



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

Fachgebiet Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit

Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux

Mikroskopische Simulation des Braess- Paradoxons

Master-Thesis

Zur Erlangung des akademisches Grades

Master of Science

Florian Giesen

Master Qualitätsingenieurwesen

Matr. Nr.: 1451392

Ausgabe: 25.04.2022

Abgabe: 18.07.2022

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit, erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Master-These selbstständig verfasst und keine andere als die angegebene Quelle und Hilfsmittel benutzt sowie Stellen der Abschlussarbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, in jedem Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Ich bin damit einverstanden, dass die Arbeit durch Dritte eingesehen und unter Wahrung urheberrechtlicher Grundsätze zitiert werden darf.

Ort und Datum:

Unterschrift:

Abstract

The topic of this master's thesis is the microscopic simulation of the braess paradox. The braess paradox describes the situation that the addition of a new road to road networks can lead to higher travel times for all network users (Bittihn und Schadschneider 2021). First the fundamental knowledge of the traffic flow theory is given. After that the reader gets information about the most important traffic flow programs. The braess paradox is explained in chapter 4, before the simulation is made in chapter 5. Goal of the master thesis was to simulate the braess paradox in NetLogo and to get information about important parameter of the program and the simulation. The new information will be helpful for further simulations and for lots of different applications at road network planning.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
Abbildungsverzeichnis	X
1. Einleitung.....	1
1.2 Aufbau	3
2. Verkehrsflusstheorie.....	4
2.1 Variablen des Verkehrs	4
2.1.1 Mikroskopische Variablen	4
2.1.1.1 Position (Trajektorien).....	4
2.1.1.2 Geschwindigkeit.....	5
2.1.1.3 Beschleunigung.....	6
2.1.1.4 Zeitlücke.....	6
2.1.1.5 Reisezeit	8
2.1.2 Makroskopische Variablen.....	9
2.1.2.1 Verkehrsfluss	9
2.1.2.2 Verkehrsdichte	11
2.1.2.3 Fundamentaldiagramm	11

2.2 Verkehrsnachfrage und Stauung.....	13
2.2.1 Verkehrsnachfrage.....	13
2.2.2 Stau.....	13
2.2.3 Ursachen von Stau	14
2.3 Verkehrsflussmodelle	16
2.3.1 Makroskopische Modelle	16
2.3.2 Mikroskopische Modelle.....	17
3. Software zur Verkehrssimulation.....	19
3.1 Definition der Verkehrssimulation.....	19
3.2 Verkehrssimulationsprogramme.....	20
3.2.1 SUMO	20
3.2.2 CORSIM.....	20
3.2.3 Aimsun	21
3.2.4 MATSim	21
3.2.5 VISSIM.....	21
4. Wardrop Prinzipien und Braess-Paradoxon	23
4.1 Wardrop Prinzipien	23
4.1.1 Erstes Wardrop Prinzip (User-Gleichgewicht)	23
4.1.2 Zweites Wardrop Prinzip (System-Gleichgewicht).....	23
4.1.3 Anwendung: Pigou Paradox	24
4.2 Braess-Paradoxon.....	25

4.2.1 Anwendung Braess-Paradoxon	29
4.2.2 Beispiele in Verkehrsnetzen	29
4.2.3 Beispiele in Informationsnetzen	29
4.2.4 Aktualität des Themas	30
5. Simulation des Braess-Paradoxons	33
5.1 Grundlagen NetLogo	33
5.2 Markow Prozess	37
5.3 Implementierung des Braess-Paradoxons	38
5.4 Simulationen	42
5.4.1 Ergebnisse	43
5.4.2 Berechnung der kritischen Schwellen	53
6. Ausblick	60
7. Literatur / Quellen	61
8. Anhang	66

Abkürzungsverzeichnis

Aimsun	Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks
Bspw.	Beispielsweise
CORSIM	Corridor Simulation
IV	Individualverkehr
KI	Künstliche Intelligenz
km	Kilometer
LKW	Lastkraftwagen
MATSim	Multi-Agent Transport Simulation
NSM	Nagel-Schreckenberg-Modell
ÖPV	Öffentlicher Personenverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PKW	Personenkraftwagen
SI-Einheit	Internationales Einheitensystem. SI (franz. <i>Système international d'unités</i>)
SUMO	Simulation of Urban Mobility
Usw.	Und so weiter
Vgl.	Vergleiche
VISSIM	Verkehr in Städten – Simulationsmodell
N	Anzahl der Fahrzeuge (NetLogo)

L	Concentration Factor (NetLogo)
Tu	Minimal-Travel-Time-Urban (NetLogo)
T0	Mean-Travel-Time-Highway (NetLogo)

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kenngrößen Simulation Tu.....	44
Tabelle 2: Kenngrößen Simulation T0.....	47
Tabelle 3: Kenngrößen Simulation L.....	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verkehrsarten des Personenverkehrs (Bertram und Bongard 2014)	2
Abbildung 2: Trajektorien eines Stop-and-Go Verkehrs (Treiterer et. al 1970).....	5
Abbildung 3: Nettozeitlücke (Wikipedia 2019).....	6
Abbildung 4: Bruttozeitlücke (Wikipedia 2019).....	7
Abbildung 5: Weglücke (Univ.-Prof. Dr. Wermuth 2007).....	8
Abbildung 6: Reisezeitvergleich (Randelhoff 2018)	9
Abbildung 7: Beispiel Fundamentaldiagramm (Wu 2000).....	12
Abbildung 8: Staulänge auf Autobahnen in Deutschland (Statista 2022)	14
Abbildung 9: Ursachen von Stau (Fritsch 2018)	15
Abbildung 10: Verkehrsnetz Ausgangssituation.....	27
Abbildung 11: Verkehrsnetz nach "Verbesserung"	28
Abbildung 12: Veröffentlichungen "Braess-Paradoxon"	31
Abbildung 13: Veröffentlichungen in Bezug auf Unterkategorien.....	32
Abbildung 14: NetLogo Wolf-Schaf	34
Abbildung 15: NetLogo Wolf-Schaf-Gras	35
Abbildung 16: NetLogo Verkehrsnetz	36
Abbildung 17: Prozessdiagramm Markow Kette	37
Abbildung 18: Interface Braess-Paradoxon NetLogo.....	38
Abbildung 19: Programmcode Braess-Paradoxon NetLogo	40
Abbildung 20: Routenwahl No Short-Cut Tu	44
Abbildung 21: Routenwahl Short-Cut Tu.....	45

Abbildung 22: Durchschnittliche Reisedauer Vergleich No Short-Cut/ Short-Cut Tu	46
Abbildung 23: Routenwahl No Short-Cut T0	47
Abbildung 24: Routenwahl Short-Cut T0.....	48
Abbildung 25: Reisezeiten Route 1 T0.....	49
Abbildung 26: Routenwahl No Short-Cut L	50
Abbildung 27: Routenwahl Short-Cut L.....	51
Abbildung 28: Reisezeiten Route 1 L.....	52
Abbildung 29: kritische Schwelle Braess T0	54
Abbildung 30: kritische Schwelle Braess Tu	55
Abbildung 31: kritische Schwelle Braess L	56
Abbildung 32: kritische Schwelle Route 3 T0	57
Abbildung 33: kritische Schwelle Route 3 Tu.....	58
Abbildung 34: kritische Schwelle Route 3 L	59

1. Einleitung

In der heutigen Zeit bekommen der Verkehr und die Verkehrsplanung einen immer wichtigeren Stellenwert in der Gesellschaft, da die Mobilität eine sehr große Rolle im Leben der Menschen spielt. Jeden Tag pendeln allein 3,5 Millionen Arbeitnehmer in Deutschland in ein anderes Bundesland, die meisten davon mit dem Auto (Tagesschau 2022).

Der Verkehr im allgemeinen ist definiert als die „realisierte Mobilität und bezeichnet gemeinhin die aggregiert beobachteten Ortsveränderungen von Personen, Gütern oder Informationen zur Erfüllung der Mobilitätsbedürfnisse“ (Bertram und Bongard 2014). Es gibt weiterhin eine Unterscheidung in zwei verschiedene Bereiche des Personenverkehrs, zum einen der Individualverkehr (IV) und zum anderen der öffentliche Personenverkehr (ÖPV).

Zum Individualverkehr zählen zum einen der motorisierte IV, wie beispielsweise PKW oder auch Motorrad, aber auch der nicht-motorisierte IV, wie zu Fuß oder mit dem Fahrrad. Beim öffentlichen Personenverkehr wird unterschieden in den Nah- und Fernverkehr. Hierbei sind Zug, Flugzeug oder beispielsweise Taxi gemeint. Eine genauere Auflistung findet sich in Abbildung 1.

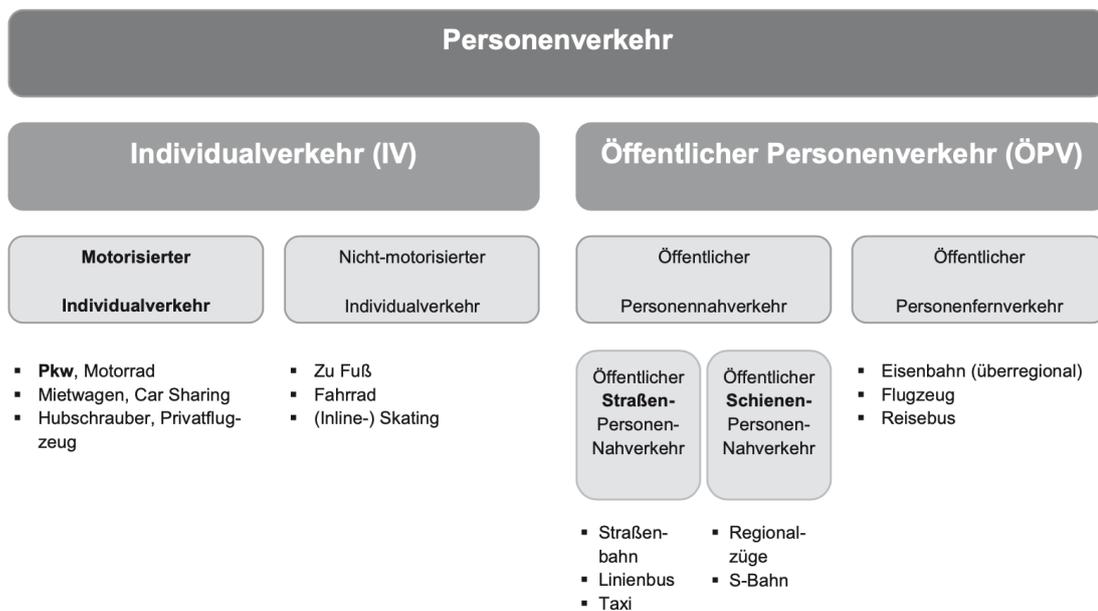


Abbildung 1: Verkehrsarten des Personenverkehrs (Bertram und Bongard 2014)

Im allgemeinen Verkehr von Fahrzeugen sowie Fußgängern gibt es Phänomene, welche schwer erklärbar sind, allerdings stark den Verkehrsablauf beeinflussen. Eines dieser Phänomene ist das sogenannte Braess-Paradoxon, welches in der vorliegenden Master-Thesis erläutert und simuliert wird.

Ziel der Arbeit ist es, das Braess-Paradoxon mikroskopisch zu simulieren und zu erkennen, von welchen Parametern sein Auftreten abhängt. Die Simulation soll grafisch dargestellt werden und es soll ein allgemeines Verständnis für das Paradoxon geschaffen werden. Durch ein Identifizieren dieser Parameter sollen zukünftige Simulationen vereinfacht werden und ein Beitrag zu Verkehrsplanung geleistet werden.

1.2 Aufbau

Um diese Ziele zu erreichen, wird zunächst begonnen, in Kapitel 2 die Grundlagen der Verkehrsflusstheorie zu erläutern. Hierbei werden eingangs die mikroskopischen und makroskopischen Variablen erklärt, bevor Verkehrsnachfrage und Stauung, sowie die Verkehrsflussmodelle beschrieben werden.

Anschließend werden die verschiedenen Arten der Verkehrssimulation mit einem groben Überblick über unterschiedliche Programme in Kapitel 3 aufgezeigt, ehe in Kapitel 4 die wichtige Grundlage der Arbeit mit den Wardrop-Prinzipien und dem Braess-Paradoxon erläutert wird. In diesem Kapitel wird neben den beiden Phänomenen auch das Pigou-Paradox, sowie die Anwendung des Braess-Paradoxons und seine Aktualität erläutert.

In Kapitel 5 wird dann die Simulation beschrieben, sowie die Unterschiedlichen Beobachtungen gedeutet. Zunächst wird das Programm NetLogo erklärt, um eine Übersicht über die Thematik der mikroskopischen Simulation zu erlangen. Ebenso werden in diesem Kapitel der Markow Prozess und die Monte Carlo Simulation thematisiert. Abgeschlossen wird die Arbeit durch Zusammenfassung und Ausblick der erlangten Erkenntnisse.

2. Verkehrsflusstheorie

In diesem Kapitel wird zunächst die Grundlage für ein Verständnis der Verkehrsflusstheorie geschaffen, bevor im nächsten verschiedene Softwares zur Simulation beschrieben werden. Zu Beginn werden die mikro- und makroskopischen Variablen erläutert, anschließend Verkehrsnachfrage und Stauung, sowie im Anschluss die unterschiedlichen Verkehrsflussmodelle.

2.1 Variablen des Verkehrs

Die Interaktion der verschiedenen Verkehrsteilnehmer wird als Verkehrsfluss bezeichnet. Hierbei spielen zur Beobachtung dieser zwei wesentliche Variablen eine Rolle, dies sind zum einen die mikroskopischen und zum anderen die makroskopischen Variablen, welche im weiteren Verlauf genauer beschrieben und anhand von Beispielen erläutert werden. Die hier beschriebenen Punkte gelten als die sogenannten Variablen des Verkehrs.

2.1.1 Mikroskopische Variablen

Die Mikroskopischen Variablen sind die messbaren Variablen des Straßenverkehrs, welche auf die Fahrzeuge im Einzelnen genau eingehen. Hierbei kann zu verschiedenen Messmitteln gegriffen werden, um diese zu erfassen. Im Weiteren werden fünf dieser Messdaten genauer erläutert.

2.1.1.1 Position (Trajektorien)

Die Position eines Objektes im Straßenverkehr, meist Kraftfahrzeuge, kann mit verschiedenen Messmitteln erfasst und analysiert werden. Beispielsweise kann die Position der Fahrzeuge direkt durch Kameradaten erfasst werden, durch sogenannte Tracking Software (Software zur Überwachung und Berechnung von Verkehrsdaten) können hierdurch dann Trajektorien $x_\alpha(t)$ erstellt werden, welche die Position der Fahrzeuge α über die Zeit verfolgen können. Wenn nun mit diesen Trajektorien die Orts-Zeit-Linien aller Fahrzeuge in einem raumzeitlichen Bereich erfasst, ergeben sich sogenannte Trajektoriendaten. Aus diesen

Messdaten kann ohne weiteres auf den Parameter der Verkehrsdichte (vgl. 2.1.2.2) bestimmt werden. (Treiber und Kesting 2010).

In Abbildung 2 ist ein Beispiel für ein Weg-Zeit-Diagramm mit Trajektoriendaten dargestellt. Hierbei sind Stop-and-Go Wellen eines britischen Autobahnabschnitts zu erkennen.

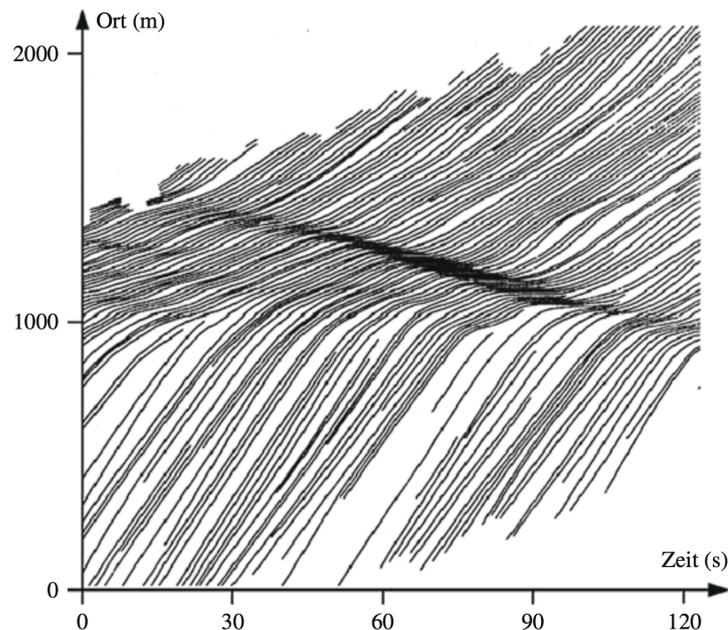


Abbildung 2: Trajektoriendaten eines Stop-and-Go Verkehrs (Treiterer et. al 1970)

2.1.1.2 Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit ist beschrieben als die Ortsänderung pro Zeitintervall, also die zurückgelegte Strecke über der Zeit. Es handelt sich hierbei um eine vektorielle Größe mit der SI-Einheit m/s (Meter pro Sekunde), wird aber auch häufig in km/h (Kilometer pro Stunde) angegeben. Die Geschwindigkeit $v(t)$ zu einem bestimmten Zeitpunkt t der Bewegung eines Massepunktes wird als Ableitung des Ortsvektors nach der Zeit bestimmt (Spektrum 1998):

$$v(t) = \frac{dr(x)}{dt} \quad (2-1)$$

2.1.1.3 Beschleunigung

Die Beschleunigung gibt an, wie sich die Geschwindigkeit eines Körpers über einen bestimmten Zeitraum verändert. Es handelt sich hierbei, wie auch bei der Geschwindigkeit, um eine Vektorielle Größe. Die SI-Einheit der Beschleunigung $a(t)$ ist m/s^2 (Meter pro Quadratsekunde) und berechnet sich wie folgt (Studyflix 2022):

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} \quad (2-2)$$

Die Beschleunigung kann einen positiven, bei einer Verzögerung (z.B. Abbremsen), auch einen negativen Wert annehmen.

2.1.1.4 Zeitlücke

Als Zeitlücke wird die Zeitspanne bezeichnet, in welchem zwei aufeinander folgende Fahrzeuge eine bestimmte Stelle, bspw. eine Ampel, passieren. Hierbei werden verschiedene Messmethoden angewandt, welche zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können (Univ.-Prof. Dr. Wermuth 2007).

a) Nettozeitlücke

Die Nettozeitlücke beschreibt, wie in Abbildung 3 zu erkennen, den zeitlichen Abstand vom Heck des Fahrzeugs 1 zur Front des Fahrzeugs 2.



Abbildung 3: Nettozeitlücke (Wikipedia 2019)

b) Bruttozeitlücke

Die Bruttozeitlücke beschreibt anders als die Nettozeitlücke, den zeitlichen Abstand von der Front des ersten Fahrzeugs zur Front des zweiten Fahrzeugs, vgl. Abbildung 4.

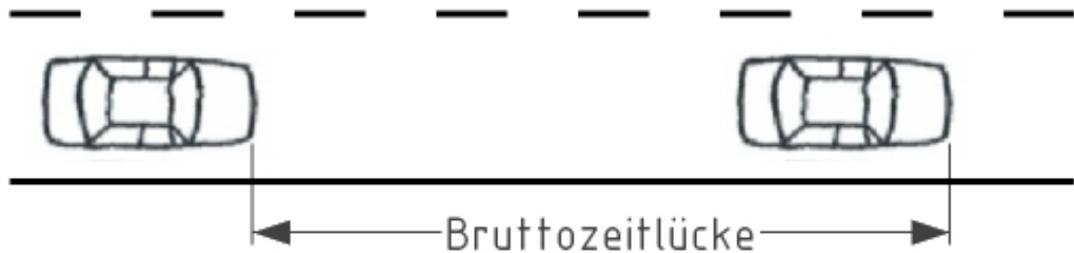


Abbildung 4: Bruttozeitlücke (Wikipedia 2019)

c) Weglücke

Die Weglücke bezeichnet den räumlichen Abstand zweier aufeinander folgender Fahrzeuge. Ähnlich wie bei der Zeitlücke, wird hierbei zwischen Netto- und Bruttoweglücke unterschieden. In Abbildung 5 ist zu erkennen, dass die Bezeichnungen identisch sind. Der Bruttoabstand beschreibt die Messung von Fahrzeugfront zu Fahrzeugfront und der Nettoabstand von Fahrzeugheck zu Fahrzeugfront.

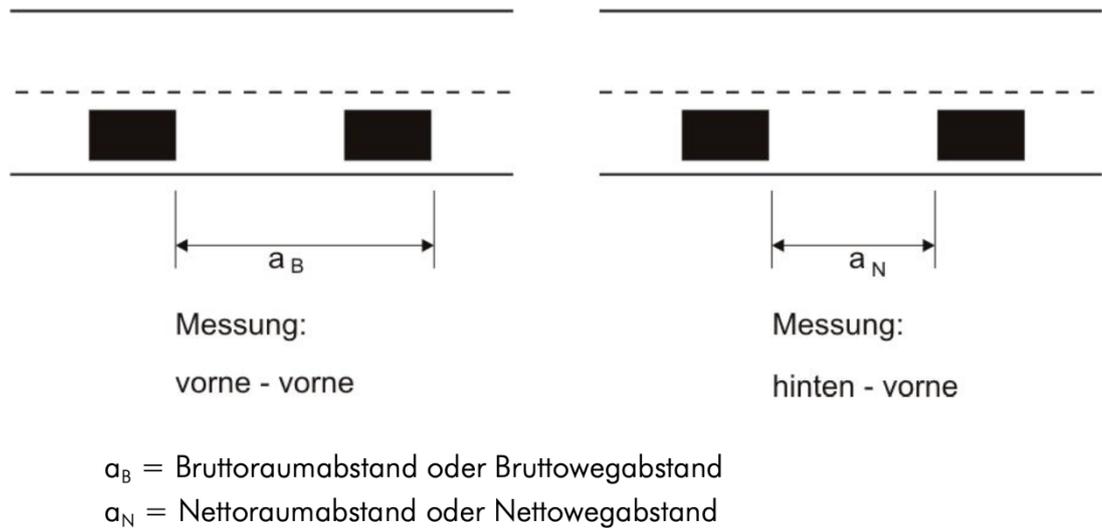


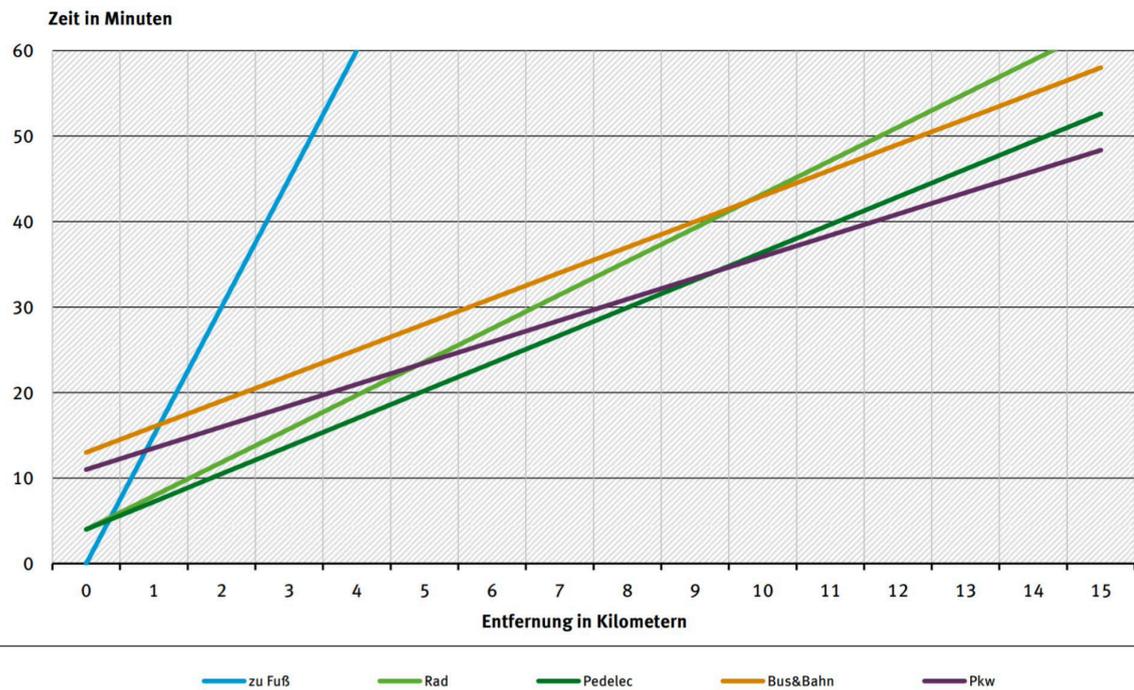
Abbildung 5: Weglücke (Univ.-Prof. Dr. Wermuth 2007)

2.1.1.5 Reisezeit

Die Reisezeit beschreibt die aufsummierte Dauer der Zeit, um von Punkt A nach B zu kommen. Je nach Wahl des Verkehrsmittels unterscheiden sich die Einflussfaktoren, welche diese erhöhen können. Hierzu zählen unter anderem Parkplatzsuche, Umsteigezeiten, Wartezeit und natürlich Fahrzeit. Ein Vergleich vom Umweltbundesamt aus dem Jahre 2014 zeigt eine Schätzung über die durchschnittliche Reisezeit von verschiedenen Verkehrsmitteln in Abhängigkeit der Wegstrecke. In Abbildung 6 ist zu erkennen, dass bis zu einer Strecke von 5 km das Fahrrad das schnellste Verkehrsmittel sein kann. Grund hierfür sind ein Wegfall der Suche nach einem Parkplatz und meist direktere Wege und damit kürzere Entfernungen zum Zielort. Mit einem Pedelec lohnen sich durch die höhere Durchschnittsgeschwindigkeit sogar innerstädtische Strecken bis 10 km.

Bei der Schätzung der Werte wurde beispielhaft eine durchschnittliche deutsche Großstadt verwendet. Bei Städten mit einem gut ausgebauten U-Bahn-Netz kann die Reisezeit mit den ÖPNV deutlich kürzer ausfallen, wobei auch in hügeligen Städten die Durchschnittsgeschwindigkeit von Fahrrädern niedriger ausfällt und dadurch eine längere Reisezeit entsteht (Randelhoff 2018).

Wegevergleich: von Tür zu Tür im Stadtverkehr*



*Jedem Verkehrsmittel wurden Durchschnittsgeschwindigkeiten zugrunde gelegt: zu Fuß $\bar{v} = 4$ km/h, Fahrrad $\bar{v} = 15,3$ km/h, Pedelec $\bar{v} = 18,5$ km/h, Bus/Bahn $\bar{v} = 20$ km/h, Pkw $\bar{v} = 24,1$ km/h. Quelle: Umweltbundesamt, Expertenschätzung, Juli 2014. Zusätzlich wurden Zu- und Abgangszeiten zum jeweiligen Verkehrsmittel definiert = Schnittpunkt mit der y-Achse.

Abbildung 6: Reisezeitvergleich (Randelhoff 2018)

2.1.2 Makroskopische Variablen

Makroskopische Variablen, auch aggregierte Daten genannt, betrachten den Verkehr und die darin enthaltenen Fahrzeuge im Ganzen, und gehen nicht auf Einzelne Verkehrsteilnehmer ein. Hierbei wird der Verkehr in seiner Masse abgebildet. Betrachtete Variablen geben beispielsweise Aufschluss über den Verkehrsfluss oder die Verkehrsdichte, welche in den kommenden Abschnitten genauer betrachtet werden.

2.1.2.1 Verkehrsfluss

Unter Verkehrsfluss wird die Anzahl an Fahrzeugen ΔN verstanden, welche einen bestimmten Ort x in einem gewissen Zeitintervall Δt überqueren (Treiber und Kesting 2010).

$$Q(x, t) = \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad (2-3)$$

Des Weiteren kann der Verkehrsfluss durch folgende Formel beschrieben werden. Hierbei steht D für die Verkehrsdichte und V für die Geschwindigkeit.

$$Q = D * V \quad (2-4)$$

Verkehrsfluss bedeutet im Allgemeinen die Ausnutzung der Verkehrswege durch den fahrenden Verkehr. Beispielsweise nimmt der Verkehrsfluss bei höherer Individualgeschwindigkeit zunächst zu, kann allerdings durch zu sehr abweichende Geschwindigkeiten beeinträchtigt werden und nimmt im Endeffekt wieder ab. Die Einheit ist Kraftfahrzeuge pro Stunde (Kfz/h).

Es gibt drei verschiedene Arten von Verkehrsflüssen, welche beobachtet werden:

a) Freier Verkehrsfluss

Als freier Verkehrsfluss, auch stabiler Zustand genannt, wird ein Verkehrsfluss beschrieben, bei dem der Fahrer freie Überholmöglichkeiten und eine freie Wahl der Geschwindigkeit hat, ohne dass er durch andere Verkehrsteilnehmer beeinflusst oder gestört wird. Der Fahrer richtet sich lediglich nach den Gegebenheiten der Straße und des Fahrzeugs.

b) Teilgebundener Verkehrsfluss

Als teilgebundener Verkehrsfluss, auch metastabiler Zustand genannt, wird ein Verkehrsfluss beschrieben, bei dem ein Fahrer über eine eingeschränkte Überholmöglichkeit und Wahl der Geschwindigkeit verfügt, da es auf Grund des erhöhten Verkehrsaufkommens zu gegenseitigen Behinderungen kommt. Dadurch sinkt die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsflusses stark ab.

c) Gebundener Verkehrsfluss

Als gebundener Verkehrsfluss, auch instabiler Zustand genannt, wird ein Verkehrsfluss beschrieben, bei dem es durch sogenannte Kolonnenbildung

für den Fahrer unmöglich ist, Überholvorgänge einzuleiten oder über die Wahl der Geschwindigkeit selbst zu verfügen. Die mittlere Geschwindigkeit nimmt in diesem Fall stark ab und kann gegen 0 abfallen (Schäfer und Blagojevic 2010).

2.1.2.2 Verkehrsdichte

Die Verkehrsdichte beschreibt die Anzahl der Verkehrselemente eines Verkehrsstroms in einem Verkehrsraum pro Kilometer Wegstrecke zu einem bestimmten Zeitpunkt. Einfacher gesagt ist die Verkehrsdichte der zahlenmäßige Ausdruck für die Intensität des Verkehrs (Linden 1966).

Berechnet wird die Verkehrsdichte D wie folgt:

$$D = \frac{n}{\Delta s} = \frac{Q}{V} \quad (2-5)$$

n Anzahl der Verkehrselemente (z.B. Kfz)

Δs Streckenabschnitt

Q Verkehrsstärke (Fahrzeuge/ Stunde)

V Reisegeschwindigkeit (Kilometer/ Stunde)

Die Verkehrsdichte dient in der Verkehrsplanung als Kenngröße, mit welcher eine Aussage über die Leistung, Qualität und Sicherheit eines Verkehrsflusses getroffen werden kann. Durch weitere Größen wie der Verkehrsstärke und der Geschwindigkeit kann ein Fundamentaldiagramm erstellt werden, welches in kommenden Abschnitt genauer beschrieben wird (Schäfer und Blagojevic 2010).

2.1.2.3 Fundamentaldiagramm

Das Fundamentaldiagramm dient dazu, die drei eben beschriebenen Phasen des Verkehrs zu beschreiben und visualisiert die Gleichung des Verkehrsflusses (2-4). Durch das Diagramm kann also der Verkehrsfluss in Abhängigkeit der Anzahl

der Verkehrsteilnehmer und der vorhandenen Kapazität beschrieben werden (Dr. Kneidl o. J.). Ein Beispiel für ein solches Diagramm ist in Abbildung 7 dargestellt.

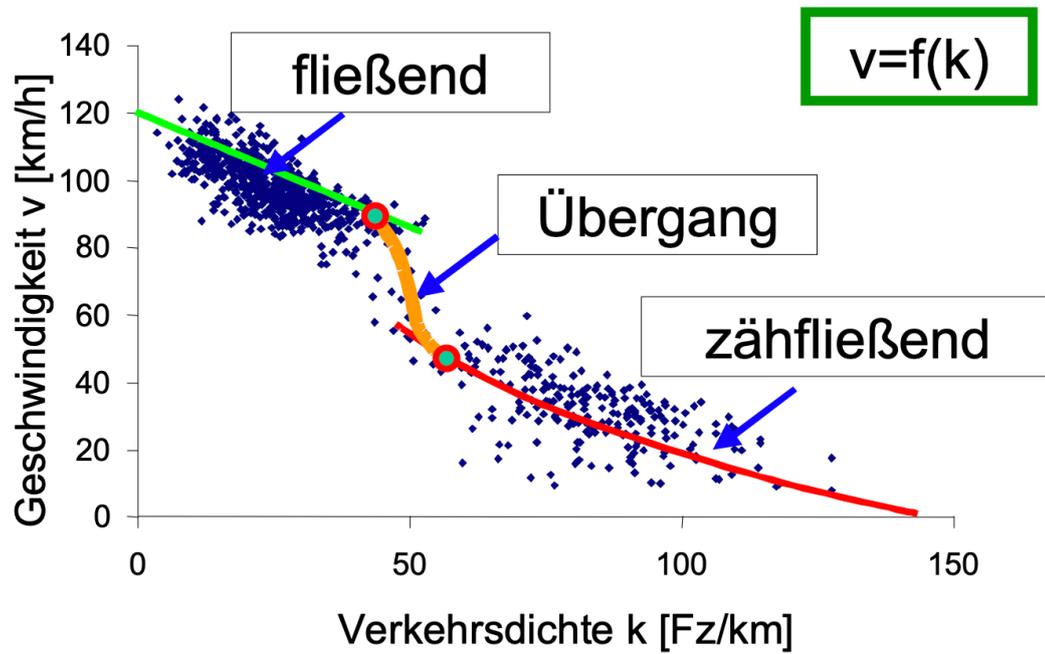


Abbildung 7: Beispiel Fundamentaldiagramm (Wu 2000)

2.2 Verkehrsnachfrage und Stauung

In diesem Unterkapitel werden die beiden Begriffe Verkehrsnachfrage und Stauung genauer beschrieben. Ebenso wird auf einige Ursachen von Stau eingegangen.

2.2.1 Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage gilt als Grundlage der Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Als obergeordnetes Ziel hierbei gilt die Auslegung so zu gestalten, dass der nachgefragte Verkehr mit ausreichender Verkehrsqualität abgewickelt werden kann. Definiert wird die Verkehrsnachfrage als „der während einer Zeiteinheit am Anfang der betrachteten Verkehrslage ankommende Verkehr“ (Geistefeldt, Hohmann, und Estel 2017). Die Verkehrslage entspricht hierbei dem abfließenden Verkehr.

2.2.2 Stau

Ein Verkehrsstau ist definiert als ein stark stockender oder zum Erliegen gekommener Verkehrsfluss auf einer öffentlichen Straße. Es gibt klare Grenzen ab wann ein Verkehrsfluss so stark eingeschränkt ist, dass es sich um Stau bzw. stockenden Verkehr handelt. Stau ergibt sich, wenn auf Straßen außerorts (z.B. Autobahnen) die Durchschnittsgeschwindigkeit während mindestens einer Minute unter 10 km/h liegt und dabei häufig zum Stillstand kommt. Innerorts liegt ein Stau vor, wenn die Verlustzeit an Engpässen oder Knotenpunkten die Verlustzeit mindestens 5 Minuten beträgt. Stockendender Verkehr außerorts liegt vor, wenn die Durchschnittsgeschwindigkeit während einer Minute unter 30 km/h liegt und es ebenfalls zu absolutem Stillstand kommen kann (ASTRA 2022).

In Abbildung 8 sind die Staulängen auf deutschen Autobahnen vom Jahr 2002 bis 2021 dargestellt. Hierbei ist klar zu erkennen, dass das Verkehrsaufkommen auf den deutschen Straßen stetig ansteigt und es zu immer mehr Staus im alltäglichen Verkehr kommt. Die Jahre 2020 und 2021 sind aufgrund der Corona-Pandemie und der daraus resultierenden Homeoffice Pflicht nicht aussagekräftig.

Die verschiedenen Ursachen für die Entstehung von Stau werden im kommenden Kapitel genauer thematisiert.

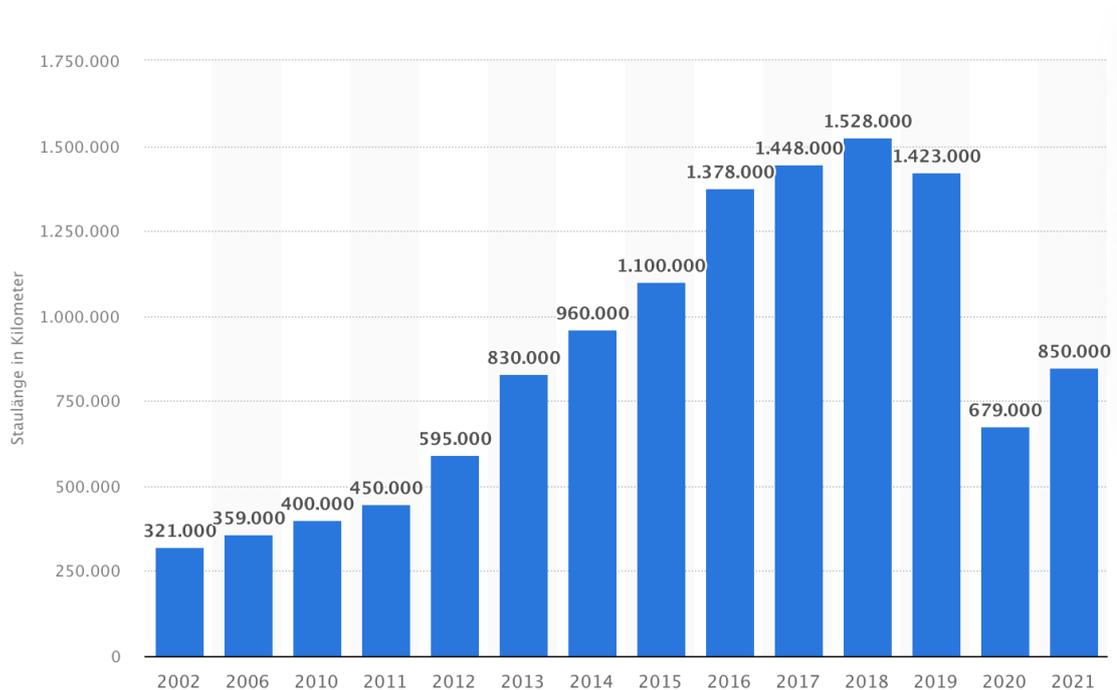


Abbildung 8: Staulänge auf Autobahnen in Deutschland (Statista 2022)

2.2.3 Ursachen von Stau

Es gibt zwei Hauptursachen für die Entstehung von Stau, zum einen ist dies ein geringer Durchsatz und zum anderen ein höheres Verkehrsaufkommen.

Die Gründe für geringen Durchsatz von Fahrzeugen sind:

- Baustellen
- Unfälle
- Schaulustige, die aufgrund eines Unfalls auf der Gegenfahrbahn abbremsen
- Extreme Wetterereignisse
- Sperrungen
- Uneffektives Verhalten von Verkehrsteilnehmern

Gründe für höheres Verkehrsaufkommen sind:

- Berufsverkehr
- Urlaubsbeginn
- Großveranstaltungen

Ebenso gibt es auch einen sogenannten Phantomstau, welcher dadurch entsteht, dass nachfolgende Fahrzeuge einen zu geringen Sicherheitsabstand zueinander einhalten, und es dadurch zu vermehrtem Bremsen kommt. Die Intensität des Abbremsens verstärkt sich von Fahrzeug zu Fahrzeug bis es zum kompletten Stillstand kommt (ASTRA 2022).

Die verschiedenen Ursachen für Staus und stockendem Verkehr treten in unterschiedlicher Häufigkeit auf, Abbildung 9 zeigt die genaue Aufteilung. Hier ist zu erkennen, dass die Hauptursache ein hohes Verkehrsaufkommen ist. Dies kann die oben beschriebenen Gründe haben. Weitere Hauptursachen sind Baustellen und Unfälle.

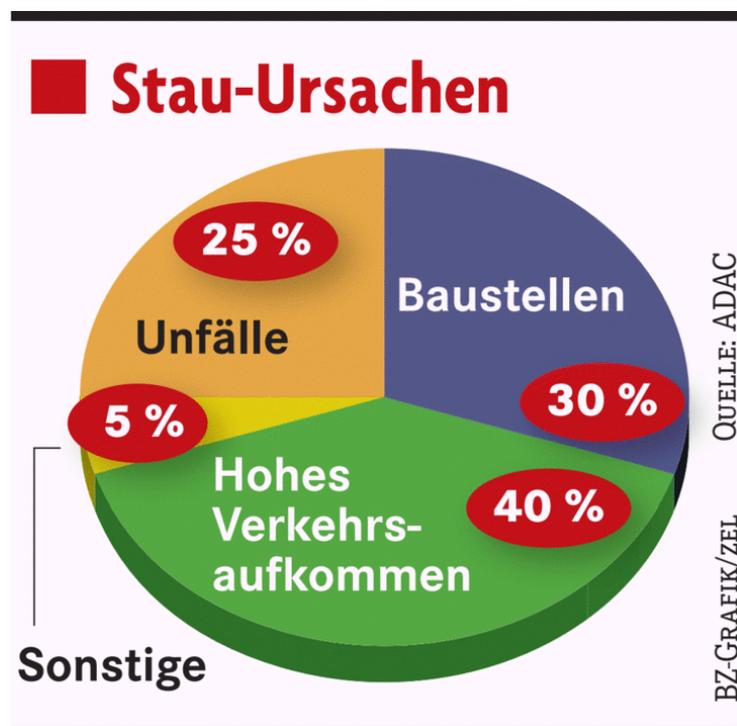


Abbildung 9: Ursachen von Stau (Fritsch 2018)

2.3 Verkehrsflussmodelle

Verkehrsflussmodelle sind mathematisch-algorithmischen Modellen und zählen damit zu den zeitdiskreten Simulationsmodellen, genauer zu den Flussmodellen. Hierbei kann zwischen vier Hauptelementen unterschieden werden. Dazu zählen:

- Makroskopische Modelle
- Mesoskopische Modelle
- Mikroskopische Modelle
- Submikroskopische Modelle

Im Folgenden wird lediglich auf makro- und mikroskopische Verkehrsflussmodelle im Detail eingegangen (Michael Reimann 2007).

2.3.1 Makroskopische Modelle

Bei den makroskopischen Modellen erfolgt die Modellierung des Verkehrs auf Basis von Fahrzeugkollektiven. Hierbei wird der Zusammenhang zwischen Parametern wie Verkehrsstärke und -dichte, der durchschnittlichen Geschwindigkeit, usw. modelliert. Makroskopische Modelle werden mit Hilfe von Flüssigkeitsmodellen oder gaskinetischen Gleichungen beschrieben. Anhand von Parametern wie der Anzahl der Spuren lassen sich wichtige Kenngrößen wie bspw. die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrs vorhersagen. Diese Modelle eignen sich gut zur Simulation von großen Verkehrsmengen, da wenige Parameter zur Beschreibung benötigt werden. Makroskopische Modelle eignen sich beispielsweise zur Simulation von Autobahnverkehr über große Strecken (Dallmeyer 2014).

Vorteile von makroskopischen Modellen sind einfache Ansätze und ein vergleichsweise geringer Rechenaufwand, ein Nachteil ist die grobe Auflösung (Michael Reimann 2007).

2.3.2 Mikroskopische Modelle

Bei mikroskopischen Modellen wird auf Basis von Einzelfahrzeugdaten modelliert. In dieser Art der Simulation spielen nun nicht mehr Parameter wie Verkehrsdichte oder Durchschnittsgeschwindigkeit eine Rolle, sondern Werte wie Individualgeschwindigkeit und Reaktion auf andere im Umfeld. Für eine innerstädtische Simulation mit komplexen Wechselwirkungen zwischen Verkehrsteilnehmern und häufig auftretenden Störungen z.B. durch Ampelschaltungen sind mikroskopische Modelle bestens geeignet. Mikroskopische Modelle können grob in zwei Untergruppen geordnet werden, zum einen die Fahrzeugfolgemodelle und zum anderen die Modelle auf Basis Zellulärer Automaten.

a) Fahrzeugfolgemodelle

„Fahrzeugfolgemodelle sind mikroskopische Verkehrsmodelle, die die Verhaltensweisen der simulierten Autos in Relation zu den vorausfahrenden Fahrzeugen auf ihrer Spur modellieren“ (Dallmeyer 2014). Die Modelle hierbei basieren auf Differentialgleichungen und haben das Ziel, sprunghafte Geschwindigkeitsänderungen zu unterbinden, damit realistische Simulationen zustande kommen.

b) Modelle auf Basis zellulärer Daten

Als Beispiel für ein Mikroskopisches Modell auf Basis zellulärer Daten ist das Nagel-Schreckenberg-Modell (NSM). Dieses ist darauf ausgelegt, mit möglichst einfachen Mitteln große Fahrzeugmengen zu simulieren. Das Modell wird hierbei in einzelne Zellen zerlegt, welche einen bestimmten Zustand aus einer Zustandsmenge annehmen können. Nagel und Schreckenberg zerteilen bspw. eine Straße in einzelne Zellen von 7,5 m, welche ein Auto von 4,5 m und Sicherheitsabstand darstellen sollen. Das NSM wurde bereits mehrfach erfolgreich getestet und erweist sich als geeignetes Modell zur mikroskopischen Simulation von Verkehrsdaten (Dallmeyer 2014).

Vorteile von mikroskopischen Verkehrsflussmodellen sind eine sehr detaillierte Auflösung von Einzelfahrzeugdaten, sowie dass dieser Ansatz sehr verbreitet ist und es viele Ansätze und Produkte dafür gibt. Nachteil ist der sehr hohe Rechenaufwand und dass teilweise große Unterschiede zwischen Simulation und Realität entstehen, wenn kein geeignetes Modell verwendet wird (Michael Reimann 2007).

3. Software zur Verkehrssimulation

In diesem Kapitel wird auf das Prinzip der Verkehrssimulation eingegangen. Mit Hilfe der Grundlagen aus dem vorherigen Kapitel wird zunächst allgemein die Verkehrssimulation erläutert, bevor danach verschiedene Programme kurz vorgestellt werden.

3.1 Definition der Verkehrssimulation

Mit der Verkehrssimulation lassen sich multimodale Verkehrssituationen abbilden und analysieren, bevor sie in der Realität umgesetzt werden. Es gibt einige Aspekte, welche dazu beitragen, wie genau diese Simulation umgesetzt wird. Der wichtigste hierbei ist, ob das Modell die vorliegende Verkehrssituation realitätsnah abbildet oder nicht.

Verkehrssimulation kann nicht nur Fahrzeuge abbilden, sondern ist mittlerweile in der Lage Fußgängerströme wirklichkeitsgetreu zu simulieren, beispielsweise für Großveranstaltungen oder die Evakuierung von Stadien. Die Simulation kann neben dem Individualverkehr auch schienengebundenen und straßengebundenen öffentlichen Verkehr abbilden. Der Verkehrsablauf erfolgt unter der Berücksichtigung von verschiedensten Randbedingungen wie der Fahrstreifenaufteilung, der Lichtsignalsteuerung und der Aufteilung in IV und ÖV.

Verkehrssimulationen bauen im Allgemeinen auf den Modellen des Verkehrsflusses und der Ampelsteuerung, der sogenannten Lichtsignalsteuerung auf. Die Simulation kann als Animation betrachtet werden und kann Antworten auf viele verschiedene Problemstellungen in der Straßenverkehrsplanung liefern, als Beispiel gelten:

- Vergleich von Knotengeometrien mit Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Verkehrsmodi wie ÖV, Fußgänger und Radfahrer
- Kapazitätsanalyse zur Betrachtung von hohem Verkehrsaufkommen und sich kreuzenden Verkehrsströmen zwischen Knotenpunkten

- Verkehrsentwicklungsplanung beispielsweise zur Planung von Parkplätzen
- ÖPNV Simulation zur Auslegung von spezifischen Fahrstreifen oder zur priorisierten Lichtsignalsteuerung
- Verkehrssteuerung auf mikroskopischer Ebene analysieren, Verbesserung des Verkehrsflusses, sowie Simulation verschiedenster Verkehrskenngrößen wie Geschwindigkeit, Reisezeit, Zeitverlust, usw. (Emch+Berger Gruppe 2020)

3.2 Verkehrssimulationsprogramme

Verkehrssimulationsprogramme dienen dazu, die eben beschriebene Vorgehensweise umzusetzen und somit eine Simulation abzubilden. Es gibt, wie bereits erwähnt, verschiedene Arten der Verkehrssimulation, die mikroskopische, makroskopische und mesoskopische Simulation, welche hierbei auch Anwendung finden.

Es existieren verschiedene Arten von Programmen, auf fünf der bekanntesten wird in den nächsten Unterkapiteln eingegangen.

3.2.1 SUMO

SUMO steht für „Simulation of Urban Mobility“ und ist ein Programm, welches vom Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum entwickelt wurde. Es handelt sich hierbei um eine Open-Source Software und ist frei verfügbar. Mit SUMO kann mikroskopische und kontinuierliche Verkehrssimulation durchgeführt werden.

3.2.2 CORSIM

CORSIM ist ebenfalls ein Programm zur mikroskopischen Verkehrssimulation für Signal-, Autobahn- und kombinierte Signal- und Autobahnssysteme. CORSIM ist die Abkürzung für Corridor Simulation und umfasst die beiden Systeme NETSIM und FRESIM. Das Programm NETSIM ist für den städtischen Verkehr geeignet, das Programm FRESIM bildet den außerstädtischen Verkehr, also den

Autobahn- und Landstraßenverkehr ab. Entwickelt und stetig verbessert wird das Programm vom McTrans Center der Universität von Florida (McTrans - University of Florida 2021).

3.2.3 Aimsun

Aimsun ist ein 1997 gegründetes Unternehmen, welches die die gleichnamige Simulationssoftware zur mikroskopischen Verkehrssimulation entwickelt hat. Aimsun gehört dem Siemens-Konzern an und bietet Verkehrssimulation auf einem sehr hohen technischen Niveau an. Durch die Verknüpfung klassischer Software mit Künstlicher Intelligenz ist es in der Lage, intelligente Verkehrsplanung mit Live-Verkehrsdaten zu verbinden, und somit eine neue Art der Simulation darzustellen. Aimsun steht für „Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks“ (Aimsun SLU 2021).

3.2.4 MATSim

MATSim ist, wie die hier anderen aufgezählten Programme, ein mikroskopisches Simulationsprogramm. Es eignet sich zur Simulation von Transport und ist im Gegensatz zu den anderen Programmen in Modulen aufgebaut. Simuliert wird der klassische Personentransport in Form von Verkehr, öffentlich und individuell. Das Tool ist besonders für große Szenarien geeignet und dabei weiterhin detailgetreu. Entwickelt wurde es von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich in der Schweiz und wird auch weiterhin gepflegt und verbessert. MATSim steht für „Multi-Agent Transport Simulation“ also Multi-Agenten Transport Simulation (MATSim 2022).

3.2.5 VISSIM

VISSIM ist eine mikroskopische, multi-modale Verkehrssimulationssoftware des deutschen Herstellers PTV Planung Verkehr Transport GmbH aus Karlsruhe. VISSIM ist erstmals 1992 auf den Markt gekommen und zählt heute zum weltweit am meisten genutzten Programm zur Verkehrssimulation. VISSIM eignet sich zur Simulation aller Verkehrsströme, inklusive Fußgängern. Der Detailgrad gilt als

sehr hoch, da Fahrzeuge wie Passanten einzeln angesteuert werden können und somit mögliche Konflikte und Probleme in der Verkehrssimulation schnell erkannt werden können. Bei Bedarf ist hier möglich, zwischen makroskopischer und mesoskopischer Simulation zu wechseln, oder ein hybrides Modell abzubilden. Als weiterer Benefit von VISSIM gilt die Möglichkeit der Darstellung des öffentlichen Verkehrs, inklusive verschiedener Linien, Haltestellen, Fahrplänen sowie Fahrzeugtypen. Der Name VISSIM ist ein Akronym für „Verkehr in Städten – Simulationsmodell“ (PTV Group 2022).

4. Wardrop Prinzipien und Braess-Paradoxon

In diesem Kapitel werden die Wardrop Prinzipien, das Braess Paradoxon, die Aktualität des Themas sowie Beispiele in Verkehrs- und Informationsnetzen beschrieben und erläutert. Dieses wird anschließend in Kapitel 5 mit Hilfe von NetLogo simuliert.

4.1 Wardrop Prinzipien

Im Jahr 1952 formulierte der Mathematiker John G. Wardrop zwei Prinzipien der Verkehrsplanung, welche unterschiedliche Vorgehensweisen der Gleichgewichtsbildung aufweisen (Dr. Treiber 2016). Diese beiden Theorien beruhen auf dem sogenannten *Nash Gleichgewicht*, welches im weiteren Verlauf der Arbeit thematisiert wird.

4.1.1 Erstes Wardrop Prinzip (User-Gleichgewicht)

Das Erste Wardrop-Prinzip lautet: „Die Fahrtzeit auf allen tatsächlich benutzten Routen ist gleich und kleiner als die Fahrtzeit, die ein einzelnes Fahrzeug auf jeder der unbenutzten Route erfahren würde (Universität Braunschweig und OptiV 2022).“ Das bedeutet, dass jeder Fahrer auf der für sich optimalen Route unterwegs ist und die Fahrtzeit nicht durch einen Wechsel auf eine andere Route verringern kann. Dieses Gleichgewicht wird im englischen als *deterministic user equilibrium*, kurz *DUE*, bezeichnet.

4.1.2 Zweites Wardrop Prinzip (System-Gleichgewicht)

Das User- bzw. Nutzer-Gleichgewicht ist nicht die einzige Möglichkeit eines Gleichgewichtszustandes in einem Verkehrsnetz. Durch eine gezielte Manipulation der Verkehrsteilnehmer ist es möglich, die Fahrtzeit bzw. Fahrtkosten nicht nur für das einzelne Individuum, sondern für die Gesamtheit aller Fahrer auf ein Minimum zu reduzieren. Dieser Gleichgewichtszustand beschreibt das Zweite Wardrop-Prinzip: „Ein Gleichgewichtszustand ist nur dann

erreicht, wenn die Grenzkosten auf allen Routen gleich sind (Universität Braunschweig und OptiV 2022).“

Anders gesagt ist die Summe aller systemweiten Kosten für die Ortsveränderung minimal. Für die im Netz vorhandenen Routen r aller Quelle-Ziel-Beziehungen, die Nachfrage Q_r nach diesen Routen und die daraus resultierenden Routenwiderstände W_r wird damit folgender Wert minimal: (Aleksic 2012)

$$\sum_r Q_r * W_r = \min \quad (4-1)$$

4.1.3 Anwendung: Pigou Paradox

Das Pigou-Paradox, auch *Pigou-Knights-Downs-Paradox* oder *Downs-Thomson Paradox* beschreibt ebenfalls ein Phänomen in der Verkehrsplanung. Hierbei wird beobachtet, wie der Ausbau der Infrastruktur im Bereich Straßenverkehr und eine gleichzeitige Vernachlässigung des Bereiches öffentlicher Personen-Nahverkehr (ÖPNV) eine Verschlechterung der Reisezeit mit sich bringt (Morgan, Orzen, und Sefton 2009).

Wenn beispielsweise eine Autobahn zwischen Köln und Düsseldorf weiter ausgebaut wird und damit augenscheinlich zu einer kürzeren Fahrzeit für Pendler führt, ist dies für alle Verkehrsteilnehmer sehr attraktiv. Bei einem gleichbleibenden Ausbau der Bahnstrecke und keiner Erweiterung der Zugkapazitäten zwischen den zwei Orten, kann es dazu kommen, dass einige Nutzer des ÖPNV auf die individuelle Nutzung des Autos umsteigen und damit zu einem höheren Verkehrsaufkommen auf der Autobahn beitragen. Hierbei führt dieses Aufkommen dann trotz des Ausbaus der Strecke zu erneuten Staus und einer Verschlechterung der Fahrzeit gegenüber dem ÖPNV. Um dieses Phänomen zu verhindern, muss es zu einer gleichen Investition beim Ausbau der Verkehrsnetzes sowohl bei Straßen als auch im Schienenverkehr kommen.

Ein Beispiel hierfür ist das sogenannte Gateway Project in Vancouver, Kanada. Hier wurde im Jahr 2009 eine große Straße für den individuellen Verkehr in

großem Stil ausgebaut, der ÖPNV allerdings komplett vernachlässigt. Ergebnis hiervon waren mehr Staus und höhere Reisezeiten, da viele Menschen vom Zug auf das Auto umgestiegen sind (Price 2009).

4.2 Braess-Paradoxon

Bei dem Braess-Paradoxon handelt es sich um ein Phänomen in der Verkehrsplanung, welches im Jahr 1968 vom gleichnamigen Prof. Dr. Dietrich Braess entdeckt wurde. Im Jahr 1964 erhielt er seine Promotion in theoretischer Kernphysik an der Universität Hamburg. Anschließend wechselte er zur Mathematik und habilitierte 1968 an der Universität Münster, an welcher er als Professor lehrte (Academic 2022).

Zusammenfassend handelt es sich hierbei um ein Phänomen, dass wenn zu vorhandenen Straßen eine weitere hinzugefügt wird, dies nicht immer bedeutet, dass der Verkehrsfluss verbessert wird und sich die Reisezeiten verringern, sondern diese vielmehr erhöht wird. Als Beispiel dient ein Verkehrsnetz, wie es in Abbildung 10 dargestellt ist. Um vom Start zum Ziel zu gelangen, gibt es zwei verschiedene Routen, die eine führt über Punkt A und die andere über Punkt **B**. Die Variable **V** beschreibt die Anzahl der Fahrzeuge, welche sich für die Route entscheiden. Die **blauen** Routen sind abhängig von der Anzahl der Fahrzeuge, die auf der Strecke fahren. Die benötigte Fahrzeit wird mit der Formel $t = V/100 \text{ min}$ beschrieben. Die **grünen** Routen sind unabhängig von der Anzahl der Fahrzeuge und haben eine konstante Fahrzeit von 45 min. Die gesamte Fahrzeit lässt sich also berechnen mit:

$$t_{ges} = V/100 \text{ min} + 45 \text{ min} \quad (4-2)$$

Wenn nun als Beispiel 4.000 Fahrzeuge vom Start zum Ziel gelangen wollen und sich alle für die Route über Punkt A entscheiden, welches den worst-case beschreibt, ergibt sich als Fahrzeit:

$$t_{wc} = 4.000/100 \text{ min} + 45 \text{ min} = 85 \text{ min} \quad (4-3)$$

Um hierbei das Systemoptimum herauszufinden, müssen sich 2.000 Fahrzeuge für die Route über Punkt **A** und 2.000 Fahrzeuge für die Route über Punkt **B** entscheiden. Hierdurch ergibt sich eine optimale Fahrzeit für beide Strecken von jeweils:

$$t_{opt} = 2.000/100 \text{ min} + 45 \text{ min} = 65 \text{ min} \quad (4-4)$$

Dieses Gleichgewicht wird auch als **Nash equilibrium** (Gleichgewicht) bezeichnet. Beim Nash equilibrium handelt es sich um eine Theorie aus der Spieltheorie. Hierbei haben Spieler, im vorliegenden Fall Führer von Fahrzeugen, die Möglichkeit aus mehreren Strategien zu wählen, wobei sich jeder Spieler für genau eine entscheidet. Es ist für jeden Spieler nicht sinnvoll von seiner Theorie abzuweichen. Hier ist es für die Fahrer nicht sinnvoll die andere Route zu wählen. Beim Nash equilibrium wählen die Spieler die bestmögliche Strategie für sich aus und sind im Nachhinein damit voll zufrieden (Chen 2022).

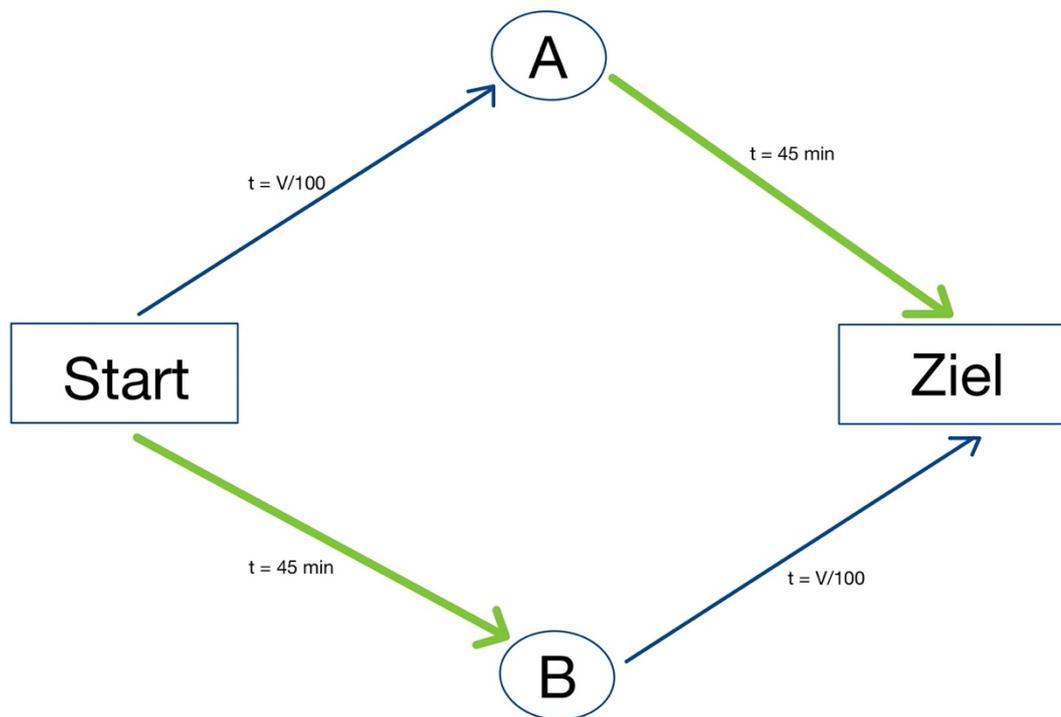


Abbildung 10: Verkehrsnetz Ausgangssituation

Um nun die Verkehrssituation zu „verbessern“, wird eine weitere Straße zwischen den Punkten **A** und **B** erbaut, wie in Abbildung 11 zu erkennen ist. Diese Straße hat zur Vereinfachung die Fahrzeit $t = 0 \text{ min}$ erhalten. Diese Anordnung der Straßen beschreibt das sogenannte Braess Paradoxon. Um die gesamte Fahrzeit zu berechnen, muss hierbei zu Grunde gelegt werden, dass die Fahrer jeweils individuell für sich entscheiden, welche Route gefahren wird, und hierbei das wohl aller, nämlich ein Gesamtgleichgewicht zu erhalten, vernachlässigt wird.

Weiterhin besteht die Anzahl der Fahrzeuge bei $V = 4.000$ Stück. Wenn sich alle Fahrer für die augenscheinlich kürzeste Strecke entscheiden würden, würde der Weg vom **Start** über Punkt **A** und **B** zum **Ziel** führen. Hierbei würde die Fahrzeit folgenden Wert betragen:

$$t_{SABZ} = 4.000/100 \text{ min} + 0 \text{ min} + 4.000/100 \text{ min} = 80 \text{ min} \quad (4-5)$$

Bei der Strecke vom **Start** über die Punkte **B** und **A** zum **Ziel** würde sich sogar folgende Fahrzeit ergeben:

$$t_{SBAZ} = 45 \text{ min} + 0 \text{ min} + 45 \text{ min} = 90 \text{ min}$$

Um das Optimum bei dieser Anordnung des Verkehrsnetzes zu erreichen, müssten alle Fahrer die neue Straße ignorieren und stattdessen auf den vorhandenen Routen bleiben. Durch das Hinzufügen der neuen Straße ergibt sich für alle Fahrer eine Verlängerung der Fahrzeit, da es immer mindestens eine Person geben wird, welche für sich die optimale Zeit erreichen möchte, ohne an die weiteren Verkehrsteilnehmer zu denken. Hierdurch werden weitere Fahrer animiert die neue Route zu verwenden, und somit die Fahrzeit für sich und für alle anderen zu verschlechtern. (Vgl: Bittihn und Schadschneider 2021)

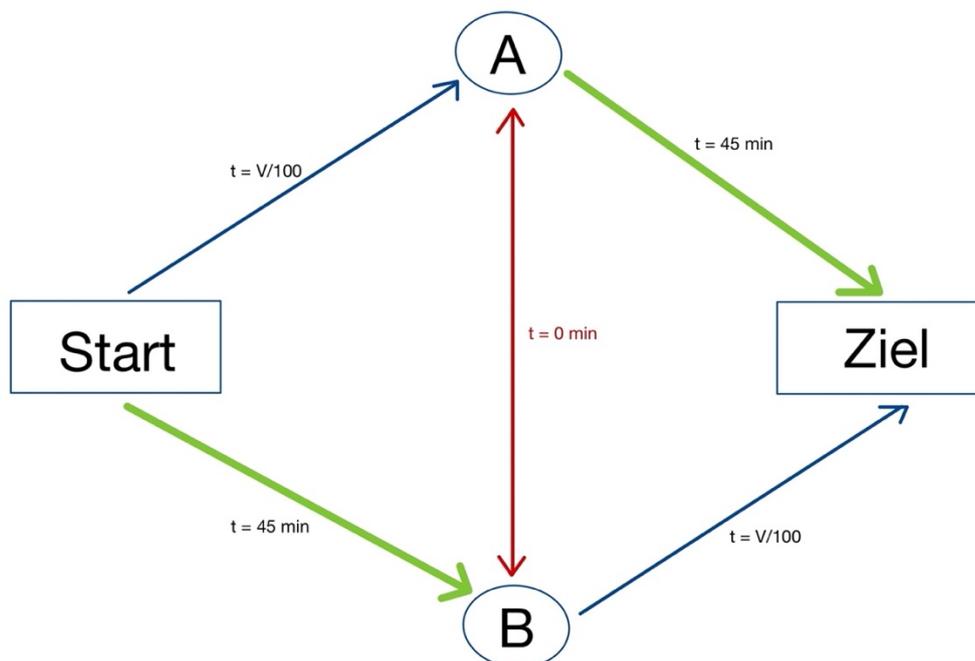


Abbildung 11: Verkehrsnetz nach "Verbesserung"

4.2.1 Anwendung Braess-Paradoxon

Das Braess Paradoxon findet Anwendung in verschiedenen Bereichen, beispielsweise in Verkehrsnetzen, sowie auch in Informationsnetzen. Im Folgenden wird auf ersteren Punkt genauer eingegangen.

4.2.2 Beispiele in Verkehrsnetzen

Das Braess-Paradoxon tritt nicht nur in der theoretischen, mathematischen Welt auf, sondern es finden sich verschiedenste Beispiele überall auf der Welt, bei denen Verkehrsphänomene durch diese Theorie beschrieben werden konnten.

Ein Verkehrsnetz ist der Oberbegriff für die Verkehrsinfrastruktur, welche die Vernetzung von Verkehrswegen innerhalb des Land-, Wasser- und Luftverkehrs betrifft. Diese Vernetzung geschieht durch Verkehrsverbindungen, beispielsweise in Form von Straßen, zwischen verschiedenen Systemelementen. Hierbei wird das System als Netzwerk bezeichnet (Wikipedia 2022).

Im Jahr 1969 führte eine Eröffnung einer neuen Straße in Stuttgart zu einer deutlichen Verschlechterung des Verkehrsflusses im Bereich der Innenstadt. Dieser beruhigte sich erst wieder, als diese Straße geschlossen wurde (Blum 2010). Das Paradox im umgekehrten Sinne wurde im Jahr 1990 in New York beobachtet. Hier führte die Sperrung der 42. Straße zu einer enormen Verbesserung des Verkehrsaufkommens und es kam zu deutlich weniger Staus, besonders zu den Stoßzeiten (Colata 1990).

4.2.3 Beispiele in Informationsnetzen

Informationsnetze gibt es in verschiedenen Formen, in der hier beschriebenen geht es hauptsächlich um bereitgestellte Informationen für Autofahrer, und wie sich diese auf den Verkehrsfluss auswirken.

Es gibt Forschungen zu der Thematik, dass Verkehrsteilnehmern, welchen im Vergleich zu anderen auf derselben Strecke von A nach B mehr Informationen zur Verfügung stehen, eine schlechtere Routenwahl treffen oder nicht. Hierbei

wird Bezug genommen auf GPS-basierte Routenführungssysteme, bei denen den Fahrzeugführern unterschiedliche Informationssätze zur Verfügung stehen, und ob diese zusätzlichen Informationen im Sinne der Erzeugung größerer Gleichgewichtskosten schädlich sein können oder nicht. Dieses Phänomen wird als *Informational Braess Paradox* bezeichnet (Acemoglu u. a. 2017).

4.2.4 Aktualität des Themas

Die Aktualität des Themas wird mit Hilfe einer Recherche in „Google Scholar“ ermittelt. Hierbei werden alle Veröffentlichungen mit den Schlagwörtern „braess paradox“ ermittelt und jahrweise angezeigt. Hieraus wird, wie in Abbildung 12 zu erkennen, ein Säulendiagramm erstellt, welches den Verlauf der Anzahl der Veröffentlichungen über die Jahre 1990 bis 2021 darstellt. Hierbei lässt sich erkennen, dass das Thema eine sehr hohe Aktualität aufweist, und die Anzahl stetig und stark angestiegen ist (Google Scholar 2022). Diese hohe Aktualität lässt sich erklären durch die ebenfalls sehr hohe Aktualität des Themas der autonom fahrenden Fahrzeuge. Die Entwicklung in diesem Bereich schreitet immer weiter voran und aktuelle Fahrzeuge haben bereits die Fähigkeit, Strecken auf Autobahnen und Landstraßen ohne Einwirkung des Fahrzeugführers zu bewältigen.

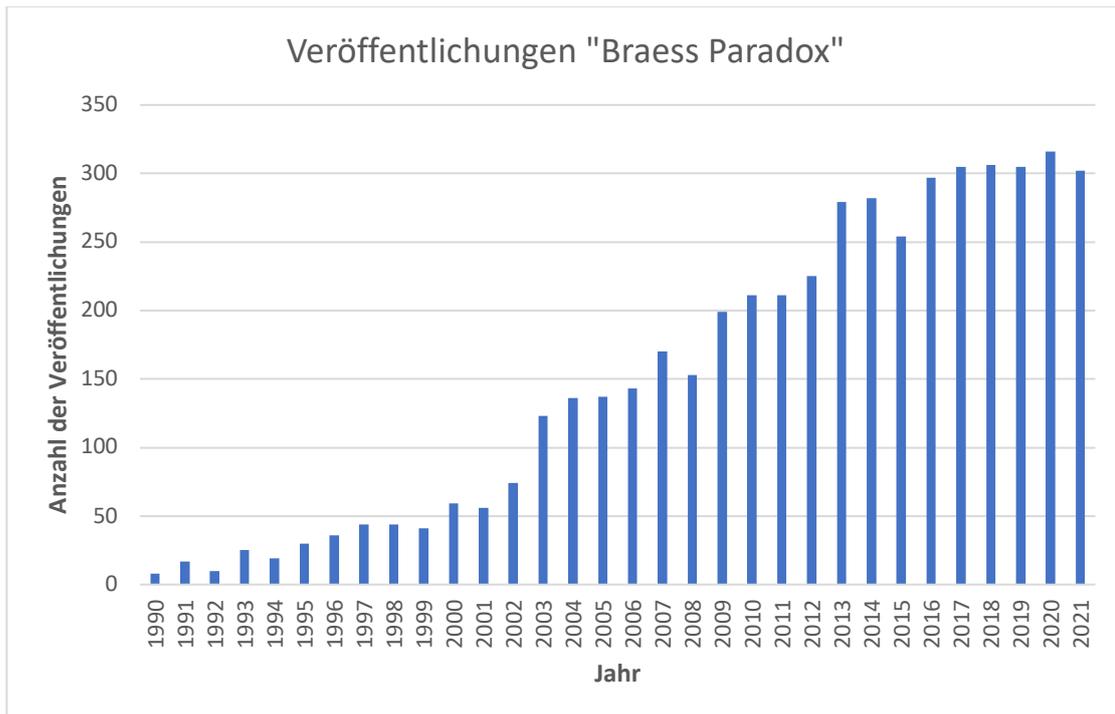


Abbildung 12: Veröffentlichungen "Braess-Paradoxon"

Ebenso wichtig bei den Veröffentlichungen ist der Anteil des Braess Paradoxon in Hinsicht auf die Informationsnetze und dem Thema der „Game Theory“, auf Deutsch: Spieltheorie. Abbildung 13 zeigt eine Statistik, wie viele Veröffentlichungen in Bezug auf die drei Unterkategorien „Traffic Network“, „Game Theory“ und „Information Network“ im Zeitraum von 2010 bis einschließlich 2021 erschienen sind (Google Scholar 2022). Hierbei ist zu erkennen, dass das Thema Verkehrsnetze die geringste Wichtigkeit aufweist, hingegen aber die beiden Themen Informationsnetze und Spieltheorie mehr Veröffentlichungen besitzen.

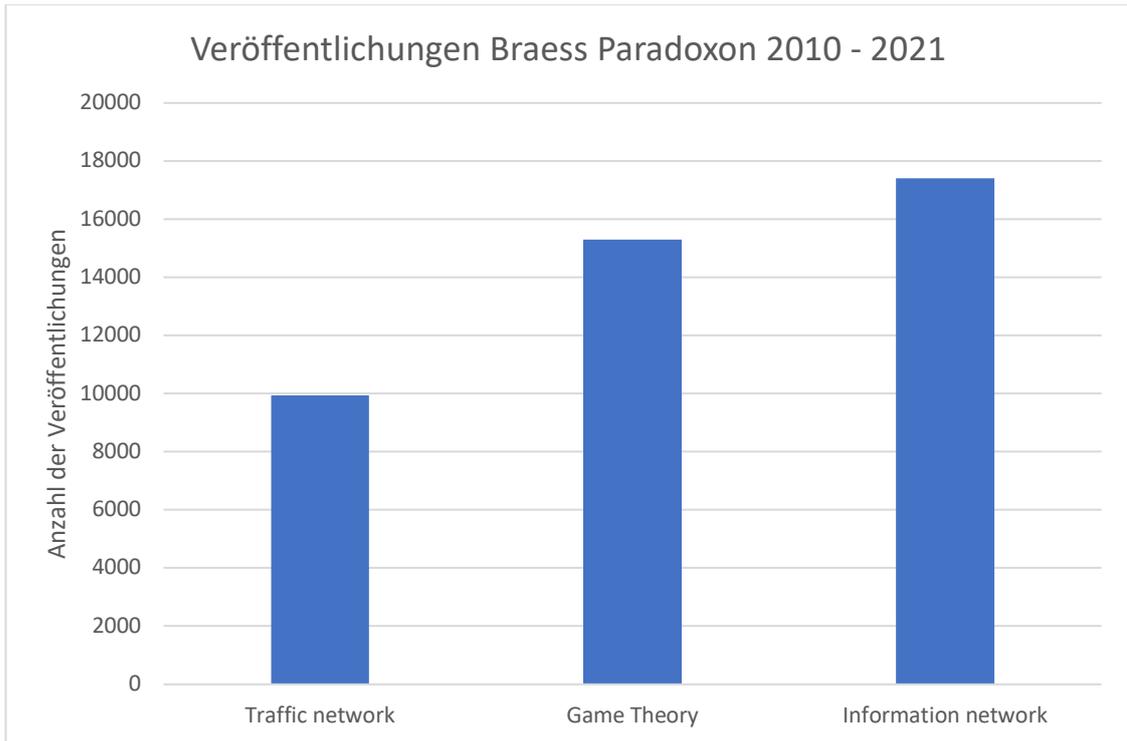


Abbildung 13: Veröffentlichungen in Bezug auf Unterkategorien

5. Simulation des Braess-Paradoxons

Das Braess-Paradoxon wird in dieser Arbeit mit Hilfe von NetLogo simuliert. Zunächst wird auf die Grundlagen des Programms genauer eingegangen, bevor elementar wichtiges stochastisches Grundlagenwissen über den Markow Prozess und die ereignisbasierte Simulation beschrieben wird. Anschließend wird die Implementierung mit Hilfe des Programmcodes erläutert, um verschiedene Simulationen des Szenarios durchzuführen.

5.1 Grundlagen NetLogo

Bei NetLogo handelt es sich um eine Multi-Agenten Simulationssoftware, welche über eine integrierte Modellierungsumgebung verfügt. Das Programm wurde im Jahr 1999 vom Entwickler Uri Wilensky veröffentlicht und basiert auf der Sprache „Logo“. Ziel der Softwareentwicklung war, eine einfache und anwenderfreundliche Anwendung zu erstellen, welche die Simulation von verschiedensten Szenarien aus vielen Bereichen abbilden kann.

NetLogo ist besonders geeignet für die Simulation komplexer Systeme über einen bestimmten Zeitverlauf. Der Benutzer kann hierbei leicht mehrere Tausend Individuen, hier „Agenten“, einzeln ansteuern, wobei sich alle unabhängig voneinander verhalten. Dadurch können sehr einfach und schnell Verhaltensmuster erkannt und analysiert werden. Durch das Ändern von unterschiedlichen Parametern in der Simulation ist es für den Anwender möglich, verschiedene Bedingungen zu beobachten, aber auch eigene Simulationen zu programmieren. Zusätzlich zu klassischer Programmierung liefert NetLogo eine sogenannte „Models Library“, in welcher voreingestellte Simulationen verwendet und abgeändert werden können. Hierbei gibt es Basis-Simulationen aus den Bereichen der Naturwissenschaften, Medizin, Physik, Mathematik und vielen mehr (Wikipedia 2020).

Ein bekanntes Beispiel für die Simulation in NetLogo ist „Wolf-Schaf“ (Abbildung 14) und „Wolf-Schaf-Gras“ (Abbildung 15). Es handelt sich hierbei um eine typische Multi-Agenten-Simulation, bei der es in diesem Fall das

Populationswachstum eines Raubtier-Beute Systems darstellt. Bei der Variante Wolf-Schaf gibt es die beiden Agenten Wolf und Schaf. Beginnend mit einer einstellbaren Startpopulation wandern Wölfe und Schafe zufällig und unabhängig voneinander durch die Landschaft. Die Wölfe verlieren durch die Bewegung Energie, welche durch ein Fressen von Schafen wieder aufgefüllt werden kann. Durch eine bestimmte festgesetzte Wahrscheinlichkeit vermehren sich die Schafe und Wölfe zu jedem Zeitschritt. Verlieren die Wölfe zu viel Energie, sterben diese (Wilensky 1997).

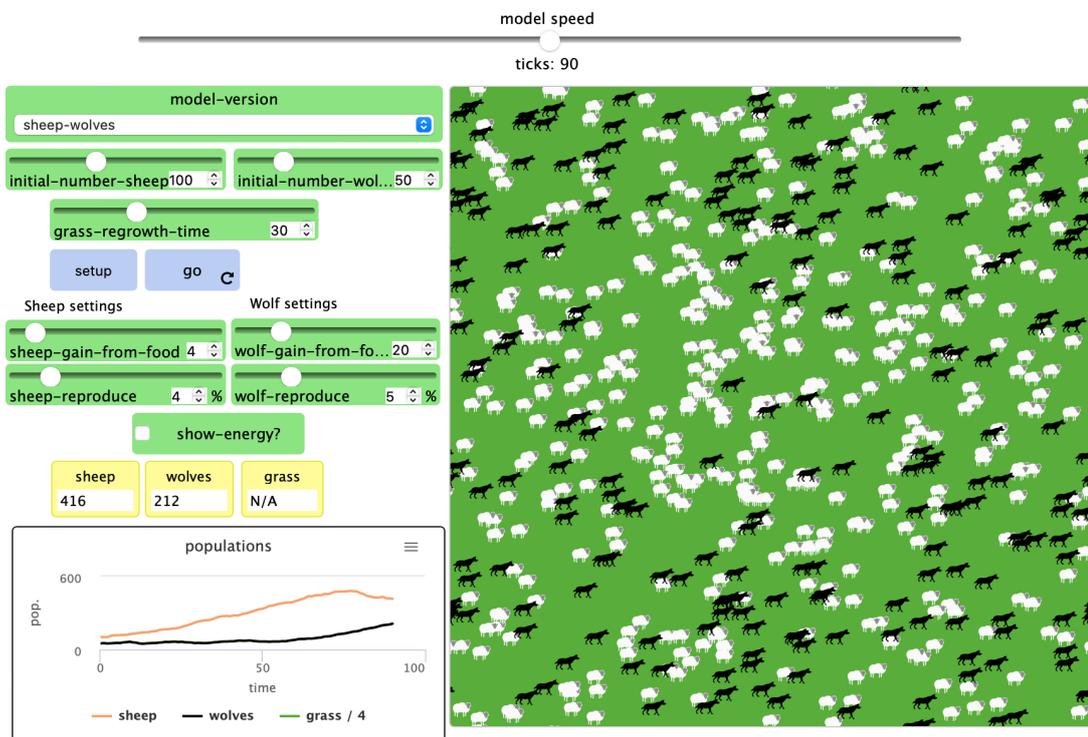


Abbildung 14: NetLogo Wolf-Schaf

Bei der zweiten Variante, zu erkennen in Abbildung 15, der Simulation Wolf-Schaf-Gras, ist das Verhalten der Wölfe identisch zu Variante eins. Hierbei besteht der Unterschied darin, dass der Agent Gras hinzugekommen ist. Schafe verlieren nun durch Bewegung Energie und müssen diese durch das Fressen von Gras wieder auffüllen, andernfalls sterben diese. Das Gras verschwindet durch das Fressen der Schafe, wächst aber nach einer gewissen Zeitperiode wieder nach (Wilensky 1997).

In NetLogo lässt sich diese Simulation nicht nur beobachten, sondern kann durch ein Verändern bestimmter Parameter auch beeinflusst werden. Es kann beispielsweise die Startpopulation verändert werden, die Zeit, in der das Gras wächst, sowie der Zuwachs an Schafen und Wölfen. Letztendlich kann nur die zweite Simulation als stabil betrachtet werden, da es bei der ersten immer auf ein Aussterben der Wölfe hinausführt, wohingegen die zweite Variante zu einer unendlich andauernden Simulation führt.

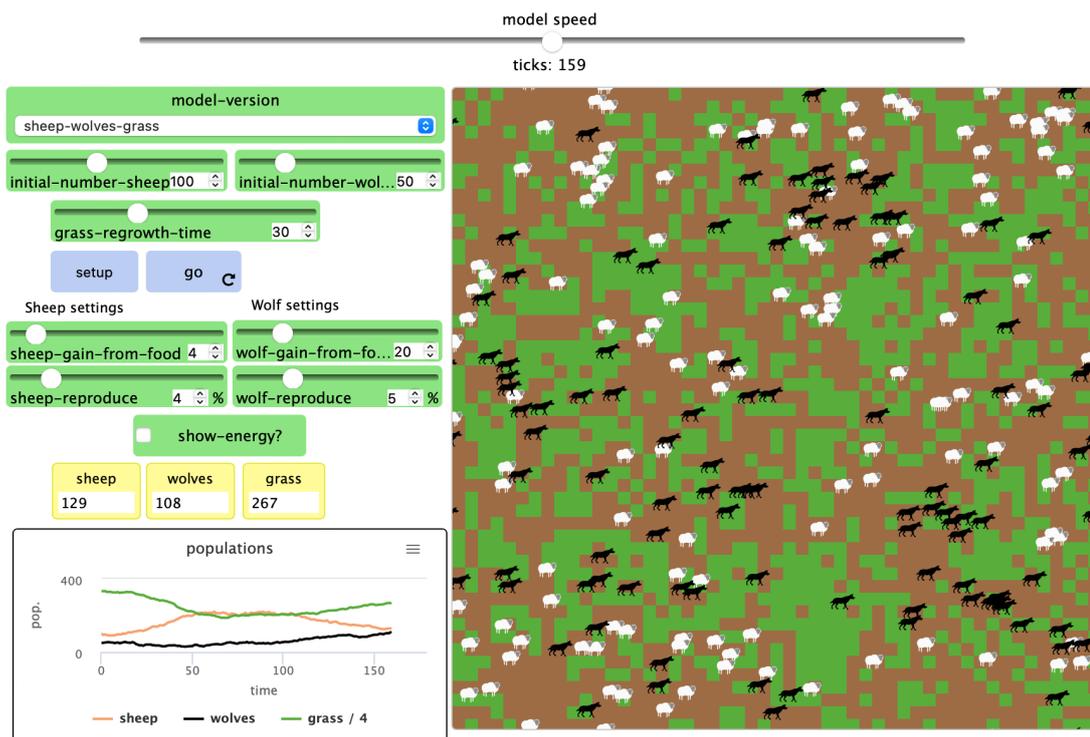


Abbildung 15: NetLogo Wolf-Schaf-Gras

Ein weiteres Beispiel für die Agenten-basierte Simulation ist das in Abbildung 16 dargestellte Verkehrsnetz. Es handelt sich hierbei um das in quadratischer Form angeordnete Straßenbild einer Stadt. Diese Simulation dient dazu, globale Variablen wie die Geschwindigkeitsbegrenzung und Steuerung der Ampeln in Relation zur Reisezeit zu untersuchen. Bei jedem Zeitschritt versuchen die Agenten in Form von Autos mit ihrer aktuellen Geschwindigkeit nach vorne zu fahren. Befindet sich die aktuelle Geschwindigkeit unter der erlaubten, so beschleunigen diese, sofern die Straße vor ihnen frei ist. Sobald ein langsames Fahrzeug vorausfährt, wird die Geschwindigkeit automatisch verringert,

respektive bei einer roten Ampel. Die Ampeln schalten bei jedem Zyklusschritt automatisch (Wilensky 2003).

In dieser Simulation können ebenfalls Parameter beeinflusst werden, um Beobachtungen zu verändern. Hierzu zählen unter anderem die Größe des Straßennetzes, die Anzahl der Fahrzeuge, sowie das Tempolimit. Es kann dann zur Auswertung die Anzahl der stehenden Autos, die durchschnittliche Geschwindigkeit und die durchschnittliche Wartezeit der Fahrzeuge abgelesen werden.

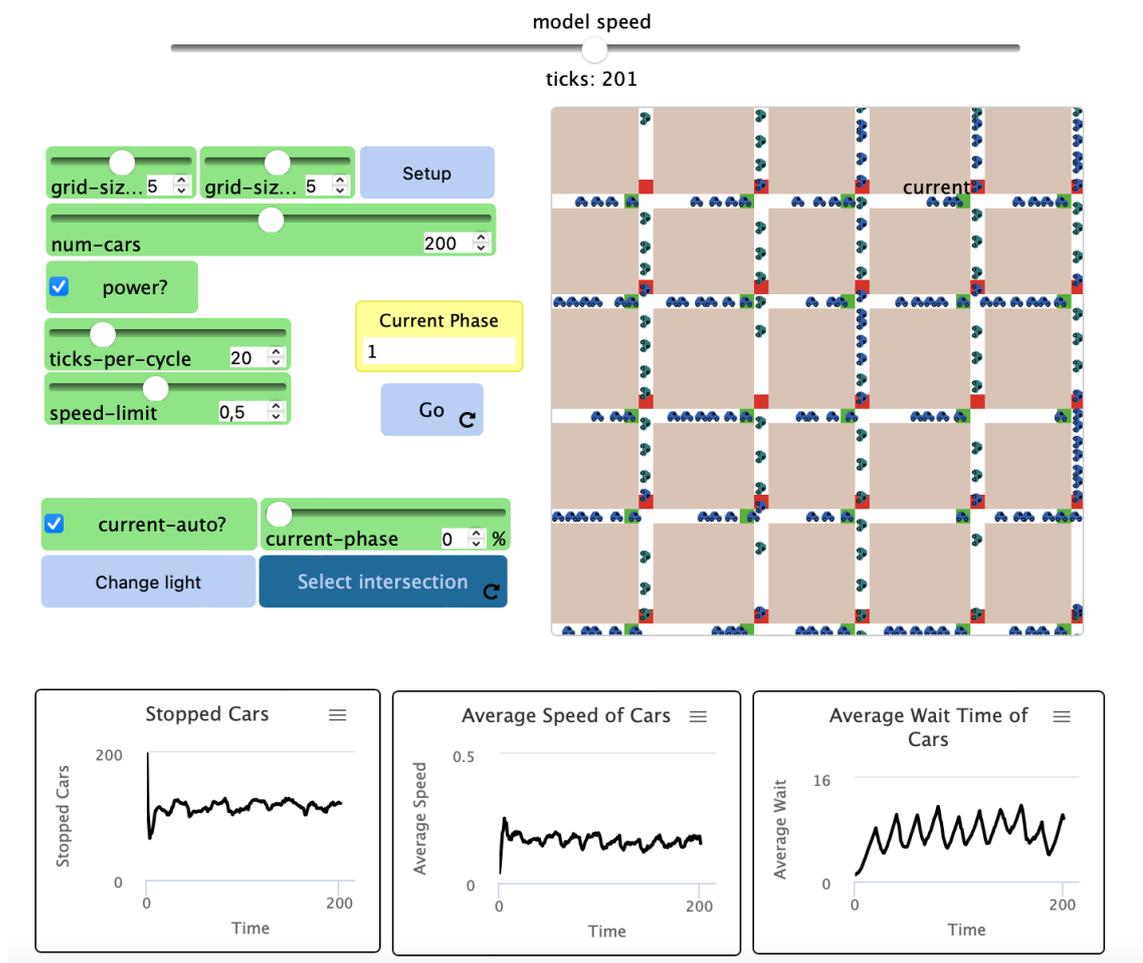


Abbildung 16: NetLogo Verkehrsnetz

5.2 Markow Prozess

Beim Markow Prozess, auch Markow Kette genannt, handelt es sich um einen speziellen stochastischen Prozess. Hierbei besteht das System aus konstanten Wahrscheinlichkeiten mit einem Wechsel zwischen endlich vielen Zuständen (Schomaker 2012).

Beschreiben lässt sich die Markow Kette durch ein wie in Abbildung 17 dargestelltes Prozessdiagramm. Hierbei beschreiben die Kreise die Zustände eins, zwei und drei; die Pfeile kennzeichnen die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten. Der Wechsel von Zustand 1 auf 2 tritt mit einer Wahrscheinlichkeit von 70% ein, im Umkehrschluss von Zustand 2 auf 1 zu 30%. Ein Verweilen in Zustand 1 und 2 geschieht mit einer Wahrscheinlichkeit von ebenfalls 30%. Der Wechsel von 2 in 3 tritt zu 40% ein und einmal angekommen in Zustand 3 ist der Prozess beendet und zu 100% findet kein Wechsel mehr statt.

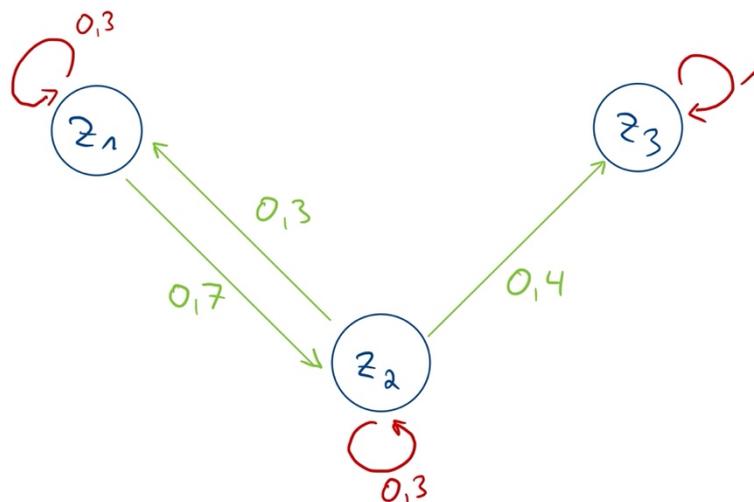


Abbildung 17: Prozessdiagramm Markow Kette

Die Markow Kette illustriert in dieser Arbeit auch die Simulation des Braess-Paradoxons; ein weiterer wichtiger Begriff hierfür ist die Ereignisbasierte Simulation, diese ist gleichzusetzen mit der diskreten Simulation. Das System ist gekennzeichnet durch diskrete Ereignisse, welche zu beliebigen Zeitpunkten auftreten können. Die zeitlichen Abstände zwischen den Ereignissen können

variieren, es kommt jedoch ohne ein Ereignis zu keiner Änderung im Prozess. Die ereignisbasierte Simulation kann neben Verkehrssystemen beispielsweise für Transportsysteme, betriebliche Abläufe und viele weitere eingesetzt werden (Universität Würzburg, o. J.).

5.3 Implementierung des Braess-Paradoxons

Um das Braess-Paradoxon simulieren zu können, wurde ein Programm dafür in NetLogo geschrieben. Ziel dieses Programms ist, das Paradoxon zu simulieren, und anhand von verschiedenen Parametern kritische Schwellen zu ermitteln. Zunächst wird das Interface (Abbildung 18) beschrieben, bevor der Programmcode genauer erläutert wird.

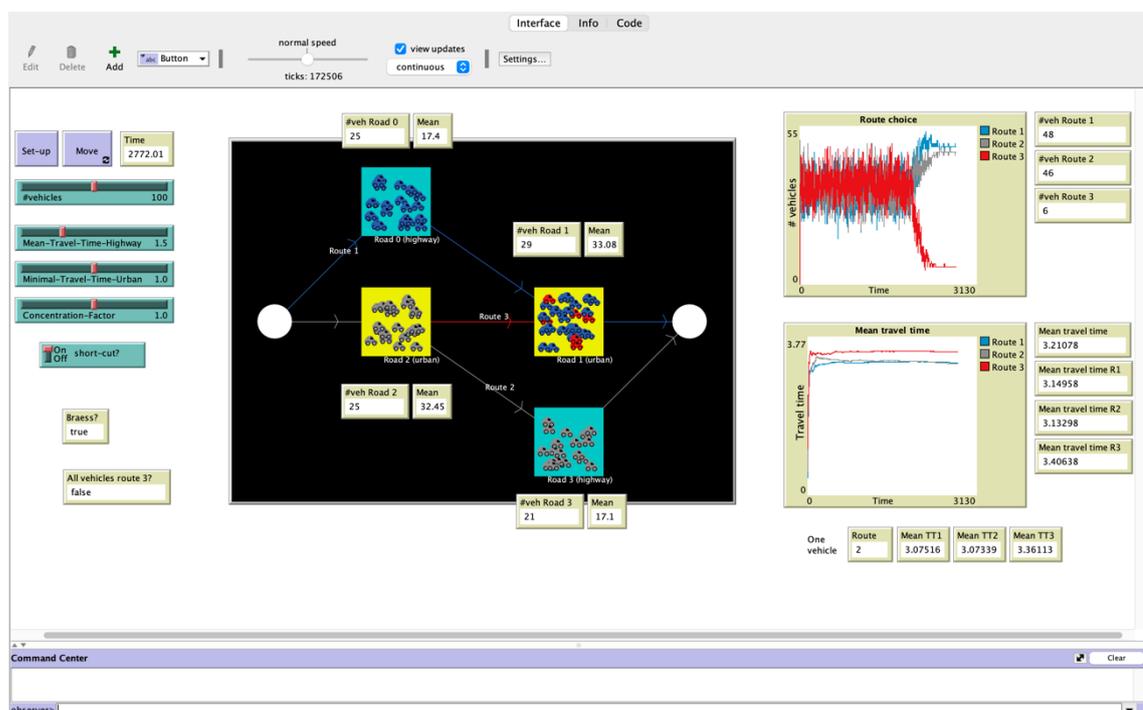


Abbildung 18: Interface Braess-Paradoxon NetLogo

Interface bedeutet übersetzt „die Schnittstelle“, und beschreibt die Ansicht, mit der der Benutzer eines Programms in Kontakt kommt, also die Schnittstelle zwischen Bediener und Programmcode. In diesem Fall ist zentral die Straßenanordnung des Braess-Paradoxons abgebildet. Hier wird das Layout zwischen den zwei bzw. drei Routen dargestellt. Die beiden weißen Punkte

stellen den Start und das Ziel der Strecke dar, die türkis-farbenen Quadrate visualisieren die Autobahn (Highway) und die gelben Quadrate stellen die Stadt (Urban) dar. Jeweils an den einzelnen Quadraten befinden sich sogenannte „Monitore“, welche die aktuelle bzw. die durchschnittliche Anzahl der Fahrzeuge in diesem Bereich zeigen.

Im linken Bereich des Interface befinden sich zunächst zwei Knöpfe, „Set-up“ und „Move“. Mit Betätigung von „Set-up“ wird der Simulationsvorgang neu aufgebaut und alle Anzeigen „genullt“. Mit dem Knopf „Move“ beginnt die Simulation und die Fahrzeuge starten ihre Bewegung. Bei laufender Simulation wird im Anzeigebereich daneben die verstrichene Zeit seit Beginn visualisiert.

In der Simulation zum Braess-Paradoxon sind verschiedene Parameter festgelegt worden, durch welche die Simulation beeinflusst und verändert werden kann. Diese sind mit Schiebereglern auf der linken Seite dargestellt. Zu diesen Parametern zählen:

- **#vehicles**: Anzahl der Fahrzeuge in der Simulation (**N**)
- **Mean-Travel-Time-Highway**: Durchschnittliche Reisezeit auf der Autobahn (**T₀**) – unabhängig vom Verkehrsaufkommen
- **Minimal-Travel-Time-Urban**: Minimale Reisezeit in der Stadt (**T_u**) – abhängig vom Verkehrsaufkommen bzw. vom Concentration-Factor
- **Concentration-Factor**: Gibt die Dichte des Verkehrs in der Stadt an (**L**)
- **Short-Cut**: Gibt an, ob die Abkürzung, genauer die neu gebaute Straße (Route 3), vorhanden ist oder nicht. Ohne diese kann ein Braess-Paradoxon nicht beobachtet werden.

Auf der rechten Seite des Interface werden zwei Diagramme geplottet, welche zum einen die Wahl der Route, und zum anderen die durchschnittliche Reisezeit abbilden. Hierbei ist in blau Route 1, in grau Route 2 und in rot Route 3 gezeigt. Ebenfalls werden diese Werte noch genauer in den Monitoren neben den Diagrammen dargestellt, um diese genauer ablesen zu können.

In Abbildung 19 ist der Programmcode hinter dem Interface abgebildet. Im Folgenden wird dieser nun genauer erklärt.

```

breed[roads road]
breed[vehicles vehicle]
roads-own[#veh-mean]
vehicles-own[t-jump route current-road current-travel-time tt1 tt2 tt3]
globals[time t-plot nb-routes]

to set-up
clear-all
create-roads 4 [set shape "square" set color white set size 5]
ask road 0 [setxy -5 7 set label "Road 0 (highway)" set color cyan create-link-to road 1[set color blue]]
ask road 1 [setxy 5 0 set label "Road 1 (urban)" set color yellow]
ask road 2 [setxy -5 0 set label "Road 2 (urban)" set color yellow create-link-to road 3[set label "Route 2"]]
ask road 3 [setxy 5 -7 set label "Road 3 (highway)" set color cyan]
crt 2 [set shape "circle" set size 2 set color white
if who = 4 [setxy -12 0 create-link-to road 0[set label "Route 1" set color blue] create-link-to road 2]
if who = 5 [setxy 12 0 create-link-from road 3 create-link-from road 1[set color blue]]]
create-vehicles #vehicles [
set tt1 [] set tt2 [] set tt3 []
set shape "car" set size .8 set color green set route 1 + random 2
if route = 1 [go-to (route - random 2)]
if route = 2 [go-to (route + random 2)]
if route = 3 [go-to (route - 1 - random 2)]
]
end
to move
ask one-of vehicles with-min [t-jump] [
set time t-jump
ifelse current-road = 0 [ go-to 1 ] [
ifelse current-road = 2 [
ifelse route = 2 [ go-to 3 ] [ go-to 1 ] ] [
save-travel-time
ifelse min(list length tt1 length tt2) >= 200 and (not short-cut? or (short-cut? and length tt3 >= 200)) [
ifelse short-cut? and mean tt3 < min(list (mean tt1) (mean tt2)) [
set route 3 go-to 2 ] [
ifelse mean tt1 < mean tt2 [
set route 1 go-to 0 ] [
set route 2 go-to 2 ] ] ] [
set route 1 + random nb-routes
ifelse route = 1 [ go-to 0 ] [ go-to 2 ] ]]]]
end
to go-to [n]
setxy [xcor] of road n + random-float 3 - 1.5 [ycor] of road n + random-float 3 - 1.5
set current-road n
ifelse n = 0 or n = 3 [
set t-jump time + random-exponential Mean-Travel-Time-Highway ] [
set t-jump time + random-exponential (Minimal-Travel-Time-Urban + Concentration-Factor * count vehicles with [current-road = n] / 50) ]
set current-travel-time current-travel-time + t-jump - time
end
to save-travel-time
if route = 1 [ set tt1 lput current-travel-time tt1 ]
if route = 2 [ set tt2 lput current-travel-time tt2 ]
if route = 3 [ set tt3 lput current-travel-time tt3 ]
set current-travel-time 0
end

```

Abbildung 19: Programmcode Braess-Paradoxon NetLogo

Die Programmierung beginnt mit einer Definition von Variablen, beginnend mit dem Befehl *breed*. Hierbei wird die Art bzw. Rasse der Variable festgelegt, zuerst die Mehrzahl, dann die Einzahl vom jeweiligen Wert, in diesem Fall *roads* und *vehicles*. Im Weiteren wird bestimmt, welchen Wert die Variablen annehmen können und es werden noch globale Variablen definiert, dessen Werte jeder annehmen kann. Wichtig ist, dass diese Konkretisierung immer Anfang eines Programmcodes vorgenommen werden muss, bevor jegliche Funktionen eingefügt werden.

Im nächsten Schritt werden die Funktionen des Knopfes *set-up* festgelegt. Beginnend mit dem Befehl *clear-all*, welcher alle Speicherungen und Definitionen

löscht, und somit das Programm auf null setzt. Nun wird im Folgenden die Benutzeroberfläche des Tools geschaffen, indem Straßen, Start- und Endpunkt, Routen und Fahrzeuge erstellt werden. An diesem Punkt werden Form, Farbe, Größe und Position der einzelnen Elemente festgelegt. Als Beispiel gilt der Befehl:

```
ask road 0 [setxy -5.7 set label „Road 0 (highway)“ set color cyan create-link-to  
road 1[set color blue]]
```

Im vorherigen Befehl wurde bereits definiert, dass die Form der Straße ein Quadrat darstellen soll. Nun wird im ersten Schritt mit dem Befehl *setxy* die Position im Interface beschrieben, und anschließend bei *set label* eine Beschriftung mit den Worten „Road 0 (highway)“ angefügt. Nun wird gesagt, dass die Farbe des Feldes *cyan*, als türkis sein soll und eine Verbindung in der Farbe Blau, zu Straße 1 geschaffen werden soll; in Abbildung 18 kann diese Beschreibung nachempfunden werden. Im Nachgang wird in diesem Programmierungsschritt für den Knopf *set-up* noch die Form und Farbe der Fahrzeuge definiert. Ebenso dass diese zufällig auf die Straßen verteilt werden sollen. Mit dem Schritt *end* wird dieser Teil der Codierung abgeschlossen.

Nachfolgend wird nun der Knopf *move* festgeschrieben. Beginnend mit einem Befehl, dass sich die einzelnen Fahrzeuge von einer Straße zur nächsten bewegen sollen. Beschrieben wird dies, dass die Fahrzeuge auf Straße 0 zu Straße 1 springen sollen, die von 1 auf 2, und so weiter. Dieser Vorgang wird dann immer weiter wiederholt und wichtig hierbei ist, dass mit dem Befehl *save travel time* die Reisezeit für die einzelnen Schritte gespeichert wird, um im Nachgang Simulationsergebnisse zu erhalten.

Abschließend werden noch einige Parameter definiert, welche bestimmen, dass die Entscheidung, für welche Route sich die Fahrzeuge entscheiden, zufällig stattfindet und in welcher Form die Simulationsergebnisse ausgegeben werden.

Im nächsten Unterkapitel werden nun mit Hilfe dieses Programms Simulationen des Braess-Paradoxons durchgeführt.

5.4 Simulationen

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Simulation innerhalb von NetLogo beschrieben und eventuelle Zusammenhänge thematisiert. Zunächst jedoch wird auf die Art der Simulation eingegangen, der sogenannten Monte Carlo Simulation.

Die Monte Carlo Simulation ist ein mathematisches Verfahren, welches dazu dient, mögliche Ergebnisse eines ungewissen Ereignisses abzuschätzen. Diese Simulation wurde während des zweiten Weltkriegs von Stanislaw Ulam und John von Neumann entwickelt, um die allgemeine Entscheidungsfindung bei komplexen mathematischen und stochastischen Problemen zu vereinfachen (IBM Cloud Education 2020).

Die Grundidee der Monte Carlo Simulation ist es, für zufällig gewählte Parameter über die entsprechenden Werte die zugehörigen Zielgrößen zu ermitteln. Es handelt sich hierbei um ein Stichprobenverfahren, bei dem beispielsweise aus einer großen, repräsentativen Stichprobe auf die Grundgesamtheit geschlossen wird. Durch eine theoretisch unendlich häufige Wiederholung der Simulation wird das Ergebnis immer weiter angenähert und liefert somit zu einer hohen Wahrscheinlichkeit das richtige Ergebnis (Gleißner und Wolfrum 2019).

Grund für die hohe Sicherheit eines Ergebnisses bei einer Monte Carlo Simulation gibt das „Gesetz der großen Zahlen“. Dieses wird folgendermaßen definiert: „Die Häufigkeit mit der ein Zufallsexperiment eintritt, nähert sich seiner rechnerischen Wahrscheinlichkeit immer weiter an, je häufiger ein Zufallsexperiment durchgeführt wird“ (Statista 2021).

Um die Monte Carlo Simulation durchzuführen, bedarf es einer Abfolge von folgenden Phasen (Gleißner und Wolfrum 2019):

1. Erzeugung der für die Monte Carlo Simulation benötigten Zufallszahlen
2. Umwandeln der Zufallszahlen in die benötigte Verteilung
3. Durchführen eines Schrittes einer Monte Carlo Simulation gemäß den gezogenen Zufallszahlen und der dahinterliegenden Verteilung

4. Wiederholen der Schritte 1-3 bis eine ausreichende Zahl von Simulationen erreicht wurde, um hieraus stabile Verteilungen und Statistiken abzuleiten
5. Endauswertung: Bilden der Mittelwerte (Verteilungen) der gemessenen Größen, Bestimmung der statistischen Fehler usw.

In der hier vorliegenden Arbeit wird die Monte Carlo Simulation mit Hilfe von NetLogo durchgeführt, die einzelnen Simulation, sowie die verschiedenen gewählten Parameter werden im Folgenden beschrieben.

5.4.1 Ergebnisse

Die Simulation des Braess-Paradoxons wurde in verschiedenen Schritten durchgeführt. Zunächst musste beobachtet werden, ab welcher Simulationsdauer aussagekräftige Ergebnisse zustande kommen. Dies wurde bei einer Wiederholung der sogenannten „ticks“ im Programm, also Sprünge der einzelnen Fahrzeuge von ca. 500.000 festgestellt werden. Auf Grundlage dieser Erkenntnis sind nun Ergebnisse entstanden, welche das Braess-Paradoxons dargestellt haben und entscheidende Parametern erkennbar sind. Im Folgenden werden einige dieser Resultate dargestellt und erläutert.

Um signifikante Ergebnisse zu erzielen, werden nacheinander die Parameter T_0 , T_u und L verändert, um zu beobachten, wo sich kritische Schwellen im Auftreten des Braess-Paradoxons befinden. Die Anzahl der Fahrzeuge ist während der gesamten Simulation gleich beim Wert 100. Die Werte für T_0 , T_u und L sind Einheitenlos. Die Tabellen mit allen detaillierten Simulationsergebnissen befinden sich im Anhang.

Die Auswertung beginnt mit einer Veränderung des Parameters T_u (minimal-Travel-Time-Uran), also der minimalen Reisezeit im innerstädtischen Bereich. Der Parameter nimmt die Werte von 0,0 bis 1,2 nacheinander an. Die beiden anderen Kenngrößen sind in dieser Simulation wie folgt definiert:

Tabelle 1: Kenngrößen Simulation Tu

Kenngröße	Wert
T0	1,5
L	1,0

Als Ergebnis der Simulation werden die folgenden Werte betrachtet:

- *#vehicles Route 1 (Anzahl der Fahrzeuge auf Route 1)*
- *#vehicles Route 2 (Anzahl der Fahrzeuge auf Route 1)*
- *Mean TT No Short Cut (Durchschnittliche Reisezeit ohne Abkürzung)*
- *Mean TT Short Cut (Durchschnittliche Reisezeit mit Abkürzung)*
- *Mean TT Route 1 (Durchschnittliche Reisezeit Route 1)*
- *Mean TT Route 2 (Durchschnittliche Reisezeit Route 2)*

Zunächst ist in Abbildung 20 die Routenwahl ohne Abkürzung zu erkennen. Hierbei ist zu sehen, dass sich die Fahrer ausgeglichen für beide Routen entscheiden, unabhängig von der minimalen Reisezeit in der Stadt.

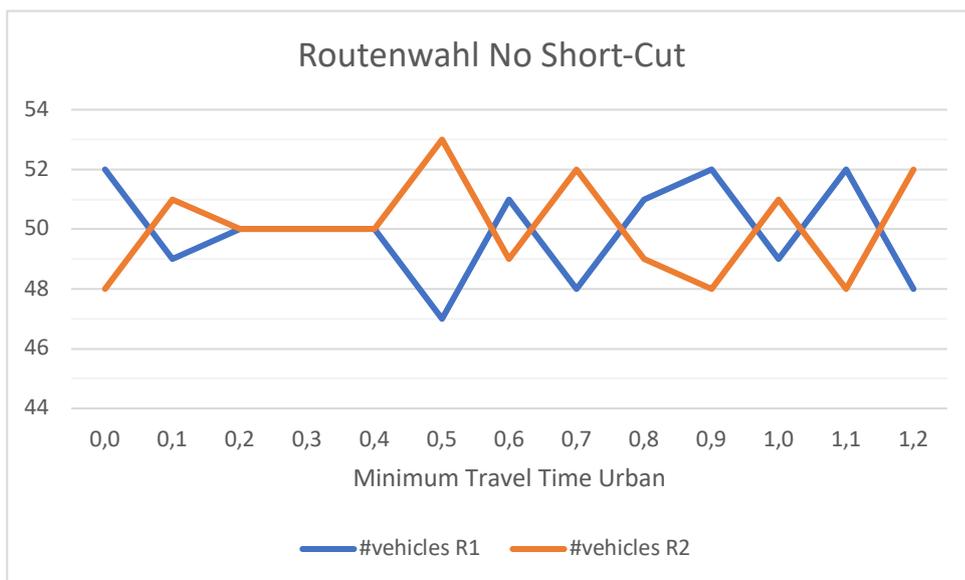


Abbildung 20: Routenwahl No Short-Cut Tu

In Abbildung 21 ist die Routenwahl mit aktivierter Abkürzung dargestellt. Nun stehen den Autofahrern die drei verschiedenen Routen, wie in Kapitel 5.3 beschrieben, zur Verfügung. Hierbei ist klar zu erkennen, dass je geringer die Reisezeit in der Stadt ist, desto mehr Fahrzeuge Route 3 benutzen, welche lediglich aus Stadt 1 und 2 besteht und die Autobahn meidet. Ab einem Wert von ungefähr 0,6 beginnt sich die Routenwahl zu verlagern und das System wird ausgeglichener; ab einem Wert von 1 bei der Minimum-Travel-Time-Urban wird die Nutzung der dritten Route zu unattraktiv und die Fahrzeuge verteilen sich wieder gleichmäßig auf den Routen 1 und 2.

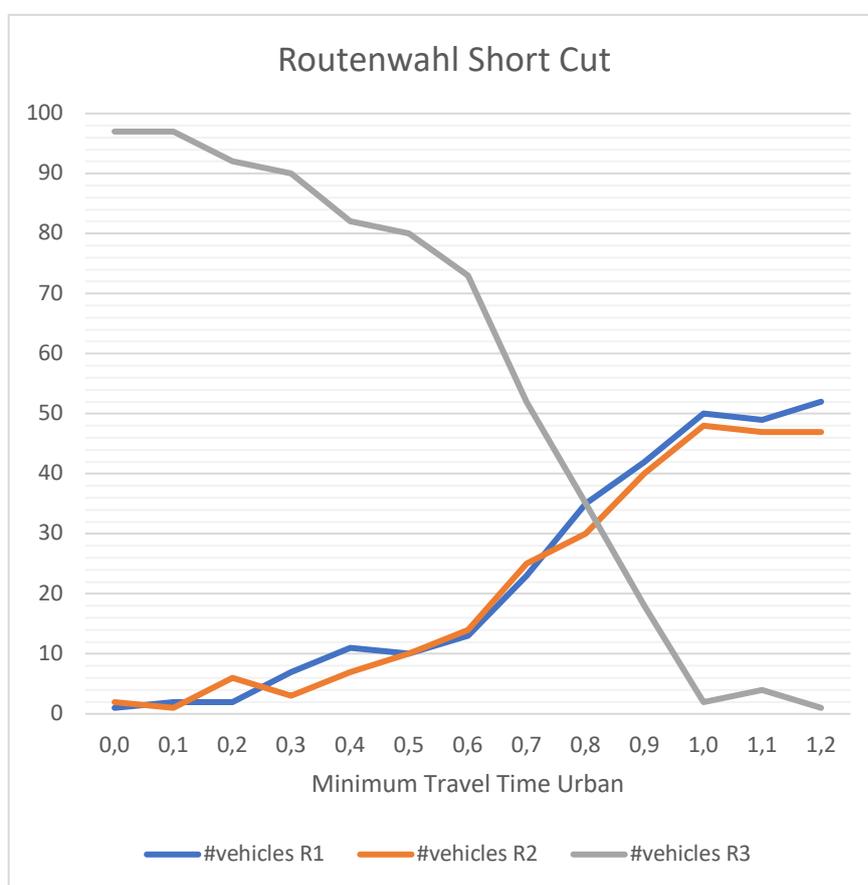


Abbildung 21: Routenwahl Short-Cut Tu

In Abbildung 22 ist ein Vergleich der durchschnittlichen Reisezeiten der kompletten Strecke zwischen dem Layout mit und dem ohne Abkürzung dargestellt. Hierbei ist klar das Braess-Paradoxon zu erkennen. Durch das Hinzufügen einer weiteren Route zum bestehenden System erhöht sich in allen

Zuständen die Durchschnittliche Reisezeit des Systems, dies ist genau der Fall, welcher bereits in Kapitel 4.2 erklärt wurde. Ab dem Wert von 1,0 der minimalen innerstädtischen Reisezeit gleichen sich die Zeiten zwar an, jedoch liegt das System mit der „Abkürzung“ weiterhin oberhalb dem ohne diese. Dasselbe wird auch in den Reisezeiten der einzelnen Routen 1 und 2 beobachtet, dieses kann im Anhang nachvollzogen werden.

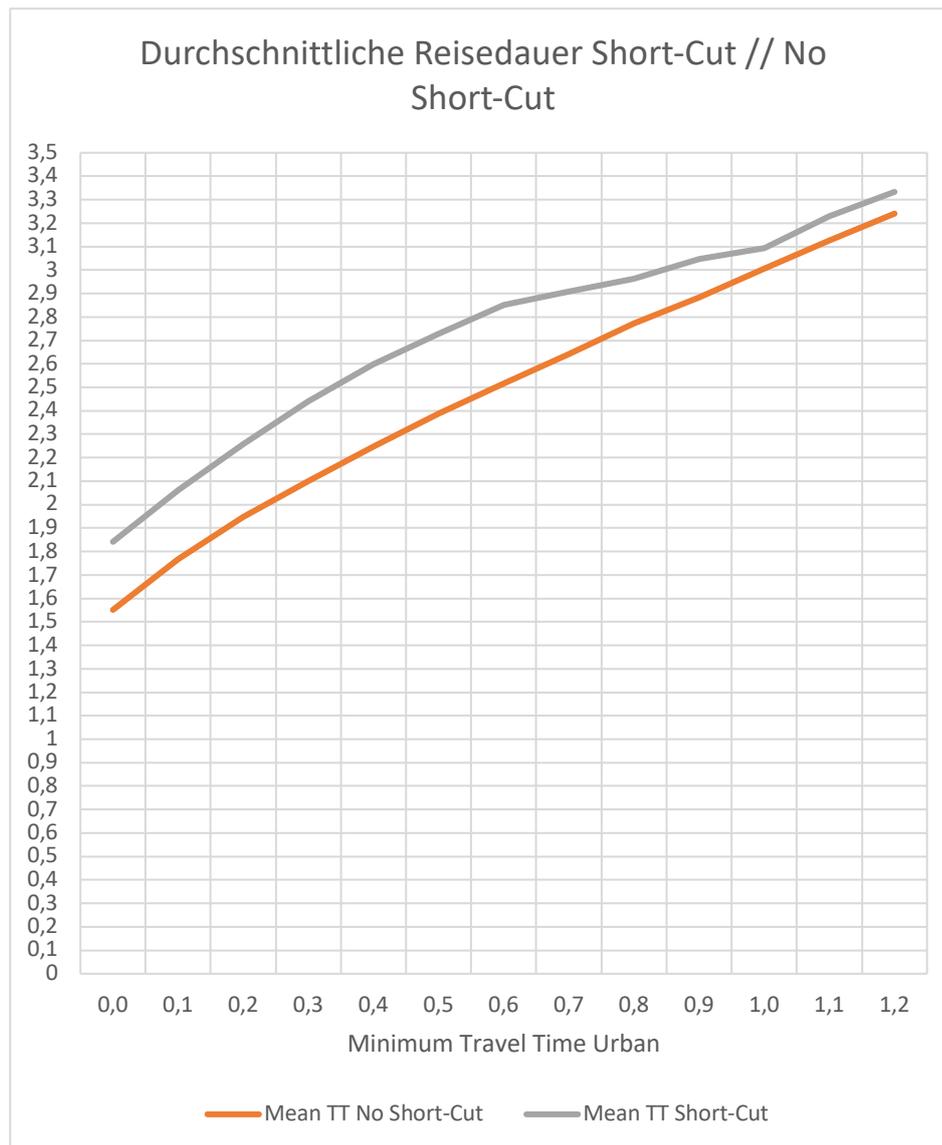


Abbildung 22: Durchschnittliche Reisedauer Vergleich No Short-Cut/ Short-Cut
 T_u

Als nächstes wird nun die Simulation mit einer Änderung des Parameters Mean-Travel-Time-Highway T_0 (durchschnittliche Reisezeit Autobahn), durchgeführt. Hierbei nimmt der Parameter T_0 Werte von 0,1 bis hin zu 2,5 an. Die anderen beiden Kenngrößen sind wie folgt definiert:

Tabelle 2: Kenngrößen Simulation T_0

Kenngröße	Wert
T_u	0,8
L	1,0

Bei der Routenwahl ohne Abkürzung, wie in Abbildung 23 zu erkennen, ist unabhängig vom Parameter T_0 eine ausgeglichene Verteilung zu sehen. Die Veränderung der Parameter hat auf diesen Verlauf der Simulation keinen Einfluss, wie auch schon bei T_u beobachtet wurde.

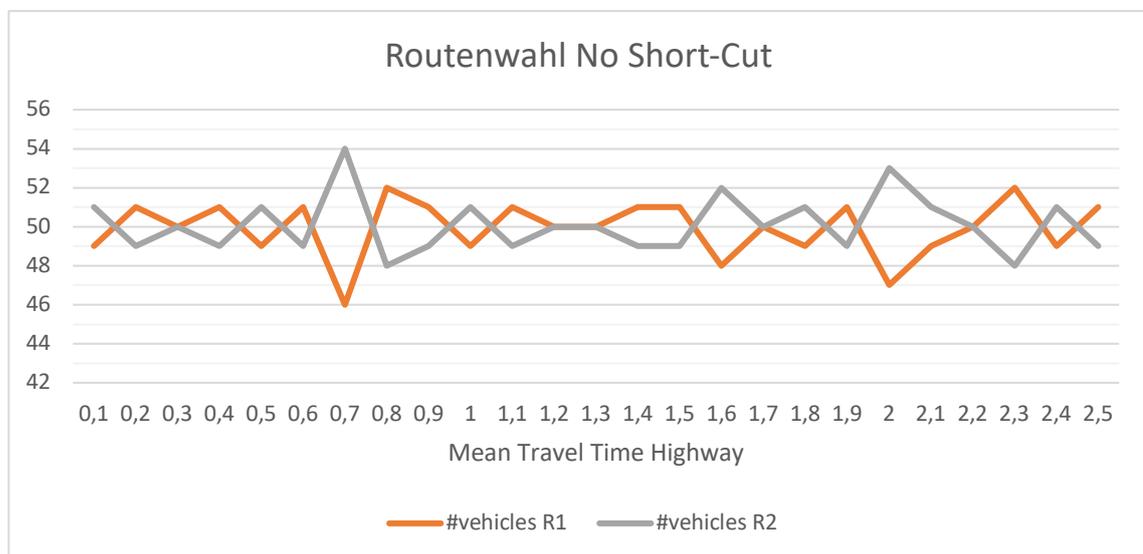


Abbildung 23: Routenwahl No Short-Cut T_0

In Abbildung 24 ist die Routenauswahl der Fahrzeuge mit vorhandener Abkürzung dargestellt. Hieraus ist zu erkennen, dass bis zu einer Schwelle von $T_0 = 1,3$ keine Fahrzeuge die Route 3 wählen. Durch die geringe Reisezeit auf der Autobahn ist es zeitlich zu unattraktiv die streckentechnische Abkürzung durch die Stadt zu nehmen. Erst ab dem oben beschriebenen Wert beginnen die Fahrzeuge auch die Route 3 zu wählen. Ab einer Größe von ungefähr $T_0 = 2,0$ benutzen alle Fahrzeuge die Route 3, da der Weg über die Autobahn rechnerisch keinen Sinn mehr macht.

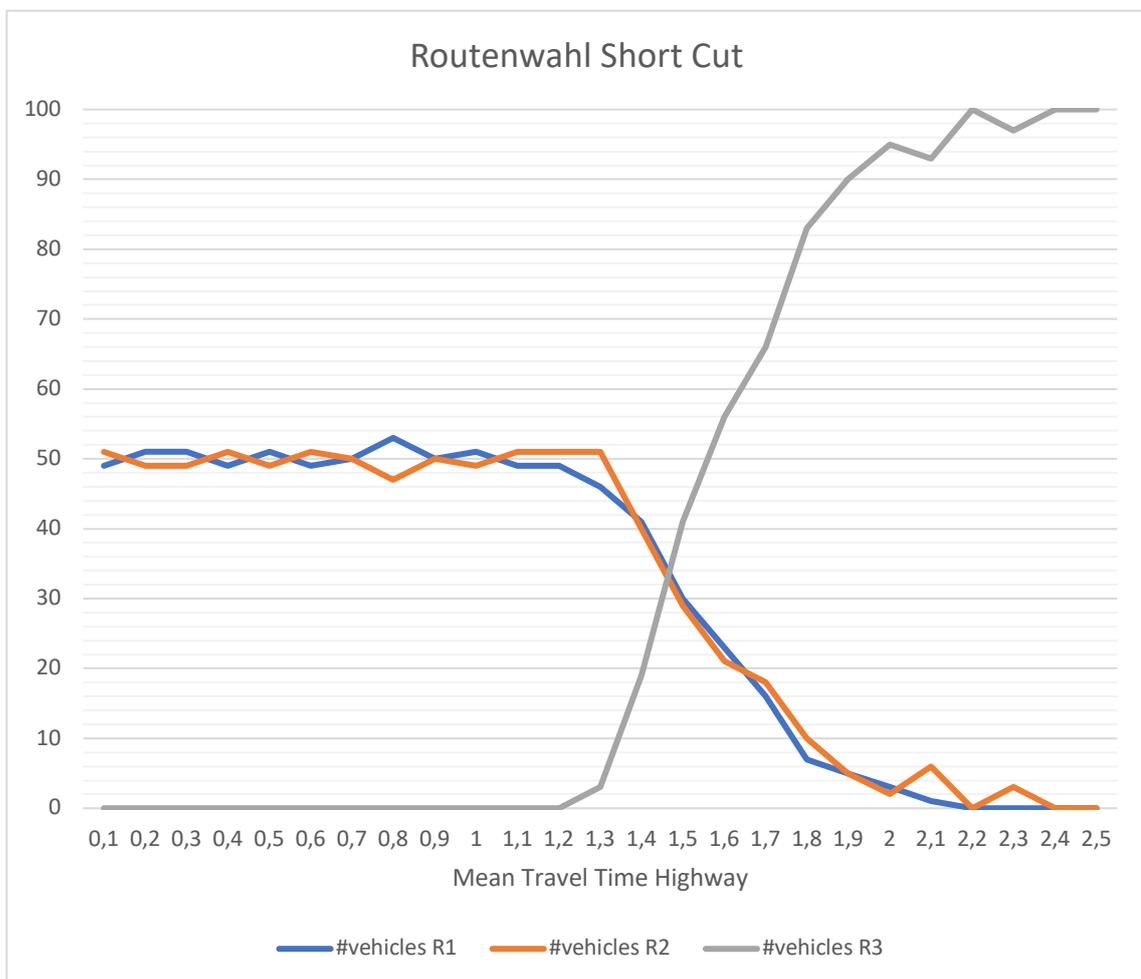


Abbildung 24: Routenwahl Short-Cut T_0

Das Braess-Paradoxon ist auch bei dieser Simulation erkennbar. Im vorliegenden Fall wird die durchschnittliche Reisezeit auf Route 1 in einem Diagramm verdeutlicht, zu sehen in Abbildung 25. Zunächst sind die Reisezeiten mit und ohne Abkürzung fast gleich. Bis zu einem Wert von $T_0 = 1,3$, wie bereits beobachtet, wirkt sich die zusätzliche Straße nicht auf den Verkehr aus. Allerdings beginnt ab diesem Punkt die Fahrzeit auf Route 1, sowie auch auf allen Routen, erkennbar im Anhang, deutlich höher zu sein als die Fahrzeit ohne Abkürzung. In der Grafik ist ab dem Punkt, an dem sich beide Linien teilen das Braess-Paradoxon erkennbar. Die Berechnung dieser kritischen Schwellen wird im folgenden Unterkapitel durchgeführt.

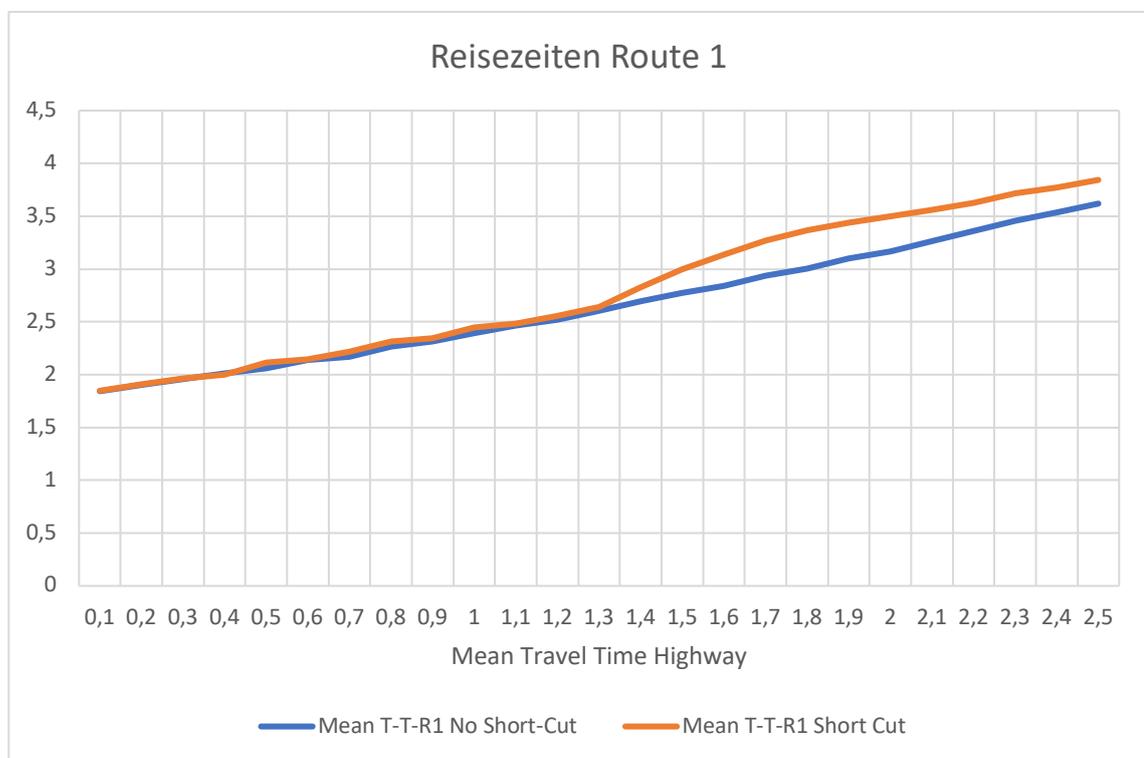


Abbildung 25: Reisezeiten Route 1 T_0

Abschließend wird die Simulation noch mit einer Veränderung des Parameters *Concentration Factor* L durchgeführt. Dieser nimmt hierbei Werte von 0,0 bis 1,6 an, die anderen beiden Kenngrößen sind aus Tabelle 3 zu entnehmen:

Tabelle 3: Kenngrößen Simulation L

Kenngröße	Wert
Tu	0,8
T0	1,5

Beginnend mit der in Abbildung 26 dargestellten Routenwahl ohne Abkürzung ist zu erkennen, dass auch hierbei, wie schon in den anderen beiden Simulationen, kein wirklicher Trend zu erkennen ist. Die Wahl der Strecke erfolgt ausgewogen und keine der beiden Routen wird bevorzugt.

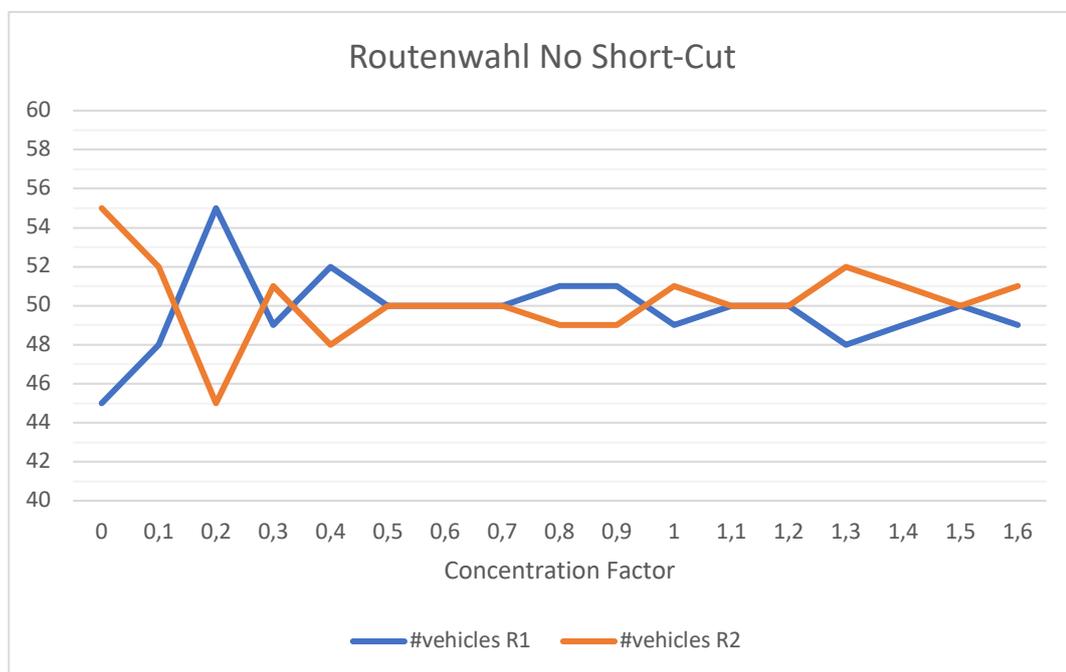


Abbildung 26: Routenwahl No Short-Cut L

Weiterhin wird bei der Routenwahl mit Abkürzung, zu sehen in Abbildung 27, beobachtet, dass bei einem niedrigen Concentration Factor alle Fahrzeuge die neue Route durch beide Städte nehmen. Dies liegt daran, dass der Parameter einen Einfluss auf die Stärke der Verkehrsdichte in der Stadt hat, und somit die Reisezeit bei einem geringen L ebenfalls sehr niedrig ist. Ab einem $L = 0,6$ beginnt sich der Verkehr weg von Route 3 zu verlagern bis hin zu einem Ausgleich der drei Routen bei einem Wert von ungefähr 1,05. Ab $L = 1,5$ sind alle Fahrzeuge wieder auf den Routen eins und zwei verteilt und würden sich auch bei einem höheren Wert von L dort einfinden. Der Einfluss des Parameters auf die Verkehrsdichte im innerstädtischen Bereich verhindert eine Nutzung der Route 3.

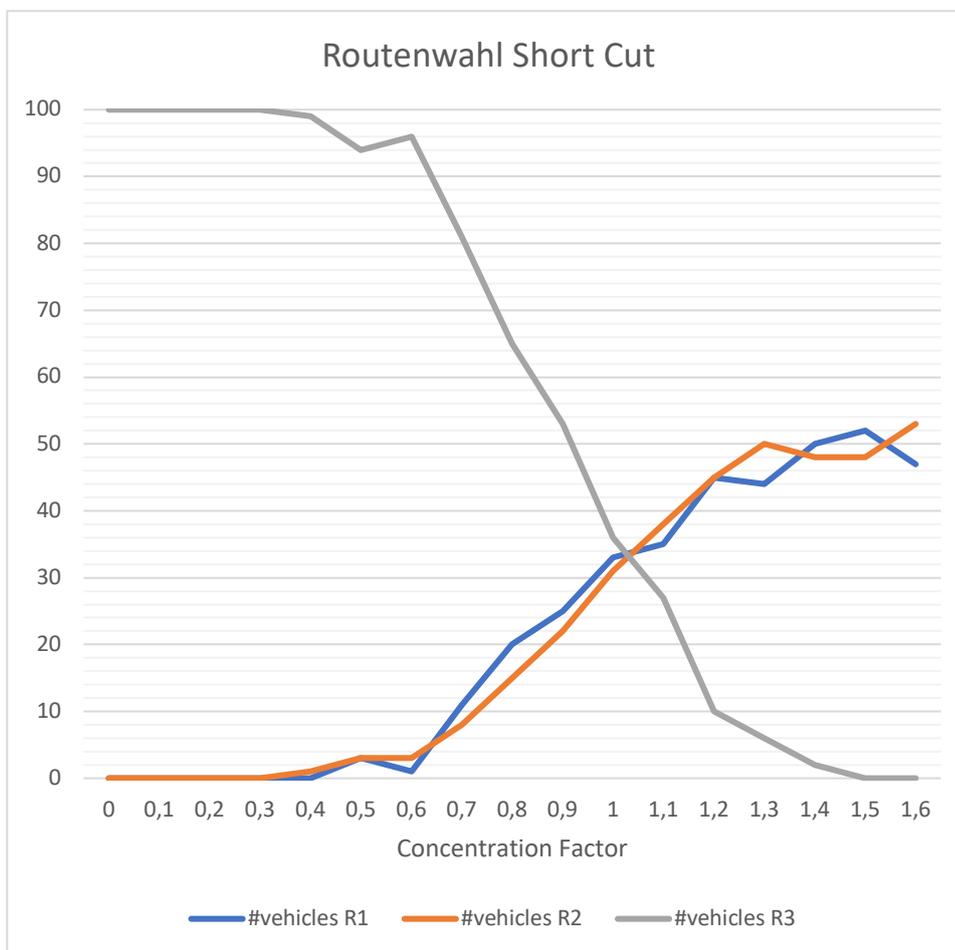


Abbildung 27: Routenwahl Short-Cut L

In der Grafik der Reisezeiten auf Route 1, Abbildung 28, ist das Braess-Paradoxon nun auch in Abhängigkeit des Parameters L zu erkennen. Die Reisezeiten auf der ersten Route sind zunächst mit und ohne Abkürzung nahezu identisch. Ab einem Wert von $L = 0,4 - 0,5$ beginnt sich die Reisezeit auf der Anordnung mit Abkürzung deutlich zu erhöhen. Dies spiegelt die Ergebnisse der anderen beiden Simulationen wider, bei denen ebenfalls bestätigt wurde, dass das Braess-Paradoxon in der Simulation erkennbar ist.

Sobald der Concentration Factor einen Wert von ungefähr 1,1 annimmt, beginnen sich die Kurven wieder anzugleichen, und das Braess-Paradoxon ist nicht mehr zu beobachten.

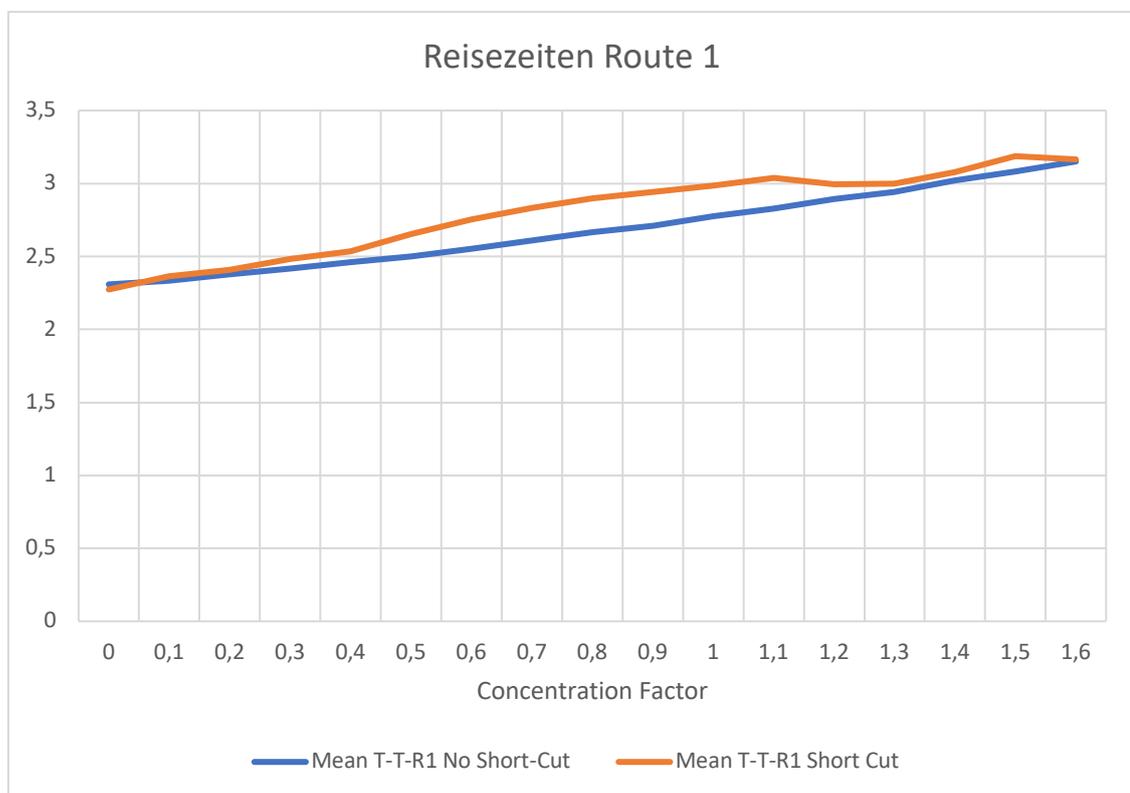


Abbildung 28: Reisezeiten Route 1 L

Im Folgenden Kapitel werden nun rechnerisch die kritischen Schwellen für die einzelnen Parameter T_0 , T_u und L bestimmt. Hieraus entstehen wichtige Ergebnisse für das Verständnis des Braess-Paradoxons und der Umgang mit diesem.

5.4.2 Berechnung der kritischen Schwellen

Die Berechnung der kritischen Schwellen für das Braess-Paradoxon dient dazu, eine visuelle Darstellung in den im vorherigen Kapitel gezeigten Grafiken zu erhalten und einen genaueren Überblick über das Auftreten des Phänomens zu erhalten. Es werden im Folgenden die Schwellen für die einzelnen Parameter Tu , $T0$ und L berechnet, zum einen für den Start des Braess-Paradoxons und zum anderen für den Zeitpunkt, ab dem alle Fahrzeuge die Route 3 benutzen. Die Formeln für die Berechnung wurden wie folgt entwickelt:

Start Braess-Paradoxon

$$T0 > \frac{Tu^2}{T0} + \frac{N/4}{50L} \quad (5-1)$$

Durch Umstellen nach Tu ergibt sich:

$$Tu < \sqrt{T0^2 - \frac{N/4}{50L} * T0} \quad (5-2)$$

Durch weiteres Umstellen nach L entsteht:

$$L > \frac{N/200}{(T0 - \frac{Tu^2}{T0})} \quad (5-3)$$

Beim Einsetzen der Werte zur Berechnung der Schwellen, werden die aus dem letzten Kapitel beschriebenen Simulationsergebnisse verwendet. Die genauen Tabellen befinden sich im Anhang.

Beginnend mit der Berechnung für $T0$ wird mit Formel 5-1 eine kritische Schwelle von **1,1** bestimmt:

$$1,1 > \frac{0,8^2}{1,1} + \frac{100/4}{50 * 1}$$

$$1,1 > 1,081$$

Zum Abgleichen trifft die Bedingung bei einem Wert von $T_0 = 1,0$ nicht mehr zu:

$$1 > \frac{0,8^2}{1} + \frac{100/4}{50 * 1}$$

$$1,1 \not> 1,14$$

Eingefügt in die Grafik der Simulation ist die Schwelle grafisch noch nicht eindeutig zu erkennen, jedoch beginnt dort das Braess-Paradoxon rechnerisch; zu sehen in Abbildung 29.

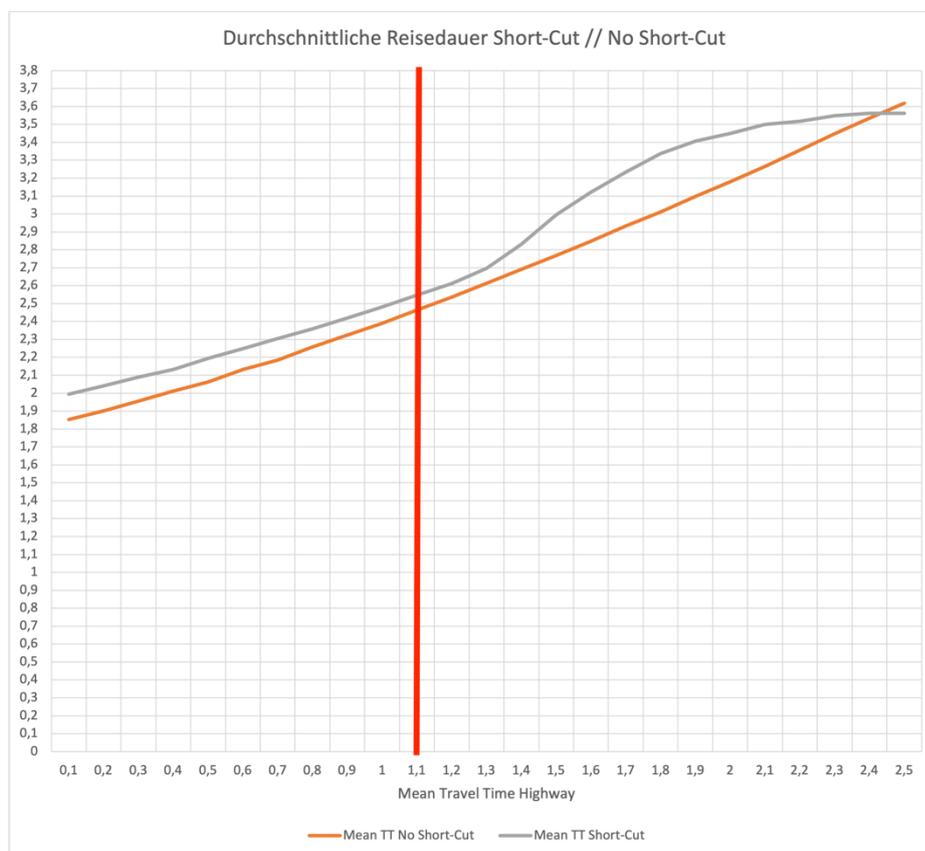


Abbildung 29: kritische Schwelle Braess T_0

Durch die Umformung ist bei Formel 5-2 der Operator der Ungleichung umgekehrt, wodurch sich bei der Berechnung eine obere Grenze ergeben wird, ab der das Braess-Paradoxon nicht mehr auftritt. Das Einsetzen der Werte ergibt folgendes:

$$Tu < \sqrt{1,5^2 - \frac{100/4}{50 * 1} * 1,5}$$

$$Tu < 1,224$$

Die grafische Darstellung der Grenze sieht wie folgt aus:

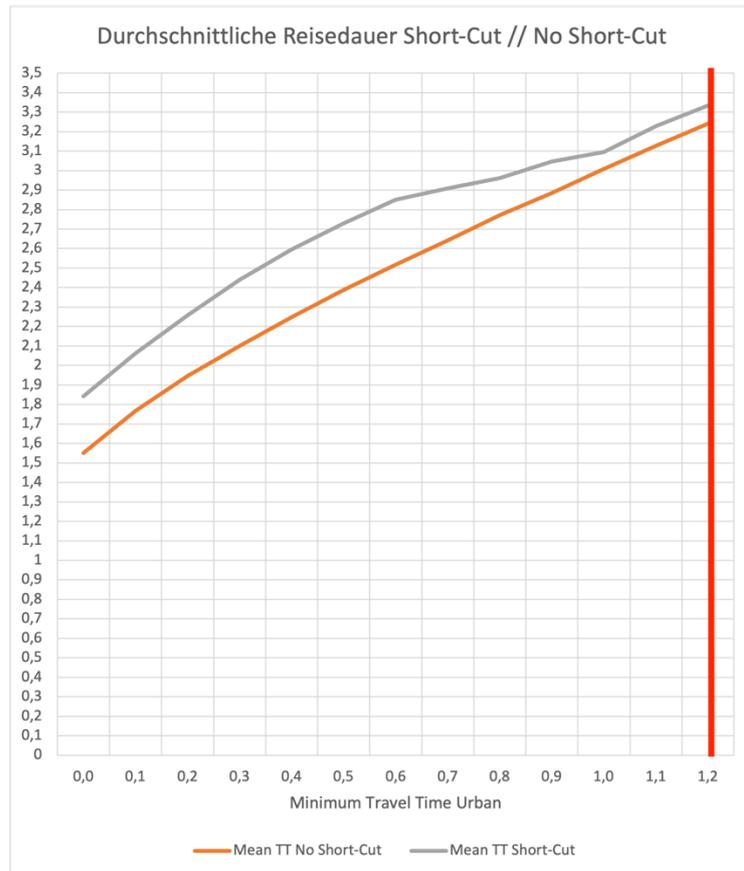


Abbildung 30: kritische Schwelle Braess Tu

Bei Parameter L ergibt sich nach Formel 5-3 wieder eine untere Schwelle, welche durch Einsetzen folgendermaßen definiert ist:

$$L > \frac{100/200}{(1,5 - \frac{0,8^2}{1,5})}$$

$$L > 0,466$$

Grafisch ergibt dies eine erkennbare Schwelle, welche in Abbildung 31 zu erkennen ist.

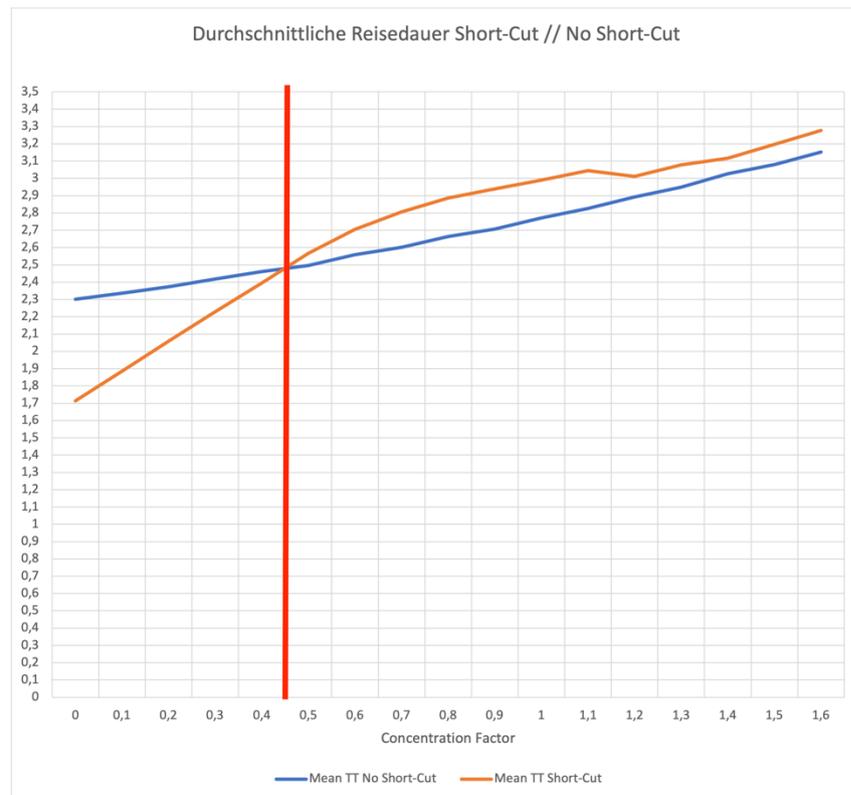


Abbildung 31: kritische Schwelle Braess L

Als nächster Schritt werden nun die Grenzen für den Fall berechnet, ab dem alle Fahrzeuge die Route 3 wählen, also ab dem Punkt, ab dem die Nutzung der Autobahn zu unattraktiv ist.

Alle Fahrzeuge Route 3

$$T_0 > \frac{Tu^2}{T_0} + \frac{N}{50L} \quad (5-4)$$

Durch Umstellen nach Tu ergibt sich:

$$Tu < \sqrt{T_0^2 - \frac{N}{50L} * T_0} \quad (5-5)$$

Durch weiteres Umstellen nach L entsteht:

$$L < \frac{N/50}{(T_0 - \frac{Tu^2}{T_0})} \quad (5-6)$$

Bei Einsetzen der Werte für die Berechnung von T_0 mit Formel 5-4 ergibt sich die folgende Grenze:

$$T_0 > \frac{0,8^2}{2,3} + \frac{100}{50 * 1}$$

$$2,3 > 2,28$$

Damit ist die Grenze für $T_0 = 2,3$, grafisch dargestellt wird dies in Abbildung 32.

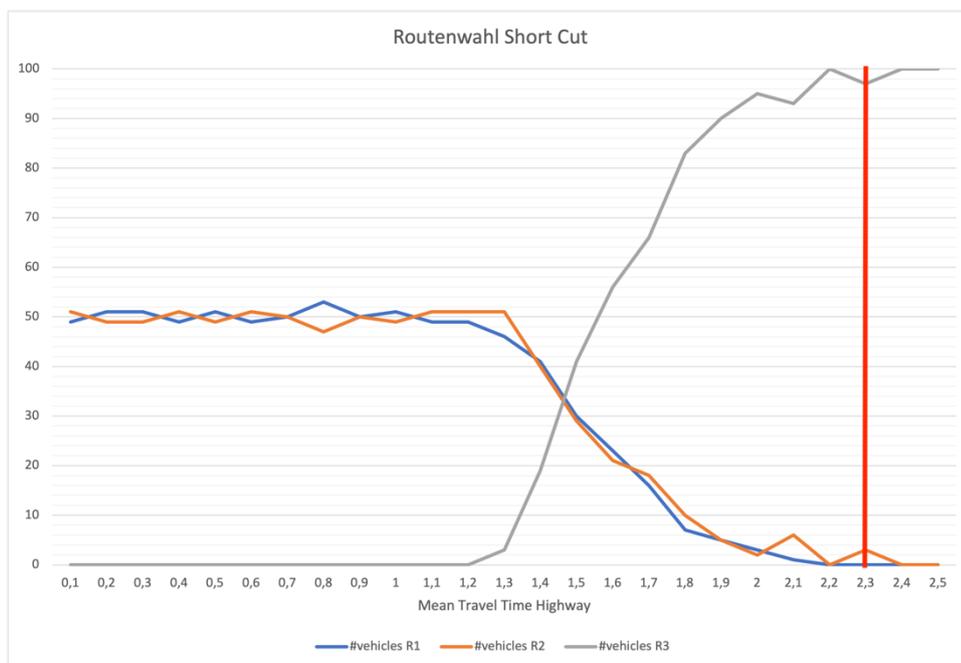


Abbildung 32: kritische Schwelle Route 3 T_0

Ein Einsetzen der Werte aus der Simulation in Formel 5-5 liefert eine untere Grenze für Tu , die minimale innerstädtische Reisezeit:

Für die Berechnung muss der Betrag der Wurzel verwendet werden, da andernfalls die Wurzel einer negativen Zahl gezogen werden muss.

$$Tu < \sqrt{\left|1,5^2 - \frac{100}{50L} * 1,5\right|}$$

$$Tu < 0,866$$

Dies bedeutet, dass Tu maximal den Wert 0,866 annehmen darf, damit sich alle Fahrzeuge für die Route 3 entscheiden. In der Grafik ist diese Schwelle ebenfalls zu erkennen, wie in Abbildung 33 visualisiert.

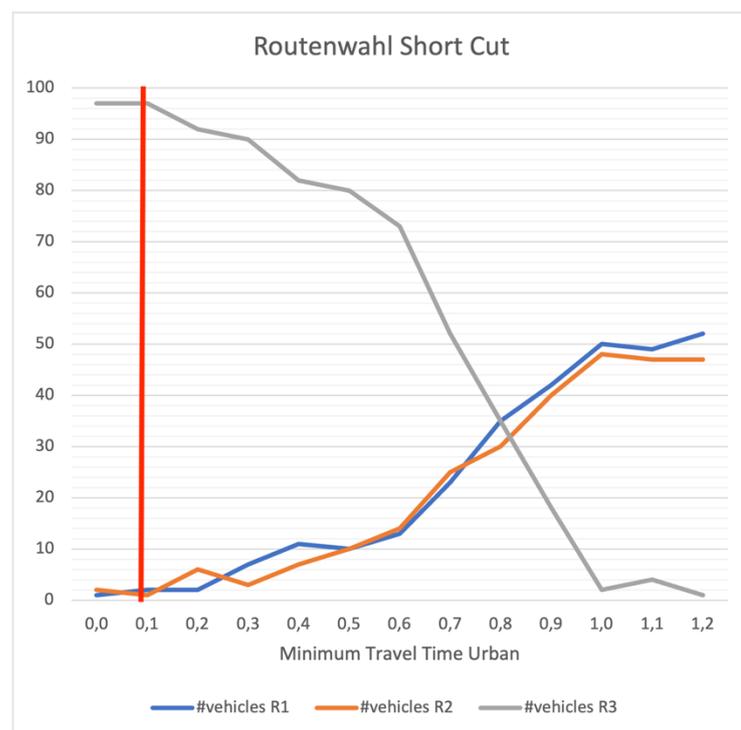


Abbildung 33: kritische Schwelle Route 3 Tu

Beim Verwenden von Formel 5-6 ergibt sich abschließend die Schwelle für Parameter L , dass alle Fahrzeuge Route 3 verwenden.

$$L < \frac{100/50}{(1,5 - \frac{0,8^2}{1,5})}$$

$$L < 0,45$$

Hierbei ist ebenfalls wieder eine Schwelle angegeben, welchen Wert der Parameter L maximal annehmen darf, dargestellt in Abbildung 34.

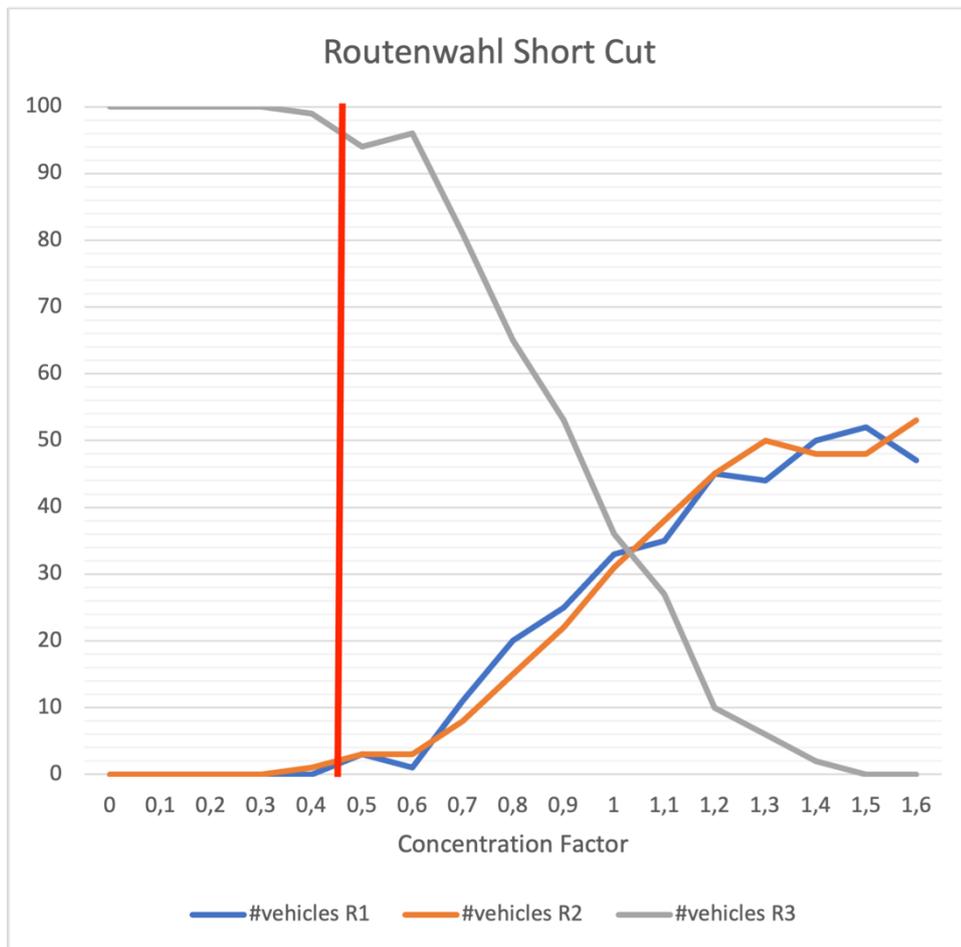


Abbildung 34: kritische Schwelle Route 3 L

6. Ausblick

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde eine mikroskopische Simulation des Braess-Paradoxons mit Hilfe des Programmes NetLogo durchgeführt. Das Paradoxon wurde beschrieben und es sind wichtige Eckdaten der allgemeinen Verkehrssimulation erklärt worden.

Die Simulationsergebnisse zeigen ein Auftreten des Braess-Paradoxons bei einer Veränderung aller Parameter. Durch diese Simulation ist es gelungen, genauere Schlüsse über das Phänomen zu erhalten, und diese für zukünftige Simulationen und die Verkehrsplanung zu nutzen. Die Parameter haben alle eine gleichwertige Bedeutung und fließen im selben Maße in das Auftreten des Paradoxons ein.

Mit dem Simulationsprogramm NetLogo konnte eine zuverlässige und einfache mikroskopische Simulation durchgeführt werden. Im nächsten Schritt wäre es möglich, diese auf andere Verkehrssimulationsprogramme zu übertragen und die Ergebnisse zu vergleichen. Es ist zu vermuten, dass die Resultate hieraus denen aus NetLogo ähneln werden.

Die neu gewonnenen Erkenntnisse können sowohl für die Forschung als auch für die Verkehrsplanung in urbanen Gebieten genutzt werden. Durch eine Simulation kann im Vorfeld von neu geplanten Straßen ein mögliches Braess-Paradoxon erkannt werden, aber auch bestehende Straßen können in die Simulation eingebaut werden und somit untersucht werden. Durch die in der Arbeit beschriebenen Beispiele für das Braess-Paradoxon in realen Städten ist zu erkennen, dass dies durchaus eine Möglichkeit zur Nutzung der Ergebnisse sein kann.

Des Weiteren ist es auch möglich, die Daten für eine Weiterentwicklung des autonomen Fahrens zu nutzen. Hierbei könnten die Fahrzeuge eine Früherkennung für das Braess-Paradoxon erhalten, wodurch kritische Routen intelligent umfahren werden und sich somit die Reisezeit nicht für alle Verkehrsteilnehmer erhöht.

7. Literatur / Quellen

Academic. 2022. „Dietrich Braess“. 3. Januar 2022. <https://de-academic.com/dic.nsf/dewiki/2328702>.

Acemoglu, Daron, Ali Makhdoumi, Azarakhsh Malekian, und Asuman Ozdaglar. 2017. „Informational Braess' Paradox: The Effect of Information on Traffic Congestion“. *Cornell University* (blog). 3. November 2017. <https://arxiv.org/abs/1601.02039>.

Aimsun SLU. 2021. „Simulation und KI für die Mobilität der Zukunft“. 2021. <https://www.aimsun.com/de/>.

Aleksic, Mario. 2012. *Dynamische Umlegung von Quelle-Ziel-Matrizen mit einem makroskopischen Verkehrsflussmodell*. Stuttgart: Springer Vieweg RESEARCH.

ASTRA. 2022. „Definitionen“. Schweizerische Eidgenossenschaft. *Bundesamt für Straßen ASTRA* (blog). 2022. <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/nationalstrassen/verkehrsfluss-stauaufkommen/definitionen.html>.

Bertram, Mathias, und Stefan Bongard. 2014. *Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr*. Wiesbaden: Springer.

Bittihn, Stefan, und Andreas Schadschneider. 2021. „Braess' paradox in the age of traffic information“.

Blum, Wolfgang. 2010. „Ewig lockt die Schnellstraße“. *Süddeutsche Zeitung*, Mai. <https://www.sueddeutsche.de/wissen/ewig-lockt-die-schnellstrasse-1.913440>.

Chen, James. 2022. „Nash Equilibrium“. *Investopedia* (blog). 4. Januar 2022. <https://www.investopedia.com/terms/n/nash-equilibrium.asp>.

Colata, Gina. 1990. „What if They Closed 42nd Street and Nobody Noticed?“ *New York Times*, Dezember. <https://www.nytimes.com/1990/12/25/health/what-if-they-closed-42d-street-and-nobody-noticed.html>.

Dallmeyer, Jörg. 2014. *Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt*. Frankfurt am Main: Springer.

Dr. Kneidl, Angelika. o. J. „Was ist das Fundamentaldiagramm?“ Accurate - Institute for crowd simulation. Zugegriffen 2. Mai 2022. <https://www.accurate.de/de/fundamentaldiagramm/>.

Dr. Treiber, Martin. 2016. „Verkehrsökonomie“. Technische Universität Dresden.

Emch+Berger Gruppe. 2020. „Verkehrssimulation - Wie funktioniert sie und was kann die Simulation von Verkehr leisten?“ 2020. <https://www.verkehrssimulation.ch>.

Fritsch, Manuel. 2018. „Wie entstehen Staus?“ *Badische Zeitung*, 7. Juli 2018. <https://www.badische-zeitung.de/wie-entstehen-staus--154387327.html>.

Geistefeldt, Justin, Sandra Hohmann, und Anja Estel. 2017. „Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen“, Berichte der Bundesanstalt für Verkehrswesen, , Nr. 293. https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/1845/file/V293_barrierefreies_Internet_PDF.pdf.

Gleißner, Werner, und Marco Wolfrum. 2019. *Risikoaggregation und Monte-Carlo-Simulation - Schlüsseltechnologie für Risikomanagement und Controlling*. Leinfelden-Echterdingen: Springer.

Google Scholar. 2022. „braess paradox“. 3. Januar 2022. https://scholar.google.com/scholar?q=braess+paradox&hl=de&as_sdt=0%2C5&as_ylo=1990&as_yhi=2021.

IBM Cloud Education. 2020. „Monte-Carlo-Simulation“. 24. August 2020. <https://www.ibm.com/de-de/cloud/learn/monte-carlo-simulation>.

Linden, Walter. 1966. *Dr. Gablers Verkehrs-Lexikon*. Wiesbaden: Gabler Verlag.

MATSim. 2022. „Multi-Agent Transport Simulation“. 2022.
<https://www.matsim.org>.

McTrans - University of Florida. 2021. „CORSIM 2022“. 2021.
<https://mctrans.ce.ufl.edu>.

Michael Reimann. 2007. „Simulationsmodelle im Verkehr“. Universität Karlsruhe.
<https://docplayer.org/39907139-Simulationsmodelle-im-verkehr.html>.

Morgan, John, Henrik Orzen, und Martin Sefton. 2009. „Network architecture and traffic flows: Experiments on the Pigou–Knight–Downs and Braess Paradoxes“ 66 (1): 348–72.

Price, Gordon. 2009. „The Road-Building Paradox“, Dezember.
<https://viewpointvancouver.ca/2009/12/09/the-road-building-paradox/>.

PTV Group. 2022. „VISSIM“. 2022.
<https://www.ptvgroup.com/de/loesungen/produkte/ptv-vissim/anwendungsfaelle/verkehrssimulation/>.

Randelhoff, Martin. 2018. „Reisezeitunterschiede unterschiedlicher Verkehrsarten von Tür zu Tür im Stadtverkehr – Realität und subjektive Wahrnehmungsverzerrung“, Juni. <https://www.zukunft-mobilitaet.net/167997/analyse/tuer-zu-tuer-reisezeit-stadtverkehr-pkw-miv-oepnv-radverkehr-pedelec-gleichheit-subjektive-verzerrung/>.

Schäfer, Daniel, und Nemanja Blagojevic. 2010. „Ermittlung der Kapazität von Straßen durch Fahrzeugmessungen im Verkehrsfluss“. Hochschule Ulm.
<https://d-nb.info/1080263136/34>.

Schomaker, Jens. 2012. „Einführung in die Theorie der Markov-Ketten“. Universität Münster. <https://www.uni-muenster.de/Stochastik/lehre/SS12/SeminarAnwendungenWT/Vortraege/Schomaker.pdf>.

Spektrum. 1998. „Geschwindigkeit“. *Lexikon der Physik* (blog). 1998.

<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/geschwindigkeit/5784>.

Statista. 2021. „Gesetz der großen Zahlen“. 2021. https://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/58/gesetz_der_gro_c3_9fen_zahl/.

———. 2022. „Staulänge auf Autobahnen in Deutschland von 2002 bis 2021“. Februar 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/200201/umfrage/gesamte-staulaenge-auf-autobahnen-in-deutschland/>.

Studyflix. 2022. „Beschleunigung“. *Mechanik: Dynamik* (blog). 2022. <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/beschleunigung-1415>.

Tagesschau. 2022. „Zahl der Pendler um 4,5 Prozent gestiegen“. 19. Januar 2022. <https://www.tagesschau.de/inland/pendler-verkehr-auto-101.html>.

Treiber, Martin, und Arne Kesting. 2010. *Verkehrsdynamik und -simulation*. Heidelberg, Berlin: Springer.

Treiterer, J., und et. al. 1970. „Investigation of traffic dynamics by aerial photogrammetric techniques“. *Ohio State University*, Interim Report EES 278-3, .

Universität Braunschweig, und OptiV. 2022. „Gleichgewichtszustände in Verkehrsnetzen“. 4. Januar 2022. <http://www.optiv.de/Fallbsp/04-Umlegung/04-umlegung/index.htm?4>.

Universität Würzburg. o. J. „Ereignisbasierte Modellierung und Simulation“. Fakultät Informatik. <http://ki.informatik.uni-wuerzburg.de/teach/ws-2006-2007/sim/6EventbasedSimulation.pdf>.

Univ.-Prof. Dr. Wermuth, M. 2007. „Stadtverkehrsplanung und Straßenverkehrstechnik“. TU Braunschweig. <https://web.archive.org/web/20070928044530/http://www2.fh-wolfenbuettel.de/trafficsz/forstluerken/Download/Verkehrsplanung/SVP&SVT-Bemessungsgrundlagen.pdf>.

Wikipedia. 2019. „Zeitlücke“. 9. Juli 2019. <https://de.wikipedia.org/wiki/Zeitlücke>.

———. 2020. „NetLogo“. 30. Dezember 2020. <https://de.wikipedia.org/wiki/NetLogo>.

———. 2022. „Verkehrsnetze“. 26. Januar 2022. https://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrsnetz#cite_ref-1.

Wilensky, Uri. 1997. „WolfSheepPreadation“. *NetLogo Models Library* (blog). 1997. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/WolfSheepPredation>.

———. 2003. „Traffic Grid“. *NetLogo Models Library* (blog). 2003. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/TrafficGrid>.

Wu, Ning. 2000. „Verkehr auf Schnellstraßen im Fundamentaldiagramm“. *Ruhr-
Uni-Bochum* 8. https://homepage.ruhr-uni-bochum.de/ning.wu/pdf/FMDG_SVT_8_2000.pdf.

8. Anhang

In diesem Kapitel sind nochmal zum Überblick alle erlangten Simulationsergebnisse in Form von Tabellen und Diagrammen aufgeführt.

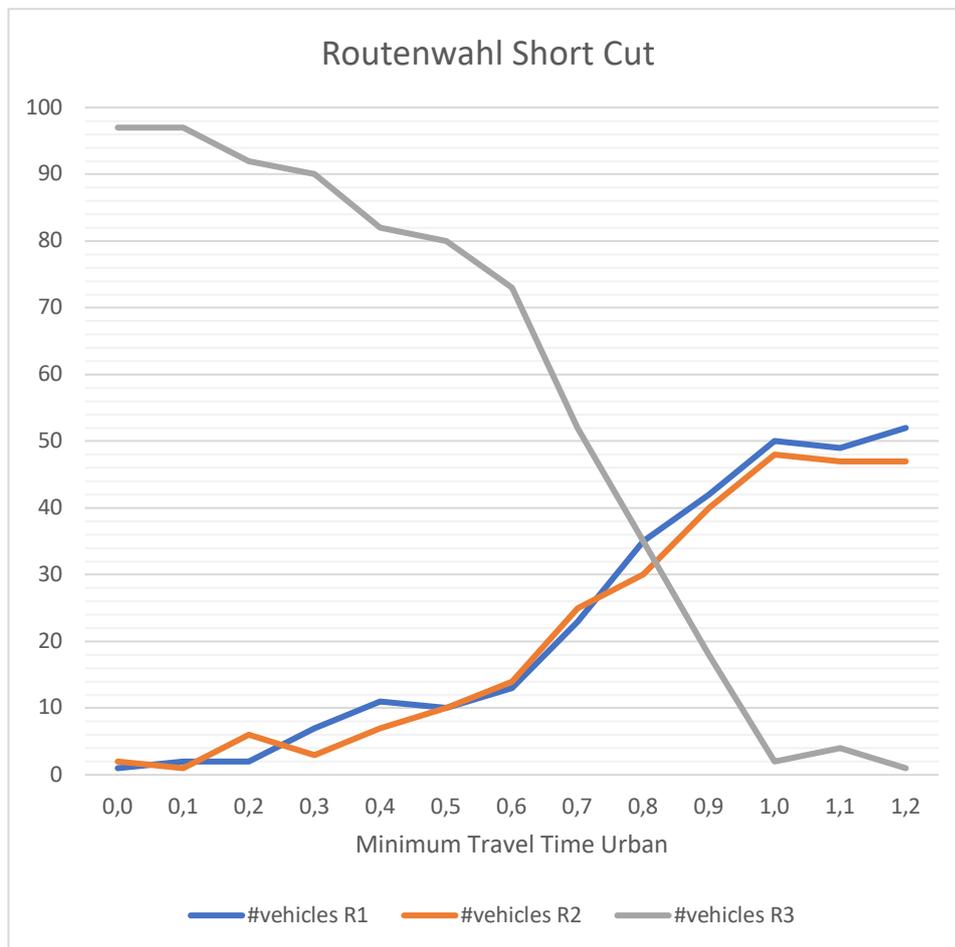
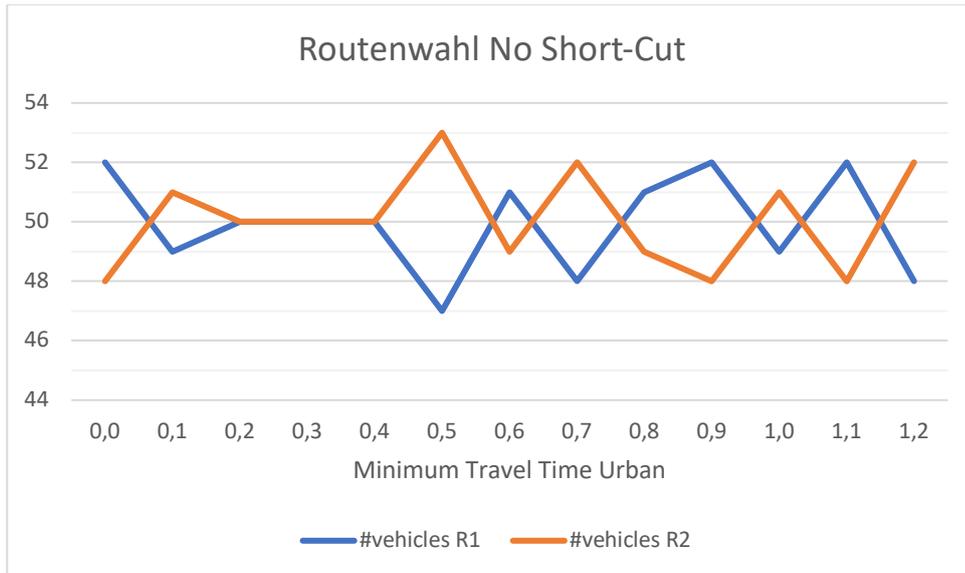
Simulation mit Tu

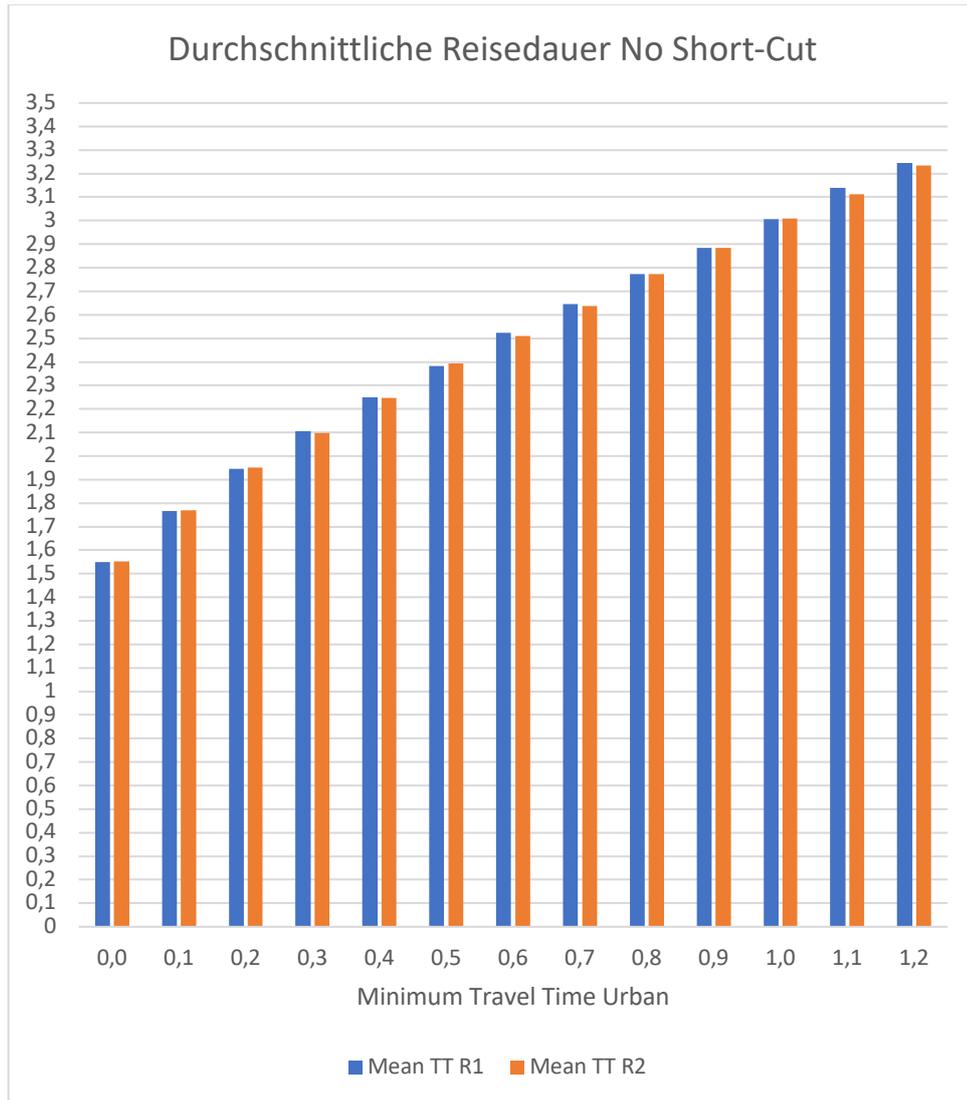
No Short-Cut:

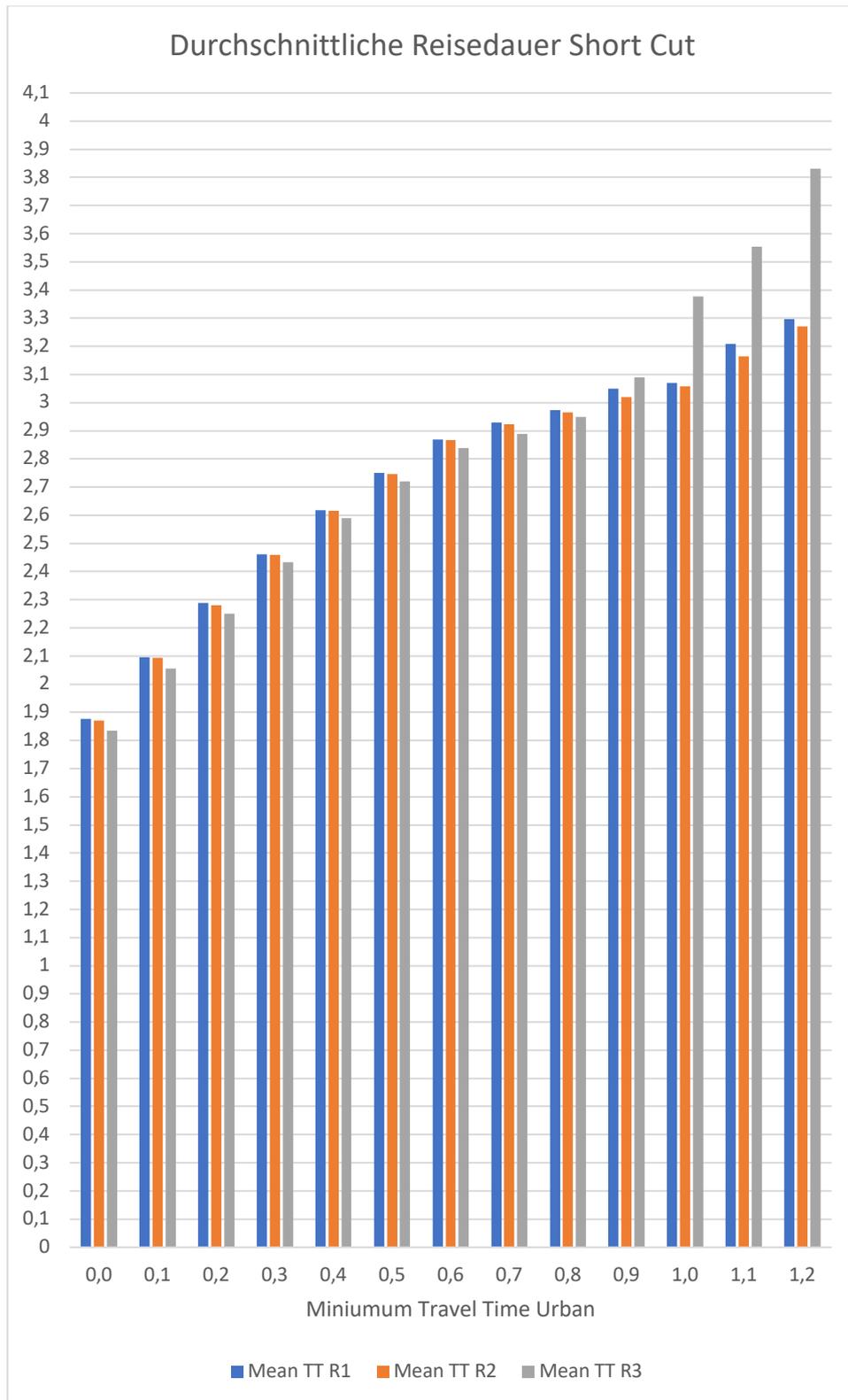
#vehicles	Mean-T-T-Highway	Min-T-T-Urban	Concentration Factor	Mean TT No Short-Cut	Mean TT R1	Mean TT R2	#vehicles R1	#vehicles R2
100	1,5	0,0	1	1,55135	1,55039	1,55234	52	48
100	1,5	0,1	1	1,76791	1,76592	1,76984	49	51
100	1,5	0,2	1	1,94804	1,94512	1,95093	50	50
100	1,5	0,3	1	2,10091	2,10513	2,09645	50	50
100	1,5	0,4	1	2,24817	2,24924	2,24708	50	50
100	1,5	0,5	1	2,38763	2,38195	2,39304	47	53
100	1,5	0,6	1	2,51665	2,52361	2,50961	51	49
100	1,5	0,7	1	2,6416	2,64506	2,63816	48	52
100	1,5	0,8	1	2,77201	2,77206	2,77197	51	49
100	1,5	0,9	1	2,88462	2,8854	2,88383	52	48
100	1,5	1,0	1	3,0078	3,00615	3,00942	49	51
100	1,5	1,1	1	3,1271	3,14029	3,11334	52	48
100	1,5	1,2	1	3,24069	3,24581	3,23561	48	52

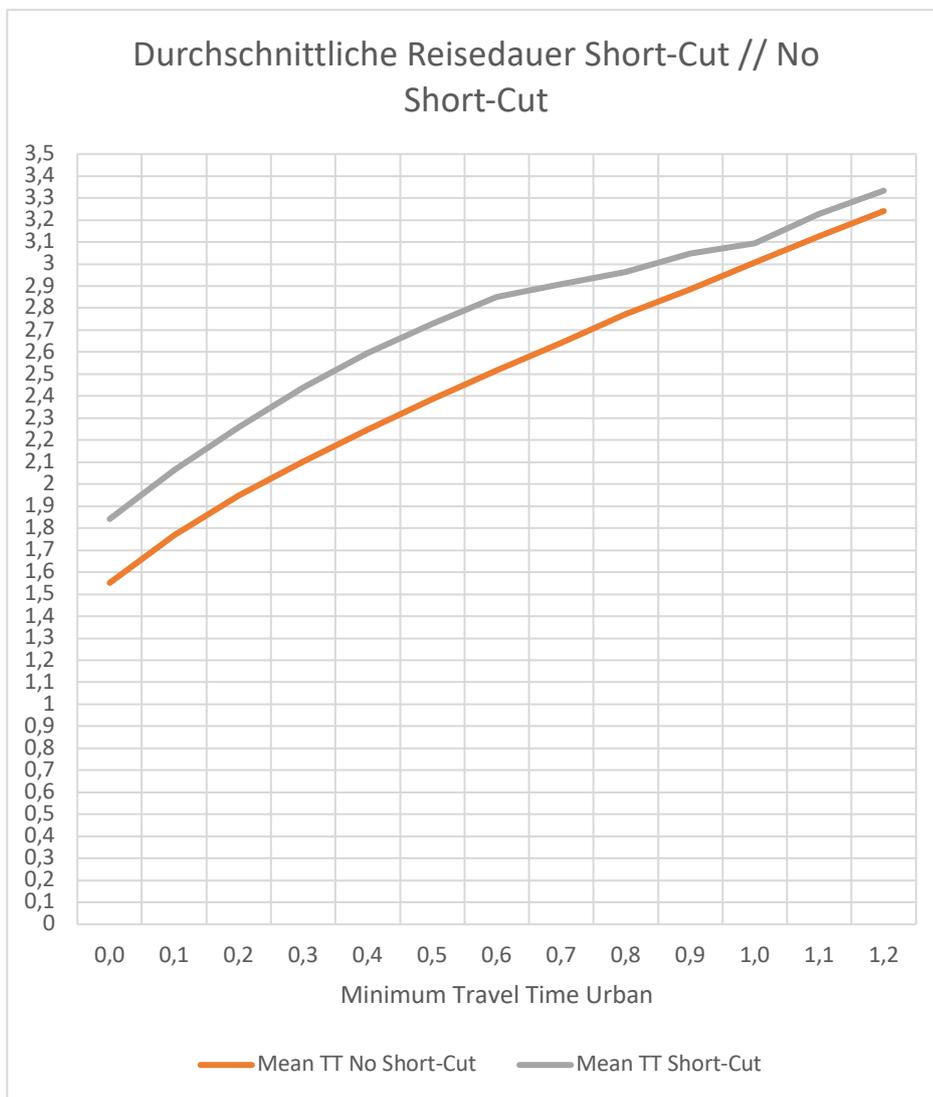
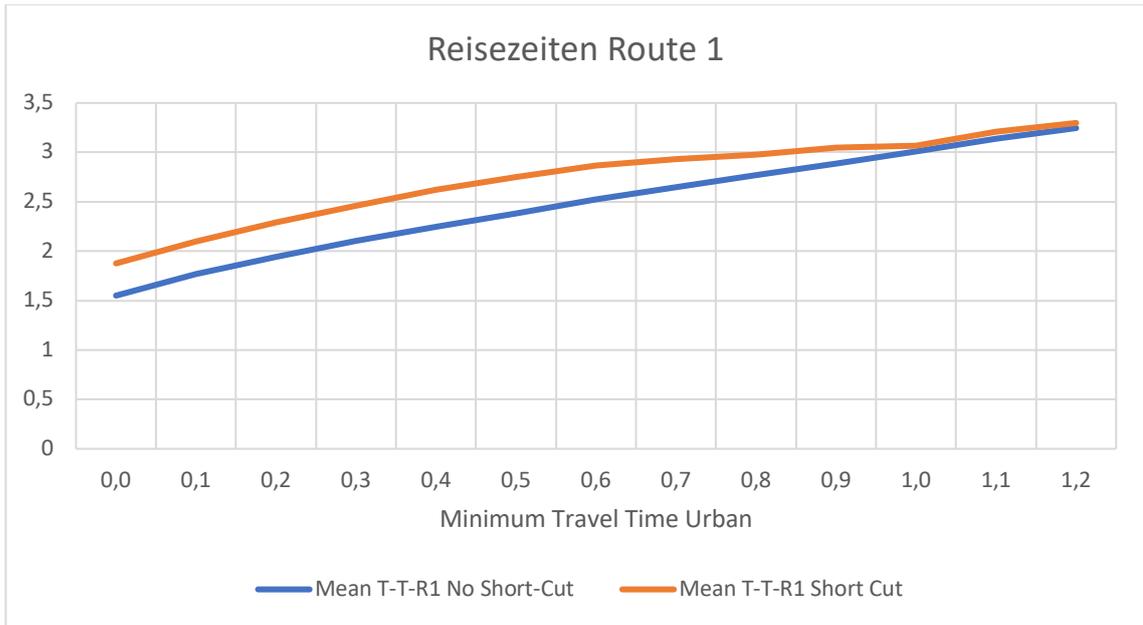
Short-Cut:

#vehicles	Mean-T-Highway	Min-T-T-Urban	Concentration Factor	Mean TT Short-Cut	Mean TT R1	Mean TT R2	Mean TT R3	#vehicles R1	#vehicles R2	#vehicles R3
100	1,5	0,0	1	1,84153	1,87626	1,86987	1,83425	1	2	97
100	1,5	0,1	1	2,06306	2,0958	2,09304	2,05569	2	1	97
100	1,5	0,2	1	2,25792	2,28878	2,28132	2,25086	2	6	92
100	1,5	0,3	1	2,4393	2,46176	2,45991	2,43297	7	3	90
100	1,5	0,4	1	2,59676	2,61879	2,61587	2,58909	11	7	82
100	1,5	0,5	1	2,7296	2,75007	2,74693	2,72034	10	10	80
100	1,5	0,6	1	2,85022	2,86924	2,86608	2,83861	13	14	73
100	1,5	0,7	1	2,90876	2,92943	2,92277	2,88926	23	25	52
100	1,5	0,8	1	2,96267	2,97432	2,96463	2,94928	35	30	35
100	1,5	0,9	1	3,04773	3,04979	3,01983	3,08955	42	40	18
100	1,5	1,0	1	3,09482	3,07004	3,05692	3,37784	50	48	2
100	1,5	1,1	1	3,22837	3,2075	3,16503	3,55411	49	47	4
100	1,5	1,2	1	3,33327	3,29741	3,27037	3,83021	52	47	1









Simulation mit T0

No Short-Cut:

#vehicles	Mean-T-T-Highway	Min-T-T-Urban	Concentration Factor	Mean TT No Short-Cut	Mean TT R1	Mean TT R2	#vehicles R1	#vehicles R2
100	0,1	0,8	1	1,85385	1,84317	1,86429	49	51
100	0,2	0,8	1	1,90192	1,90382	1,9	51	49
100	0,3	0,8	1	1,95635	1,95904	1,95362	50	50
100	0,4	0,8	1	2,01271	2,01452	2,0109	51	49
100	0,5	0,8	1	2,06246	2,05732	2,06759	49	51
100	0,6	0,8	1	2,13199	2,14134	2,12255	51	49
100	0,7	0,8	1	2,1841	2,16842	2,1994	46	54
100	0,8	0,8	1	2,25818	2,26297	2,25333	52	48
100	0,9	0,8	1	2,32339	2,31477	2,332	51	49
100	1	0,8	1	2,38938	2,39031	2,38848	49	51
100	1,1	0,8	1	2,46442	2,46272	2,46614	51	49
100	1,2	0,8	1	2,53523	2,52224	2,54786	50	50
100	1,3	0,8	1	2,61253	2,60261	2,62217	50	50
100	1,4	0,8	1	2,69068	2,69368	2,68765	51	49
100	1,5	0,8	1	2,76871	2,77677	2,76045	51	49
100	1,6	0,8	1	2,84855	2,84122	2,85577	48	52
100	1,7	0,8	1	2,93339	2,93673	2,93008	50	50
100	1,8	0,8	1	3,01084	3,00546	3,01616	49	51
100	1,9	0,8	1	3,09838	3,102	3,09457	51	49

Mikroskopische Simulation des Braess-Paradoxons

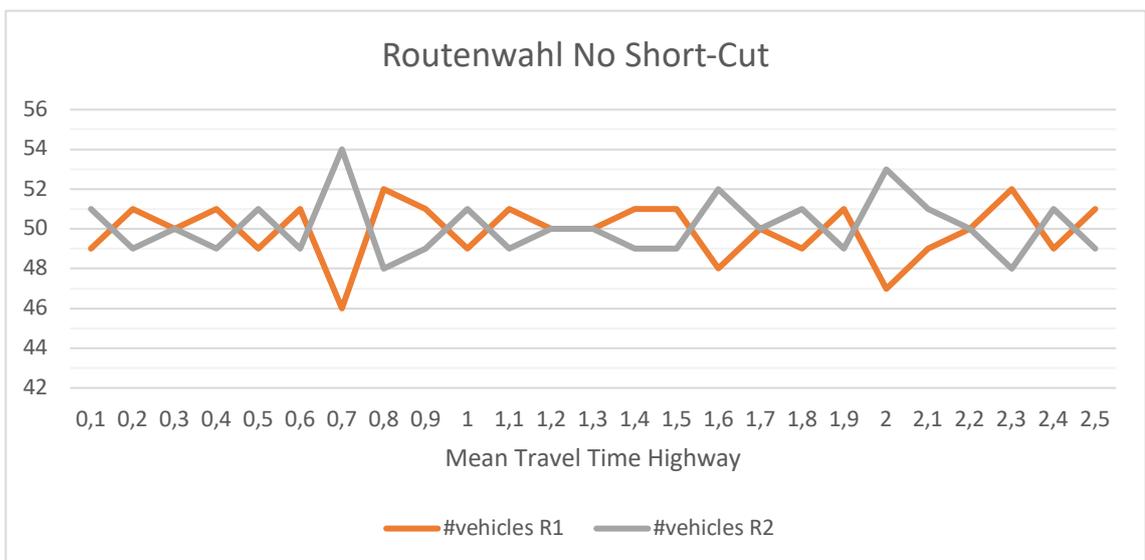
100	2	0,8	1	3,17895	3,16805	3,18933	47	53
100	2,1	0,8	1	3,2642	3,26079	3,26755	49	51
100	2,2	0,8	1	3,35532	3,35725	3,35344	50	50
100	2,3	0,8	1	3,44701	3,45752	3,43573	52	48
100	2,4	0,8	1	3,53392	3,53674	3,5311	49	51
100	2,5	0,8	1	3,61822	3,61942	3,61696	51	49

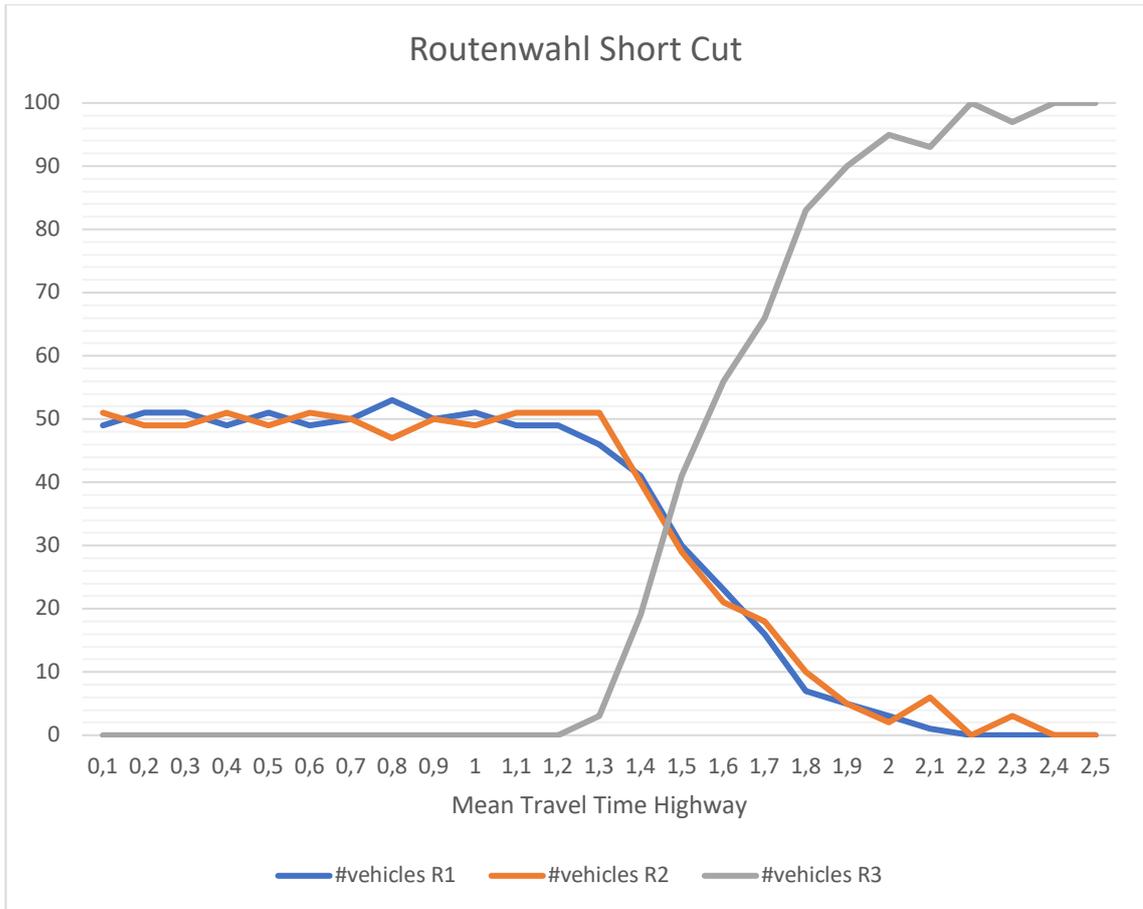
Short-Cut:

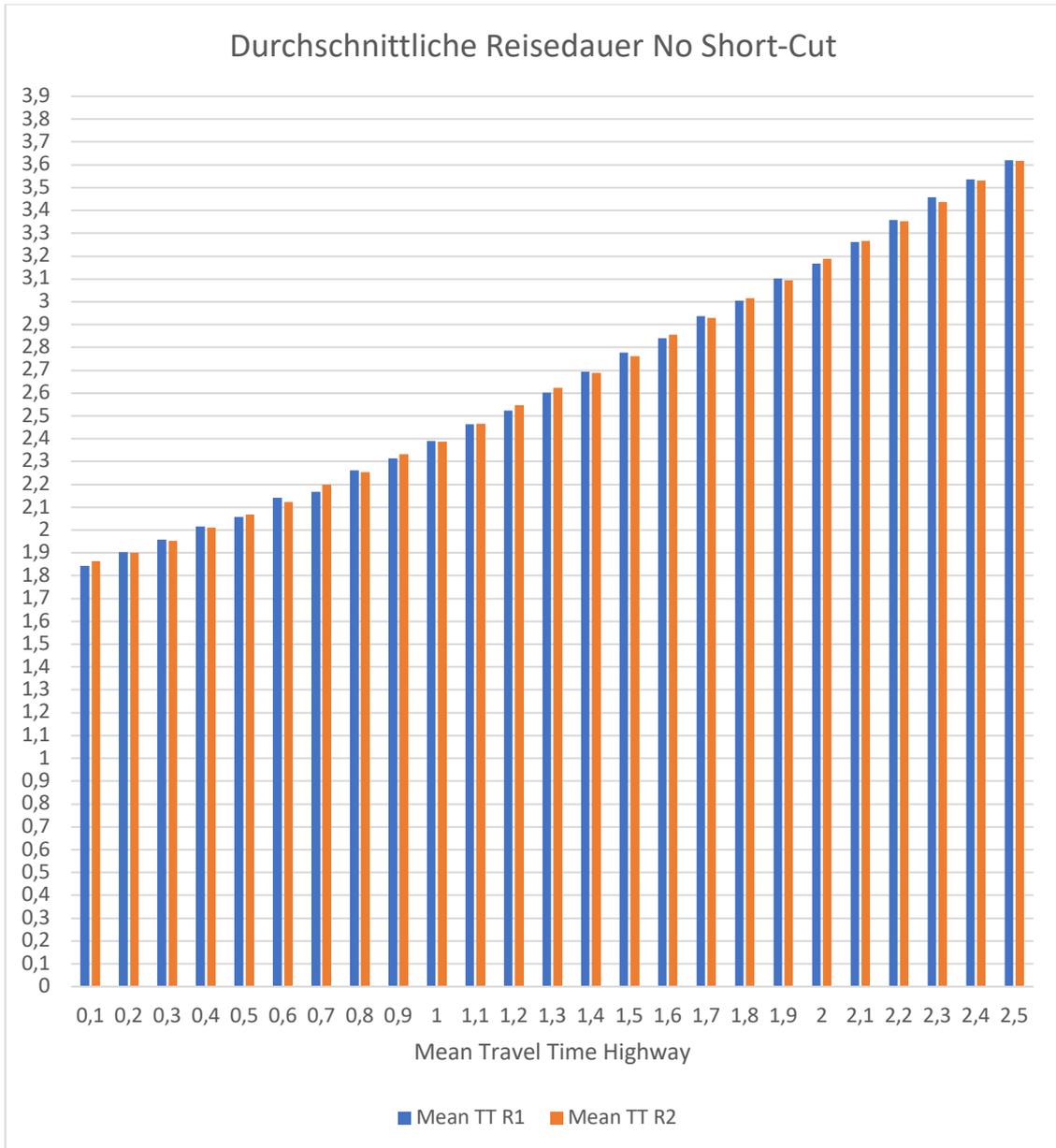
#vehicles	Mean-T-Highway	Min-T-T-Urban	Concentration Factor	Mean TT Short-Cut	Mean TT R1	Mean TT R2	Mean TT R3	#vehicles R1	#vehicles R2	#vehicles R3
100	0,1	0,8	1	1,99418	1,84785	1,85673	3,54608	49	51	0
100	0,2	0,8	1	2,04175	1,9106	1,90399	3,51625	51	49	0
100	0,3	0,8	1	2,08904	1,96078	1,96507	3,45682	51	49	0
100	0,4	0,8	1	2,13135	2,00133	2,03111	3,38283	49	51	0
100	0,5	0,8	1	2,19357	2,11176	2,06133	3,34649	51	49	0
100	0,6	0,8	1	2,24933	2,14795	2,15063	3,33066	49	51	0
100	0,7	0,8	1	2,30507	2,21587	2,21344	3,27465	50	50	0
100	0,8	0,8	1	2,35894	2,31381	2,24774	3,19147	53	47	0
100	0,9	0,8	1	2,41858	2,34655	2,35449	3,15065	50	50	0
100	1	0,8	1	2,481	2,44476	2,39485	3,14313	51	49	0
100	1,1	0,8	1	2,54641	2,48399	2,50177	3,12151	49	51	0
100	1,2	0,8	1	2,6113	2,55865	2,57659	3,08178	49	51	0

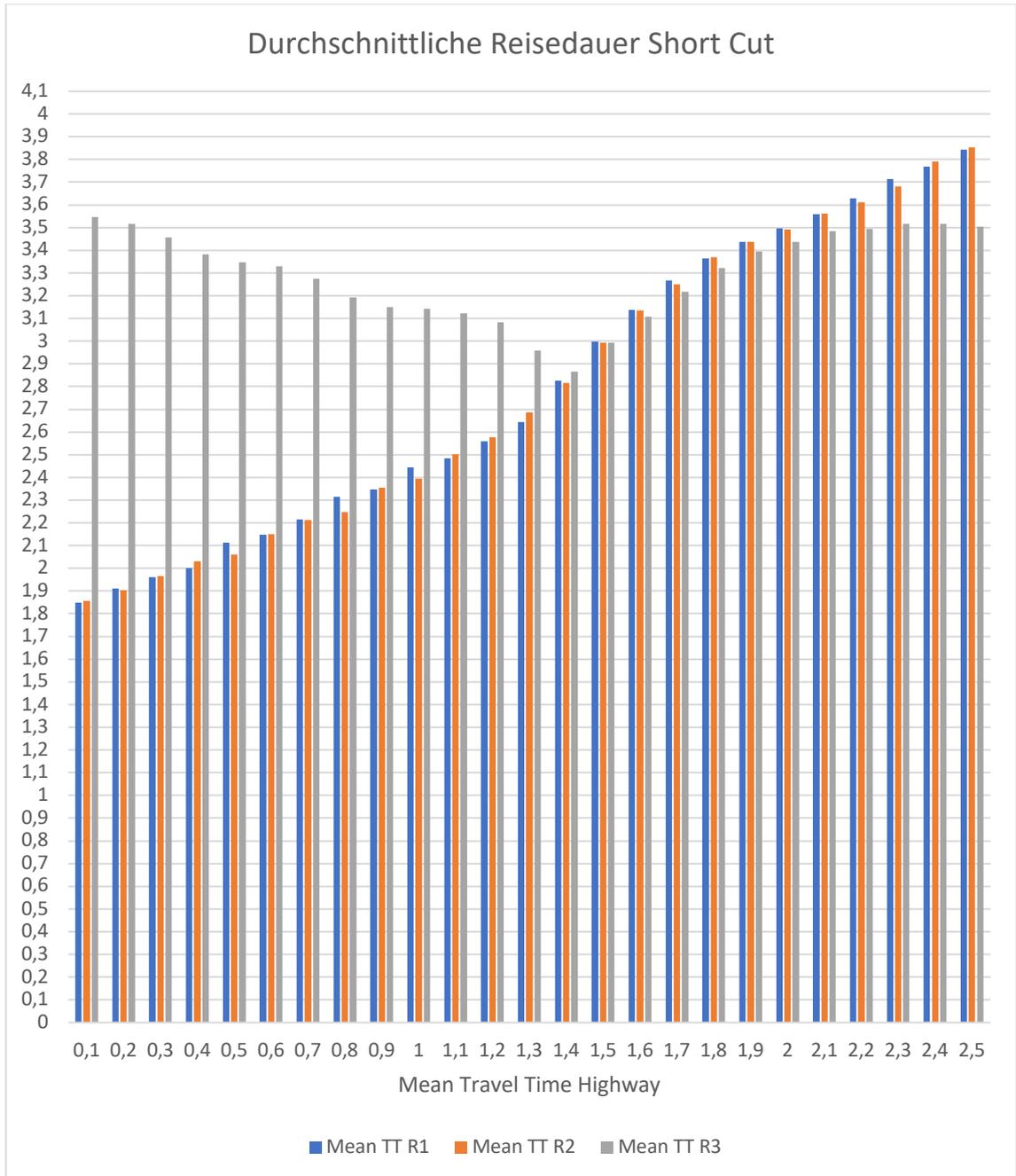
Mikroskopische Simulation des Braess-Paradoxons

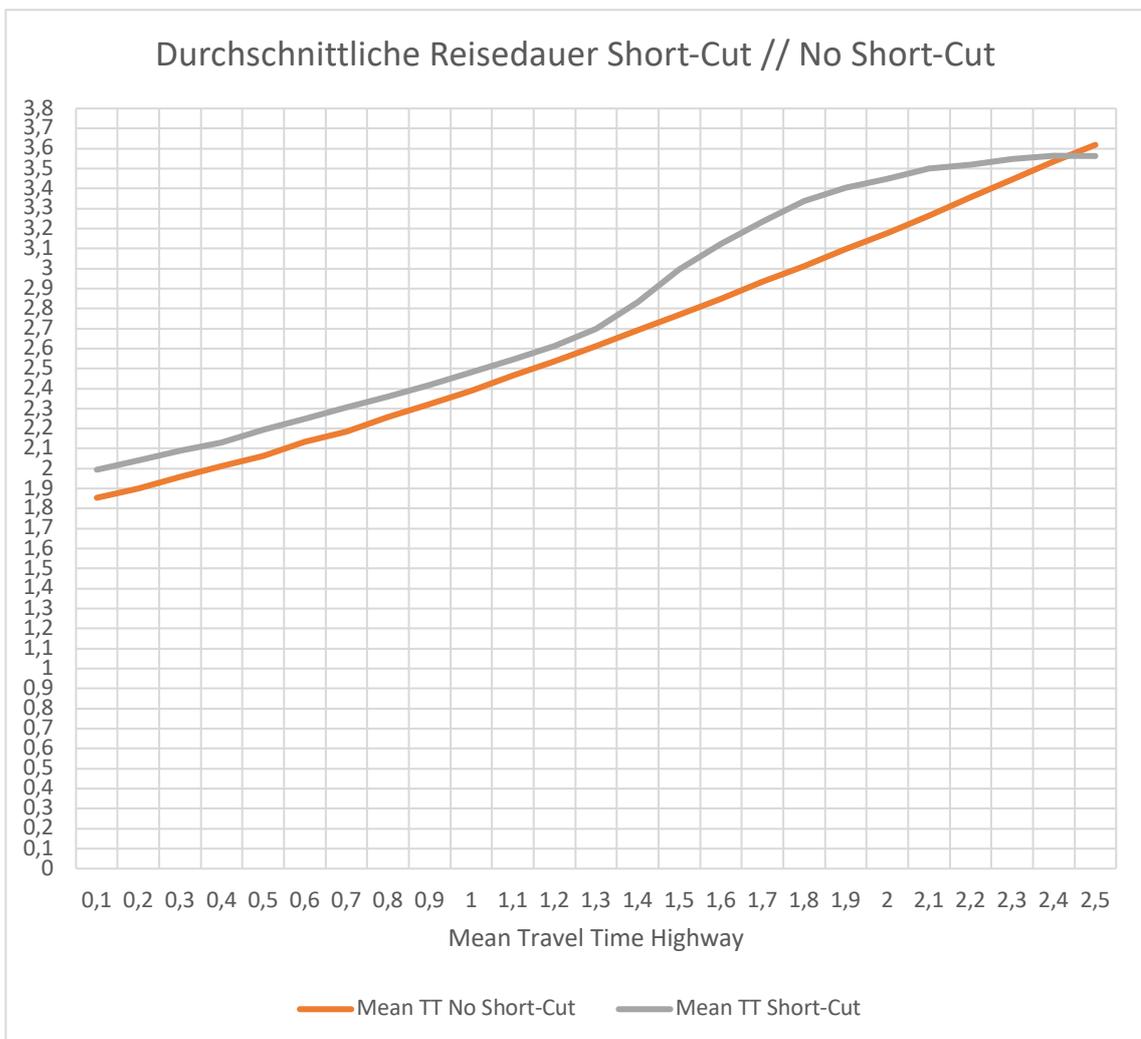
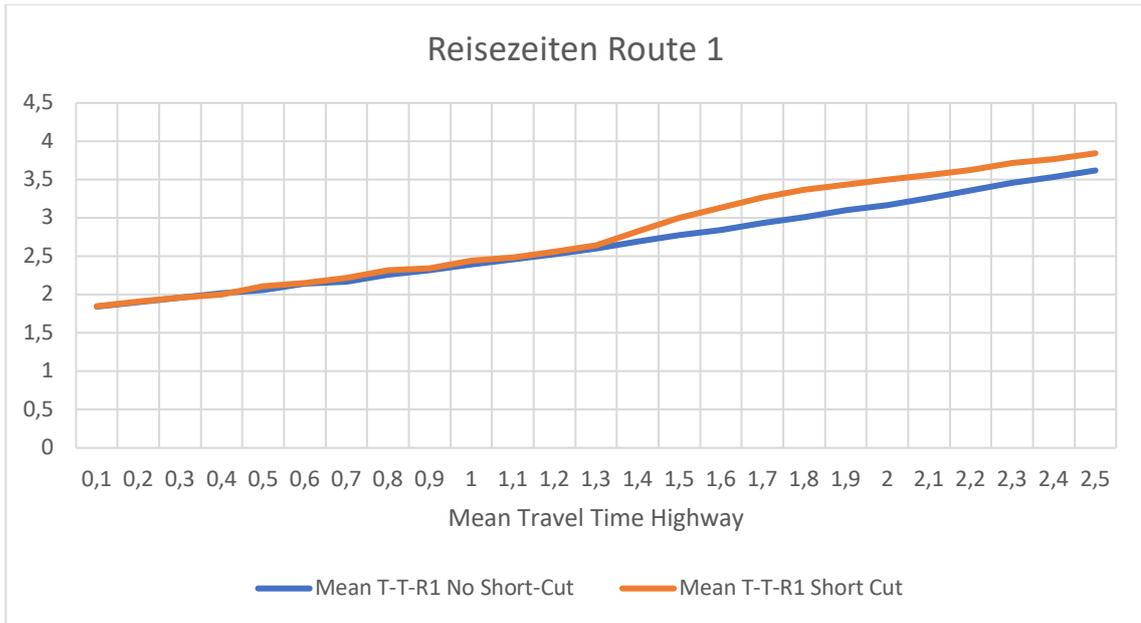
100	1,3	0,8	1	2,6974	2,64 306	2,68 713	2,95 818	46	51	3
100	1,4	0,8	1	2,83117	2,82 615	2,81 713	2,86 559	41	40	19
100	1,5	0,8	1	2,99538	2,99 889	2,99 419	2,99 344	30	29	41
100	1,6	0,8	1	3,12205	3,13 681	3,13 406	3,10 774	23	21	56
100	1,7	0,8	1	3,23446	3,26 687	3,24 973	3,21 753	16	18	66
100	1,8	0,8	1	3,33665	3,36 424	3,37 006	3,32 162	7	10	83
100	1,9	0,8	1	3,40556	3,43 622	3,43 639	3,39 456	5	5	90
100	2	0,8	1	3,44937	3,49 722	3,49 084	3,43 568	3	2	95
100	2,1	0,8	1	3,50013	3,55 99	3,56 066	3,48 46	1	6	93
100	2,2	0,8	1	3,51772	3,62 807	3,61 227	3,49 432	0	0	100
100	2,3	0,8	1	3,54872	3,71 467	3,68 239	3,51 622	0	3	97
100	2,4	0,8	1	3,56225	3,76 846	3,79 047	3,51 742	0	0	100
100	2,5	0,8	1	3,56241	3,84 377	3,85 388	3,50 333	0	0	100











Simulation mit L

No Short-Cut:

#vehicles	Mean-T-T-Highway	Min-T-T-Urban	Concentration Factor	Mean TT No Short-Cut	Mean TT R1	Mean TT R2	#vehicles R1	#vehicles R2
100	1,5	0,8	0	2,30047	2,30872	2,29299	45	55
100	1,5	0,8	0,1	2,33693	2,33267	2,34107	48	52
100	1,5	0,8	0,2	2,37354	2,37565	2,37107	55	45
100	1,5	0,8	0,3	2,41913	2,41776	2,42035	49	51
100	1,5	0,8	0,4	2,46065	2,4614	2,45989	52	48
100	1,5	0,8	0,5	2,4969	2,4993	2,49446	50	50
100	1,5	0,8	0,6	2,55865	2,55188	2,56514	50	50
100	1,5	0,8	0,7	2,60217	2,60991	2,59418	50	50
100	1,5	0,8	0,8	2,66466	2,6673	2,66192	51	49
100	1,5	0,8	0,9	2,70758	2,71083	2,70423	51	49
100	1,5	0,8	1	2,77214	2,77415	2,7701	49	51
100	1,5	0,8	1,1	2,82525	2,82971	2,82073	50	50
100	1,5	0,8	1,2	2,89224	2,89556	2,88892	50	50
100	1,5	0,8	1,3	2,94861	2,94167	2,95553	48	52
100	1,5	0,8	1,4	3,02679	3,02105	3,03249	49	51
100	1,5	0,8	1,5	3,08048	3,08071	3,08025	50	50
100	1,5	0,8	1,6	3,15144	3,15104	3,15183	49	51

Short-Cut:

#vehicles	Mean-T-Highway	Min-T-T-Urban	Concentration Factor	Mean TT Short-Cut	Mean TT R1	Mean TT R2	Mean TT R3	#vehicles R1	#vehicles R2	#vehicles R3
100	1,5	0,8	0	1,71408	2,27369	2,29679	1,597	0	0	100
100	1,5	0,8	0,1	1,88609	2,36601	2,33341	1,79169	0	0	100
100	1,5	0,8	0,2	2,05855	2,40765	2,41041	1,98733	0	0	100
100	1,5	0,8	0,3	2,22937	2,48288	2,47339	2,17828	0	0	100
100	1,5	0,8	0,4	2,39431	2,53304	2,51936	2,36637	0	1	99
100	1,5	0,8	0,5	2,56671	2,6522	2,62862	2,54831	3	3	94
100	1,5	0,8	0,6	2,70523	2,75387	2,75403	2,68915	1	3	96
100	1,5	0,8	0,7	2,80733	2,83384	2,83785	2,7926	11	8	81
100	1,5	0,8	0,8	2,88644	2,89819	2,91305	2,87108	20	15	65
100	1,5	0,8	0,9	2,94011	2,94391	2,95915	2,92623	25	22	53
100	1,5	0,8	1	2,99027	2,98416	3,00253	2,98459	33	31	36
100	1,5	0,8	1,1	3,04406	3,03792	3,03556	3,06093	35	38	27
100	1,5	0,8	1,2	3,01181	2,99277	2,99603	3,10358	45	45	10
100	1,5	0,8	1,3	3,07819	3,00109	3,08493	3,30193	44	50	6
100	1,5	0,8	1,4	3,11748	3,07702	3,07254	3,50775	50	48	2
100	1,5	0,8	1,5	3,19629	3,18721	3,09679	3,77373	52	48	0
100	1,5	0,8	1,6	3,27698	3,16721	3,26115	3,94342	47	53	0

