



**HWI HAMBURG**  
HOCHSCHULÜBERGREIFENDER STUDIENGANG  
WIRTSCHAFTSINGENIEURWESEN HAMBURG

# Masterarbeit

## Optimization of on-demand line-based bus services

vorglegt von

**Alexander Klaus**

**Matrikelnummer 7169020**

**Bereich:**

**1. Gutachter: Prof. Dr. Knut Haase**

**2. Gutachter: Prof. Dr. Malte Fliedner**

**vorgelegt am: 27. August 2025**

AM LEHRANGEBOT BETEILIGTE HOCHSCHULEN:

Universität Hamburg

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Helmut Schmidt Universität - Universität der Bundeswehr Hamburg

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>iii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>iv</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit . . . . .	1
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>2</b>
2.1 Linienverkehr vs. Ridepooling vs. on-demand . . . . .	2
2.2 Einordnung des zu betrachtenden Modells . . . . .	2
2.3 Relevante Modelle & Literatur . . . . .	2
2.4 Offene Forschungsfragen . . . . .	2
<b>3 Methodik &amp; Modellbeschreibung</b>	<b>3</b>
3.1 Ziel des Modells . . . . .	3
3.2 Erläuterung der drei Settings . . . . .	3
3.3 Zentrale Modellannahmen, Eingaben & Nebenbedingungen . . . . .	3
<b>4 Implementierung &amp; Validierung des Modells</b>	<b>4</b>
4.1 Grundlagen der Implementierung . . . . .	4
4.2 Struktur der Implementierung . . . . .	4
4.3 Herausforderungen bei der Umsetzung . . . . .	4
4.4 Validierung der Implementierung . . . . .	4
4.5 Ergebnisvergleich & Plausibilität . . . . .	5
<b>5 Erweiterungsmöglichkeiten &amp; Diskussion</b>	<b>6</b>
5.1 Limitierungen des aktuellen Modells . . . . .	6
5.2 Mögliche Erweiterungen . . . . .	6
5.3 Praxisrelevanz & Umsetzung . . . . .	6
<b>6 Fazit &amp; Ausblick</b>	<b>-7</b>
<b>A Beispielanhang</b>	<b>A-1</b>
<b>B Zweiter Beispielanhang</b>	<b>B-1</b>

## Abbildungsverzeichnis

## **Tabellenverzeichnis**

## **Abkürzungsverzeichnis**

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

→ warum ist das Thema relevant?

- CO<sub>2</sub>-Reduktion & Individualmobilität: aktueller Zielkonflikt im ÖPNV
- Herausforderungen im ländlichen Raum (geringe Auslastung, lange Taktzeiten)
- Technologischer Fortschritt: Autonome Busse & digitale Nachfrageerfassung ermöglichen neue Konzepte
- Klassischer Linienverkehr: fixe Zeiten & Routen, hohe Bündelung, geringe Flexibilität
- Ridepooling: Tür-zu-Tür, aber hohe operative Komplexität, oft ineffizient
- On-Demand-Linienbusse als Hybridform: planbare, aber flexible Nachfragebedienung

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

- Implementierung eines zu veröffentlichenden Optimierungsmodells
- Validierung durch Reproduktion der publizierten Ergebnisse
- Analyse von Anwendbarkeit, Stärken & Schwächen des Modells
- Aufbau der Arbeit (welche Inhalte in welchen Kapiteln)

## 2 Stand der Forschung

### 2.1 Linienverkehr vs. Ridepooling vs. on-demand

→ warum ist das Thema relevant?

- Definitionen & Merkmale
- Anwendungsbereiche & typische Zielkonflikte
- Literaturübersicht zu semi-flexiblen Systemen (z.B. MAST, Schulbusse)

### 2.2 Einordnung des zu betrachtenden Modells

→ was gibt es schon?

- Modell von Schulz & Vlček: Kombination aus Linienverkehr & Bedarfssteuerung
- Beitrag: Reduktion der Fahrtenzahl durch On-Demand-Verkürzung
- Einordnung in die Forschung zur flexiblen Linienplanung

### 2.3 Relevante Modelle & Literatur

→ evtl. 2.2 und 2.3 zusammenlegen....

- Überblick über verwandte Optimierungsansätze (z.B. DARP, MIP, Netzwerkflussmodelle)
- Besonderheiten des gewählten Modells (Netzwerkstruktur, einfache Erweiterbarkeit)
- Überblick zur Methodik: LP/IP, Flow-Modelle, Erweiterbarkeit für verschiedene Szenarien

Hier evtl. dann die tabellarische Übersicht der gefundenen Literatur

### 2.4 Offene Forschungsfragen

- Kapazitätsfragen, Depotstruktur, Echtzeitfähigkeit
- Zukunftsperspektiven: adaptive Fahrpläne, Realtime-Demand
- Bewertung der Robustheit und Praktikabilität in Realanwendungen

## 3 Methodik & Modellbeschreibung

### 3.1 Ziel des Modells

Minimierung der Anzahl benötigter Busse unter Berücksichtigung echter Nachfrage Motivation: Ressourceneffizienz & Angebotsoptimierung

### 3.2 Erläuterung der drei Settings

- **Homogene autonome Busse:** Keine Fahrer, gleiche Kapazität. Fokus auf reine Tourenoptimierung.
- **Heterogene Busse:** Verschiedene Kapazitäten → neue Zuordnungsprobleme. Selektive Tourabdeckung bei Bedarf.
- **Busse mit Fahrerpausen:** Zeitfenster für Einsetzbarkeit, gesetzliche Pausen. Auswirkungen auf Tourverläufe & Zuordnung.

Verweis auf 9 Szenarien im Paper, die diese Settings abdecken.

### 3.3 Zentrale Modellannahmen, Eingaben & Nebenbedingungen

- Fester Fahrplan & Linienstruktur
- Fahrzeugkapazität & Depotstruktur
- Statischer Demand (vor Fahrtbeginn bekannt)
- Kein Laden/Tanken, kein Fahrerwechsel außerhalb des Depots
- Übersicht zu relevanten Parametern (Stopps, Zeiten, Kapazität, Fahrzeiten)



## 4 Implementierung & Validierung des Modells

### 4.1 Grundlagen der Implementierung

- Hardware (Macbook Pro mit M1 Prozessor, 16 GB RAM, in VS Code)
- Programmiersprache (z.B. Julia/Python)
- Verwendete Solver (z.B. Gurobi, GLPK)
- Datenstrukturen: Graphenmodell, Knoten/Arc-Logik

### 4.2 Struktur der Implementierung

- Modularer Aufbau: Dateninput, Modellkonstruktion, Lösung, Output
- Relevante Klassen/Methoden (z.B. für Pfadgenerierung, Kapazitätsprüfung)
- Beispiel für den Workflow einer Instanz: Einlesen → Modellaufbau → Lösung → Auswertung

### 4.3 Herausforderungen bei der Umsetzung

- Setaufbau
- Speicher-/Performanceprobleme bei großen Instanzen
- Umgang mit überlappenden Trips und Duplikaten (siehe Paper)

### 4.4 Validierung der Implementierung

Anhand der Originalergebnisse

Hier darauf achten, dass es 9 Szenarios gibt -> Referenz auf beschriebene Settings in Kapitel 3.3(?)

- Szenarien aus Schulz/Vlček: Fahrplan aus Mecklenburg-Vorpommern
- Umsetzung von Settings 1 bis 3 (jeweils relevante Details nennen)
- Beispiel: Setting 1 mit künstlich hoher Geschwindigkeit → Reproduzierbarkeit des theoretischen Optimums

## 4.5 Ergebnisvergleich & Plausibilität

- Tourenanzahl, Busanzahl, Tourverläufe: Vergleich Paper vs. eigene Lösung
- Abweichungen und deren mögliche Ursachen (z.B. Rundungsfehler, alternative Pfade)
- Qualität & Robustheit der eigenen Implementierung

## **5 Erweiterungsmöglichkeiten & Diskussion**

### **5.1 Limitierungen des aktuellen Modells**

- Nur ein Depot
- Statischer Demand
- Keine dynamische Tourenbildung, keine Live-Reaktionen
- Keine Betriebskostenbetrachtung

### **5.2 Mögliche Erweiterungen**

- Mehrere Depots: Flexibilität bei der Tourenplanung, bessere Abdeckung
- Depotzuordnung optimieren
- Zeitfensterbasierte oder dynamische Nachfrage
- Realtime-Routing mit Rolling Horizon
- Erweiterung um Ladezeiten, Servicelevel-Bedingungen
- größerer Datensatz

### **5.3 Praxisrelevanz & Umsetzung**

- Welche Erkenntnisse sind direkt anwendbar?
- Welche Modellannahmen müssen für reale Implementierung angepasst werden?
- Bewertung der Lösung hinsichtlich Kosten, Fahrgastkomfort, Nachhaltigkeit

## 6 Fazit & Ausblick

6.1 Wichtigste Erkenntnisse Implementierung gelungen / Modell nachvollziehbar repliziert Validierung zeigt Übereinstimmungen und Grenzen Modell zeigt Potenzial bei Ressourceneinsparung und Flexibilisierung

6.2 Bewertung der Zielerreichung Rückblick auf Ziele aus Kapitel 1.3 Welche Ziele wurden vollständig erreicht? Wo gab es Einschränkungen?

6.3 Zukunftsperspektiven Technische Weiterentwicklung des Modells Einsatz in kommunalen Verkehrspunkten Integration in Planungssoftware / Fahrplangenerierungssysteme

## **A Beispielanhang**

## **B Zweiter Beispielanhang**

## Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel – insbesondere keine im Quellverzeichnis nicht benannten Internet-Quellen – benutzt. Ich habe die Arbeit vorher nicht in einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht. Die schriftliche Fassung entspricht der auf dem elektronischen Speichermedium.

Hamburg, den 15. Juli 2025

Ort, Datum

Unterschrift