



## Stopping place prediction at commercial stops of urban public transport

---

Patrick Wolf, Christian Gassel and Sven Schöne

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

January 10, 2020

# Stellplatzprognose an Mehrfachhaltestellen: Ein Beitrag zur Steigerung von Attraktivität und Effizienz des öffentlichen Stadtverkehrs

## Dipl.-Ing. Patrick Wolf

TU Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Professur für Verkehrsleitsysteme und –prozessautomatisierung, Hettnerstraße 3, D-01069 Dresden, E-Mail: patrick.wolf1@tu-dresden.de

## Dipl.-Ing. Christian Gassel

TU Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Professur für Verkehrsleitsysteme und –prozessautomatisierung, Hettnerstraße 3, D-01069 Dresden, E-Mail: christian.gassel@tu-dresden.de

## Dipl.-Verk.wirtsch. Sven Schöne

Leipziger Verkehrsbetriebe GmbH, Georgiring 3, D-04103 Leipzig, E-Mail: sven.schoene@L.de

## Kurzfassung

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Optimierung des Bedienungsprozesses an Mehrfachhaltestellen im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV). Dazu wurde seitens der Technischen Universität Dresden ein Verfahren zur Prognose der wahrscheinlichen Stellplatzverteilung der Fahrzeuge in Annäherung an eine Mehrfachhaltestelle entwickelt. Dieses beruht auf einer mikroskopischen Modellierung der einzelnen Fahrtrajektorien unter Berücksichtigung verschiedener stochastischer, infrastruktureller und betrieblicher Einflussgrößen. Anhand einer prototypischen Umsetzung der Stellplatzprognose an einer stark frequentierten Haltestelle in der Stadt Leipzig, können bereits erste Ergebnisse hinsichtlich der erreichten Güte der Prognose vorgestellt werden.

## 1 Einleitung

Um auf Hauptverkehrsachsen mit hoher Linienbelegung und dichter Zugfolgezeit die größtmögliche Trassenkapazität bereitzustellen, werden vor allem im Innenstadtbereich häufig Mehrfachhaltestellen angeordnet. Durch ihre bauliche Gestaltung ermöglichen diese, je nach verfügbarer Aufstellfläche, mehreren Fahrzeugen das gleichzeitige Halten zur Durchführung des Fahrgastwechsels. Gleichzeitig besteht für die wartenden Fahrgäste jedoch die Schwierigkeit den Halteplatz der Fahrzeuge korrekt zu antizipieren. Dies resultiert nicht selten in vermehrten Fahrgastbewegungen auf dem Bahnsteig während der Einfahrt der Fahrzeuge, und führt damit zur Verminderung der Verkehrssicherheit, Kundenzufriedenheit und Betriebsqualität. Durch eine zuverlässige Prognose des Stellplatzes können die Fahrgastströme auf dem Bahnsteig schon vor dem Eintreffen der Fahrzeuge auf die entsprechende Halteposition gelenkt werden. Durch die Art und Weise der fahrgastwirksamen

## Stellplatzprognose an Mehrfachhaltestellen: Ein Beitrag zur Steigerung von Attraktivität und Effizienz des öffentlichen Stadtverkehrs

Darstellung der Stellplatzprognoseergebnisse kann zudem auf eine gleichmäßige Verteilung der Fahrgäste an der Halteposition bzw. den Einstiegsbereichen am Fahrzeug hingewirkt werden. In der Folge ergeben sich kürzere Wege zum Einstieg in die jeweiligen Verkehrsmittel, wodurch sich die Haltestellenaufenthaltszeit reduziert und die Durchlassfähigkeit der Haltestelle erhöht. Eine homogenere Fahrgastverteilung auf dem Bahnsteig führt zudem zur homogenen Fahrgastverteilung innerhalb der Fahrzeuge. Eine funktionierende Stellplatzprognose vermag daher auch die Fahrgastwechselzeiten an den nachfolgenden Haltestellen positiv zu beeinflussen. Gleichzeitig wird die wahrgenommene Servicequalität infolge der höherwertigen Fahrgastinformation gesteigert.

## 2 Technologische Anforderungen

Der Einsatz einer Stellplatzprognose im produktiven Betrieb unterliegt verschiedenen Restriktionen. So sind neben den betrieblichen Anforderungen hinsichtlich Organisation und Steuerung des Betriebsablaufes auch kundenspezifische Prämissen zu beachten. Durch die Analyse der Ansprüche von Fahrgästen und Verkehrsunternehmen konnten folgende wesentliche Kriterien herausgearbeitet werden (siehe Wolf 2017, [1]):

- Die dem Fahrgast angezeigten Stellplatzprognosen müssen äußerst verlässlich sein. Dazu muss die Wahrscheinlichkeit  $P_E$  für das Ereignis  $X$ , dass ein beliebiges Fahrzeug auf der entsprechend vorhergesagten Halteposition zum Stehen kommt, möglichst groß sein.
- Um den Betriebsablauf an Mehrfachhaltestellen unterstützen zu können, müssen die Stellplatzprognosen sowohl dem Fahrgast als auch dem Fahrpersonal mit einem bestimmten zeitlichen Vorlauf bekanntgegeben werden.
- Die Durchlassfähigkeit der Haltestelle darf sich durch den Einsatz der Stellplatzprognose nicht verringern.
- Weiterhin muss die Bekanntgabe des Stellplatzes durch den Fahrgast intuitiv und ohne besondere Systemkenntnis verständlich sein. Dazu sind möglichst die vorhandenen und bereits vertrauten Einrichtungen zur Fahrgastinformation zu nutzen.
- Die durch den Betriebsleiter erlassenen Regularien zur Bedienung der Mehrfachhaltestellen sind durch das Verfahren abzubilden.

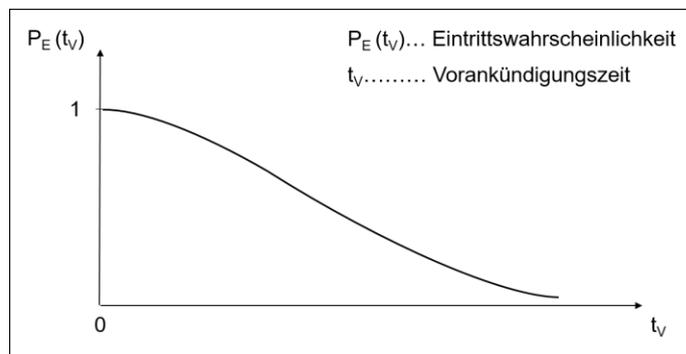
### 2.1 Berechnung der Stellplatzverteilung

Die Berechnung der Stellplatzverteilung besteht aus der Zuordnung zwischen den Fahrzeugen in Zufahrt einer Mehrfachhaltestelle und den dort zur Verfügung stehenden Stellplätzen. Die Qualität der Prognosen kann anhand der erreichten Eintrittswahrscheinlichkeit  $P_E$  und Vorankündigungszeit  $t_v$  beschrieben werden. Aufgrund der stochastisch wirkenden Beeinflussungen über den Fahrtverlauf stehen diese beiden Größen in unmittelbarem Zusammenhang. Es gilt: Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer Stellplatzprognose wird maximal, wenn der Prognosehorizont minimal wird und umgekehrt. Der resultierende Zielkonflikt zwischen der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses und dessen

## Stellplatzprognose an Mehrfachhaltestellen: Ein Beitrag zur Steigerung von Attraktivität und Effizienz des öffentlichen Stadtverkehrs

Vorankündigungszeit ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Zusammenhang kann durch das folgende Gedankenexperiment verdeutlicht werden.

Mehrere Fahrzeuge nähern sich aus verschiedenen Fahrtrichtungen einer Haltestelle an. Der zurückzulegende Restfahrweg ist noch groß, die Fahrzeuge verkehren teils auf Mischverkehrsflächen mit dem Motorisierten Individualverkehr und es sind zahlreiche Knoten mit Lichtsignalanlagen (LSA) zu passieren. Die Fahrzeit wird folglich durch verschiedene stochastische Einflüsse geprägt. Ein Zutreffen der Ankunftsprognose ist in diesem Stadium der Annäherung eher unwahrscheinlich. Demzufolge ist eine Prognose des Stellplatzes unzuverlässig. Das Gegenteil ist der Fall, wenn sich das Fahrzeug bereits kurz vor dem Stillstand im Haltestellenbereich befindet. Die Prognose der Ankunftszeit ist nun mit überaus hoher Wahrscheinlichkeit richtig. Entsprechend hoch ist die Zuverlässigkeit einer Stellplatzprognose. Da sich die stochastischen Einflussgrößen im Verlaufe einer Fahrt überlagern, nimmt die Eintrittswahrscheinlichkeit der Stellplatzprognose mit zunehmender räumlicher bzw. zeitlicher Entfernung immer stärker ab und geht schließlich gegen null.



**Abbildung 1 - Die Eintrittswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Vorankündigungszeit**

Im Ergebnis des dargestellten Zielkonflikts besteht hinsichtlich des praxisrelevanten Einsatzes der Stellplatzprognose die Herausforderung ein optimales Verhältnis der beiden Größen Eintrittswahrscheinlichkeit und Vorankündigungszeit zu bestimmen, um Stellplätze fahrgastwirksam zu veröffentlichen. Dieses muss sowohl eine ausreichend hohe Zuverlässigkeit der Prognosen, als auch eine akzeptable Zeitdauer zum Aufsuchen des entsprechenden Halteplatzes gewährleisten.

### 2.2 Bekanntgabe der fahrtbezogenen Stellplätze

Der fahrgastwirksame Veröffentlichungszeitpunkt wird durch das Verhältnis der beiden Größen Vorankündigungszeit und Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmt (siehe Abschnitt 2.1). Dabei gilt es zu beachten, dass eine sehr frühe Bekanntgabe der Stellplatzprognose das Risiko einer Korrektur erhöht und damit zusätzliche Bewegung auf dem Bahnsteig induziert. Bei einer zu kurzfristigen Bekanntgabe des Stellplatzes ist wiederum davon auszugehen, dass sich nicht alle Fahrgäste rechtzeitig auf die ausgewählte Halteposition orientieren.

Entsprechend bewegt sich die optimale Vorankündigungszeit der fahrgastwirksamen Veröffentlichung  $t_{V,opt, FG}$  zwischen den Schranken einer minimal notwendigen Vorankündigungszeit  $t_{V,min, FG}$  und der maximal zweckmäßigen Vorankündigungszeit  $t_{V,max, FG}$ .

## Stellplatzprognose an Mehrfachhaltestellen: Ein Beitrag zur Steigerung von Attraktivität und Effizienz des öffentlichen Stadtverkehrs

Für die Bestimmung des maximalen Prognosehorizonts ist der Fahrgastankunftsstrom an der Haltestelle maßgebend. Die Bekanntgabe der Stellplatzprognose ist frühestens mit Beginn der Wartezeit der Fahrgäste an der Haltestelle sinnvoll möglich. So kann der Fahrgast die Wartezeit nutzen, um sich an den voraussichtlichen Stellplatz des herannahenden Fahrzeugs zu begeben. Die Wartezeit wird bei planmäßigem Betrieb allein durch den Fahrgastzustrom bestimmt. Der Zusammenhang zwischen dem Fahrgastzustrom und der Wartezeit an Haltestellen des ÖPNV wurde bereits in verschiedenen Untersuchungen analysiert (siehe: Luethi, M., Weidmann U. und Nash, A. (2006), [8], Mueller, H. (1981), [9], Weber 1966, [10]). Diese kommen zu dem Schluss, dass sich der Fahrgastankunftsstrom aus der Überlagerung eines fahrplanunabhängigen und eines fahrplanabhängigen Zustroms zusammensetzt. Dabei ist das Verhältnis der beiden Zuströme abhängig von der Taktzeit. Die Beobachtungen zeigen für kleine Taktzeiten ( $\leq 10$  Minuten) einen linearen Zusammenhang von mittlerer Wartezeit und Taktzeit. Die mittlere Wartezeit  $t_{\bar{w}}$  entspricht hier der halben Taktzeit  $t_{\text{Takt}}$ . Der Anteil fahrplanunabhängiger Fahrgäste ist demzufolge für kleine Taktzeiten dominant, wodurch sich eine Gleichverteilung der ankommenden Fahrgäste einstellt. Aufgrund ihrer Funktion als Verknüpfungspunkt werden Mehrfachhaltestellen in der Regel jedoch von mehreren Linien bedient. In der Folge resultieren fahrplanabhängige Beeinflussungen des Fahrgastzustroms durch umsteigende Fahrgäste. Diese sind jedoch von der zeitlichen Lage der unterschiedlichen Fahrten abhängig. Unter Berücksichtigung der Anzahl kreuzender Linien und deren Taktung nimmt die Komplexität der Abschätzung mit Einbezug der Umsteigebeziehungen rapide zu. Für eine erste Abschätzung einer oberen Schranke der Vorankündigungszeit  $t_{V,\text{max},\text{FG}}$  wird die Beeinflussung des Fahrgastankunftsstromes durch kreuzende Linien vernachlässigt. Die obere Beschränkung des maximalen Vorankündigungszeitraums  $t_{V,\text{max},\text{FG}}$  ergibt sich näherungsweise aus:

$$t_{V,\text{max},\text{FG}} = t_{\bar{w}} = \frac{1}{2} t_{\text{Takt}} \quad (1)$$

Für die Definition des optimalen Vorankündigungszeitraums müssen weiterhin die Zeitanteile zur technischen Übermittlung der Stellplatzinformation  $t_{\bar{U},\text{T}}$ , zur Wahrnehmung der Stellplatzanzeige durch den Fahrgast  $t_{\bar{U},\text{M}}$  und zum Aufsuchen der entsprechenden Halteposition  $t_{\text{Weg}}$ , Berücksichtigung finden. Die Abschätzung der unteren Beschränkung der optimalen Vorankündigungszeit kann durch die Bestimmung der minimal erforderlichen Zeitelemente der Vorankündigungszeit vorgenommen werden. Der minimale Vorankündigungszeitraum  $t_{V,\text{min},\text{FG}}$  ergibt sich folglich aus:

$$t_{V,\text{min},\text{FG}} = t_{\bar{U},\text{T},\text{min}} + t_{\bar{U},\text{M},\text{min}} + t_{\text{Weg},\text{min}} \quad (2)$$

Die Zeitdauer zur technischen Übermittlung der Stellplatzinformation erscheint sowohl konstant als auch gering. Die übrigen Zeitbestandteile der Vorankündigungszeit sind jedoch deutlich heterogener einzuschätzen. Dies ist mit der Zusammensetzung der Fahrgastströme zu erklären. Die Gesamtheit der Fahrgäste kann in verschiedene Gruppen mit unterschiedlichen Eigenschaften (z.B. Systemkenntnis, Geschwindigkeit, situativer Fokus) untergliedert werden. Der relative Anteil der einzelnen Fahrgastgruppen am momentanen Gesamtaufkommen an einer Haltestelle ist zudem von stochastischer Natur. Daraus ergibt sich eine wahrscheinliche Schwankung im Betrag und der Streuung der konkreten Zeitanteile für das Erkennen, Verstehen und Aufsuchen der ausgewiesenen Halteposition.

### 3 Prognoseansatz

Das Verfahren zur Stellplatzprognose wertet bestimmte Ereignisse der Fahrzeugbewegung kontinuierlich aus. Dazu bedarf es einer mikroskopischen Modellierung der einzelnen Fahrten, deren Komplexität mit steigender Anzahl der verkehrenden Linien zunimmt. Die Bestimmung der Verteilung der Stellplätze basiert insbesondere auf der Kenntnis der voraussichtlichen Ankunftszeit des Fahrzeuges und der Besetzungsdauer des Halteplatzes am Prognoseort.

#### 3.1 Modellierung der Fahrzeugbewegung

Die Fahrtrajektorie wird in die folgenden drei Phasen zerlegt (siehe Kindinger 2010, [2]):

- Fahrzeugzulauf
- Haltestellenaufenthalt
- Fahrzeugablauf

Durch die hinreichend genaue Modellierung der einzelnen Phasen können die relevanten Ereignisse im Verlaufe der Fahrtrajektorie zeitlich abgeschätzt werden. Das Zusammenspiel der benannten Phasen der Fahrzeugbewegung kann in Abbildung 2 nachvollzogen werden.

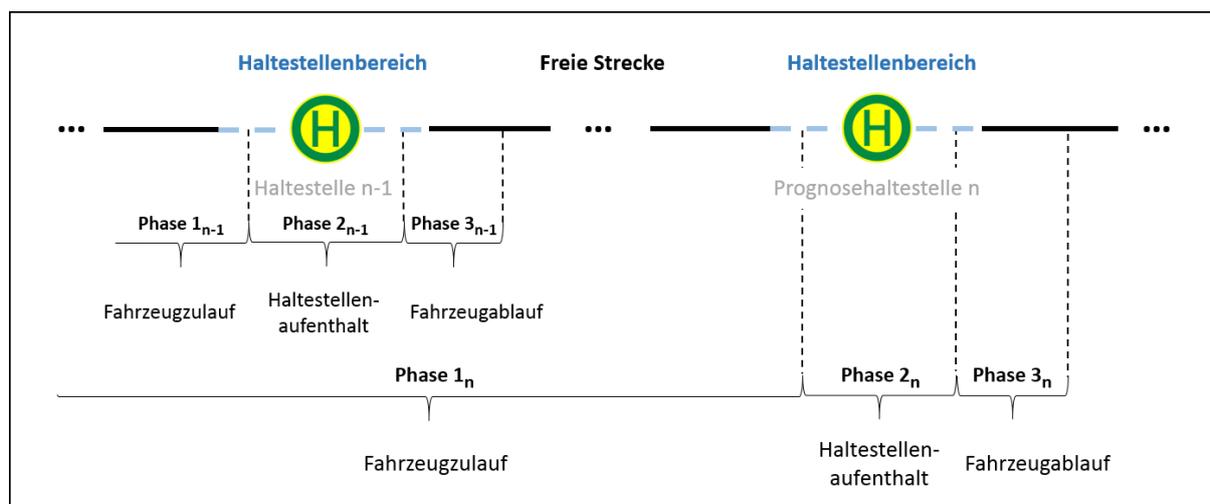


Abbildung 2 - Phasenmodell der Fahrzeugbewegung

Die Untergliederung der Fahrtrajektorie in die Phasen Fahrzeugzulauf, Haltestellenaufenthalt und Fahrzeugablauf ist an jeder befahrenen Haltestelle zu beachten. So besitzt beispielsweise eine fehlerhafte Schätzung der Haltestellenaufenthaltszeit (Phase 2<sub>n-1</sub>) an der Haltestelle n-1 eine direkte Rückkopplung zur Modellierung des Fahrzeugzulaufes (Phase 1<sub>n</sub>) an der darauffolgenden Prognosehaltestelle n. Folglich kann die zeitliche Ausprägung der einzelnen Phasen je nach Referenzhaltestelle variieren. Dies ist durch die Art und den Umfang der lokal auftretenden Beeinflussungen begründet. Demzufolge setzt eine hochwertige Stellplatzprognose für jede Fahrt eine entsprechend komplexe Betrachtung der einzelnen Phasen und deren Einflussgrößen voraus.

### 3.1.1 Fahrzeugzulauf

Der Fahrzeugzulauf beschreibt die Phase der Annäherung des Fahrzeugs an die Haltestelle. Er kann die Bedienung mehrerer vorgelagerter Haltestellen beinhalten und endet mit der Ankunft am Stellplatz des Prognoseortes. Durch die Modellierung des Fahrzeugzulaufs kann die voraussichtliche Ankunftszeit des Fahrzeugs an der betreffenden Haltestelle bestimmt werden. Auf deren Grundlage können die Schätzungen zur Haltestellenaufenthaltszeit und Abfahrtszeit konkretisiert werden.

Für die Berechnung des Ankunftszeitpunktes können verschiedene Ansätze gewählt werden. Ein weit verbreitetes Verfahren zur Bestimmung der Restfahrzeit bis zur Ankunft an einer Haltestelle ist die lineare Interpolation der Fahrzeit. Hierbei wird der Ankunftszeitpunkt an einer bestimmten Haltestelle auf Basis der fahrplanmäßig vorgesehenen Fahrzeit und der aktuellen Fahrplanlage des Fahrzeugs abgeschätzt. Die Genauigkeit der resultierenden Prognose liegt in der Regel im Minutenbereich. Für nähere Angaben siehe Wolf 2017, [1].

Eine deutliche Steigerung der Präzision der Ankunftsprognose kann durch eine mikroskopische Modellierung der Fahrtrajektorie erreicht werden (siehe Gassel et. al. 2013, [3]). Dazu wird der entsprechende Teil des Streckennetzes innerhalb eines Knoten- und Kantenmodells nachgebildet und der physische Fahrzeitbedarf für jedes Streckenelement ermittelt. Durch die Vernetzung mit umliegenden Einrichtungen der Verkehrssteuerung kann dieser Wert in Echtzeit mit etwaigen Verlustzeiten beaufschlagt werden. Dies ermöglicht eine sekundengenaue Vorhersage der Ankunft des Fahrzeugs an der Haltestelle.

Die wesentlichen Einflussgrößen des Fahrzeugzulaufs sind in Tabelle 1 zusammengefasst:

Einflussgröße	Beschreibung
Verkehrsaufkommen	- Zeitliche Schwankungen in der Anzahl von Verkehrsteilnehmern und Fahrgästen
Verlustzeit an LSA	- Haltezeit an einem LSA-geregeltem Verkehrsknoten - Abhängig von Steuerverfahren, Eingriffsmöglichkeiten der ÖPNV-Fahrzeuge
Haltestellenaufenthaltszeit	- Verweildauer des Fahrzeugs am Stellplatz (an vormals bedienten Haltestellen)
Ortungsgenauigkeit	- Auftretende Latenzzeiten beeinflussen die Präzision der Fahrtprognosen

**Tabelle 1 - Maßgebende Einflussgrößen des Fahrzeugzulaufs**

### 3.1.2 Haltestellenaufenthalt

Die Zeitdauer welche das Fahrzeug auf dem Stellplatz verbringt ist Grundlage der Bestimmung des Abfahrtszeitpunktes. Sie beginnt mit dessen Ankunft auf dem Stellplatz (Stillstand) und endet mit der Herstellung der Abfahrtsbereitschaft. Die Abschätzung dieser Zeitkomponente wird durch die Einflussgrößen in Tabelle 2 bestimmt:

Einflussgröße	Beschreibung
Türöffnungs- und -schließzeit	- Technisch bedingte Prüf- und Latenzzeiten
Fahrgastwechselzeit	- Zeitdauer zum Aus- und Einstieg der Fahrgäste - Maßgebender Zeitanteil für die Dimensionierung der Haltestellenaufenthaltszeit - Abhängig von Verkehrsaufkommen, Fahrgastbewegung und Stellplatz
Personalwechsel	- Zeitdauer zur Übergabe des Fahrzeugs an ein anderes Fahrpersonal - Dauer und Streuung in Abhängigkeit der aktuellen Betriebslage

## Stellplatzprognose an Mehrfachhaltestellen: Ein Beitrag zur Steigerung von Attraktivität und Effizienz des öffentlichen Stadtverkehrs

Betriebstechnologie	- Betriebliche Bestimmungen zur Bedienung der Haltestellen - z.B. kontrollierter vorderer Einstieg zur Fahrausweisprüfung
Pufferzeiten	- Zeitreserven zum Abbau von Verspätungen und Realisierung von Anschlüssen

**Tabelle 2 - Maßgebende Einflussgrößen des Haltestellenaufenthalts**

### 3.1.3 Fahrzeugablauf

Der Fahrzeugablauf beschreibt den Zeitraum zwischen dem Erlangen der Abfahrtsbereitschaft und dem vollständigen Räumen der Halteposition bzw. des Haltestellenbereichs. Der Zeitpunkt des Freiseins eines Stellplatzes ergibt sich folglich aus dem prognostizierten Abfahrtszeitpunkt zuzüglich der Zeitdauer zum Räumen des Halteplatzes. Der Fahrzeugablauf kann mitunter durch ein erneutes Halten an einer vorderen Halteposition (im Bedarfsfall auch mit weiterer Haltestellenaufenthaltszeit) unterbrochen werden. Auch diese Phase wird durch verschiedene Einflussgrößen geprägt (Tabelle 3):

Einflussgröße	Beschreibung
Freigabezeitfenster	- LSA im Ausfahrbereich determinieren die Ausfahrmöglichkeiten eines Fahrzeugs
Verkehrsaufkommen	- Beeinflusst die Einordnung des Fahrzeugs in den fließenden Verkehr
Fahrplanlage	- Mögliche Wartezeit zur Vermeidung einer verfrühten Abfahrt
Stellplatz	- Lage kann das Erreichen des Freigabezeitfensters beeinflussen
Ausfahrgeschwindigkeit	- Geschwindigkeitsrestriktionen (z.B. durch Weichenkonstruktionen)
Ortungsgenauigkeit	- Auftretende Latenzzeiten beeinflussen die Präzision der Abfahrtsdetektion

**Tabelle 3 - Maßgebende Einflussgrößen des Fahrzeugablaufs**

### 3.2 Modellierung der Fahrgastbewegung

Die Gesamtheit aller Fahrgastbewegungen mit dem Ziel ein bestimmtes Fahrzeug zu betreten bzw. dessen Innenraum zu verlassen, wird durch den Prozess Fahrgastwechsel beschrieben. Hierbei ist die Art und Weise der Fahrgastbewegung eine wesentliche Determinante der Fahrgastwechselzeit. Sie lässt sich grundsätzlich von der Höhe des Fahrgastaufkommens ableiten (siehe Horn 2017, [4], Rüger 1986, [5]). Das Ausmaß der Fahrgastwechselzeit wird weiterhin durch die Verteilung der Fahrgäste über den Bahnsteig bzw. innerhalb des Fahrzeugs und der Zusammensetzung des Fahrgastzustromes beeinflusst (siehe Abschnitt 2.2). Bei der Modellierung des Fahrgastwechsels sind vor allem die Charakteristika des Fußwegverkehrs zu berücksichtigen:

- Bevorzugung kurzer und direkte Wege
- Meidung von Hindernissen (z.B. Engstellen, Stufen)
- Wahrung des Abstandes zu umliegenden Personen (ges. Distanz)
- Meidung von Unannehmlichkeiten (raue Oberflächen, Witterung Lichtverhältnisse)

Der Fußverkehr ist besonders durch sprunghafte Änderungen der Routenwahl geprägt. Ausgelöst wird dies durch den großen Variantenreichtum in Verbindung mit kontinuierlich wechselnden situativen Reizen. In der Folge wird die gewählte Route anhand sub- und objektiven Kriterien ständig optimiert und neu berechnet. Bezüglich der Modellierung der

## Stellplatzprognose an Mehrfachhaltestellen: Ein Beitrag zur Steigerung von Attraktivität und Effizienz des öffentlichen Stadtverkehrs

Fahrgastbewegung und der resultierenden Fahrgastwechselzeit an Mehrfachhaltestellen ergeben sich bestimmte Kriterien, welche in die folgenden Kategorien eingeordnet werden:

- Infrastruktur
- Verkehrsmittel
- Fahrgäste

Eine Auflistung der wesentlichen Einflussgrößen kann Tabelle 4 entnommen werden. Die verschiedenen Faktoren erwachsen vor allem aus der baulichen Gestaltung der Anlagen und Fahrzeuge sowie den spezifischen Eigenschaften der Fahrgäste.

Kategorie	Einflussgröße
Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lage und Anzahl der Zugänge zum Bahnsteig</li> <li>- Geometrie der Plattform</li> <li>- Haltestellenausstattung (z.B. Fahrgastunterstände, Fahrausweis-Automaten, Sitzgelegenheiten, Abfahrtsanzeiger)</li> <li>- Bauliche Rahmenbedingungen (z.B. Gebäude, Bepflanzung)</li> </ul>
Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stellplatz des Fahrzeugs</li> <li>- Fahrzeuglänge</li> <li>- Größe und Anzahl der Türen</li> <li>- Ebenerdiger Einstieg</li> <li>- Vorgesehener Staubraum im Bereich der Türen</li> <li>- Durchlassfähigkeit in Gängen und an Engstellen</li> <li>- Besetztgrad</li> </ul>
Fahrgast	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abstand zum Stellplatz des Fahrzeugs</li> <li>- Hauptrichtung des Fahrgastzustroms</li> <li>- Zusammensetzung und Geschwindigkeit des Fahrgaststroms</li> <li>- Charakteristika des Fußwegverkehrs</li> <li>- Grad der Systemkenntnis</li> <li>- Fahrausweiserwerb beim Fahrer (z.B. im Busbereich)</li> <li>- Anzahl nacheilender Fahrgäste</li> </ul>

**Tabelle 4 – Einflussfaktoren der Fahrgastverteilung und -geschwindigkeit**

Eine Abschätzung der Fahrgastwechselzeit erfordert folglich die Berücksichtigung zahlreicher, sowohl statischer als auch dynamischer Kriterien. Dazu wird eine mikroskopische Modellierung des Fahrgastwechsels benötigt, welche die unterschiedlichen Merkmale der Kategorien Infrastruktur, Verkehrsmittel und Fahrgäste entsprechend des Prognoseortes auswertet. In Anbetracht der Komplexität hinsichtlich Detektion und Bewertung der Eingangsgrößen einer solchen Analyse wird die Fahrgastwechselzeit durch die Verkehrsunternehmen meist durch orts- und fahrzeitklassenabhängige Zeitbestandteile innerhalb des Sollfahrplans abgebildet. Diese Zeitbestandteile werden in der Regel durch automatisierte Auswertungen zu Haltestellenaufenthaltszeiten seitens des Leitsystems ermittelt. Der resultierende gemittelte Wert weist eine entsprechende Unschärfe hinsichtlich der einzelnen Zeitelemente der Haltestellenaufenthaltszeit (siehe Abschnitt 3.1.2) auf. Die Modellierung des Fahrgastwechsels erlaubt weiterhin die Ableitung der mindesterforderlichen Vorankündigungszeit als elementare Zielgröße des Verfahrens zur Stellplatzprognose. Deren Dimensionierung erfordert ebenfalls die Berücksichtigung der zuvor benannten, sowohl

## Stellplatzprognose an Mehrfachhaltestellen: Ein Beitrag zur Steigerung von Attraktivität und Effizienz des öffentlichen Stadtverkehrs

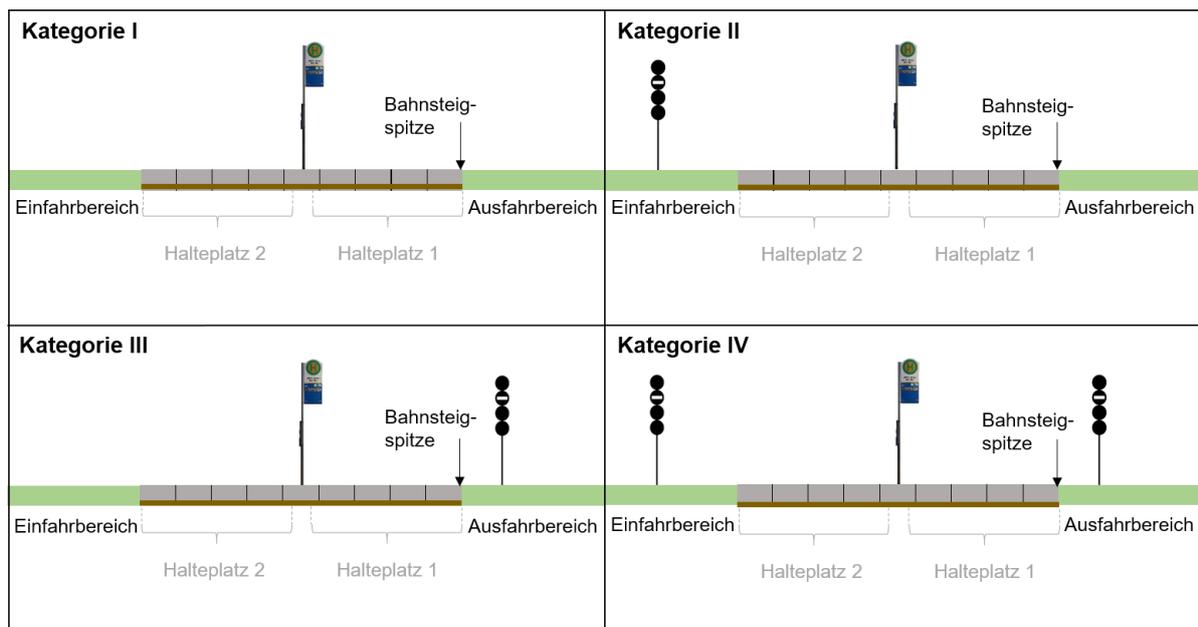
statischer als auch dynamischer Kriterien. Zur Vereinfachung wird auch an dieser Stelle ein fester Zeitwert angesetzt, welcher sich aus der groben Kategorisierung der Mehrfachhaltestellen im folgenden Kapitel ableitet.

### 3.3 Kategorisierung der Mehrfachhaltestellen

Für eine zuverlässige Stellplatzprognose ist die Präzision der Ankunfts- und Abfahrtszeitschätzung von elementarer Bedeutung. Diese wird wiederum durch die Qualität der Modellierung der Fahrtrajektorie und Modellierung der Fahrgastbewegung geprägt. Beide Modelle werden in hohem Maße durch einzelne Faktoren beeinflusst.

#### 3.3.1 Kategorisierung nach LSA-Beeinflussung

Das Ausmaß der stochastischen Beeinflussung der Fahrtrajektorie wird stark vom Vorhandensein von LSA im Umfeld der Haltestelle geprägt. Daher wird an dieser Stelle eine Unterscheidung der Mehrfachhaltestellen nach der umliegenden Positionierung von LSA vorgenommen. Die Variationsmöglichkeiten zeigt Abbildung 3.



**Abbildung 3 - Kategorisierung der Mehrfachhaltestellen anhand der LSA im Umfeld**

Dabei stellt Kategorie I eine Mehrfachhaltestelle dar, welche durch keinerlei Signale im Ein- oder Ausfahrbereich beeinflusst wird. Dies kann zum einen durch deren Nichtvorhandensein, zum anderen durch den hohen Grad an Eingriffsmöglichkeiten für ÖPNV-Fahrzeuge und der dadurch vernachlässigbaren Verlustzeit, begründet sein. Wird die Fahrtrajektorie durch eine LSA im Einfahr- bzw. Ausfahrbereich der Mehrfachhaltestelle beeinflusst, wird die Haltestelle der Kategorie II bzw. Kategorie III zugeordnet. In Kategorie IV wirken sowohl in der Einfahrt als auch in Ausfahrt LSA auf die Fahrzeugbewegung ein. Der Grad der Beeinflussung durch LSA hängt dabei stark von der Flexibilität des operierenden Signalprogramms, den vorgesehenen Eingriffsmöglichkeiten und dem Ankunftszeitpunkt der ÖPNV-Fahrzeuge ab.

### 3.3.2 Kategorisierung nach Fahrgastverteilung

Die Fahrgastverteilung an Mehrfachhaltestellen prägt maßgeblich die Fahrgastwechselzeit. Sie wird besonders durch die Lage der Zugänge und der Hauptzustromrichtung der Fahrgäste beeinflusst. Die Kategorisierung der möglichen Verteilungen ist in Abbildung 4 dargestellt.

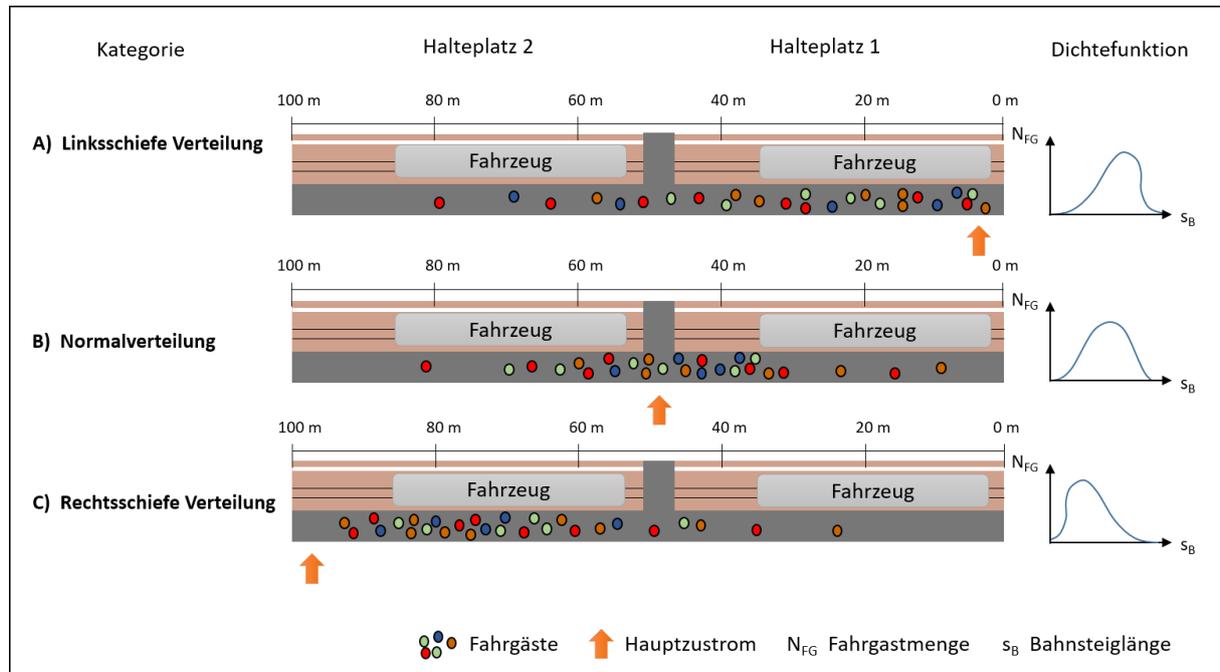


Abbildung 4 - Kategorisierung der Fahrgastverteilung auf dem Bahnsteig

Unter Annahme der folgenden Rahmenbedingungen wird die Verteilung der Fahrgäste auf dem Bahnsteig zur ausschlaggebende Größe für die Bestimmung der minimalen Vorankündigungszeit des Stellplatzes:

- Die Fahrgastverteilung auf dem Bahnsteig wird ausschließlich durch die Richtung des Hauptzustroms zum Haltestellenbereich beeinflusst.
- Die verfügbare Aufstellfläche innerhalb des Haltestellenbereichs ermöglicht das gleichzeitige Halten von nicht mehr als zwei Fahrzeugen.
- Die Zusammensetzung des Fahrgaststroms ist homogen und konstant. Für die mittlere Geschwindigkeit des Fahrgaststroms  $v_{FG}$  werden 1,0 m/s angenommen (siehe FGSV 2018, [6], Bartels et. al. 2014, [11]).
- Die minimale Vorankündigungszeit gewährleistet die Bewegung des Fahrgastes von seiner Warteposition bis zum Fahrzeug (Wegstrecke  $s_{FG}$ ).
- Die Bemessung der minimalen Vorankündigungszeit soll mindestens für 90% der Fahrgäste ausreichend sein.
- Die Latenzzeiten zur technischen Übertragung und Wahrnehmung der Stellplatzinformation werden vernachlässigt.

## Stellplatzprognose an Mehrfachhaltestellen: Ein Beitrag zur Steigerung von Attraktivität und Effizienz des öffentlichen Stadtverkehrs

Folglich können die Kategorien wie folgt beschrieben werden:

In den Kategorien A und C korrespondiert die Position der Mehrzahl der Fahrgäste mit der Lage des vorderen oder hinteren Halteplatzes. Folglich ist die benötigte Wegstrecke zum Erreichen des Stellplatzes entweder sehr gering oder sehr groß. Für beide Fälle gilt:

- Stimmt der Stellplatz des Fahrzeugs mit der Position der Mehrheit der Fahrgäste überein, sind sehr kurze Wege zurückzulegen. Die mittlere Wegstrecke  $\bar{s}_{FG}$  geht gegen Null.
  - $t_{v,min} = t_{\bar{U},T, min} + t_{\bar{U},M, min} + t_{W, min}$  | mit:  $t_{\bar{U},T, min} = t_{\bar{U},M, min} = 0$
  - $t_{v,min} = \bar{s}_{FG} / v_{FG} = \mathbf{0s}$  | mit:  $\bar{s}_{FG} = 0m, v_{FG} = 1,0m/s$
- Stimmt der Stellplatz des Fahrzeugs nicht mit der Position der Mehrheit der Fahrgäste überein, sind sehr lange Wege zurückzulegen. Unter Berücksichtigung der Bahnsteig- und der Fahrzeuglänge im Beispiel ergibt sich für die Mehrheit der Fahrgäste eine mittlere Wegstrecke  $\bar{s}_{FG}$  von ca. 60 Metern.
  - $t_{v,min} = \bar{s}_{FG} / v_{FG} = \mathbf{60s}$  | mit:  $\bar{s}_{FG} = 60m, v_{FG} = 1,0m/s$

Die Verteilung in Kategorie B zeigt eine Konzentration der Fahrgäste zwischen den möglichen Stellplätzen der Fahrzeuge. Dies bewirkt eine Reduktion der durch die Fahrgäste zurückzulegenden mittleren Wegstrecke. Da sich die Fahrgäste jedoch nicht auf einen konkreten Halteplatz vororientieren (Kategorie A und C), zieht nun jede Fahrzeugankunft eine Fahrgastbewegung nach sich. Es gilt:

- Die minimale Vorankündigungszeit ist für alle Fahrten konstant. Aus dem gegebenen Beispiel lässt sich eine mittlere Wegstrecke  $\bar{s}_{FG}$  von ca. 30 Metern ableiten.
  - $t_{v,min} = \bar{s}_{FG} / v_{FG} = \mathbf{30s}$  | mit:  $\bar{s}_{FG} = 30m, v_{FG} = 1,0m/s$

## 4 Umsetzung und Ergebnisse

Das Verfahren zur Stellplatzprognose wurde im Rahmen des mehrstufigen Projekts „Adaptive RBL-gekoppelte LSA-Steuerung zur Qualitätsverbesserung des Verkehrs in Leipzig“ (RBLSA) an der Technischen Universität Dresden entwickelt (siehe Wolf 2017, [1]). Nach Erarbeitung der theoretischen Grundlagen wurden dank der Unterstützung der Leipziger Verkehrsbetriebe GmbH (LVB) und des Verkehrs- und Tiefbauamts der Stadt Leipzig die technischen Voraussetzungen zur Realisierung des Verfahrens geschaffen.

### 4.1 Untersuchungsgebiet

Für die Pilotumsetzung der Stellplatzprognose wurde die Leipziger Zentralhaltestelle Hauptbahnhof ausgewählt. An dieser Haltestelle steigen werktags etwa 112.000 Fahrgäste ein oder aus. Insgesamt verteilen sich zehn Straßenbahnlinien und drei Buslinien mit insgesamt etwa 124 ÖPNV-Abfahrten in der Spitzenstunde auf vier Bahnsteige.

Zunächst wurde das Verfahren am Bahnsteig 3 getestet, an dem fünf Straßenbahnlinien verkehren und etwa 23.000 Fahrgäste täglich ein- und aussteigen (siehe Abbildung 5). Bedingt durch Betriebstechnologie und Infrastruktur können an dem 126 m langen Bahnsteig zeitgleich zwei ÖPNV-Fahrzeuge einen Fahrgastwechsel durchführen.

## Stellplatzprognose an Mehrfachhaltestellen: Ein Beitrag zur Steigerung von Attraktivität und Effizienz des öffentlichen Stadtverkehrs

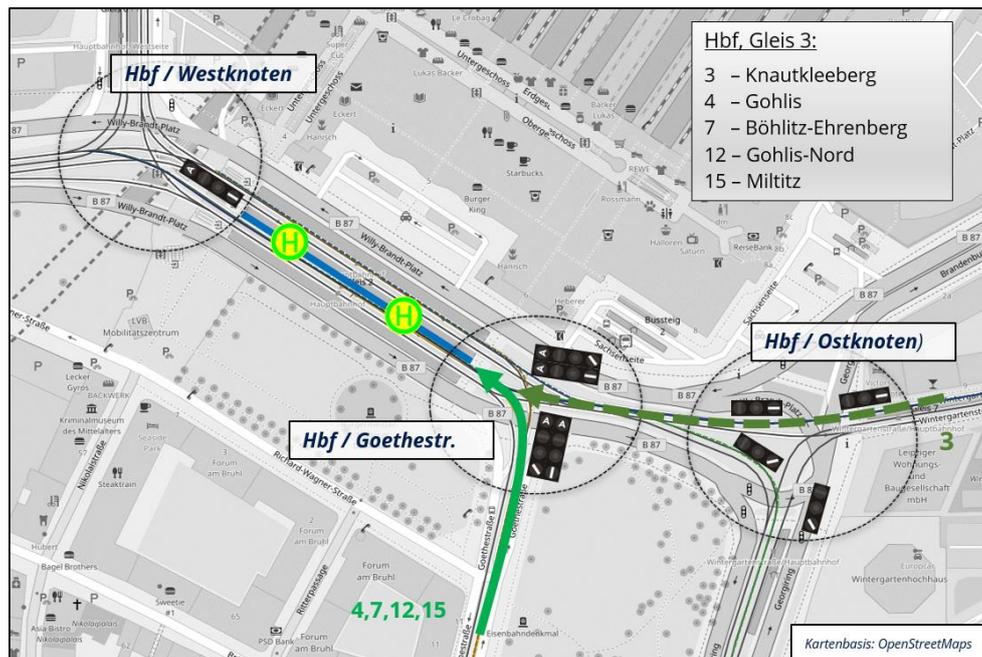


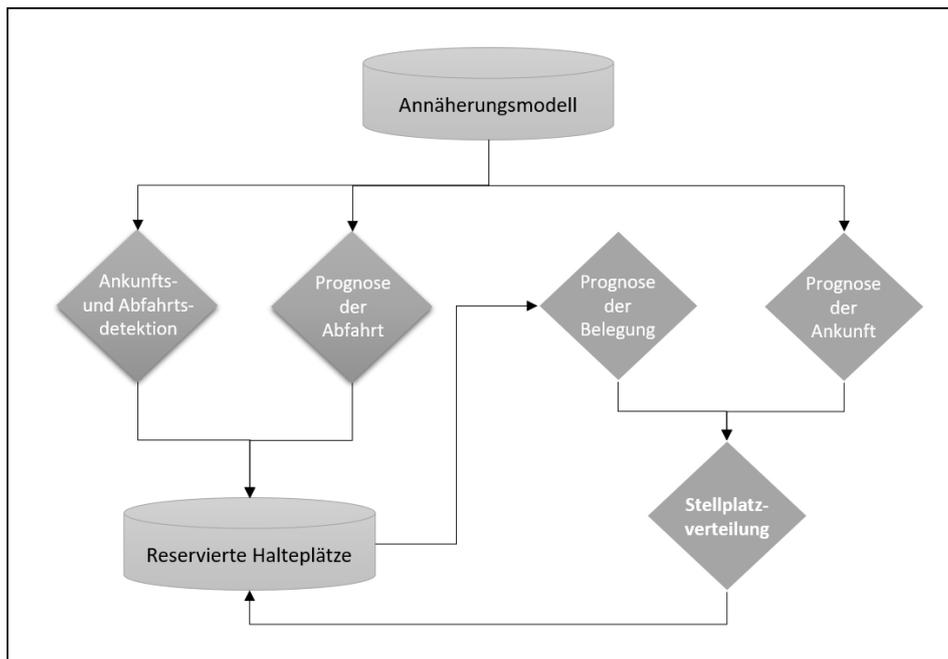
Abbildung 5 - Untersuchungsgebiet Leipzig Hauptbahnhof, Gleis 3

Aus Sicht des Fahrgasts erweist sich eine eigenständige Antizipation des Stellplatzes am Bahnsteig 3 ohne technische Unterstützung als äußerst schwierig. Die ÖPNV-Fahrzeiten in der östlichen Zufahrt unterliegen aufgrund mehrerer LSA im unmittelbaren Umfeld an den Knotenpunkten Hbf/Goethestr. und Hbf/Ostknoten einer hohen Streuung. Zum einen ist es ohne technische Unterstützung schwer vorhersehbar, wie sich die Reihenfolge der Fahrzeuge aus der Goethestraße (Linien 4,7, 12, 15) mit den Fahrzeugen vom Willy-Brand-Platz (Linie 3) einstellt. Zum anderen ist es in ausgewählten Verkehrssituationen möglich, dass mehrere Straßenbahnen eine ÖPNV-Freigabe an der LSA Hbf/Goethestr. aus südlicher Richtung kommend nutzen. Darüber hinaus wird die Halteplatzvorhersage erschwert, da die Signalisierung im Abfluss der Haltestelle am Knotenpunkt Hbf/Westknoten ein ungehindertes Verlassen der Haltestelle teils unterbindet. In der Praxis führen die ausgeprägte Bahnsteiglänge und die Unsicherheit des tatsächlichen Stellplatzes dazu, dass sich die Fahrgäste zwischen den Stellplätzen 1 und 2 konzentrieren. In Hinblick auf die LSA-Beeinflussung und Fahrgastkonzentration entspricht diese Mehrfachhaltestelle der Kategorie IV-B (siehe Abschnitt 3.3) Aufgrund der Fahrgastverteilung ist eine minimale Vorankündigungszeit von 30 Sekunden erforderlich.

### 4.2 Eingangsdaten

Das neu entwickelte Verfahren zur Stellplatzprognose erhält kontinuierlich Informationen vom ÖPNV-Annäherungsmodell der Technischen Universität Dresden. Dieses Annäherungsmodell wurde zunächst für die Qualitätsgerechte Behandlung des ÖPNV an Lichtsignalanlagen entwickelt und kommt seither an einer Vielzahl von LSA-geregelten Knotenpunkten in Leipzig und Dresden zum Einsatz (siehe Gassel et. al. 2013, [3], Dutsch et. al. 2017, [7]).

## Stellplatzprognose an Mehrfachhaltestellen: Ein Beitrag zur Steigerung von Attraktivität und Effizienz des öffentlichen Stadtverkehrs



**Abbildung 6: Komponenten und Prozesse der Stellplatzprognose**

Das ÖPNV-Annäherungsmodell ist ein Betriebslagemodell, welches durch Schnittstellen zum Betriebsleitsystem der LVB, zum LSA-Verkehrsrechner der Stadt Leipzig, zur Verkehrslagedetektion im Motorisierten Individualverkehr (MIV) und zu Funkempfangseinheiten der Fahrzeug-Zu-Infrastruktur-Kommunikation ein exaktes ÖPNV-Betriebslagebild generiert. Anhand der mikroskopischen Fahrzeugmodellierung, der Prognose von LSA-Schaltzeiten und direkten Steuerungseingriffen in die LSA-Steuerung werden Fahrzeugpositionen im Rahmen einer Kurz- und Mittelfristprognose sekundenfein prognostiziert. Entsprechend stellt das Annäherungsmodell Ankunftszeiten im Fahrzeugzulauf an Haltestellen und mögliche Optionen im signalisierten Fahrzeugabfluss zur Verfügung. Die Stellplatzprognose verwertet diese Daten zur stellplatzspezifischen Ermittlung und Prognose der Ankunft, Abfahrt, Belegung und Verteilung (siehe Abbildung 6).

### 4.3 Qualität der Prognoseergebnisse

Zur Bewertung der Prognosequalität liegt eine Stichprobe von 12.653 Fahrten (Zeitraum vom 01.06.2019 bis 01.07.2019) vor. Durch das Verfahren wurde jeder dieser Fahrten ein Stellplatz zugeordnet. Die Verteilung der tatsächlichen Halte auf die Stellplätze im vorderen oder hinteren Haltestellenbereich kann Abbildung 7 entnommen werden. Die dabei erreichte Vorankündigungszeit beschreibt die Zeitdauer einer unveränderten Stellplatzprognose vor Ankunft des Fahrzeugs. Anhand der Haltestellenkategorie (IV-B) wurde für die betrachtete Haltestelle eine minimale Vorankündigungszeit von 30 Sekunden angesetzt (siehe Abschnitt 4.1). Zur Evaluation der erreichten Vorankündigungszeiten wurde eine Klassifizierung der Gesamtanzahl der Fahrten vorgenommen. Die über alle Stellplätze gemittelte Vorankündigungszeit entspricht in ca. 94% der Fahrten der geforderten minimalen Vorankündigungszeit (siehe Abbildung 7). Im Vergleich zu Stellplatz eins fällt die Wahrscheinlichkeit einer hohen Vorankündigungszeit, für den Stellplatz im hinteren

## Stellplatzprognose an Mehrfachhaltestellen: Ein Beitrag zur Steigerung von Attraktivität und Effizienz des öffentlichen Stadtverkehrs

Haltestellenbereich geringer aus. Dies liegt in der Unschärfe der Modellierung der Fahrtrajektorien an den vorgelagerten Haltestellen begründet. Dadurch kann die Belegung des hinteren Stellplatzes mitunter erst zum Zeitpunkt des Passierens des Knotenpunktes Hbf/Goethestr. zuverlässig vorhergesagt werden. Ein weiteres Einflusskriterium auf die Vorankündigungszeit am Stellplatz zwei sind Ungenauigkeiten in der Prognose des Abfahrtszeitpunktes. Diese sind im Wesentlichen auf Streuungen in der auftretenden Fahrgastwechselzeit, sowohl an vorgelagerten Haltestellen als auch am Prognoseort selbst zurückzuführen.

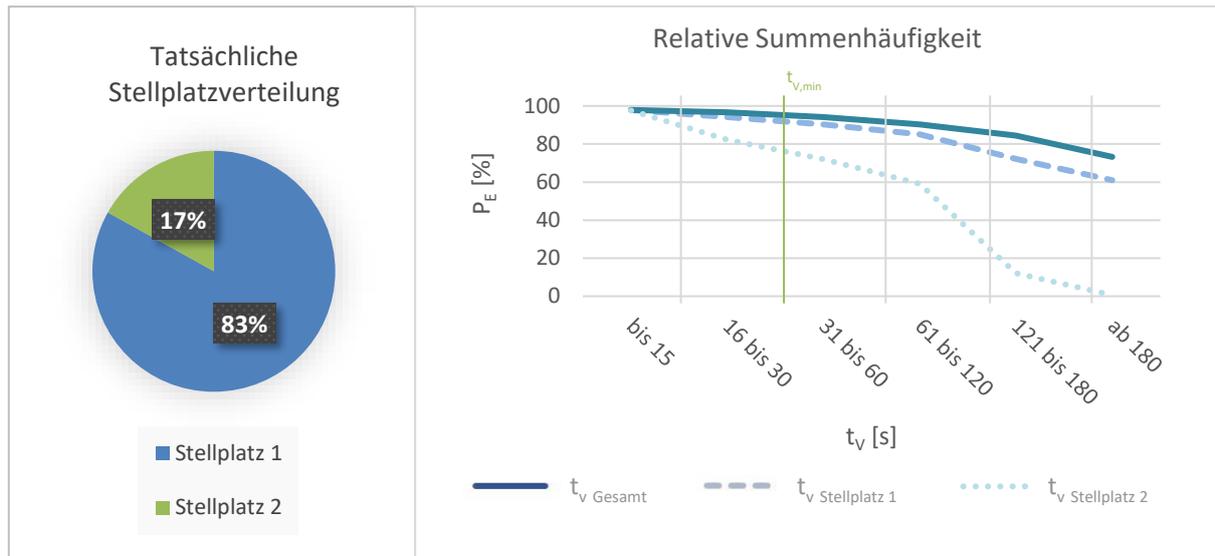


Abbildung 7 – Stellplatzverteilung und Vorankündigungszeit

Eine abschließende Aussage über den Qualitätsgewinn durch das entwickelte Verfahren bedarf einer Abschätzung des aktuellen Zustandes. Um die korrekte Fahrzeugreihung zu erkennen, können die Fahrgäste die bestehenden Abfahrtsanzeiger nutzen. Dort sind die nächsten Abfahrten nach ihrer zeitlichen Reihenfolge sortiert. Die Darstellung der Reihenfolge berücksichtigt jedoch keinerlei stochastischer Einflussgrößen. In der Folge entspricht die angezeigte Reihungsinformation häufig nicht dem realen Betriebsablauf. Gleichzeitig wird der mögliche Stellplatz eines Fahrzeugs durch die chronologische Fahrtenreihenfolge dem Fahrgast gegenüber nur implizit kommuniziert.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Das korrekte Antizipieren der Halteposition von Fahrzeugen an Mehrfachhaltestellen gestaltet sich für die wartenden Fahrgäste häufig als sehr schwierig. Dies wird im Wesentlichen durch die unterschiedlich starken Schwankungen in der zeitlichen Streuung der Fahrzeit und den unterschiedlichen Annäherungsverhalten des Fahrpersonals bedingt. In der Folge müssen die Kunden einen längeren Weg zum Fahrzeug zurücklegen, wodurch die Fahrgastwechselzeit erhöht und die Qualität des Betriebsablaufs gemindert wird. Durch die Stellplatzprognose kann die jeweilige Halteplatzinformation den Fahrgästen noch vor Eintreffen des Fahrzeuges an der Haltestelle rechtzeitig bekanntgegeben werden. Dadurch ist es den Fahrgästen möglich sich frühzeitig auf den Haltebereich der entsprechenden Fahrzeuge zu orientieren. Folglich wird

die Haltestellenaufenthaltszeit der Fahrzeuge durch kurze Einstiegswege reduziert und gleichzeitig die wahrgenommene Servicequalität infolge der höherwertigen Fahrgastinformation gesteigert. Auf Basis der vielversprechenden Prognoseergebnisse ist sowohl eine fahrgastwirksame Visualisierung des Stellplatzes am Bahnsteig als auch eine fahrerwirksame Darstellung im Fahrzeug auf dem Fahrerassistenzsystem der Leipziger Verkehrsbetriebe im Jahr 2020 geplant.

## 6 Literatur

### 6.1 Bücher

- [1] P. Wolf. (2017). Entwicklung eines Verfahrens zur Halteplatzprognose im ÖPNV. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- [2] C. Kindinger (2010): Entwicklung eines Simulationsmodells zur Planung und Steuerung von zuverlässigen Betriebsabläufen mit Anschlusssicherung an Bushaltestellen, Dissertation, Bergische Universität Wuppertal.
- [3] Gassel, C. und Krimmling, J. (2013): Effects of Cooperative Traffic Signals for Energy Efficient Driving in Tramway Systems, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference of Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, Dresden.
- [4] T. Horn. (2017). Auswertung von unterschiedlichen Randbedingungen auf die Haltestellenaufenthaltszeit. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- [5] S. Rüger (1986): Transporttechnologie städtischer öffentlicher Personenverkehr (3. Auflage), VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin.
- [6] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (2015): RiLSA Richtlinien für Lichtsignalanlagen – Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr, FGSV Verlag GmbH, Köln.
- [7] Dutsch, S., Gassel, C. und Krimmling, J. (2017): Vernetzte dezentrale Qualitätssteuerung im Öffentlichen Personennahverkehr - ein neuer Ansatz in Theorie und Praxis -, Heureka 2017, Stuttgart
- [8] Luethi, M., Weidmann U. und Nash, A. (2006): passenger arrival rates at public transport stations, ETH Zürich
- [9] Müller, H. (1981): Fahrplanabhängigkeit des Fahrgastzuflusses zu Haltestellen, ResearchCollection, ETH Zürich
- [10] Weber W. (1966): Die Reisezeit der Fahrgäste öffentlicher Verkehrsmittel in Abhängigkeit von Bahnart und Raumlage, Dissertation TH Stuttgart

### 6.2 Schriftenreihen

- [11] B. Bartels, C.-T. Erbsmehl (2014). Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr – Teil 1. FAT 267. Forschungsvereinigung Automobiltechnik E.V.