

# Modellierung des Zeitbedarfs für Verkehrshalte im spurgeführten Personenverkehr



Johannes Uhl

Neues verkehrswissenschaftliches Journal

---

**Ausgabe 33**



# **Modellierung des Zeitbedarfs für Verkehrs- halte im spurgeführten Personenverkehr**

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

Vorgelegt von

Johannes Uhl  
aus Aalen, Deutschland

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Ullrich Martin

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Alois Weidmann

Tag der mündlichen Prüfung: 10.09.2021

Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart

2021

© 2022 Verkehrswissenschaftliches Institut an der Universität Stuttgart e.V.,  
Johannes Uhl

Titelbild: Johannes Uhl

Herstellung und Verlag: BoD – [Books on Demand](#), Norderstedt

Printed in Germany

ISBN 978-3-7557-6497-7

## **Vorwort**

Durch die aktuelle Entwicklung der Eisenbahnsicherungstechnik, wie z.B. in Form von ETCS Level 2 mit Hochleistungsblock, werden, neben den Weichen in der Fahrwegssicherung, die Fahrgastwechselzeiten während der Verkehrshalte zunehmend zum dominierenden Kriterium für die Mindestzugfolgezeiten und damit für die Leistungsfähigkeit hochbelasteter Infrastrukturen. Auch wächst der Einfluss der Fahrgastwechselzeiten auf die Betriebsqualität bzw. Pünktlichkeit mit deutlich zunehmendem Reisendenaufkommen insbesondere im SPNV und S-Bahn-Verkehr.

Dementsprechend ist eine hinreichend belastbare Prognose der vom Reisendenaufkommen abhängigen Verkehrshaltezeiten sowohl bei der Fahrplankonstruktion als auch im laufenden Betrieb bei der Disposition aktuell von hoher Relevanz. Für eine derartige Prognose existieren auch im internationalen Umfeld bereits mehrere Modelle, die jedoch entweder zu ungenau sind, eine große Zahl nur extrem aufwendig zu erfassender Eingangsparameter erfordern oder eine inakzeptable Rechenzeit benötigen. Diese bislang vorhandenen Defizite werden durch den in der vorliegenden Dissertation vorgestellten Modellansatz kompensiert, indem der gewichtete Einfluss der vielfältigen Eingangsparameter berücksichtigt und methodisch auf die Bedienungstheorie zurückgegriffen wird. Dadurch lassen sich auch situativ spezifische Fälle schnell und variabel mit anwendungsgerechter Qualität der Ergebnisse berechnen. Die Werte für eine überschaubare Zahl notwendiger durch den Nutzer einzugebender Eingangsparameter müssen bei unveränderter Infrastruktur und gleichbleibendem Fahrzeugeinsatz nur einmalig erfasst werden. Eine Anwendung des Modells auch im U-Bahn-, Stadtbahn- und Fernverkehr ist grundsätzlich möglich.

Wesentliches Forschungsergebnis der vorliegenden Arbeit ist ein neues Verfahren auf der Grundlage der Bedienungstheorie für die praxisgerechte Prognose der Fahrgastwechselzeiten zur Bestimmung realistischer Verkehrshaltezeiten in der Planung und bei der Disposition des Eisenbahnbetriebs. Daraus ergibt sich ein beachtlicher eisenbahnbetriebswissenschaftlicher und praxisbezogener Nutzwert des in dieser Art erstmals entwickelten bedienungstheoretischen Ansatzes zur Prognose der Haltezeiten in Abhängigkeit vom Verhalten in Verbindung mit dem Aufkommen der Fahrgäste.

Stuttgart, September 2021

Ullrich Martin

## Danksagung

Bei der Erstellung dieser Dissertation und insbesondere bei der Entwicklung des damit verbundenen Modells haben sich zahlreiche Menschen verschiedenartig eingebracht. Auch wenn mir bewusst ist, dass eine Aufzählung kaum umfassend gelingen kann, möchte ich nachfolgend doch einige der besonders umfangreich Beteiligten nennen.

Zunächst gebührt mein Dank Professor Ullrich Martin für seine zahlreichen wegweisenden Impulse in der Phase der Themenfindung sowie insbesondere während der gesamten Bearbeitungszeit. Weiterhin möchte ich mich bei Professor Ulrich Weidmann für die Übernahme des Mitberichts sowie seine wertvollen Hinweise bedanken.

Auch den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen möchte ich für die kollegiale Zusammenarbeit über viele Jahre hinweg meinen Dank aussprechen. In besonderem Maß zum Gelingen beigetragen haben hier Dr. Fabian Hantsch durch seine zahlreichen wertvollen Beiträge sowohl in der Phase meiner Masterarbeit als auch der Dissertation sowie Markus Tideman durch seine unermüdliche Unterstützung vielfältigster Art. Zuletzt möchte ich hier auch alle an der Arbeit beteiligten Studentinnen und Studenten nennen, die als studentische Hilfskräfte sowie durch studentische Arbeiten mitgewirkt haben.

Besonders die Kalibrierung und die Validierung des Haltezeitmodells wurde erst durch die verschiedenartige Zusammenarbeit mit Verkehrsunternehmen ermöglicht. Hierbei möchte ich mich insbesondere bei den beteiligten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der DB Netz AG, der DB Station&Service AG, der DB Regio AG, der DB Fernverkehr AG sowie der Stuttgarter Straßenbahnen AG für die Genehmigung von Erhebungen, die zur Verfügung gestellten Daten sowie die gute Zusammenarbeit bei der gemeinsamen Projektarbeit bedanken.

Die Erstellung dieser Arbeit wurde dankenswerterweise durch das vom VWI e.V. verliehene Carl-Pirath-Forschungsstipendium unterstützt. Die dadurch ermöglichten zeitlichen Freiräume erlaubten eine beschleunigte Fertigstellung.

Mein herzlichster Dank gilt jedoch meiner Familie und hierbei insbesondere meiner Frau, die mir die Erstellung dieser Arbeit überhaupt erst ermöglicht haben und mich durchweg mit viel Geduld sowie großem Entgegenkommen dabei unterstützt haben.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Stuttgart, den 09.05.2021

Johannes Uhl

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>vi</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>ix</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>xix</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>1 Haltezeitmodellierung im spurgeführten Personenverkehr – Motivation und Abgrenzung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Definition der Haltezeit und damit verbundener Begriffe .....	4
1.2 Betrachtungsbereich der Arbeit.....	6
1.3 Potenziale und Einsatzmöglichkeiten von Haltezeitprognosemodellen.....	7
1.4 Gegenstand der Untersuchung und Forschungsfrage .....	10
1.5 Bearbeitungsvorgehen und Aufbau der Arbeit .....	11
<b>2 Prozessuale Zusammensetzung und Einflussgrößen der reinen Haltezeit</b> .....	<b>13</b>
2.1 Prozessuale Zusammensetzung der reinen Haltezeit und Gliederung in Zeitabschnitte.....	13
2.1.1 Prozessuale Zusammensetzung .....	14
2.1.2 Gliederung in Zeitabschnitte.....	21
2.2 Einflussgrößen auf den Erwartungswert und die Variationsbreite der reinen Haltezeit und deren modelltheoretische Beschreibung .....	23
2.2.1 Einflussgrößen auf das Fahrgastankunftsverhalten und das situative Einsteigeraufkommen an einem Halt .....	26
2.2.2 Einflussgrößen auf die Verteilung einsteigewilliger Fahrgäste über die Bahnsteiglänge und die Ein- sowie Aussteigeranzahl je Fahrzeugtür.....	32
2.2.3 Einflussgrößen auf den Erwartungswert sowie die Standardabweichung der Aus- und Einsteigedauer je Fahrgast .	53
2.2.4 Einflussgrößen auf die weiteren Haltezeitbestandteile .....	67

<b>3</b>	<b>Stand der Forschung bezüglich der Modellierung von Fahrgastwechsel- und Haltezeiten .....</b>	<b>71</b>
3.1	Kategorisierung bestehender Ansätze.....	71
3.2	Analytische Ansätze .....	72
3.2.1	Ohne Aussagen zur Variabilität .....	72
3.2.2	Mit Aussagen zur Variabilität .....	74
3.3	Personenstromsimulative Ansätze .....	76
3.4	Ist-Datengetriebene Ansätze .....	76
3.5	Resultierender Forschungsbedarf angesichts bestehender Modellansätze .....	77
<b>4</b>	<b>Anforderungen an eine linienbezogene Modellierung der reinen Haltezeit im spurgeführten Verkehr .....</b>	<b>81</b>
4.1	Anforderungsspezifikation des Modells .....	81
4.2	In- und Outputspezifikation des Modells.....	83
4.2.1	Eingangsgrößen .....	84
4.2.2	Ausgabegrößen .....	85
4.3	Einordnung des Modells und Abgrenzung zu bestehenden Ansätzen.....	86
<b>5</b>	<b>Algorithmische Umsetzung der linienbezogenen Modellierung der Haltezeitverteilung im spurgeführten Verkehr .....</b>	<b>89</b>
5.1	Grundstruktur des Modells .....	89
5.2	Bedienungstheoretische Grundlagen und Ansätze im Modell .....	91
5.3	Bestimmung des zu erwartenden Einsteigeraufkommens.....	92
5.3.1	Schätzung der Quelle-Ziel-Matrix .....	93
5.3.2	Schätzung des situativen Einsteigeraufkommens an einer Station .....	93
5.4	Prognose der Verteilung der Fahrgäste auf die Fahrzeugtüren.....	98
5.4.1	Bestimmung der Türwahlwahrscheinlichkeiten an einer Station	100
5.4.2	Ermittlung der Ein- und Aussteigerzahlen sowie der Fahrzeugbesetzung .....	107
5.4.3	Berücksichtigung auslastungsbedingter Umverteilungen .....	110

5.5	Modellierung der Verteilungsfunktionen der Haltezeit .....	115
5.5.1	Türfreigabe-, Öffnungsimpuls- und Türöffnungsdauer.....	115
5.5.2	Dauer des Aussteige- und regulären Einsteigeprozesses .....	117
5.5.3	Dauer des Nachzüglereinsteigeprozesses sowie Türschließ- und der Abfertigungsdauer .....	123
5.5.4	Zusammenfassung der Bestandteile zur reinen Haltezeit .....	130
<b>6</b>	<b>Kalibrierung, Validierung sowie prototypische Anwendungen des Modells .....</b>	<b>131</b>
6.1	Modellkalibrierung .....	131
6.2	Modellvalidierung .....	132
6.3	Prototypische Anwendung des Modells in Praxisfällen .....	137
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>139</b>
7.1	Beantwortung der Forschungsfrage und Ableitung weiteren Forschungsbedarfs .....	139
7.2	Schlussbetrachtung .....	142
	<b>Glossar.....</b>	<b>145</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>147</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>178</b>
	<b>Formelzeichenverzeichnis .....</b>	<b>179</b>
	<b>Anhang I: Einführung.....</b>	<b>185</b>
	<b>Anhang II: Prozessuale Zusammensetzung und Einflussgrößen der Haltezeit.....</b>	<b>190</b>
	<b>Anhang III: Bestehende Haltezeitmodelle sowie Anforderungen an den zu entwickelnden Ansatz .....</b>	<b>204</b>
	<b>Anhang IV: Algorithmische Umsetzung der Haltezeitmodellierung.....</b>	<b>213</b>
	<b>Anhang V: Modellkalibrierung und -validierung .....</b>	<b>241</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Ablauf der Haltezeitprognose im entwickelten Ansatz .....	xxi
Abbildung 2:	Procedure of the presented dwell time model .....	xxv
Abbildung 3:	Wirkungszusammenhänge der Haltezeitproblematik .....	2
Abbildung 4:	Bestimmung der bei der Fahrplanerstellung sowie bei Betrachtungen der Leistungsfähigkeit bzw. Betriebsqualität erforderlichen Kenngrößen .....	8
Abbildung 5:	Prozesse bei einem Verkehrshalt im Schienenpersonenverkehr zwischen Halteruck und Anfahruck.....	15
Abbildung 6:	Zugspezifische Prozesse vor dem Fahrgastwechsel .....	16
Abbildung 7:	Türspezifische Prozesse vor dem Fahrgastwechsel sowie Fahrgastwechselprozesse an einer beispielhaften Fahrzeugtür .....	17
Abbildung 8:	Türspezifische Prozesse nach dem Fahrgastwechsel an einer beispielhaften Fahrzeugtür .....	19
Abbildung 9:	Zugspezifische Prozesse nach dem Fahrgastwechsel .....	20
Abbildung 10:	Darstellung der wesentlichen Einflussfaktoren und Wirkungszusammenhänge im Kontext der reinen Haltezeit.....	24
Abbildung 11:	Fahrgastankunftsverhalten an zwei der untersuchten Stationen bei jeweils 15 Klassen .....	29
Abbildung 12:	Anteil fahrplanorientiert eintreffender Fahrgäste in der morgendlichen Hauptverkehrszeit nach Zugfolgezeit sowie entsprechende Näherungen mittels einer Gammaverteilung .....	30
Abbildung 13:	Zusammenhang zwischen dem Anteil fahrplanorientiert eintreffender Fahrgäste und der Zugfolgezeit nach Verkehrszeit.....	31
Abbildung 14:	Räumliche Verteilung der bei der Befragung genannten Beweggründe und Fahrgastverteilung nach Bahnsteigbereichen in Bad Cannstatt an Gleis 2 .....	37
Abbildung 15:	Fahrgastverteilung und Bahnsteigausstattung in Österfeld an Gleis 2.....	40
Abbildung 16:	Fahrgastverteilung und Bahnsteigausstattung in Kornwestheim Pbf an Gleis 3.....	43

Abbildung 17:	Fahrgastverteilung und Fahrgastdichte je Bereich vor und während der Covid-19-Pandemie an der Station Nürnberger Straße Gleis 1 .....	45
Abbildung 18:	Beweggründe nach der abgefragten Häufigkeit, mit der der aktuelle Weg zurückgelegt wird .....	47
Abbildung 19:	Mittelwert der fahrgastspez. Fahrgastwechseldauer in Abhängigkeit von der gesamten Ein- bzw. Aussteigeranzahl.....	56
Abbildung 20:	Standardabweichung der mittleren fahrgastspezifischen Fahrgastwechseldauer in Abhängigkeit von der gesamten Ein- bzw. Aussteigeranzahl.....	58
Abbildung 21:	Mittelwert der Einsteigedauer je Einsteiger in Abhängigkeit vom Anteil belegter Stehplätze im Fahrzeug zur Mitte des Einsteigevorgangs.....	59
Abbildung 22:	Zuschlagfaktor zum Mittelwert der fahrgastspezifischen Fahrgastwechseldauer in Abhängigkeit vom Gepäckaufkommen .	62
Abbildung 23:	Zuschlagfaktor zum Mittelwert der fahrgastspezifischen Fahrgastwechseldauer in Abhängigkeit von der vertikalen Distanz zwischen Bahnsteig- und Fahrzeugbodenhöhe.....	64
Abbildung 24:	Anzahl genutzter Türspuren an einer 1,9 Meter breiten Tür in Abhängigkeit vom Maximum der jeweils beteiligten Ein- und Aussteigeranzahl.....	65
Abbildung 25:	Zuschlagfaktor zum Mittelwert der fahrgastspezifischen Fahrgastwechseldauer in Abhängigkeit von der im konkreten Fall genutzten Breitendifferenz zur Standardtürbreite von 1,3m .....	66
Abbildung 26:	Bestehende Modellansätze nach Anzahl der einzugebenden sowie der insgesamt (auch modellimmanent) berücksichtigten Einflussfaktoren.....	78
Abbildung 27:	Ein- und Ausgabegrößen des entwickelten Modells.....	84
Abbildung 28:	Bestehende Modellansätze nach Anzahl der einzugebenden, schwer verfügbaren Eingangsgrößen sowie der insgesamt berücksichtigten Eingangsgrößen. Kreisgröße verdeutlicht die Anzahl identischer Modelle.....	87
Abbildung 29:	Gesamtprozess der Haltezeitmodellierung.....	90

---

Abbildung 30:	Überblick über die Verwendung bedienungstheoretischer Zusammenhänge im Modell.....	92
Abbildung 31:	Prozessablauf zur Prognose des situativen Einsteigeraufkommens .....	95
Abbildung 32:	Anteil des fahrplanorientierten Einsteigeraufkommens für verschiedene planmäßige Zugfolgezeiten, das bei einer bestimmten situativen Zugfolgezeit als eingetroffen erwartet werden kann .....	96
Abbildung 33:	Ankunftsprozess nicht-fahrplanorientierter Einsteiger als reiner Geburtsprozess.....	97
Abbildung 34:	Prozessablauf zur Prognose der Fahrgastverteilung an einer Station.....	100
Abbildung 35:	Prozessablauf zur Bestimmung der Türwahlwahrscheinlichkeiten für Einsteiger an einer Station.....	101
Abbildung 36:	Vorgehen zur Bestimmung der Türwahlwahrscheinlichkeiten auf Basis der Startstation an einem beispielhaften Bahnsteig .....	106
Abbildung 37:	Vorgehen zur Bestimmung der Türwahlwahrscheinlichkeiten auf Basis jener der betrachteten Station m nachfolgenden, beispielhaften Zielstationen.....	107
Abbildung 38:	Bestimmung der initialen Einsteigerverteilung für eine beispielhafte Quelle-Ziel-Relation .....	108
Abbildung 39:	Prozessablauf zur Ermittlung der Ein- und Aussteigerzahlen sowie der Fahrzeugbesetzung an einer Station .....	109
Abbildung 40:	Prozessablauf zur Berücksichtigung der Reaktion der Einsteiger auf die eventuell ungleiche Auslastung der Bahnsteigbereiche vor dem Einstieg .....	112
Abbildung 41:	Beispielhafte Darstellung der drei Umverteilungsschritte .....	114
Abbildung 42:	Prozessablauf zur Bestimmung der Verteilungsfunktion (CDF) der Haltezeit.....	116
Abbildung 43:	Prozessablauf zur Bestimmung der Verteilungsfunktion (CDF) der türspezifischen Zeitdauer vor Beginn des Fahrgastwechsels in Abhängigkeit vom Türöffnungsverfahren und dem Vorhandensein von Aussteigern .....	118

---

Abbildung 44:	Markov-Graph eines reinen, bedienungstheoretischen Todesprozesses am Beispiel des Einsteigevorgangs mit exponentialverteilter Einsteigedauer $1/\mu$ .....	120
Abbildung 45:	Prozessablauf zur Bestimmung der Verteilungsfunktion (CDF) der türspezifischen Zeitdauer bis zum Ende des Aussteigevorgangs	123
Abbildung 46:	Prozessablauf zur Bestimmung der Verteilungsfunktion (CDF) der Zeitdauer für den Türschließprozess .....	125
Abbildung 47:	Markov-Graph eines bedienungstheoretischen Geburts- und Todesprozesses mit Annahme exponentialverteilter Geburts- und Sterberaten bei Busy-Period-Betrachtung zur Modellierung des Einsteigevorgangs mit Nachzüglern .....	126
Abbildung 48:	Prozessablauf zur Bestimmung der Verteilungsfunktion (CDF) des für die dezentrale Türschließung erforderlichen Zeitbedarfs an einer Fahrzeugtür .....	127
Abbildung 49:	Gegenüberstellung der automatisch in situ gemessenen und der prognostizierten Einsteigerverteilungen für zwei Station der Stuttgarter Stadtbahnlinie U12 .....	132
Abbildung 50:	Verfahren zur Modellvalidierung auf Basis fahrzeugseitig gemessener Haltezeitdaten .....	133
Abbildung 51:	Verteilungsfunktionen der gemessenen und modellierten Haltezeiten für zwei unterschiedlich stark frequentierte Stationen einer deutschen S-Bahnlinie .....	135
Abbildung 52:	Im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigte Publikationen mit Bezug zur Haltezeitthematik im spurgeführten Verkehr nach Jahrzehnt der Veröffentlichung .....	185
Abbildung 53:	Übersicht der mit dieser Arbeit in Verbindung stehenden Erhebungen, studentischen Arbeiten sowie Datenkooperationen – Teil 1 .....	187
Abbildung 54:	Übersicht der mit dieser Arbeit in Verbindung stehenden Erhebungen, studentischen Arbeiten sowie Datenkooperationen– Teil 2 .....	188
Abbildung 55:	Vorgehen zur Erfassung der Fahrgastankünfte sowie Zugfahrten an einem Bahnsteig mittels Smartphone-App .....	191

---

Abbildung 56:	Fahrgastankunftsverhalten an den im Rahmen der Arbeit betrachteten Stationen. Klassenanzahl entsprechend der jeweiligen Zugfolgezeit .....	192
Abbildung 57:	Erwartungswerte der Wartezeit fahrplanorientiert eintreffender Fahrgäste sowie entsprechende Näherung unter der Annahme, dass sich das Ankunftsverhalten mit einer entsprechend parametrisierten Betaverteilung beschreiben lässt .....	193
Abbildung 58:	Anteil fahrplanorientiert eintreffender Fahrgäste in der abendlichen Hauptverkehrszeit sowie entsprechende Näherungen mittels einer Gammaverteilung.....	194
Abbildung 59:	Anteil fahrplanorientiert eintreffender Fahrgäste in der Nebenverkehrszeit sowie entsprechende Näherungen mittels einer Gammaverteilung.....	194
Abbildung 60:	Bevorzugung von Wartepositionen unter dem Wetterschutz bei intensiver Sonneneinstrahlung.....	197
Abbildung 61:	Im Rahmen der Fahrgastbefragung in Bad Cannstatt genannte Beweggründe bei der Wahl der Warteposition auf dem Bahnsteig nach der Verkehrszeit .....	197
Abbildung 62:	Vorgehen zur Erfassung der Zeitbestandteile des Fahrgastwechsels sowie des Halts an einer einzelnen Fahrzeugtür mittels Smartphone-App .....	199
Abbildung 63:	Einsteigedauer je Einsteiger in Abhängigkeit von der gesamten Einsteigeranzahl an der Tür sowie entsprechende Näherung (nur Messungen ohne stehende Fahrgäste im Fahrzeug).....	200
Abbildung 64:	Aussteigedauer je Aussteiger in Abhängigkeit von der gesamten Aussteigeranzahl an der Tür sowie entsprechende Näherung ....	200
Abbildung 65:	Zuschlagfaktor zur mittleren Aussteigedauer je Aussteiger in Abhängigkeit vom Aussteigeranteil sowie entsprechende Näherung .....	201
Abbildung 66:	Einstiegssituation an einem n-Wagen.....	202
Abbildung 67:	Vorgehen zur Erfassung der Zeitbestandteile eines Halts auf Ebene des gesamten Zuges mittels Smartphone-App .....	203

Abbildung 68:	Im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigte Haltezeitmodelle im spurgeführten Verkehr nach Jahrzehnt der Veröffentlichung und Modellart.....	204
Abbildung 69:	Beispielhafter Screenshot der abschließenden Ergebnisdarstellung im Hilfstool zur Aufnahme der Bahnsteiginfrastruktur.....	210
Abbildung 70:	Ergebnisdarstellung der Haltezeitmodellierung mit Fokus auf die einzelnen Zeitbestandteile im entwickelten Haltezeitmodells für eine beispielhafte Regionalverkehrslinie .....	211
Abbildung 71:	Ergebnisdarstellung der Fahrgastverteilungsgrößen des entwickelten Haltezeitmodells für zwei beispielhafte S-Bahnstationen.....	212
Abbildung 72:	Prozessablauf zur Bestimmung der situativen Zugfolgezeiten auf den Zielrelationen an einer Station m.....	213
Abbildung 73:	Prozessablauf zur Bestimmung der Einzugsbereiche der einzelnen Fahrzeugtüren an Station m.....	214
Abbildung 74:	Prozessablauf zur Bestimmung der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsfunktion über die Bahnsteiglänge an einer Station auf Basis des von den Fahrgästen erwarteten Haltebereichs.....	216
Abbildung 75:	Prozessablauf zur Bestimmung der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsfunktion über die Bahnsteiglänge an einer Station auf Basis des tatsächlichen Haltebereichs.....	217
Abbildung 76:	Prozessablauf zur Bestimmung der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsfunktion über die Bahnsteiglänge an einer Station auf Basis der Bahnsteigzugänge.....	218
Abbildung 77:	Prozessablauf zur Bestimmung der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsfunktion über die Bahnsteiglänge an einer Station auf Basis der Sitzgelegenheiten.....	219
Abbildung 78:	Prozessablauf zur Bestimmung der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsfunktion über die Bahnsteiglänge an einer Station auf Basis der Wetterschutzeinrichtungen .....	219
Abbildung 79:	Prozessablauf zur Bestimmung der Gewichtungen der einzelnen Einflussfaktoren an einer Station in der konkreten Situation .....	220

---

Abbildung 80:	Prozessablauf zur Bestimmung der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsfunktion über die Bahnsteiglänge an einer Station auf Basis der dortigen Bahnsteigabgänge für Fahrgäste, die sich an der Station als ihre Zielstation orientieren.....	221
Abbildung 81:	Übergangswahrscheinlichkeiten auf dem Bahnsteig in Abhängigkeit von der Fahrgastdichte für verschiedene Türmittenabstände .....	222
Abbildung 82:	Übergangswahrscheinlichkeiten im Zug in Abhängigkeit von der Dichte stehender Fahrgäste für verschiedene Türmittenabstände .....	222
Abbildung 83:	Prozessablauf zur Umverteilung der Fahrgäste vor dem Einstieg bei Erschöpfung der Zugkapazität an einzelnen Türbereichen .....	223
Abbildung 84:	Prozessablauf zur Berücksichtigung der Reaktion der Einsteiger auf die eventuell ungleiche Auslastung der Türbereiche im Zug.....	224
Abbildung 85:	Prozessablauf zur Bestimmung der Verteilungsfunktion (CDF) des fahrzeugspezifischen Zeitbedarfs vor dem Fahrgastwechsel .....	225
Abbildung 86:	Prozessablauf zur Bestimmung des situativ eingesetzten Türöffnungsverfahrens .....	226
Abbildung 87:	Markov-Graph eines reinen, bedienungstheoretischen Todesprozesses am Beispiel des Einsteigevorgangs mit Erlang-3-verteilter Einsteigedauer $1/3\mu$ .....	227
Abbildung 88:	Prozessablauf zur Bestimmung der Verteilungsfunktion (CDF) der türspezifischen Zeitdauer bis zum Ende des regulären Einsteigevorgangs .....	230
Abbildung 89:	Prozessablauf zur Verteilung des Nachzügleraufkommens an einer Station auf die Fahrzeigtüren.....	231
Abbildung 90:	Prozessablauf zur Bestimmung der situativ gewählten Türschließ- und Abfertigungsverfahren an einer Station.....	232
Abbildung 91:	Prozessablauf der numerischen Realisierung der für die Modellierung des dezentralen Türschließens verwendeten Formulierung als Geburts- und Todesprozess .....	233
Abbildung 92:	Prozessablauf zur Prüfung, wann die nächste Nachzüglerankunft erfolgt, bei der numerischen Realisierung des Geburts- und Todesprozesses.....	234

Abbildung 93:	Prozessablauf zum Abarbeiten eines (nicht letzten) Einsteigers bei der numerischen Realisierung des Geburts- und Todesprozesses .....	235
Abbildung 94:	Prozessablauf zum Abarbeiten des letzten noch wartenden Einsteigers bei der numerischen Realisierung des Geburts- und Todesprozesses .....	236
Abbildung 95:	Prozessablauf zur Ermittlung der Verteilungsfunktion (CDF) des Zeitbedarfs bis zum Vorliegen einer hinreichend großen Zeitlücke zur Einleitung der zentralen Türschließung an einer Fahrzeugtür .....	237
Abbildung 96:	Prozessablauf zur Ermittlung der Verteilungsfunktion (CDF) des Zeitbedarfs bis zur vollständigen, zentralen Schließung einer Fahrzeugtür .....	238
Abbildung 97:	Prozessablauf des abgewandelten Geburtsprozesses zur Ermittlung der Verteilungsfunktion (CDF) des Zeitbedarfs bis zur vollständigen, zentralen Schließung einer Fahrzeugtür bei Nachzügleraufkommen .....	239
Abbildung 98:	Prozessablauf zur Ermittlung der Verteilungsfunktion (CDF) der Abfertigungsdauer .....	240
Abbildung 99:	Gegenüberstellung der in situ gemessenen mit den vom Modell geschätzten Verteilungsfunktionen der Gesamtdauern für den Aussteigevorgang nach Anzahl beteiligter Aussteiger.....	241
Abbildung 100:	Gegenüberstellung der in situ gemessenen mit den vom Modell geschätzten Verteilungsfunktionen der Gesamtdauern für den Einsteigevorgang nach Anzahl beteiligter Einsteiger.....	242

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Abgrenzung der Haltezeitanteile bei zentraler Türöffnung. Falls die Türen dezentral geöffnet werden und an einer Tür keine Ein- oder Aussteiger auftreten, entfallen sämtliche türspezifischen Zeitanteile an der jeweiligen Tür.....	22
Tabelle 2:	Gegenüberstellung der Ergebnisse verschiedener Fahrgastbefragungen mit den Ergebnissen der Modellkalibrierung.....	50
Tabelle 3:	Erhebungen zum Fahrgastwechsel im Kontext dieser Arbeit durch den Verfasser sowie Cancar (2019) und Glaser (2019).....	55
Tabelle 4:	Art des Fahrgastwechsels bei Vorliegen von Aus- und Einsteigevorgang nach Türbreite .....	60
Tabelle 5:	Fahrgastanteil mit mindestens einem Gepäckstück nach Verkehrsmittel und Verkehrszeit .....	62
Tabelle 6:	Gemessene Zeitdauern der Haltezeitanteile für zwei exemplarische Fahrzeugtypen .....	68
Tabelle 7:	Verwendung der Türöffnungsverfahren auf der Stammstrecke der S-Bahn Stuttgart nach Verkehrszeit und Verspätung .....	69
Tabelle 8:	Verwendung der Türschließverfahren auf der Stammstrecke der S-Bahn Stuttgart nach Verkehrszeit und Auftreten von Nachzüglern während des Halts .....	70
Tabelle 9:	Klassifizierung möglicher Eingangsgrößen eines Haltezeitmodells	83
Tabelle 10:	Ergebnisse der Modellvalidierungen als mittlerer Absolutfehler über alle je Linie betrachteten Stationen .....	134
Tabelle 11:	Übersicht der im Rahmen dieser Arbeit erfolgten Erhebungen des Fahrgastankunftsverhaltens.....	190
Tabelle 12:	Übersicht über den in ausgewählten Untersuchungen ermittelten Anteil fahrplanorientiert eintreffender Fahrgäste in Abhängigkeit von der planmäßigen Zugfolgezeit.....	193
Tabelle 13:	Teil 1 der Übersicht über die manuellen Erhebungen der Einsteigerverteilung auf dem Bahnsteig im Rahmen dieser Arbeit sowie Klose 2019a, Klose 2019b, Endlich et al. 2019 und Mang et al. 2020.....	195

Tabelle 14:	Teil 2 der Übersicht über die manuellen Erhebungen der Einsteigerverteilung auf dem Bahnsteig im Rahmen dieser Arbeit sowie Klose 2019a, Klose 2019b, Endlich et al. 2019 und Mang et al. 2020 .....	196
Tabelle 15:	Übersicht über die auf Türebene erfassten Zeitanteile sowie deren Mittelwerte .....	198
Tabelle 16:	Zuschlagfaktoren zum Grundwert der Standardabweichung der mittleren Fahrgastwechseldauer je Fahrgast nach vertikaler Distanz zwischen Bahnsteig- und Fahrzeugbodenhöhe laut Erhebungsdaten .....	201
Tabelle 17:	Aus der Erhebung resultierende Zuschlagfaktoren zum Grundwert der Standardabweichung der mittleren Fahrgastwechseldauer je Fahrgast nach genutzter Differenz zur Standardtübrenbreite von 1,3 m laut Erhebungsdaten .....	201
Tabelle 18:	Im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigte Haltezeitmodelle im spurgeführten Verkehr nach Kontinent und Modellart .....	204
Tabelle 19:	Überblick über die bestehenden Haltezeitmodelle – Teil 1 .....	205
Tabelle 20:	Überblick über die bestehenden Haltezeitmodelle – Teil 2 .....	206
Tabelle 21:	Überblick über die bestehenden Haltezeitmodelle – Teil 3 .....	207
Tabelle 22:	Überblick über die bestehenden Haltezeitmodelle – Teil 4 .....	208
Tabelle 23:	Überblick über die bestehenden Haltezeitmodelle – Teil 5 .....	209
Tabelle 24:	Werte der einzelnen Parameter zur Modellierung der Fahrgastverteilung auf Basis der Modellkalibrierung .....	215
Tabelle 25:	Erwartungswert, Standardabweichung und Variationskoeffizient in Bezug auf die mittlere fahrgastspezifische Fahrgastwechseldauer nach Vorgang im Stadt- und S-Bahnverkehr .....	229

## Kurzfassung

Weltweit stellen die Entwicklungen rund um die Haltezeiten von Zügen in den Stationen sowohl Infrastruktur- als auch Verkehrsunternehmen vor verschiedenartige Herausforderungen. Während die benötigten Zeitbedarfe sowie deren Variabilität aufgrund wachsenden Fahrgastaufkommens und höherer Sicherheitsanforderungen ansteigen, steht die zunehmende Infrastrukturauslastung einer Ausweitung der im Fahrplan vorgesehenen Haltezeiten entgegen.

Für eine effiziente Nutzung der Infrastruktur und eine zufriedenstellende Betriebsqualität ist eine Kenntnis der zu erwartenden mittleren Haltezeiten sowie deren Variabilität unabdingbar. Derartige Informationen können in der Betriebsplanung (z.B. Fahrplanerstellung), aber auch in der Betriebssteuerung (z.B. Disposition) sowie bei Untersuchungen der Robustheit bzw. Leistungsfähigkeit oder haltezeitspezifischen Optimierungsmaßnahmen Verwendung finden.

Eine Berücksichtigung des Haltezeitbedarfs in frühen Phasen der Betriebsplanung erfordert in der Regel stets den Einsatz eines Prognosemodells. Aber auch bei bereits vergleichbar in Betrieb befindlichen Linien kommt Modellen zur Haltezeitbestimmung aufgrund des mit der Erhebung und Auswertung in situ gemessener Daten verbundenen Aufwands sowie methodischer Limitationen eine große Bedeutung zu.

Zur Prognose von Verkehrshaltezeiten im Bereich des spurgeführten Verkehrs gibt es international bereits verschiedenartige Modellierungsvorschläge. Die Eignung dieser *bestehenden Ansätze* für die beschriebenen Anwendungsfelder ist jedoch unter anderem mangels Aussagen zur Variabilität, kritischer Vereinfachungen sowie geringer Übertragbarkeit und Praktikabilität als erheblich eingeschränkt zu betrachten.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird daher ein *generisches Modell zur linienbezogenen Prognose des Haltezeitbedarfs im spurgeführten Personennahverkehr* entwickelt. Der Ansatz ermöglicht eine Prognose der Verteilungsfunktion des Zeitbedarfs, der für den Fahrgastwechsel sowie die diesbezüglich notwendigen vor- und nachbereitenden Prozesse erforderlich ist. Das entwickelte Modell weist eine hohe Übertragbarkeit auf und beschränkt sich hinsichtlich des Datenbedarfs auf typischerweise in Verkehrsunternehmen verfügbare Daten. Der vorgeschlagene Modellansatz wurde als Prototyp softwareseitig in Matlab (2018) implementiert.

Zur Entwicklung eines derartigen Haltezeitmodells werden in der vorliegenden Arbeit zunächst die den Haltezeitbedarf prägenden Wirkungszusammenhänge strukturiert betrachtet und mittels quantitativer Zusammenhänge auf niederschwellig verfügbare Eingangsgrößen zurückgeführt. Die hierzu bereits bestehenden Erkenntnisse wurden dabei durch ausführliche weitere Untersuchungen im Großraum Stuttgart ergänzt.

Darauf basierend wird ein Haltezeitmodell abgeleitet. Abbildung 1 skizziert den *Ablauf der Haltezeitprognose im entwickelten Ansatz*. Dementsprechend sind durch den Nutzer zunächst Infrastrukturdaten (z.B. Eigenschaften und Ausstattung der Bahnsteige und Haltepositionen), Fahrzeugdaten (z.B. Länge, Tür- und Kapazitätsverteilung, Türschließzeiten) und verkehrliche Daten (z.B. Fahrgastaufkommen) einzugeben.

Der nachfolgende Berechnungsprozess besteht im Kern aus drei Teilschritten – namentlich den Modellierungen der zu erwartenden Einsteigerzahl, der Verteilung der Fahrgäste auf die Fahrzeugtüren sowie abschließend des hierfür notwendigen Zeitbedarfs. Diese drei Teilschritte werden nacheinander für jede Station im Linienverlauf durchgeführt. Dabei wird jeweils auf die Ergebnisse der zurückliegenden Stationen aufgebaut, was eine Berücksichtigung der Zusammenhänge zwischen den Stationen ermöglicht. Abgesehen vom Einsatz im entwickelten Haltezeitmodell können diese Teilmodelle auch separat beispielsweise für die Analyse von Optimierungspotenzialen Verwendung finden. Das Vorgehen innerhalb der Teilschritte wird im Folgenden näher erläutert.

Im ersten Berechnungsschritt wird das *Einsteigeraufkommen an einer Station* unter Berücksichtigung der situativen Verspätung separat für jede dort auf der betrachteten Linienrichtung mögliche Zielrelation durchgeführt. Dabei werden nicht-fahrplanorientiert an der Station eintreffende Fahrgäste von fahrplanorientiert Eintreffenden in Abhängigkeit von der planmäßigen Zugfolgezeit unterschieden. Das implementierte Vorgehen ermöglicht eine Berücksichtigung der Zusammenhänge zwischen Verspätung und Haltezeit, aus denen auf hochfrequentierten Linien ein Aufschaukeln von Fahrplanabweichungen resultieren kann.

Im zweiten Schritt wird für jede der Stationen die dort *an den einzelnen Türen zu erwartende Ein- und Aussteigeranzahl* prognostiziert. Hierzu wird zunächst die zu erwartende Verteilung der Fahrgäste über die Bahnsteiglänge auf Basis der Gegebenheiten an der Station (insbesondere der Lage der Bahnsteigzugänge, der Haltepositionen und

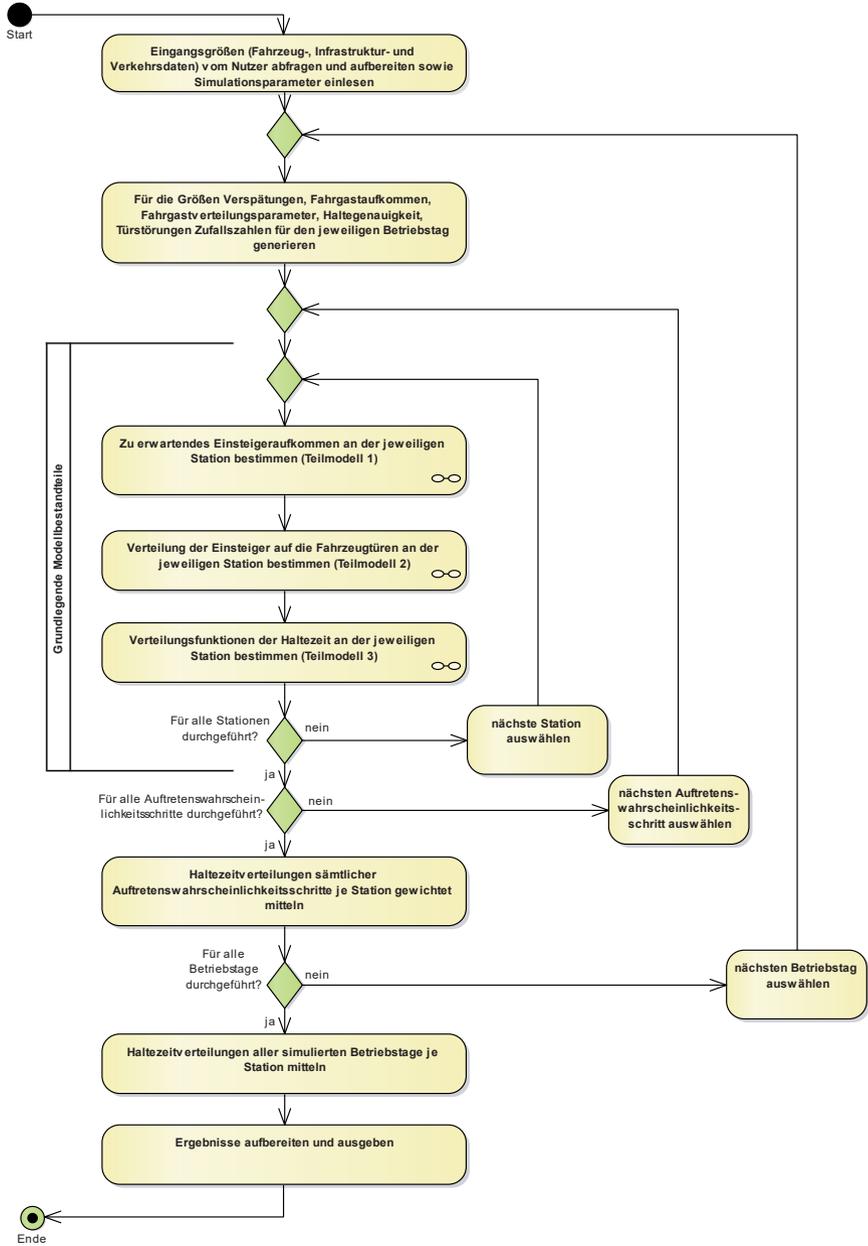


Abbildung 1: Ablauf der Haltezeitprognose im entwickelten Ansatz (Quelle: Verfasser)

des Wetterschutzes) sowie der Abhängigkeiten mit den von dort erreichbaren Zielstationen modelliert. Hieraus wird anschließend unter Berücksichtigung auslastungsbedingter Umverteilungen auf dem Bahnsteig und im Zug die Anzahl der je Station an den einzelnen Türen ein- und aussteigenden Reisenden prognostiziert.

Im dritten Berechnungsschritt wird auf Grundlage der Ein- und Aussteigeranzahl je Tür für jeden Halt mit Hilfe bedienungstheoretischer Ansätze die *Fahrgastwechselzeit an den einzelnen Türen* bestimmt. Dabei werden sowohl geometrische Randbedingungen, wie die Türbreite und die Einstiegshöhe, aber auch Wechselwirkungen zwischen den Fahrgästen, wie zum Beispiel Rückstaueffekte bei hohem Besetzungsgrad, berücksichtigt. Von den so bestimmten Fahrgastwechselzeiten der einzelnen Türen wird abschließend auf die Haltezeit des Zuges geschlossen. Neben den Türöffnungs- und Türschließverfahren wird dabei auch der Einfluss von Nachzüglern berücksichtigt, die erst nach der Ankunft des Zuges auf dem Bahnsteig ankommen.

Wiederholungsschleifen ermöglichen unter anderem eine Berücksichtigung der stochastischen Variationen von Einflussgrößen. Abschließend wird dem Nutzer für jede Station die dort zu erwartende Verteilungsfunktion der Haltezeiten ausgegeben. Weitere darüberhinausgehende Ergebnisdarstellungen sollen die Interpretation der Prognoseergebnisse sowie das Ableiten von Optimierungspotenzialen unterstützen.

Eine *Validierung* am Beispiel verschiedener städtischer, regionaler sowie überregionaler Linien des öffentlichen Personennahverkehrs legt eine hohe Prognosegüte des entwickelten Modells nahe. So lag die durchschnittliche Absolutabweichung über alle Halte der untersuchten Linien bei Gegenüberstellung der vom Modell berechneten Werte der Haltezeiten mit in situ gemessenen Werten für das 50% Quantil beispielsweise bei 1,6 Sekunden beziehungsweise 7%. Erste Erprobungen lassen zudem eine Übertragbarkeit des Ansatzes sowohl auf den Schienenpersonenfernverkehr als auch andere Verkehrsträger bei entsprechenden Anpassungen erwarten. Im Rahmen eines Projektes im Auftrag der DB Netz AG erfolgt am Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart unter anderem eine weitere Validierung des Modells mit dem Ziel der praxisbezogenen Einsatzreife.

## Abstract

Transport operators all over the world are faced with various challenges concerning dwell times at scheduled stops in railbound traffic. While times required for scheduled stops as well as their variability are increasing due to rising number of passengers and safety requirements, the growing occupancy rate of the infrastructure and resulting shorter train headways prevent an expansion of dwell times. This and increasing passenger and operational requirements on operating quality require a reliable forecast of the expected dwell times and their variations.

Knowledge of the expected average dwell times and their variability is essential for efficient use of infrastructure and satisfactory operational quality. Such information can be used for timetable planning as well as for dispatching and performance investigation, due to consideration of the relationship between delay and dwell times. Because of additional outputs, optimization potentials regarding vehicle, infrastructure and operating program can also be derived.

Taking dwell time requirements in early phases of operational planning in account, requires always the usage of forecast models. Also, even in the case of lines that are already comparably in operation, models for determining dwell times are of great importance due to the effort for collecting and evaluating measured data as well as methodological limitations.

Various modelling proposals already supply forecasts of dwell times in railbound traffic. However, the suitability of these *existing approaches* for the described scope is to be regarded as considerably limited, inter alia because of a lack of statements on variability, critical simplifications as well as poor transferability and practicability.

Within this dissertation a generic model for *course-related forecast of dwell times at scheduled stops in railbound transport systems* is developed. The approach enables forecasting the cumulative distribution function (CDF) of the time required for passenger exchange as well as the time required for related pre- and post-processes. The approach is applicable to all railbound transport systems and to ensure the models practicability its data requirements are limited to data being typically available in transport companies. As a prototype, the proposed model was implemented in Matlab (2018).

In order to develop such a dwell time model, this thesis first structures the interdependencies of dwell time requirements and then uses quantitative relationships to trace them to low-threshold input variables. In addition to existing research findings, the results of further investigations carried out in the Stuttgart metropolitan area are also used for this purpose.

Based on this, a dwell time model is derived. As can be seen in Figure 2, the dwell time modelling for a course starts with the input of the required data by the user. Hereby, infrastructure data (e.g. properties and facilities of the platforms, stop positions), vehicle data (e.g. length, door and capacity distribution, door closing times) and traffic data (e.g. passenger volume) are queried for the investigated train run.

The calculation process consists of three sub steps - namely the modelling of the expected number of boarding passengers, the distribution of the boarding and alighting passengers among the vehicle doors and finally the time required for the passenger exchange and the other processes of a stop. These three sub-steps are calculated consecutively for every station in the course of a train run, building up on the results of previous scheduled stops and thus allowing to consider interrelationships between the stations. Besides the application in the developed dwell time model, these submodels can also be used separately, for example to analyse optimization potentials. The procedure within the sub-steps will be explained in more detail below.

In the first calculation step the modelling of the *amount of boarding passengers at a scheduled stop* is carried out separately for each destination reachable from this stop on the considered line. Thereby the passengers arriving at the platform are distinguished between passengers arriving randomly and timetable-oriented. Their ratio is depending on the scheduled headway on the respective origin-destination-relation. This procedure allows modelling interdependencies between delay and dwell times, which can result in the building up of delays on busy line sections with short headways.

In the second step the *distribution of the passengers among the vehicle doors* at the considered station is modelled. In order to determine the distribution of passengers, it is assumed that passengers, orient either towards the circumstances of their departure (platform accesses, weather protection, usual vehicle stop position) or their destination station (platform exits), when positioning on the platform of their departure station.

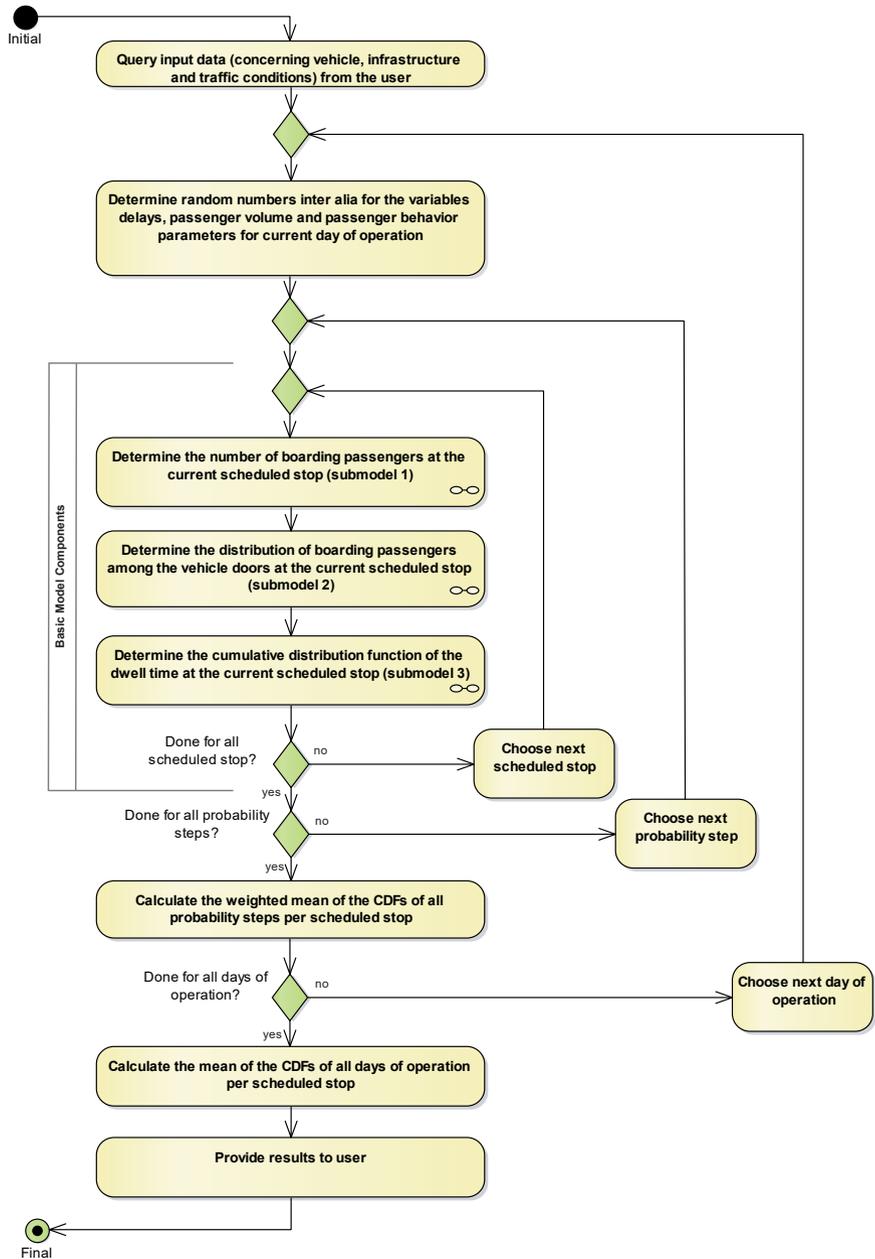


Abbildung 2: Procedure of the presented dwell time model (Source: Author)