



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

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	iv
Abkürzungsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	1
2 Stand der Forschung	2
2.1 Linienverkehr vs. Ridepooling vs. on-demand	2
2.2 Einordnung des zu betrachtenden Modells	2
2.3 Relevante Modelle & Literatur	3
2.4 Offene Forschungsfragen	3
3 Methodik & Modellbeschreibung	4
3.1 Ziel des Modells	4
3.2 Erläuterung der drei Settings	4
3.3 Zentrale Modellannahmen, Eingaben & Nebenbedingungen	4
4 Implementierung & Validierung des Modells	5
4.1 Grundlagen der Implementierung	5
4.2 Struktur der Implementierung	5
4.3 Herausforderungen bei der Umsetzung	5
4.4 Validierung der Implementierung	5
4.5 Ergebnisvergleich & Plausibilität	6
5 Erweiterungsmöglichkeiten & Diskussion	7
5.1 Limitierungen des aktuellen Modells	7
5.2 Mögliche Erweiterungen	7
5.3 Praxisrelevanz & Umsetzung	7
6 Fazit & Ausblick	8
Literatur	-9
A Beispielanhang	A-1
B Zweiter Beispielanhang	B-1

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

1 Einleitung

1.1 Motivation

→ warum ist das Thema relevant?

- CO₂-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)
- Suchstruktur darstellen als:
 - generell zum Thema on-demand in Relation zu Bussen: Searchstrings: (on-demand bus), ...
 - klassisches bus system in rural areas
 - on-demand in rural areas
 - dann Kombination von on-demand und line-based
 -

2.2 Einordnung des zu betrachtenden Modells

BESCHREIBUNG DER VORGEHENSWEISE:

1. SUCHEN MITTELS REVIEW PAPER (SEARCHSTRING)
2. ...

→ was gibt es schon?

- Modell von Schulz & Vlček: Kombination aus Linienverkehr & Bedarfssteuerung
- Überleitung zum Beispiel:
 - on-demand wird in urban areas viel geforscht, aber nicht in rural areas, da sich dort on-demand eigentlich immer lohnt, aufgrund der geringen Nachfrage
 -
- 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

→ Enden mit Rechtfertigung dafür, dass es sich lohnt die Kombination, die Vlček und Schulz gemacht haben, weiter zu untersuchen

3 Methodik & Modellbeschreibung

3.1 Ziel des Modells

Ziel des Modells ist die Minimierung der Anzahl benötigter Busse unter Berücksichtigung bekannter Nachfrage und Einsatz von

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
- 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

- Liniennetz überschneidet sich nicht, daher auch keine Linien übergreifenden Touren möglich
- Mehrere Depots: Flexibilität bei der Tourenplanung, bessere Abdeckung
- Depotzuordnung optimieren
- Zeitfensterbasierte oder dynamische Nachfrage
- Realtime-Routing mit Rolling Horizon
 - dynamische Änderungen der Fahrzeiten zwischen den Stops siehe Abstract von Lian et al. (2023)
- 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 Verkehrsjprojekten Integration in Planungssoftware / Fahrplangenerierungssysteme

Literatur

Lian, Y., F. Lucas und K. Sörensen (1. Sep. 2023). „The on-demand bus routing problem with real-time traffic information“. In: *Multimodal Transportation* 2.3, S. 100093. DOI: [10.1016/j.multra.2023.100093](https://doi.org/10.1016/j.multra.2023.100093). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772586323000254> (besucht am 22.07.2025).

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 24. Juli 2025

Ort, Datum

Unterschrift