

Lehrstuhl für Verkehrsverhalten
Technische Universität München

Bachelorarbeit

**Potentialanalyse eines Ringnetzsystems
für den öffentlichen Schienenpersonennahverkehr
im Münchner Umland**

Dennis Jakobson

Matrikelnummer: 03724767

03. April 2023

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Rolf Moeckel

Kurzfassung

Mobilität kann immer weiter optimiert werden. Diese Arbeit dokumentiert den Versuch ein Ringnetzsystem in den Vororten von München mit der Verkehrssimulation MATSim zu prüfen. Dafür wird für die einwohnerstärksten Gemeinden im Münchner Umland ein S-Bahn-Ring nach dem klassischen Verkehrsplanungsprozess konzipiert und im Rahmen der Simulation umgesetzt. Als Kriterien für den Erfolg des Experiments werden die Reisedauer und die Anzahl der Umstiege der Fahrgäste gewählt. Diese werden in einer Nutzwertanalyse zweimal ausgewertet. Einmal mit den tatsächlich gemessenen Werten der Simulation und das zweite Mal unter Beachtung der Reisezeitbewertung des Fahrgasts. Alle Ergebnisse werden schließlich miteinander verglichen und in Kontext gesetzt. Am Ende dienen sie als Grundlage für eine Diskussion, ob ein Ringnetzsystem im Münchner Umland eine denkbare Optimierung des öffentlichen Schienenpersonennahverkehrs ist.

Erklärung zur Bachelorarbeit

Ich versichere hiermit, die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen Quellen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Die Arbeit wurde noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt.

München, 03. April 2023

Dennis Jakobson

Danksagung

Die folgende Seite möchte ich nutzen, um allen zu danken, die mich bei der Vorbereitung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst danke ich Prof. Dr.-Ing. Rolf Moeckel. Er nahm meine Idee für das Thema der Bachelorarbeit von Anfang an positiv auf und bot mir Optionen an, wie ich diese umsetzen kann. Meine Entscheidungen über die Methodik und Ausführung unterstützte er stets und behalf mir zu den nötigen Ressourcen und dem entsprechenden fachlichen Netzwerk. Ich bin sehr dankbar für den regelmäßigen Austausch mit Prof. Dr.-Ing. Rolf Moeckel. Sein ehrlicher und direkter Umgang mit mir war ein wertvoller Bestandteil meiner ersten Erfahrung im selbstständigen wissenschaftlichen Arbeiten.

Als nächstes spreche ich M. Sc. Wei-Chieh Huang meinen Dank aus. Von Beginn meiner Arbeit leistete er einen erheblichen Beitrag für mein Verständnis von Java und MATSim. Die von ihm erstellten Lehrmaterialien und seine stets positive Ausstrahlung brachten mich näher an den technischen Teil der Verkehrsmodellierung. Vor allem für den Aufbau meiner Simulation war er mir eine große Hilfe.

Genauso bedanke ich mich bei M. Sc. Qin Zhang. Ihr Rat bei dem Umgang mit dem Simulationsoutput und Behebung der technischen Hürden waren mir eine wichtige Unterstützung. Als die Simulation unbrauchbare Ergebnisse produzierte, war sie es die die Fehler beseitigt hat, sodass ich meine Auswertung beginnen konnte. Für die anhaltend nette und hilfsbereite Interaktion möchte ich mich bedanken.

Außerdem danke ich meinem Kommilitonen und Freund Florian Krenkel. Die Idee für diese Bachelorarbeit entstand bei einer gemeinsamen Spritztour zur verlassenen S-Bahn-Station Olympiastadion. Der alltägliche fachliche und außerfachliche Austausch mit ihm – vor allem bei unseren Mensagängen – waren eine enorme emotionale Stütze für mich.

Schließlich danke ich der Gerhard C. Starck Stiftung. Ohne diese wäre mein Studium – geschweige dieser Arbeit – in dieser Form nicht möglich gewesen. Ich hätte wahrscheinlich nicht die Mittel gehabt eine reibungslose, akademische Laufbahn an der Technischen Universität München zu absolvieren. Nur die finanzielle und ideelle Unterstützung der Gerhard C. Starck Stiftung ermöglichte mir das vollständige Eintauchen in das Umweltingenieurwesen an der renommierten Universität meiner Heimatstadt.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	II
Erklärung zur Bachelorarbeit	III
Danksagung	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Ziel der Arbeit	2
2 Literaturrecherche	3
2.1 Städte mit Ringbahnen.....	3
2.1.1 Berlin	3
2.1.2 Moskau.....	3
2.1.3 Tokio	4
2.1.4 Ansatz zum direkten Vergleich der Verkehrssystemen in Städten	4
2.2 Evaluationsmaßnahmen für den ÖPNV mit Ringlinie.....	4
2.2.1 Zusammenhang zwischen Fahrgastzahlen und Strukturgrößen der Stadt.....	4
2.2.2 Verfahren zur Bestimmung des Erfordernisses einer Ringlinie.....	5
2.3 Allgemeine Evaluationsmaßnahmen für den (öffentlichen) Verkehr	5
2.3.1 Erreichbarkeit von Knotenpunkten	5
2.3.2 Evaluation ökonomischer Aspekte eines Verkehrsnetzes	6
2.3.3 Nutzen-Kosten-Analyse am Beispiel von Portland.....	6
2.3.4 Wirksamkeits-Kosten-Analyse	7
2.3.5 Standardisierte Bewertung.....	7
2.4 Lösungsansätze der Verkehrsplanung im ländlichen Raum	7
2.4.1 Simulation von nachfragegesteuerten Systemen.....	8
2.5 Weitere Beispiele für Simulationen aus der Praxis	8
3 Methodik	9
3.1 Der klassische Verkehrsplanungsprozess	9
4 Vororientierung	10
4.1 Tram	11
4.1.1 Tram Münchner Norden	11
4.1.2 Tram Nordtangente	11
4.1.3 Tram Westtangente.....	12
4.2 U-Bahn	12
4.2.1 Verlängerung der U5.....	13
4.2.2 Verlängerung der U6.....	13

- 4.2.3 Bau der U913
- 4.3 S-Bahn14
 - 4.3.1 Bau der zweiten S-Bahn-Stammstrecke14
 - 4.3.2 Erdinger Ringschluss und weitere Teilprojekte15
- 4.4 Seilbahn16
- 5 Problemanalyse17**
 - 5.1 Rebound-Effekt bisheriger Maßnahmen17
 - 5.2 Topologie der Münchner Schienenverkehrsnetzes18
 - 5.3 Lösungsansatz20
 - 5.3.1 Die Ringbahn20
 - 5.3.2 Bereits bestehende Vorschläge21
- 6 Maßnahmenuntersuchung.....23**
 - 6.1 Verwendete Simulationen und Modelle23
 - 6.1.1 MATSim.....23
 - 6.1.2 MITO23
 - 6.1.3 SILO24
 - 6.2 Konzeption der Ringbahn24
 - 6.2.1 Verkehrsplanerisches Ziel24
 - 6.2.2 Voraussetzungen für die Simulation24
 - 6.2.3 Gemeindewahl24
 - 6.2.4 Haltestellenwahl28
 - 6.3 Simulationsaufbau32
 - 6.3.1 Configuration32
 - 6.3.2 Plan33
 - 6.3.3 Network33
 - 6.3.4 Schedule34
 - 6.3.5 Vehicles.....37
- 7 Bewertung der Maßnahme.....39**
 - 7.1 Vorteile und Nachteile des Ringnetzsystems39
 - 7.2 Nutzwertanalyse40
 - 7.2.1 Definition Zielsystem40
 - 7.2.2 Definition Untersuchungsgebiet40
 - 7.2.3 Zielerträge40
 - 7.3 Nutzwertanalyse ohne Zeitbewertung42
 - 7.3.1 Skalentransformation42
 - 7.3.2 Gewichtung42
 - 7.3.3 Nutzwertbestimmung43
 - 7.4 Nutzwertanalyse mit Zeitbewertung44
 - 7.4.1 Reisezeitkomponenten.....44
 - 7.4.2 Reisezeitbewertung.....44

7.4.3	Berechnung	46
7.4.4	Nutzwertbestimmung:	46
7.5	Gegenüberstellung der Nutzwertanalysen	47
7.6	Ein- und Aussteige auf der Ringlinie	47
8	Diskussion	51
8.1	Limitationen	51
8.2	Fazit.....	53
8.3	Ausblick.....	54
A	Anhang	56
A.1	Gemeinden im MVV-Netz.....	56
A.2	Entfernung der Ringbahn-Gemeinden	58
A.3	Berechnung freespeed	59
	Literaturverzeichnis.....	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Unterwegszeit im globalen Vergleich (Schafer and Victor, 2000).....	1
Abbildung 3.1: Prozess der Verkehrsplanung (Köhler, 2014).....	9
Abbildung 4.1: Netzplan der MVV (MVV, 2022b)	10
Abbildung 4.2: Projektübersicht Tram (MVG, 2023a)	11
Abbildung 4.3: Mögliches Liniennetz mit der U9 (Schütz, 2022).....	12
Abbildung 4.4: Streckenverlauf der U9 (MVG, 2023a).....	13
Abbildung 4.5: Projektübersicht S-Bahn München (DB Netz, 2023b)	14
Abbildung 4.6: Zweite Stammstrecke München (DB Netz, 2022).....	15
Abbildung 4.7: S-Bahn Ausbau am Flughafen München (Walter and Lill, 2018).....	15
Abbildung 4.8: Trassenvarianten Urbane Seilbahn München (MVG, 2023a)	16
Abbildung 5.1: Rebound-Effekt im ÖPNV-Ausbau	17
Abbildung 5.2: Netztopologie der S-Bahn (Kartengrundlage: Google Maps).....	18
Abbildung 5.3: Strecke von Gauting nach Deisenhofen mit der MVV	19
Abbildung 5.4: Strecke von Eching nach Gröbenzell mit der MVV	19
Abbildung 5.5: Strecke von Poing nach Garching-Forschungszentrum mit der MVV.....	19
Abbildung 5.6: Netztopologie der S-Bahn mit Ring (Kartengrundlage: Google Maps)	20
Abbildung 5.7: Bestehender Vorschlag eine Ringbahn in München (Koopmann, 2016).....	21
Abbildung 5.8: Bestehender Vorschlag über eine Ringbahn in München (Leonhartsberger et al., 2012)	22
Abbildung 6.1: Die MATSim-Schleife (Horni et al., 2016)	23
Abbildung 6.2: Verlauf des Ringes gemäß Tabelle 6.1 (Kartengrundlage: Google Maps).....	25
Abbildung 6.3: Verlauf des Ringes gemäß Tabelle 6.2 (Kartengrundlage: Google Maps).....	26
Abbildung 6.4: Verlauf des Ringes gemäß Tabelle 6.5 (Kartengrundlage: Google Maps).....	27
Abbildung 6.5: Haltestellen der Stadt Unterschleißheim (Kartengrundlage: Google Maps)	29
Abbildung 6.6: Haltestelle der Gemeinde Kirchheim b. München (Kartengrundlage: Google Maps)	29
Abbildung 6.7: Haltestellen der Kreisstadt Dachau (Kartengrundlage: Google Maps)	29
Abbildung 6.8: Haltestelle der Gemeinde Unterhaching (Kartengrundlage: Google Maps).....	29
Abbildung 6.9: Haltestellen der Stadt Olching (Kartengrundlage: Google Maps).....	29
Abbildung 6.10: Haltestellen der Gemeinde Haar (Kartengrundlage: Google Maps)	29
Abbildung 6.11: Haltestelle der Stadt Puchheim (Kartengrundlage: Google Maps).....	30
Abbildung 6.12: Haltestellen der Gemeinden PGK (Kartengrundlage: Google Maps)	30
Abbildung 6.13: Haltestelle der Gemeinde Ottobrunn (Kartengrundlage: Google Maps).....	30
Abbildung 6.14: Haltestellen der Gemeinde Pullach im Isartal (Kartengrundlage: Google Maps).....	30
Abbildung 6.15: Haltestelle der Gemeinde Ismaning (Kartengrundlage: Google Maps)	30
Abbildung 6.16: Haltestellen der Kreisstadt Germering (Kartengrundlage: Google Maps).....	30
Abbildung 6.17: Haltestellen der Stadt Garching (Kartengrundlage: Google Maps).....	31
Abbildung 6.18: Ring (Kartengrundlage: Google Maps).....	32
Abbildung 6.19: Auszug aus plan file	33
Abbildung 6.20: Auszug aus network file, Abschnitt link	34
Abbildung 6.21: Auszug auf network file, Abschnitt node	34
Abbildung 6.22: Fahrplan Unterhaching (MVV, 2022a).....	35
Abbildung 6.23: Auszug aus schedule file, Abfahrten der Route ‚Dachau im Uhrzeigersinn‘	35
Abbildung 6.24: Zeitplan der Route ‚Dachau im Uhrzeigersinn‘	36
Abbildung 6.25: Zeitplan der Route ‚Dachau gegen den Uhrzeigersinn‘	36
Abbildung 6.26: Zeitplan der Route ‚Unterhaching im Uhrzeigersinn‘	37
Abbildung 6.27: Zeitplan der Route ‚Unterhaching gegen den Uhrzeigersinn‘	37
Abbildung 6.28: Auszug aus vehicle file	37
Abbildung 6.29: Ring im MVV-Netz (Abbildungsgrundlage: MVV).....	38

Abbildung 7.1: Vor- und Nachteile einer Ringbahn	39
Abbildung 7.2: Untersuchungsgebiet.....	40
Abbildung 7.3: Skalentransformation.....	42
Abbildung 7.4: Reisezeitkomponenten im ÖV (Walther, 1980)	44
Abbildung 7.5: Graphische Darstellung der Zeitbewertungsfunktionen der S-Bahn	45
Abbildung 7.6: Ein- und Ausstiege auf der Ringlinie	48
Abbildung 7.7: Visualisierung der Abbildung 7.6 (Kartengrundlage: Google Maps)	49
Abbildung A.1: Ausgleichsgerade freespeed	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 6.1: Kandidaten für Ringbahnanschluss gemäß Einwohner- und Beschäftigtenzahl.....	25
Tabelle 6.2: Kandidaten für Ringbahnanschluss gemäß dem 20-km-Kriterium.....	26
Tabelle 6.3: Vergleich der Gemeinden Kirchheim bei München und Poing	26
Tabelle 6.4: Vergleich der Gemeinden Gauting und PGK.....	27
Tabelle 6.5: Finale Gemeinden für Ringanschluss nach Feinjustierung	27
Tabelle 6.6: Haltestellen am Ring	31
Tabelle 6.7: Ergebnisse Fahrzeit am Beispiel der Linie ‚Dachau im Uhrzeigersinn‘	36
Tabelle 7.1: Ergebnisse der Simulation (Durchschnittswerte)	41
Tabelle 7.2: Ergebnisse der Simulation (Akkumulierte Werte)	41
Tabelle 7.3: Zeitbewertungsfunktionen (Walther, 1980).....	45
Tabelle 7.4: Tabellen zur Berechnung von t^*	46
Tabelle 7.5: Ein- und Ausstiege auf der Ringlinie.....	48
Tabelle 7.6: Einwohner- und Beschäftigtenzahlen der Gemeinden an der Ringbahn	49
Tabelle A.1: Einwohner- und Beschäftigtenzahl aller Gemeinden im MVV-Netz	56
Tabelle A.2: Entfernung der Ringbahn-Gemeinden vom Münchner Stadtzentrum	58
Tabelle A.3: Streckenabschnitte der MVV (Basisdaten) (WIKI, 2022)	59
Tabelle A.4: Streckenabschnitte der MVV (Durchschnittswerte).....	60
Tabelle A.5: Streckenabschnittslängen.....	61

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Verkehr wird in einer zunehmend vernetzten Welt immer wichtiger.

Orts- und einkommensunabhängig ist die Reisezeit der Menschen über Jahrzehnte immer konstant geblieben. Jedoch wurde durch technische Errungenschaften an diversen Verkehrsmitteln zeitgleich eine immer schneller werdende Fortbewegung ermöglicht. In Summe werden heutzutage also größere Entfernungen zurückgelegt. Als verschärfende Faktoren zu dem wachsenden Verkehrsausmaß kommen die steigende Bevölkerung und die Konzentration dieser in Städten hinzu.



Abbildung 1.1: Unterwegszeit im globalen Vergleich (Schafer and Victor, 2000)

Verkehr bedeutet immer auch Energieverbrauch und somit die Verbrennung fossiler Brennstoffe und den Ausstoß damit einhergehender Treibhausgasen. Global betrachtet sind die verkehrsbedingten Emissionen von 1990-2015 um 68% gestiegen. Das bedeutet einen Anteil von 24% des gesamten Treibhausgashaushalts im Jahr 2015. (Scheelhaase et al., 2018)

Im gleichen Jahr unterzeichnen sämtliche Staaten der Welt auf der Klimakonferenz in Paris einen Vertrag mit dem Ziel die globale Erwärmung auf höchstens zwei Grad Celsius im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zu begrenzen. Dafür braucht es eine Reduktion der klimaschädlichen Emissionen in allen Bereichen. (Übereinkommen von Paris. UNFCCC, 2015)

In Deutschland ist allen voran der Straßenverkehr mit 96% Hauptverantwortlicher für die Emissionen im Verkehrssektor. Davon entfällt ein Großteil auf den Personenverkehr, welcher europaweit zu 72% mit dem, meist benzin- oder dieselbetriebenen, PKW zurückgelegt wurde. Es gilt diese Wege zu vermeiden, zu vermindern bzw. zu verlagern, damit das Zwei-Grad-Ziel erreichbar bleibt. (Kasten, 2022)

Eine etablierte, technisch umsetzbare und kosteneffiziente Maßnahme ist der Ausbau bzw. die Optimierung des öffentlichen Verkehrs (ÖV). Ein breites Verkehrsangebot führt zu einem hohen Fahrgastschlüssel, was wiederum bedeutet, dass insgesamt weniger Fahrzeuge unterwegs sind und weniger Energie verbraucht wird. Kurzum, der Verkehr wird effizienter. (Kasten, 2022)

Um möglichst viele Menschen, und somit potentielle Autofahrer, von der Mobilitätswende profitieren zu lassen, bietet es sich an Angebotserweiterungen in Ballungsräumen durchzuführen. Gerade dort kann eine Verkehrsverlagerung auf die Schiene – die Bahn hat sich als ein energieeffizienter Verkehrsträger bewiesen (Scheelhaase et al., 2018) – eine positive Wirkung auf die Entwicklung der Flächennutzung, die Funktionalität, die Struktur und die Lebensqualität in der Stadt haben.

Damit sich der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) durchsetzt, muss er attraktiv sein. Er darf keine übermäßigen Nachteile gegenüber dem Individualverkehr (IV) aufweisen. Konkret heißt das, dass es ausreichend frequentierte Verbindungen von und zu planungsstrategisch intelligenten Orten in komfortablen Fahrzeugen geben muss. Gleichzeitig sollten die Kosten für eine Fahrkarte nicht zu hoch sein.

Der Ausbau des ÖPNV ist eine Lösung, die bereits seit Jahrzehnten praktiziert wird und zudem noch sozial gerecht ist. Teile der Bevölkerung, die kein PKW nutzen können – dazu gehören unter anderem Kinder, Senioren, geistig und körperlich eingeschränkte und finanziell schlechter gestellte Menschen – sind auf den ÖPNV angewiesen. Ein gutes Verkehrsangebot trägt also auch zu gleichwertigen Lebensbedingungen und zur Chancengleichheit der Gesellschaft bei. (Bendzko, 2023)

1.2 Ziel der Arbeit

Eine mögliche Ausführung einer Angebotsoptimierung des ÖPNV ist das Ringnetzsystem. Charakteristisch für dieses ist der Streckenverlauf auf einer kreisähnlichen Bahn um ein Siedlungszentrum herum. Die Hauptaufgabe des Systems besteht also darin, die um das Zentrum gelegenen Ortschaften miteinander zu verbinden.

In dieser Arbeit wird eine Angebotserweiterung des Schienenpersonennahverkehrs (SPNV) in München durch ein Ringnetzsystem vorgeschlagen. Dieses wird mithilfe eines Verkehrsmodells simuliert und anschließend nach seinem Nutzen bewertet. Dabei dienen sowohl empirische Größen als auch das Fahrzeitgefühl des Fahrgasts als Kriterien. Nach der Auswertung kann eine begründete Aussage getroffen werden, ob und inwiefern eine solche Ringbahn im Münchner Umland das Potential hat den ÖV zu optimieren.

2 Literaturrecherche

Nachfolgend werden ausgewählte Verfahren zur Bewertung eines (öffentlichen) Verkehrsnetzes und Ansätze zur Begründung neuer Verkehrsprojekte mithilfe von Beispielen aus der Forschung und der Verkehrsplanung erklärt. Dabei wird vor allem auf Methoden eingegangen, die speziell für Ringnetzsysteme ausgearbeitet wurden bzw. für diese geeignet sind. Zuvor werden kurz drei Städte mit Ringlinien vorgestellt und die Geschichte ihrer Entstehung angeschnitten.

2.1 Städte mit Ringbahnen

Ringbahnen sind kein neuartiges Phänomen, sondern eine anerkannte Maßnahme zur Verbesserung des ÖPNV in Städten weltweit. Zu den Betriebsnetzen, die eine ring-radiale Struktur aufweisen, gehören unter anderem Berlin, Kopenhagen, Glasgow, London, Moskau und Tokio. (Saidi, Wirasinghe, Kattan, 2016)

2.1.1 Berlin

Die erste Ringbahn Berlins wurde in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts weit außerhalb der damaligen Stadtgrenzen gebaut, um die Verkehrsleistung des ÖV zu erhöhen. (Königlich Preussischen Ministers der Öffentlichen Arbeiten, 1896). Das bisherige radiale Netz war an seine Grenzen gestoßen und sorgte für Missgunst bei den Fahrgästen. Die neue Ringlinie verknüpfte die Endhaltestellen der Berliner Bahn miteinander, um das System zu entlasten.

Die neue Linie erfreute sich zunächst keiner großen Beliebtheit. Der Eingriff in das Straßennetz und bauliche Nebeneffekte, wie Lärm und Vibrationen, störten den motorisierten Individualverkehr (MIV) und die Anwohner stark.

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde daher eine neue, größere Ringbahn geplant, deren Streckenverlauf auch von den Interessen der Industrie beeinflusst wurde. Diese wollte die weiten Flächen außerhalb der Stadt für sich nutzen. Baulich wurde sie auf den Schienen des Güterverkehrs umgesetzt und mithilfe von Brücken und Unterführungen von der Straße isoliert. Trotzdem herrschte keine große Nachfrage, da zu der Zeit die meisten Arbeitswege immer noch fußläufig zurückgelegt wurden und nicht in Konkurrenz mit den hohen Fahrtpreisen standen. Stadt- und verkehrsplanerisch gesehen, verbesserte die Ringbahn langfristig den Verkehr zwischen den Vororten und stimulierte die Entwicklung ländlicher Gebiete. Gleichzeitig sorgte sie dafür, dass das Wachstum Berlins auf Gebiete in angemessener Entfernung zur Bahn beschränkt blieb. (Fabian, 2000)

2.1.2 Moskau

Moskau ist ein klassisches Beispiel für eine zentral ausgerichtete Stadt, bei der Straßen und Eisenbahnen aus dem Zentrum an die Stadtränder führen. Außerdem weist Moskau durch die vielen Verkehrsringe (Gartenring, Kleiner und Großer Eisenbahnring, Ringautobahn, Dritter Transportring etc.) auch eine prägnante ringförmige Struktur auf. Diese verbinden die einschneidenden, breiten, radialen Strecken miteinander. (Kudrjavcev and Körner, 2012)

Die Planung für eine solche Stadt- und Transportstruktur begann in der vorletzten Jahrhundertwende Form anzunehmen. Grund hierfür war, ähnlich wie in Berlin, dass Personen und Güter von Kopfbahnhof zu Kopfbahnhof quer durch die Stadt transportiert werden mussten. Nach der Umsetzung zu Zeiten der UdSSR diente der Eisenbahnring zunächst nur dem Güterverkehr, später

auch dem Personenverkehr um das Zentrum herum (unter anderem als Metro im Untergrund). Voraussetzung für diese Entwicklung war das bereits existierende Radialsystem. (Neutatz, 1996)

2.1.3 Tokio

In der japanischen Hauptstadt kann man beim Blick auf die Vergangenheit eine ähnliche Entwicklung beobachten. Das Betreibernetz kam vor allem an den Endhaltestellen an seine Grenzen, woraufhin eine Ringlinie für den Personenverkehr, auf der Strecke ehemaliger Güterzüge, vorgeschlagen wurde. (Pendleton and Coates, 2018)

Hier wurde die Berliner Ringbahn für die örtliche *Yamamoto*-Linie als Vorbild gesehen. Jedoch wurde in Tokio die Linienführung deutlich stärker an den Wohngebieten der höheren Gesellschaftsschichten festgemacht. Die kaiserliche Burg steht dabei im Zentrum des ring-radialen Systems. Genauso wie in der deutschen Hauptstadt lässt sich nach der Eröffnung der Ringlinie eine verstärkte multipolare Stadtentwicklung in Tokio feststellen. (Tiry, 1997)

Heute verläuft die U-Bahn-Linie vollständig im Untergrund. (Yoshida and Hiraide, 1992)

2.1.4 Ansatz zum direkten Vergleich der Verkehrssystemen in Städten

Um die verschiedenen Verkehrssysteme der Städte miteinander vergleichen zu können, wurden in der Wissenschaft eine Vielzahl von Verfahren entwickelt, mit dem Ziel einheitliche Parameter für die Optimierung des ÖPNV abzuleiten. Eine Auswahl dieser Methoden wird in diesem Abschnitt vorgestellt.

In diesem einfachen sowie konkreten Beispiel werden die fünf U-Bahn-Systeme Peking, Hong Kong, London, Paris and Tokio miteinander verglichen. Als charakterisierte Größen gelten die Streckenlänge (kürzeste Strecke zwischen zwei Orten), Ballungskoeffizienten (Anfälligkeit für Systemausfälle) und die Netzeffizienz. Zudem werden die Parameter Durchschnittliche Haltestellenerfassungsfläche (*Average Station Coverage Area*) und die Durchschnittliche Haltestellenbelastung (*Average Station Load*) eingeführt. Nach Durchführung der Analyse können Aussagen über verschiedene Aspekte der Verkehrsnetze getroffen und abgewogen werden. (Wu et al., 2016)

2.2 Evaluationsmaßnahmen für den ÖPNV mit Ringlinie

2.2.1 Zusammenhang zwischen Fahrgastzahlen und Strukturgrößen der Stadt

Bei einer Untersuchung der Frage, inwiefern die Fahrgastzahlen im öffentlichen Verkehr von Strukturgrößen einer Stadt abhängig sind, werden in diesem Beispiel lineare Regressionsanalysen durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass vor allem das Alter des Verkehrsnetzes einen positiven Effekt auf das Fahrgastaufkommen hat. Das Verhältnis von Fahrgastzahlen zur Bevölkerung bzw. zum Alter des Systems ist von Kontinent zu Kontinent unterschiedlich. Auch der Autobesitz spielt bei der Verkehrsmittelwahl eine große Rolle.

Eine detailliertere Analyse der Untersuchungsfrage wurde für Städte mit einer Ringbahn durchgeführt. Relevante makroskopische Strukturgrößen zur Rechtfertigung einer Ringlinie sind die Bevölkerungsdichte und Länge des Netzwerks (sprich: Umfang). Für das Erfordern einer Ringlinie ist jedoch auch die Verteilung der Bevölkerung auf mehrere (kleinere) Zentren, also keine monozentralistische Ausprägung der Stadt, eine Voraussetzung. Zudem benötigt das Netz zunächst eine gewisse Reife. Ein ausgeprägtes Radialnetz muss also schon vorhanden sein.

Welche Optimierungsmaßnahmen genau in Erwägung gezogen werden sollen, kann nur durch eine ortsspezifische Analyse bestimmt werden. Generell gilt, dass die Erweiterung von Radiallinien zur Zersiedelung der Stadt beiträgt. Der Bau einer Ringlinie in der Nähe des Stadtzentrums hingegen führt zu einer höheren Bebauungsdichte und multifunktionalen Flächennutzungen. (Saidi et al., 2014)

2.2.2 Verfahren zur Bestimmung des Erfordernisses einer Ringlinie

Um eine einheitliche, regionsunabhängige Methode für die Untersuchung der Notwendigkeit und Machbarkeit eines Ring-Radial-Netzes in einer monozentralistischen Stadt zu schaffen, wurde ein analytisches Modell basierend auf einem *Mode-Choice-Modell* entwickelt. Für die optimale Anzahl an radialen Linien wird eine Methode aus der Kontinuumsmechanik (genauer: *Continuum-Approximation-Method*) benutzt. Als die wichtigsten Faktoren, von der diese Entscheidung abhängig ist, haben sich die Quelle-Ziel-Muster (*OD-patterns*) und das existierende radiale Netzwerk herauskristallisiert. Daneben zählen noch Grundkapital, Betriebskosten und Fahrtkosten zu den relevanten Entscheidungskriterien zur Nutzung der Ringlinie.

Bei dem Vergleich zweier Verkehrsszenarien (1. Ohne Ring, 2. Mit Ring) wurde festgestellt, dass eine Reduktion des negativen Nutzens in Anbetracht der Reisezeit, die im Fahrzeug verbracht wird, eine wichtige Größe für die Gestaltung des Verkehrsnetzes ist. Gleichzeitig wurde beobachtet, dass eine hohe Anzahl radialer Linien der Attraktivität einer Ringlinie schaden. Diese Behauptung ist stark abhängig von den *OD-patterns* und somit auch von der Aufgabe der Ringlinie im System. Auch hierfür wurde ein generisches mathematisches Modell entwickelt, mit dem ein beliebiger Ring für eine beliebige Stadt getestet werden kann. Als Input für dieses Modell sind die *OD-patterns*, die Koordinaten der Zentroiden von Transportzonen und die Koordinaten der Radiallinie erforderlich. (Saidi, Wirasinghe, Kattan, 2016) Das vorgestellte Verfahren wurde erfolgreich angewandt, um eine zweite Ringlinie in Shanghai zu testen und ihren Radius zu bestimmen. (Saidi, Ji et al., 2016)

Eine weitere Möglichkeit zur langfristigen Bewertung komplexer städtischer Schienenverkehre auf Basis von *OD-patterns*, wurde mithilfe von generalisierten Fahrgastkosten entwickelt. Insbesondere radiozentrische Städte eignen sich für dieses Verfahren. Statt sich auf Umfragedaten oder die Graphentheorie zu beziehen, wird in dieser Arbeit der Fokus auf Nachfrageverteilung und Fahrgastkosten gelegt. Als Inputs wurden die Länge des Verkehrsnetzes und die *OD-patterns* verwendet. Dabei wurden die Städte London, Moskau, Tokio, Paris, Berlin und Madrid, die allesamt eine Ringlinie besitzen, als Vorlage für die Topologie der in der Arbeit verwendeten Musterstadt genommen. (Saidi et al., 2017)

2.3 Allgemeine Evaluationsmaßnahmen für den (öffentlichen) Verkehr

2.3.1 Erreichbarkeit von Knotenpunkten

Ein weiteres etabliertes Bewertungsverfahren basiert auf der Graphentheorie. Hierbei werden die Linien als Graphen angenommen, um ihnen Eigenschaften zuzuordnen oder mit ihnen zu rechnen. So können verschiedene topologische Größen, zum Beispiel die *Güte der Verknüpfung* von Verkehrslinien, ermittelt werden. Statt nur mit einer Maßzahl zu rechnen, wie es bei Graphen üblich ist, kann ein Verkehrsnetz durch Einsatz von (Struktur-) Matrizen feinkörniger analysiert werden.

Vor allem die Zugänglichkeit und Erreichbarkeit von Verkehrsknoten können so bestimmt werden, was in diesem Beispiel anhand der Metropolregion *Randstad Holland* geschehen ist. (Schickhoff, 1977)

2.3.2 Evaluation ökonomischer Aspekte eines Verkehrsnetzes

Verkehrssysteme werden auch nach ihren ökonomischen Eigenschaften kategorisiert, wie im folgenden Beispiel zu sehen ist. Hier wurde eine mathematische Untersuchung durchgeführt, wie ein Verkehrsnetz räumlich optimal gestaltet werden kann und gleichzeitig die Kosten niedrig gehalten werden.

Dabei wurde für die Gesamtkostenrechnung in Abhängigkeit von der geometrischen Gestalt des Verkehrsnetzes, als zweidimensional angenommen. Die Verkehrsquellen repräsentieren dabei die wichtigste Größe für die Linienführung und die Kostenrechnung. Für letztere werden die Lage der Verkehrsquellen, die Größe der Verkehrsspannungen sowie die kilometrischen Bau- und Betriebskosten als Faktoren hergenommen. Nach ökonomischen Kriterien empfiehlt sich daraus folgend eine Planung nach dem Bündelungsprinzip. Das heißt, dass multimodale Fortbewegung durch Knotenpunkte sinnvoll ist. Folglich kann ein solches System weiter in Konzentration, Massentransport und Dispersion gegliedert werden.

Außerdem wird die Annahme getroffen, dass sich jedes Verkehrsnetz als eine dreistrahlige Gabelung verstehen lässt. Um herauszufinden welche Verkehrsströme gebündelt werden sollen, müssen für die Berechnungen also zunächst die Netztypen bestimmt werden, um danach die einzelnen Knotenpunkte zu identifizieren und ebenso in eine Struktur einzuordnen. Wo genau eine neue Strecke verlegt werden soll, ist abhängig von dem bestehenden Netz. Ökonomisch betrachtet ist eine Umlegung auf eine bestehende Strecke mit kleinem Volumen sinnvoll, auch wenn dadurch Umwege in Kauf genommen werden müssen.

Um der im echten Leben vorkommenden Inhomogenität entgegen zu kommen, kann die Strecke/Stadt in baukostenmäßig homogene Areale zerlegt werden. Im Rechenprozess werden lokale Unterschiede somit auch betrachtet. (Werner, 1966)

Eine Abwandlung dieser mathematischen Herangehensweise ist durch eine nichtlineare Optimierung mit linearen Einschränkungen (*mixed-integer non-linear programming*) möglich. Zudem kann die Optimierung durch eine Approximationsmethode linearisiert werden. (Zhou et al., 2021)

2.3.3 Nutzen-Kosten-Analyse am Beispiel von Portland

Am Beispiel der Verlängerung einer lokalen Straßenbahn-Linie in Portland (Oregon) wurde eine solche stark vereinfachte Nutzen-Kosten-Analyse durchgeführt. Bei dieser wurden den entsprechenden Kosten bzw. Nutzen der neuen Strecken quantitative, monetarisierte Werte zugeteilt und für 30 Jahre prognostiziert. Zu den Nutzenparametern gehören die Zeitersparnis aller Fahrer des öffentlichen und des motorisierten Individualverkehrs, Einsparungen der persönlichen Betriebskosten sowie der Kosten beim PKW-Besitz, reduziertes Parken, Versicherungen und Kosteneinsparung durch wegfallende Straßensanierungen. (Letzterer Parameter ist nicht üblich bei solchen Bewertungsverfahren.) Es wurde gezeigt, dass sich der Gesamtnutzen der Verlängerung auf rund 700.000\$ bezieht. Dabei wurden die größten Vorteile durch Zeit- und Parkkosteneinsparungen erzielt. Jedoch sind einige der Parameter stark vereinfacht, wie zum Beispiel die Kosteneinsparnisse beim PKW-Besitz, wo nicht beachtet wird, dass das Fahrzeug von Dritten genutzt werden kann. (Meyer and Miller, 2001) (Cervero and Aschauer, 1998)

2.3.4 Wirksamkeits-Kosten-Analyse

Alternativ für das Projekt in Portland könnte auch eine Wirksamkeits-Kosten-Analyse durchgeführt werden. Dabei wird versucht abzuschätzen, wie effektiv eine Maßnahme das definierte Ziel erfüllt. Allerdings muss sich die Zielsetzung bei der Bewertung eines verkehrsplanerischen Vorhabens immer auf genau ein Kriterium beziehen. Um zu gewährleisten, dass alle Modi gleichwertig in die Bewertung eingehen, empfiehlt sich ein (Schein-) Widerstand als ein solches Kriterium. Dieser sollte mindestens aus den wichtigsten Größen zusammengesetzt sein: Reisezeit und Kosten. All diese Faktoren werden abschließend mit den aufgetragenen Kosten für die Maßnahme abgewogen. (Meyer and Miller, 2001)

2.3.5 Standardisierte Bewertung

Speziell für öffentliche Großprojekte im Verkehrssektor gibt es in Deutschland die *Standardisierte Bewertung von Verkehrsweginvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs* als formalisiertes Evaluationsverfahren. Bei diesem geht man davon aus, dass die Sinnhaftigkeit der Maßnahme bereits nachgewiesen ist, sodass man für diese die Gesamtwirtschaftlichkeit und eine Folgenkostenrechnung ermitteln kann. Auch hier werden die Kosten nach dem Mitfall/Ohnefall-Prinzip miteinander verglichen. Dabei ist ein einheitlich maßgebender, regionaler Preisstand notwendig. Abhängig von der Größe des Projekts gibt es die Option Vereinfachungen der *Standardisierten Bewertung* durchzuführen. (Intraplan and VWI, 2022)

In Deutschland bietet der Gesetzgeber für Projekte eines solchen Maßstabs formelle Planungsinstrumente auf regionaler Ebene an. Diese sind, gemäß dem Raumordnungsgesetz und dem Raumplanungsgesetz, rechtlich bindend und in Form des Regionalplans und des Raumordnungsverfahrens zu finden.

2.4 Lösungsansätze der Verkehrsplanung im ländlichen Raum

Natürlich geht die Wirkung eines Projekts einer solchen Dimension über die Stadtgrenzen hinaus. Trotzdem muss es auch Ansätze geben, um gezielt im ländlichen Raum die Mobilität mithilfe des ÖPNV zu sichern.

Zu den besonderen Herausforderungen für den ÖPNV auf dem Land zählt der hohe Anteil der PKW-Besitzer. Dadurch kommt es zu sinkenden Fahrgastzahlen und Einnahmen für Betreiber des ÖV, was gerade auf dem Land durch hohe Energie- und Personalkosten ein kritisches Problem ist. Es kommt zu einer Abwärtsspirale (Weniger Einnahmen, weniger Angebot, weniger Nachfrage usw.). Zukünftige Entwicklungen zeigen jedoch den Bedarf eines starken Angebots vor allem für Schüler und Senioren.

Einer der sozial verträglichen Lösungsmöglichkeiten ist die Ergänzung bzw. Umstellung des ÖPNV auf ein nachfragegesteuertes Angebot (On-Demand-System, Rufbus, Sammeltaxis). Solche Systeme sind in verschiedenen Betriebskombinationen und -formen möglich. Das führt jedoch auch dazu, dass Variablen entstehen, die es bei einem fahrplanmäßigen Betrieb nicht gibt. So muss die früheste zulässige Abfahrtszeit durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Linie ermittelt werden. Ebenso muss man von einer größeren Toleranz bei der Fahrdauer ausgehen. Der Fahrtablauf ist durch Anmeldung von Fahrtwünschen steuerbar. Das alles macht die Berechnung von Fahrkosten sehr schwierig. Diese hängen in nachfragegesteuerten Systemen stärker von der Nachfrage, als beim Regelbetrieb. (Kirchhoff and Tsakarestos, 2007)

2.4.1 Simulation von nachfragegesteuerten Systemen

Um diese dynamischen Zusammenhänge besser vorhersagen zu können, werden (Mikro-) Simulationen genutzt. Eine Ausführung eines solchen Modells ermöglicht „Verhandlungen“ zwischen den Verkehrsakteuren. Dafür werden zunächst die Nachfrage und das Angebot im Hauptsimulator, dem *Thin Flow Travel Model (TFTM)*, generiert. Hierbei wird das *SARL*-Programmiergerüst benutzt, um die räumliche Verteilung der breit gestreuten Bevölkerung zu repräsentieren. Fahrtangebote können von den einzelnen Parteien eingeholt oder aktiv angefragt werden. Bei der Verhandlung, die mithilfe von Tupeln (Vektoren) simuliert wird, mit Ziel den Nutzen der Vektorwerte zu maximieren, kommt es dann zur Entscheidung welche Verkehrsangebote (nicht) angenommen werden.

Der operative Teil der Simulation wird von *MATSim*, einem agentenbasierten Verkehrsmodell, übernommen. Dieses agiert als *OTM (Operational Travel Model)* und ist unter anderem für die Simulation der dynamischen Streckenverläufe in Abhängigkeit der Nachfrage zuständig. (Cich et al., 2017)

2.5 Weitere Beispiele für Simulationen aus der Praxis

Auch für ringförmige Erweiterungen des SPNV wurden in einigen Fallbeispielen Simulationen zur Bewertung der Maßnahme genutzt.

2007 war der Stadtschuss für den Bau des Kopenhagener U-Bahn-Rings. Die Bewertung dieses basiert auf der Fahrgastgunst (*passenger patronage*) im Jahr 2015. In der zugehörigen Arbeit wird gezeigt, wie die Werte für das Kopenhagener Verkehrsmodell prognostiziert wurden. Zudem wird die Modellstruktur und -validation erklärt. (Vuk et al., 2009)

Auch die Berliner Ringbahn wurde einst simuliert, um mögliche Fahrplanverbesserungen zu bestimmen. Damals war sie nicht in Betrieb und es wurde in Erwägung gezogen bei einer Neueröffnung die Fahrpläne zu ändern. (Werner, 1988)

Es gibt eine Vielzahl von Ansätzen zur Bewertung eines Verkehrsnetzes auf aktuellem Forschungsstand. Die wissenschaftliche Lücke, die diese Arbeit füllt, ist explizit die Analyse des Potentials eines Ringsystems im öffentlichen SPNV mithilfe einer agentenbasierten Verkehrssimulation. Diese soll aufzeigen, welche Vorteile und Nachteile, insbesondere für Fahrgäste der Gemeinden im Umland der Stadt München, die Netzoptimierung mit sich bringt.

3 Methodik

3.1 Der klassische Verkehrsplanungsprozess

Die Gesamtheit dieser Arbeit hält sich an die Vorgehensweise des klassischen Verkehrsplanungsprozesses.

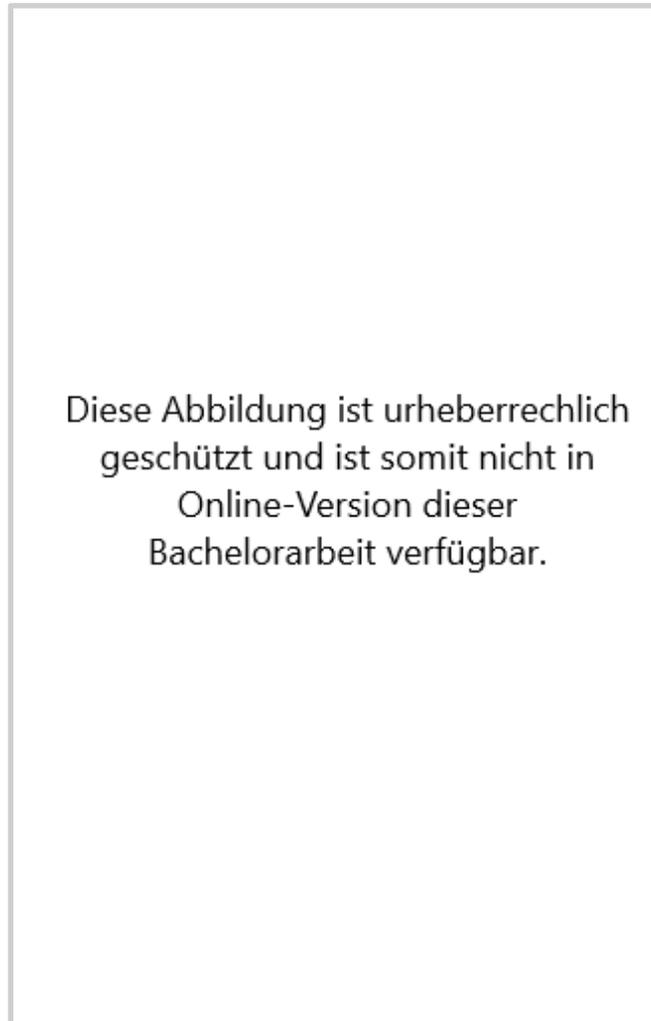


Abbildung 3.1: Prozess der Verkehrsplanung (Köhler, 2014)

In der **Vororientierung** werden kurz Basisdaten des aktuellen Verkehrs- und Betriebsnetzes aufgelistet. Das Augenmerk liegt jedoch auf den sich im Bau bzw. in Planung befindlichen Ausbaumaßnahmen des ÖPNV.

Die **Problemanalyse** beschreibt ein grundlegendes Problem der Struktur im SPNV. Ein begründeter Lösungsansatz wird vorgestellt, der die Herausforderungen bewältigen soll.

Die **Maßnahmenuntersuchung** ist der Hauptteil dieser Arbeit und dient zur Konkretisierung des Vorschlags. Hier wird die Angebotserweiterung ausgearbeitet, in das heutige Verkehrsnetz eingebettet und anschließend zu untersuchungszwecken simuliert. Die Ergebnisse der Simulation werden mithilfe verschiedener Verfahren in der **Bewertung** analysiert und gegenübergestellt.

Die **Abwägung** schließt in Form des **Fazits** den Verkehrsplanungsprozess ab.

Alle Schritte beschränken sich auf den Münchner Großraum als Planungsgebiet.

4 Vororientierung

Laut eigenen Angaben verbindet die Münchner Verkehrs- und Tarifverbund GmbH (**MVV**) 2,9 Millionen Menschen in 176 Gemeinden miteinander. Auf über 6000km Verkehrsnetz werden jährlich bis zu 737 Millionen Fahrten absolviert. (MVV, 2021)

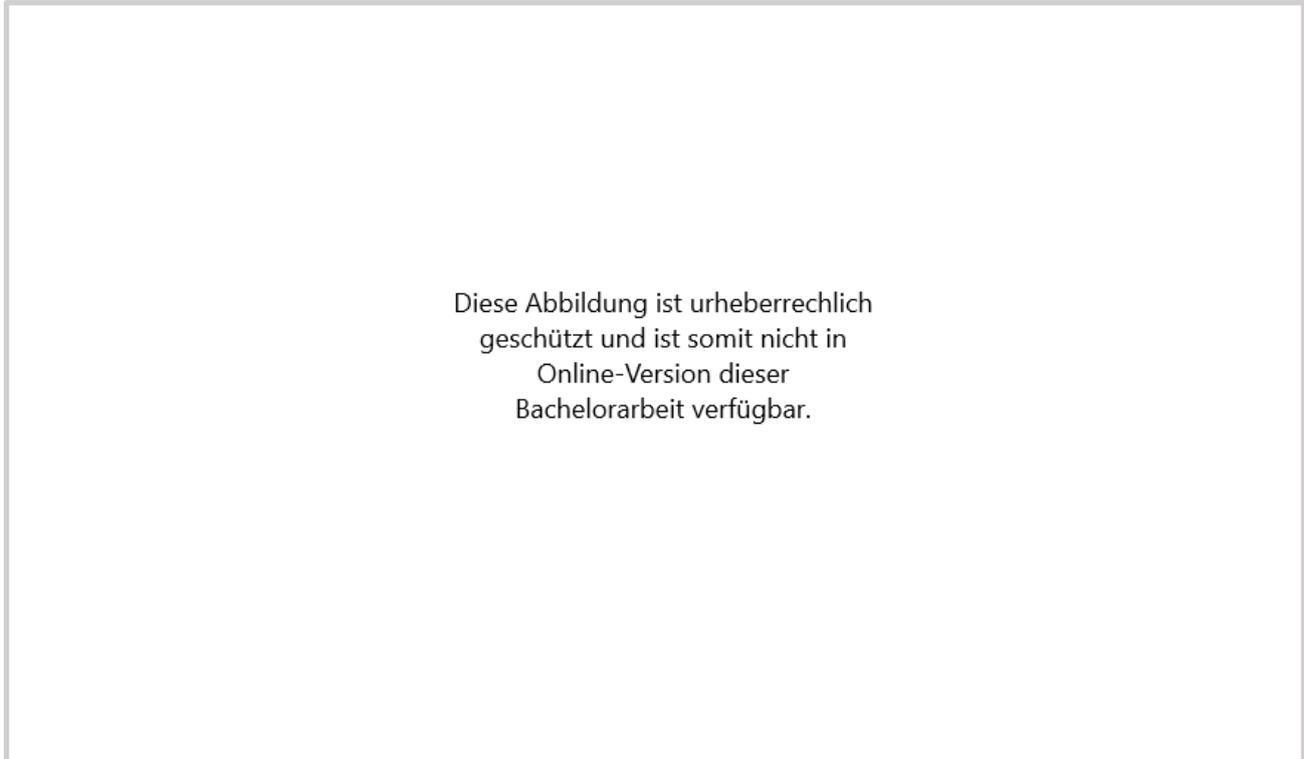


Abbildung 4.1: Netzplan der MVV (MVV, 2022b)

Der MVV ist ein Zusammenschluss von den Betreibern des öffentlichen Verkehrs in München und seinem Umland:

Die Münchner Verkehrsgesellschaft mbH (**MVG**) ist im Stadtgebiet München mit U-Bahn, Bus und Tram vertreten.

Die **DB Regio AG/ S-Bahn-München** ist zuständig für die S-Bahn im Großraum München.

Daneben gibt es noch zahlreiche Busunternehmen, die die freie Mobilität in den Landkreisen gewährleisten. (MVV, 2021)

Bei täglich knapp 2 Millionen beförderten Fahrgästen ist es nicht übertrieben die MVV als das Rückgrat der 1,5 Millionen großen Stadt München zu bezeichnen. Jedoch ist es auch diese hohe Nachfrage, die Herausforderungen für die Betreiber stellt. Um diese auch in Zukunft zu bewältigen, werden kontinuierlich Projekte zur Verbesserung der (öffentlichen) Verkehrsinfrastruktur geplant und ausgeführt. Im Folgenden wird eine Auswahl aller verkehrsplanerischen Maßnahmen für den ÖV im Münchner Großraum aufgelistet. Auf verkehrstechnische Optimierungen, wie die Elektrifizierung von Streckenabschnitten, Erschließung neuer Betriebsbahnhöfe und barrierefreier Ausbau von Haltestellen, wird nicht weiter eingegangen.

4.1 Tram

Zu den konkretesten Ausbauvorhaben der Straßenbahn zählen die Projekte *Tram Münchner Norden*, *Tram Nordtangente* und *Tram Westtangente*. Dabei wird allen voran das Ziel verfolgt, dauerhafte Querverbindungen zwischen bestehenden U- und S-Bahnanschlüssen, Stadtteilen und neuen bzw. wachsenden Wohnquartieren zu schaffen. Gleichzeitig soll das derzeitige öffentliche Verkehrsnetz entlastet werden. (MVG, 2023a)

Diese Abbildung ist urheberrechtlich geschützt und ist somit nicht in Online-Version dieser Bachelorarbeit verfügbar.

Abbildung 4.2: Projektübersicht Tram (MVG, 2023a)

4.1.1 Tram Münchner Norden

Aktuell endet die Tram 23 an der Haltestelle *Schwabing Nord*. Künftig wird diese zunächst bis nach *Kieferngarten* (Anschluss zur U6) verkehren, später auch nach *Am Hart* (Anschluss zur U2). Außerdem wird eine weitere Tramlinie eingesetzt, die zwischen den beiden U-Bahn-Stationen pendelt.

4.1.2 Tram Nordtangente

Hier wird zunächst vom Bahnhof *Münchner Freiheit* eine neue Querverbindung zum westlich gelegenen *Elisabethplatz* gebaut. Dort gibt es Umstiegsmöglichkeiten in Richtung *Hauptbahnhof* oder in den Münchner Nordosten.

Im nächsten Schritt wird die neugebaute Strecke auf Höhe des U-Bahnhofs *Giselastraße* Richtung *Thiemestraße* in den Osten abgezweigt. Die Tram verläuft dabei einmal quer durch den *Englischen Garten* bis zur *Tivolistraße*.

Im *Abschnitt Johanneskirchen* des Projekts wird eine neue Abzweigung auf der Strecke Richtung *St. Emmeram* geplant. Ab der *Regina-Ullmann-Straße* führt eine rund ein Kilometer lange Verbindung zur S-Bahn-Station *Johanneskirchen*.

4.1.3 Tram Westtangente

Vom *Romanplatz* wird es eine Direktverbindung zur *Aidenbachstraße* geben. Die fünf Stadtbezirke *Neuhausen-Nymphenburg*, *Laim*, *Sendling-Westpark*, *Hadern* und *Thalkirchen-Obersendling-Forstenried-Fürstenried-Solln* werden über *Wotanstraße*, *Fürstenrieder Straße* und *Boschetsrieder Straße* miteinander verbunden. Umstiegsmöglichkeiten gibt es dann auf die U-Bahn-Linien U3, U5 und U6 sowie zur S-Bahn-Stammstrecke über die Haltestelle *Laim*.

4.2 U-Bahn

Aktuell befinden sich zwei Projekte bereits in der Bauphase. Durch die Verlängerung der Linien *U5* und *U6* im Westen wird vor allem versucht neue Räume zu erschließen, die vorher noch nicht von dem SPNV bedient wurden.

Außerdem wird mit dem Bau der *U9* eine neue Nord-Süd-Verbindungsspanne geschaffen, die die U-Bahn-Linien im Bereich der Innenstadt entlasten soll. Dafür werden neue Haltestellen im Stadtzentrum geplant, sodass das öffentliche Verkehrsnetz dort noch besser erreichbar ist. (MVG, 2023a)



Diese Abbildung ist urheberrechtlich geschützt und ist somit nicht in Online-Version dieser Bachelorarbeit verfügbar.

Abbildung 4.3: Mögliches Liniennetz mit der U9 (Schütz, 2022)

4.2.1 Verlängerung der U5

Die U5 wird von der Endhaltestelle *Laimer Platz* nach *Pasing* verlängert. Auf ungefähr 3,8 Kilometern entstehen die Haltestellen *Willibaldstraße*, *Am Knie* und *Pasing* in den bisher schwach erschlossenen Wohngebieten. Der Effekt dieses Vorhabens wird durch den Bau der *Tram Westtangente* sowie einen Anschluss an die Stammstrecke beim Bahnhof *Pasing* verstärkt.

Ein weiterer Ausbau der Linie U5 bis nach *Freiham* im nächsten Jahrzehnt gilt derzeit als wahrscheinlich.

4.2.2 Verlängerung der U6

Auch die U6 wird im Südwesten bis nach *Martinsried* verlängert (In Abbildung 4.3 als U9 gekennzeichnet). Die neue Endhaltestelle befindet sich unmittelbar neben dem Campus Martinsried der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München und dem Max-Planck-Institut für Biochemie. Somit liegt hier das Augenmerk vor allem auf den Mobilitätsbedürfnissen von Studierenden und (wissenschaftlichen) Mitarbeitern, die in München wohnen. Aber auch Park-and-Ride Möglichkeiten für Pendler aus den Gemeinden *Planegg* und *Gräfelfing* nach München können hier entstehen.

4.2.3 Bau der U9



Abbildung 4.4: Streckenverlauf der U9 (MVG, 2023a)

Das größte Bauvorhaben für die Münchner U-Bahn in absehbarer Zeit ist die Linie *U9*. Die fünf neuen Stationen *Impler-/ Poccistraße*, *Esperantoplatz/ 2.Wiesnbahnhof*, *Hauptbahnhof*, *Pinakotheken* und *Elisabethplatz* werden durch einen über fünf Kilometer langen Tunnel miteinander verbunden. Die Strecke bedient somit hochfrequentierte Orte in der Stadt, die durchaus auch von Fahrgästen genutzt werden können, die von außerhalb der Stadt kommen. Von der Haltestelle *Hauptbahnhof*, die einen Umstieg zur zweiten S-Bahn-Stammstrecke (siehe Kapitel 4.3.1 *Bau der zweite S-Bahn-Stammstrecke*) bietet, kommt man sowohl direkt zu dem Universitätscampus *Garching-Forschungszentrum* (TUM) als auch nach *Martinsried* (LMU). Zusätzlich hat man eine direkte Verbindung zu den Veranstaltungsorten *Theresienwiese* und der *Allianz Arena* in *Fröttmaning*.

Außerdem bietet eine Abzweigung vom *Hauptbahnhof* Richtung *Theresienstraße* die Möglichkeit ohne Umstiege vom Münchner Südwesten in den Nordwesten zu kommen (beispielsweise als U29), was eine höhere Betriebsqualität bei Veranstaltungen im *Olympiapark* gewährleisten kann. Gleiches gilt für den Innenstadt Campus der TUM an der *Theresienstraße*.

4.3 S-Bahn

Die S-Bahn hat im Vergleich zu Tram und U-Bahn zusätzlich die Herausforderung bessere Mobilitätsbedingungen für Fahrgäste aus den umliegenden Landkreisen zu schaffen. Hier ist das oberste Gebot die begrenzten Kapazitäten der sehr großen Nachfrage anzupassen. Somit werden primär bestehende Verbindungen durch neue Routen erweitert. Das äußert sich vor allem in den Projekten rund um den *Flughafen München* und die *zweite Stammstrecke*.

Außerdem werden auch immer wieder alternative Maßnahmen zu der *zweiten Stammstrecke* vorgeschlagen, wie zum Beispiel die Nutzung der Infrastruktur des *Nordrings* für den Personennahverkehr. Mehr dazu im Kapitel 5 *Problemanalyse*. (DB Regio, 2023) (DB Netz, 2023b)

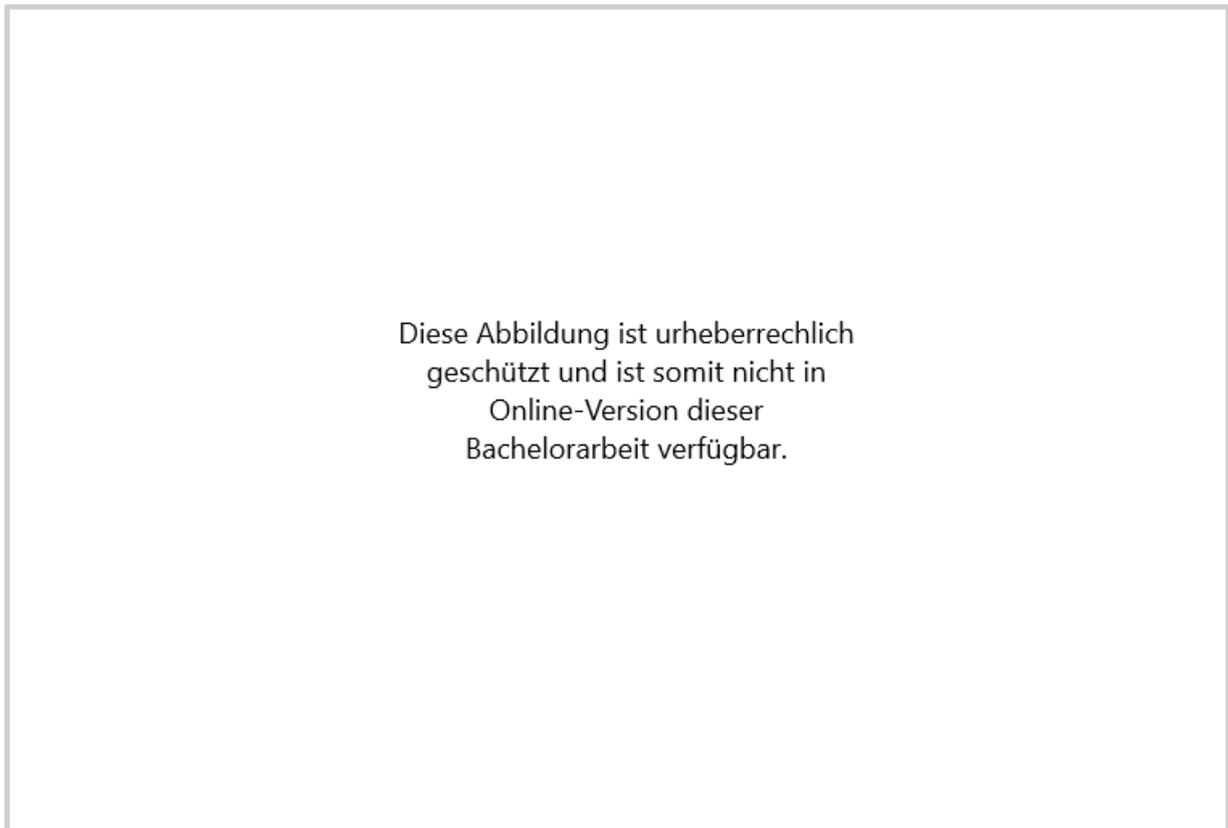


Abbildung 4.5: Projektübersicht S-Bahn München (DB Netz, 2023b)

4.3.1 Bau der zweiten S-Bahn-Stammstrecke

Diese Abbildung ist urheberrechtlich geschützt und ist somit nicht in Online-Version dieser Bachelorarbeit verfügbar.

Abbildung 4.6: Zweite Stammstrecke München (DB Netz, 2022)

Um die extrem hochfrequentierte S-Bahn-Stammstrecke zu entlasten und das gesamte S-Bahn-Netz resilienter gegen einen Systemausfall zu machen, wird durch die Münchner Innenstadt ein zweiter Tunnel hindurchgeführt. Dieser verläuft fast parallel zur bereits bestehenden Strecke von *Laim* bis zum *Leuchtenbergring* und dient als mögliche Ausweichroute, falls es zu Überlastungen auf der Strecke kommt. Die rote Linie fährt zwischen den Endstationen die Haltestellen *Hauptbahnhof*, *Marienhof* und *Ostbahnhof* an, für die jeweils Neubauten entstehen. Durch die kleinere Anzahl der Halte eignet sich die Strecke gut als Expresslinie zwischen West und Ost.

4.3.2 Erdinger Ringschluss und weitere Teilprojekte

Diese Abbildung ist urheberrechtlich geschützt und ist somit nicht in Online-Version dieser Bachelorarbeit verfügbar.

Abbildung 4.7: S-Bahn Ausbau am Flughafen München (Walter and Lill, 2018)

Der Kern des Projekts ist der Bau des hier in dunkelgrün eingezeichneten *Erdinger Ringschlusses*. Hierbei wird die Gemeinde *Erding* mit einem Zwischenhalt in *Schwaigerloh* an den Flughafen München angeschlossen. Somit haben Fahrgäste aus den nordöstlichen Gemeinden bei München eine direkte Verbindung zum Flughafen, wohin dann neben der S1 und S8 insgesamt drei S-Bahn-Linien führen. (Walter and Lill, 2018)

Zusätzlich soll der *Erdinger Ringschluss* als erste Teilstrecke im Regionalverkehr vom Flughafen Richtung *Mühdorf*, *Freilassing* und *Salzburg* agieren. Dazu wird in einem nächsten Projektschritt die *Walpertskirchner Spange* zu der bestehenden Infrastruktur ergänzt.

Westlich des Flughafens werden ebenfalls diverse Ausbaumaßnahmen ausgeführt. Unter anderem ermöglicht die schon in Betrieb genommene *Neufahrner Gegenkurve* eine Direktverbindung Richtung *Regensburg* und *Landshut* mit dem Regionalzug. (DB Netz, 2023a)

4.4 Seilbahn

Außerdem wurde von der Stadt München und der Gemeinde Unterföhring eine Machbarkeitsstudie für eine Seilbahn von der U-Bahn-Haltestelle *Oberwiesenfeld* zur *Studentenstadt* in Auftrag gegeben. Ebenso wurde das Potential eines Ausbaus der Strecke bis nach *Unterföhring* untersucht. Das Ergebnis der Studie ergab, dass die Seilbahn auf der Hauptstrecke im Vergleich zu einem Expressbus kaum besser abschneiden würde. Die Osterweiterung *Studentenstadt-Unterföhring* könnte in Zukunft näher betrachtet werden, da eine Seilbahn prinzipiell große Vorteile beim Überwinden von natürlichen Barrieren hat. In diesem Beispiel wäre dies das Isartal. (MVG, 2023a)

Diese Abbildung ist urheberrechtlich geschützt und ist somit nicht in Online-Version dieser Bachelorarbeit verfügbar.

Abbildung 4.8: Trassenvarianten Urbane Seilbahn München (MVG, 2023a)

5 Problemanalyse

5.1 Rebound-Effekt bisheriger Maßnahmen

Bei den oben genannten Projekten für U- und S-Bahn wird der Fokus von allem darauf gelegt das Stadtzentrum zu entlasten (Neubau/ Ausbau von Strecken) und neue Ortschaften an das MVV-Netz anzubinden (Verlängerung bestehender Strecken). Bei der Tram hingegen wird ein Akzent auf die Verknüpfung neuer Wohnquartiere gesetzt.

Ein entscheidender Nachteil bei der Umsetzung der U- und S-Bahn Projekte ist, dass trotz allen entlastenden Maßnahmen für den Innenstadtverkehr, eben dieser noch mehr belastet werden könnte. Schafft man neue Möglichkeiten sich im Raum fortzubewegen, werden diese besonders an Knotenpunkten zweifellos in Anspruch genommen. Die Verkehrsnachfrage passt sich dem Angebot langfristig an, was in diesen Beispielen zu einer Erhöhung der Fahrgastzahlen führen könnte. Und dieses Szenario ist durchaus wünschenswert, wenn man bedenkt, dass die hinzugekommenen Fahrgäste von einem anderen Verkehrsmittel auf den ÖPNV umgestiegen sind - in den meisten Fällen also vom Auto.

Jedoch steigt die Belastung des Verkehrsnetzes mit der Anzahl der Fahrgäste an, was wiederum die Qualität des ÖV beeinträchtigen könnte. Dadurch würde der öffentliche Verkehr wieder als unattraktiver wahrgenommen werden, sodass weniger Menschen diesen nutzen würden.

Die bisherigen Maßnahmen könnten also einen klassischen Rebound-Effekt zur Folge haben:

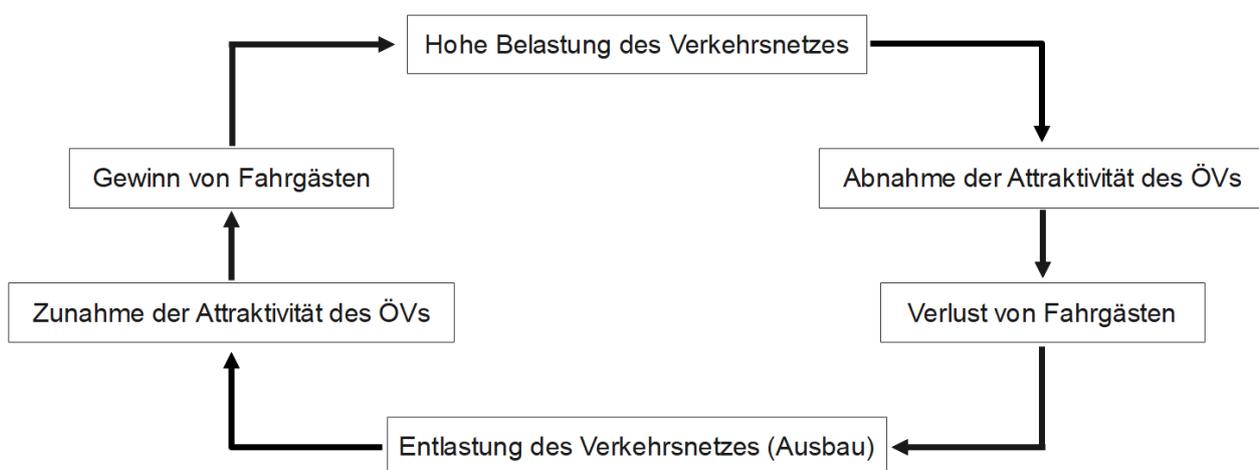


Abbildung 5.1: Rebound-Effekt im ÖPNV-Ausbau

Hinzu kommt, dass laut Prognosen tatsächlich mehr Menschen in Zukunft in der Region München leben werden. Dies bedeutet zwangsläufig einen Zuwachs der Fahrgäste, was den Rebound-Effekt nochmals verstärkt.

5.2 Topologie der Münchner Schienenverkehrsnetzes

Das heutige Netz der MVV hat eine starke Zentralausrichtung. Bei einem Blick auf Münchens Karte ist deutlich das Radialnetz des Nahverkehrsnetzes der S-Bahn zu erkennen. Durch die Stammstrecke zwischen *Pasing* und *Ostbahnhof* wirkt die Mitte ausgedehnt gen Osten und Westen. (Wulfhorst, 2022)

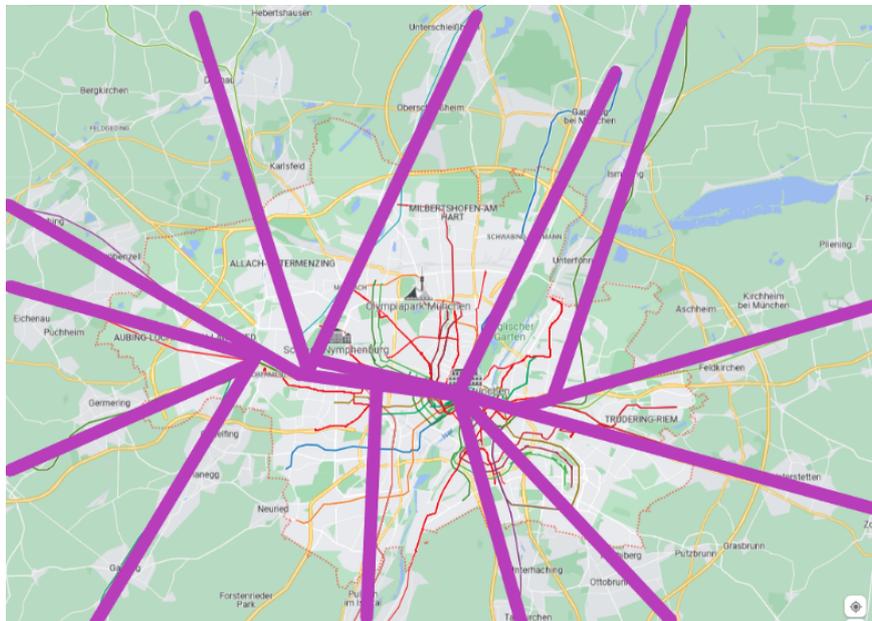


Abbildung 5.2: Netztopologie der S-Bahn (Kartengrundlage: Google Maps)

Der derzeitige Ausbau des SPNV (z. B. Bau der zweiten Stammstrecke) zielt nicht darauf ab diese Netztopologie grundlegend zu verändern. Dadurch wird das Problem der ineffizienten Fortbewegung von Menschen, die von einer Gemeinde bei München in eine andere Gemeinde bei München fahren müssen, nicht gelöst. Fahrgäste von außerhalb der Stadt haben oft erst auf der Stammstrecke eine sinnvolle Umstiegsmöglichkeit zur U-Bahn und anderen S-Bahn Linien. Ein Teil der Fahrgäste, die täglich in die Stadt reinfahren, tun dies nur, um mit der nächsten passenden Verbindung dort wieder rauszufahren. Sie haben keinen direkten Nutzen davon in das Stadtzentrum zu reisen (der indirekte Nutzen ist der Umstieg), tragen aber trotzdem zur Verkehrsbelastung in der Innenstadt bei.

Dieser Sachverhalt wurde in drei Beispielstrecken aufgeführt, die der MVV-Fahrtauskunft entsprungen sind (MVV, 2023):

Strecke Gauting-Deisenhofen



Abbildung 5.3: Strecke von Gauting nach Deisenhofen mit der MVV

Strecke Eching-Gröbenzell

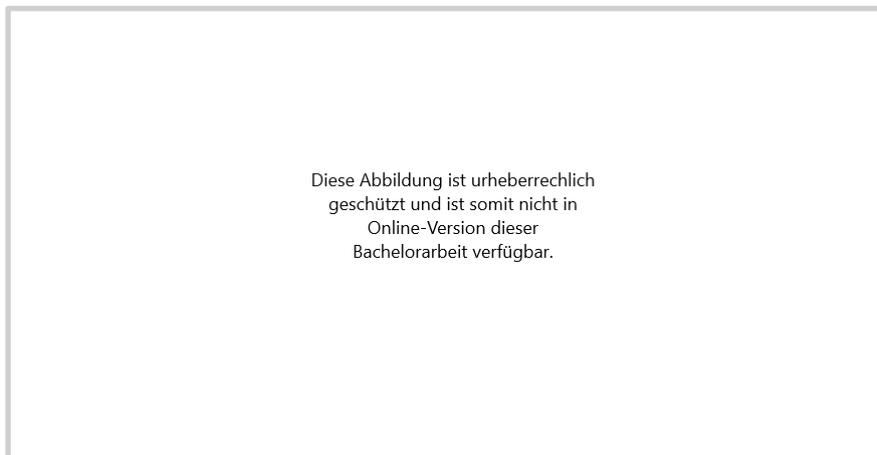


Abbildung 5.4: Strecke von Eching nach Gröbenzell mit der MVV

Strecke Poing-Garching-Forschungszentrum

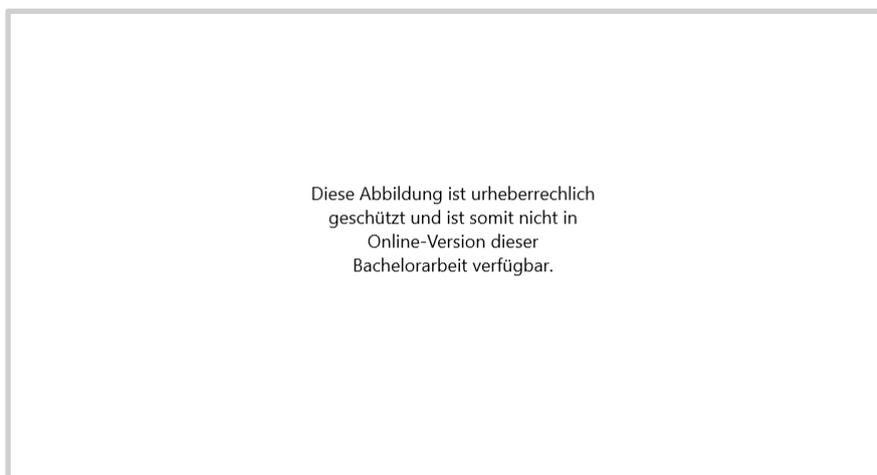


Abbildung 5.5: Strecke von Poing nach Garching-Forschungszentrum mit der MVV

5.3 Lösungsansatz

5.3.1 Die Ringbahn

Um dem Rebound-Effekt zu entgehen, wird eine Optimierungsmaßnahme vorgestellt und untersucht, die in Bezug auf das Stadtzentrum verkehrshindernd, im Gesamtkontext jedoch verkehrsfördernd wirken könnte. Das bedeutet auch, dass Fahrgäste, die keinen direkten Mehrwert von der Fahrt in die Innenstadt haben, gar nicht mehr ins Zentrum fahren müssen. Trotzdem wird der ÖPNV für sie attraktiver.

Der vorgestellte Lösungsansatz ist die Ringbahn.

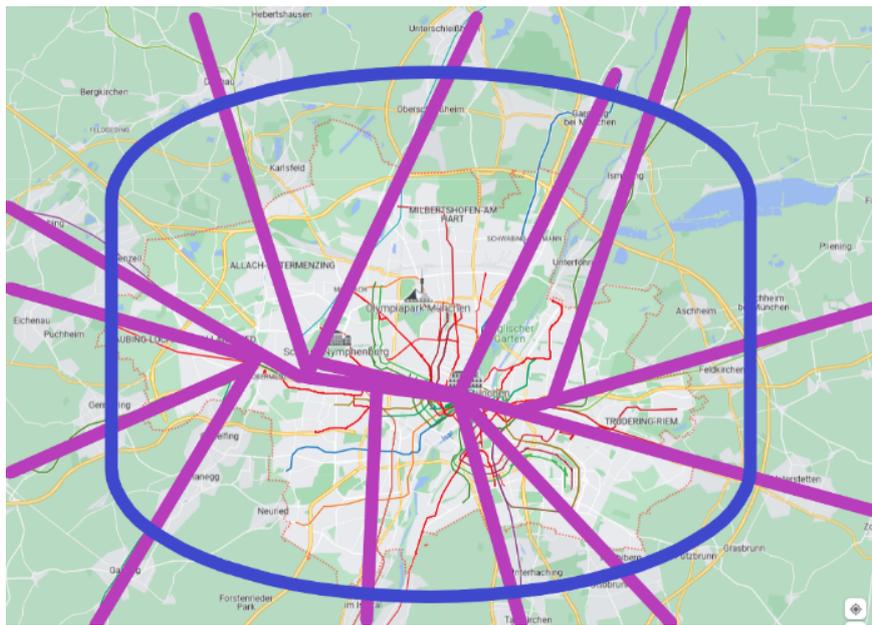


Abbildung 5.6: Netztopologie der S-Bahn mit Ring (Kartengrundlage: Google Maps)

Ein Radialringnetz in Form einer (S-) Bahnstrecke, um die Stadt München hat das Potential:

1. Überflüssigen Verkehr im Zentrum zu verhindern und somit die Innenstadt zu entlasten.
2. Die Attraktivität des ÖPNV, durch bessere Erreichbarkeit von Orten außerhalb der Stadt zu erhöhen.

Nach dem Vorbild der Tram (siehe Kapitel 4.1 *Tram*) werden hiermit neue Querverbindungen geschaffen, um Ortschaften miteinander zu verknüpfen und somit die Verkehrsmittel auf ohnehin schon hoch frequentierten Strecken der Stadt zu entlasten.

Damit würde sich München zu Städten wie Berlin, Kopenhagen, Glasgow, London, Madrid, Moskau und Tokio einreihen, die allesamt eine Ringbahn als Teil ihres SPNV haben. (Saidi, Wirasinghe, Kattan, 2016)

5.3.2 Bereits bestehende Vorschläge

Das Konzept einer Ringbahn in der Stadt München ist nicht neu. Eine populäre Idee ist die Teilnutzung/ -umfunktionierung der Güterzuginfrastruktur am *Nordring* für den Personennahverkehr. Vom diesem ausgehend wurden bereits verschiedene Streckenverläufe geplant, die das Ziel haben einen vollständigen Ring in der Stadt München zu schaffen. Hier werden kurz bereits bestehende Vorschläge gezeigt.

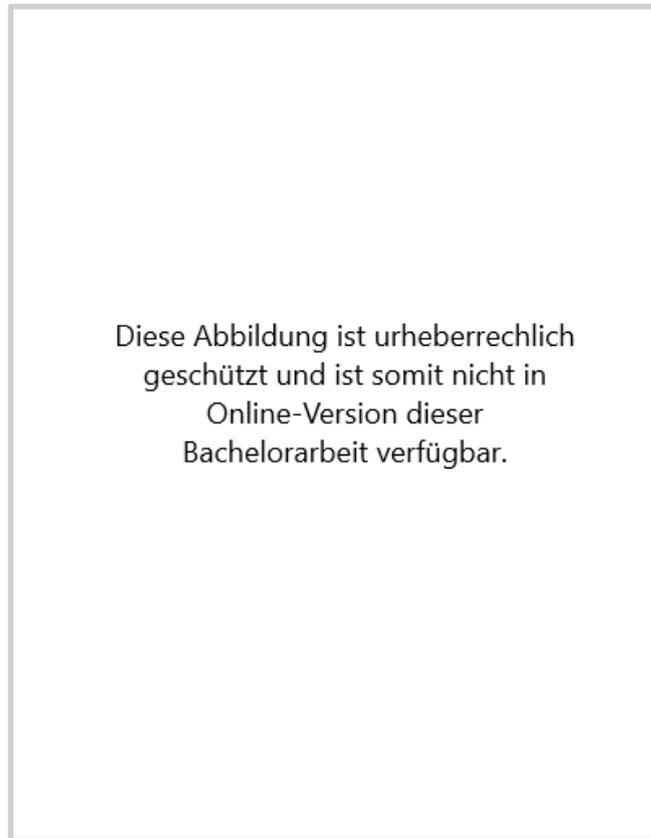


Abbildung 5.7: Bestehender Vorschlag eine Ringbahn in München (Koopmann, 2016)

Bei *Johanneskirchen* folgt die Strecke der Linie *S8* bis zum *Ostbahnhof*, wo sie dann an den *Südring* anknüpft. Dieser wird heute bereits vom Regionalverkehr genutzt. Die fehlende Verbindung vom Nord- zum Südring auf der westlichen Seite, könnte mithilfe eines Tunnels vom *Heimeranplatz* zum *Olympiakreuz* erschlossen werden. (Koopmann, 2016) (Herzog and Atabay, 2016)

Ein ähnlicher Vorschlag für eine Ringbahn in München wurde bereits 2012 vorgestellt. (Leonhartsberger et al., 2012)

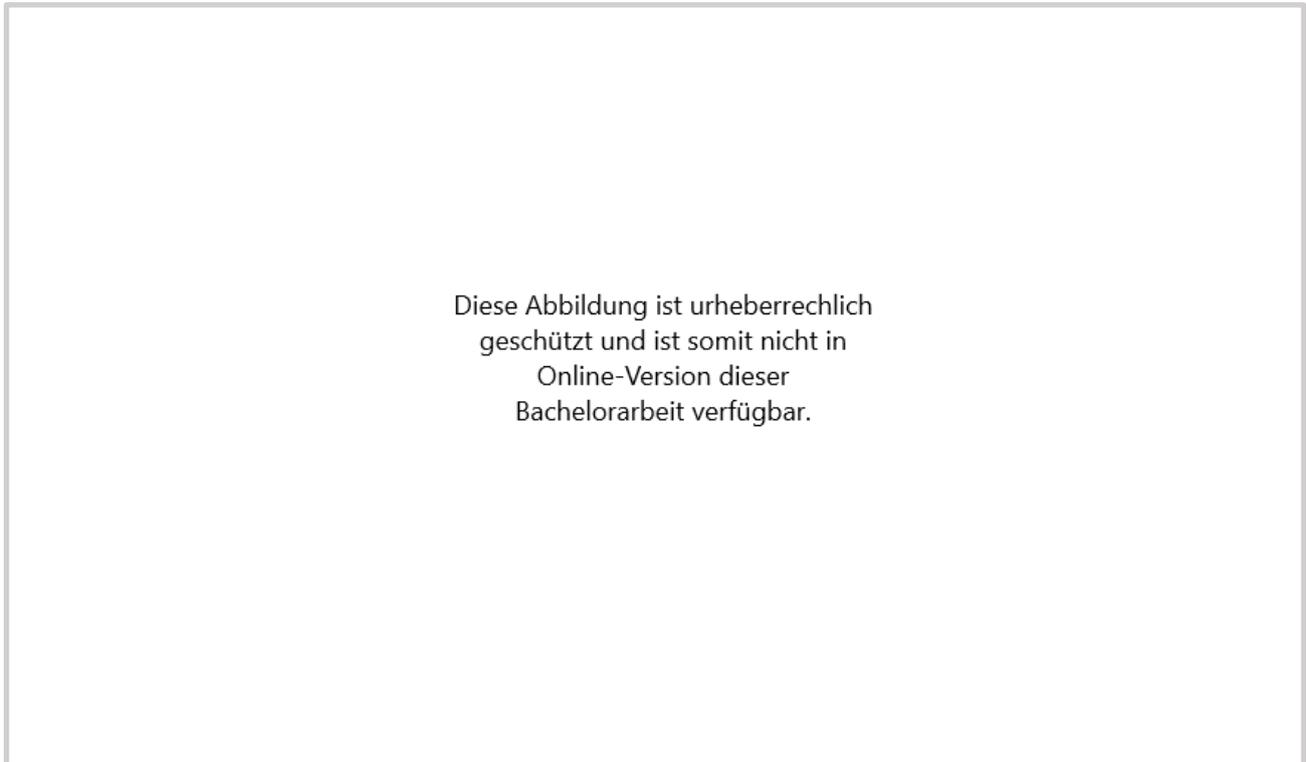


Abbildung 5.8: Bestehender Vorschlag über eine Ringbahn in München (Leonhartsberger et al., 2012)

Bei der Ausarbeitung dieser Vorschläge wurde darauf geachtet einen möglichst konkreten Ring zu planen, der einen möglichst minimalen Arbeitsaufwand in der Bauphase bedeutet. Der soll meist als Alternative oder Ergänzung zur zweiten S-Bahn-Stammstrecke fungieren und möglichst nah am Mittleren Ring verlaufen.

In dieser Arbeit, wird davon abgesehen sich von so einer Aufgabenstellung in der Netzplanung limitieren zu lassen. Genauso sind bestehende Gleisstrecken für das Ringnetzsystem kein Faktor. Das verkehrsplanerische Werkzeug ist zwar das Gleiche und die verkehrlichen Ziele ähnlich, jedoch wird im Folgenden in einer anderen Größenordnung gedacht und ein weiteres Untersuchungsgebiet betrachtet. Diese Arbeit bezieht explizit sich auf Gemeinden im Umland der Stadt München, in dem die Potentialanalyse eines Ringsystems im öffentlichen SPNV durchgeführt wird.

6 Maßnahmenuntersuchung

6.1 Verwendete Simulationen und Modelle

6.1.1 MATSim

Die Maßnahmenuntersuchung erfolgt mit dem Verkehrsmodell MATSim (Multi-Agent Transport Simulation). Das agentenbasierte mesoskopische Modell simuliert den Verkehr im Laufe eines Tages auf dem ihm gegebenen Netzwerk. Eine Übersicht der wichtigsten Etappen der Simulation kann der folgenden Abbildung entnommen werden.



Abbildung 6.1: Die MATSim-Schleife (Horni et al., 2016)

Als Input in das Modell dient die Initialnachfrage (**Initial Demand**). Diese liegt in Form von den Plänen der verschiedenen Agenten vor. Wichtige Informationen, die hier gelistet werden sind die Ausgangsposition, die Zielkoordinaten, die Aktivitäten und ein zeitlicher Rahmen der Agenten.

Für die Ausführung der Pläne wird **Mobsim** (Mobility Simulation) verwendet. Dabei sind die Agenten an das Netzwerk und die Fahrpläne der Simulation gebunden. Sie können sich nur dort fortbewegen, wo es einen Weg gibt. Phänomene, wie Staus bei der Überlastung einer Straße werden hier ebenso beachtet.

Nachdem die Agenten ihre Pläne ausgeführt haben, werden ihre Fahrten ausgewertet und in einem Punktesystem (**Scoring**) bewertet. Dabei werden der Zeit, die im Verkehr verbracht wird, negative Werte zugeordnet. Die Zeit, in der die Aktivitäten durchgeführt werden, ist hingegen positiv.

Den *score* und die gesammelte Erfahrung nutzt der Agent in einer neuen Iteration, um sein Verkehrsverhalten effizienter zu gestalten. In der Umplanungsphase (**Replanning**) kann er Verkehrsmittel, Routen und Zeiten neu anpassen, um seinen *score* zu optimieren.

Schließlich, nach Durchlauf aller Iterationen, kann eine Analyse (**Analysis**) des Outputs durchgeführt werden. (Horni et al., 2016)

6.1.2 MITO

In dieser Arbeit wird das MITO-München-Modell des Lehrstuhls für Verkehrsverhalten der Technischen Universität München als Initialnachfrage verwendet.

Das Verkehrsnachfragemodell MITO (*Microscopic Transport Orchestrator*) generiert basierend auf einer synthetischen Population individuelle Mobilitätsbedürfnisse. Durch ein Monte-Carlo-Stichprobenverfahren wird einem Haushalt mit einem geschätzten Fahrzeit-Budget eine zufällige

Anzahl an Fahrten zugeordnet. Nachdem alle Zielkoordinaten für die Fahrten bestimmt wurden, wählt ein Mode-Choice-Modell den Fortbewegungsmodus aus. Dabei werden der Zweck der Reise und die gewünschte Abfahrts- bzw. Ankunftszeit beachtet. (Moeckel et al., 2020)

6.1.3 SILO

Die synthetische Population in MITO wird von SILO (*Simple Integrated Land-Use Orchestrator*) erzeugt. Aufgrund von gegebenen Daten (Zählungen, Statistiken) über die Haushaltstypen und Anzahl von Haushalten einer Gemeinde, wird ein synthetischer Haushalt zufällig einer Rasterzelle zugewiesen. Mit einer Monte-Carlo-Simulation werden Attribute bestimmt, die auf ein Haushalt zutreffen. Dabei wird zwischen kontrollierten (auf Daten basierenden) und unkontrollierten (geschätzten) Attributen unterschieden. Schließlich wird der finale Zustand mithilfe der Anpassungsgüte (*Goodness of fit*) der synthetischen Population beurteilt. (Moeckel, 2013)

6.2 Konzeption der Ringbahn

6.2.1 Verkehrsplanerisches Ziel

Die Ringbahn wird mit dem Ziel geplant eine Tangentialstrecke im SPNV zu schaffen, die die einwohnerstärksten Gemeinden im Münchner Umkreis miteinander verknüpft. Dabei werden nur die Gemeinden betrachtet, die bereits heute an das Schienennetz der MVV angeschlossen sind.

6.2.2 Voraussetzungen für die Simulation

Für die Simulation des Rings werden keine neuen Haltestellen geschaffen. Grund hierfür ist, dass der bestehende Verkehrsfluss von U- und S-Bahn nicht gestört werden soll. Eine zusätzliche Station auf einer Linie würde den Zeitplan der Bahn nachhaltig verändern und somit auch die feinjustierten Abstimmungen des gesamten Verkehrssystems durcheinander bringen. Da eine Integration der Ringbahn in den tagesaktuellen Zeitplan die Komplexität dieser Arbeit übersteigt und keinen großen Mehrwert für die Beantwortung der Forschungsfrage hat, wird von neuen Haltestellen abgesehen.

Folglich kann man sich die simulierte Ringbahn als komplett isoliertes, in sich abgeschlossenes System vorstellen. Die Ringbahn agiert als unabhängiges Netz und kommt zu keinem Zeitpunkt mit dem vorhandenen Verkehrs- und Betriebsnetz in Berührung. Das bedeutet auch, dass sich die Ringbahn nicht, aufgrund einer Blockierung des Gleises durch eine S-Bahn verspäten kann, und vice versa.

6.2.3 Gemeindewahl

Als grundlegendes Entscheidungskriterium für die Wahl der Gemeinden, die an den Ring angeschlossen werden sollen, dient die jeweilige Einwohner- und Beschäftigtenzahl. Diese GIS-Daten wurden für diesen Zweck von dem Lehrstuhl für Verkehrsverhalten zur Verfügung gestellt. Eine Übersicht der Einwohner- und Beschäftigtenzahlen des gesamten MVV-Gebiets kann im Anhang A.1 *Gemeinden im MVV-Netz* gefunden werden.

Zwei einwohnerstarke Gemeinden, die auf einer radialen Linie liegen, können nicht beide Teil des Rings sein. Daraus folgt der Grundsatz, dass die Ringbahn jede Linie des MVV-Netzes genauso oft schneidet, wie die jeweilige Linie die Stadtgrenze der Stadt München. Im Normalfall passiert das

zwei Mal pro Linie. Ausnahmen hierfür bilden die Linien S1 und U6, welche jeweils nur eine Endstation außerhalb des Stadtgebiets haben. Zwangsläufig ergibt sich daraus, dass es 13 Stationen geben wird und somit 13 Gemeinden direkt miteinander verbunden werden.

Aus den oben beschriebenen Annahmen werden zunächst folgende Gemeinden ausgewählt:

Tabelle 6.1: Kandidaten für Ringbahnanschluss gemäß Einwohner- und Beschäftigtenzahl

Linie	Streckenabschnitt	Größte Gemeinde	Einwohner- und Beschäftigtenzahl
S1	-	Freising	85.959
S2	Ost	Erding	45.869
S2	West	Dachau	54.055
S3	Ost	Unterhaching	29.114
S3	West	Olching	28.489
S4/S6	Ost	Haar	28.291
S4	West	Fürstenfeldbruck	46.395
S6	West	Starnberg	32.410
S7	Ost	Ottobrunn	32.170
S7	West	Wolfratshausen	25.246
S8	Ost	Ismaning	27.850
S8	West	Germering	42.875
U6	-	Garching b. München	28.494

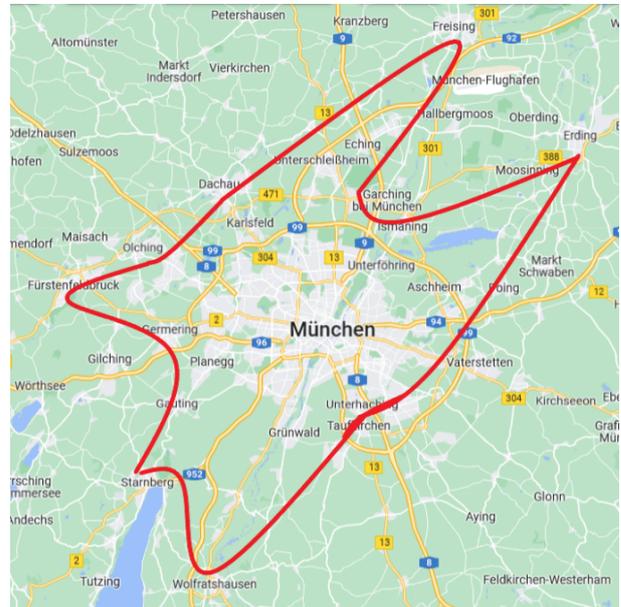


Abbildung 6.2: Verlauf des Ringes gemäß Tabelle 6.1 (Kartengrundlage: Google Maps)

20-km- Kriterium

Die Veranschaulichung der Tabelle in Abbildung 6.2 zeigt eine wilde geometrische Figur, die optisch keinem Ring, Oval oder Ähnlichem sieht. Die Strecke ist ineffizient angeordnet und folgt keinem ersichtlichen verkehrsplanerischen Konzept. Einige Streckenabschnitte sind zu lang, andere scheinen zu kurz. Außerdem ist kein einheitlicher Radius bzw. keine Zentrum erkennbar. Die Umsetzung eines solchen Verkehrsprojekts steigert keinesfalls die Attraktivität des ÖPNV und ist somit ausgeschlossen.

Daher wird zusätzlich das Kriterium eingeführt, dass nur Gemeinden, die sich nicht weiter als 20 km Luftlinie vom Münchner Stadtzentrum befinden, betrachtet werden. Gemessen wird von der Mariensäule am Marienplatz zu den jeweiligen S-Bahn-Stationen. Das heißt theoretisch auch, dass eine Gemeinde, deren Zentrum die 20 km überschreitet, auch betrachtet wird, wenn sie eine Haltestelle hat, die dem oben genannten Kriterium entspricht. (siehe A.2 Entfernung der Ringbahn-Gemeinden)

Freising, Fürstenfeldbruck, Erding, Starnberg und Wolfratshausen werden dadurch aus dem Planungsprozess eliminiert. Die nächstgrößten Gemeinden rücken nach, woraus sich das folgende Bild ergibt:

Tabelle 6.2: Kandidaten für Ringbahnanschluss gemäß dem 20-km-Kriterium

Linie	Streckenabschnitt	Größte Gemeinde	Einwohner- und Beschäftigtenzahl
S1	-	Unterschleißheim	40.573
S2	Ost	Poing	19.154
S2	West	Dachau	54.055
S3	Ost	Unterhaching	29.114
S3	West	Olching	28.489
S4/S6	Ost	Haar	28.291
S4	West	Puchheim	24.220
S6	West	PGK	47.495
S7	Ost	Ottobrunn	32.170
S7	West	Pullach	15.307
S8	Ost	Ismaning	27.850
S8	West	Germering	42.875
U6	-	Garching b. München	28.494

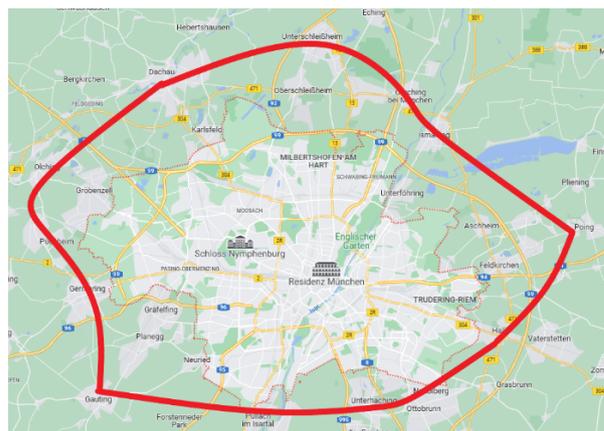


Abbildung 6.3: Verlauf des Ringes gemäß Tabelle 6.2 (Kartengrundlage: Google Maps)

Feinjustierung

S2 (Ost)

Auffällig bei dieser Veranschaulichung ist die unverhältnismäßig lange Strecke von und nach *Poing* (siehe die rechte Ecke in Abbildung 6.3). Die Einwohner- und Beschäftigtenzahlen zeigen, dass in der benachbarten Gemeinde Kirchheim bei München nur 17 Personen weniger wohnen bzw. arbeiten. Bei einem Maßstab, bei dem dutzende Gemeinden mit zehntausenden Einwohnern betrachtet werden, können die beiden Gemeinden im Osten der S2 als gleichwertig angesehen werden.

Tabelle 6.3: Vergleich der Gemeinden Kirchheim bei München und Poing

Gemeinde	Einwohner- und Beschäftigtenzahl
Kirchheim b. München	19.137
Poing	19.154

In diesem Fall wird die Streckenführung in die Gemeinde *Kirchheim*, also Richtung München, verrückt. Der Ring bietet dadurch eine bessere Erreichbarkeit für mehr Menschen, da die Bevölkerungsdichte mit der Nähe zu München prinzipiell zunimmt. Gleichzeitig haben Einwohner

der Gemeinde *Poing* immer noch einen relativ guten Anschluss an den Ring. Außerdem wirkt der Ring einheitlicher und verbraucht weniger Fläche.

S6 (West)

Das gleiche Problem wie bei der S2 taucht auch bei der Gemeinde *Gauting* (siehe die linke untere Ecke in Abbildung 6.3). auf. Von dort sind die Strecken jeweils aus *Pullach im Isartal* und aus *Germering-Unterpfaffenhofen* betroffen. Bei einem Blick auf die Einwohnerzahlen der übrigen Gemeinden im Westen der S6 stellt sich heraus, dass die aneinander angrenzenden Gemeinden *Planegg*, *Gräfelfing* und *Krailing* (PGK) zusammengenommen fast doppelt so viele Einwohner auf einer kleineren Fläche haben als *Gauting*. Die Einwohnerdichte in *PGK* ist knapp dreimal so hoch.

Tabelle 6.4: Vergleich der Gemeinden *Gauting* und PGK

Gemeinde	Einwohner- und Beschäftigten zahl	Fläche [km ²]	Bevölkerungs- dichte [Personen/km ²]
Gauting	24.622	55,3	445
Planegg	19.611	10,8	
Gräfelfing	17.993	9,4	
Krailing	9.891	15,9	
PGK-Gesamt	47.495	36,2	1.314

Deswegen wird die Station am Ring in einer der *PGK*-Gemeinden liegen.

Tabelle 6.5: Finale Gemeinden für Ringanschluss nach Feinjustierung

Linie	Strecken abschnitt	Größte Gemeinde	Einwohner- und Beschäftigten zahl
S1	-	Unterschleiß- heim	40.573
S2	Ost	Kirchheim	19.137
S2	West	Dachau	54.055
S3	Ost	Unterhaching	29.114
S3	West	Olching	28.489
S4/S6	Ost	Haar	28.291
S4	West	Puchheim	24.22
S6	West	PGK	47.495
S7	Ost	Ottobrunn	32.170
S7	West	Pullach	15.307
S8	Ost	Ismaning	27.850
S8	West	Germering	42.875
U6	-	Garching b. München	28.494



Abbildung 6.4: Verlauf des Ringes gemäß Tabelle 6.5 (Kartengrundlage: Google Maps)

6.2.4 Haltestellenwahl

Nun, wo feststeht welche Gemeinden miteinander verknüpft werden sollen, werden die Stationen bestimmt, die von der Ringbahn angefahren werden. Wie am Anfang dieses Kapitels bereits erklärt, werden hierbei keine neuen Stationen geschaffen, sondern nur existierende Haltestellen neu verbunden. Die Haltepunkte müssen in der jeweiligen Gemeinde liegen.

Einige Gemeinden besitzen nur eine S-Bahn-Haltestelle, was diese automatisch zu einer Haltestelle der Ringbahn qualifiziert. Für die restlichen Gemeinden werden die Stationen einzeln bestimmt. Dabei wird in der Regel die Haltestelle ausgesucht, die am zentralsten in der Ortschaft liegt und somit eine höherer Erreichbarkeit bieten. Als Grundlage für die Entscheidung dienen Kartenbilder, die qualitativ auf die Bebauungsdichte untersucht werden.

Die im Folgenden aufgelisteten Aussagen beziehen sich auf die Abbildungen, welche auf den Seiten 29-31 zu finden sind.

S1: Die Station **Unterschleißheim** liegt klar im Zentrum der Gemeinde. Das Rathaus der Ortschaft befindet sich in unmittelbarer Nähe zu der Haltestelle.

S2 (Ost): Die Station **Heimstetten** ist die Einzige in *Kirchheim bei München*.

S2 (West): Die Station **Dachau Bahnhof** liegt klar im Zentrum der Gemeinde. Außerdem ist die Gemeinde *Dachau* eine der drei Ortschaften auf dem Ring, die am weitesten vom Stadtzentrum Münchens liegen. Die Tendenz geht in diesem Fall also zur näherliegenden Haltestelle. (siehe A.2 *Entfernung der Ringbahn-Gemeinden*) Zusätzlich wird die Station *Dachau Bahnhof* im Gegensatz zu *Dachau Stadt* auch von den Zügen aus *Petershausen* befahren.

S3 (Ost): Die Station **Unterhaching** ist die Einzige im gleichnamigen Ort.

S3 (West): Die Station **Olching** liegt klar im Zentrum der Gemeinde. Außerdem ist die Gemeinde *Olching* eine der drei Ortschaften auf dem Ring, die am weitesten vom Stadtzentrum Münchens liegen. Die Tendenz geht in diesem Fall also zur näherliegenden Haltestelle. (siehe A.2 *Entfernung der Ringbahn-Gemeinden*)

S4/S6 (Ost): Die Station **Haar** liegt klar im Zentrum der Gemeinde. Zu dem kommt das diese Haltestelle näher an der im Osten angrenzenden Ortschaft *Vaterstetten* befindet, welche fast genauso viele Einwohner und Beschäftigte wie *Haar* hat.

S4 (West): Die Station **Puchheim** ist die Einzige im gleichnamigen Ort.

S6 (West): Die Station **Planegg** liegt einerseits in der größten der drei *PGK-Gemeinden*. Andererseits ist sie von den drei Haltestellen, die zur Wahl stehen, die nächste an der angrenzenden und einwohnerstarken Gemeinde *Gauting*.

S7 (Ost): Die Station **Ottobrunn** ist die Einzige im gleichnamigen Ort.

S7 (West): Die Station **Pullach** liegt klar im Zentrum der Gemeinde. Außerdem ist es von den drei Haltestellen der Gemeinde die zentralere und bietet somit eine höhere Erreichbarkeit.

S8 (Ost): Die Station **Ismaning** ist die Einzige im gleichnamigen Ort.

S8(West): Die Station **Germering- Unterpfaffenhofen** liegt klar im Zentrum der Gemeinde und bietet somit eine höhere Erreichbarkeit.

U6: Die Station **Garching-Forschungszentrum** liegt auf dem Campus der Technischen Universität München. Viele von den mehr als 7500 Beschäftigten und rund 20.300 Studierenden müssen täglich aus dem gesamten Münchner Großraum in die Universität. (TUM, 2023)



Abbildung 6.5: Haltestellen der Stadt Unterschleißheim (Kartengrundlage: Google Maps)



Abbildung 6.6: Haltestelle der Gemeinde Kirchheim b. München (Kartengrundlage: Google Maps)

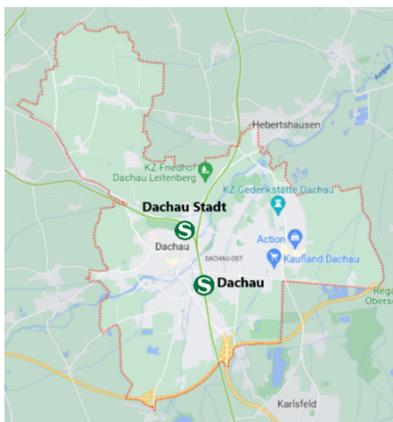


Abbildung 6.7: Haltestellen der Kreisstadt Dachau (Kartengrundlage: Google Maps)



Abbildung 6.8: Haltestelle der Gemeinde Unterhaching (Kartengrundlage: Google Maps)



Abbildung 6.9: Haltestellen der Stadt Olching (Kartengrundlage: Google Maps)

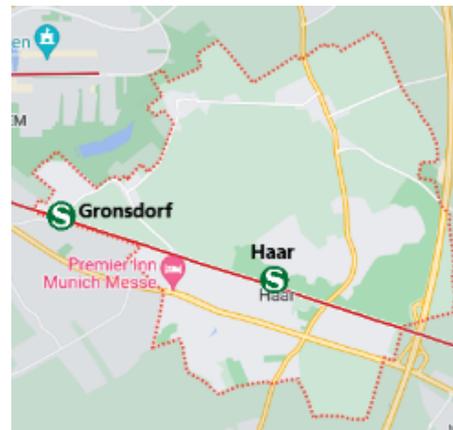


Abbildung 6.10: Haltestellen der Gemeinde Haar (Kartengrundlage: Google Maps)



Abbildung 6.11: Haltestelle der Stadt Puchheim
(Kartengrundlage: Google Maps)



Abbildung 6.12: Haltestellen der Gemeinden PGK
(Kartengrundlage: Google Maps)



Abbildung 6.13: Haltestelle der Gemeinde Ottobrunn
(Kartengrundlage: Google Maps)



Abbildung 6.14: Haltestellen der Gemeinde Pullach im Isartal
(Kartengrundlage: Google Maps)

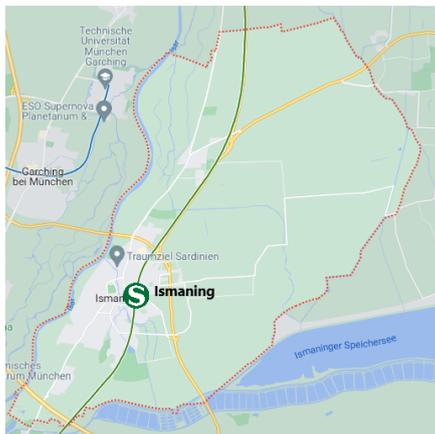


Abbildung 6.15: Haltestelle der Gemeinde Ismaning
(Kartengrundlage: Google Maps)



Abbildung 6.16: Haltestellen der Kreisstadt Germering
(Kartengrundlage: Google Maps)



Abbildung 6.17: Haltestellen der Stadt Garching
(Kartengrundlage: Google Maps)

Die folgende Tabelle und Abbildung zeigen eine Übersicht der Stationen am S-Bahn-Ring:

Tabelle 6.6: Haltestellen am Ring

Linie	Streckenabschnitt	Haltestelle
S1	-	Unterschleißheim
S2	Ost	Heimstetten
S2	West	Dachau (Bahnhof)
S3	Ost	Unterhaching
S3	West	Olching
S4/S6	Ost	Haar
S4	West	Puchheim
S6	West	Planegg
S7	Ost	Ottobrunn
S7	West	Pullach
S8	Ost	Ismaning
S8	West	Germering-Unterpfaffenhofen
U6	-	Garching-Forschungszentrum

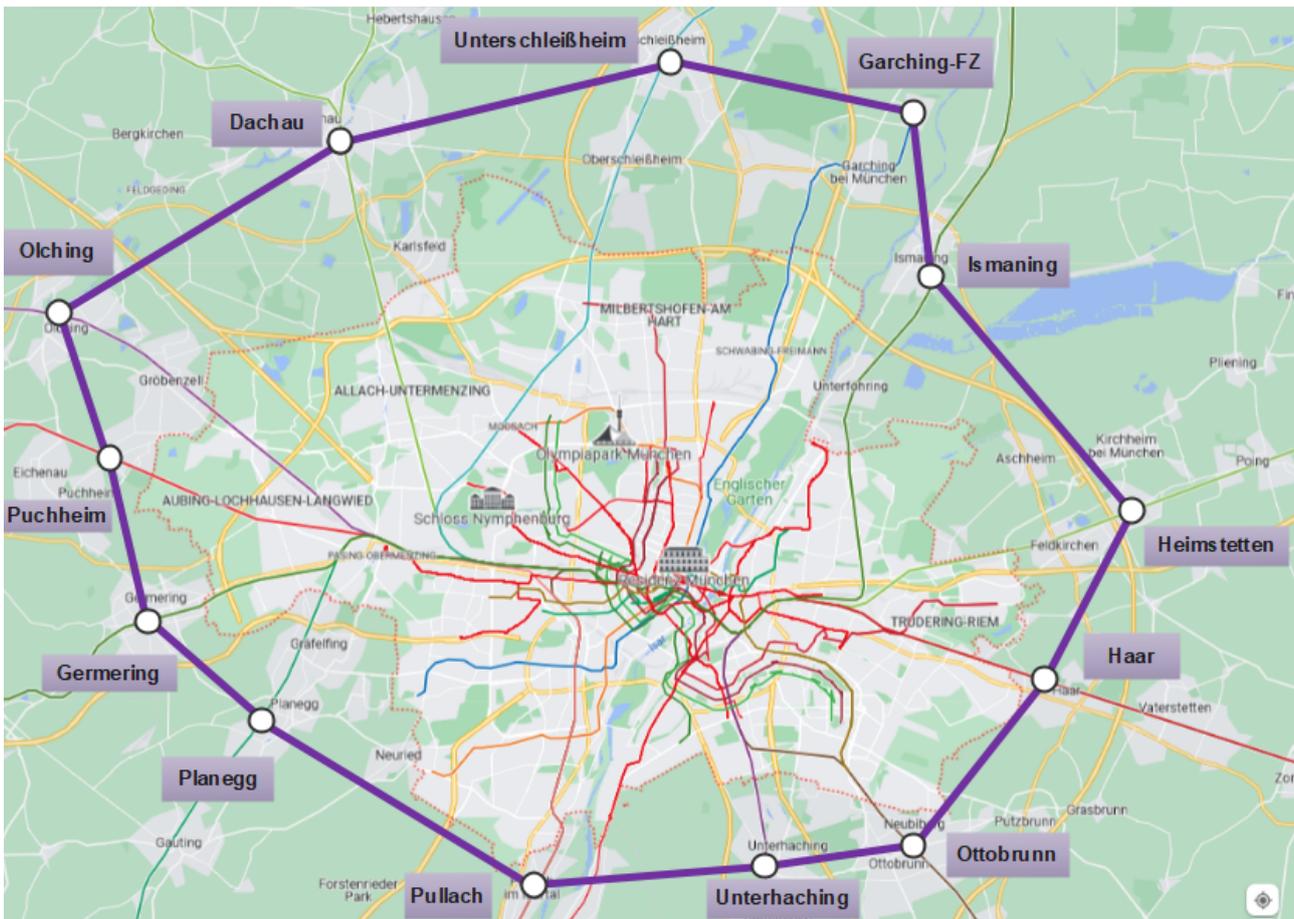


Abbildung 6.18: Ring (Kartengrundlage: Google Maps)

6.3 Simulationsaufbau

Ein Simulationsszenario von der Metropolregion München in seiner heutigen Form wurde von dem Lehrstuhl für Verkehrsverhalten der Technischen Universität München gestellt. Es dient als **Basisszenario**.

Das Vergleichsszenario (**Ringszenario**) ist eine Modifizierung des Basisszenarios, in dem die Ringstrecke, inklusive zugehörigen Fahrplänen und Fahrzeugen, hinzugefügt wurde. Im Folgenden wird beschrieben, wie genau die ursprüngliche Simulation verändert wurde.

6.3.1 Configuration

Die Konfigurationseinstellungen sind für beide Simulationen gleich. Lediglich die Verweise auf die entsprechenden Input-Dateien sind unterschiedlich.

Pro Szenario werden zur erhöhten Genauigkeit jeweils zehn Iterationen gelaufen.

Der Suchradius eines Agenten wird auf zwei Kilometer gedeckelt. Falls sich von seiner Ausgangsposition keine Haltestelle innerhalb von zwei Kilometern Luftlinie befindet, wird die Person nicht mit den öffentlichen Verkehrsmitteln reisen.

Um der realen Präferenz, lange Fußwege zu minimieren, zu entsprechen, wird das *Walking Penalty* auf -12 gesetzt. Falls dies nicht gemacht wird, entscheidet sich ein großer Teil der Bevölkerung lange Strecke zu Fuß zu laufen. (siehe Kapitel 8.1 *Limitationen*)

Außerdem wird nur 10% der Gesamtpopulation simuliert. Das heißt, dass auf dem gesamten Netzwerk nur 10% der ursprünglichen Fahrten stattfinden. Gleichzeitig reduziert sich auch die Kapazität aller Fahrzeuge um 90%, sodass das Gleichgewicht zwischen Verkehrsangebot und -nachfrage gleich bleibt. Bei der Auswertung der Ergebnisse werden die Output-Daten wieder auf 100% der Bevölkerung hochgerechnet.

6.3.2 Plan

Der Plan und die Agenten sind in beiden Simulationen identisch.

Er entstammt einer von MITO synthetisierten *Trip List*, welche vom Lehrstuhl für Verkehrsverhalten zur Verfügung gestellt wurde. Die in dieser Arbeit tatsächlich verwendeten Agenten sind nur diejenigen, die ohnehin schon die Verkehrsmittel des ÖV zur Fortbewegung wählen. Dazu gehören *train*, *bus*, *tram*, und *metro*. Die Modi *auto driver*, *auto passenger*, *bicycle* und *walk* wurden aussortiert und werden nicht weiter in der Simulation betrachtet. Eine Verkehrsmittelwahl findet bei den Agenten also nicht statt.

Die Anzahl der *trips*, die von den Agenten mit dem ÖV zurückgelegt werden, beläuft sich auf 740.655. Dabei ist ein *trip* entweder eine einfache Fahrt zum Zielort oder eine Hin- und Rückfahrt. MATSim akzeptiert dieses Format als Input, gibt jedoch als Output jede Fahrt einzeln an.

Beispiel: Wird der unten abgebildete Plan von dem Agenten ausgeführt, so werden dem Agenten zwei Fahrten für diesen Tag zugewiesen. Nämlich (1.) *Home-Work* und (2.) *Work-Home*.

```

<person id="person_359508">
  <plan selected="yes">
    <activity type="home" x="4459363.0" y="5336308.0" end_time="07:05:00" >
    </activity>
    <leg mode="pt">
    </leg>
    <activity type="work" x="4471662.5" y="5334571.5" end_time="16:21:00" >
    </activity>
    <leg mode="pt">
    </leg>
    <activity type="home" x="4459363.0" y="5336308.0" >
    </activity>
  </plan>
</person>

```

Abbildung 6.19: Auszug aus plan file

Die *trips* wurden schließlich, wie im Kapitel 6.3.1 *Configuration* schon beschrieben auf 10% herunterskaliert.

6.3.3 Network

Zu dem Basisszenario wurden 26 Links, also Streckenabschnitte für den SPNV, hinzugefügt. Diese verbinden jeweils die Stationen des Rings im und gegen den Uhrzeigersinn miteinander.

Ein Link hat mehrere Parameter, die jeweils einzeln bestimmt werden.

```
<link id="pt_10096_rb_pt_11939_rb" from="pt_10096_rb" to="pt_11939_rb"
length="5675.940224" freespeed="20.8333" capacity="9999.0"
permlanes="1.0" oneway="1" modes="bus,artificial" >
</link>
```

Abbildung 6.20: Auszug aus network file, Abschnitt link

Parameter *length*: Die Länge der Strecke berechnet sich jeweils durch den Satz des Pythagoras. Im oben gegebenen Beispiel heißt das folgendes:

```
<node id="pt_10096_rb" x="4482228.334016553" y="5335663.940722075" >
</node>

<node id="pt_11939_rb" x="4480089.023295596" y="5330406.598516752" >
</node>
```

Abbildung 6.21: Auszug auf network file, Abschnitt node

$$Length = \sqrt{(x_{10096} - x_{11939})^2 - (y_{10096} - y_{11939})^2}$$

Parameter *freespeed*: Hier wurde sich an den tatsächlichen Fahrtzeiten der S-Bahn im MVV-Netz orientiert. Für die Berechnung des *freespeed* in der Simulation wurde eine einfache lineare Regression durchgeführt (siehe Anhang A.3 *Berechnung freespeed*). Der in dieser Simulation verwendete *freespeed* wird auf 75km/h (20,83 m/s) gesetzt.

Dies überschreitet die technisch mögliche Höchstgeschwindigkeit der aktuell eingesetzten Triebzüge der DB-Baureihe 423 von 140km/h (38,89 m/s) nicht und kann somit als *freespeed* angenommen werden. (DB Regio, 2023; VRS, 2022)

Parameter *capacity*, *permlanes*, *oneway*, *modes*: Hier wurden die oben zu sehenden Standardeinstellungen beibehalten.

6.3.4 Schedule

Um eine möglichst ausgeglichene Auslastung über den Tag zu ermöglichen, soll die Ringbahn mit mehreren Fahrzeugen gleichzeitig befahren werden. Daher werden zwei gegenüber voneinander liegenden Haltestellen gewählt werden. In dieser Simulation starten (und enden) die Züge jeweils an den Haltestellen Dachau und Unterhaching.

Das heißt es gibt vier Routen:

- Dachau (bis Dachau) im Uhrzeigersinn
- Dachau (bis Dachau) gegen den Uhrzeigersinn
- Unterhaching (bis Unterhaching) im Uhrzeigersinn
- Unterhaching (bis Unterhaching) gegen den Uhrzeigersinn

Die Züge sollen den ganzen Tag über mit einem realistischen Takt fahren. Dieser ist an die Hauptverkehrszeiten angepasst und fährt zu diesen in einer höheren Frequenz. Für die Simulation wurde für jede Route der Fahrplan der S-Bahn-Haltestelle *Unterhaching* genommen. In der Abbildung 6.22 sind die Abfahrtszeiten von *Unterhaching* in Richtung *Mammendorf* montags-freitags zu erkennen (Stand 11.12.2022). (MVV, 2022a)



Diese Abbildung ist urheberrechtlich geschützt und ist somit nicht in Online-Version dieser Bachelorarbeit verfügbar.

Abbildung 6.22: Fahrplan Unterhaching (MVV, 2022a)

In MATSim sieht das beispielhaft wie folgt aus:

```
<departures>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_00:37:00" departureTime="00:37:00" vehicleRefId="DachauUZS_1"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_01:17:00" departureTime="01:17:00" vehicleRefId="DachauUZS_2"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_02:17:00" departureTime="02:17:00" vehicleRefId="DachauUZS_3"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_04:37:00" departureTime="04:37:00" vehicleRefId="DachauUZS_4"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_04:57:00" departureTime="04:57:00" vehicleRefId="DachauUZS_5"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_05:17:00" departureTime="05:17:00" vehicleRefId="DachauUZS_6"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_05:37:00" departureTime="05:37:00" vehicleRefId="DachauUZS_7"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_05:57:00" departureTime="05:57:00" vehicleRefId="DachauUZS_8"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_06:17:00" departureTime="06:17:00" vehicleRefId="DachauUZS_9"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_06:27:00" departureTime="06:27:00" vehicleRefId="DachauUZS_10"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_06:37:00" departureTime="06:37:00" vehicleRefId="DachauUZS_11"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_06:47:00" departureTime="06:47:00" vehicleRefId="DachauUZS_12"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_06:57:00" departureTime="06:57:00" vehicleRefId="DachauUZS_13"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_07:07:00" departureTime="07:07:00" vehicleRefId="DachauUZS_14"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_07:17:00" departureTime="07:17:00" vehicleRefId="DachauUZS_15"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_07:27:00" departureTime="07:27:00" vehicleRefId="DachauUZS_16"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_07:37:00" departureTime="07:37:00" vehicleRefId="DachauUZS_17"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_07:47:00" departureTime="07:47:00" vehicleRefId="DachauUZS_18"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_07:57:00" departureTime="07:57:00" vehicleRefId="DachauUZS_19"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_08:07:00" departureTime="08:07:00" vehicleRefId="DachauUZS_20"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_08:17:00" departureTime="08:17:00" vehicleRefId="DachauUZS_21"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_08:27:00" departureTime="08:27:00" vehicleRefId="DachauUZS_22"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_08:37:00" departureTime="08:37:00" vehicleRefId="DachauUZS_23"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_08:47:00" departureTime="08:47:00" vehicleRefId="DachauUZS_24"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_08:57:00" departureTime="08:57:00" vehicleRefId="DachauUZS_25"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_09:07:00" departureTime="09:07:00" vehicleRefId="DachauUZS_26"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_09:17:00" departureTime="09:17:00" vehicleRefId="DachauUZS_27"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_09:37:00" departureTime="09:37:00" vehicleRefId="DachauUZS_28"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_09:57:00" departureTime="09:57:00" vehicleRefId="DachauUZS_29"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_10:17:00" departureTime="10:17:00" vehicleRefId="DachauUZS_30"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_10:37:00" departureTime="10:37:00" vehicleRefId="DachauUZS_31"/>
  <departure id="DachauUhrzeigersinn_10:57:00" departureTime="10:57:00" vehicleRefId="DachauUZS_32"/>

```

Abbildung 6.23: Auszug aus schedule file, Abfahrten der Route ‚Dachau im Uhrzeigersinn‘

Um zu bestimmen, wie lange es dauert von einer Station zur benachbarten zu fahren, werden die Informationen über die Längen der Strecken aus *Network* (siehe Kapitel 6.3.3 *Network*) verwendet.

Die aufgebrauchte Zeit für die Überwindung der Entfernung wird mit der Formel für Durchschnittsgeschwindigkeit

$$Zeit = \frac{Strecke}{Geschwindigkeit}$$

berechnet und im Anschluss auf die volle Minute aufgerundet.

Tabelle 6.7: Ergebnisse Fahrzeit am Beispiel der Linie ‚Dachau im Uhrzeigersinn‘

Strecke		Strecke [m]	Geschwindigkeit [m/s]	Zeit [s]	Zeit [min]
von	nach				
Dachau	Unterschleißheim	10.792	20,83	518	9
Unterschleißheim	Garching-Forschungszentrum	7.196	20,83	345	6
Garching-Forschungszentrum	Ismaning	4.356	20,83	209	4
Ismaning	Heimstetten	9.563	20,83	459	8
Heimstetten	Haar	5.676	20,83	272	5
Haar	Ottobrunn	6.630	20,83	318	6
Ottobrunn	Unterhaching	4.879	20,83	234	4
Unterhaching	Pullach	6.779	20,83	325	6
Pullach	Planegg	9.573	20,83	460	8
Planegg	Germering	4.524	20,83	217	4
Germering	Puchheim	4.885	20,83	234	4
Puchheim	Olching	4.401	20,83	211	4
Olching	Dachau	9.477	20,83	455	8

Nach dem Aufsummieren der Fahrzeiten der jeweiligen Haltestellen ergibt sich folgendes Bild:

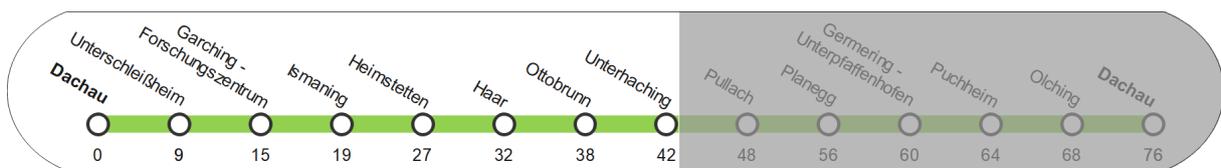


Abbildung 6.24: Zeitplan der Route ‚Dachau im Uhrzeigersinn‘

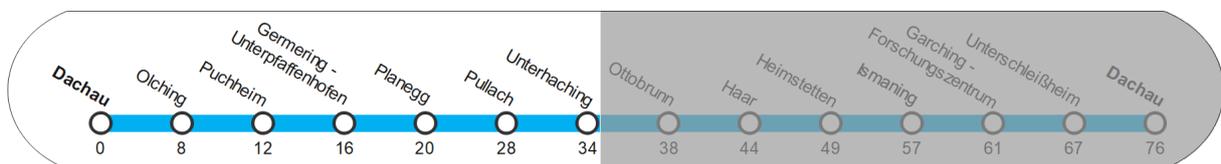


Abbildung 6.25: Zeitplan der Route ‚Dachau gegen den Uhrzeigersinn‘

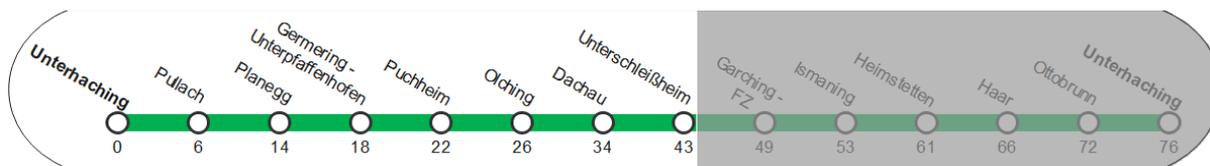


Abbildung 6.26: Zeitplan der Route ‚Unterhaching im Uhrzeigersinn‘

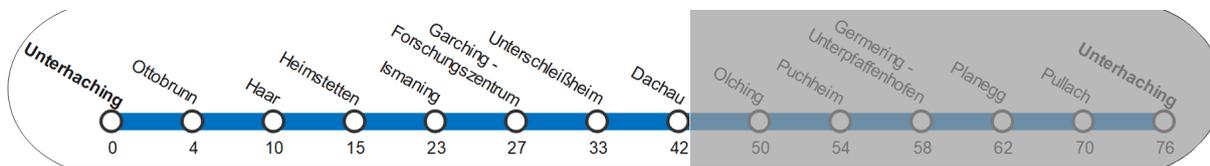


Abbildung 6.27: Zeitplan der Route ‚Unterhaching gegen den Uhrzeigersinn‘

Die einmalige Umrundung der Stadt München auf der vorgestellten Strecke dauert 1:16h.

6.3.5 Vehicles

Als Fahrzeugtyp wurde das bereits im Basisszenario konfigurierte *rail* ausgewählt. Die voreingestellten Parameter wurden identisch übernommen. Die geometrischen Abmessungen und Kapazität stimmen zwar nicht genau mit dem Realfall überein, genügen jedoch für simulationszwecke.

Auch hier wurde, wie bereits im Kapitel 6.3.1 *Configuration* erwähnt, die Kapazität der Fahrzeuge auf 10% herab skaliert.

```

<vehicleType id="rail">
  <capacity>
    <seats persons="30"/>
    <standingRoom persons="0"/>
  </capacity>
  <length meter="7.5"/>
  <width meter="1.0"/>
  <accessTime secondsPerPerson="1.0"/>
  <egressTime secondsPerPerson="1.0"/>
  <doorOperation mode="serial"/>
  <passengerCarEquivalent pce="1.0"/>
</vehicleType>
    
```

Abbildung 6.28: Auszug aus vehicle file

Für jede Fahrt wurde ein eigenes Fahrzeug erschaffen (siehe Abbildung 6.23).

Nun ist der S-Bahn-Ring als eigenes Szenario in MATSim integriert.

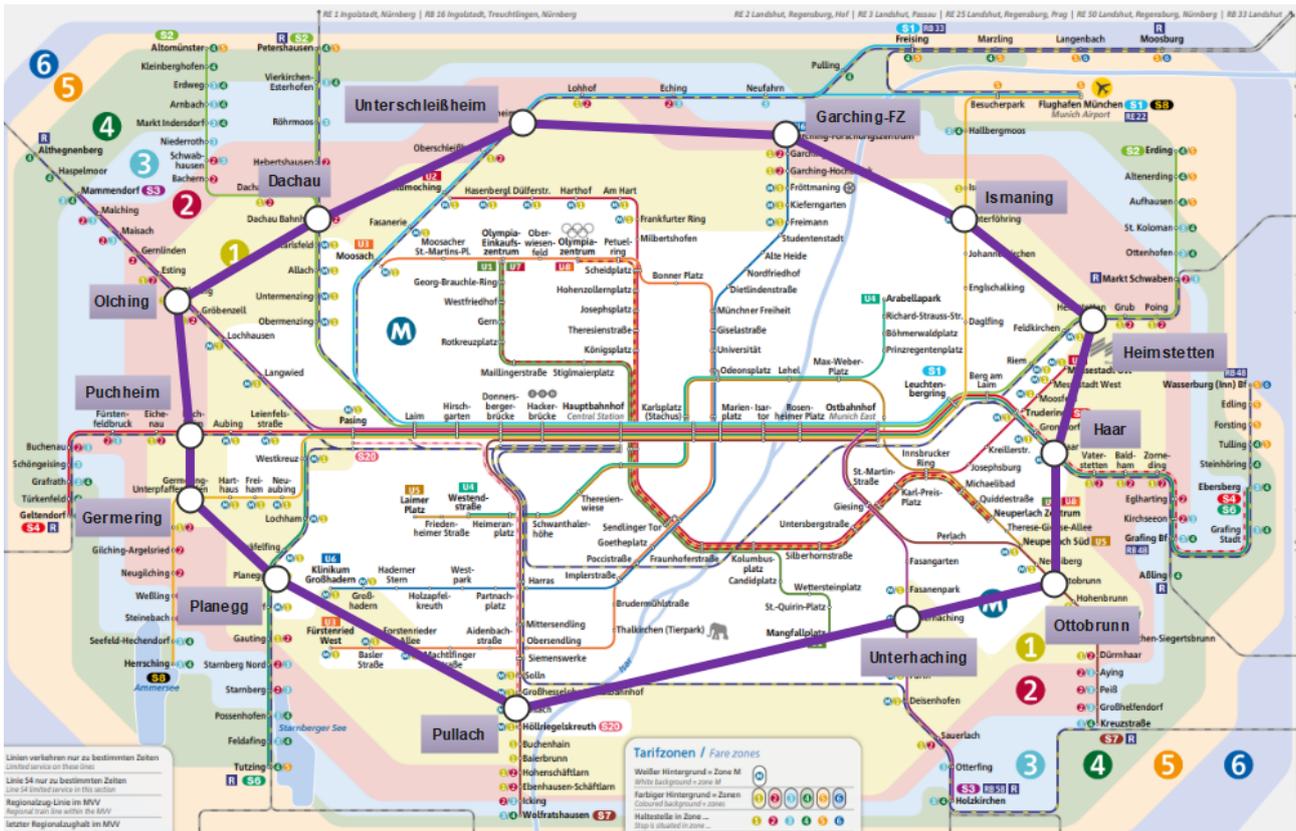


Abbildung 6.29: Ring im MVV-Netz (Abbildungsgrundlage: MVV)

7 Bewertung der Maßnahme

Das Ziel dieser Arbeit ist eine Aussage darüber zu treffen, ob eine Nachfrage zwischen den Gemeinden im Münchner Umland besteht und inwiefern die Ringbahn das Potential hat diese zu erfüllen.

Dafür werden zunächst qualitativ Vor- und Nachteile des Ringnetzsystems aufgelistet.

Im nächsten Schritt wird eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Als zentralen Kriterien dienen die simulierte **Reisezeit** und die **Anzahl der Umstiege**.

Um für die abweichende Zeitwahrnehmung der Fahrgäste aufzukommen, wird eine weitere Nutzwertanalyse durchgeführt, bei der die Zeitbewertung der Reiseetappen beachtet wird.

Schließlich werden die simulierten Ein- und Ausstiege an den einzelnen Haltestellen der Ringbahn, also die Streckenabschnittsbelastungen, untersucht.

7.1 Vorteile und Nachteile des Ringnetzsystems

Vorteile	Nachteile
Attraktiver ÖPNV für den Fahrgast	Hohe Bau-, Wartungs-, Personal- und Betriebskosten
Mitwirkung zur Sicherung der Mobilität	Teils drastischer Eingriff in die Natur und in das Stadtbild
Schaffung gleichwertiger Lebensbedingungen für: <ul style="list-style-type: none"> • Benachteiligte Gesellschaftsgruppen • Die ländliche Bevölkerung 	Komplizierte überkommunale Planung mit Beteiligung vieler Akteure verschiedener Interessensgruppen
Ausbau einer zukunftsorientierten klimafreundlichen Strecke (elektrifiziert, potentiell emissionsfrei)	
Beitrag zur Erfüllung politischer Ziele: <ul style="list-style-type: none"> • Zwei-Grad-Ziel (<i>Übereinkommen von Paris</i>, UNFCCC, 2015) • 30% des Verkehrs in München soll mit dem ÖV stattfinden. (MVG, 2023b) (München, 2023) 	

Abbildung 7.1: Vor- und Nachteile einer Ringbahn

7.2 Nutzwertanalyse

Bei der Nutzwertanalyse (NWA) wird nach Definition eines Zielsystems und eines Untersuchungsgebiets durch Skalentransformation eine Zielerfüllungsgerade von den einzelnen Kriterien erstellt. Aus den daraus hervorgehenden Zielwerten und unter Berücksichtigung ihrer Gewichtung wird ein Gesamtnutzwert ermittelt. Schließlich werden die Gesamtnutzwerte aller Szenarien miteinander verglichen. (Köhler, 2014)

7.2.1 Definition Zielsystem

Oberziel	Unterziel	Zielkriterium
Minimierung der generalisierten Kosten	Verringerung der Reisezeit	Durchschnittlich gefahrene Zeit t_{Reise}
	Verringerung der Umstiege	Durchschnittliche Anzahl der Umstiege $n_{Umstieg}$

7.2.2 Definition Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst alle Gemeinden, die an das MVV-Netz angeschlossen sind (blau) sowie alle Gemeinden, die eine gemeinsame Grenze mit den erstgenannten Gemeinden haben (grün).

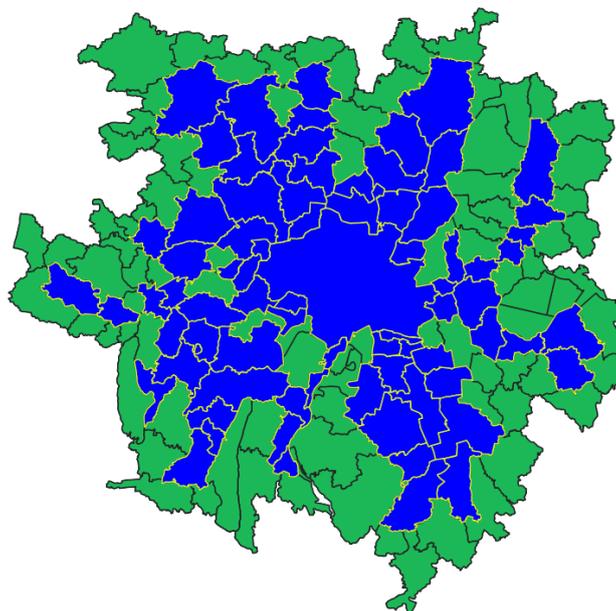


Abbildung 7.2: Untersuchungsgebiet

7.2.3 Zilerträge

Von den 123.655 simulierten Fahrten im Basisszenario mit dem ÖPNV in der gesamten Münchner Metropolregion fanden 98.364 im Untersuchungsgebiet statt. Das heißt, dass sie einen Start- und/oder einen Zielpunkt im Untersuchungsgebiet haben. Von ihnen sind 8.736 Strecken (ca. 9%) ausschließlich zu Fuß zurückgelegt worden. Zudem wurden 15.418 Fahrten (ca. 16%) von Agenten

ausgeführt, die länger als 30 Minuten an einer Haltestelle gewartet haben. Keiner der beiden Fahrtentypen wird bei der Bewertung der Szenarien betrachtet (siehe Kapitel 8.1 *Limitationen*).

Nur die brauchbaren 74.168 Fahrten (ca. 75%) im Basisszenario, bei denen Fahrgäste nicht länger als 30 Minuten auf den ÖPNV warten, werden mit ihren Gegenstücken im Ringszenario verglichen. Um dies zu tun, werden alle Ergebnisse der Simulation mit dem Faktor 10 multipliziert. Sie wurden vorher in der Konfigurationsdatei mit dem Faktor 0,1 verrechnet, um die Rechenkapazität des Computers nicht zu übersteigen. (siehe Kapitel 6.3.1 *Configuration*)

Die folgende Tabelle zeigt die durchschnittliche Reisezeit und Anzahl an Umstiege der jeweils 741.680 Fahrten pro Szenario:

Tabelle 7.1: Ergebnisse der Simulation (Durchschnittswerte)

Durchschnittswerte	Zielkriterium	
	t_{Reise} [min]	$n_{Umstieg}$ [-]
Basisszenario	55,25	1,74
Ringszenario	55,14	1,75

Schon hier lässt sich erkennen, dass der Einfluss der Maßnahme relativ gering ist. Pro Fahrt hat ein Agent eine durchschnittliche Zeitersparnis von 0,11 Minuten (also ca. 7 Sekunden) und muss dafür 0,01 Umstiege mehr machen. Anders ausgedrückt: Bei jeder hundertsten Fahrt muss der Agent im Ringszenario einmal öfter umsteigen als im Basisszenario.

Tabelle 7.2: Ergebnisse der Simulation (Akkumulierte Werte)

Akkumulierte Werte	Σt_{Reise} [h]	$\Sigma n_{Umstieg}$ [-]
Basisszenario	683.020	1.292.270
Ringszenario	681.630	1.295.370

Bei Betrachtung der akkumulierten Ergebnisse, stellt sich heraus, dass die Agenten im Ringszenario bei 741.680 Fahrten insgesamt zwar 1390 Stunden weniger gefahren sind, gleichzeitig jedoch 3100-mal mehr umgestiegen sind.

Eine weitere Aussage liefert der Wert über die Anzahl der Fahrten, die mit dem Ring gemacht wurden. 23.930 aller dokumentierten Strecken wurden im Ringszenario über den Ring zurückgelegt. Das heißt, dass für 3,2% aller ÖV-Nutzer der Weg über die Ringbahn die beste Alternative ist.

Um eine deutliches Urteil über eine quantitative Veränderung der Maßnahme hinsichtlich der Zielkriterien t_{Reise} und $n_{Umstieg}$ zu fällen, müssen diese gegeneinander abgewogen werden. Dafür müssen sie durch eine Skalentransformation auf eine gemeinsame Einheit gebracht werden.

7.3 Nutzwertanalyse ohne Zeitbewertung

7.3.1 Skalentransformation

Um in dieser Nutzwertanalyse die Unsicherheit möglichst gering zu halten, werden nicht wie bei KÖHLER vorgeschlagen beide Kriterien in eine dimensionslose Größe umgewandelt, sondern nur die Anzahl der Umstiege in die reisezeitäquivalente Einheit $n_{\text{äquivalent}}$ umgerechnet. Es ist wichtig zu betonen, dass sich bei $n_{\text{äquivalent}}$ explizit nicht um die Umstiegszeit handelt, sondern lediglich eine Umformung des Kriteriums n_{Umstieg} in die entsprechende Einheit. Die Umstiegszeit hingegen ist bereits in die Reisezeit miteinkalkuliert.

Da der Nutzwert nun, abweichend von KÖHLER, die Zeiteinheit [*min*] besitzt, spricht ein kleinerer Wert für eine bessere Gesamtbewertung als ein größerer. Je kleiner der Nutzwert, desto kürzer sind die Reisezeiten der Agenten, und umgekehrt.

Trotz mehrmaliger Nachfrage bei verschiedenen, nationalen Verkehrsbetrieben und -verbänden konnte kein praxisnaher Skalierungsfaktor für die Umrechnung des Kriteriums ermittelt werden. Daher wird dieser für die Nutzwertanalyse als $13 \frac{\text{min}}{\text{Umstieg}}$ (CTPS, 1997) angenommen.

$$n_{\text{äquivalent}} = n_{\text{Umstieg}} * 13 \text{ min}$$

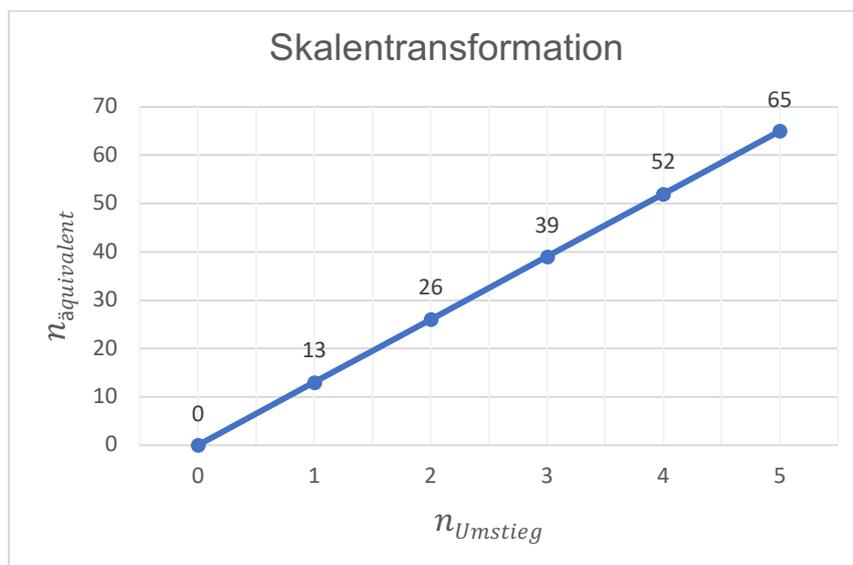


Abbildung 7.3: Skalentransformation

Für die simulierten Szenarien bedeutet das:

$$n_{\text{äquivalent}, \text{Basis}} = 22,62 \text{ min}$$

$$n_{\text{äquivalent}, \text{Ring}} = 22,75 \text{ min}$$

7.3.2 Gewichtung

Wie eine Person die Relevanz von Fahrtzeit und Anzahl der Umstiege bei der Routenwahl bewerten, ist sehr individuell. Alter, körperlicher Zustand, Wetter, Temperatur, Tageszeit, Gepäck und

Gewohnheit sind nur einige der vielen Parameter, die diese Entscheidung beeinflussen. Eine Modellierung dieser Fragestellung ist äußerst komplex. Das gleiche gilt auch für die Erstellung einer repräsentativen Umfrage der Bevölkerung, die mit dem ÖV fahren. (Walther, 1980)

Deswegen wird im Folgenden die Annahme getroffen, dass beide Kriterien als gleichwertig angesehen werden.

$$g_{t_{Reise}} = g_{n_{\text{äquivalent}}} = 1$$

7.3.3 Nutzwertbestimmung

Mit den oben aufgeführten Werten lässt sich der jeweilige Nutzwert NW der Szenarien durch die Gleichung

$$NW = t_{Reise} * g_{t_{Reise}} + n_{\text{äquivalent}} * g_{n_{\text{äquivalent}}}$$

bestimmen. (Köhler, 2014)

Mit

$$g_{t_{Reise}} = g_{n_{\text{äquivalent}}} = 1$$

lässt sich diese zu

$$NW = t_{Reise} + n_{\text{äquivalent}}$$

vereinfachen.

Nun kann der Nutzwert sowohl für das Basis- als auch für das Ringszenario ausgerechnet werden.

$$NW_{Basis} = 77,87 \text{ min}$$

$$NW_{Ring} = 77,89 \text{ min}$$

An dieser Stelle lässt sich keine eindeutige Aussage treffen. Beide Szenarien sind bei Betrachtung des Gesamtsystems in etwa gleichwertig. Die Ringbahn bietet zunächst keinen eindeutigen Vorteil (bzw. Nachteil) gegenüber dem heutigen Verkehrsnetz.

Jedoch ist es das Ziel dieser Arbeit nicht nur die empirischen Größen als Kriterien miteinzubeziehen, sondern auch die Wahrnehmung des Fahrgasts. Deswegen wird nun eine *Quantifizierung des subjektiven Zeitempfindens* in Bezug auf die Reisezeit nach WALTHER durchgeführt. (Walther, 1980)

7.4 Nutzwertanalyse mit Zeitbewertung

7.4.1 Reisezeitkomponenten

Nach genauer Untersuchung der Reisezeit, wird diese in Teilhandlungen kategorisiert:



Abbildung 7.4: Reisezeitkomponenten im ÖV (Walther, 1980)

7.4.2 Reisezeitbewertung

Jede der oben genannten Komponenten wird von dem Fahrgast (bzw. Agenten) unterschiedlich wahrgenommen. Zum Beispiel fühlen sich zehn Minuten in einem auf Höchstgeschwindigkeit fahrenden Zug für den Passanten schneller an, als zehn Minuten am Bahnsteig wartend. Wahrscheinlich lässt sich dies auf die zurückgelegte Strecke während dieser Zeitspanne – also den Grad der effizienten Zeitnutzung – zurückführen. Doch auch Umweltfaktoren und persönliches Wohlbefinden beeinflussen dieses Gefühl stark. (Wetter, Temperatur, Lärm, Gerüche, Tageszeit, Begleitung, Gepäck, Sicherheitsgefühl etc.) (Walther, 1980)

Diesen Sachverhalt versucht WALTHER in Form von der fahrzeitäquivalenten Zeit t^* zu quantifizieren. Natürlich bieten die Werte nur eine grobe Orientierung, da Zeitempfinden äußerst komplex und individuell ist.

Dafür wird die Formel

$$t^* = ZB(t) * t$$

verwendet.

$ZB(t)$ ist die individuelle Zeitbewertung und t die physikalisch gemessene Zeit. $ZB(t)$ wird als

$$ZB(t) = A + B * t^C$$

approximiert.

Wobei für die Parameter A , B und C folgende Werte angenommen werden:

Tabelle 7.3: Zeitbewertungsfunktionen (Walther, 1980)



Die Zeitbewertung für die Beförderungszeit wird als $t_b = 1$ definiert.

In dieser Arbeit werden für alle Fahrzeugtypen aus der Simulation vereinfacht nur die Parameterwerte für das Verkehrsmittel S-Bahn zur genommen. Die folgende Abbildung veranschaulicht dafür die Zeitbewertungen der gelisteten Komponenten:

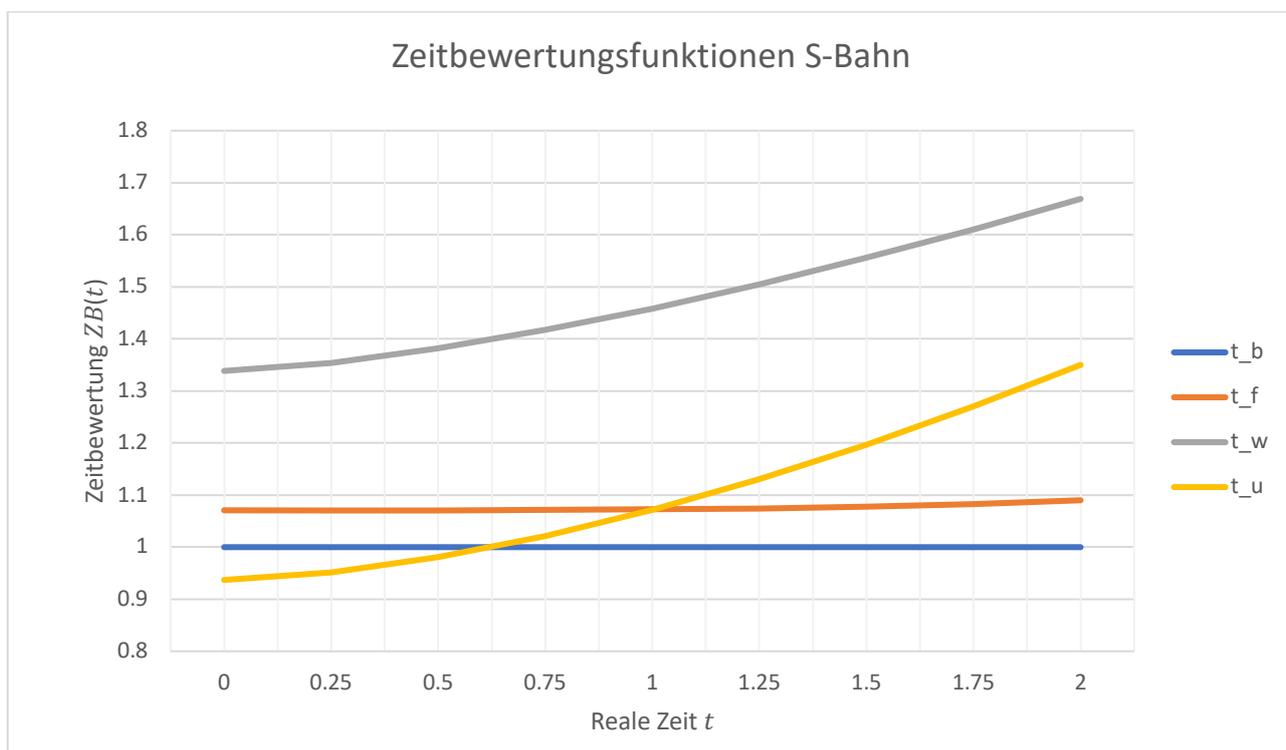


Abbildung 7.5: Graphische Darstellung der Zeitbewertungsfunktionen der S-Bahn

In Bezug auf die Beförderungszeit t_b wird die Zeit für den Fußweg t_f immer als länger und die Wartezeit t_w als deutlich länger empfunden. Dieses Gefühl steigt mit der Dauer der einzelnen Komponenten überlinear an. Die Umstiegszeit t_u hingegen wird zunächst sogar kürzer als t_b angesehen, wird jedoch nach ungefähr 0,6 realen Zeiteinheiten als ineffizienter bewertet. Ab diesem Punkt entwickelt sich das Empfinden stärker als bei t_w .

7.4.3 Berechnung

Durch die oben aufgeführten Formeln lässt sich somit die fahrzeitäquivalente Zeit t^* für beide Simulationen bestimmen. Die Komponenten t_b , t_f , t_w , und t_u lassen sich aus dem Simulationsoutput, genauer aus dem *legs file*, herauslesen.

Tabelle 7.4: Tabellen zur Berechnung von t^*

[min]	t_b	t_f	t_w	t_u	t_{gesamt}
Basisszenario	27,01	12,76	12,95	2,53	55,25
Ringszenario	26,64	12,76	13,23	2,51	55,14

	$ZB(t_b)$	$ZB(t_f)$	$ZB(t_w)$	$ZB(t_u)$
A	-	1,0708	1,3385	0,9370
B	-	0,0018	0,1201	0,1345
C	-	3,4206	1,4604	1,6186
Basisszenario	1	11,99	6,40	1,54
Ringszenario	1	11,99	6,56	1,53

[min]	t_b^*	t_f^*	t_w^*	t_u^*	t_{gesamt}^*
Basisszenario	27,01	153,03	82,91	3,89	266,84
Ringszenario	27,64	153,03	86,78	3,85	270,30

7.4.4 Nutzwertbestimmung:

Mit den ermittelten Werten für die fahrzeitäquivalente Zeit t^* kann ein neuer Nutzwert NW^* bestimmt werden.

$$NW^* = t^* * g_{t_{Reise}} + n_{\text{äquivalent}} * g_{n_{\text{äquivalent}}}$$

$$NW^* = t^* + n_{\text{äquivalent}}$$

Mit

$$n_{\text{äquivalent}, \text{Basis}} = 22,62 \text{ min}$$

$$n_{\text{äquivalent}, \text{Ring}} = 22,75 \text{ min}$$

$$NW_{\text{Basis}}^* = 289,46 \text{ min}$$

$$NW_{\text{Ring}}^* = 293,05 \text{ min}$$

Die zweite Nutzwertanalyse ergibt, dass das Basisszenario gegenüber dem Ringszenario einen leichten Vorteil hat. Im Ersteren hat der Fahrgast durchschnittlich seine Reisezeit um 3,59 Minuten kürzer empfunden. Das entspricht einem relativen Wahrnehmungsunterschied von ca. 1,2% zwischen den Szenarien. Obwohl also im Basisszenario eine höhere Fahrzeiten zurückgelegt wurden, haben beim Ringszenario die Umstiege den Unterschied im Gefühl gemacht.

7.5 Gegenüberstellung der Nutzwertanalysen

$$NW_{Basis} = 77,87 \text{ min}$$

$$NW_{Basis}^* = 289,46 \text{ min}$$

$$NW_{Ring} = 77,89 \text{ min}$$

$$NW_{Ring}^* = 293,05 \text{ min}$$

Das Auswertungsverfahren ohne Einbezug der Zeitwahrnehmung ergibt, dass das Einfügen eines Rings für den auf das Gesamtsystem bezogenen Nutzwert keinen signifikanten Einfluss hat. Vergleicht man die Nutzwerte unter Beachtung der Zeitbewertung, stellt sich heraus, dass der Ring eine kleine, negative Einwirkung im Vergleich zu dem Basisszenario hat.

Der einzige Unterschied zwischen den beiden Verfahren ist das Verwenden der Zeitbewertungsfunktionen nach WALTHER. Dennoch ist die Differenz der Nutzwerte zwischen den beiden Methoden massiv. Die fahrzeitäquivalente Einheit $n_{\text{äquivalent}}$ ist für beide Szenarien verfahrensübergreifend jeweils konstant, was bedeutet, dass die Abweichung aus der Fahrzeit selbst stammen muss.

$$t_{Basis} = 55,25 \text{ min}$$

$$t_{Basis}^* = 266,84 \text{ min}$$

$$t_{Ring} = 55,14 \text{ min}$$

$$t_{Ring}^* = 270,30 \text{ min}$$

Laut der Methodik nach WALTHER wird eine durchschnittliche Fahrt fast fünf Mal länger wahrgenommen, als sie tatsächlich ist. Dieser Wert variiert stark mit der Dauer der Fahrt, da die Zeitbewertungsfunktionen allesamt exponentiell sind. Eine kürzere Fahrt wird sich danach nicht nach der fünffachen Zeitspanne anfühlen, sondern beispielsweise nur doppelt so lang. Ein Weg, der jedoch die 55 Minuten stark überschreitet, kann mit einem Faktor größer 5 multipliziert werden.

Dennoch haben 23.930 Agenten (also 3,2%) die Ringlinie mit in ihre Routenwahl eingeplant, da diese die beste Alternative für sie ist. Die Verkehrsumlegung hat sich trotz einem schlechteren subjektiven Gesamtnutzwert verändert. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Agenten einen (zusätzlichen) Umstieg in Kauf nehmen, um im Gegenzug bei anderen Kriterien zu profitieren. Eine frühere Ankunft an den Zielort ist ein denkbares und nachvollziehbares Beispiel für diesen Fall.

7.6 Ein- und Aussteige auf der Ringlinie

Wie genau sich die 23.930 Agenten auf die Haltestellen der Ringbahn aufteilen, wird in diesem Kapitel ermittelt. Dafür wurden für jede Ringstation jeweils die Anzahl der Ein- und Ausstiege gezählt. In einem nächsten Schritt wird untersucht auf welcher Route, also ob im oder gegen den Uhrzeigersinn, die ein- und ausstiegen wurde.

Die meisten Ein- und Ausstiege dienen als Umstieg von bzw. auf eine andere Route. Nur wenige Haltestellen sind tatsächliche Start- bzw. Zielorte einer Reise. Eine quantitative Analyse über den Zweck der Ringnutzung dahingehend wurde nicht durchgeführt.

Tabelle 7.5: Ein- und Ausstiege auf der Ringlinie

Haltestelle	Im Uhrzeigersinn		Gegen den Uhrzeigersinn		Summe Ein- stiege	Summe Aus- stiege	Summe Ein- und Ausstiege
	Einstiege	Ausstiege	Einstiege	Ausstiege			
Dachau	1.650	620	910	720	2.560	1.340	3.900
Unterschleißheim	700	470	310	1380	1.010	1.850	2.860
Garching- Forschungszentrum	1.940	1.790	1.380	1950	3.320	3.740	7.060
Ismaning	670	1.480	1.500	570	2.170	2.050	4.220
Heimstetten	1.030	620	680	560	1.710	1.180	2.890
Haar	950	1.440	960	770	1.910	2.210	4.120
Ottobrunn	610	460	700	410	1.310	870	2.180
Unterhaching	1.140	990	950	1190	2.090	2.180	4.270
Pullach	300	1.170	600	1080	900	2.250	3.150
Planegg	1.270	610	850	760	2.120	1.370	3.490
Germering	990	1.000	1.380	940	2.370	1.940	4.310
Puchheim	730	980	760	620	1.490	1.600	3.090
Olching	340	690	630	660	970	1.350	2.320

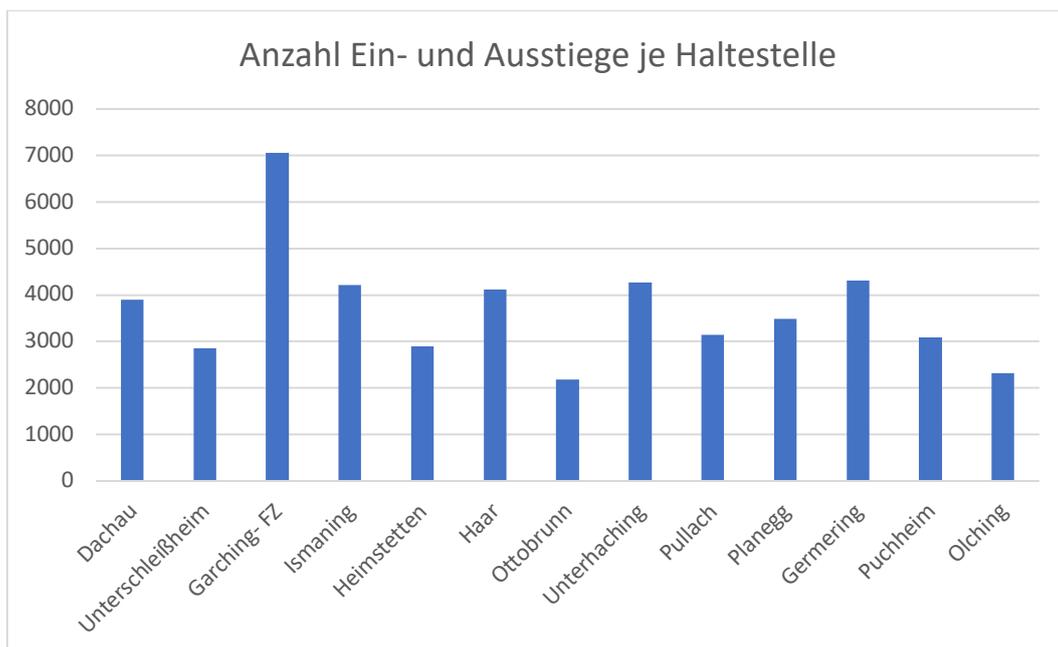


Abbildung 7.6: Ein- und Ausstiege auf der Ringlinie

Es lässt sich deutlich erkennen, dass an der Haltestelle *Garching-Forschungszentrum* am meisten Nachfrage für die Ringbahn herrscht. Knapp über 7000 Ein- und Ausstiege werden dort in der Simulation absolviert. Das nächstgrößte Aufkommen haben Haltestellen, die mehr als 4000 Fahrgästen eine Plattform bieten. Dazu gehören *Ismaning*, *Haar*, *Unterhaching* und *Germering*. Mit 3900 liegt ebenfalls *Dachau* in dieser Größenordnung. Die restlichen Haltestellen benötigen laut der Simulation eine Kapazität von jeweils 2000-3500 Ein- und Ausstiegen.

Die folgende Abbildung gibt die Auslastungen der Haltestellen maßstabsgetreu wieder.

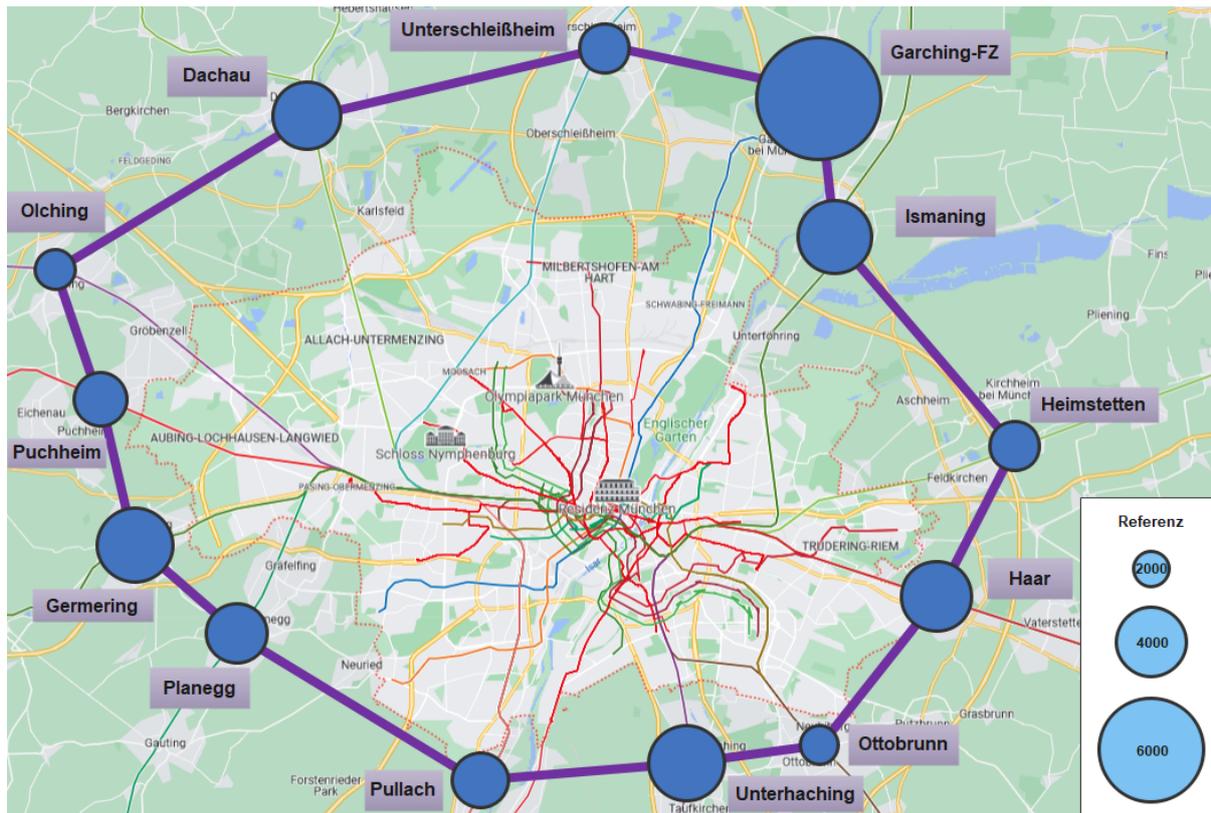


Abbildung 7.7: Visualisierung der Abbildung 7.6 (Kartengrundlage: Google Maps)

Auffällig ist, dass die Einwohner- und Beschäftigtenzahlen der Gemeinden nicht unbedingt die Nachfrage für die Ringbahn widerspiegeln.

Tabelle 7.6: Einwohner- und Beschäftigtenzahlen der Gemeinden an der Ringbahn

Linie	Streckenabschnitt	Größte Gemeinde	Einwohner- und Beschäftigtenzahl
S2	West	Dachau	54.055
S6	West	PGK	47.495
S8	West	Germering	42.875
S1	-	Unterschleißheim	40.573
S7	Ost	Ottobrunn	32.170
S3	Ost	Unterhaching	29.114
U6	-	Garching b. München	28.494
S3	West	Olching	28.489
S4/S6	Ost	Haar	28.291
S8	Ost	Ismaning	27.850
S4	West	Puchheim	24.220
S2	Ost	Kirchheim	19.137
S7	West	Pullach	15.307

Alle Gemeinden mit über 4000 Ein- und Ausstiegen, mit Ausnahme von *Germering*, befinden sich bei Betrachtung der Bevölkerung eher im Mittelfeld. Dennoch scheinen die Agenten gerade aus den Gemeinden im Münchner Osten ein Interesse daran zu haben mit der Ringbahn zu fahren.

Zweifelsohne ist die Verbesserung der Konnektivität des TUM-Campus *Garching-Forschungszentrum* einer der Hauptfaktoren für die Nachfrage der Ringbahn. Gerade Studenten und Mitarbeiter der Universität, für die die Fahrt mit der *U6* aus Richtung der Innenstadt ein Umweg ist, profitieren von der Ringbahn (siehe Abbildung 5.5). Jedoch dient sie Menschen, die auf der gegenüberliegenden Seite der Stadt wohnen, nicht als relevante Alternative.

Ein weiterer möglicher Grund für die unverhältnismäßig stärkere Nachfrage im Osten könnte der Flughafen sein. Er ist eine ausschlaggebende Quelle für den regionalen Verkehr, der weitreichende Auswirkungen auf das gesamte Stadtgebiet hat. Täglich reist eine Vielzahl von Menschen zum und vom Flughafen mit dem ÖPNV. Ähnlich wie im vorigen Absatz bedeutet ein S-Bahn-Ring einen besseren Anschluss an den Flughafen, was einen Effekt auf die Fahrgastzahlen haben kann. Das würde auch erklären, warum sich die Anzahl der Ein- und Ausstiege nicht zwangsläufig in den Bevölkerungszahlen widerspiegelt.

8 Diskussion

8.1 Limitationen

Ein Modell ist nie ein Abbild der Realität, sondern lediglich ein Versuch sich dieser anzunähern. Daher ist es wichtig sich mit den Einschränkungen eines Modells zu beschäftigen, um Ergebnisse besser interpretieren zu können.

In diesem Kapitel werden die Limitationen aufgelistet, die einen Einfluss auf das Resultat haben. Dazu zählen auch Einschränkungen, die aktiv eingesetzt wurden, um den Rahmen einer Bachelorarbeit einzuhalten bzw. die technische Machbarkeit zu gewährleisten.

Implizierte Limitationen, die mit MATSim und Modellen im Allgemeinen einhergehen, können in der entsprechenden Literatur nachgelesen werden und werden hier weiter nicht erwähnt. (Horni et al., 2016); (Moeckel et al., 2020) (Moeckel, 2013)

- Die Planung und Analyse der Ringbahn erfolgt rein konzeptionell. Faktoren, die im Realfall eine große Rolle bei der Planung eines solchen Projekts spielen, werden in dieser Arbeit ignoriert. Dazu gehören unter anderem die Kosten, die Topographie, die Demographie, die bestehende Bebauung.
- Verkehrsverbesserungsmaßnahmen werden im Normalfall auf lange Sicht geplant. Ein essentieller Bestandteil, vor allem für eine dynamisch wachsende Stadt wie München, ist eine Abschätzung über die Bevölkerungsentwicklung der nächsten Jahrzehnte. Von einer solchen Prognose wird in dieser Arbeit abgesehen.
- Ebenso ignoriert werden sich in der Ausführungs – und Planungsphase befindenden Verkehrsprojekte und verkehrspolitische Entscheidungen. Als Beispiel kann man hier den Ausbau der U5 nach Pasing und das Dieselfahrverbot (geltend ab 01.02.2023) (München, 2022) nennen.
- Beide Vergleichssimulationen werden mit jeweils zehn Iterationen ausgeführt. Eine größere Anzahl an Durchführungen würde zwar eine leicht höhere Genauigkeit der Simulationsergebnisse mit sich bringen, diese wird jedoch als vernachlässigbar eingestuft.
- Der S-Bahn-Ring ist ein abgeschlossenes System. Verkehrereignisse auf anderen Strecken haben in der keinerlei Einfluss auf der Fahrplan des Rings. Der Fahrplan wird zu jedem Zeitpunkt plangemäß ausgeführt.
- Obwohl eine Ringbahn eigene Haltestellen brauchen würde, wurden in der Simulation nur bereits vorhandene Stationen verwendet. Der S-Bahn-Ring verläuft jeweils nahezu senkrecht zu den Fahrtstrecken des aktuellen MIV-Netzes, sodass im Realfall neue Bauwerke errichtet werden müssten. Diese hätten dann auch abweichende Koordinaten.
- Als Fahrplan wurde für jede Station der Fahrplan für Unterhaching gewählt. Die Fahrpläne anderer Transitlinien von/ auf welche ein Umstieg möglich wäre, wurden nicht beachtet. Im Realfall würde man die Abfahrtszeiten unter Betrachtung anderer ÖPNV-Linien optimieren.
- Für jede simulierte Fahrt mit der Ringbahn wurde ein neues Fahrzeug kreiert. Im Normalfall kann ein Fahrzeug jedoch mehrere Fahrten machen.
- Die Streckeabschnitte auf der Ringbahn werden als Geraden angenommen. Dadurch ist die Berechnung der Länge dieser ebenso nur eine Annäherung. In Wirklichkeit würde die tatsächliche Streckenführung durch Krümmungen und Ausbuchtungen die Streckenlänge beeinflussen.

- Im Rahmen der Arbeit wird nur der Teil der simulierten Bevölkerung angeschaut, der bereits die öffentlichen Verkehrsmittel (also die Modi: *Walk* und *Public Transport*) nutzt. Menschen, für die die beste Wahl das Auto ist (ca. 90%), wurden vorher ausgefiltert. Das führt dazu, dass nur etwa 10% der Bevölkerung beachtet. Es kann keine Aussage über den Modal Split getroffen werden.
- Im Output der Simulationen existieren unbrauchbare Daten. Agenten, die jede Strecke zu Fuß gehen und Fahrgäste, die länger als 30 Minuten auf den ÖPNV warten. Diese 25% der Gesamtfahrten werden nicht weiter in der Bewertung untersucht. Dennoch haben sie in der Simulation einen Einfluss auf die Ergebnisse.
- In dieser Arbeit werden die Zeitbewertungsfunktionen nach WALTHER nur Werte der S-Bahn genommen – unabhängig von den Fahrzeugtypen in der Simulation.

8.2 Fazit

Der Vergleich der Simulationen des Basisszenarios mit dem Ringszenario ergab, dass sich eine Ringlinie im Münchner Umland den Nutzwert des Gesamtsystems um 1,2% verschlechtert, zumindest bei Betrachtung der Reisezeitbewertung. Wählt man also den Nutzwert als einziges Entscheidungskriterium, gibt es keinen Grund den in dieser Arbeit vorgestellten Ring als eine mögliche Erweiterung des öffentlichen Verkehrsnetzes weiterzuverfolgen.

Jedoch wurde bei der Bewertung der Ringbahn den Umstiegen eine relativ hohe Zeitstrafe (13 Minuten) zugeordnet, obwohl ersichtlich war, dass mehr Fahrgäste umsteigen werden müssen. Es liegt in der Natur eines Ringnetzsystems, dass von ihm vor allem Menschen profitieren, die zwischen stadtnahen Ortschaften fahren. Falls der Start- und der Zielort nicht in einer Ringbahn-Gemeinde liegen, müssen zwei radiale Verbindungen stadteinwärts bzw. stadtauswärts genommen werden, um eine Möglichkeit zu haben in den tangentialen S-Bahn-Ring zuzusteigen. Die Alternative im SPNV ohne den einen Ring wäre die Fahrt mit nur einem Umstieg in der Innenstadt zu absolvieren, was jedoch zu höheren Fahrtzeiten führen könnte. Bedenkt man diese Zusammenhänge bei der Auswertung der Analyse, scheint der kaum veränderte tatsächliche Nutzwert der Ringbahn ein gutes Signal für die Verbesserung der Verkehrsqualität zu sein.

Zumindest für 3,4% der Bevölkerung konnte in der Simulation ein konkreter Vorteil des Rings gegenüber des bisherigen Verkehrsnetzes nachgewiesen werden. Für sie hat sich dieser sofort, also in ihren derzeitigen Lebensverhältnissen (Plänen) gelohnt, ohne dass langfristige Mobilitätsentscheidungen für den Ort der Aktivitäten angepasst werden mussten. Bei all dem wurden andere Fahrgäste des öffentlichen Verkehrs nicht weiter benachteiligt.

Indirekt wurde aber auch der gesamtgesellschaftliche Nutzen gefördert, die Mobilität zu sichern. Alleine durch die Ergänzung einer neuen Alternative, werden die anderen Linien entlastet und führen somit zu einer Steigerung der Attraktivität des ÖPNV. Außerdem ist die Wahrscheinlichkeit eines Systemausfalls reduziert worden, da im Falle von baulichen Maßnahmen oder anderen Notfällen mit der Ringbahn eine neue Umgehungsstrecke zur Verfügung steht. Allerdings gilt dieses Argument nicht ausschließlich für das Ringnetzsystem, da jede Erweiterung des öffentlichen Verkehrsnetzes diesen Effekt hätte.

Bei näherer Untersuchung der Verkehrsumlegung wurde festgestellt, dass Gemeinden im Osten der Stadt das neue Verkehrsangebot öfter nutzen, als die westliche Hälfte. Als Gründe dafür wurden die starken Pull-Faktoren des Universitätscampus in Garching und des Flughafens angeführt.

Die Verkehrsplanung ist eine multi-, inter- und transdisziplinäre Aufgabe, die nicht nur nach dem Bedarf handeln sollte, sondern strategisch ausgerichtet sein muss. Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage beeinflussen sich wechselseitig, weshalb es wichtig ist vorrausschauend zu denken und zu handeln. Langfristige Mobilitätsentscheidungen, wie die Wahl des Arbeitsplatzes, hängen stark von der Erreichbarkeit von Orten über (öffentliche) Verkehrswege ab. Wenn keine Möglichkeit geboten wird sich fortzubewegen, wird es auch niemand tun.

Deswegen sollte die Idee der Ringbahn nicht gänzlich verworfen werden. Obwohl die Umsetzung des Vorschlags für die vorgestellte Ausarbeitung nicht optimal ist, kann sie durchaus als Orientierung für ein ähnliches Planungsprojekt dienen.

Diese Arbeit hat gezeigt, dass es durchaus eine Verkehrsnachfrage zwischen Gemeinden im Münchner Umland gibt. Obwohl diese nicht enorm ist, darf man sie nicht vernachlässigen. Eine Ringbahn hat das Potential diesen Bedarf sicher und komfortabel zu bewältigen. Durch Optimierung des Verkehrs- und Betriebsnetzes, kann auch in Zukunft den Mobilitätsbedürfnissen der Bevölkerung nachhaltig, mit einer höheren Effizienz nachgekommen werden.

8.3 Ausblick

Hält man an der Idee einer Ringbahn für die Erweiterung des Münchner SPNV fest, wofür es durchaus Gründe gibt, muss das Verkehrs- und Betriebsnetz optimiert werden. Dazu werden in diesem Kapitel eine Auswahl von möglichen Ansätzen vorgeschlagen. Außerdem werden kurz weitere Bewertungsverfahren aufgezählt, die für eine Evaluation des Systems in Frage kommen.

Zunächst muss die Ringbahn konzeptionell weiter optimiert werden, um einen möglichst großen Nutzen für die Gesamtbevölkerung zu schaffen. Dafür empfiehlt es sich die in dieser Arbeit entworfene Ringbahn iterativ abzuändern und zu verstehen wie sich dies auf das Verkehrsverhalten im Untersuchungsgebiet auswirkt. Zum Vergleich ist es auch sinnvoll einen vollständig neuen Ring mit anderen Parametern zu konzipieren. Statt dem 20-km-Kriterium könnte der Grenzwert beispielsweise ein 5 km, 10 km oder 15 km großer Radius sein. Dennoch ist es als Grundsatz weiterhin empfehlenswert vor allem Regionen mit hohen Bevölkerungsdichten miteinander zu verknüpfen.

Eine genauere Untersuchung über die Gründe der hohen Nachfrage im Osten ist ebenso interessant. Hinweise darauf könnte man durch die oben erwähnte iterative Vorgehensweise bekommen. Hier ist konsequenterweise der Einfluss der Haltestelle *Garching-Forschungszentrum* und des *Flughafens* zu prüfen. Sollten sich die Hinweise verdichten, dass das Potential im Osten unabhängig von den äußeren Faktoren stärker ist als im Westen, könnte man dort über einen Teilring nachdenken. Perspektivisch könnte man diesen entweder als solchen bestehen lassen oder als einen ersten Vorhabenschritt für den Bau eines vollständigen Ringes definieren. Im vorgeschlagenen Szenario würde sich für eine erste Teilstrecke *Unterhaching – Garching-Forschungszentrum* anbieten. Diese kann bis nach *Dachau* verlängert werden, bevor die Gemeinde *Germering* beidseitig an den Ring angeschlossen wird. All die möglichen Variationen, wie das Planungsvorhaben schrittweise aussehen soll, kann genauso in einem Verkehrsmodell wie MATSim simuliert werden.

Ebenso wie die Vorteile der direkt beteiligten Fahrgäste, muss man auch die indirekten Vorteile für das Gesamtsystem beachten. Die Ringbahn hat eine verkehrsverlagernde Wirkung bezogen auf den ÖPNV. Fahrten, die im Basisszenario durch die Stadtmitte gehen würden, können im Ringszenario auf einer anderen Strecke absolviert werden. Eine quantitative Aussage darüber, wie groß die Entlastung des Verkehrs in der Innenstadt ist und wie weitreichend diese Auswirkungen sind, kann ein wichtiges Bewertungskriterium für das Planungsvorhaben sein. Da gerade zu Stoßzeiten diese Fragestellung eine hohe Relevanz hat, spielen die Betriebsfahrpläne bei der Beantwortung dieser eine große Rolle. Auch hier kann eine iterative Vorgehensweise angewandt werden.

Während die Verkehrs- und Betriebsnetze optimiert werden, müssen Folgen der Erweiterungsmaßnahme für den Gesamtverkehr abgeschätzt werden. Diese sind stark miteinander verflochten, weshalb es sich empfiehlt sich zeitgleich darüber Gedanken zu machen. Eines der Ziele des Ausbaus des ÖPNV ist den Individualverkehr, und somit die Nutzung des PKWs, zu reduzieren. Eine angemessene Fragestellung in diesem Zusammenhang ist also, ob der S-Bahn-Ring es tatsächlich schafft Fahrgäste, die aktuell auf das Auto als Verkehrsmittel setzen, neu für sich zu gewinnen. Eine quantitative Analyse über die Veränderung des Modal Splits ist dafür notwendig.

Um die Fahrzeiten bzw. die Fahrzeitäquivalenz für den Vergleich mit anderen Verkehrsmitteln fair zu beurteilen, müssen auch die Umrechnungsfaktoren der Parameter, die in dieser Arbeit verwendet wurden (Fahrzeitäquivalenz eines Umstiegs, Fahrzeitfunktionen nach WALTHER), hinterfragt werden. Diese Werte wurden in den 1980er bzw. 1990er Jahren erhoben. Seitdem gab es schwerwiegende gesellschaftliche Veränderungen, die das Zeitempfinden eines Menschen beeinflusst haben könnten. Das Mobiltelefon, das heutzutage Zugang zu jeglichem Entertainment

bietet und ständige Kommunikation ermöglicht, ist ein Faktor, der damals nicht in die Bewertung miteingeflossen ist. Heute gibt es an vielen Bahnsteigen, Haltestellen und auch in Fahrzeugen Bildschirme mit aktuellen Fahrgastinformationen, Nachrichten und diversen Unterhaltungsformaten. Es ist also die Frage zu klären, ob und wie stark sich durch die permanente Informations- und Reizaufnahme des Gehirns das Fahrzeitempfinden verändert hat.

A Anhang

A.1 Gemeinden im MVV-Netz

Tabelle A.1: Einwohner- und Beschäftigtenzahl aller Gemeinden im MVV-Netz

Gemeinde	Einwohner	Beschäftigte	Einwohner- und Beschäftigtenzahl
München	1.325.388	685.792	2.012.134
Freising ^b	45.619	40.306	85.959
Dachau ^a	41.841	12.189	54.055
Fürstenfeldbruck ^b	33.904	12.472	46.395
Erding ^b	34.013	11.832	45.869
Germering ^a	37.161	5.698	42.875
Unterschleißheim ^a	26.365	14.196	40.573
Starnberg ^b	23.403	8.999	32.410
Ottobrunn ^a	19.810	12.347	32.170
Unterhaching ^a	22.155	6.953	29.114
Garching b. München ^a	15.198	13.289	28.494
Olching ^a	24.504	3.973	28.489
Haar ^a	19.621	8.660	28.291
Ismaning ^a	15.182	12.661	27.850
Unterföhring	9.520	17.111	26.639
Vaterstetten	21.878	4.382	26.274
Wolfratshausen ^b	17.725	7.506	25.246
Gauting ^c	19.499	5.115	24.622
Neufahrn b. Freising	18.998	5.369	24.372
Puchheim ^a	19.321	4.891	24.220
Karlsfeld	18.626	4.817	23.453
Neubiberg	14.283	8.576	22.865
Taufkirchen	17.420	4.539	21.968
Holzkirchen	15.417	6.497	21.921
Gröbenzell	19.057	2.811	21.875
Gilching	17.156	4.008	21.172
Eching	12.925	7.014	19.943
Planegg ^{a,d}	10.535	9.073	19.611
Poing ^c	13.051	6.097	19.154
Kirchheim b. München ¹	12.131	7.001	19.137
Gräfelfing ^{a,d}	12.666	5.320	17.993
Oberhaching	12.616	5.064	17.685
Oberschleißheim	11.737	5.102	16.845
Maisach	12.956	3.017	15.980

Gemeinde	Einwohner	Beschäftigte	Einwohner- und Beschäftigten zahl
Ebersberg	11.219	4.376	15.605
Hallbergmoos	9.056	6.269	15.328
Pullach i. Isartal	8.422	6.882	15.307
Markt Schwaben	11.513	3.436	14.954
Grafring b. München	12.673	2.259	14.934
Eichenau	12.196	1.448	13.652
Herrsching am Ammersee	10.033	2.831	12.866
Hohenbrunn	8.426	2.896	11.323
Tutzing	9.452	1.843	11.298
Feldkirchen	6.113	5.008	11.126
Kirseeon	9.275	1.688	10.966
Markt Indersdorf	9.313	1.393	10.708
Höhenkirchen-Siegertsbrunn	9.262	1.096	10.363
Zorneding	8.712	1.289	10.005
Weßling	5.196	4.760	9.958
Krailling ^{a,d}	9.891	7.753	2.138
Seefeld	7.048	2.707	9.760
Bergkirchen	7.374	1.637	9.015
Sauerlach	6.764	2.078	8.845
Altomünster	7.330	1.071	8.403
Röhrmoos	6.343	1.519	7.865
Petershausen	6.028	780	6.808
Schwabhausen	6.094	578	6.674
Pöcking	5.650	913	6.565
Schäftlarn	5.580	919	6.499
Erdweg	5.498	762	6.262
Brunnthal	4.729	1.453	6.185
Geltendorf	5.634	396	6.032
Hebertshausen	5.201	699	5.902
Mammendorf	4.541	1.006	5.548
Otterfing	4.476	980	5.458
Aying	4.385	1.049	5.435
Wörthsee	4.690	598	5.290
Feldafing	4.391	854	5.247
Vierkirchen	4.291	842	5.135
Wörth	4.446	363	4.810
Grafrath	3.585	506	4.091

Gemeinde	Einwohner	Beschäftigte	Einwohner- und Beschäftigten zahl
Türkenfeld	3.631	418	4.050
Icking	3.562	415	3.978
Valley	2.882	796	3.680
Baierbrunn	2.701	963	3.666
Schöngeising	1.870	116	1.986
Ottenhofen	1.852	97	1.949

a – Gemeinde ist direkt an die Ringbahn angeschlossen

b – Gemeinde ist aufgrund des 20-km-Kriteriums nicht an der Ringbahn angeschlossen

c – Gemeinde ist aufgrund der Feinjustierung nicht an der Ringbahn angeschlossen

d – Gemeinde ist Teil der PGK-Gemeinden

A.2 Entfernung der Ringbahn-Gemeinden

Tabelle A.2: Entfernung der Ringbahn-Gemeinden vom Münchner Stadtzentrum

Gemeinde	Entfernung von der Mariensäule in München [km]
Freising	31,8
Erding	31,0
Wolfratshausen	27,4
Fürstenfeldbruck	24,3
Starnberg	23,2
Olching	19,5
Dachau	17,2
Puchheim	17,1
Germering	15,8
Unterschleißheim	15,1
Kirchheim	14,0
Garching b. München	13,9
Ismaning	12,5
PGK	11,9
Haar	11,7
Ottobrunn	10,5
Pullach	9,7
Unterhaching	8,3

A.3 Berechnung freespeed

In dem folgenden Anhang wird die Bestimmung des *freespeed* für die Simulation der Ringbahn mithilfe einer einfachen linearen Regression durchgeführt.

Gegeben sind Informationen über Teilstreckenabschnitte, des aktuellen S-Bahn-Netzes. Diese liegen allesamt größtenteils außerhalb des Stadtgebiets München. D.h. sie beginnen bzw. enden im Westen an der Haltestelle *Donnersberger Brücke* und im Osten am *Ostbahnhof*. Die Dauer der Fahrtzeiten für die Streckenabschnitte wurden einzeln durch einen Fahrplanabgleich bestimmt. (MVV, 2023)

Tabelle A.3: Streckenabschnitte der MVV (Basisdaten) (WIKI, 2022)

Linie	Streckenabschnitt		Anzahl der Stationen	Strecke [km]	Dauer [min]
	von	nach			
S1	Flughafen	Donnersberger Brücke	13	39,1	39
S2	Petershausen	Donnersberger Brücke	12	34,8	33
S2	Ostbahnhof	Erding	14	34,7	41
S3	Mammendorf	Donnersberger Brücke	13	29,3	35
S3	Ostbahnhof	Holzkirchen	12	31,1	32
S4	Geltendorf	Donnersberger Brücke	13	40,4	40
S4/S6	Ostbahnhof	Ebersberg	14	33,8	38
S6	Tutzing	Donnersberger Brücke	14	38,0	40
S7	Wolfratshausen	Donnersberger Brücke	15	29,5	37
S7	Ostbahnhof	Kreuzstraße	15	30,1	35
S8	Herrsching	Donnersberger Brücke	15	36,7	46
S8	Ostbahnhof	Flughafen	10	33,2	31

Durch diese Angaben lassen sich einerseits die Durchschnittsgeschwindigkeit pro Streckenabschnitt mit $Durchschnittsgeschwindigkeit = \frac{Strecke}{Dauer}$ berechnen.

Andererseits kann auch der durchschnittliche Abstand zwischen den Haltestellen je Streckenabschnitt durch $Durchschnittlicher\ Stationsabstand = \frac{Strecke}{Anzahl\ Stationen - 1}$ herausgefunden werden.

Tabelle A.4: Streckenabschnitte der MVV (Durchschnittswerte)

Linie	Streckenabschnitt		Durchschnittliche Strecke zwischen zwei Stationen x_{MVV} [km]	Durchschnittsgeschwindigkeit y_{MVV} [km/h]
	von	nach		
S1	Flughafen	Donnersberger Brücke	3,26	60,15
S2	Petershausen	Donnersberger Brücke	3,16	63,27
S2	Ostbahnhof	Erding	2,67	50,78
S3	Mammendorf	Donnersberger Brücke	2,44	50,23
S3	Ostbahnhof	Holzkirchen	2,83	58,31
S4	Geltendorf	Donnersberger Brücke	3,37	60,60
S4/S6	Ostbahnhof	Ebersberg	2,60	53,37
S6	Tutzing	Donnersberger Brücke	2,92	57,00
S7	Wolfratshausen	Donnersberger Brücke	2,11	47,84
S7	Ostbahnhof	Kreuzstraße	2,15	51,60
S8	Herrsching	Donnersberger Brücke	2,62	47,87
S8	Ostbahnhof	Flughafen	3,69	64,26

Arithmetisches Mittel Durchschnittsstrecke \bar{x}_{MVV} [km]	Arithmetisches Mittel Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{y}_{MVV} [km/h]
2,82	55,44

Aus den beiden arithmetischen Mitteln \bar{x}_{MVV} und \bar{y}_{MVV} lässt sich auf die geschätzte Durchschnittsgeschwindigkeit der Ringbahn (=freespeed) durch einfache lineare Regression schließen, da die Durchschnittsstrecken zwischen den Haltestellen der Ringbahn durch den Parameter *length* (x_{Ring}) bekannt sind.

Tabelle A.5: Streckenabschnittslängen

Strecke		Länge x_{Ring} [km]
von	nach	
Dachau	Unterschleißheim	10,79
Unterschleißheim	Garching-Forschungszentrum	7,20
Garching-Forschungszentrum	Ismaning	4,36
Ismaning	Heimstetten	9,56
Heimstetten	Haar	5,68
Haar	Ottobrunn	6,63
Ottobrunn	Unterhaching	4,88
Unterhaching	Pullach	6,78
Pullach	Planegg	9,57
Planegg	Germering	4,52
Germering	Puchheim	4,89
Puchheim	Olching	4,40
Olching	Dachau	9,48

Die Durchschnittsstrecke zwischen den Haltestellen der Ringbahn beläuft sich auf $\overline{x_{Ring}} = 6,83 \text{ km}$.

Die allgemeine Formel für die Ausgleichsgerade der einfachen linearen Regression lautet:

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 * x_i + \epsilon_i$$

Der Erwartungswert ϵ_i kann nicht schlüssig aus den Daten abgeleitet werden, weswegen dieser als null angenommen wird. Somit ist die Formel der Ausgleichsgeraden:

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 * x_i$$

Mit

$$\beta_1 = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x^2}$$

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 * \bar{x}$$

In diesem Fall ist \bar{y} der Durchschnittsgeschwindigkeit zugewiesen und \bar{x} der Durchschnittsstrecke.

Daraus ergibt sich für $\beta_1 = 10,85$ und $\beta_0 = 24,87$.

Somit kann die Ausgleichsgerade durch $\hat{y} = 24,87 + 10,85 * x$ beschrieben werden

Nun kann die geschätzte Wert \hat{y} für $\overline{x_{Ring}} = 6,83 \text{ km}$ durch einsetzen in die Formel bestimmt werden.

$$\hat{y} = \text{freespeed} = \mathbf{98.9 \text{ km/h}}$$

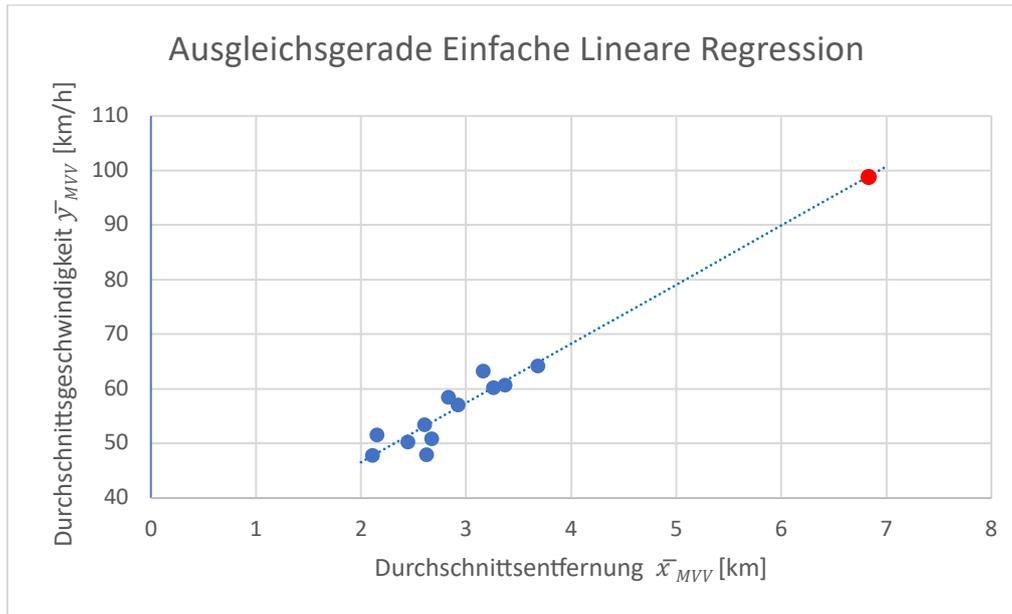


Abbildung A.1: Ausgleichsgerade freespeed

Man muss anmerken, dass der gesuchte *freespeed*-Wert weit außerhalb des gegebenen Bereichs liegt und die Geschwindigkeit des Fahrzeugs nicht zwingend linear mit der Strecke ansteigt. Aus diesem Grund wird der ausgerechnete Wert gemäßigt, um eine realistischere Annahme zu treffen. Der finale *freespeed* wird zwischen $62,0 \text{ km/h}$ (Durchschnittsgeschwindigkeit aller Strecken, die länger als 3km sind) und $98,9 \text{ km/h}$ liegen.

Der Mittelpunkt zwischen Höchst- und Tiefstwert liegt bei $80,45 \text{ km/h}$. Um eine konservative Schätzung zu machen, wird der *freespeed* für die Simulation auf **75 km/h** bestimmt.

Literaturverzeichnis

- Bendzko, T. (2023) *Planungsparadigmen I: Weiche Planungsinstrumente & Planungsparadigmen*, 01.02.2023 [Online], Grundzüge der räumlichen Planung für Umweltingenieure, Fakultät für Luftfahrt, Raumfahrt und Geodäsie, Technische Universität München (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- Cervero, R. and Aschauer, D. (1998) *Economic impact analysis of transit investments: Guidebook for practitioners*, Washington, D.C., Transportation Research Board, National Research Council.
- Cich, G., Knapen, L., Maciejewski, M., Yasar, A.-U.-H., Bellemans, T. and Janssens, D. (2017) 'Modeling Demand Responsive Transport using SARL and MATSim'.
- CTPS (1997) *Transfer penalties in urban mode choice modeling*, U.S. Department of Transportation.
- DB Netz (2022) 2. *Stammstrecke München: Kernstück des Bahnausbaus in der Region München* [Online]. Verfügbar auf <https://www.2.stammstrecke-muenchen.de/start.html> (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- DB Netz (2023a) *Bahnausbau Region München: Erdinger Ringschluss: Abschnitt Flughafen–Schwaigerloh* [Online]. Verfügbar auf <https://www.bahnausbau-muenchen.de/projekt.html?PID=44> (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- DB Netz (2023b) *Bahnausbau Region München: Interaktive Karte* [Online]. Verfügbar auf <https://www.bahnausbau-muenchen.de/interaktive-karte.html> (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- DB Regio (2023) *Das Unternehmen S-Bahn München: Unsere Mission: München bewegen* [Online]. Verfügbar auf <https://www.s-bahn-muenchen.de/ueber-uns/unternehmen> (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- Fabian, T. (2000) *The evolution of the Berlin urban railway network: Evolution of Urban Railways* [Online]. Verfügbar auf https://www.ejrcf.or.jp/jrtr/jrtr25/pdf/f18_fab.pdf.
- Herzog, S. and Atabay, D. (2016) *Münchner Ringbahn: Eine Vision für die Landeshauptstadt* [Online]. Verfügbar auf <http://studie2016.ringbahn.de/> (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- Horni, A., Nagel, K. and Axhausen, K. W. (2016) *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*, Ubiquity Press.
- Intraplan and VWI (2022) *Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im öffentlichen Personennahverkehr Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im öffentlichen Personennahverkehr: Version 2016+*, Bundesministeriums für Digitales und Verkehr.
- Kasten, P. (2022) 'Klimaschutz im Verkehrssektor: Klimaorientiertes und sozial gerechtes Marktdesign'.

- Kirchhoff, P. and Tsakarestos, A. (2007) *Planung des ÖPNV in ländlichen Räumen: Ziele - Entwurf - Realisierung*, Wiesbaden, Teubner.
- Köhler, U. (2014) *Einführung in die Verkehrsplanung: Grundlagen Modellbildung Verkehrsprognose Verkehrsnetze*, Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag.
- Königlich Preussischen Ministers der Öffentlichen Arbeiten (ed) (1896) *Berlin und seine Eisenbahnen 1846–1896*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Koopmann, C. (2016) 'Nahverkehr: Freie Wähler fordern S-Bahn-Ring', 12.10.2016, 12.10.2016 [Online]. Verfügbar auf <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/nahverkehr-freie-waehler-fordern-s-bahn-ring-1.3200904> (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- Kudrjavcev, F. and Körner, C. (2012) *Plan ohne Plan: Das Projekt „Groß-Moskau“* (Osteuropa) [Online], Berliner Wissenschafts-Verlag. Verfügbar auf <https://www.jstor.org/stable/44935739>.
- Leonhartsberger, R., Dierschedl and Krüttli (2012): *Das München der 2ten Reihe* [Online]. Verfügbar auf <https://panm.info/portfolio/das-munchen-der-2ten-reihe/> (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- Meyer, M. D. and Miller, E. J. (2001) *Urban transportation planning: A decision-oriented approach*, 2nd edn, Boston, McGraw-Hill.
- Moeckel, R. (2013) 'Constraints in household relocation: Modeling land-use/transport interactions that respect time and monetary budgets'.
- Moeckel, R., Kuehnel, N., Llorca, C., Moreno, A. T. and Rayaprolu, H. (2020) 'Agent-Based Simulation to Improve Policy Sensitivity of Trip-Based Models'.
- München (2022) *Dieselfahrverbot in der Umweltzone: Stufenweise Einführung ab 1. Februar 2023 mit zahlreichen Ausnahmeregelungen* [Online]. Verfügbar auf <https://stadt.muenchen.de/news/dieselfahrverbot-in-der-umweltzone.html> (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- München (2023) *Mobilitätsplan: Verkehrsstrategie für München* [Online]. Verfügbar auf <https://stadt.muenchen.de/infos/mobilitaetsplan.html> (Zuletzt geprüft am 18.03.2023).
- MVG (2023a) *Bauprojekte Tram und U-Bahn* [Online]. Verfügbar auf <https://www.mvg.de/ueber/mvg-projekte/bauprojekte.html> (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- MVG (2023b) *Die Tram-Westtangente: Wieso ist die Tram-Westtangente notwendig?* [Online]. Verfügbar auf <https://www.mvg.de/ueber/mvg-projekte/bauprojekte/tram-westtangente.html> (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- MVV (2021) *Mobilität im Landkreis München: Basisdaten* [Online]. Verfügbar auf https://www.mvv-muenchen.de/fileadmin/mediapool/07-Ueber_den_MVV/02-Dokumente/MVV_in_Zahlen/Desktopdruck_M_Nov_22_Basisdaten_komplett.pdf (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).

- MVV (2022a) *Aushangfahrplan: Unterhaching* [Online], München. Verfügbar auf https://efa.mvv-muenchen.de/ahf2/1002310/mvv_01003___R_s23_1_None.pdf (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- MVV (2022b) *Netzplan der MVV* [Online], München. Verfügbar auf https://www.mvv-muenchen.de/fileadmin/mediapool/03-Plaene_Bahnhoefe/Netzplaene/MVV_Netzplan_S_U_R.pdf (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- MVV (2023) *Fahrtauskunft* [Online]. Verfügbar auf <https://efa.mvv-muenchen.de/index.html#stoptimetables@enquiry> (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- Neutatz, D. (1996) *Von der Stadtduma ins Politbüro? Entscheidungsprozesse bei der Projektierung der Moskauer Untergrundbahn 1897-1935* (Jahrbücher für Geschichte Osteuropas) [Online], Düsseldorf, Franz Steiner Verlag Wiesbaden GmbH. Verfügbar auf <https://www.jstor.org/stable/41052986>.
- Pendleton, M. and Coates, J. (2018) 'Thinking from the Yamanote: space, place and mobility in Tokyo's past and present'.
- Saidi, S., Ji, Y., Cheng, C., Guan, J., Jiang, S., Kattan, L., Du, Y. and Wirasinghe, S. C. (2016) 'Planning Urban Ring Rail Transit Lines: Case Study of Shanghai, China'.
- Saidi, S., Wirasinghe, S. C. and Kattan, L. (2014) 'Rail Transit - Exploration with emphasis on networks with ring Lines'.
- Saidi, S., Wirasinghe, S. C. and Kattan, L. (2016) 'Long-term planning for ring-radial urban rail transit networks'.
- Saidi, S., Wirasinghe, S. C., Kattan, L. and Esmaelinejad, S. (2017) 'A generalized framework for complex urban rail transit network analysis'.
- Schafer, A. and Victor, D. G. (2000) 'The future mobility of the world population'.
- Scheelhaase, J., Grimme, W., O'Sullivan, M., Naegler, T., Klötzke, M., Kugler, U., Scheier, B. and Standfuß, T. (2018) 'Klimaschutz im Verkehrssektor — aktuelle Beispiele aus der Verkehrsforschung'.
- Schickhoff, I. (1977) 'Matrizentheoretische Verfahren zur Bestimmung der Zugänglichkeit von Knotenpunkten eines Verkehrsnetzes aufgezeigt am Beispiel 'Eisenbahnnetz Randstad Holland''.
- Schütz, F. (2022) *Geplante Linie U9: Gründe für eine neue Strecke* [Online]. Verfügbar auf <https://www.u-bahn-muenchen.de/netz/u9/> (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- Tiry, C. (1997) *Tokyo Yamanote line—cityscape mutations: Impact of Railways on Japanese Society & Culture* [Online], EJRCF. Verfügbar auf https://www.ejrcf.or.jp/jrtr/jrtr13/pdf/f04_tir.pdf.
- TUM (2023) *Forschen und Lernen auf dem Campus Garching* [Online]. Verfügbar auf <https://webarchiv.typo3.tum.de/TUM/fg/startseite/index.html> (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).

- UNFCCC (2015) *Übereinkommen von Paris*. ABl. L 282 vom 19.10.2016 (United Nations Framework Convention on Climate Change).
- VRS (2022) *Elektrotriebwagen BR 423: Fahrzeugdaten* [Online]. Verfügbar auf <https://infoportal.mobil.nrw/technik/spnv-fahrzeuge/elektrotriebwagen-br-423.html#c918> (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- Vuk, G., Hansen, C. O. and Fox, J. (2009) 'The Copenhagen Traffic Model and its Application in the Metro City Ring Project'.
- Walter, D. and Lill, T. (2018) 'Flughafen-Tunnel wird verlängert: Erdinger Ringschluss rückt ein Stück näher', 09.01.2018, 09.01.2018 [Online]. Verfügbar auf <https://www.merkur.de/lokales/erdinger/flughafen-muenchen-ort60188/erdinger-ringschluss-rueckt-ein-stueck-naeher-9509306.html> (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- Walther, K. (1980) *Verkehrsaufteilung Mit Gewichteten Reisezeitkomponenten: Ein Tri-Modal-Split-Modell Für Den Städtischen Personenverkehr* [Online], Wiesbaden, VS Verlag für Sozialwissenschaften GmbH. Verfügbar auf <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=7204852>.
- Werner, C. (1966) *Zur Geometrie von Verkehrsnetzen*, Selbstverlag des Geographischen Instituts der Freien Universität Berlin.
- Werner, W. H. (1988) *Simulation of the Berlin (West) S-Bahn ('Ringbahn'). Analysis of the alignment with a view to scheduling. Final report. Simulation Ringbahn Berlin. Untersuchung der ...* [Online]. Verfügbar auf <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/7783702>.
- Wikipedia (2022) *Liste der Stationen der S-Bahn München* [Online]. Verfügbar auf https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Stationen_der_S-Bahn_M%C3%Bcnchen (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- Wikipedia (2023) *Ringlinie* [Online]. Verfügbar auf <https://de.wikipedia.org/wiki/Ringlinie> (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- Wu, X., Tse, C. K., Dong, H., Ho, I. W. H. and Lau, F. C. M. (2016) *A Network Analysis of World's Metro Systems*, Beijing Jiaotong University [Online]. Verfügbar auf <https://www.ieice.org/nolta/symposium/archive/2016/articles/1065.pdf>.
- Wulfhorst, G. (2022) *Verkehrsangebotsplanung: Inhalte und Prozesse*, 25.10.2022 [Online], Grundlagen der Verkehrsplanung, Lehrstuhl für Siedlungsstruktur und Verkehrsplanung, Technische Universität München (Zuletzt geprüft am 28.03.2023).
- Yoshida, S. and Hiraide, T. (1992) 'Construction of ring subway line in Tokyo' [Online]. Verfügbar auf <https://trid.trb.org/view/676810>.
- Zhou, Y., Yang, H., Wang, Y. and Yan, X. (2021) 'Integrated line configuration and frequency determination with passenger path assignment in urban rail transit networks'.