

Diploma Thesis

Simulation of entry and exit at regularly scheduled stops at the regional rail transport

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Mechanical Engineering and Process Engineering

Diplomarbeit

Simulation von Fahrgastwechsel im Schienenpersonennahverkehr

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Ing.Mathias Denk, BSc

Matr.Nr.: 01227087

unter der Anleitung von

Univ. Prof. i.R. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Norbert Ostermann** &
Dipl.-Ing. Dr.techn. **Bernhard Rürger**

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/230-2, 1040 Wien, Österreich
in Kooperation mit
Siemens Mobility Austria GmbH
Leberstraße 34, 1110 Wien, Österreich

Wien, im März 2021



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Eidesstattliche Erklärung

Ing. Mathias Denk, BSc; Storkgasse 13/29; 1050 Wien, Österreich

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst habe. Wo ich aus Arbeiten anderer direkt oder indirekt Passagen oder Erkenntnisse übernommen habe, habe ich diese Stellen immer klar und deutlich ausgewiesen.

Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch ähnlicher Form an einer anderen Hochschule vorgelegt oder veröffentlicht.

Wien, am 10.03.2021



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Aufgrund von zunehmenden Fahrgastzahlen und nicht mehr weiter kürzbaren Intervallen stehen die Betreiber von öffentlichen Verkehrsmitteln vor einem scheinbar unlösbaren Problem. Die letzte Möglichkeit eine Kapazitätssteigerung zu erreichen, ist das Layout der Züge bzw. der Wagons so anzupassen, dass möglichst viele Fahrgäste befördert werden können. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss des Layouts der Wagons auf die Ein- und Ausstiegszeiten der Passagiere. Hierfür wurde exemplarisch das Layout der U-Bahn in München, welches von der *Siemens Mobility GmbH* konzipiert wurde, herangezogen.

Um den Einfluss zeigen zu können, wurden die am Markt erhältlichen Softwareprodukte gesichtet und auf Pathfinder, PTV Vissim & Visswalk und Anylogic eingeschränkt. Nach näherer Betrachtung wurde PTV Viswalk & Vissim aufgrund der Einschränkungen des Programms nicht mehr weiter behandelt.

In Pathfinder und Anylogic wurden vergleichbare Modelle erstellt und ausgewertet. Beide Modelle folgen hier der agentenbasierten Simulationsmethode. Durch das Wählen und Anpassen der abänderbaren Parameter konnten realitätsnahe Ergebnisse erzielt werden. Nach ausführlicher Bearbeitung und Auswertung kommt diese Arbeit zu dem Schluss, dass Pathfinder am besten dafür geeignet ist, die Evakuierung in Katastrophenfällen zu simulieren, während Anylogic den zyklischen Ein- und Aussteigeprozess realitätsnah abbilden kann.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

Due to the ever rising number of passengers on public transport and train intervals that can not be shortened due to a number of unalterable factors the operators of public transport systems are faced with an insolvable challenge. The only possibility to increase the capacity of the public transport system is to change the layout of the trains or train cars. This master thesis is going to quantify the impact of a changed layout on the time it takes passengers to enter or exit the train cars. The layout used in this thesis is the layout of the underground in Munich, Germany. These trains were designed and manufactured by the *Siemens Mobility GmbH*.

First the available software products were sighted. Then the most suitable ones were chosen. For this application the chosen ones were Pathfinder, PTV Vissim & Visswalk and Anylogic. PTV Vissim & Visswalk was soon after excluded due to the programs limitations.

With Pathfinder and Anylogic comparable models were built and the obtained data evaluated. Both models are based on agent based simulation techniques. Through choosing and modifying the relevant parameters the data obtained was realistic.

In conclusion Pathfinder turned out to be most suitable to simulate the evacuation of train cars in case of an emergency while Anylogic is most suitable to depict the periodical entering and exiting of train cars.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	10
1.1	Problemstellung	10
1.2	Ziel der Arbeit	11
1.3	Methoden	11
2	Theoretische Grundlagen	13
2.1	Der Fahrgastwechsel	13
2.1.1	Eigenschaften der Fußgänger	13
2.1.2	Bewegungsablauf	15
2.1.3	Geschwindigkeitsverhalten	15
2.1.4	Leistungsfähigkeit der Fußgängeranlage	15
2.1.5	Wahl der Gehspur	16
2.1.6	Passagierverteilung am Bahnsteig	17
2.1.7	Passagierverteilung in U-Bahnzügen	18
2.1.8	Passagiermodell Zusammenfassung	20
2.2	Simulation von Fußgängern	21
2.2.1	Makroskopische Modelle	21
2.2.2	Mesoskopische Modelle	21
2.2.3	Mikroskopische Modelle	22
2.2.4	Social Force Model	22
2.2.5	Pedestrian Dynamics Modell	24
2.2.6	Agent Based Modeling	26
2.3	Monte Carlo Simulation	27
3	Software	29
3.1	Auswahl der Software	29
3.2	PTV- Vissim & Viswalk	31
3.2.1	Allgemeines	31
3.2.2	Parameter	32
3.2.3	Modellierung	33
3.3	Anylogic	33
3.3.1	Allgemeines	33
3.3.2	Parameter	35
3.3.3	Modellierung	36
3.4	Thunderhead Engineering Pathfinder	37
3.4.1	Allgemeines	37
3.4.2	Parameter	39
3.4.3	Modellierung	40
4	Modell	42
4.1	U-Bahn München	42
4.2	Simulation	44
4.2.1	PTV- Vissim & Viswalk	44

4.2.2	Anylogic	44
4.2.3	Thunderhead Engineering Pathfinder	56
5	Conclusio	65
5.1	Zusammenfassung der Methode und Auswertung des Modells	65
5.2	Zusammenfassung der Erkenntnisse	68
5.3	Ausblick	68
6	Anhang	75
6.1	Pathfinder	75
6.1.1	Model 80%	75
6.1.2	Model 60%	76
6.1.3	Model 40%	77

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Problemstellung

Stetig zunehmende Fahrgastzahlen, sowie kürzere Entwicklungszeiten in der Produktion von U-Bahnzügen, stellen sowohl die Betreiber, als auch die Hersteller vor neue Herausforderungen. Wird die Entwicklung der Fahrgastzahlen exemplarisch der Wiener Linien betrachtet, zeigt sich, dass die Anzahl der Beförderungen seit dem Jahr 2000 um etwa 30% auf 960,7 Mio. gestiegen ist.¹ Dabei entfallen etwa 50% auf den U-Bahnbetrieb. Um diesen Entwicklungen nachzukommen, ist es notwendig die Kapazitäten des öffentlichen Verkehrs zu erhöhen. Die Kapazität einer U-Bahnlinie ist dabei von mehreren Faktoren abhängig. Eine Möglichkeit bietet die Verringerung der zeitlichen Intervalle zwischen den Zügen. Die zeitlichen Intervalle zwischen den einzelnen Fahrzeugen ist von vielen Faktoren abhängig. Diese sind für U-Bahnen z.B. Fahrweg und damit Fahrzeit, Passagieraufkommen und -verteilung, Türöffnungs- und -schließzeiten. In den Stoßzeiten kommt es damit zu einem vorgegebenen Minimum der Zugfolgezeit, welche z. B. bei den Wiener Linien bei etwa zwei Minuten liegt.

Um trotz der begrenzten Zugfolgezeiten eine Kapazitätssteigerung herbeizuführen, kann das Layout der Wagons angepasst werden. Das Layout umfasst dabei Türen, Haltestangen, Sitzanordnungen, Anzeigen etc. und nicht den Waggenkasten an sich. Der Unterschied zeigt sich bei Zügen mit hoher Kapazität im asiatischen Raum mit Längsbestuhlung und breiteren Türen. Der dadurch erhöhte Anteil an Stehplätzen führt zu einer Kapazitätssteigerung bei allerdings gleichzeitiger Komforteinbuße. Weiters müssen die durch die nationalen Regularien bedingten Evakuierungsstrategien eingehalten werden. Dabei ist es zusätzlich vom Betreiber abhängig wie diese Auflagen umgesetzt werden.

Mit unterschiedlichen Verteilungen innerhalb der Bevölkerung bezüglich Alter, Geschlecht und Nationalität sind weiterer Einflussfaktoren gegeben, welche nicht außer Acht gelassen werden dürfen.^{2 3}

Japan und Taiwan sind gute Beispiele dafür, wie sich soziale Konventionen oder Regularien auf das Ein- bzw. Ausstiegsverhalten des Individuums auswirken können. Durch Reihenbildung der einsteigenden Personen am Bahnsteig in gekennzeichneten Bereichen können ankommende Passagiere schnell und ungehindert aussteigen. Der Einsteigevorgang kann dann rasch in der zuvor am Bahnsteig gebildeten Reihenfolge ablaufen. In Europa zeigt sich dazu ein anderes Bild, mit seitlich neben den Türen angeordneten, auch oft zu Traubenbildung neigenden Personengruppen.⁴

¹Vgl. *Zahlen, Daten, Fakten: 2019* 2020

²Vgl. *Verteilung der Körpergrößen nach Geschlecht im Jahr 2006* 2020

³Vgl. *Demographische Indikatoren* 2020

⁴Eigene Beobachtung

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist die Validierung unterschiedlicher am Markt erhältlicher Softwarelösungen mit Fokus auf Crowdsimulation im Kontext des Passagierflusses in öffentlichen Verkehrsmitteln. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf den Fahrgastwechsel zwischen U-Bahn und Bahnsteig, sowie die Bewegung der Passagiere innerhalb des Zuges, gelegt. Die Fragen, ob eine derartige Simulation mit den verfügbaren Softwareprodukten überhaupt möglich ist und wie akkurat die ausgegebenen Ergebnisse sind, sollen in dieser Arbeit beantwortet werden. Außerdem soll erhoben werden welchen Einfluss die Layoutgestaltung der U-Bahnwaggons auf den Ein- und Ausstiegsprozess hat.

1.3 Methoden

Im Zuge dieser Arbeit wurde eine Studie über gängige Simulationssoftware mit dem Fokus auf Crowdsimulation durchgeführt. Im ersten Schritt werden die am Markt erhältlichen Softwareprodukte gesichtet und anschließend nach vordefinierten Kriterien bewertet. Die drei am besten bewerteten Produkte werden für die Modellbildung und Simulation herangezogen. Die dabei erhaltenen Ergebnisse werden mit Referenzdaten abgeglichen und validiert. Die zugrundeliegende Modellbildung ist dabei stark von der Software abhängig. Es wird zwischen makro-, mikro- und mesoskopischen Modellen und der damit verbundenen Eigenschaften der Simulation unterschieden. In dieser Arbeit wird vor allem auf den mikroskopischen Ansatz eingegangen, weil dieser am Häufigsten in der Literatur bezüglich Crowdsimulation Einsatz findet.

Als Modell wird ein U-Bahnzug mit unterschiedlichen Layoutkonfigurationen pro Waggon herangezogen. Dies soll alle angeführten Probleme, sowohl bei der Modellbildung als auch die Interaktion der Personen mit dieser Umgebung zeigen. Dabei ist auf die unterschiedlichen Ansätze der Softwarehersteller bezüglich der implementierten Verhaltensmodelle zu achten.

Um die Interaktion von Passagieren mit dem U-Bahnzug beim Ein- und Aussteigen während der Fahrt und mit anderen Passagieren in dieser Arbeit abbilden und bewerten zu können, wurde auf folgende Arbeiten zurückgegriffen:

- Bruckner 2014 befasst sich in seiner Dissertation mit der Modellierung von Personenströmen auf Basis einer agentenbasierten Simulation. Sein Modell kann unterschiedliche Personengruppen (z.B. Rollstuhlfahrer) und die damit verbundenen Randbedingungen im Falle einer Evakuierung abbilden.
- Zhang et al. 2018 zeigt in seinem Paper eine Erweiterung des Social Force Models von Helbing und Molnar 1998 um die Gruppenbildung in Evakuierungsszenarien besser abbilden zu können.
- Tomasz et al. 2014 befasst sich mit der Wichtigkeit der Simulation und die damit einhergehende Kostenreduktion. Er geht im Zuge seiner Arbeit auf die Modellierung unterschiedlicher Personengruppen (Alter, Geschlecht, physische und psychische Attribute) beim Ein- und Aussteigen und der Wahl des Sitzplatzes in einem Bus ein. Es werden weiters unterschiedliche Buslayouts miteinander verglichen.
- Panzera 2014 hat empirische Untersuchungen an höherrangigen, innerstädtischen Verkehrsmitteln durchgeführt. Auf Basis dieser Daten können Kalibrierungen und Zusammenhänge für die Modellbildung abgeleitet werden.

- Macal und North 2009 beschreibt in seinem Paper die Notwendigkeit agentenbasierter Modellierung und wie Probleme bei diesem Ansatz gelöst werden können.
- Kubanik 2017 hat im Zuge seiner Diplomarbeit empirische Untersuchungen an urbanen Nahverkehrsmitteln durchgeführt. Dabei wurden Daten über die Sitzplatzbelegung unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen erhoben.
- Fiebag 2019 fokussiert auf die Fahrgastwechselzeiten und welche Rolle hierbei die Innenraumgestaltung spielt. Durch den Vergleich unterschiedlicher Waggonlayouts mittels einer Bewegungsmatrix konnte eine Bewertung durchgeführt werden.
- Gao und Jia 2016 beschreibt in seinem Paper die Modellierung und Simulation von Passagierflussverteilungen auf U-Bahnbahnsteigen.
- Johansson et al. 2007 zeigt in seinem Paper eine Methode, wie durch Videoaufnahmen und Auswertung von Trajektorien eine Parametrierung des Social Force Models durchgeführt werden kann. Dadurch kann das Bewegungsverhalten und die Interaktion zwischen Personen noch realistischer abgebildet werden.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die aktuellen Ansätze in der Simulation von Personenströmen und die computergestützte Umsetzung. Im ersten Teil wird der Fahrgastwechsel und im zweiten Teil die zugrundeliegenden Simulationsansätze dargelegt.

2.1 Der Fahrgastwechsel

Der Fahrgastwechsel stellt einen Teilprozess des gesamten Halteprozesses im öffentlichen Nahverkehr dar. Er bildet dabei den variablen Anteil der Haltezeit. Alle übrigen Anteile der Haltezeit werden als feste Haltezeitanteile bezeichnet. Die festen Anteile beinhalten z. B. die Türöffnungs- und -schließzeiten, Entriegelung und Verriegelung der Türen und die Reaktionszeit des Personals. Diese werden in dieser Arbeit als Gesamtgröße betrachtet und daher nicht eingehender bearbeitet⁵.

Der Fahrgastwechsel stellt den Austausch von Personen zwischen Bahnsteig und Fahrzeug dar. Dabei muss eine Schnittstelle, z. B. eine Tür oder ein Durchgang, passiert werden. Der Fahrgastwechsel ist von vielen Faktoren abhängig und wurde unter anderem von Weidmann 1995 in seiner Arbeit über die *Grundlagen zur Berechnung der Fahrgastwechselzeiten* ausführlich untersucht. Er geht dabei von folgenden Annahmen in der Modellbildung aus:

Das Einsteigen und Aussteigen in ein Fahrzeug des öffentlichen Verkehrs kann als Parallelschaltung von mehreren Engpässen einer Fußgängeranlage gesehen werden. Deshalb muss bei der Betrachtung der Fahrgastwechselzeiten ein Augenmerk auf die physischen und psychischen Eigenschaften der Fahrgäste und die örtlichen Gegebenheiten eingegangen werden. Es ergeben sich deshalb folgende Parameter, die zu betrachten sind⁶:

- Eigenschaften der Fußgänger bezüglich Geschlecht, Alter und Größe
- Bewegungsablauf und Leistungsfähigkeit
- Geschwindigkeitsverhalten
- Leistungsfähigkeit der Fußgängeranlage

2.1.1 Eigenschaften der Fußgänger

Die physiologischen Eigenschaften von Personen sind stark abhängig von Geschlecht, Alter und Herkunft. In Österreich wird die demographische Entwicklung von der Statistik Austria erhoben. Laut der demographischen Indikatoren für das Jahr 2019⁷ kommen in Österreich auf 1000

⁵Vgl. Weidmann 1995, S.108

⁶Vgl. Weidmann 1995, S.17

⁷Vgl. *Demographische Indikatoren* 2020

Frauen 968 Männer. Das ergibt eine prozentuale Verteilung von 49.2% Männer und 50.8% Frauen. Die Altersverteilung ist der **Abb.2.1** zu entnehmen. Dabei ist auffällig, dass der größere Anteil an Frauen in der Bevölkerung vor allem aus den Altersbereichen ab 60 Jahren stammt.



Abb. 2.1: Altersverteilung in Österreich⁸

In **Abb.2.2** ist beispielhaft die Größenverteilung für die Bundesrepublik Deutschland und das Jahr 2006 dargestellt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Durchschnittsgröße bei Männern bei 178.5cm und für Frauen bei 166.9cm liegt.⁹ In dieser Arbeit werden die Daten der Bundesrepublik Deutschland herangezogen, da die Daten für Österreich bei der Statistik Austria nicht aufliegen.

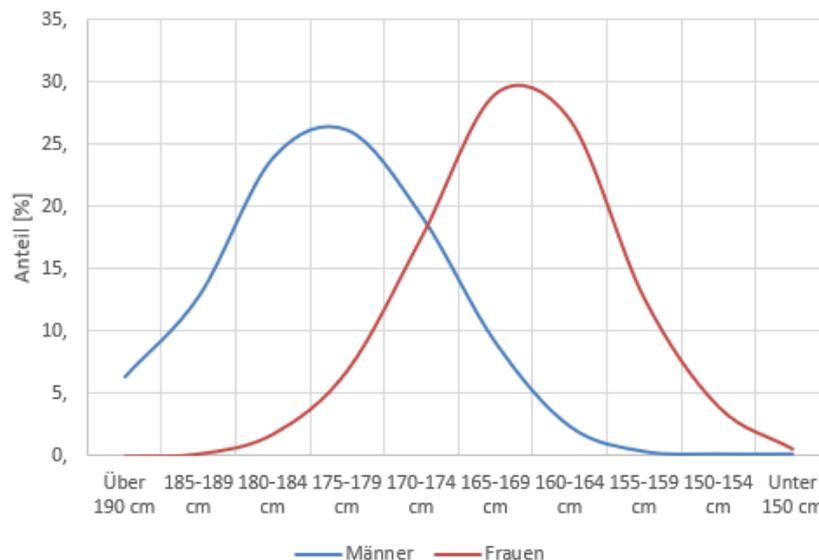


Abb. 2.2: Körpergrößenverteilung in Deutschland¹⁰

⁸Eigene Darstellung nach *Demographische Indikatoren 2020*

⁹Vgl. *Verteilung der Körpergrößen nach Geschlecht im Jahr 2006 2020*

¹⁰Eigene Darstellung nach *Verteilung der Körpergrößen nach Geschlecht im Jahr 2006 2020*

Werden diese Zahlen mit dem zentral asiatischen Raum verglichen, zeigt sich, dass sowohl die Altersverteilung, als auch die Körpergrößenverteilung anders sind: Der Durchschnittswert für einen 19-jährigen Mann liegt bei 173.7cm und der für eine 19-jährige Frau bei 160.4cm¹¹

2.1.2 Bewegungsablauf

Der Bewegungsablauf beim Menschen wird in zwei Fortbewegungsarten unterteilt. Hat einer der beiden Füße während der Bewegung stets Bodenkontakt, spricht man von "Gehen". Trifft diese Einschränkung nicht mehr zu, spricht man von "Laufen". Dabei ist die Fortbewegungsgeschwindigkeit primär von der Schrittlänge und der Bewegungsart abhängig.¹²

2.1.3 Geschwindigkeitsverhalten

Die Gehgeschwindigkeit ist von mehreren Faktoren abhängig. Diese sind nach Weidmann 1995¹³:

- **Geschlecht:** Die Durchschnittsgeschwindigkeit von Männern liegt bei 1.41 m/s und für Frauen bei 1.27 m/s.
- **Lebensalter:** Die Fußgängergeschwindigkeit steigert sich vom Kleinkindesalter bis sie ihr Maximum um das zwanzigste Lebensjahr erreicht hat. Anschließend nimmt sie wieder ab (siehe **Abb.2.3a**).
- **Tageszeit:** Die körperliche Leistungsfähigkeit steht im Zusammenhang mit der Tageszeit und diese hat deshalb eine Auswirkung auf die Gehgeschwindigkeit (siehe **Abb.2.3b**).
- **Fußgängeranlage:** Beim Treppensteigen, sowohl hinauf, als auch herab, verringert sich die Gehgeschwindigkeit (siehe **Abb.2.3c**).
- **Fußgängerdichte:** Mit zunehmender Dichte, nimmt die Gehgeschwindigkeit ab (siehe **Abb.2.3d**).

2.1.4 Leistungsfähigkeit der Fußgängeranlage

Unter Fußgängeranlage wird der Bereich verstanden, in welchem sich Fußgänger mehr oder weniger frei bewegen können. Die Fußgängeranlage gliedert sich in zwei Bereiche mit unterschiedlichen Eigenschaften, diese sind Speicher und Durchgänge. Ein Beispiel für einen Speicher ist der Bahnsteig und für einen Durchgang die Türe eines Fahrzeuges. In der Regel sind die Speicher größer als die Durchgänge, daher stellen diese Durchgänge den wichtigsten Faktor für die Leistungsfähigkeit dar.¹⁵

Harris et al. 2014 hat z. B. umfangreiche Untersuchungen bezüglich des Einfluss der Türweite auf die Leistungsfähigkeit angestellt. Er kommt dabei zum Schluss, dass eine Türweite größer als 1.25m und kleiner als 1.5m einen positiven Effekt auf den Fahrgastwechsel bewirkt. Weiters weist er darauf hin, dass es trotz einer angemessenen Türweite durch Einflüsse der Speicher (z. B. Bahnsteig, Layout der Züge etc.) zu einer Abnahme der Geschwindigkeit, durch z. B. Fahrgäste die am Bahnsteig warten und den ungehinderten Ausstieg stören, kommt¹⁶.

¹¹Vgl. *Evolution of adult height over time 2020*

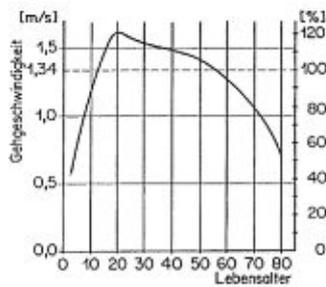
¹²Vgl. Weidmann 1995

¹³Vgl. Weidmann 1995, S.32ff

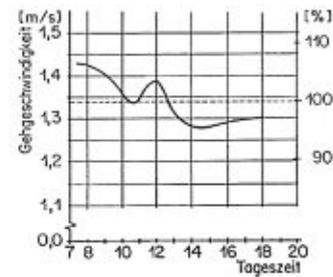
¹⁴Weidmann 1995, S.33ff

¹⁵Vgl. Weidmann 1995, S.6

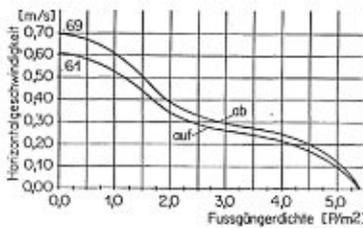
¹⁶Vgl. Harris et al. 2014, Abbildung 4



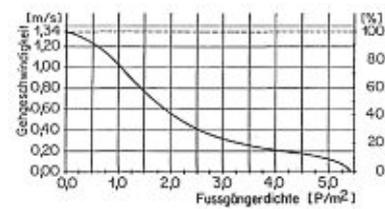
(a) Gehgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Alters



(b) Gehgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Tageszeit



(c) Gehgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Fußgängeranlage



(d) Gehgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Fußgängerdicke

Abb. 2.3: Gehgeschwindigkeitsabhängigkeiten¹⁴

2.1.5 Wahl der Gehspur

Beim Wechsel von Speicher zu Speicher müssen, wie in **Kap.2.1.4** erläutert, Engstellen passiert werden. Passagiere haben die Möglichkeit abhängig von physischen und psychischen Eigenschaften, sowie Umgebungsbedingungen mit den Durchgängen zu interagieren. Die Anzahl der Gehspuren hängt von der Breite der Durchgänge ab.¹⁷ Die *DIN 33402-2:2020-12: Ergonomie-Körpermaße des Menschen- Teil2: Werte 2020* gibt in Tabelle 11 (siehe **Abb.2.4**) die Verteilung der Schulterbreiten nach Altersgruppe und Geschlecht an. Das 95% Perzentil liegt in der zusammengefassten Altersgruppe 18-65 Jahren für Männer bei 525mm und für Frauen bei 485mm.

Je nach Türbreite und Schulterweite (siehe **Abb.2.4**) kann die Türe von einer oder mehreren Personen gleichzeitig passiert werden. Zur Schulterbreite muss durch die schwankende Bewegung beim Gehen oder der Mitnahme von Gepäck etwas auf den theoretischen Wert aufgeschlagen werden. Werden die Werte aus **Abb.2.4** mit Weidmann 1995 verglichen, ist zu sehen, dass für eine Person ohne Gepäck etwa 20 cm zum theoretischen Wert hinzugefügt werden müssen und damit liegt die reale Breite bei 73 cm¹⁹.

Mit den anzunehmenden Schulterbreiten der Passagiere und den baulichen Gegebenheiten der Türen bei Zügen ergeben sich folgende Konfigurationen²⁰ für das Ein- und Aussteigen:

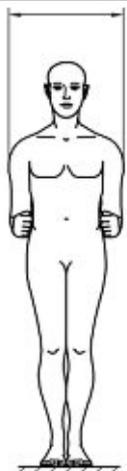
- Fahrgastwechsel Alleine: Fahrgast passiert die Türe alleine. Personen haben keine Abhängigkeit zu den Fahrgästen vor ihnen (siehe **Abb.2.5a**)
- Fahrgastwechsel parallel: Fahrgäste passieren gleichzeitig die Türe (siehe **Abb.2.5b**).

¹⁷Vgl. Weidmann 1995, S.36ff

¹⁸*DIN 33402-2:2020-12: Ergonomie- Körpermaße des Menschen- Teil2: Werte 2020*, Tabelle 11

¹⁹Vgl. Weidmann 1995, Tabelle 3

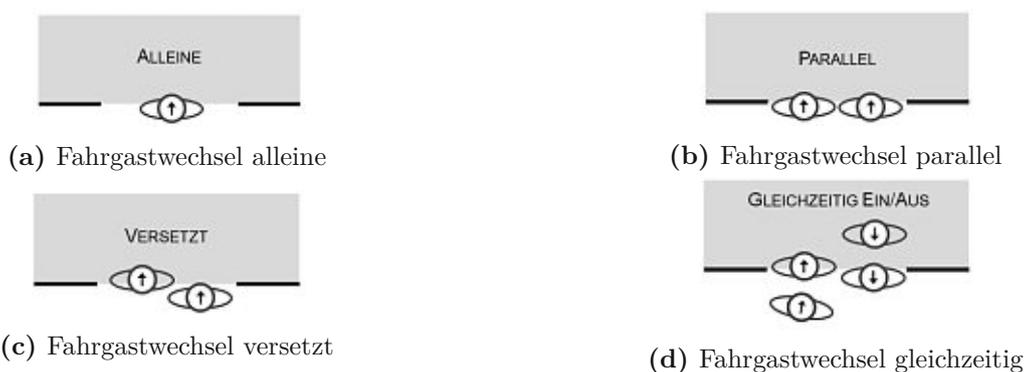
²⁰Vgl. Panzera 2014, S.15ff



Altersgruppen	Schulterbreite (bideltoid)					
	mm					
	Männer			Frauen		
	Perzentil					
Jahre	5	50	95	5	50	95
18-65	440	480	525	395	435	485
18-25	425	470	515	385	420	455
26-40	440	480	525	395	435	490
41-60	445	480	525	400	445	495
61-65	435	475	520	395	440	480

Abb. 2.4: Verteilung der Schulterbreite¹⁸

- Fahrgastwechsel versetzt: Fahrgäste benutzen beide zur Verfügung stehende Gehspuren etwas schräg versetzt zueinander (siehe Abb.2.5c).
- Fahrgastwechsel gleichzeitig: Es wird je eine Gehspur zum Ein- sowie zum Ausstieg benutzt.

Abb. 2.5: Fahrgastwechselkonfigurationen²¹

2.1.6 Passagierverteilung am Bahnsteig

Eigner 2014 hat die Verteilungen von Passagieren am Bahnsteig und im Zug untersucht. Er kommt dabei zum Schluss, dass die kritische Tür vor allem von der Infrastruktur abhängt. Die

²¹Panzera 2014, S.15ff

kritische Türe ist jene Türe, die während des Stationsaufenthaltes am längsten geöffnet bleiben muss. Wie in **Abb. 2.6** gezeigt wird, ist das die Türe, die am nächsten zum Hauptausgang (H) liegt²².

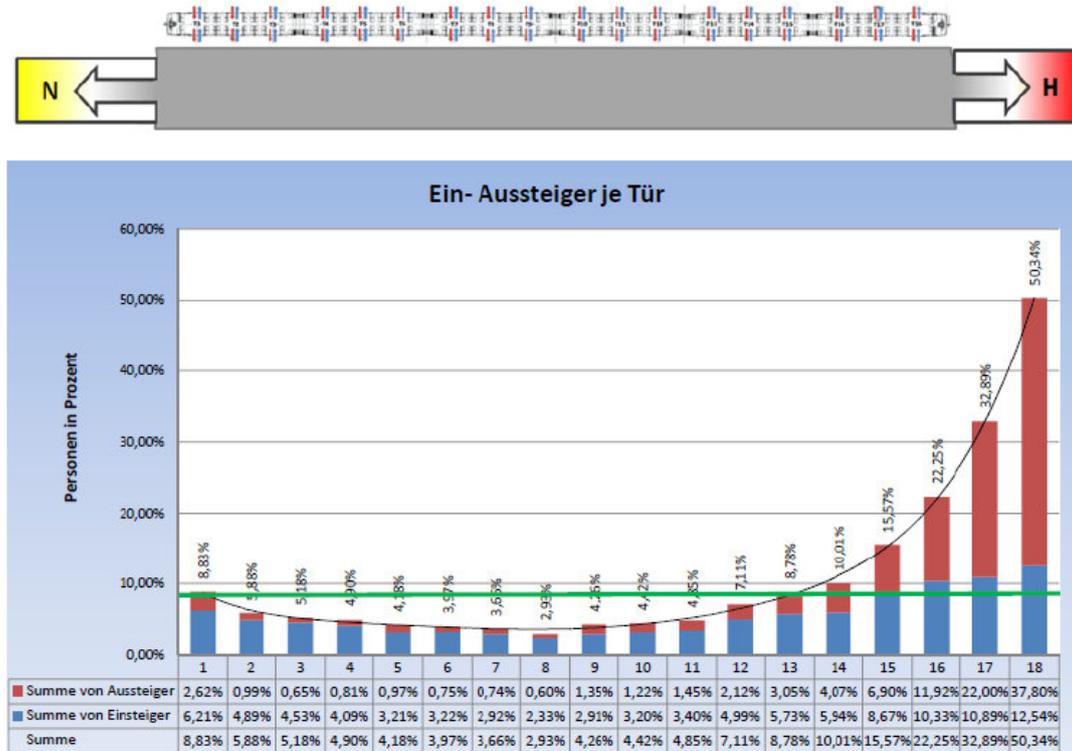


Abb. 2.6: Passagierverteilung am Bahnsteig²³

Fiebag 2019 referenziert sich auf die Untersuchungen von Kim et al. 2014 um dieses Phänomen zu beschreiben. Er stellt dabei fest, dass sich 76.6% der Fahrgäste bewusst für eine Türe entscheiden und zwar so, dass 69.9% den Fußweg an der Zielhaltestelle minimieren. Für 16.6% der Fahrgäste ist die Minimierung des Fußweges an der Zustiegshaltestelle entscheidend. Der Rest wählt die Türe so, dass der Komfort während der Fahrt maximiert wird (z. B. weniger dicht gepackt)^{24,25}.

Die Verteilung der Passagiere sowohl im Zug als auch am Bahnsteig ist somit hauptsächlich von dem Layouts des Bahnsteiges abhängig.

2.1.7 Passagierverteilung in U-Bahnzügen

Kubanik 2017 untersuchte die Fahrgastverteilung in urbanen Nahverkehrsmitteln. Die Daten wurden sowohl in Graz, als auch in Wien für unterschiedliche Fahrzeugtypen und zu unterschiedlichen Uhrzeiten aufgenommen. Für diese Arbeit werden nur die Daten für die Wiener U-Bahn (V- Wagen und T-Wagen) herangezogen. Der T-Wagen ist ausschließlich auf der Linie U6 im

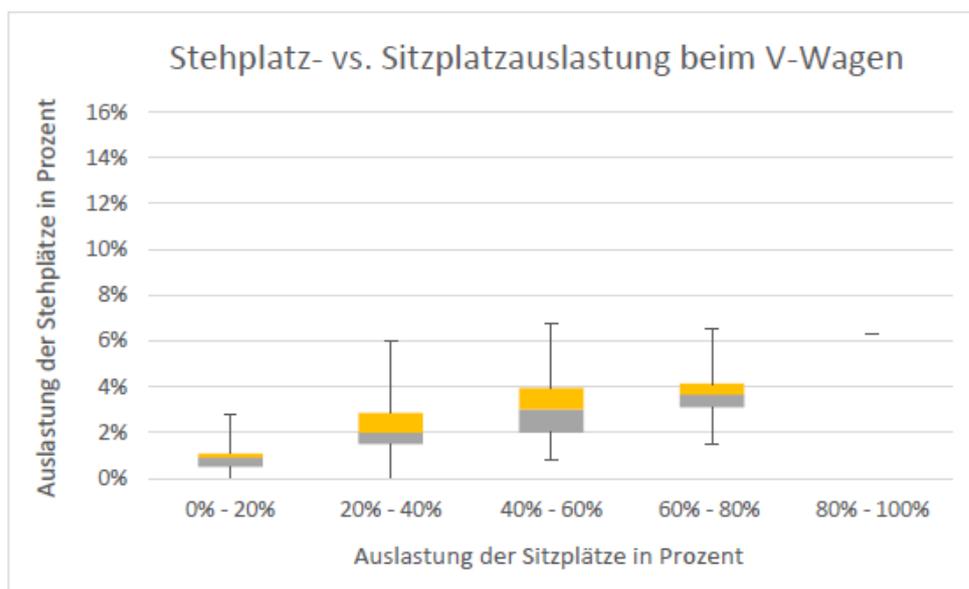
²²Vgl. Eigner 2014, S.23

²³Eigner 2014, S.23

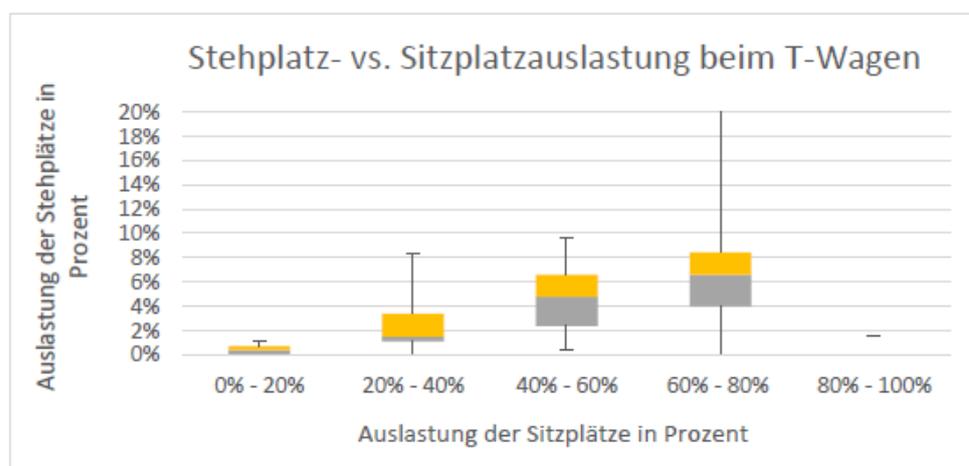
²⁴Vgl. Fiebag 2019, S.16ff

²⁵Vgl. Kim et al. 2014, S.15ff

Einsatz, während der V-Wagen auf den Linien U1, U2, U3 und U4 fährt²⁶.



(a) Stehplatz-Sitzplatz-V-Wagen



(b) Stehplatz-Sitzplatz-T-Wagen

Abb. 2.7: Stehplatz-Sitzplatz Verteilung²⁷

Wie in den **Abb.2.7a** und **Abb.2.7b** ersichtlich, ist die Stehplatzauslastung proportional zur Sitzplatzauslastung. Die Stehplatzauslastung stellt allerdings auch bei höheren Sitzplatzauslastungen einen geringen Anteil dar. Die meisten Fahrgäste sind bestrebt während der Fahrt einen Sitzplatz zu besetzen.

Für die Fahrgastverteilung im Stehbereich hat Kubanik 2017 diesen in drei Bereiche unterteilt. Dabei wurde festgestellt, dass beim V-Wagen über 80% der Fahrgäste im Einstiegsbereich bleiben und nur etwa 10% in den Gangbereich und weites nur 10% in den Portalbereich weitergehen. Beim T-Wagen zeichnet sich ein anderes Bild, hier verteilen sich die Passagiere aufgrund des Layouts

²⁶Vgl. Kubanik 2017, S.30

²⁷Kubanik 2017, S.30

des Zuges auf etwa 50% im Portalbereich und etwa 15% bzw. 35% im Gang- und Einstiegsbereich²⁸.

Bei der Untersuchung der Sitzplatzplatzverteilung im V- Wagen (siehe **Abb. 2.8**) stellt Kubanik 2017 fest, dass Einzelsitze in Fahrtrichtung besonders beliebt sind. Weiters auffällig ist, dass Fensterplätze Gangplätzen bevorzugt werden und die Auslastung zur Wagenmitte hin abnimmt. Dies kann wie in **Abb.2.6** mit der Verteilung der Passagiere am Bahnsteig und den Layouts der Stationen zusammenhängen, wurde aber im Zuge der Arbeit von Kubanik 2017 nicht validiert. Grün stellt Bereiche mit hoher, rot im Gegensatz dazu Bereiche mit niedriger Auslastung dar²⁹.

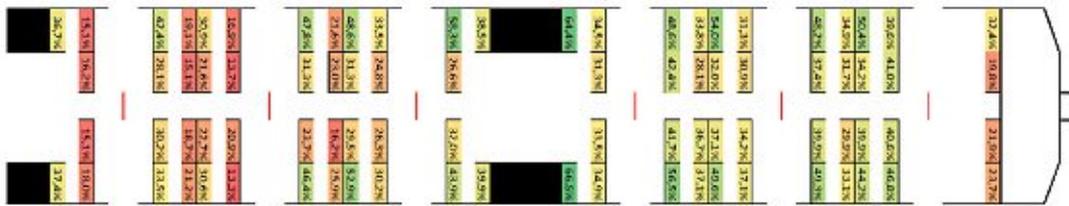


Abb. 2.8: Sitzplatzverteilung V-Wagen³⁰

Der T- Wagen zeigt bei den Untersuchungen von Kubanik 2017 ein völlig anderes Bild (siehe **Abb.2.9**): Hier ist die Auslastung in der Fahrzeugmitte am höchsten und nimmt zur Fahrerkabine und dem Heck des Fahrzeuges hin ab. Am beliebtesten sind aber trotzdem Einzelsitze in Fahrtrichtung, gleich wie im V-Wagen. Die höhere Auslastung der mittleren Waggons kann mit der Platzierung der Zu- und Abgänge an den Stationen zusammenhängen, wurde aber von Kubanik 2017 nicht untersucht³¹.



Abb. 2.9: Sitzplatzverteilung T-Wagen³²

2.1.8 Passagiermodell Zusammenfassung

Passagiere im öffentlichen Verkehr stellen keine homogene Gruppe dar. Sie unterscheiden sich, wie vorher beschrieben, sowohl in den physiologischen als auch den psychologischen Eigenschaften, bedingt durch z. B. die individuelle Bildung, Herkunft und Gewohnheiten. Wie Weidmann 1995 in seinen Untersuchungen gezeigt hat, haben diese Parameter einen zum Teil erhebliche Einfluss auf den Fahrgastwechsel³³.

²⁸Vgl. Kubanik 2017, S.59ff

²⁹Vgl. Kubanik 2017, S.59ff

³⁰Kubanik 2017, S.64

³¹Vgl. Kubanik 2017, S.65ff

³²Kubanik 2017, S.65

³³Vgl. Weidmann 1995, S.41ff

Ein Beispiel dafür ist bei Tomasz et al. 2014 zu finden. Sie definieren in ihrem Paper acht verschiedene Typen von Passagieren. Sie wollen damit eine passagierzentrierte Sichtweise bei der Gestaltung von öffentlichen Verkehrsmittel erreichen und dadurch eine Abkehr des bisher herrschenden Kosten- Effizienzparadigma schaffen, um in weiterer Folge mehr Menschen für den öffentlichen Verkehr zu begeistern. Diese Klassifizierung beruht auf 100 Beobachtungen an Bushaltestellen in Schweden, Bremerhaven und Rom. Ein Beispiel hiervon ist³⁴:

Harry ist 83 Jahre alt und verwendet eine Gehhilfe. Er betritt den Bus über den zweiten Eingang um die Gehhilfe anschließend fixieren zu können. Er hat keine Sitzplatzpräferenz bezüglich der Orientierung (Fahrtrichtung, gegen die Fahrtrichtung). Wenn ein Fensterplatz frei ist, der Gangplatz aber nicht, bittet er den Passagier zu rücken. Falls alle Sitzplätze belegt sind, bittet er andere Fahrgäste ihm Platz zu machen. Falls der ankommende Bus fast voll ist, wartet er auf den nächsten³⁵.

2.2 Simulation von Fußgängern

In diesem Abschnitt werden die gängigsten Modellbildungsmethode zur Modellierung von Fußgängern beschrieben. Grundsätzlich muss zwischen drei Modelltypen unterschieden werden:

- makroskopische Modelle
- mesoskopische Modelle
- mikroskopische Modelle

2.2.1 Makroskopische Modelle

Makroskopische Modelle werden von Twarogowska et al. 2014 in ihrem Paper wie folgt zusammengefasst: Fußgängerflüsse werden als ein kontinuierliches Medium mit einer durchschnittlichen Dichte und Geschwindigkeit angesehen. Die verwendeten partiellen Differentialgleichungen werden dabei aus der Fluidmechanik adaptiert. Beispiele dafür sind die Navier- Stokes- Gleichung und die Boltzmann- Gleichung aus der Gasdynamik³⁶.

Probleme bei diesen Modellen können laut Bruckner 2014 bei einer zu geringer Dichte des Personenstromes auftreten. Weiters kann die Navier- Stokes- Gleichung nur näherungsweise gelöst werden, eine analytische Lösung ist nicht bekannt³⁷.

Makroskopische Modelle beschreiben immer das Verhalten von Personengruppen und nicht das Verhalten des Individuums.

2.2.2 Mesoskopische Modelle

Das mesoskopische Modell ist eine Mischform von makroskopischen- und mikroskopischen Modellen. Sie stellen dabei einen Kompromiss zwischen Komplexität aus den mikroskopischen Modellen und der schnellen Berechenbarkeit von makroskopischen Modellen dar, ohne einen allzu großen

³⁴Vgl. Tomasz et al. 2014, S.1ff

³⁵Vgl. Tomasz et al. 2014, S.3

³⁶Vgl. Twarogowska et al. 2014, S.477f

³⁷Vgl. Bruckner 2014, S.8f

Fehler in Kauf nehmen zu müssen. Tordeux et al. 2018 zeigt in seinem Paper ein Beispiel für so ein Modell und vergleicht die Rechenzeiten der unterschiedlichen Ansätze. Wie in **Abb. 2.10** zu sehen ist, folgt die Zunahme der Rechenzeit bei niedrigeren Fußgängerdichten den mikroskopischen Modellen. Bei einer relativen Fußgängerdichte von 0.5 wird das Maximum erreicht. Bei Erhöhung der Fußgängerdichte nimmt die Rechenzeit wieder ab und nähert sich der des makroskopischen Modells an³⁸.

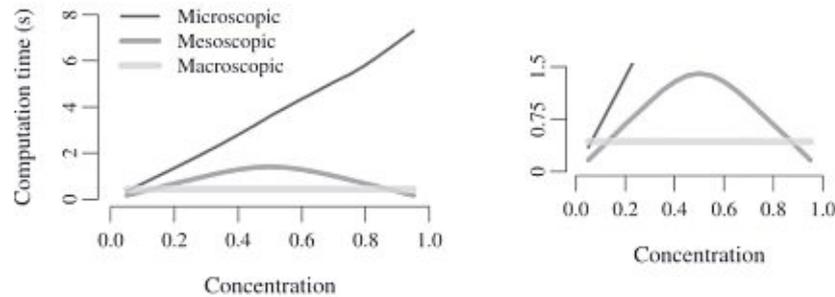


Abb. 2.10: Vergleich mesoskopisches Modell³⁹

2.2.3 Mikroskopische Modelle

Im Gegensatz zu den makroskopischen Modellen, wird bei mikroskopischen Modellen der Fokus auf das Individuum mit seinen individuellen Eigenschaften gelegt. Diese Eigenschaften betreffen nicht nur Alter, Geschlecht, Gewicht und Körpergröße, sondern auch die Wechselwirkung zwischen den Personen. Die wichtigsten Vertreter der mikroskopischen Modelle im Zusammenhang mit dieser Arbeit sind:

- Social Force Model
- Zelluläre Automaten

Diese werden nachstehend im Detail beschrieben.

2.2.4 Social Force Model

Das Social Force Model (siehe **Glg. 2.1**) wurden von Helbing und Molnar 1998 am Ende der 1990 Jahre für den Bereich der Fußgängersimulation entwickelt. Das Grundelement stellt dabei der Schwerpunktsatz nach Newton dar⁴⁰:

$$\frac{d\vec{w}_\alpha}{dt} = \vec{F}_\alpha(t) + fluctuation \quad (2.1)$$

³⁸Vgl. Tordeux et al. 2018, S.144ff

³⁹Tordeux et al. 2018, S.146

⁴⁰Vgl. Helbing und Molnar 1998, S.1ff

mit

$$\begin{aligned} \vec{F}_\alpha(t) = & \underbrace{\vec{F}_\alpha^0(\vec{v}_\alpha, \vec{v}_\alpha^0 \vec{e}_\alpha)}_I + \underbrace{\sum_\beta \vec{F}_{\alpha\beta}(\vec{e}_\alpha, \vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta)}_{II} \\ & + \underbrace{\sum_B \vec{F}_{\alpha B}(\vec{e}_\alpha, \vec{r}_\alpha - \vec{r}_B)}_{III} + \underbrace{\sum_i \vec{F}_{\alpha i}(\vec{e}_\alpha, \vec{r}_\alpha - \vec{r}_i, t)}_{IV} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Das Modell setzt sich aus folgenden Termen zusammen:

- I *Beschleunigungs-Term*: Ein Individuum α versucht sich in eine bestimmte Richtung \vec{e}_α mit einer gewissen Geschwindigkeit \vec{v}_α^0 zu bewegen. Seine tatsächliche Geschwindigkeit \vec{v}_α versucht es an die gewünschte anzupassen. Das Individuum möchte eine bestimmte Destination \vec{r}_α^0 möglichst komfortabel und ohne Umwege erreichen.
- II *Abstoßender-Term*: Die Bewegung eines Individuums α wird von anderen Fußgängern beeinflusst. Personen fühlen sich zunehmend unwohler, je mehr eine andere Person in ihren persönlichen Bereich eindringt. Dieses resultiert in einer abstoßenden Kraft gegenüber anderen Personen β .
- III *Abstoßender-Term*: Individuen α halten einen gewissen Abstand gegenüber natürlichen Grenzen B . Diese Grenzen können z. B. Straßen, Mauern oder Hindernisse sein. Mit kleiner werdendem Abstand fühlen sich Personen zunehmend unwohler. So erzeugen natürliche Grenzen eine abstoßende Kraft.
- IV *Anziehender-Term*: Individuen α werden von anderen Personen i angezogen. Diese Personen können z. B. Freunde oder Verwandte sein.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass das Modell eine gute Näherung des Fußgängerverhaltens in Interaktion mit seiner Umgebung wiedergibt. Für die Simulation und damit des Lösens der Gleichungen ist allerdings zu beachten, dass es sich bei **Glg.2.1** um nichtlineare gekoppelte Langevin- Gleichungen handelt⁴¹. Zahlreiche Weiterentwicklungen sind seit der erst Publikation des Social Force Modells hinzugekommen. Einige sollen nachstehend erwähnt werden:

Johansson et al. 2007 beschreibt in seinem Paper eine Möglichkeit das Social Force Model mittels der Video- Tracking- Methode zu kalibrieren. Dabei werden von einer Kamera die tatsächlichen Trajektorien einer Person aufgenommen und mit denen durch das Modell vorhergesagten verglichen. Der dabei entstehende relative Abstandsfehler wird dann als Maß für die Kalibrierung herangezogen⁴².

Zhang et al. 2018 hat das Social Force Model um eine Layer erweitert, in dem er das Verhalten von Personen im Falle einer Evakuierung ergänzt hat. Hier geht er davon aus, dass nachdem sich eine Gruppe mit einem Gruppenleiter gebildet hat die Evakuierung schneller und reibungsloser stattfinden kann⁴³.

⁴¹Vgl. Helbing und Molnar 1998, S.7

⁴²Vgl. Johansson et al. 2007, S.3ff

⁴³Vgl. Zhang et al. 2018, S.1109ff

2.2.5 Pedestrian Dynamics Modell

Pedestrian Dynamic Modelle bauen auf Zellulären Automaten auf (siehe Kap:2.2.5). Dabei wird die Geometrie der Räume in diskrete Bereiche unterteilt (siehe **Abb.2.11**). Die Größe der Zellen muss an die Personen, die sich in dem Modell bewegen, angepasst werden. In jedem Zeitschritt $t \rightarrow t + 1$ können sich die Personen auf eine andere freie Zelle weiterbewegen.

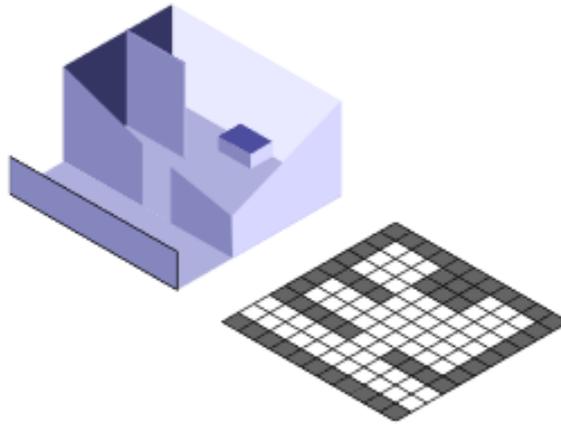


Abb. 2.11: Pedestrian Dynamics⁴⁴

Zelluläre Automaten

sind von John von Neumann und Stanislaw Ulam in den 40er Jahren des letzten Jahrhunderts entwickelt worden. Der Zustand jeder Zelle ändert sich mit jedem diskreten Zeitschritt t_k zu t_{k+1} in Abhängigkeit zu den umliegenden Zellen⁴⁵. Bruckner 2014 definiert die Eigenschaften von zellulären Automaten in seiner Arbeit wie folgt:

- Zellanordnung und deren Geometrie R:
Abhängig vom Anwendungsbereich und der Dimension des Automaten, kann die Anordnung der Zellen variieren (siehe **Abb. 2.12**)



Abb. 2.12: Zell Geometrie⁴⁶

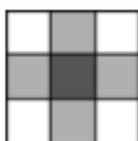
- Nachbarschaft der Zellen N: Der Zustand der Zelle hängt von den benachbarten Zellen ab. Welche Zellnachbarn Einfluss haben, hängt von der Geometrie und dem Modell ab (siehe **Abb. 2.13**)

⁴⁴Bruckner 2014, S.12

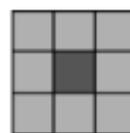
⁴⁵Vgl. Bruckner 2014, S.10

⁴⁶Bruckner 2014, S.11

⁴⁷Bruckner 2014, S.11



(a) Von-Neumann-Nachbarschaft



(b) Moore-Nachbarschaft

Abb. 2.13: Nachbarschaften⁴⁷

- Zustandsmenge Q :
Die Zustandsmenge Q gibt alle möglichen Zustände an, die eine Zelle annehmen kann
- Überföhrungsfunktion δ :
Die Überföhrungsfunktion δ definiert in Abhängigkeit des Zustands der Nachbarzellen und der Zelle selbst zum Zeitpunkt t_k den neuen Zustand der Zelle zum Zeitpunkt t_{k+1}

Floor Fields

Wie sich eine Person im Raum von Zelle zu Zelle bewegt, wird durch einen der Zelle eingeschriebenen Wert bestimmt. Jede Zelle im Raum besitzt aufgrund ihrer Position oder Funktion einen numerischen Wert (siehe **Abb.2.14**).

4	4	4	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	3	3	3
3	2	2	2	2	2	2	3
3	2	1	1	1	1	2	3
			0	0			

Abb. 2.14: Floor Field⁴⁸

Grundsätzlich muss zwischen folgenden Floor Fiels unterschieden werden:⁴⁹

- **Static Floor Fields:** hier bekommt jedes Feld einen statischen Wert, der sich während der Simulation nicht ändert. Dieser kann z. B. proportional zum Abstand des Zieles sein.
- **Dynamic Floor Field:** der Wert der Zelle wird mit jedem Zeitschritt $t \rightarrow t + 1$ gelesen, aktualisiert und in die Zelle geschrieben. Damit wird nicht nur die momentane Anwesenheit einer Person in einer Zelle signalisiert, sondern es kann auch durch diffusive Terme die vor kürzliche Präsenz abgebildet werden.

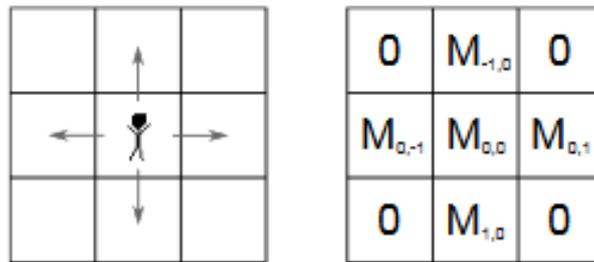
Übergangsmatrix

Werden die in dem **Kap. 2.2.5** gesammelten Erkenntnisse zusammengefasst, hat jede Entität die Möglichkeit sich in vier (bei der Von- Neumann- Nachbarschaft) beziehungsweise acht (bei der Moor- Nachbarschaft) Richtungen zu bewegen oder sich nicht zu bewegen und auf der Stelle zu verharren. Diese Entscheidungsfindung ergibt für die Von-Neumann-Nachbarschaft eine 3x3 Matrix (siehe **Abb.2.15**).

⁴⁸Bruckner 2014, S.13

⁴⁹Vgl. Bruckner 2014, S.13ff

⁵⁰Bruckner 2014, S.15

Abb. 2.15: Wahrscheinlichkeitsmatrix⁵⁰

Die Wahrscheinlichkeitswerte werden mit der **Glg. 2.3** ermittelt⁵¹

$$p_{ij} = N * \exp(k_D * D_{ij}) * \exp(k_S * S_{ij} * p_I(i, j) * p_w) \quad (2.3)$$

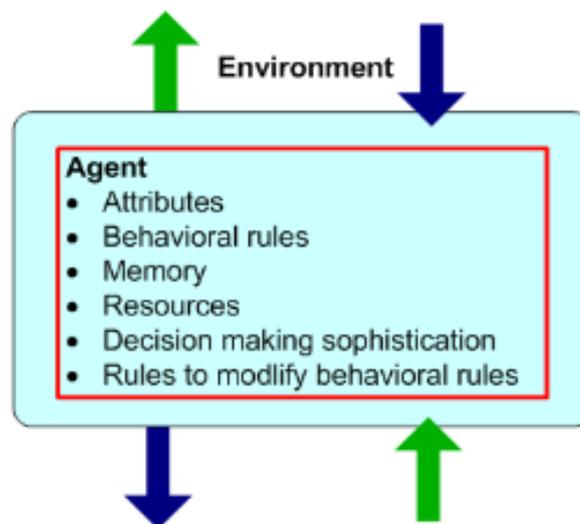
mit

$$D_{ij} = (1 - \alpha)(1 - \delta)D_{ij}^t + \frac{\alpha(1 - \delta)}{4}(D_{i+1j}^t + D_{i-1j}^t + D_{ij+1}^t + D_{ij-1}^t) \quad (2.4)$$

In **Glg.2.3** werden die Werte für das Dynamic Floor Field mit D (siehe **Glg.2.4**) und für das Static Floor Field mit S bezeichnet. k_s und k_D sind die zugehörigen Gewichtungsfaktoren. N stellt den Normalisierungsfaktor dar, p_I und p_w die Faktoren für die Trägheit der Person und die abstoßende Wirkung von Wänden.

2.2.6 Agent Based Modeling

Die agentenbasierte Modellierung hat in den letzten 20 Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Macal und North 2009 beschreibt einen Agenten als Subjekte mit heterogene, vielfältigen und dynamische Attributen und Verhaltensregeln der mit seiner Umgebung interagiert (siehe **Abb.2.16**). Weiters stellt er aber auch fest, dass es keine einheitliche Definition eines Agenten in der Literatur gibt⁵².

Abb. 2.16: Agent⁵³

⁵¹Vgl. Bruckner 2014, S16

⁵²Vgl. Macal und North 2009, S.87ff

Borshchev 2013 fasst in seinem Buch *The Big Book of Simulation Modelling* die agentenbasierte Simulation wie folgt zusammen⁵⁴:

- Agenten unterscheiden sich von Zellulären Automaten: Agenten müssen nicht im diskreten Raum existieren. In den meisten Fällen ist überhaupt kein Raum vorhanden oder er ist kontinuierlich (z. B. Landkarten oder Gebäude).
- Agentenbasierte Modellierung ist nicht synchron zeitdiskret, d.h. Agenten überprüfen nur ihre Zustände, wenn es notwendig ist.
- Agenten müssen nicht notwendigerweise Menschen darstellen. Agenten können ebenso Fahrzeuge, Equipment, ein Projekt oder eine Idee sein.
- Agenten können absolut passiv auftreten. Ein Beispiel dafür kann eine Stromleitung darstellen. Diese kann z. B. mit Instandhaltungsplänen, Kosten und Versagensszenarien verbunden werden.
- Es können viele oder wenige Agenten im Model existieren und diese können alle gleich oder unterschiedlich sein.
- Agenten müssen nicht zwingen miteinander interagieren. Die Modelle hängen nur von persönlichen Parametern ab.

Kitzler 2016 führt dazu beispielhaft ein Lieferkettenmodell an. Dieses besteht aus fünf Agenten die miteinander interagieren. Kunden mit Einzelhändler, Einzelhändler mit einem oder mehreren Großhändler, Großhändler mit einem oder mehreren Lieferanten und schließlich Lieferanten mit den Fabrikanten (siehe **Abb. 2.17**)⁵⁵.

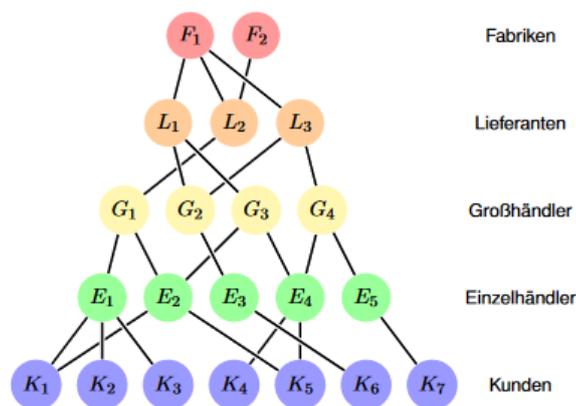


Abb. 2.17: Lieferkettenmodell⁵⁶

2.3 Monte Carlo Simulation

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der Monte Carlo Simulation erläutert, da diese Methode bei der Variation der Parameter in der Simulation verwendet wird (siehe 4.2.3.2).

⁵³Macal und North 2009, S.88

⁵⁴Vgl. Borshchev 2013, S.13ff

⁵⁵Vgl. Kitzler 2016, S.11

⁵⁶Kitzler 2016, S.11

Die Monte Carlo Methode beschreibt eine Gruppe von numerischen Methoden, die mit Hilfe von Zufallszahlen eine approximative Lösung liefern und zur Simulation verschiedener Prozesse dienen.⁵⁷

Den Kern der Monte Carlo Simulation bildet das Erzeugen von Zufallsgrößen $f(x)$. Die Erzeugung der Zufallszahlen für einen bestimmten Einsatzzweck kann über die Verteilungsdichte $\phi(x)$ beeinflusst werden. Das Theorem der zentralen Monte Carlo Rechnung ist in 2.5 definiert.

$$\langle f(x) \rangle = \int f(x)\phi(x) dx \approx \frac{1}{N} \sum_i^N f(x_i) \pm \sqrt{\frac{\langle f(x)^2 \rangle - \langle f(x) \rangle^2}{N}} \quad (2.5)$$

Es sei nur angemerkt, dass wirkliche Zufallszahlen nicht mit einem Computer erzeugt werden können. Die Zufallsgeneratoren wiederholen die Sequenzen an Zahlen nach einer gewissen Zeit. Das Ziel ist es somit, den Abstand zwischen den Sequenzen möglichst groß zu machen.⁵⁸

⁵⁷Vgl. Theis und Kernbichler 2021, S.9ff

⁵⁸Vgl. Theis und Kernbichler 2021, S.9ff

Kapitel 3

Software

Dieses Kapitel widmet sich der Auswahl der für die Passagierflusssimulation im Kontext des Ein- und Aussteigens von U-Bahnzügen am Markt verfügbaren Software. Diese wurden gesichtet und Fragen mit den Herstellern geklärt. Durch die Auswertung mittels einer Bewertungsmatrix (siehe **Tab. 3.1**) wurden anschließend die drei am besten geeigneten Softwareprodukte im Detail untersucht. Nach einer Einarbeitungszeit sind, wenn programmtechnisch möglich, verschiedene Szenarien für den Ein- und Ausstieg definiert und simuliert worden.

3.1 Auswahl der Software

Für die Auswahl der Software ist im Internet recherchiert und nach folgenden Schlagwörtern gesucht worden:

- Pedestrian Dynamics
- Fußgänger Simulation
- Social Force
- Pedestrian Simulation
- Public Transport Simulation
- Passenger Flow Simulation

Nach Sichtung der Herstellerwebsites ist eine Vorauswahl getroffen worden. Für zusätzliche Informationen, bzw. wenn diese auf den Websites oder Benutzerhandbüchern nicht ersichtlich, sind die Hersteller kontaktiert worden und die folgende Punkte geklärt worden:

- Social Repulsive Force Treatment
- Speciality of the Software
- Validation Method of the Software
- Adapitivity for the Vehicle- Platform Interface
- Licence Costs
- Support / Tutorials / Training
- CAD Exchange Formats
- Last Software Update

Die gefundenen und ausgewählten Softwareprodukte sind in **Tab. 3.1** verzeichnet. Die Information zur Bewertung wurden den Websites^{59 60 61 62 63 64 65} als auch, wo vorhanden, den Benutzerhandbüchern^{66 67 68} entnommen. Ein “–“ bedeutet in der **Tab. 3.1**, dass entweder keine Information gefunden wurde oder dass diese Funktion für die Simulation nicht zur Verfügung stand.

Kurz zusammengefasst sind die Kriterien folgendermaßen zu interpretieren:

- **Kulturen:** Unter Kulturen sind die demographischen Gegebenheiten und die sozialen Konventionen der einzelnen Länder zu verstehen.
- **Alter:** Alter bezieht sich auf die Altersverteilung in den jeweiligen Ländern.
- **Beeinträchtigungen:** Kann die Software z. B. Barrierefreiheit im Zusammenhang mit einer Rollstuhlnutzung simulieren?
- **Gruppen:** Können in der Software Gruppen gebildet und das Verhalten dieser abgebildet werden z. B. Schüler, Freunde, Touristen, Pendler, etc.?
- **Anstellen:** Ist es möglich, das Anstellen bei einem Ticketschalter oder dem U-Bahneingang umzusetzen?
- **Gepäck:** Können die Personen mit unterschiedliche Gepäckstücken und den damit verbundenen Bewegungseinschränkungen bzw. der damit verbundenen Platzzunahme modelliert werden?
- **Evakuierung:** Kann eine Evakuierung simuliert werden? Welche Regulatorien, bzw. Standard werden angewendet?
- **CAD Import:** Welche CAD- Formate sind für den Import kompatibel?
- **Updates:** Wie oft werden Updates, Verbesserungen und Erweiterungen der Software gemacht? Wie ist der User Support bei Problemen?
- **Tutorials:** Wie ist der autodidakte Lernerfolg der Software? Müssen Schulungen in Anspruch genommen werden?
- **Kosten:** Wie hoch sind die Kosten für die Software? Müssen jährlich Lizenzgebühren entrichtet werden?

Nach Berücksichtigung der erwähnten Kriterien wurden die Softwareprodukte **Thunderhead Engineering- Pathfinder**, **PTV- Viswalk & Vissim** und **Anylogic** ausgewählt. Anschließend wird ein tieferer Einblick in die gewählte Software gegeben.

⁵⁹<https://www.thunderheadeng.com>, 15.01.2021

⁶⁰<https://company.ptvgroup.com>, 15.01.2021

⁶¹<https://www.anylogic.com>, 15.01.2021

⁶²<https://www.bentley.com>, 15.01.2021

⁶³<https://www.oasys-software.com>, 15.01.2021

⁶⁴<https://www.incontrolsim.com>, 15.01.2021

⁶⁵<https://www.simwalk.com>, 15.01.2021

⁶⁶Vgl. Borshchev 2013

⁶⁷Vgl. *Technical Reference* 2017

⁶⁸Vgl. *User Manual* 2020

Tab. 3.1: Software

Kriterium	Pathfinder	PTV- Viswalk	Anylogic	Legion Simula- tor	Oasys Mass- Motion	Incontrol	Simwalk
Kulturen	+	+	+	+	+	+	+
Alter	+	+	+	+	+	+	+
Beeinträchtigungen	+	+	+	+	+		+
Gruppen	+	-	+	-	-	-	-
Anstellen	+	+	+	+	+	+	+
Gepäck	+	+	+	+	-	-	+
Evakuierung	+	+	+	+	-	-	+
CAD Import	DXF, DWG, GIF, JPG, PNG	DWG, BIM, JPG, PNG, EPS, BING, OSM	DXF, PNG, JPG, BMP, BIM, DAE	DNG, DWG, DXF	DWG, Sketch- up, JPG, PNG	DWG, BIM, Ci- tyGML	DXF, PNG, BMP, JPG
Updates	ca. alle 2 Monate	ca. jährlich	ca. 2 Monate	-	ca. 2 Jahre	jährlich	ca. 2 Jahre
Tutorials	Video, Hand- buch	Video, Hand- buch	Video, Hand- buch	Learn Server	Video	Video	Handbuch
Kosten	1900€/Jahr	-	16.800€	-	-	-	4800€

3.2 PTV- Vissim & Viswalk

3.2.1 Allgemeines

PTV- Vissim ist ein mikroskopisches Simulationsprogramm für die Modellierung von multimodalen Beförderungsvorgängen. Diese können private Transporte (z. B. mit dem PKW) oder der öffentliche Schienen- und Straßenverkehr sein. Um Personenflüsse in das Modell implementieren zu können, ist das Zusatzpaket Viswalk notwendig.⁶⁹

Viswalk basiert auf dem Social Force Model von Helbing und Molnar (siehe **Kap. 2.2.4**). Dr. Dirk Helbing hat in Zusammenarbeit mit PTV das Social Force Model erweitert und validiert. Dabei sind die makroskopischen Parameter berechnet und an empirische Daten angepasst worden. Die Simulation von mikroskopischen Effekten, wie z. B. Warteschlangen und Personenbewegungen mit Gegenstrom, sind ebenfalls möglich.

PTV unterscheidet bei der Fußgängersimulation zwischen zwei Ansätzen:

- **Helbing:** Fußgänger können sich frei im Modell in den räumlichen Dimensionen bewegen. Ihre Trajektorien sind nicht im Vorhinein festgelegt, sondern werden vom Modell berechnet.⁷⁰

⁶⁹Vgl. *User Manual 2020*, S.908ff

⁷⁰Vgl. *User Manual 2020*, S.912

- **Wiedemann:** Fußgänger können sich nicht frei im Modell und in den räumlichen Dimensionen bewegen. Die Bewegung ist im Vorhinein von Trajektorien über die Inputdaten bestimmt und resultieren nicht aus der Simulation.⁷¹

3.2.2 Parameter

Standardmäßig stellt PTV- Viswalk vier Fußgängertypen zur Verfügung. Diese sind Mann, Frau, Frau mit Kind und eine Person im Rollstuhl. Die Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit des Geschlechts und Alter, sowie der Umgebung (z. B. Fußgänger auf einem Schiff- IMO) kann nach **Abb. 3.1** gewählt werden. **Abb. 3.1** stellt nur einen Auszug aller Möglichkeiten dar, die PTV bietet.

No.	Name	Description
1026	IMO-M M1	Speed distribution for male pedestrians on ships with reduced mobility, age class over 50. International Maritime Organization
1027	IMO-F M1	Same as IMO-F >50 , but for females
1028	IMO-M M2	Speed distribution for male pedestrians on ships with severely reduced mobility, age class over 50. International Maritime Organization
1029	IMO-F M2	Same as IMO-F >50 , but for females
1040	Fruin 1	Speed distribution according to Fruin, J.J. : In: Pedestrian Planning and Design, 1971, PEDESTRIAN PLANNING AND DESIGN
1041	Fruin 2	Speed distribution according to Fruin, J.J. : In: Pedestrian Planning and Design, 1971, PEDESTRIAN PLANNING AND DESIGN
1042	Predt-Milinski	Speed distribution for pedestrians in buildings. Predtechenski, V.; Milinski, A. : Planning for Foot Traffic Flow in Buildings. Amerino Publishing Co., New Delhi, 1978
1043	Stairs Kretz 1	Speed distribution based on measurements of the upward speed of pedestrians at the top end of long stairs. Kretz, T.; Grünebohm, A.; Kessel, A.; Klüpfel, H.; Meyer-König, T. and Schreckenberg, M. : Upstairs walking speed distributions on a long stairway . In: Safety Science 46(1) p. 72-78. 2008.
1044	Stairs Kretz 2	Speed distribution based on measurements of the upward speed of pedestrians at the top end of long stairs. Kretz, T.; Grünebohm, A.; Kessel, A.; Klüpfel, H.; Meyer-König, T. and Schreckenberg, M. : Upstairs walking speed distributions on a long stairway . In: Safety Science 46(1) p. 72-78. 2008.
1045	Airport - S.B. Young	Speed distribution for pedestrians in airports. Young, S.B. : journal article: Evaluation of Pedestrian Walking Speeds in Airport Terminals and full papers: Evaluation of Pedestrian Walking Speeds in Airport Terminals .

Abb. 3.1: PTV Geschwindigkeitsverteilung⁷²

Weiters kann das Social Force Modell für jeden Fußgängertyp über die folgenden Parameter beeinflusst werden:⁷³

- τ : steht für die Relaxationszeit zwischen der gewünschte Geschwindigkeit und der Momentangeschwindigkeit
- λ : Die Menge an Anisotropie der Kräfte, sodass Phänomene im Rücken der Person einen nicht so großen Einfluss besitzen wie jene vor ihr.
- $A_{soc-isotropic}$ und $B_{soc-isotropic}$: Definieren gemeinsam mit λ eine der zwei Kräfte zwischen den Personen.

⁷¹Vgl. *User Manual* 2020, S.912

⁷²*User Manual* 2020, S.922

⁷³Vgl. *User Manual* 2020, S.916ff

- $A_{soc-mean}$, $B_{soc-mean}$ und VD : A definiert die Größe und B den üblichen Einflussbereich der Social Force zwischen zwei Fußgängern. VD definiert, ob die Relativgeschwindigkeiten zwischen zwei Personen berücksichtigt werden oder nicht.
- *noise*: Je größer dieser Parameterwert ist, desto höher ist der Anteil der Zufallskraft, die einer Person hinzugefügt wird, wenn sie sich für eine gewisse Zeit unterhalb ihrer gewünschten Geschwindigkeit bewegt.
- $react_{to-n}$: die Gesamtkraft für einen Fußgänger wird nur durch die n nächsten Personen bestimmt.
- $queue_{order}$: Besteht aus zwei Parametern, die die Form der Warteschlange bestimmen. Je höher der Wert, desto geradliniger ist die Warteschlange.

3.2.3 Modellierung

Die Modellbildung erfolgt über *Network object types*. Mit diesen Elementen wird die Modellumgebung für die Personen und deren Verhaltensweisen definiert. Die wichtigsten Elemente sind in **Abb. 3.2** zu sehen.

Symbol	Network object type
	Areas
	Obstacles
	Ramps & Stairs
	Elevators
	Pedestrian Inputs
	Pedestrian Routes

Abb. 3.2: PTV Pedestrian Object Types⁷⁴

Mit dem *Area* Object wird die Fläche, auf der sich die Fußgänger bewegen können, definiert. Es stehen dafür Rechteck, Kreis und Polygon als Geometrieelemente zur Verfügung. *Obstacles* sind für die Definition von Wänden oder Hindernissen im Modellraum verantwortlich. Diese können wieder als Rechteck, Kreis oder Polygon definiert werden. *Ramps & Stairs* ist für das Einfügen von Stiegen, Rampen oder Fahrtreppen verantwortlich. Dazu werden mindestens zwei Ebenen im Modell miteinander verbunden. Mit *Escalators* werden Aufzüge und Fahrtreppen definiert, sie haben im Gegensatz zu *Ramps & Stairs* eine spezifische Richtung. Bei *Pedestrian Inputs* handelt es sich um den Ort, an dem die Fußgänger mit einer gewissen Rate (z. B. Personen pro Stunde) das Modell betreten. Falls spezielle Routen definiert werden müssen, kann das mit *Pedestrian Routes* geschehen.

3.3 Anylogic

3.3.1 Allgemeines

Anylogic ist eine Simulationsumgebung basierend auf der Programmiersprache Java, die verschiedene Modellieransätze integriert hat. Es wird, je nach Abstraktionslevel, in drei Methoden

⁷⁴ *User Manual* 2020, S.923

unterschieden (siehe **Abb. 3.3**). Diese können jeweils getrennt oder in Kombination für die Simulation verwendet werden.

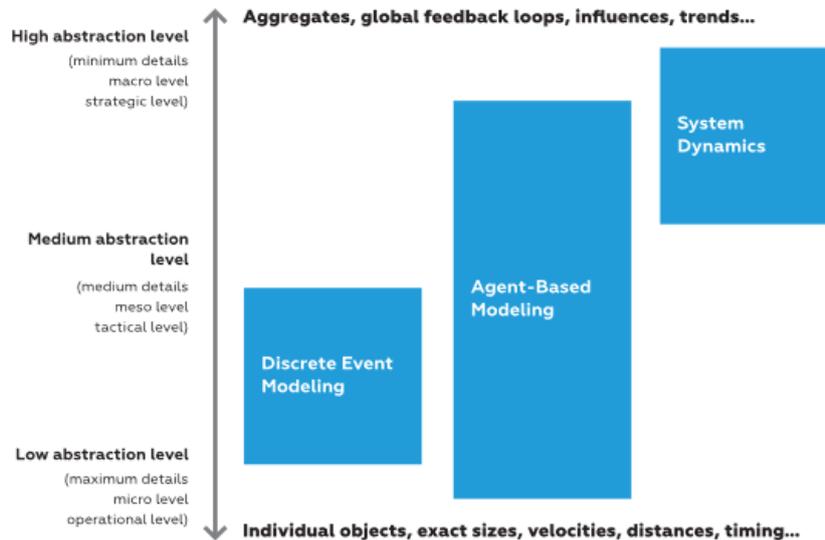


Abb. 3.3: Anylogic Methodiken⁷⁵

- **System Dynamics:**

Beim System Dynamics Ansatz wird ein hoher Grad an Abstraktionslevel (siehe **Abb. 3.3**) des Modells vorausgesetzt. Er wird hauptsächlich zur strategischen Entscheidungsfindung verwendet. Das Systemverhalten wird mittels Speicher- und Ablaufeinheiten, die über Feedbackschleifen miteinander interagieren, abgebildet (siehe **Abb. 3.4**).⁷⁶⁷⁷

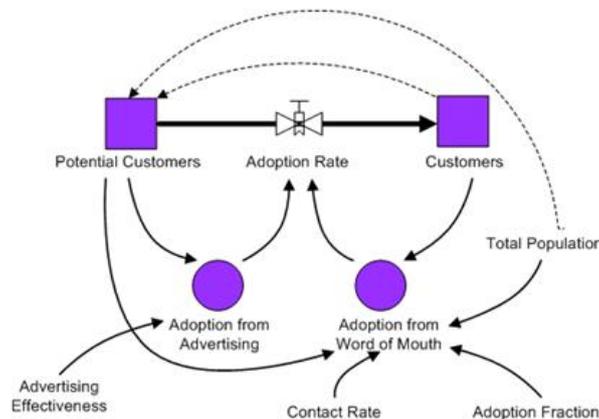


Abb. 3.4: Anylogic System Dynamics⁷⁸

System Dynamics findet vor allem Anwendung bei der Simulation zur Strategieentwicklung, Marketing, Makroökonomie und ökologischen bzw. sozialen Systemen.⁷⁹

⁷⁵ Anylogic 2020c, S.6

⁷⁶ Vgl. Anylogic 2020a, System Dynamics Modeling

⁷⁷ Vgl. Anylogic 2020c, S.4

⁷⁸ Anylogic 2020a, System Dynamics Modeling

⁷⁹ Vgl. Anylogic 2020c, S.4

- **Discret Event Simulation:**

Die Discret Event Simulation unterstützt ein mittleres bis niedriges Abstraktionslevel (siehe **Abb. 3.3**). Sie orientiert sich stark an einem prozessorientierten Ansatz. Dabei wird jedes System als ein Prozess angesehen. Das bedeutet, dass eine Abfolge von Operationen von Entitäten entlang des Prozesses ausgeführt wird. Diese Operationen können Verzögerungen, Services, Zusammenführungen, Aufteilungen und einige mehr sein. Die Definition der Modelle erfolgt über Flussdiagramme mit Funktionsblöcken (siehe **Abb. 3.5**).

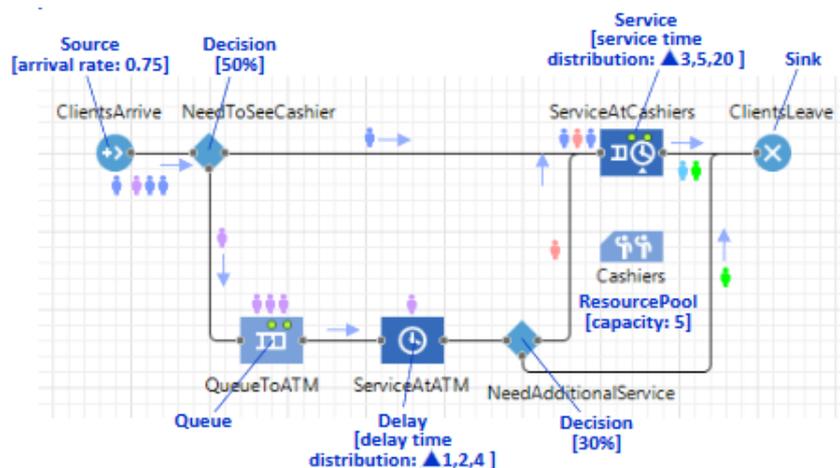


Abb. 3.5: Anylogic Discret Event Modeling⁸⁰

- **Agent Based Modeling:**

Bei der agentenbasierten Modellierung wird das Systemverhalten durch die Summe an Aktionen individueller Agenten bestimmt. Eine ausführliche Beschreibung ist in **Kap. 2.2.6** zu finden.

3.3.2 Parameter

Im Gegensatz zu *PTV-Vissim* & *Viswalk* (siehe **Kap. 3.2.2**) stehen in *Anylogic* standardmäßig keine Fußgängertypen zur Verfügung. Fußgänger bewegen sich nach dem Social Force Model (siehe **Kap. 2.2.4**) und entscheiden sich für die kürzeste Route um ihr Ziel zu erreichen. Dabei verhindern sie Kollisionen mit anderen Objekten (z. B. Personen, Wände etc.) indem die unmittelbare Umgebung analysiert und weiterführende Entscheidungen getroffen werden.⁸¹

Das Verhalten der Fußgänger wird mittels *Building Blocks*, die zu einem Flowchart (siehe **Kap. 3.3.3**) zusammengesetzt werden, definiert. Zusätzlich haben Space Markup Elemente einen Einfluss auf die Fußgänger. Dazu zählen Wände, Services, Attraktoren und Aufzüge. Individuelle Eigenschaften werden über Parameter in der Agentendefinition eingestellt. Diese können z. B. das Tragen von Handgepäck oder die demographischen Eigenschaften der Agenten sein.⁸²

Anylogic unterscheidet bei der Agentenbewegung zwischen drei Raummodellen:

- **Continous Space:** Hier kann der Agent sich frei mit seiner spezifizierten Geschwindigkeit von einem Ort zum anderen bewegen.

⁸⁰Borshchev 2013, S.12

⁸¹Vgl. Anylogic 2020b

⁸²Vgl. Anylogic 2020b

- **Discrete Space:** Hier handelt es sich um einen Zellulären Automaten (siehe **Kap. 2.2.5**). Dabei kann sich der Agent nur von einer Zelle zur nächsten bewegen. In jeder Zelle darf sich nur ein Agent befinden.
- **GIS Space:** Hierbei handelt es sich um einen geodätische Raum. Die Agenten bewegen sich entlang der durch die Geodäsie definierten Wege, wie z. B. Straßen. Die Routen werden von der Software automatisch berechnet und müssen nicht zur Verfügung gestellt werden.

3.3.3 Modellierung

Für die Modellierung kommen, je nach Komplexität, unterschiedliche Methoden zum Einsatz (siehe **Kap. 3.3.1**). Für die Definition der Simulationsumgebung werden im Falle der *Pedestrian Library* die *Markup* in **Abb. 3.6** verwendet. Hier werden nur die für diese Arbeit relevanten *Markups* beschrieben.

Symbol	Markup
	Wall
	Rectangular Wall
	Circular Wall
	Target Line
	Service with Lines
	Rectangular Node
	Attractors

Abb. 3.6: Anylogic Markup⁸³

Mittels *Wall* können polygonförmige Wände und Hindernisse auf der Simulationsebene erzeugt werden. *Rectangular Wall* und *Circular Wall* stellen ebenfalls Bereiche dar, welche für Fußgänger nicht begehbar sind. Die *Target Line* dient primär als Ort an dem die Fußgänger in das Modell eintreten und auch wieder austreten können. Es können auch mehrere *Target Lines* im Modell definiert werden, um von einem Stockwerk zum nächsten zu gelangen. Zusätzlich werden sie als Wartebereiche eingesetzt. *Service with Lines* wird verwendet um Warteschlange vor Services zu bilden. Services können z. B. Ticketautomaten oder Flughafen Check-in Bereiche sein. Für die Simulation von Aufzügen, Stiegen und Fahrtreppen, kann die *Rectangular Node* verwendet werden. Mit ihr ist es ebenfalls möglich Wartebereiche, Ein- und Ausgangsbereiche zu definieren. Innerhalb von *Rectangular Nodes* können *Attractors* hinzugefügt werden. *Attractor* erlauben es Fußgänger innerhalb eines Bereiches zu manipulieren. In Kombination mit einem *PedGoTo* Block (siehe **Abb. 3.7**) definiert der *Attractor* eine genaue Zielposition, mit einem *PedWait* Block eine exakte Warteposition innerhalb der *Rectangular Node*.⁸⁴

Das individuelle Verhalten der Fußgänger wird über die *Building Blocks* der *Pedestrian Library* definiert. Wie schon bei den *Markups* werden nur die für diese Arbeit relevanten *Building Blocks* beschrieben und in **Abb. 3.7** dargestellt. Der volle Umfang ist der Softwarebeschreibung Anylogic 2020a zu entnehmen⁸⁵.

⁸³Eigene Darstellung nach Anylogic 2020a, Markup for pedestrian simulation

⁸⁴Vgl. Anylogic 2020a, Markup for pedestrian simulation

⁸⁵Vgl. Anylogic 2020a

Symbol	Building Block
	Ped Source
	Ped Sink
	PedGoTo
	PedService
	PedWait
	PedSelectOutput

Abb. 3.7: Anylogic Building Blocks⁸⁶

Ped Source ist für die Erzeugung der Fußgänger in beliebigen zeitlichen Abständen oder durch Ereignisse zuständig und stellt in der Regel den Startpunkt des Flowcharts dar. Eine weitere Möglichkeit ist die Bildung von Gruppen mit unterschiedlichen Gruppengrößen, Gruppenformen und Ankunftsrate. Mit der *PedSink* werden alle Fußgänger, die diesen Block erreicht, haben aus dem Modell entfernt. Der *PedGoTo* Block definiert ein Ziel, das der Fußgänger erreichen soll. Diese Ziele können *Target Lines*, *Nodes* oder bestimmte Koordinaten sein. Das Ziel kann entweder automatisch über *Reach target* oder über eine vordefinierte Route bei komplizierteren Geometrien mit *Follow Route* erreicht werden. Um den Fußgängerfluss zu einem Servicebereich zu lenken, wird der *PedService* Block verwendet. In Kombination mit dem *Service with Area Markup* können damit physisch gleiche Serviceeinheiten wie z. B. Ticketautomaten oder Check-In Bereiche definiert werden. Mit *PedWait* ist es möglich, Fußgänger in einem spezifizierten Bereich für eine gewisse Zeit warten zu lassen. Diese Bereiche können *Target Lines*, *Nodes* oder Koordinaten sein und zusätzlich mit *Attractor* bestückt werden. Der *PedSelectOutput* Block verteilt den eintreffenden Fußgängerstrom auf einen oder mehrere Ausgänge. Die Ausgänge können über Bedingungen oder Verteilungen definiert werden.

Die Lösung der Differentialgleichungen wird mit dem Euler- oder Runge- Kutta 4 Verfahren gefunden. Algebraische Gleichungen werden mit dem modifizierten Newton-, schnellen Newton- oder klassischen Newton- Verfahren oder gemeinsam mit der Runge- Kutta- Fehlberg Methode gelöst.⁸⁷

3.4 Thunderhead Engineering Pathfinder

3.4.1 Allgemeines

Pathfinder ist ein agentenbasierter Simulator für die Simulation von menschlicher Bewegung in Räumen und der Evakuierung von diesen. Räume können dabei Häuser, Stadien, Konzerthallen und vieles mehr sein. Es stehen grundsätzlich zwei verschiedene Simulationsmethoden zu Verfügung:

- **Steering Mode:** Agenten bewegen sich individuell zu ihrem Ziel und versuchen dabei andere Agenten und Hindernisse, wie z. B. Wände, zu vermeiden. Durchflussraten bei Durchgängen (z. B. Türen) resultieren aus der Interaktion der Agenten miteinander und mit den örtlichen Gegebenheiten.

⁸⁶Eigene Darstellung nach Anylogic 2020a, Pedestrian Building Blocks

⁸⁷Vgl. Anylogic 2020a, Numerical Methods

- **SFPE:** SFPE steht für die *Society of Fire Protection Engineers*. In diesem Modus, welcher zur Modellierung der Evakuierung im Brandfall genutzt werden kann, richtet sich das Verhalten der Agenten nach den Leitlinien der SFPE, wie z. B. Abhängigkeit der Gehgeschwindigkeit von der Personendichte und Durchflussbegrenzungen bei Durchgängen. Die SFPE- Simulation verhindert allerdings nicht, dass mehrere Personen den selben Platz einnehmen.⁸⁸

Im Gegensatz zu *PTV Viswalk & Vissim* und *Anylogic* wird bei *Pathfinder*, um ein gewisses Ziel im Modell zu erreichen, eine Kostenfunktion mit den gewichteten Summen der Verhaltenskosten für jeden Agenten minimiert. Die Kostenfunktion ist dabei von drei Faktoren abhängig:

- **Path Planning:** Wird nach der Methode *Locally Quickest* durchgeführt. Dabei haben die Agenten Wissen über alle Türen im Raum, sowie über das Gesamtlayout des Gebäudes. Weiters wird angenommen, dass der Agent über etwaige Warteschlange bei den Türen Bescheid weiß. *Locally quickest* verwendet diese Information um im aktuellen Raum die Kosten für jede einzelne Türe zu berechnen.⁸⁹
- **Path Generation:** Hierfür wird der *A** Suchalgorithmus nach Hart et al. 1972 verwendet. Zur Glättung des auf diesem Wege gefundenen Pfades wird eine Variation der *string pulling technique* nach Johnson 2006 angewendet (siehe **Abb. 3.8**).^{90,91,92}

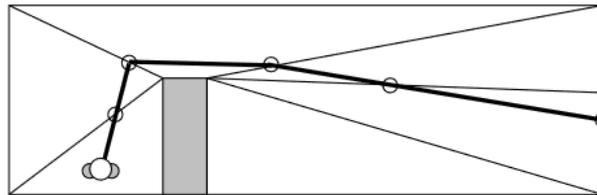


Abb. 3.8: Pathfinder Path Generation⁹³

- **Path Following:** Dabei muss in den *SFPE* Modus und den *Steering* Modus unterschieden werden. Im *SFPE* Modus sind die Gehgeschwindigkeiten und die Durchflussraten durch Türen und Gänge begrenzt. Beim *Steering* Modus wird eine Kombination aus Steuermechanismen und Kollisionsvermeidung verwendet um der Zielroute zu folgen. Es ist den Agenten dabei auch erlaubt von den Pfaden abzuweichen, solange dabei nicht die Richtung geändert wird.⁹⁴

Die Bewegungsgeschwindigkeit und Beschleunigung wird anschließend mit dem *Expliziten Euler- Verfahren* für jede Position und jeden Agenten berechnet.⁹⁵

⁸⁸Vgl. *Technical Reference* 2017, S.3

⁸⁹Vgl. *Technical Reference* 2017; S.18ff

⁹⁰Vgl. *Technical Reference* 2017, S.20ff

⁹¹Vgl. Hart et al. 1972

⁹²Vgl. Johnson 2006

⁹³*Technical Reference* 2017, S.21

⁹⁴Vgl. *Technical Reference* 2017, S23ff

⁹⁵Vgl. *Technical Reference* 2017, S.35

3.4.2 Parameter

In *Pathfinder* können standardmäßig verschiedene Klassen von Agenten mit unterschiedlichen Eigenschaften definiert werden. Diese können vordefiniert, nach z.B. IMO- Richtlinien (siehe **Abb. 3.2**), oder benutzerdefiniert sein. Es wird dabei in vier Kategorien unterteilt:⁹⁶

- **Charakteristiken:**

Prioritätslevel: Höhere Werte bedeutet höhere Priorität. Das heißt, dass Agenten mit niedrigeren Werten solchen mit höheren Werten ausweichen. Das kann für die Simulation von z. B. Rettungskräften, die sich durch eine Menschenmenge bewegen müssen, sinnvoll sein.

Geschwindigkeit: Spezifiziert die maximale Geschwindigkeit die Agenten haben können.

Schulterweite: Definiert den Durchmesser des Zylinders für die Agenten Repräsentation im Modell. Zusätzlich hat dieser Wert einen Einfluss auf die maximale Agentenanzahl, die sich in einem Raum platztechnisch befinden kann.

- **Bewegung:**

Verwendung von Stiegen: Definiert, ob Agenten Stiegen verwenden können.

Ignorieren der Einbahnregelung für Türen: Agenten ignorieren die vordefinierte Benützungsrichtung der Türe.

Gehen auf Fahrtreppen: Die Agenten bewegen sich weiter mit ihrer Gehgeschwindigkeit auf Fahrtreppen. In diesem Fall wird die Fahrgeschwindigkeit zur Gehgeschwindigkeit addiert. Sollte der Agent auf der Fahrtreppe stehen bleiben und nicht weitergehen, hat dieser die Geschwindigkeit der Fahrtreppe.

- **Türwahl:**

Momentane Raumreisezeit: Ist ein Kostenfaktor, der die Kosten für die Bewegung zu einer Türe im aktuellen Raum beeinflusst.

Momentane Raumwarteschlangenzeit: Ist ein Kostenfaktor, der die Kosten für das Warten in einer Warteschlange beeinflusst.

Globale Reisezeit: Ist ein Kostenfaktor, der die Bewegungszeit von einer Türe zum Ausgang oder nächsten Ziel beeinflusst.

Momentane Türpreferenz: Ist ein Wert, der den Agenten bei der Wahl der Tür beeinflusst. Je höher der Wert, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass der Agent bei der initial gewählten Türe bleibt.

Momentane Raumdistanzstrafe: Der Wert erhöht sich mit der zurückgelegten Distanz in einem Raum. Dieser Parameter bewirkt, dass der Agent kürzere im Gegensatz zu schnelleren Routen bevorzugt. Je länger diese Distanz, desto höher die Strafe.

- **Fortgeschritten:**

Größe: Gibt die Größe des stellvertretenden Zylinders für die Simulation an.

Beschleunigungszeit: Definiert im *Steering* Modus die Zeit für die Beschleunigung um die maximale Geschwindigkeit zu erreichen.

⁹⁶Vgl. *User Manual* 2014, S.51ff

Reduzierungs Faktor: Definiert im *Steering* Modus den Faktor um den ein Agent deformiert werden kann, um sich an anderen Agenten vorbeibewegen zu können.

Komfortabstand: Spezifiziert die Größe der Komfortzone, die ein Agent zu anderen Agenten halten möchte.

Fortbestehungszeit: Definiert die Zeit in der eine erhöhte Priorität gegenüber anderen Agenten bei der Lösung von Bewegungskonflikten besteht.

Kollisions- Reaktionszeit: Multipliziert mit der Momentangeschwindigkeit eines Agenten definiert sie die Distanz ab der eine Kollision die Kostenfunktion beeinflusst.

Langsamkeitsfaktor: Gibt an ab welcher Geschwindigkeit ein Agent als langsam zu definieren ist. Langsame Agenten haben die Möglichkeit sich rückwärts zu bewegen um sich von anderen Agenten zu distanzieren.

Jeder dieser Parameter kann entweder konstant, gleichförmig, normal oder logarithmisch-normal verteilt sein.

3.4.3 Modellierung

Die Geometrie der Räume im Modell kann entweder über das *Polygon Raum Werkzeug* oder das *Rechteck Raum Werkzeug* in Verbindung mit den *Wand Werkzeugen* erstellt werden oder über einen CAD- Import geschehen. Diese sind in **Abb. 3.9** zu sehen und stellen nur eine Auswahl derer für diese Arbeit notwendigen Werkzeuge dar.

Symbol	Werkzeug
	Polygon Raum
	Rechteck Raum
	Dünne Wand
	Dicke Wand

Abb. 3.9: Pathfinder Werkzeuge⁹⁷

Der Bewegungsbereich der Agenten wird erzeugt, in dem über die Geometrie ein Netz aus Dreieckselementen gelegt wird (siehe **Abb. 3.10**). Dieses Netz kann entweder automatisch oder manuell erzeugt werden. Wände oder andere Hindernisse werden als Leerräume frei gelassen und sind deshalb für Agenten nicht passierbar. Türen werden als spezielle Netzkanten behandelt und haben die Aufgabe zwei oder mehrere Räume zu verbinden. Je nach Simulationsmodus können diese für die Regelung des Personendurchflusses verwendet werden.

Nach der Definition der Geometrie werden die zuvor erstellten Agenten in der gewünschten Anzahl auf dem Modell platziert. Die Routen werden automatisch über die Kostenfunktionen (siehe **Kap. 3.4.1**) bei der Simulation erstellt.

⁹⁷Eigene Darstellung nach *Technical Reference* 2017, S.13ff

⁹⁸*Technical Reference* 2017, S.3

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

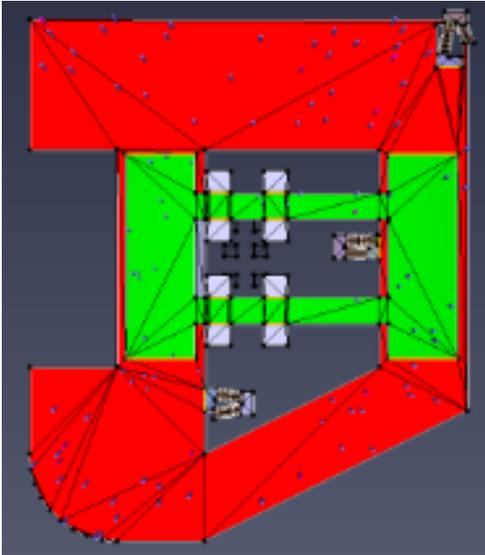


Abb. 3.10: Pathfinder Mesh⁹⁸

Kapitel 4

Modell

In diesem Kapitel wird das Modell, die softwaretechnische Umsetzung, als auch die Auswertung und Validierung der erhaltenen Ergebnisse dargestellt. Das Modell ist in Absprache mit der *Siemens Mobility GmbH* ausgesucht und von dieser zur Verfügung gestellt worden. Da es sich um ein öffentliches Projekt handelt, sind alle relevanten Daten für die Simulation über das Fahrzeug online verfügbar.

4.1 U-Bahn München

Die *Siemens Mobility GmbH* erhielt im Jahr 2010 den Auftrag zur Lieferung von 21 U-Bahnzügen, um die bereits 40 Jahre in Betrieb der *Stadtwerke München* stehenden Züge sukzessive zu ersetzen. Durch die Erweiterung des Angebotes bis in das Jahr 2020 ist die Anzahl auf 46 und somit in Summe auf 67 Züge gestiegen.⁹⁹

Die Innenraumgestaltung baut auf der des Vorgängermodells C1 auf. Durch das verbesserte Layout gegenüber dem C1 konnte die Fahrgastkapazität erhöht werden. Der hellere Innenraum durch die LED- Beleuchtung sowie das Fahrgastinformations- und Kommunikationssystem tragen zu einem erhöhtem Komfort bei (siehe **Abb. 4.1**).¹⁰⁰



Abb. 4.1: U-Bahn München Innenraum¹⁰¹

Die Anordnung der Wagons ist auf den Zweirichtungsbetrieb ausgelegt, das heißt jeder Kopfwagen ist mit einem Fahrerstand ausgestattet (siehe **Abb. 4.2**). Ein Wenden des Zuges an den Endstationen ist daher nicht zwingend notwendig. Der Zug besteht aus sechs Wagons, die bei einer theoretischen Personendichte von 4 Personen/ m^2 Platz für 940 Passagiere bieten. Die 940 Plätze teilen sich in 220 Sitz- und in 720 Stehplätze auf. Die Wagenkästen bestehen aus einer

⁹⁹Vgl. *U-Bahn München* 2020, S.2

¹⁰⁰Vgl. *U-Bahn München* 2020, S.2ff

¹⁰¹*U-Bahn München* 2020, S.4

Aluminium Leichtbaukonstruktion mit verschweißten Profilen.¹⁰²

Technische Daten	
Zugkonfiguration	Mc+M+M+M+M+Mc
Achsfolge	Bo'Bo'+Bo'Bo'+Bo'Bo'+Bo'Bo'+Bo'Bo'+Bo'Bo'
Wagenkasten-Material	Aluminium
Spurweite	1.435 mm
Länge über Kupplung	ca. 115.060 mm
Fahrzeugbreite	2.900 mm
Fußbodenhöhe über Schienenoberkante	1.100 mm
Raddurchmesser max. / min.	850 / 770 mm
Leergewicht	ca. 180 t
Max. Achslast	13,5 t
Sitzplätze / Klappsitze	220
Zugkapazität bei 4 Fahrgästen/m ²	940
Fahrgasttüren pro Wagen	6
Minimaler Kurvenradius Betriebsgleis / Betriebshof	270 m / 70 m
Höchstgeschwindigkeit	90 km/h
Maximale Anfahrbeschleunigung	1,3 m/s ²
Mittlere Bremsverzögerung	1,2 m/s ²
Fahrleitungsspannung	750 V DC / 3. Schiene

Abb. 4.2: U-Bahn München Technische Daten¹⁰³

Jeder Wagen besitzt beidseitig drei elektrisch betriebene Schwenkschiebetüren mit einer Türweite von 1400 mm. Das Layout der Wagons unterscheidet sich für die Kopfwägen und die Mittelwägen. Aufgrund des höheren Fahrgastaufkommens an den beiden Zugenden, bedingt durch die Position der Ein- und Ausgänge in den Stationen (siehe **Kap. 2.1.6**), wurde in den Kopfwagons auf eine Längsbestuhlung gesetzt. In den mittleren Wagons kommt eine vis-a-vis Bestuhlung zum Einsatz. Auf den Plateaus und zwischen der Längsbestuhlung sind Haltestangen angebracht, die vom Boden bis etwa zur halben Höhe des Fahrgastraumes reichen. Diese Information ist für die später Modellbildung wichtig, da diese eine Hindernis für die Fahrgäste bei der Bewegung innerhalb des Zuges darstellt. Die Haltestangen sind im Grundriss (siehe **Abb. 4.3**) nicht ersichtlich, aber in der **Abb. 4.1** des Innenraumes zu sehen.

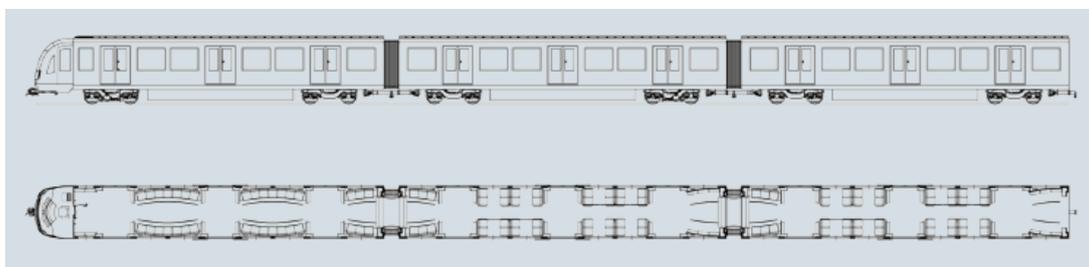


Abb. 4.3: U-Bahn München Layout¹⁰⁴

¹⁰²Vgl. *U-Bahn München* 2020, S.2

¹⁰³*U-Bahn München* 2020, S.1

¹⁰⁴*U-Bahn München* 2020, S.3

4.2 Simulation

4.2.1 PTV- Vissim & Viswalk

Im Zuge der Einarbeitung in das Programm hat sich gezeigt, dass *PTV- Vissim & Viswalk* für die Simulation von Passagierflüssen für das Ein- und Aussteigen von U-Bahnen nicht geeignet ist. Die Verkehrsmittel können nur als *Blackbox* im Modell abgebildet werden. Die Passagiere betreten und verlassen das gewählte Verkehrsmittel ohne dass der Innenraum einen Einfluss auf das Ein- und Ausstiegsverhalten hat. Dieses wurde auch von *PTV* bestätigt. Damit wurde mit diesem Programm kein Modell bzw. keine Simulation erstellt.

4.2.2 Anylogic

4.2.2.1 Modellbildung

Bei der Erstellung des Projektes ist für die globale Modellzeiteinheiten “Sekunden“ ausgewählt worden. Das hat den Grund, dass die Ausstiegszeiten die Panzera 2014 gemessen hat im Sekundenbereich liegen¹⁰⁵. Zur Modellbildung ist aus Symmetriegründen und Übersichtlichkeit nur der halbe Zug, bestehend aus Kopfwagen und zwei mittel Wägen, verwendet worden. Der Grundriss des Zuges ist mittels Bild (siehe **Abb. 4.3**) in den Modellbereich eingefügt worden. Der Import von CAD- Dateien war in der dieser Arbeit zugrundeliegenden Version von *Anylogic* nicht möglich. Der Modellmaßstab kann über das Menü als Zahlenwert oder direkt auf der Modellebene durch verkleinern oder vergrößern des Maßstabsymbols (siehe **Nr.1** in **Abb. 4.4a**) eingestellt werden. Der Kopfwagen wird mit KN und die mittel Wägen mit M abgekürzt. Der Maßstab wird für die programmtechnische Bearbeitung in Pixel umgerechnet und hat sich in diesem Fall an der Türweite orientiert. Daraus ergibt sich ein Verhältnis von $1,4\text{m} \equiv 320 \text{ Pixel}$ oder $1\text{m} \equiv 228,57 \text{ Pixel}$. Daraus ergibt sich wiederum für die Klasse *Main* und den Modellbereich eine Größe von 13.600 Pixel Länge und 1.000 Pixel Höhe. Durch die Voraussetzung, dass zwischen Bahnsteig und U-Bahn kein Niveauunterschied besteht, ist die Simulation in zwei Raumdimensionen ausreichend. Der Raumtyp ist mit *Continuous Space* definiert worden, da es sich weder um einen Zellulären Automaten handelt oder geodätische Informationen für das Modell benötigten werden.

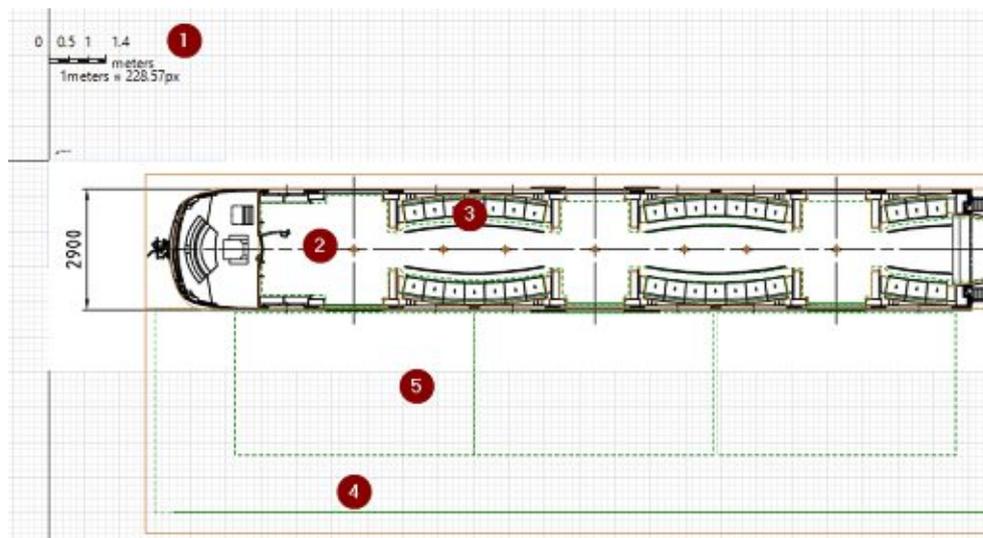
Das Modell gliedert sich grundsätzlich, wie in **Abb. 4.4a** dargestellt, in 4 Bereiche:

- **Nr.2:** Ist der Stehbereich im Zug.
- **Nr.3:** Ist der Sitzbereich im Zug.
- **Nr.4:** Bezeichnet den Bahnsteig.
- **Nr.5:** Sind die Wartebereiche am Bahnsteig.

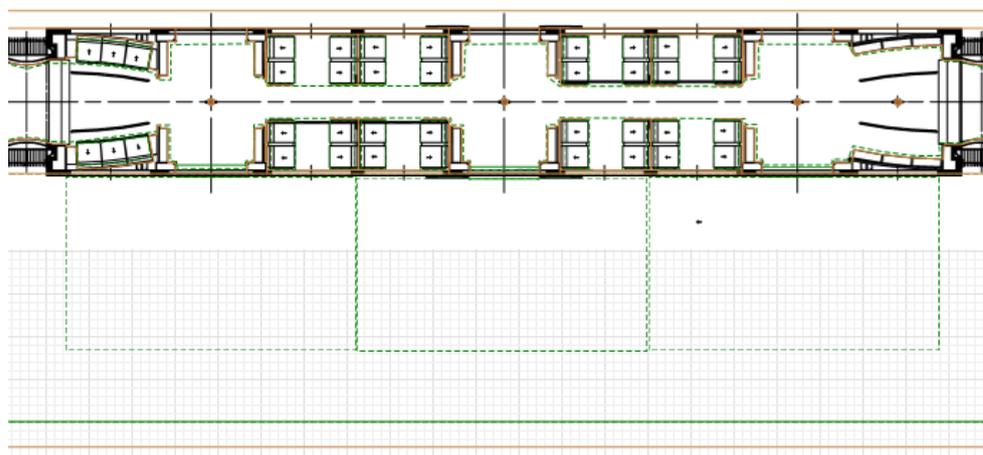
Mit den *Markup* Elementen der Fußgängerbibliothek (siehe **Kap.3.3.3**) wurden diese Geometrieelemente in der Simulationumgebung definiert. Der Grundriss der einzelnen Wagons wurde mit dem *Wand* Element nachgezeichnet. Die einzelnen Elemente des Polygons wurden durch Drücken der linken Maustaste hinzugefügt. Um zwischendurch eine Rundung einzufügen, ist das über Drücken der linken Maustaste und Halten mit anschließendem Verschieben der Maus möglich. Jeder Wagon stellt einen eigenen Raum dar, der von den Passagieren betreten und während der Fahrt gewechselt werden kann.

¹⁰⁵Vgl. Panzera 2014, Tabelle 2

¹⁰⁶Eigene Darstellung



(a) Anylogic Modell KN



(b) Anylogic Modell M

Abb. 4.4: Ausstiegszeit und Personenfluss¹⁰⁶

Der Stehbereich (Nr.2) wurde über den *Polygon Node* Befehl im Modellbereich definiert. Dazu wurde die den Passagieren zur Verfügung stehende Fläche nachgezeichnet. Die Bereiche für die Haltestangen, die nicht als Stehfläche zur Verfügung stehen, wurden für die Modellbildung als Hindernis definiert. Im vorliegenden Modell wurde zur Darstellung eine Kombination aus einem Kreis für den Steher und einem abgerundeten Rechteck für den aufgesetzten Haltegriff gewählt. Die Glasabtrennungen zwischen den Plateaus und den inneren Bereichen der Wagons wurde als Wand definiert, um eine räumliche Trennung im Modell herbeizuführen.

Der Bahnsteig (Nr.4) wurde als rechteckige Fläche mit dem *Rechteck Node* Befehl definiert. Um Einflüsse des Bahnsteiges auf das Modell auszuschließen, wurde auf jegliche Hindernisse, wie z. B. Sitzgelegenheiten oder Säulen, verzichtet. Der Stationseingang und Ausgang wurde ebenfalls so dimensioniert, dass es zu keinerlei Beeinflussung des U-Bahnmodells kommen kann. Vor jeder Ein- und Ausstiegstüre der U-Bahn wurde ein Wartebereich (Nr.5) für die auf den Bahnsteig strömenden Passagiere eingerichtet. Dafür wurden diese auch mit dem *Rechteck Node* Befehl definiert.

Jeder Sitzplatz ist mit einem *Attractor* bestückt. Diese geben den Agenten die Möglichkeit sich an einem definierten Ort mit einer gewissen Orientierung zu platzieren.

Die Aus- und Eingänge wurden mit dem *TargetLine* Block erstellt. Diese können direkt durch Ziehen der Maus und Klicken an der gewünschten Stelle eingefügt werden. In den Eigenschaften wurde dann die genaue Größe als Zahlenwert eingestellt. Für die U-Bahntüren entspricht das 320 Pixel.

Agent

Die physiologischen Eigenschaft der Agenten wurden nach den **Kap 2.1.1** und **Kap. 2.1.3** definiert. Für die Validierung der Software ist nur zwischen den biologischen Geschlechtern mit den dazugehörigen physischen Eigenschaften unterschieden worden. Die prozentuelle Aufteilung dabei ist mit 49,2% Männern und 50,8% Frauen festgelegt. Es wurden keine Altersgruppen mit zugehörigen Gehgeschwindigkeiten angelegt. Als Verteilung für die Gehgeschwindigkeit wurde die Normalverteilung herangezogen. Damit ist für die vollständige Beschreibung der Verteilung Mittelwert und Standardabweichung ausreichend. Der Durchmesser wurde anhand der in **Abb. 2.4** vermerkten Schulterbreiten definiert. Nach *DIN 33402-2:2020-12: Ergonomie- Körpermaße des Menschen- Teil2: Werte 2020* ist die Annahme einer Normalverteilung nur für die Körpergröße zulässig. Für die Schulterbreite wurde deshalb das 5% und 95% Perzentil herangezogen und innerhalb dieser Grenzen gleichverteilt. Da es sich um ein Modell mit ausschließlich zwei Raumdimensionen handelt, wurde auf die Körpergrößenverteilung verzichtet. Die Parameter sind wie folgt implementiert worden:

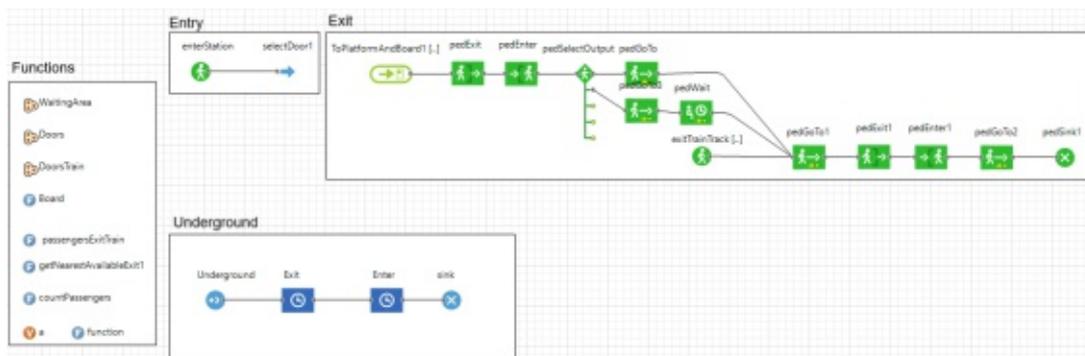
- **Schulterbreite Frauen:**
 - 5% Perzentil: 39.5 cm
 - 95% Perzentil: 48.5 cm
- **Schulterbreite Männer:**
 - 5% Perzentil: 44.0 cm
 - 95% Perzentil: 52.5 cm
- **Gehgeschwindigkeit Frauen:**
 - Mittelwert μ : 1.27 m/s
 - Standardabweichung s : 0.26 m/s
- **Gehgeschwindigkeit Männer:**
 - Mittelwert μ : 1.41 m/s
 - Standardabweichung s : 0.26 m/s

Logik

Die Logik des Modells wurde gesondert über die *Building Blocks* definiert und gliedert sich, wie in **Abb. 4.5** in vier Bereiche:

- **Entry:** Definiert die Ankunft der Passagiere am Bahnsteig

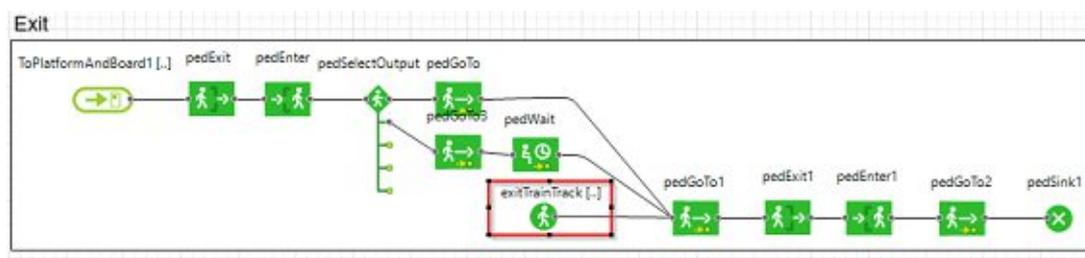
- **Exit:** Definiert die Bewegung der Passagiere zum Zug, das Verweilen im Zug und den Ausstieg. Weiters ist dieser Block für die initiale Befüllung des Zuges vor dem ersten Fahrgastwechsel verantwortlich.
- **Underground:** Ist für den Zyklus der U-Bahn zuständig. Damit wird die Zugfolgezeit, als auch die Freigabe für das Ein- und Aussteigen der Passagiere definiert.
- **Functions:** In diesem Bereich sind alle Funktionen definiert, die nicht standardmäßig als *Building Block* zur Verfügung stehen.

Abb. 4.5: Anylogic Logik¹⁰⁷

In Folge werden die drei Bereiche (Entry, Exit und Underground) in Reihenfolge des programmtechnischen Ablaufes beschrieben. Der Funktionsbereich stellt einen Sonderbereich dar, weil jeder der anderen Bereiche im Zuge der Abarbeitung der Simulation darauf zugreifen kann. Die Funktionen werden an der Stelle an der sie von den *Building Blocks* aufgerufen werden beschrieben. Wartebereiche und U-Bahntüren werden für die programmiertechnische Umsetzung in den Funktionen zu *Collections* zusammengefasst.

Exit

Die Simulation beginnt mit dem Aussteigen der sich initial in der U-Bahn befindlichen Passagieren. Dazu wird in der Klasse *Main* die Funktion *passengersExitTrain* aufgerufen (siehe 4.1). Damit werden in *exitTrainTrack* die gewünschte Anzahl an Passagieren in einem definierten Bereich erzeugt. Im *exitTrainTrack* Block muss dafür die Ankunft der Passagier auf *Calls of inject()* *Function* gesetzt sein.

Abb. 4.6: Anylogic-Exit¹⁰⁸

¹⁰⁷Eigene Darstellung

¹⁰⁸Eigene Darstellung

Program Code 4.1: passengersExitTrain

```

1   AgentArrayList <PedSource <Passenger >>pedSources=null;
2   pedSources = exitTrainTrack;
3   for( PedSource ps : pedSources )
4   ps.inject();

```

Ist dieser Block völlig abgearbeitet, wird der Block *pedGoTo1* aufgerufen (siehe **Abb. 4.7**). Dieser ruft die Funktion *getNearestAvailableExit1()* (siehe **Program Code 4.2**) auf und berechnet damit den am nächsten gelegenen Ausgang für jeden Passagier. Die Berechnung wurde mit den Codezeilen, welche in **Program Code 4.2** ersichtlich sind, durchgeführt.

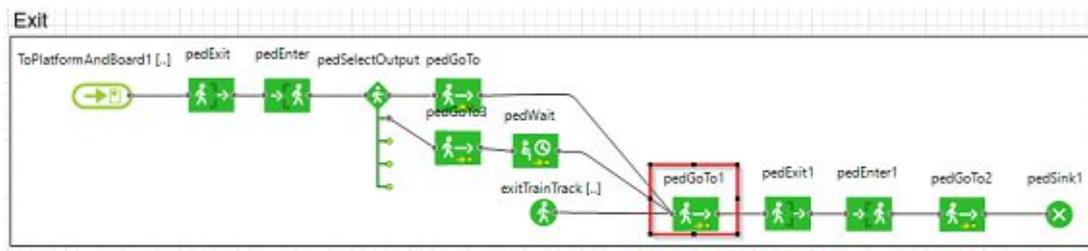


Abb. 4.7: Anylogic-Exit¹⁰⁹

Program Code 4.2: getNearestAvailableExit1

```

1   if(DoorsTrain.size() <1){
2       error("No exit is available");
3       return null;
4   }
5
6   double currentDistance = ped.getPosition().distance2D(new Point(
7       DoorsTrain.get(0).getX(),DoorsTrain.get(0).getY()));
8   double minDistance = currentDistance;
9   TargetLine closestExit = DoorsTrain.get(0);
10
11  for(int i=1;i<DoorsTrain.size();i++){
12      currentDistance= ped.getPosition().distance2D(new Point(DoorsTrain.
13          get(i).getX(),DoorsTrain.get(i).getY()));
14      if(currentDistance < minDistance){
15          minDistance = currentDistance;
16          closestExit = DoorsTrain.get(i);
17      }
18  }
19  return closestExit;

```

Nachdem jeder Passagier den für ihn nächsten Ausgang gewählt hat, verlässt er über den *pedExit1* mit der definierten *TargetLine* den Zug. Mit dem *pedEnter1* Block betritt er den Bahnsteig und verlässt über den *pedSink1* Block diesen und ist damit aus der Simulation entfernt (siehe **Abb. 4.8**). Dieses Vorgehen ist notwendig, da der Zug und der Bahnsteig von einander getrennte Räume darstellen.

¹⁰⁹Eigene Darstellung

¹¹⁰Eigene Darstellung

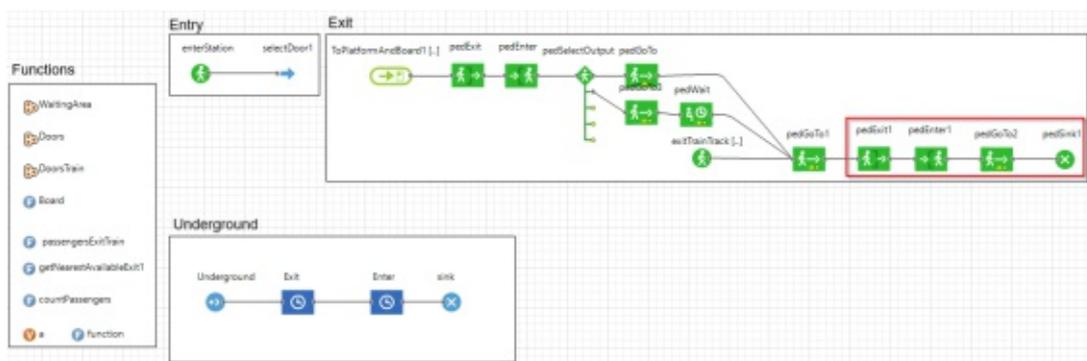


Abb. 4.8: Anylogic-Exit3¹¹⁰

Durch die Übergabe der Passagiere aus dem *Entry* Bereich (siehe **Kap. 4.2.2.1**) wird mit *ToPlatformAndBoard* (siehe **Abb. 4.9**) ein Unterbereich (siehe **Kap. 4.2.2.1**) aufgerufen.

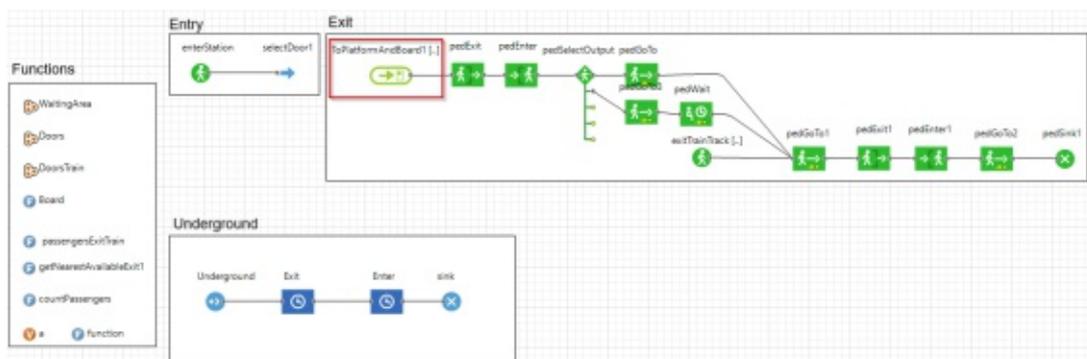


Abb. 4.9: Anylogic-Exit4¹¹¹

Die anschließenden Blöcke *pedExit* und *pedEnter* werden für das Betreten des Zuges mit den für jeden Passagier durch *ToPlatformAndBoard* zugeschriebenen Türen verwendet (siehe **Abb. 4.10**). Durch *pedSelectOutput* werden die Passagiere in jene, die Sitzen wollen, und jene die Stehen bevorzugen aufgeteilt. Dafür ist im Block eine Wahrscheinlichkeitsverteilung mit 80% stehenden und 20% sitzenden Fahrgästen hinterlegt. Die beiden anschließenden *pedGoTo* definieren die Bewegung zu den Steh- bzw. Sitzbereichen.

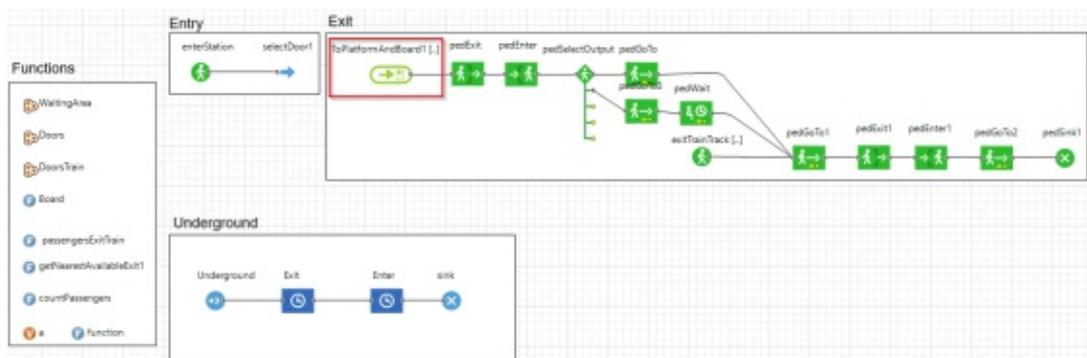


Abb. 4.10: Anylogic-Exit5¹¹²

¹¹¹Eigene Darstellung

ToPlatformAndBoard

ToPlatformAndBoard stellt einen eigenständigen Bereich abseits der Klasse *Main* dar. Sie wird durch die Funktion *Board* (siehe **Program Code 4.3**) im Bereich *Function* aufgerufen (siehe **Abb. 4.5**). Mit dieser Klasse wird jedem Passagier über *waitTrain* ein Wartebereich und mit *toCarDoor* die beim Einsteigen zu verwendende Türe zugeordnet (siehe **Abb. 4.11**). Die Parameter *waitArea* und *doorLine* werden an die Klasse durch den Bereich *Entry* (siehe **Kap. 4.2.2.1**) vererbt. Durch die Funktionsaufruf *board* wird der komplette Prozess gestartet.

Program Code 4.3: Board()

```

1  AgentArrayList<ToPlatformAndBoard>gtpablist = null;
2  gtpablist = ToPlatformAndBoard1;
3  for( ToPlatformAndBoard gtpab : gtpablist )
4  gtpab.board();

```

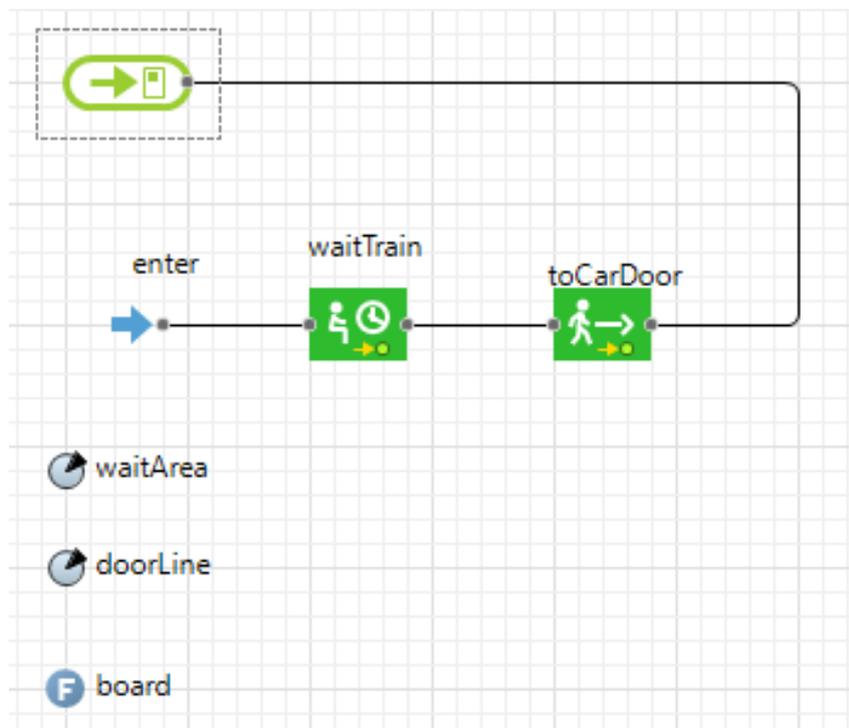


Abb. 4.11: Anylogic-ToPlatformAndBoard¹¹³

Entry

Im *Entry* Bereich (siehe **Abb. 4.12**) werden jene Passagiere mit dem *enterStation* Block erzeugt, die mit einer Rate von 20 Personen / Minute¹¹⁴ auf den Bahnsteig strömen. Die Passagiere platzieren sich nach ihren Türpräferenzen mit dem *select Door1* Block am Bahnsteig. Für diese Arbeit ist eine gleichmäßige Verteilung angenommen worden, um die Einflüsse des Bahnsteigs, wie im **Kap. 2.1.6** erläutert, zu eliminieren und eine Vergleichbarkeit zwischen den Modellen zu erreichen. Die Übergabe an die Klasse *ToPlatformAndBoard* ist in **Program Code 4.4** zu

¹¹²Eigene Darstellung

¹¹³Eigene Darstellung

¹¹⁴Eigene Beobachtung in der Station Karlsplatz der Linie U4

sehen.

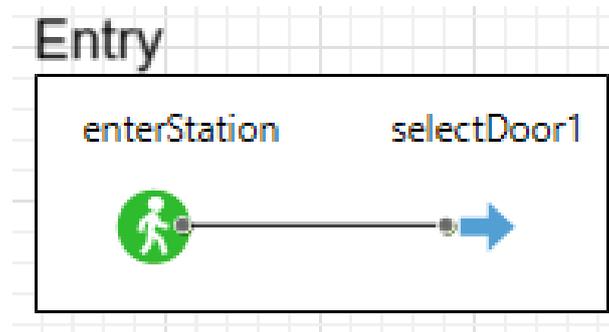


Abb. 4.12: Anylogic-Entry¹¹⁵

Program Code 4.4: selectDoor1

```
1 ToPlatformAndBoard1.get(uniform_discr(0,8)).enter.take(agent);
```

Underground

Der *Underground* (siehe **Abb. 4.13**) Bereich definiert die Zugfolge für das zyklische Ein- und Aussteigen der Passagiere. Der Zyklus wird mit dem *Source* Block gestartet, in welchem die Zykluszeit definiert wurde. In dieser Simulation ist diese mit 12 Zügen pro Stunde, was einer Taktzeit von 5 Minuten entspricht, hinterlegt. Der *Exit* Block gibt die Ausgänge für das Aussteigen der Passagiere frei. Gleichzeitig wird über die Variable *a* (siehe **Abb. 4.5**) der Zeitpunkt für das Einsteigen der Fahrgäste vom Bahnsteig gesteuert. Wenn sich nur noch wenige Fahrgäste in der U-Bahn befinden wird mit **Program Code 4.5** der Einstiegsprozess begonnen. Im vorliegenden Fall ist dieser Wert mit $a \leq 3$ gewählt. Der *Enter* Block wird aktiviert und dieser ruft die *Board()* Funktion auf (siehe **Program Code 4.3**).

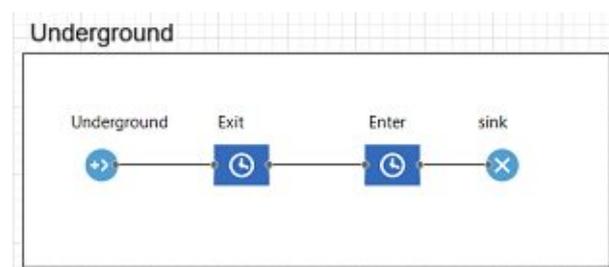


Abb. 4.13: Anylogic-Underground¹¹⁶

Program Code 4.5: function

¹¹⁵Eigene Darstellung

¹¹⁶Eigene Darstellung

```

1   if (a<=5) {
2       Exit.stopDelay(Underground);
3   }

```

PedFlowStatistics

Für die Auswertung der Personenflüsse wurde an jeder Türe ein *PedFlowStatistics* Element definiert. Dieses gibt die Anzahl der Passagiere an, die einen definierten Bereich (z.B. Türen) passiert haben. Für die Auswertung muss die Klasse mit der Methode *countPeds()* aufgerufen werden.

Program Code 4.6: PedFlowStatistics

```

1   pedFlowStatistics.countPeds();

```

4.2.2.2 Simulation

Für die Simulation wurde zunächst das Ausstiegsverhalten untersucht und anschließend das Modell auf mehrere Fahrgastwechselzyklen erweitert. Wie die Simulation mit *Pathfinder* im **Kap. 4.2.3.2** gezeigt hat, wurde für die Vergleichbarkeit mit den empirischen Werten aus Panzera 2014 für 20 Fahrgäste der Auslastungsgrad mit 40% gewählt¹¹⁷. Ein Auslastungsgrad von 40% entspricht einer Personendichte von 1.4 Personen/ m^2 (Angaben zu den Auslastungsgraden sind der **Tab. 4.3** zu entnehmen). Für die Auswertung wurden fünf Simulationsdurchgänge durchgeführt. Dadurch wurde eine statistische Anordnung der Personen, sowie eine Variation der definierten Parameter erreicht. Die Monte Carlo Simulation stand in der verwendeten Version von *Anylogic* nicht zur Verfügung.



Abb. 4.14: Anylogic-Simulation¹¹⁸

4.2.2.3 Ergebnisse

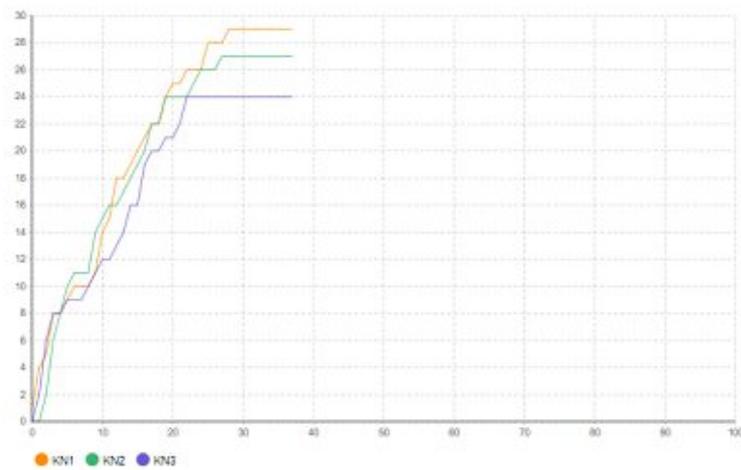
Für die Auswertung wurde der Mittelwert und die Standardabweichung aus fünf Simulationsdurchgängen für einen Auslastungsgrad von 40% herangezogen. Die einzelnen Durchflussraten sind für den Kopfwagen mit KN und für die Mittelwägen mit M bezeichnet. Die Zahl nach KN gibt die Türe an. Für M gibt die erste Zahl den Wagon und die zweite die Türe an. Es wird in beiden Fällen von links nach rechts aufsteigend nummeriert.

Die Ergebnisse sind mittels Zeitplots (siehe **Abb. 4.15a**, **Abb. 4.15b** und **Abb. 4.15c**) der *PedFlowStatistic* Elemente in *Anylogic* aufgezeichnet worden. Die Messwerte wurden im *dataset-log* in Tabellenform protokolliert und anschließend ausgelesen. Auf der x-Achse ist die

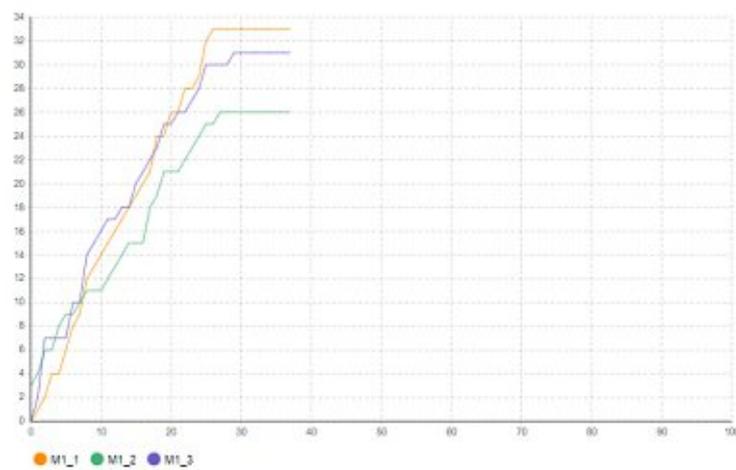
¹¹⁷Vgl. Panzera 2014, Tabelle 2

¹¹⁸Eigene Darstellung

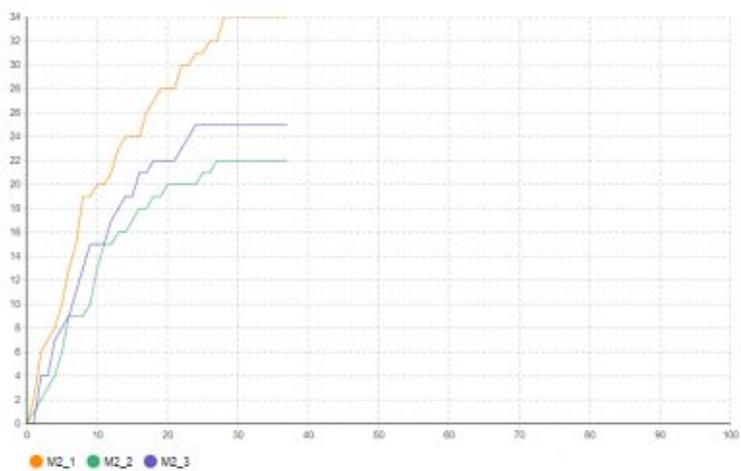
aufgenommene Zeit aufgetragen und auf der y-Achse die zugehörige Passagierzahl.



(a) Anylogic-Auswertung KN



(b) Anylogic-Auswertung M1



(c) Anylogic-Auswertung M2

Abb. 4.15: Personenfluss pro Wagon und Türe¹¹⁹

Bei der Auswertung der Versuche hat sich gezeigt, dass bei Versuch 4 die Türe M1-3 und im Versuch 5 die Tür M2-2 nicht den geforderten Durchfluss von 20 Passagieren erreicht haben. Die Werte sind deshalb bei der Auswertung nicht berücksichtigt worden. In **Abb. 4.16** sind die Mittelwert über die fünf Versuche pro Türe aufgetragen. Der Mittelwert liegt bei 17.57 s mit einer Standardabweichung 2.52 s. Alle weiteren Werte sind der **Tab. 4.1** zu entnehmen. Weiters ist festzustellen, dass das Layout der Wagons einen geringen Einfluss auf die Ausstiegszeit hat. Der begrenzende Faktor ist hier die Türweite und eventuelle Einflüsse des Bahnsteiges, wie Passagiere, die den Ausgang verstellen, oder sonstige bauliche Gegebenheiten.

Tab. 4.1: Ausstiegszeiten für 20 Personen

Tür [%]	Zeit für 20 Pers.	Standardabw.
KN1	18.70	4.53
KN2	15.00	2.00
KN3	18.20	15.76
M1-1	15.80	2.71
M1-2	22.2	4.79
M1-3	13.75	1.92
M2-1	16.30	3.09
M2-2	17.78	3.20
M2-3	20.4	4.67
Ausstiegszeit [s]		17.57
Standardabweichung [s]		2.52

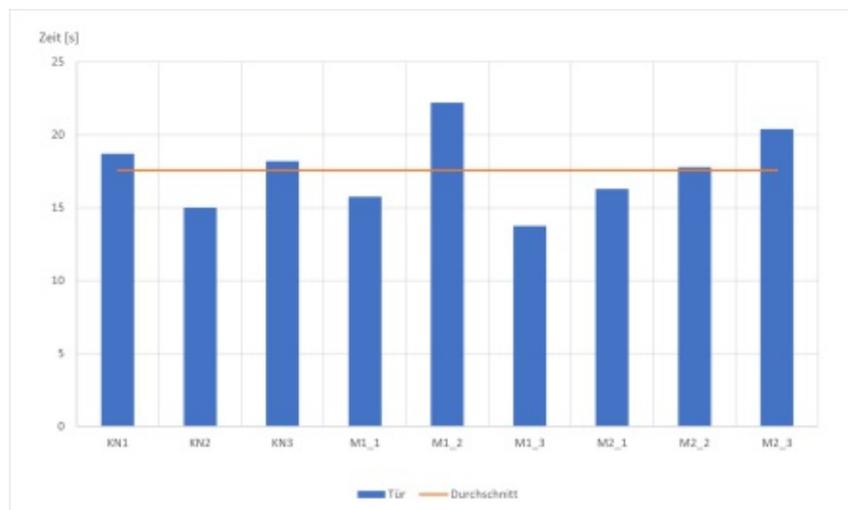


Abb. 4.16: Anylogic-Ausstiegszeit¹²⁰

Vergleicht man die Ausstiegszeit mit der von Panzera 2014, ergibt sich für den reinen Ausstiegsprozess eine Abweichung von 1.05 s. Für die Validierung des Modells bedeutet das, dass die angenommenen Parameter in **Kap. 4.2.2.1** die Realität abbilden¹²¹. Die angenommenen

¹¹⁹Eigene Darstellung

¹²⁰Eigene Darstellung

¹²¹Vgl. Panzera 2014, Tabelle 2

Mittelwerte der Gehgeschwindigkeiten nach Weidmann 1995 sind somit auch eine passende Näherung. Die tatsächliche Gehgeschwindigkeit im Modell ist allerdings aufgrund des Social Force Models eine Funktion der Passagierdichte und der physischen Umgebung jeder Person. Daraus resultiert eine geringere durchschnittliche Gehgeschwindigkeit als jene bei Weidmann 1995. Personen die sich z. B. am Bahnsteig frei bewegen können, nehmen die ihnen durch die Funktion, welche dem Modell hinterlegt wurde, eingeprägte Geschwindigkeit an.

Der Einstiegsprozess ist für fünf Personen simuliert worden, um eine Vergleichbarkeit mit Panzera 2014 zu erhalten. Für die Auswertung ist der Mittelwert und die Standardabweichung aus fünf Simulationsdurchgängen gebildet worden (siehe **Tab. 4.2**). Der Mittelwert über alle Türen ist 6.75 s mit einer Standardabweichung von 1.22 s. Daraus folgt eine Abweichung von 1.22 s zu den empirischen Werten von Panzera 2014¹²². Durch die geringe Abweichung kann davon ausgegangen werden, dass das Modell die Realität auch für den Einstiegsvorgang gut abbildet. In **Abb. 4.17** ist die Verteilung der Einstiegszeiten für fünf Passagiere pro Tür aufgetragen. Dabei ist eine erhöhte Zeit in den vorderen Zugteilen festzustellen. Das Layout des Kopfwagen ist für ein höheres Passagieraufkommen entwickelt worden (vgl. Fiebag 2019). Daraus folgt, dass das Modell hier weiter angepasst werden muss, um die Realität besser abbilden zu können. Für die Mittelwägen wird aufgrund des vorhandenen Layouts eine längere Einstiegszeit erwartet¹²³.

Tab. 4.2: Einstiegszeiten für 5 Personen

Tür [%]	Zeit für 5 Pers.	Standardabw.
KN1	8.50	3.64
KN2	6.67	2.05
KN3	7.5	4.15
M1-1	8.75	2.71
M1-2	4.67	1.70
M1-3	6.00	1.83
M2-1	6.30	1.72
M2-2	6.00	2.45
M2-3	6.40	1.62
Ausstiegszeit [s]		6.75
Standardabweichung [s]		1.22

Der kombinierte Prozess zwischen Ein- und Ausstieg konnte im Zuge der Simulation nicht abgebildet werden. Wie in **Abb. 4.18** zu sehen ist, kommt es zu einer Zeitverzögerung nach dem Aussteigen bis das Einsteigen gestartet wird. Die x-Achse stellt die Zeit und die y-Achse die Anzahl der Passagiere dar. Um bessere Ergebnisse zu erhalten, muss die Funktion **Program Code 4.5** angepasst werden.

Verschieden Anordnungen beim Aus- und Einsteigen (siehe **Kap. 2.1.5**) der Passagiere konnte in der Simulation beobachtet werden.

¹²²Vgl. Panzera 2014, Tabelle 2

¹²³Vgl. Fiebag 2019, S.48ff

¹²⁴Eigene Darstellung

¹²⁵Eigene Darstellung

¹²⁶Eigene Darstellung

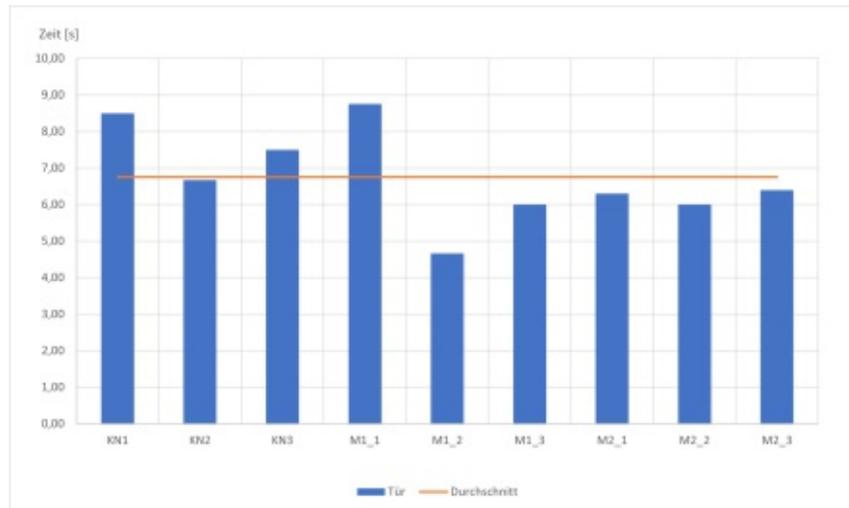


Abb. 4.17: Anylogic-Einstiegszeiten¹²⁴

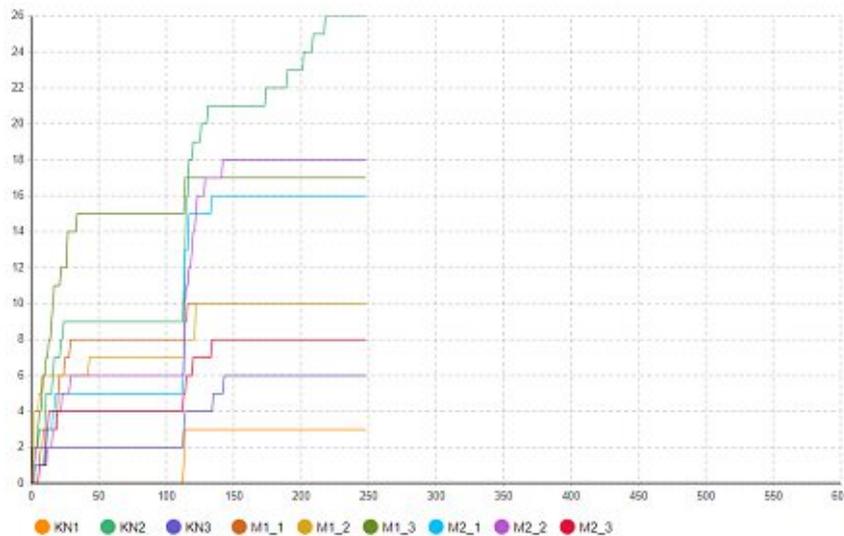


Abb. 4.18: Anylogic-Ein- und Aussteigen¹²⁵



(a) Einzel Ausstieg



(b) Paralleler Ausstieg



(c) Versetzter Ausstieg

Abb. 4.19: Ein- und Aussteigsanordnungen¹²⁶

4.2.3 Thunderhead Engineering Pathfinder

4.2.3.1 Modellbildung

Für die Erstellung des Modells wurde wie in **Kap. 4.2.2.1** das Hintergrundbild **Abb. 4.3** in den Modellbereich eingefügt. Auf den CAD- Import ist aufgrund der Vergleichbarkeit zwischen

den Programmen verzichtet worden. Der CAD-Import ist im Zuge des Erlernen der Software getestet worden und war ohne Probleme möglich. Durch das Setzen eines *Anchor Point* wurde der Modellursprung festgesetzt. Dieser kann am besten mit dem Ursprung in einem kartesischen Koordinatensystem verglichen werden. Mit der Distanz zwischen den Punkten A und B (siehe **Abb. 4.20**) wurde der Maßstab im Modell definiert. Hier ist analog zu **Kap. 4.2.2.1** die Türweite mit 1,4 m verwendet worden.

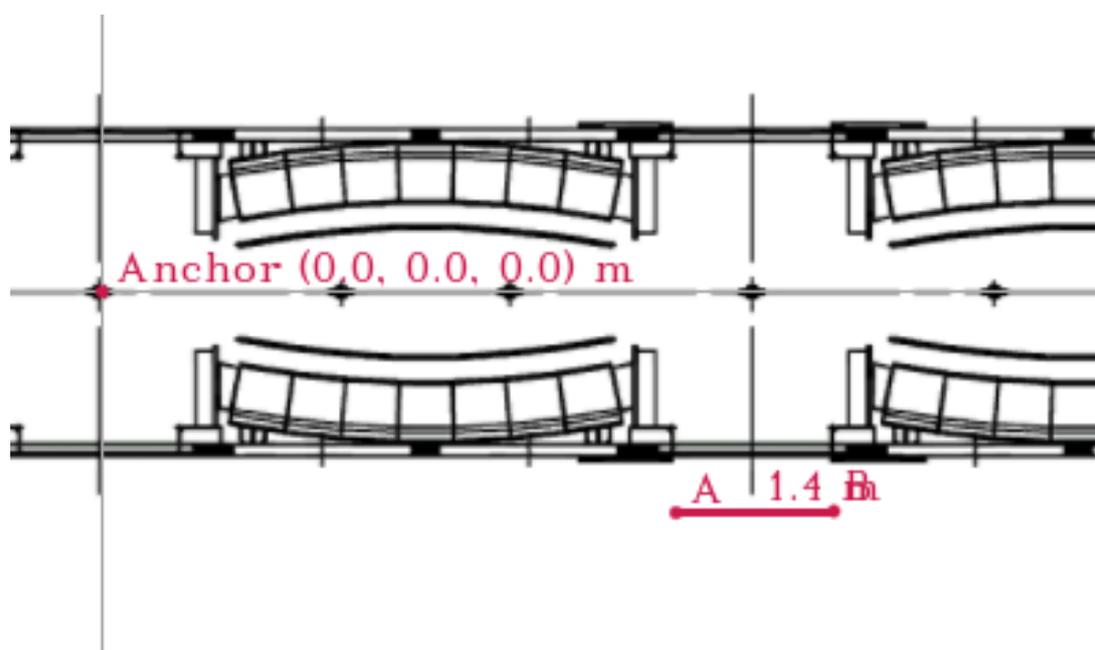


Abb. 4.20: Pathfinder Maßstab¹²⁷

Die Erzeugung der Geometrie, in der sich die Personen bewegen und mit dem Modell interagieren können, gliedert sich in vier Bereiche (**Abb. 4.21**):

- **Nr.1:** Definiert den Stehtbereich im Zug
- **Nr.2:** Definiert den Sitzbereich im Zug
- **Nr.3:** Definiert den Bahnsteig
- **Nr.4:** Definiert die Türen zwischen den Räumen (zwischen den Wagonen)

Nachdem die Software *Pathfinder* für die Simulation von Personen in Gebäuden entwickelt wurde ist, muss bei der Modellbildung für die vorliegende Arbeit eine andere Sichtweise auf den U-Bahnzug genutzt werden. Die Stehfläche (**Nr.1**) für jeden Wagon wurde als ein Raum mit Türen entweder auf den Bahnsteig oder in einen anderen Raum, der ebenfalls wieder ein Wagon ist, dargestellt. Die Türen zwischen den Wagonen können in beide Richtungen benützt werden. Hingegen die Türen zum Bahnsteig sind nur in eine Richtung benützlich. Diese Einstellung ist notwendig, weil, wie in **Kap. 3.4.3** beschrieben, in *Pathfinder* die Bewegung der Agenten durch das Modell mittels Minimierung der individuellen Kostenfunktion für jede Person durchgeführt wird. Jeder Sitzplatz (**Nr.2**) wurde durch einen eigenen Raum dargestellt in dem genau eine

¹²⁷Eigene Darstellung

¹²⁸Eigene Darstellung

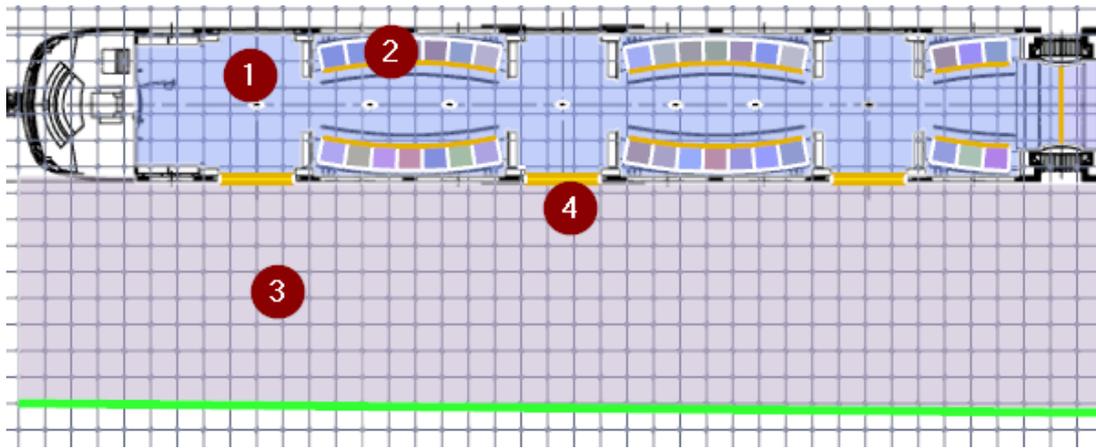


Abb. 4.21: Pathfinder Modellbildung¹²⁸

Person Platz hat. Dieser Raum wird durch eine Türe begrenzt, die nur in Richtung der Stehfläche passiert werden kann. Diese Definition ist notwendig, da Initialpersonen auf den einzelnen Sitzplätzen definiert werden können.

Die physiologischen Eigenschaften der Agenten wurden nach den **Kap 2.1.1** und **Kap. 2.1.3** definiert. Für die Validierung der Software ist nur zwischen den biologischen Geschlechtern mit den dazugehörigen physischen Eigenschaften unterschieden worden. Die prozentuelle Aufteilung dabei ist mit 49,2% Männern und 50,8% Frauen festgelegt. Es wurden keine Altersgruppen mit zugehörigen Gehgeschwindigkeiten angelegt. Als Verteilung wurde für die Körpergröße und Gehgeschwindigkeit eine Normalverteilung herangezogen (siehe **Abb. 2.2** und Weidmann 1995). Damit wurden Mittelwert, Standardabweichung, Minimalwert und Maximalwert als Parameter der einzelnen Agentencharakteristiken definiert. Der Minimal- und Maximalwert der Gehgeschwindigkeit wurde der Summenkurve der Fußgängergeschwindigkeit in Weidmann 1995 entnommen und stellt drei Standardabweichungen dar. Für andere Körpermaße ist diese Annahme laut *DIN 33402-2:2020-12: Ergonomie- Körpermaße des Menschen- Teil2: Werte 2020* nicht zulässig und die Perzentilwerte müssen herangezogen werden. Da *Pathfinder* diese Möglichkeit nicht unterstützt, wurde eine Gleichverteilung mit dem 95% Perzentil für den Maximalwert und das 5% Perzentil für den Minimalwert verwendet. Eine detaillierte Beschreibung der restlichen Parameter sind in **Kap. 3.4.3** zu finden¹²⁹:

Frauen

- **Körpergröße:**
 - Mittelwert μ : 166.9 cm
 - Standardabweichung s : 4.1 cm
 - Minimalwert: 150 cm
 - Maximalwert: 189 cm
- **Schulterbreite:**
 - Minimalwert: 39.5 cm
 - Maximalwert: 48.5 cm

¹²⁹Vgl. Weidmann 1995, S.36

- **Gehgeschwindigkeit:**
 - Mittelwert μ : 1.27 m/s
 - Standardabweichung s : 0.26 m/s
 - Minimalwert: 0.5 m/s
 - Maximalwert: 2.1 m/s
- **Reduzierungsfaktor:** 0.7
- **Form:** zylindrisch
- **Initiale Orientierung:**
 - Mittelwert μ : 180°
 - Standardabweichung s : 60°
 - Minimalwert: 0°
 - Maximalwert: 360°
- **Türwahl:**
 - Momentane Raumreise Zeit: 1.0
 - Momentane Warteschlangenzeit: 1.0
 - Globale Reisezeit: 1.0
 - Momentane Türpräferenz: 35%
 - Momentane Raumdistanzstrafe: 35.0 m
- **Fortgeschritten:**
 - Beschleunigungszeit: 1.1s
 - Vortbestehungszeit: 1.0s
 - Kollisions- Reaktionszeit: 1.5s
 - Langsamkeitsfaktor: 0.1
 - Reduzierungs Faktor: 0.15m
 - Komfortabstand: 0.08m
 - Social Distancing: deaktiviert

Männer

- **Körpergröße:**
 - Mittelwert μ : 178.5 cm
 - Standardabweichung s : 8.2 cm
 - Minimalwert: 150 cm
 - Maximalwert: 189 cm
- **Schulterbreite:**
 - Minimalwert: 44.0 cm
 - Maximalwert: 52.5 cm

- **Gehgeschwindigkeit:**
 - Mittelwert μ : 1.41 m/s
 - Standardabweichung s : 0.26 m/s
 - Minimalwert: 0.5 m/s
 - Maximalwert: 2.1 m/s
- **Reduzierungsfaktor:** 0.7
- **Form:** zylindrisch
- **Initiale Orientierung:**
 - Mittelwert μ : 180°
 - Standardabweichung s : 60°
 - Minimalwert: 0°
 - Maximalwert: 360°
- **Türwahl:**
 - Momentane Raumreise Zeit: 1.0
 - Momentane Warteschlangenzeit: 1.0
 - Globale Reisezeit: 1.0
 - Momentane Türpräferenz: 35%
 - Momentane Raumdistanzstrafe: 35.0 m
- **Fortgeschritten:**
 - Beschleunigungszeit: 1.1s
 - Vortbestehungszeit: 1.0s
 - Kollisions- Reaktionszeit: 1.5s
 - Langsamkeitsfaktor: 0.1
 - Reduzierungs Faktor: 0.15m
 - Komfortabstand: 0.08m
 - Social Distancing: deaktiviert

4.2.3.2 Simulation

Für die Simulation sind unterschiedliche Szenarien entwickelt worden, die mit den software-technischen Einschränkungen umsetzbar sind. Dazu zählt die Simulation eines ganzen Ein- und Ausstiegszyklus mit Sitzplatzwahl der Passagiere. Es wurde in Absprache mit der *Siemens Mobility GmbH* entschieden, dass der Ausstieg aus dem Zug bei unterschiedlichen Auslastungsgraden untersucht werden soll. Dies kann für zukünftige Evakuierungssimulationen von Interesse sein. Die gewählten Auslastungsgrade sind 100%, 80%, 60% und 40%. Bei 100% Auslastung wurde in der Simulation mit einer Personendichte von 4 Personen/ m^2 im Stehbereich gerechnet, die Sitzbereiche wurden bei jedem Auslastungsgrad zu 100% besetzt. Die für die Festigkeitsberechnung nach VDV 152 verwendete Personendichte von 6,66 Personen/ m^2 wurde nicht untersucht.

Aufgrund der unterschiedlichen Layouts für die Zugwagons wird nachstehen für den Kopfwagons die Kurzbezeichnung KN und für die Mittelwagons M verwendet. Die Anzahl an Passagieren kann **Tab. 4.3** entnommen werden.

Tab. 4.3: Belastungsgrad

Auslastungsgrad [%]	Personendichte [Personen/m ²]	KN-Sitzplätze	KN-Stehplätze	M-Sitzplätze	M-Stehplätze
100	4	34	118	38	121
80	3.2	34	94	38	97
60	2.4	34	71	38	73
40	1.6	34	47	38	48

Die Platzierung der Passagiere in den Stehbereichen geschah zufällig, es wurde lediglich die Anzahl pro Wagon festgelegt. Anschließend sind die Sitzbereiche mit Passagieren besetzt worden. Beide Definition folgen der demographischen Verteilung österreichs. Anschließend ist beispielhaft in **Abb. 4.22** die Simulatuion zum Zeitpunkt = 0 dargestellt. Alle weiteren sind **Kap. 6** zu entnehmen.

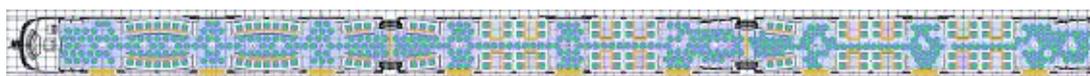


Abb. 4.22: Pathfinder Auslastung %100¹³⁰

Die Simulation ist anschließend für alle Auslastungsgrade definiert und durchgeführt worden. Dabei sind der mittels Monte Carlo Methode (siehe **Kap. 2.3**) die definierten Parameter mit ihren Verteilungsfunktionen für jeden Auslastungsgrad über fünf Simulationsdurchgänge variiert worden. Die Monte Carlo Simulation in *Pathfinder* kann nicht über die GUI der Software aufgerufen werden, sonder muss über die *Command Prompt* des Betriebssystems erfolgen. Die Erstellung der Variationen erfolgt in drei Schritten:¹³¹

- 1 Ausführen von `<montecarlo_createcases.bat><pathfinder filename><number of variations><addl.opts>`. *Number of variations* gibt die Anzahl an Simulationsdurchgängen an und beträgt in diesem Fall fünf. Mit *addl.opts* werden Ausnahmen für die Simulation definiert (z. B. Passagiere aus einem gewissen Bereich sollen ausgeschlossen werden)
- 2 Ausführen der Simulationen durch doppel- klick der Datei `__run.bat`
- 3 Die Ergebnisse können anschließen mit dem Ausführen von `__results.bat` aufgerufen werden.

Die Ausgabe im *Command Prompt* ist in **Abb. 4.23** zu sehen.

Die drei Status hinter jedem definierten Passagier im Modell geben folgende Information:

- **Include:** Der Passagier ist in die Zufallszuteilung der Simulation inkludiert.
- **Rng Pos:** Die Postion des Passagiers wird zufällig geändert.
- **Rng Props:** Das Passagierprofil und Verhalten wird zufällig geändert.

¹³⁰Eigene Darstellung

¹³¹Vgl. *Monte Carlo User Manual* 2020, S.2ff

¹³²Eigene Darstellung

```

C:\Program Files\Pathfinder 2020>montecarlo_createcases.bat C:\Users\mathias.denk\Desktop\Pathfinder_Montecarlo\Modell.pth 5
Id                Include  Rng Pos  Rng Props
Occupants/AddToRoomToo1_02/00051  yes     yes     yes
Occupants/AddToRoomToo1_03/00052  yes     yes     yes
Occupants/AddToRoomToo1_05/00053  yes     yes     yes
Occupants/AddToRoomToo1_06/00054  yes     yes     yes
Occupants/AddToRoomToo1_07/00055  yes     yes     yes
Occupants/AddToRoomToo1_08/00056  yes     yes     yes
Occupants/AddToRoomToo1_09/00057  yes     yes     yes
Occupants/AddToRoomToo1_10/00058  yes     yes     yes
Occupants/AddToRoomToo1_11/00059  yes     yes     yes
Occupants/AddToRoomToo1_12/00060  yes     yes     yes
Occupants/AddToRoomToo1_13/00061  yes     yes     yes
Occupants/AddToRoomToo1_14/00062  yes     yes     yes
Occupants/AddToRoomToo1_15/00063  yes     yes     yes
Occupants/AddToRoomToo1_16/00064  yes     yes     yes

```

Abb. 4.23: Pathfinder Command Prompt¹³²

4.2.3.3 Ergebnisse

Zur Auswertung der Ergebnisse ist für jeden Auslastungsgrad der Mittelwert und die Standardabweichungen aus den fünf Simulationsdurchgängen für die Ausstiegszeit und den Personenfluss pro Türe berechnet worden. In Folge ist der Prozess mit 100% Auslastung aufgeführt, alle weiteren Ergebnisse sind **Kap. 6** zu entnehmen.

Tab. 4.4: Auswertung 100% Auslastung

Bezeichnung	Wert [Pers.]	Standardabweichung [Pers.]
KN-M1	12	3.67
M1-M2	12.8	2.68
KN-1	46.8	1.3
KN-2	50.2	0.8
KN-3	55.2	1.8
M1-1	53.6	1.9
M1-2	53.8	2.6
M1-3	53.8	2.4
M2-1	53.4	2.3
M2-2	52.4	1.1
M2-3	50.8	1.3
Ausstiegszeit [s]		39.42

Der Kopfwagen ist mit KN und die Mittelwägen sind mit M in der **Tab. 4.4** bezeichnet. Die erste Nummer gibt den Wagen und die zweite die Türe an. Die Nummerierung ist von links nach rechts aufsteigend. KN-M sind die Werte für den Austausch an Passagieren zwischen den Wagons. Durch Division mit der mittleren Ausstiegszeit erhält man den Personenfluss pro Türe (siehe **Abb. 4.24**).

Durch die geringe Schwankungsbreite zwischen den Türen kann davon ausgegangen werden, dass der modellierte Bahnsteig keinen Einfluss auf das Ausstiegsverhalten der Passagiere hat. Nach Zusammenfassung der Ergebnisse (siehe **Abb. 4.25a** und **Abb. 4.25b**) in ein Diagramm für die unterschiedlichen Auslastungsgrade zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Auslastungsgrad und Ausstiegszeit mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 97\%$.

¹³³Eigene Darstellung

¹³⁴Eigene Darstellung

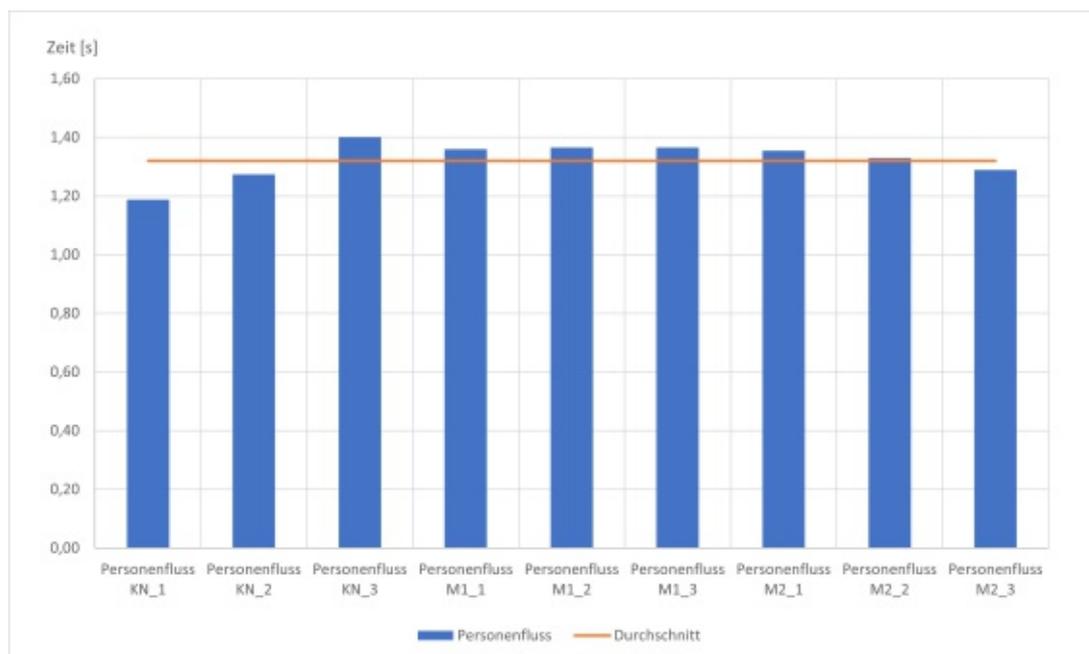


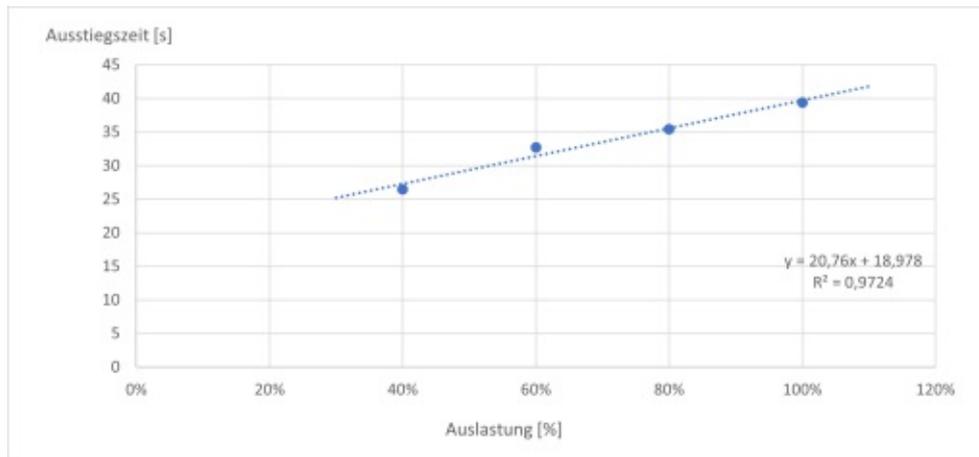
Abb. 4.24: Personenfluss pro Türe¹³³

Vergleicht man die Werte mit den empirisch erhobenen von Panzera 2014 ergibt sich bei 20 Fahrgästen, die den Zug verlassen, ein Unterschied von 8,42 s¹³⁵. Der theoretische Wert aus dem Modell wurde durch das Einsetzen in die lineare Regression aus **Abb. 4.25a** errechnet. Ein Auslastungsgrad von 40% entspricht einer mittleren Personenzahl von 28 pro Türe. Deshalb wurde mit der Linearen Regression aus **Abb. 4.25a** gearbeitet, um auf 20 Personen pro Türe zu kommen. Die Abweichung hängt mit der Annahme der Modellparameter zusammen. Wird z. B. der Wert der Gehgeschwindigkeit auf 1.5 m/s erhöht, decken sich die Ausstiegszeiten des Modells mit denen von Panzera 2014. Allerdings kann diese Geschwindigkeit in der Realität innerhalb der U-Bahn aufgrund der Passagierdichte und der physischen Umgebung nicht erreicht werden.

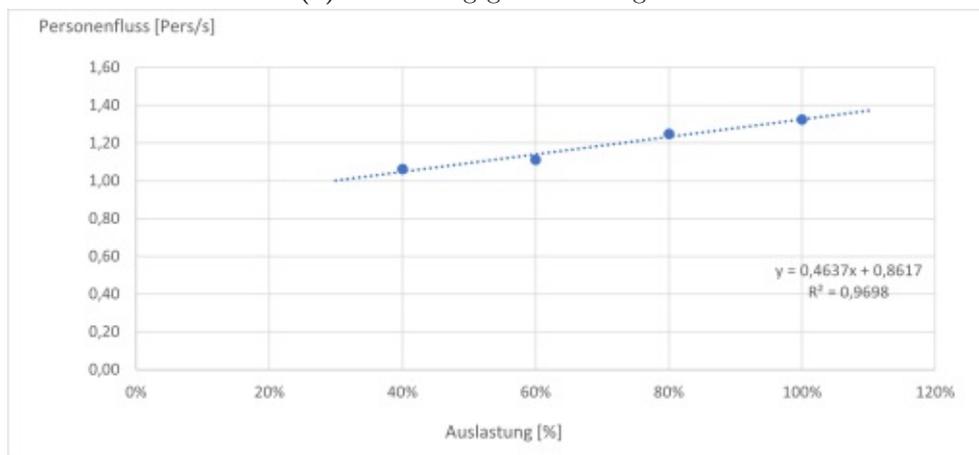
Die unterschiedlichen Passagierformationen beim Aussteigen (siehe **Kap. 2.1.5**) sind mit dem Modell gut abbildbar, wie in **Abb. 4.26** zu sehen ist.

¹³⁵Vgl. Panzera 2014, Tabelle 2

¹³⁵Eigene Darstellung



(a) Auslastungsgrad-Ausstiegszeit



(b) Auslastungsgrad-Personenfluss

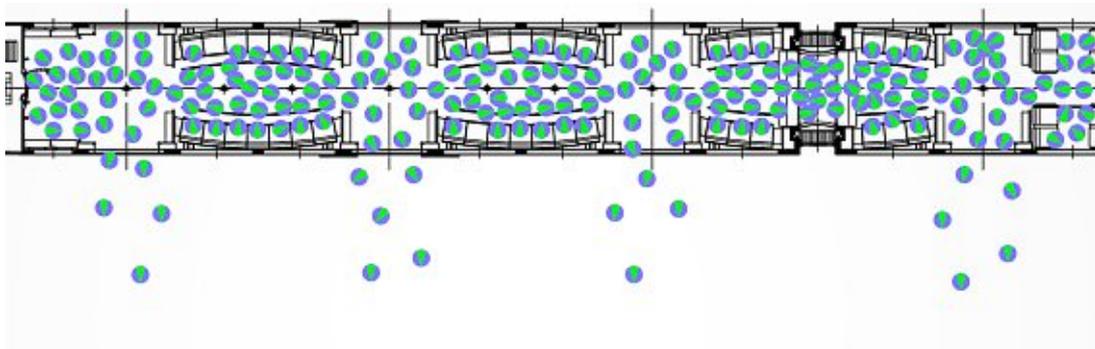
Abb. 4.25: Ausstiegszeit und Personenfluss¹³⁴

Abb. 4.26: Pathfinder Ausstiegsverhaltenfootnotemark

Kapitel 5

Conclusio

5.1 Zusammenfassung der Methode und Auswertung des Modells

Ziel der Arbeit war es herauszufinden, ob das Ein- und Ausstiegsverhalten von Passagieren in öffentlichen Verkehrsmitteln und im Speziellen in der U-Bahn mit Hilfe der am Markt verfügbaren Simulationssoftwareprodukten abbildbar ist und falls dies möglich ist, ob die ausgegebenen Ergebnisse mit den Zahlen in der Literatur übereinstimmen. Außerdem sollte die Auswirkung des Layouts des Wagons auf die Ein- und Ausstiegszeiten ermittelt werden.

Um dies erheben zu können, wurde wie folgt vorgegangen:

Nachdem die verfügbaren Softwareprodukte gesichtet und mit Hilfe einer Auswertungstabelle (siehe **Tab. 3.1**) miteinander verglichen wurden, stellte sich heraus, dass von den 7 zur Auswertung herangezogenen nur 3 Programme näher in Betracht gezogen werden konnten (siehe **Kap. 3.1**). Diese waren **Anylogic**, **Pathfinder** und **PTV Vissim & Visswalk**.

Um die ausgewählten Softwareprodukte auszuwerten, wurde ein Modell konzipiert und dieses in jeder Software implementiert. Für das Modell wurde, in Absprache mit der *Siemens Mobility GmbH*, das Layout der neuen U-Bahn München (C2) gewählt. Zwei Gründe waren dafür ausschlaggebend, einerseits handelt es sich um ein öffentliches Projekt und alle Daten sind online verfügbar und andererseits konnte aufgrund der Ähnlichkeit des Layouts ein Vergleich mit den empirisch aufgenommenen Daten von Panzera 2014 durchgeführt werden.

PTV Viswalk & Vissim

Im Zuge der Erlernung des Programms hat sich gezeigt, dass *PTV- Vissim & Viswalk* für die Simulation von Passagierflüssen für das Ein- und Aussteigen von U-Bahnen nicht geeignet ist. Die Verkehrsmittel können nur als *Blackbox* im Modell abgebildet werden. Die Passagiere betreten und verlassen das gewählte Verkehrsmittel ohne dass der Innenraum einen Einfluss auf das Ein- und Ausstiegsverhalten hat. Dieses wurde auch von *PTV* bestätigt.

Anylogic

Für die Simulationen in dieser Arbeit ist der agentenbasierte Ansatz gewählt worden. Anylogic basiert wie *PTV Viswalk* auf dem *Social Force* Ansatz für die Fußgängersimulation. Für die Simulation sind zwei Szenarien untersucht worden. Die Ausstiegszeit von 20 Personen pro Türe und die Einstiegszeit von 5 Personen pro Türe. Für jedes Szenario sind fünf Simulationsdurchgänge durchgeführt worden und der Mittelwert, sowie die Standardabweichung pro Türe berechnet worden. Die Daten sind mittels Zeitplots und Durchflussmessung pro Türe ermittelt worden.

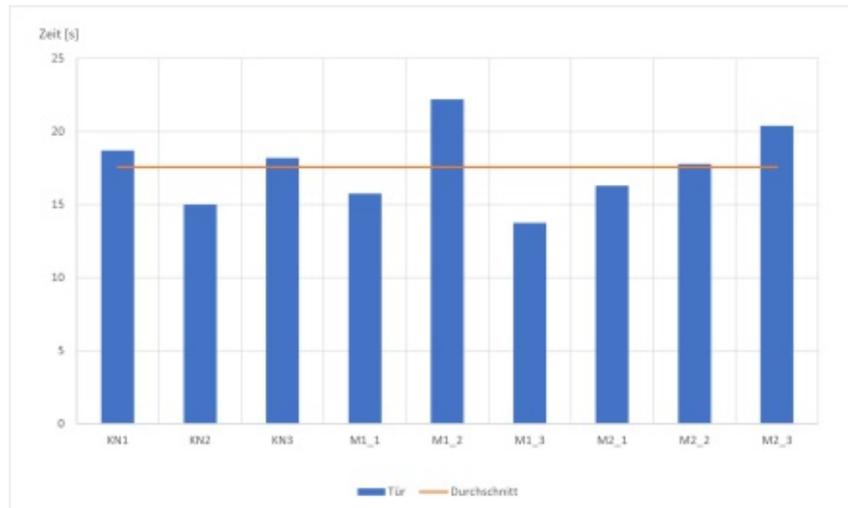


Abb. 5.1: Anylogic-Ausstiegszeit¹³⁶

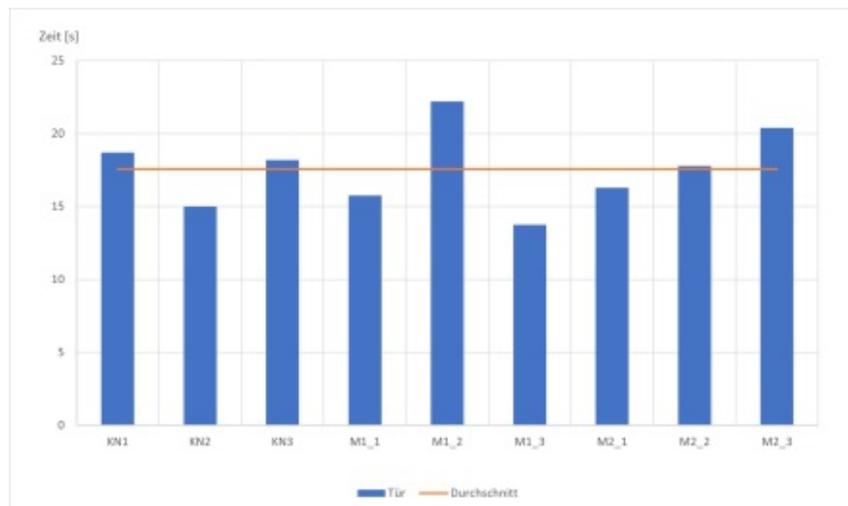


Abb. 5.2: Anylogic-Einstiegszeiten¹³⁷

Abb. 5.1 zeigt die Verteilung der Ausstiegszeiten pro Türe. Der Mittelwert beläuft sich auf 17.57 s mit einer Standardabweichung von 2.52 s. Vergleicht man diesen Wert mit der reinen Ausstiegszeit von Panzera 2014, ergibt sich eine Differenz von 1.05 s. Für das Einsteigen ergibt sich die Verteilung, welche in Abb. 5.2 ersichtlich ist. Der Mittelwert über alle Türen ist 6.75 s mit einer Standardabweichung von 1.22 s und damit liegt eine Differenz von 1.22 s zu den Werten von Panzera 2014 vor. Das Layout des Kopfwagens ist für eine erhöhte Passagieraufkommen entwickelt worden. Das widerspricht den erhöhten Zeitwerten im vorderen Zugteil. Für die Mittelwägen ist der Umkehrschluss zu betrachten. Hier bedarf das Modell einer Anpassung¹³⁸. Die theoretischen Werte der Gehgeschwindigkeit nach Weidmann 1995 werden im Modell nur an jenen Stellen erreicht, wo die Personen sich frei im Modell bewegen können (z. B. Bahnsteig). Ansonsten sind die Gehgeschwindigkeiten, welche durch eine Funktion abhängig von der Passagierdichte und der

¹³⁶Eigene Darstellung

¹³⁷Eigene Darstellung

¹³⁸Vgl. Panzera 2014, Tabelle 2

physischen Umgebung für jeden Passagier definiert sind, geringer als jene bei Weidmann 1995

Der zyklische Ein- und Ausstiegsprozess konnte im Zuge der Simulation nicht abgebildet werden. Dafür ist eine Anpassung des Modells notwendig. Unterschiedliche Passagieranordnungen (parallel, versetzt und einzeln) konnten im Modell nachgewiesen werden.

Pathfinder

Bei Pathfinder handelt es sich ebenso um einen agentenbasierten Simulator von menschlichen Bewegungen im Raum.

Im Gegensatz zu Anylogic und PTV Viswalk & Vissim wird die Bewegung der Personen in Pathfinder über die Minimierung einer Kostenfunktion durchgeführt.

Aufgrund der softwaretechnischen Einschränkungen sind vier Szenarien (100%, 80%, 60% und 40% Auslastung) für den Ausstieg aus dem Zug festgelegt worden. Mittels Monte Carlo Simulation mit fünf Simulationsdurchgängen pro Auslastungsgrad ist der Mittelwert und Standardabweichung für das Entleeren des Zuges ermittelt worden. Die Werte sind in **Abb. 5.3** dargestellt. Bei einem Auslastungsgrad von 40% ist die mittlere Personenzahl 28. Deshalb wurde für den Vergleich mit Panzera 2014 die Ausstiegszeit für 20 Personen mit der erhaltenen linearen Regression berechnet. Die Differenz zu Panzera 2014 beträgt 8.42 s. Für eine weitere Validierung der Software ist eine Anpassung der Modellparameter notwendig¹³⁹. Wird z. B. die Gehgeschwindigkeit auf 1.5 m/s im Modell korrigiert, können die Werte von Panzera 2014 erreicht werden. Diese Geschwindigkeit kann in der Realität, aufgrund der Passagierdichte und der physischen Umgebung, nicht erreicht werden.

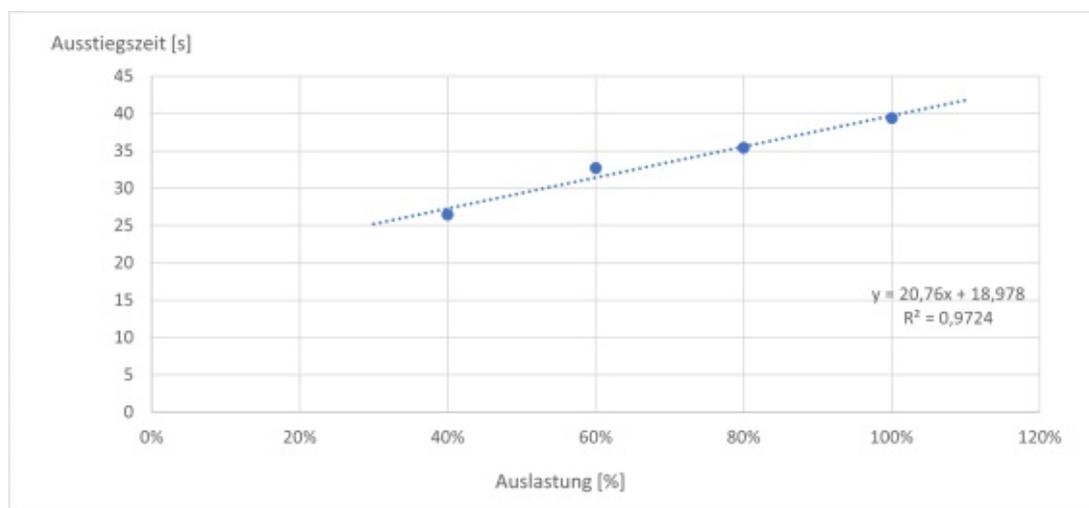


Abb. 5.3: Auslastungsgrad-Ausstiegszeit

Passagieranordnungen (parallel, versetzt und einzeln) sind in der Simulation beobachtbar. Aufgrund der ausschließlichen Verwendung für den Ausstieg von Fahrgästen ist eine Weiterentwicklung, welche auch den Einstieg von Passagieren umfassen würde, auszuschließen.

¹³⁹Vgl. Panzera 2014, Tabelle 2

¹³⁹Eigene Darstellung

5.2 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die Zahlen, welche in der angegebenen Literatur erhoben wurden, stimmen mit den Ergebnissen der Simulationen des Ein- und Ausstiegsprozesses in Anylogic und Pathfinder überein.

Allerdings ist anzumerken, dass ausschließlich das Softwareprodukt Anylogic dafür geeignet ist, das Verhalten der Passagiere innerhalb des U-Bahnzuges und den zyklischen Fahrgastwechsel abzubilden und darzustellen, während sich das Produkt Pathfinder einzig für Evakuierungsszenarien eignet.

Die agentenbasierte Modellierung hat sich, um das Verhalten der Passagiere darzustellen, als die geeignete Methode erwiesen und auch der mikroskopische Ansatz hat sich als zielführend herausgestellt.

Die Einbettung der Monte Carlo Simulation ist ein notwendiger Schritt um die statistische Auswertung zu ermöglichen.

Auch lassen sich Passagieranordnungen während des Ein- und Ausstiegs in den Simulationen sowohl in Pathfinder, als auch in Anylogic feststellen, welche mit der in der Literatur angegebenen Formationen deckungsgleich sind.

In den ausgeführten Simulationen konnten kaum Unterschiede in den Ein- und Ausstiegszeiten der Passagiere zwischen den verschiedenen Wagonlayouts festgestellt werden. Obwohl anzunehmen ist, dass U-Bahnwagons mit Längsbestuhlung kürzere Fahrgastwechselzeiten aufweisen würden, hat die Simulation diese Annahme nicht widerspiegelt. Daher muss das Modell und in weiterer Folge die Simulation dahingehend angepasst werden, dass die Ergebnisse diesbezüglich die Realität abbilden.

Diese Arbeit hat die Fragen, ob es möglich ist die Realität mit den verfügbaren Softwareprodukten zu simulieren und wie akkurat die erhaltenen Ergebnisse sind, beantworten können, allerdings soll dies nur den ersten Schritt darstellen.

Durch Anpassung der Parameter, durch Einbettung verschiedener Layouts der U-Bahnzüge und dem Einbeziehen vom Einfluss der Bahnsteiggestaltung auf das Verhalten der Passagiere können die Modelle und Simulationen noch akkurater werden.

5.3 Ausblick

Für die Simulation von Evakuierungen können mit Pathfinder weitere Versuche durchgeführt werden, vor allem hinsichtlich zukünftig geforderter Standards (z. B. SFPE). Hierfür müssen die in dieser Arbeit angenommenen Parameter weiter angepasst und mit empirischen Werten verglichen werden.

Die Modellbildung mit Anylogic konnte aufgrund der Vielzahl an Möglichkeiten nur zum Teil in die Modellbildung eingearbeitet werden. Verbesserungen bestehen im Bereich der Modellierung hinsichtlich:

- Ein- und Aussteigezyklus
- Sitzplatzwahl
- Gruppenbildung
- Gepäckmitnahme
- Behinderungen
- Verhalten am Bahnsteig in unterschiedlichen Kulturkreisen

- Verteilung der Fahrgäste am Bahnsteig
- Einfluss von Bahnsteigtüren
- Bahnsteiggestaltung

Diese Aufzählung stellt nur einen Bruchteil der Möglichkeiten, die Modelle und Simulationen anzupassen und zu verbessern, dar.

Computerunterstützte Simulationen sind in jedem Fall ein hilfreiches Tool um den öffentlichen Nahverkehr sicherer und flüssiger zu gestalten und die passagierzentrierte Sichtweise in den Vordergrund zu stellen.

Literatur

- Anylogic (2020a). *AnyLogic Help*. URL: <https://help.anylogic.com/index.jsp> (Zugriff am 09.12.2020).
- (2020b). *AnyLogic Pedestrian Library*. URL: <https://www.anylogic.com/resources/libraries/pedestrian-library/> (Zugriff am 09.12.2020).
 - (2020c). *Multimethod Simulation Modeling for Business Application*. URL: <https://www.anylogic.com/resources/white-papers/multimethod-simulation-modeling-for-business-applications/> (Zugriff am 12.08.2020).
- Borshchev, A. (2013). *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6*. AnyLogic North America. ISBN: 9780989573177. URL: <https://books.google.at/books?id=2c5FnwEACAAJ>.
- Bruckner, M. (2014). „Agentenbasierte Simulation von Personenströmen mit unterschiedlichen Charakteristiken“. Dissertation. Technische Universität Wien.
- Demographische Indikatoren* (17. Aug. 2020). URL: https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/demographische_indikatoren/index.html.
- DIN 33402-2:2020-12: Ergonomie- Körpermaße des Menschen- Teil2: Werte* (Dez. 2020). Wien: Austrian Standards.
- Eigner, T. (2014). *Fahrgastverteilung im U-Bahn-Verkehr*. Diplomarbeit.
- Evolution of adult height over time* (20. Juli 2020). URL: <https://www.ncdrisc.org/index.html>.
- Fiebag, T. (2019). *Innenraumgestaltung für S-Bahn Fahrzeuge am Beispiel der S-Bahn München*. Diplomarbeit.
- Gao, L. und L. Jia (Dez. 2016). „Modeling and Simulation of Passenger Flow Distribution in Urban Rail Transit Hub Platform“. In: *Preprints*. DOI: 10.20944/preprints201609.0085.v2.
- Harris, N., Ø. Risan und Schrader (Apr. 2014). *The Impact of Differing Door Widths on Passenger Movement Rates*. DOI: 10.2495/CRS140051.
- Hart, P., N. Nilsson und B. Raphael (Dez. 1972). „A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths“. In: *Intelligence/sigart Bulletin - SIGART 37*, S. 28–29. DOI: 10.1145/1056777.1056779.
- Helbing, D. und P. Molnar (Mai 1998). „Social Force Model for Pedestrian Dynamics“. In: *Physical Review E* 51. DOI: 10.1103/PhysRevE.51.4282.
- Johansson, A., D. Helbing und P. K. Shukla (Dez. 2007). „Specification of the Social Force Pedestrian Model by Evolutionary Adjustment to Video Tracking Data.“ In: *Advances in Complex Systems* 10, S. 271–288. DOI: 10.1142/S0219525907001355.
- Johnson, G. (2006). „Smoothing a Navigation Mesh Path“. In: *AI Game Programming Wisdom 3*, S. 129–139.
- Kim, H., S. Kwon, S. K. Wu und K. Sohn (2014). „Why do passengers choose a specific car of a metro train during the morning peak hours?“ In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 61, S. 249–258. ISSN: 0965-8564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.02.015>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856414000469>.
- Kitzler, F. (2016). *Analyse von agentenbasierten modellen mithilfe von Markovketten*. Diplomarbeit.

- Kubanik, M. (2017). *Fahrgastverteilung in urbanen Nahverkehrsmitteln der Städte Wien und Graz*. Diplomarbeit.
- Macal, C. M. und M. J. North (2009). „Agent-based modeling and simulation“. In: *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)*, S. 86–98. DOI: 10.1109/WSC.2009.5429318.
- Monte Carlo User Manual* (2020). Thunderhead Engineering. 403 Poyntz Avenue, Suite B Manhattan, KS 66502, USA.
- Panzer, N. (2014). *Die Haltezeit bei hochrangigen, innerstädtischen Verkehren*. Diplomarbeit.
- Technical Reference* (2017). Thunderhead Engineering. 403 Poyntz Avenue, Suite B Manhattan, KS 66502, USA.
- Theis, C. und W. Kernbichler (2021). *Grundlagen der Monte Carlo Methode*. URL: <https://itp.tugraz.at/MML/MonteCarlo/MCIntro.pdf> (Zugriff am 11.02.2021).
- Tomasz, S., S. Ángel, W. Li und K. MariAnne (2014). „Application of agent based simulation for evaluating a bus layout design from passengers’ perspective“. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 43. Special Issue with Selected Papers from Transport Research Arena, S. 222–229. ISSN: 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.11.009>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X13002362>.
- Tordeux, A., G. Lämmel, F. S. Hänseler und B. Steffen (2018). „A mesoscopic model for large-scale simulation of pedestrian dynamics“. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 93, S. 128–147. ISSN: 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.05.021>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X18307228>.
- Twarogowska, M., P. Goatin und R. Duvigneau (2014). „Comparative Study of Macroscopic Pedestrian Models“. In: *Transportation Research Procedia* 2. The Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2014 (PED 2014), 22-24 October 2014, Delft, The Netherlands, S. 477–485. ISSN: 2352-1465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.09.063>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146514000994>.
- U-Bahn München* (2020). URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:d82c503e-7f68-42a4-bd2f-2afed7e12530/325-200562-db-ubahn-muenchen-de-200630-online.pdf> (Zugriff am 11.04.2020).
- User Manual* (2014). Thunderhead Engineering. 403 Poyntz Avenue, Suite B Manhattan, KS 66502, USA.
- User Manual* (2020). PTV AG. Haid-und-Neu-Str.15, 76131 Karlsruhe, Germany.
- Verteilung der Körpergrößen nach Geschlecht im Jahr 2006* (20. Juli 2020). URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1825/umfrage/koerpergroesse-nach-geschlecht/>.
- Weidmann, U. (Juni 1995). „Grundlagen zur Berechnung der Fahrgastwechselzeit“. In: *Schriftreihe des IVT* 106.
- Zahlen, Daten, Fakten: 2019* (Juni 2020). URL: https://www.wienerlinien.at/media/files/2020/wl_betriebsangaben_2019_deutsch_358274.pdf (Zugriff am 12.09.2020).
- Zhang, H., H. Liu, X. Qin und B. Liu (2018). „Modified two-layer social force model for emergency earthquake evacuation“. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 492, S. 1107–1119. ISSN: 0378-4371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.11.041>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437117311172>.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Altersverteilung in Österreich	14
2.2	Körpergrößenverteilung in Deutschland	14
2.3	Gehgeschwindigkeitsabhängigkeiten	16
a	Gehgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Alters	16
b	Gehgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Tageszeit	16
c	Gehgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Fußgängeranlage	16
d	Gehgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Fußgängerdichte	16
2.4	Schulterbreite	17
2.5	Fahrgastwechselkonfigurationen	17
a	Fahrgastwechsel alleine	17
b	Fahrgastwechsel parallel	17
c	Fahrgastwechsel versetzt	17
d	Fahrgastwechsel gleichzeitig	17
2.6	Passagierverteilung am Bahnsteig	18
2.7	Stehplatz-Sitzplatz Verteilung	19
a	Stehplatz-Sitzplatz-V-Wagen	19
b	Stehplatz-Sitzplatz-T-Wagen	19
2.8	Sitzplatzverteilung V-Wagen	20
2.9	Sitzplatzverteilung T-Wagen	20
2.10	Vergleich mesoskopisches Modell	22
2.11	Pedestrian Dynamics	24
2.12	Zell Geometrie	24
2.13	Nachbarschaften	25
a	Von Neumann Nachbarschaft	25
b	Moore Nachbarschaft	25
2.14	Floor Field	25
2.15	Wahrscheinlichkeitsmatrix	26
2.16	Agent	26
2.17	Lieferkettenmodell	27
3.1	PTV Geschwindigkeitsverteilung	32
3.2	PTV Pedestrian Object Types	33
3.3	Anylogic Methodiken	34
3.4	Anylogic System Dynamics	34
3.5	Anylogic Discret Event Modeling	35
3.6	Anylogic Markup	36
3.7	Anylogic Building Blocks	37
3.8	Pathfinder Path Generation	38
3.9	Pathfinder Werkzeuge	40
3.10	Pathfinder Mesh	41
4.1	U-Bahn München Innenraum	42

4.2	U-Bahn München Technische Daten	43
4.3	U-Bahn München Layout	43
4.4	Ausstiegszeit und Personenfluss	45
	a Anylogic Modell KN	45
	b Anylogic Modell M	45
4.5	Anylogic Logik	47
4.6	Anylogic-Exit1	47
4.7	Anylogic-Exit2	48
4.8	Anylogic-Exit3	49
4.9	Anylogic-Exit4	49
4.10	Anylogic-Exit5	49
4.11	Anylogic-ToPlatformAndBoard	50
4.12	Anylogic-Entry	51
4.13	Anylogic-Underground	51
4.14	Anylogic-Simulation	52
4.15	Personenfluss pro Wagon und Türe	53
	a Anylogic-Auswertung KN	53
	b Anylogic-Auswertung M1	53
	c Anylogic-Auswertung M2	53
4.16	Anylogic-Ausstiegszeit	54
4.17	Anylogic-Einstiegszeiten	56
4.18	Anylogic-Ein- und Aussteigen	56
4.19	Ein- und Ausstiegsanordnungen	56
	a Anylogic-Einzel Ausstieg	56
	b Anylogic-Paralleler Ausstieg	56
	c Anylogic-Versetzter Ausstieg	56
4.20	Pathfinder Maßstab	57
4.21	Pathfinder Modellbildung	58
4.22	Pathfinder Auslastung 100	61
4.23	Pathfinder Command Prompt	62
4.24	Personenfluss pro Türe	63
4.25	Ausstiegszeit und Personenfluss	64
	a Auslastungsgrad-Ausstiegszeit	64
	b Auslastungsgrad-Personenfluss	64
4.26	Pathfinder Ausstiegsverhalten	64
5.1	Anylogic-Ausstiegszeit	66
5.2	Anylogic-Einstiegsszeiten	66
5.3	Auslastungsgrad-Ausstiegszeit	67
6.1	Personenfluss pro Türe-Model2	75
6.2	Personenfluss pro Türe-Model3	76
6.3	Personenfluss pro Türe-Model4	77

Tabellenverzeichnis

3.1	Software	31
4.1	Ausstiegszeiten für 20 Personen	54
4.2	Einstiegszeiten für 5 Personen	55
4.3	Belastungsgrad	61
4.4	Auswertung 100% Auslastung	62
6.1	Auswertung 80% Auslastung	75
6.2	Auswertung 60% Auslastung	76
6.3	Auswertung 40% Auslastung	77

Kapitel 6

Anhang

6.1 Pathfinder

6.1.1 Model 80%

Tab. 6.1: Auswertung 80% Auslastung

Bezeichnung	Wert [Pers.]	Standardabweichung [Pers.]
KN-M1	13.8	2.28
M1-M2	13.6	1.52
KN-1	37.8	1.3
KN-2	41.2	2.17
KN-3	47.6	2.51
M1-1	46.8	1.48
M1-2	43.8	1.30
M1-3	45.8	1.30
M2-1	46.4	1.14
M2-2	46.2	1.30
M2-3	42.4	1.52
Ausstiegszeit [s]		35.43

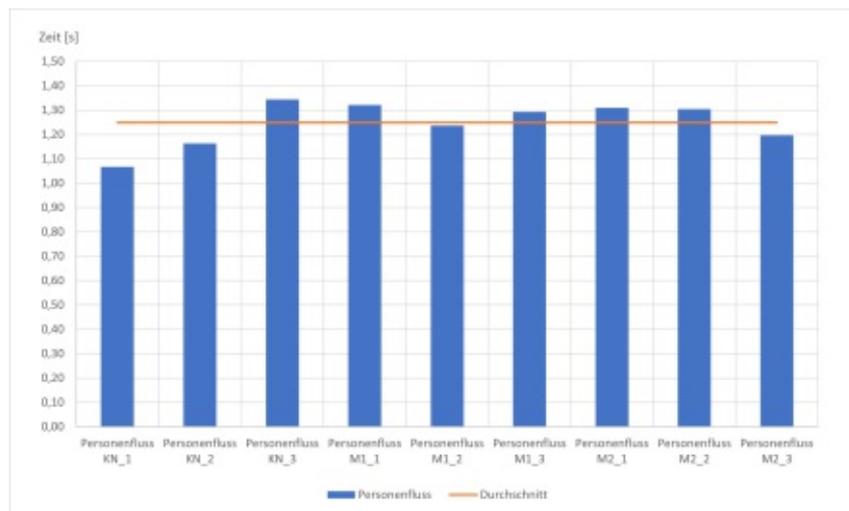


Abb. 6.1: Personenfluss pro Türe-Model2¹⁴⁰

6.1.2 Model 60%

Tab. 6.2: Auswertung 60% Auslastung

Bezeichnung	Wert [Pers.]	Standardabweichung [Pers.]
KN-M1	11.6	2.3
M1-M2	11.4	0.89
KN-1	29	0.70
KN-2	33.4	1.52
KN-3	38.4	1.34
M1-1	40.6	2.19
M1-2	41.2	1.48
M1-3	36.6	2.51
M2-1	35.2	2.16
M2-2	36.8	1.30
M2-3	35.8	1.64
Ausstiegszeit [s]		32.73

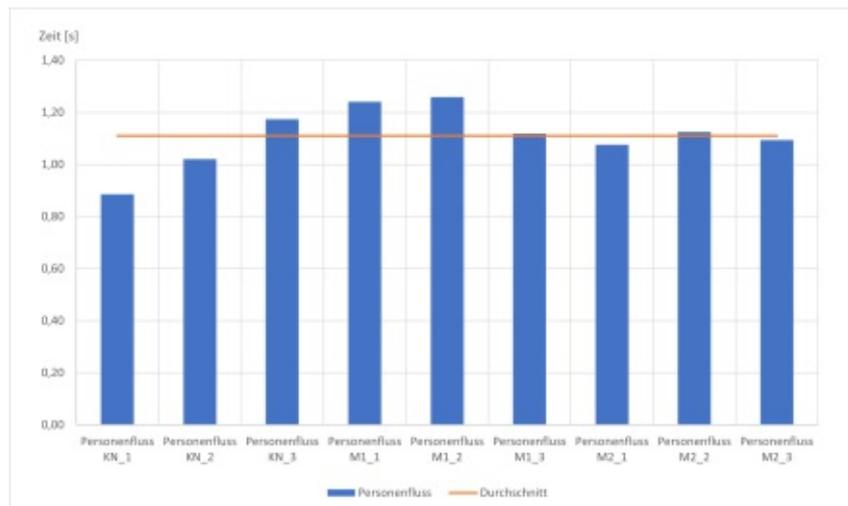


Abb. 6.2: Personenfluss pro Türe-Model3¹⁴¹

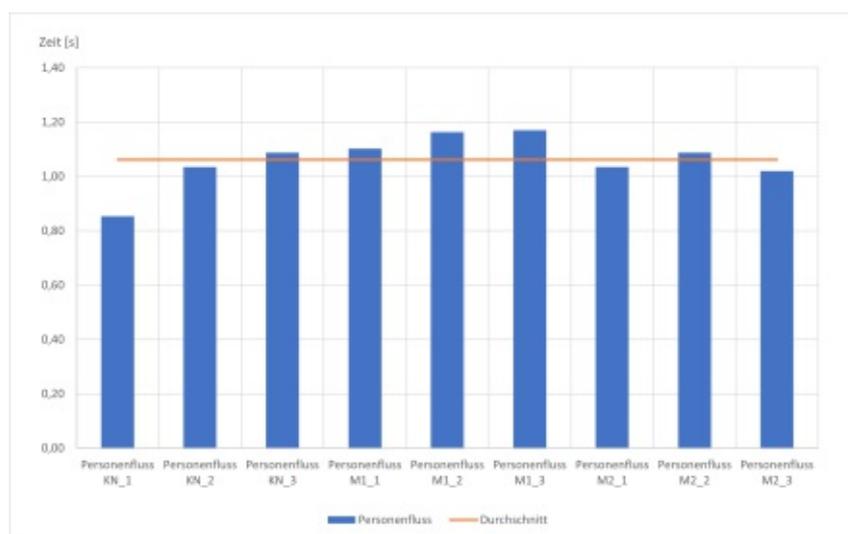
¹⁴⁰Eigene Darstellung

¹⁴¹Eigene Darstellung

6.1.3 Model 40%

Tab. 6.3: Auswertung 40% Auslastung

Bezeichnung	Wert [Pers.]	Standardabweichung [Pers.]
KN-M1	10.2	2.3
M1-M2	10.8	0.89
KN-1	22.6	0.70
KN-2	27.4	1.52
KN-3	28.8	1.34
M1-1	29.2	2.19
M1-2	30.8	1.48
M1-3	31	2.51
M2-1	27.4	2.16
M2-2	28.8	1.30
M2-3	27	1.64
Ausstiegszeit [s]		26.48

Abb. 6.3: Personenfluss pro Türe-Model4¹⁴²¹⁴²Eigene Darstellung