

Xie, Lin; Kliewer, Natalia

Report

Robuste integrierte Umlauf-, Tagesdienst- und Dienstreihenfolgeplanung im ÖPNV

Suggested Citation: Xie, Lin; Kliewer, Natalia (2025) : Robuste integrierte Umlauf-, Tagesdienst- und Dienstreihenfolgeplanung im ÖPNV, ZBW – Leibniz Information Centre for Economics, Kiel, Hamburg

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/319684>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

ABSCHLUSSBERICHT

1 Allgemeine Angaben

DFG-Geschäftszeichen: KL 2152/7-1, XI 156/2-1

Projektnummer: 417192377

Titel des Projekts: Robuste integrierte Umlauf-, Tagesdienst- und Dienstreihenfolgeplanung im ÖPNV

Name(n) des/r Antragstellenden: Prof. Dr. Natalia Kliewer, Prof. Dr. Lin Xie

Dienstanschrift/en: Prof. Dr. Natalia Kliewer, Freie Universität Berlin, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Professur für Wirtschaftsinformatik, Garystr. 21, 14195 Berlin

Prof. Dr. Lin Xie, Leuphana Universität Lüneburg, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Institute für Information Systems, Universitätsallee 1, 21335 Lüneburg

Name(n) der Mitverantwortlichen:

Name(n) der Kooperationspartnerinnen und –partner: Init AG, Moveo Software GmbH, Verkehrsunternehmen (z.B. Hochbahn AG, Berliner Verkehrsbetriebe – BVG)

Berichtszeitraum (gesamte Förderdauer): 01.07.2019 – 31.12.2022

2 Zusammenfassung / Summary

Wegen des zunehmenden Einsatzes von Elektrobussen ist es für das Busunternehmen wichtig zu wissen, wie sich die operative Planung der Busse und des Personals durch die Einführung der Elektromobilität ändert. Die drei Teilaufgaben der operativen Planung (Umlauf-, Dienst- und Dienstreihenfolgeplanung) sind komplex und wurden in der Literatur sequentiell oder (teil-)integriert betrachtet. Aufbauend auf den bisherig erarbeiteten Forschungsergebnissen (inklusive Daten, Algorithmen und Software) beider Antragstellerinnen wird eine prototypische Software/Framework für eine Taxonomie der verschiedenen mathematischen Modelle entwickelt. Basierend darauf wurde der nichtlineare Nachladeprozess von Batterien in die Umlaufplanung auf Basis eines Time-Space-Netzwerks integriert. Die Rechenzeit erhöht sich enorm, deshalb wurden ein Column-Generation-Ansatz sowie heuristische Lösungsansätze in das Framework eingebaut. Zusätzlich wurde das Framework um die Integration der Standortplanung der Ladeinfrastruktur in die elektrische Fahrzeugeinsatzplanung erweitert. Das bedeutet, dass die zum Durchführen der Fahrzeugumläufe benötigten Ladestandorte in einer integrierten Weise optimiert werden. Damit werden Synergieeffekte zwischen den beiden Planungsaufgaben (Fahrzeugeinsatz und Ladeinfrastrukturplanung) erzeugt, indem die Zusammenstellung und der Verlauf der Tagesumläufe der batterieelektrisch betriebener Busse in einer optimalen Weise die Lademöglichkeiten einbeziehen und die letzteren sich aus einer angepassten Ladeinfrastruktur ergeben, die wiederum auf die Bedarfe der batterieelektrisch angetriebener Busflotte hin optimiert wurde. Außerdem ist die robuste Planung wichtig aufgrund der begrenzten Batteriekapazität und Lademöglichkeiten der E-Busse. Deshalb wurden unterschiedliche Aspekte der Robustheit in der operativen Planung (zunächst ohne Betrachtung des Nachladeprozesses) in diesem Projekt untersucht. Dazu zählen die Berücksichtigung der propagierten Verspätungen im integrierten Modell, die bessere Schätzung der Fahrzeit der Busse sowie die Betrachtung der variierenden Anzahl der Busse. Ein wichtiges Ergebnis ist, dass die Berücksichtigung der propagierten Verspätungen die Komplexität des integrierten Modells nicht erhöht. Zusätzlich dient die geschätzte Fahrzeit mit Hilfe der Datenanalyse statt der geplanten Fahrzeit für die robusten Umlaufpläne. Die variierende Anzahl der Busse im mathematischen Modell ist eine gute Vorbereitung für eine wichtige Fragestellung: Wie viele E-Busse sollten die Busunternehmen anschaffen, um alle Bedarfe abzudecken?

3 Wissenschaftlicher Arbeits- und Ergebnisbericht

Das Ziel des Projekts war die Entwicklung und Evaluation von Methoden zur Integration von Umlauf-, Dienst- und Dienstreihenfolgeplanung im öffentlichen Personennahverkehr. Dabei sollte auch die robuste Effizienz berücksichtigt werden. Drei Arbeitspakete wurden geplant:

1. Entwicklung einer prototypischen Software, die alle vorhandenen Modelle der unterschiedlichen Problemvarianten (sequentiell, (teil-)integriert) umfasst und um die Robustheitsaspekte ergänzt wurde (AP 1).
2. Lösen der unterschiedlichen Problemvarianten mit exakten Verfahren (z.B. Column Generation) sowie Heuristiken (AP 2).
3. Entwicklung eines Simulators, um die Effizienz und Robustheit zu testen (AP 3).

In AP 1 bildeten unsere Literaturanalysen über die Robustheit im ÖPNV [Ge et al. 2022a], die Datenquelle für die Datenanalyse im ÖPNV [Ge et al. 2021] sowie die Methodologie für die Optimierungsprobleme im ÖPNV [Mertens et al. 2023] den Startpunkt unseres Projekts. In der Literatur gibt es nur wenige Publikationen über die robuste Planung in der Umlauf- und Dienstplanung. Wir orientieren uns an dem integrierten Modell zur Umlauf-, Dienst- und Dienstreihenfolgeplanung von [Mesquita et al. 2013]. Um eine robuste Lösung zu ermöglichen, bauen wir die propagierten Verspätungen in das Modell ein. Wir verwenden die Idee von [Amberg et al. 2019], nämlich das Einbauen von unterschiedlichen Pufferzeiten in die Planung [Ge et al. 2022c]. Um zu bestimmen, wo wir die Pufferzeit einplanen sollen, haben wir Machine-Learning-Verfahren entwickelt, um die Fahrzeiten und Verspätungen der Umläufe vorherzusagen [Nimpanomprasert et al. 2022]. Wir haben dann die verbesserten geschätzten Fahrzeiten in die Umlaufplanung eingesetzt [Xie et al. 2023]. Die verbesserten geschätzten Fahrzeiten erhöhen die Robustheit der Planung, insbesondere für E-Busse aufgrund ihrer beschränkten Batteriekapazität und Lademöglichkeiten. In einer anderen Richtung der Forschung zur robusten Planung analysieren wir im integrierten Modell (mit Betrachtung der propagierten Verspätungen) die Anzahl der E-Busse nicht als Parameter auf der rechten Seite der Ressourcen-Restriktionen der Umläufe, sondern als Variablen [Ge et al. 2022b]. Das ist eine wichtige Frage für alle Busunternehmen: Wie viele E-Busse sollten sie anschaffen, um alle Bedarfe abzudecken? Zusammenfassend haben wir in AP 1 eine prototypische Software auf vorhandenen Modellen entwickelt (auch die Generierung der Instanzen ermöglicht) und uns zusätzlich auf die Forschung von Robustheit konzentriert. In der Literaturanalyse von [Ge et al. 2022a] haben wir eine Forschungslücke und mehr Bedarfe für den Einsatz von E-Bussen bei unseren Kooperationspartnern festgestellt. Das integrierte Modell mit Betrachtung von

Robustheit (für Dieselbusse) in [Ge et al. 2022c] liefert gute Ergebnisse innerhalb akzeptabler Rechenzeit. Deshalb haben wir uns in AP 2 mehr auf Verfahren für E-Busse fokussiert.

In AP 2 wurde ein evolutionärer Ansatz in der prototypischen Software für die integrierten Probleme implementiert [Mertens et al. 2022]. Aufgrund des zunehmenden Forschungsbedarfs über die operative Planung der E-Busse haben wir einen exakten Lösungsansatz für die Fahrzeugeinsatzplanung unter Berücksichtigung von Elektromobilität auf Basis eines Time-Space-Netzwerks entwickelt [Olsen et al. 2022a] und mit einem Column-Generation-Ansatz gelöst. Der nichtlineare Ladevorgang von Batterien erhöht die Rechenzeit des elektrischen Umlaufproblems. Aus diesem Grund wurde noch ein heuristischer Ansatz konzipiert und implementiert. Außerdem wurde noch ein anderer Integrationsaspekt im Rahmen des Projekts untersucht [Olsen et al. 2022b]. Eine integrierte Betrachtung der Fahrzeugeinsatzplanung mit Elektrobussen und der Standortplanung der Ladeinfrastruktur führt zu erheblichen Optimierungspotenzialen, da die zum Durchführen der Fahrzeugumläufe benötigten Ladestandorte simultan festgelegt werden. In der Literatur existieren bisher Modelle für das elektrische Fahrzeugeinsatzplanungsproblem oder für die Gestaltung der Infrastruktur, jedoch keine für die integrierte Betrachtung der beiden Aspekte. Daher wurden in diesem Arbeitspaket integrierte Lösungsverfahren entwickelt, welche die beiden Probleme simultan lösen [Stumpe et al. 2021]. Zu diesem Zweck wurden bestehende Lösungsansätze für das elektrische Fahrzeugeinsatzplanungsproblem um die Integration des Infrastrukturdiseigns erweitert, um Optimierungspotentiale durch das simultane Festlegen der Infrastruktur zu nutzen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in AP 2 sowohl exakte als auch heuristische Ansätze entwickelt wurden, wie geplant. Dabei wurde nicht nur das integrierte Modell für Dieselbusse, sondern auch für E-Busse berücksichtigt. Aufgrund der Ladebedarfe der E-Busse wurde in diesem Arbeitspaket der Ladeprozess in die Umlaufplanung mit einbezogen und zusätzlich die integrierte Betrachtung von Umlaufplanung und Ladestandorten berücksichtigt.

In AP 3 war die Entwicklung eines Simulators zur Generierung von Verspätungsszenarien geplant. Während des Projekts wurde der Ansatz des maschinellen Lernens gewählt, um Verspätungsfaktoren zu analysieren und zukünftige Verspätungen vorherzusagen [Nimpanomprasert et al. 2022]. In AP 3.3 konnte dank der engen Zusammenarbeit mit unserem Praxispartner eine empirische Untersuchung direkt im realen Umfeld durchgeführt werden. Die Daten des Praxispartners Hochbahn AG wurden für den Ansatz verwendet, und die erzielten Ergebnisse wurden auch dem Praxispartner präsentiert. Die geschätzten Fahrzeiten der Busse wurden in die Umlaufplanung eingesetzt und es dient zu robusten

Umläufen. Außerdem wurden die Daten von Literatur und unsere Instanzgenerator generierte Daten auch in dem Projekt getestet und analysiert (z.B. [Ge et al. 2022c], [Olsen et al. 2022a]).

Literaturverzeichnis:

[Amberg et al. 2019] Amberg, B; Amberg, B; Kliwer, N (2019), 'Robust efficiency in urban public transportation: Minimizing delay propagation in cost-efficient bus and driver schedules', *Transportation Science* 53, 89–112, <https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0757>

[Ge et al. 2021] Ge, L.; Sarhani, M.; Voß, S. & Xie, L. (2021), 'Review of Transit Data Sources: Potentials, Challenges and Complementarity', *Sustainability* 13(20), 11450, open access, <https://doi.org/10.3390/su132011450>.

[Ge et al. 2022a] Ge, L.; Voß, S. & Xie, L. (2022), 'Robustness and Disturbances in Public Transport', *Public Transport* 14, 191—261, open access, <https://doi.org/10.1007/s12469-022-00301-8>.

[Ge et al. 2022b] Ge, L.; Nourmohammadzadeh, A.; Voß, S. & Xie, L. (2022), Robust Optimization for Integrated Vehicle and Crew Scheduling Based on Uncertainty in the Main Inputs, in 'The Fifth Data Science Meets Optimisation Workshop at IJCAI-22'.

[Ge et al. 2022c] Ge, L.; Kliwer, N.; Nourmohammadzadeh, A.; Voß, S. & Xie, L. (2022), 'Revisiting the Richness of Integrated Vehicle and Crew Scheduling', *Public Transport*, 1—27, open access, <https://doi.org/10.1007/s12469-022-00292-6>.

[Mesquita et al. 2013] Mesquita, M; Moz, M; Paias, A; Pato, M (2013), 'A decomposition approach for the integrated vehicle-crew-roster problem with days-off pattern'. *European Journal of Operational Research* 229, 318–331, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.02.055>.

[Mertens et al. 2022] Mertens, L.; Amberg, B. & Kliwer, N. (2022), A Mutation Based Modular Evolutionary Scheme for Integrated Timetabling and Vehicle Scheduling With Headways and Connection Quality Criteria, in 'Proceedings of International Conference on Operations Research', Springer.

[Mertens et al. 2023] Mertens, L.; Wolbeck, L.; Rößler, D.; Xie, L. & Kliwer, N. (2023), 'An Overview of Optimization Approaches for Scheduling and Rostering Resources in Public Transportation', *ArXiv*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.13425>.

[Nimpanomprasert et al. 2022] Nimpanomprasert, T.; Xie, L. & Kliwer, N. (2022), 'Comparing Two Hybrid Neural Network Models to Predict Real-World Bus Travel Time', *Transportation Research Procedia* 62, 393—400, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.02.049>.

[Olsen et al. 2022a] Olsen, N.; Kliwer, N. & Wolbeck, L. (2022), 'A Study on Flow Decomposition Methods for Scheduling of Electric Buses in Public Transport Based on Aggregated Time–Space Network Models', *Central European Journal of Operations Research*, 1—37, <https://doi.org/10.1007/s10100-020-00705-6>.

[Olsen et al. 2022b] Olsen, N. & Kliwer, N. (2022), 'Location Planning of Charging Stations for Electric Buses in Public Transport Considering Vehicle Scheduling: A Variable Neighborhood Search Based Approach', *Applied Sciences* 12(8), 3855, open access, <https://doi.org/10.3390/app12083855>.

[Stumpe et al. 2021] Stumpe, M.; Rößler, D.; Schryen, G. & Kliwer, N. (2021), 'Study on Sensitivity of Electric Bus Systems Under Simultaneous Optimization of Charging Infrastructure and Vehicle Schedules', *EURO Journal on Transportation and Logistics* 10, 100049, <https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2021.100049>.

[Xie et al. 2023] Xie, L.; Kliwer, N. & Rößler, D. (2023), 'Generating Robust Vehicle Schedules by Predicting Real-World Bus Travel Time', *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, under review.

4 Veröffentlichte Projektergebnisse

4.1 Publikationen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung

1. Xie, L.; Kliwer, N. & Rößler, D. (2023), 'Generating Robust Vehicle Schedules by Predicting Real-World Bus Travel Time', *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, under review.
2. Akhgarnusch, A.; Voß, S. & Ge, L. (2023), Mystery Shopping: Improving Quality Assurance of Public Transport Services for People with Restricted Mobility using a Prototypical Mobile Application, in 'Proceedings of The Hawaii International Conference on System Sciences'.
3. Ge, L.; Kliwer, N.; Nourmohammadzadeh, A.; Voß, S. & Xie, L. (2022), 'Revisiting the Richness of Integrated Vehicle and Crew Scheduling', *Public Transport*, 1—27, open access, <https://doi.org/10.1007/s12469-022-00292-6>.
4. Ge, L.; Nourmohammadzadeh, A.; Voß, S. & Xie, L. (2022), Robust Optimization for Integrated Vehicle and Crew Scheduling Based on Uncertainty in the Main Inputs, in 'The Fifth Data Science Meets Optimisation Workshop at IJCAI-22'.
5. Ge, L.; Voß, S. & Xie, L. (2022), 'Robustness and Disturbances in Public Transport', *Public Transport* 14, 191—261, open access, <https://doi.org/10.1007/s12469-022-00301-8>.
6. Mertens, L.; Amberg, B. & Kliwer, N. (2022), A Mutation Based Modular Evolutionary Scheme for Integrated Timetabling and Vehicle Scheduling With Headways and Connection Quality Criteria, in 'Proceedings of International Conference on Operations Research', Springer.

7. Nimpanomprasert, T.; Xie, L. & Kliewer, N. (2022), 'Comparing Two Hybrid Neural Network Models to Predict Real-World Bus Travel Time', *Transportation Research Procedia* 62, 393–400, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.02.049>.
8. Olsen, N. & Kliewer, N. (2022), 'Location Planning of Charging Stations for Electric Buses in Public Transport Considering Vehicle Scheduling: A Variable Neighborhood Search Based Approach', *Applied Sciences* 12(8), 3855, open access, <https://doi.org/10.3390/app12083855>.
9. Olsen, N.; Kliewer, N. & Wolbeck, L. (2022), 'A Study on Flow Decomposition Methods for Scheduling of Electric Buses in Public Transport Based on Aggregated Time–Space Network Models', *Central European Journal of Operations Research*, 1–37, <https://doi.org/10.1007/s10100-020-00705-6>.
10. Ge, L.; Sarhani, M.; Voß, S. & Xie, L. (2021), 'Review of Transit Data Sources: Potentials, Challenges and Complementarity', *Sustainability* 13(20), 11450, open access, <https://doi.org/10.3390/su132011450>.
11. Stumpe, M.; Rößler, D.; Schryen, G. & Kliewer, N. (2021), 'Study on Sensitivity of Electric Bus Systems Under Simultaneous Optimization of Charging Infrastructure and Vehicle Schedules', *EURO Journal on Transportation and Logistics* 10, 100049, <https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2021.100049>.
12. Wolbeck, L.; Amberg, B. & Kliewer, N. (2019), Entscheidungsunterstützung durch Historienbasierte Dienstreihenfolgeplanung mit Pattern, in 'Proceedings International Conference Wirtschaftsinformatik'.

4.2 Weitere Publikationen und öffentlich gemachte Ergebnisse

4.2.1 *Preprints*

1. Mertens, L.; Wolbeck, L.; Rößler, D.; Xie, L. & Kliewer, N. (2023), 'An Overview of Optimization Approaches for Scheduling and Rostering Resources in Public Transportation', *ArXiv*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.13425>.

4.2.2 *Konferenzvorträge*

1. Ge, L.; Voß, S. & Xie, L. (2023), Robust Optimization for Vehicle Routing and Crew Scheduling with Uncertainty in the Number of Vehicles, in 'Wintertagung 2023 der WK Logistik'.
2. Ge, L. (2022), IT Governance in Public Transport – An Open Agenda?, in 'ICCL 2022'.
3. Ge, L.; Nourmohammadzadeh, A.; Voß, S. & Xie, L. (2022), Robust Optimization for Integrated Vehicle and Crew Scheduling Based on Uncertainty in the Main Inputs, in 'The Fifth Data Science Meets Optimisation Workshop at IJCAI-22'.
4. Xie, L.; Kliewer, N. & Ge, L. (2022), Robustness in Resource Scheduling in Public Transit, in 'VHB 2022, WKs LOG, OR & PROD 4 – Line Balancing and Scheduling'.

5. Ge, L.; Kliwer, N.; Nourmohammadzadeh, A.; Voß, S. & Xie, L. (2021), Revisiting the Richness of Integrated Vehicle and Crew Scheduling, in 'CASPT 2021'.
6. Graniero, P.; Rößler, D.; Ulbrich, C. & Kliwer, N. (2021), Potentials and Challenges for Integration of Electric Bus Fleets and PV-Systems, in '31st European Conference on Operational Research (EURO 2021)'.
7. Mertens, L.; Amberg, B. & Kliwer, N. (2021), A Column Generation Approach for Solving the Integrated Timetabling and Vehicle Scheduling Problem, in '31st European Conference on Operational Research (EURO 2021)'.
8. Rößler, D.; Schwarm, N. & Kliwer, N. (2021), A Vehicle Routing Problem for Electric Vehicle Charging and Maintenance Scheduling, in '31st European Conference on Operational Research (EURO 2021)'.
9. Xie, L.; Nimpanomprasert, T. & Kliwer, N. (2021), Comparing Two Hybrid Neural Network Models to Predict Real-World Bus Travel Time, in 'EWGT 2021'.
10. Ge, L.; Voß, S. & Xie, L. (2020), Robustness and Disturbances in Public Transport, in 'ICCL 2020'.
11. Rößler, D.; Olsen, N. & Kliwer, N. (2019), Location Planning of Charging Stations under Spatial Limitations and Power Grid Constraints, in 'OR2019 – International Conference on Operations Research'.

4.3 Patente (angemeldete und erteilte)