



WISSENSCHAFTLICHER SCHLUSSBERICHT

OPEN-SOURCE-SOFTWARE FÜR LÄNDLICHEN ON-DEMAND-VERKEHR
OSLO MACHBARKEISSTUDIE

PROF. DR.-ING. ANDRÉ NITZE / M.SC TINGTING WANG
- TECHNISCHE HOCHSCHULE BRANDENBURG

PROF. DR. RER. NAT. HABIL. PETRA HOFSTEDT / DR. RER. NAT. SVEN
LÖFFLER
- BRANDENBURGISCHE TECHNISCHE UNIVERSITÄT COTTBUS-SENFTENBERG

M.P.P. SILVIA HENNIG / M.SC. ALEXANDER KLINGE
- NEULAND21 E.V.

ALEXANDER KLINGE
NEULAND21 E.V.
KLEIN GLIEN 25
14806 BAD BELZIG

ALEXANDER.KLINGE@NEULAND21.DE

26. Oktober 2023

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	3
Einleitung.....	4
1 Implementierungsszenarien	5
2 Anwendungsfälle im Raum Spremberg	6
2.1 Pendeln	6
2.1.1 Vergleichsstrecke	6
2.1.2 Prozessdiagramme.....	7
2.1.3 Anforderungen.....	8
2.1.4 Zusammenfassung	9
2.2 Querverbindungen und kurze Wege.....	10
2.2.1 Vergleichsstrecke	10
2.2.2 Prozessdiagramm.....	11
2.2.3 Anforderungen.....	11
2.2.4 Zusammenfassung	13
2.3 Abendliche Randzeiten	13
2.3.1 Vergleichsstrecke	13
2.3.2 Prozessdiagramme.....	14
2.3.3 Anforderungen.....	14
2.3.4 Zusammenfassung	15
2.4 Zwischenfazit.....	16
3 Rahmenbedingungen.....	16
3.1 Rechtlich.....	16
3.2 Technisch	18
3.2.1 Softwarearchitektur.....	18
3.2.2 Routing-Algorithmen	22
3.3 Organisatorisch	27
4 Betriebsmodell	28
5 Umsetzungskonzept Modellprojekt	29
5.1 Betriebsstruktur	30
5.2 Rollenmodell	31
5.3 Wirtschaftlichkeit	32
6 Fazit	35
7 Literaturverzeichnis	37

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Ein Verbund aus



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hochlauf von ÖV-integrierten digitale On-Demand-Verkehrsprojekte.....	4
Abbildung 2: Verteilung der On-Demand-Verkehr-Projekte nach Raumtyp	5
Abbildung 3: Vergleichsstrecke Anwendungsfall 1.....	6
Abbildung 4: Prozessdiagramm Anwendungsfall 1 - Hinfahrt	7
Abbildung 5: Prozessdiagramm Anwendungsfall 1 - Rückfahrt.....	8
Abbildung 6: Vergleichsstrecke Anwendungsfall 2.....	10
Abbildung 7: Prozessdiagramm Anwendungsfall 2 - Hinfahrt	11
Abbildung 8: Prozessdiagramm Anwendungsfall 2 – Rückfahrt.....	11
Abbildung 9: Vergleichsstrecke Anwendungsfall 3.....	13
Abbildung 10: Prozessdiagramm Anwendungsfall 3	14
Abbildung 11: Anforderungen zur Zuordnung § 44 als Linienverkehr des ÖPNV.....	18
Abbildung 12: Darstellung der Software-Architektur	20
Abbildung 13: Darstellung des GTFS-Flex v2 Models	20
Abbildung 14: Visualisierung der Dreiecksungleichung (Triangle Inequality)	25
Abbildung 15: Existierende Algorithmen zum Lösen von Vehicle Routing-Problemen	26
Abbildung 16: Betriebsmodell On-Demand-Verkehr (Testbetrieb).....	29
Abbildung 17: Rollenmodell On-Demand-Verkehr. Von der Planung zum Regelbetrieb	32
Abbildung 18: Finanzierung des ÖPNV in Deutschland (Überblick).....	33

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Ein Verbund aus



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungen Anwendungsfall 1	8
Tabelle 2: Anforderungen Anwendungsfall 2	11
Tabelle 3: Anforderungen Anwendungsfall 3	14
Tabelle 4: Rechtsgrundlagen Bedarfsverkehre im Personenbeförderungsgesetz (PBefG).....	17
Tabelle 5: Liste eingesetzter Open-Source-Komponenten	19
Tabelle 6: Kostenaufschlüsselung je Anwendungsfall	35

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



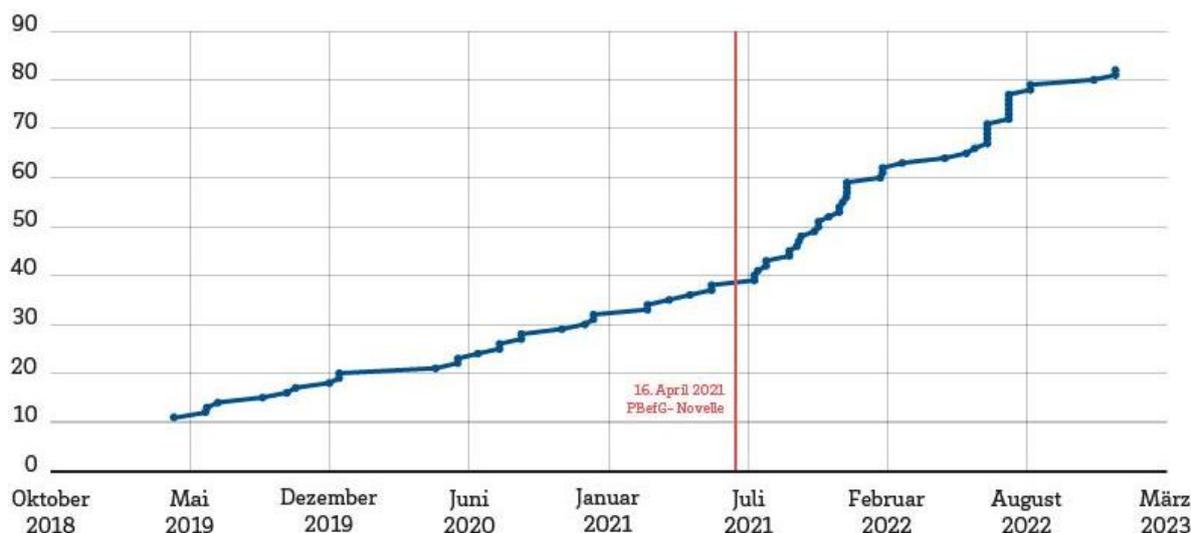
Ein Verbund aus



Einleitung

Im Projekt OSLO wurde die Machbarkeit einer lizenzfrei verfügbaren Softwarelösung für die Integration ländlicher On-Demand-Verkehre (ODVe) in das bestehende ÖPNV-Netz erforscht. Bedarfsverkehre in ländlichen Räumen erfahren einen Aufschwung. Die Branchenumfrage 2022 des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) [VD22] stellt fest, dass deutschlandweit mehr als 400 Fahrzeuge im Linienbedarfsverkehr unterwegs sind und bis Ende 2022 mehr als 80 Projekte mit dem Schwerpunkt ÖPNV-integrierter Bedarfsverkehr in der Umsetzung erwartet wurden (vgl. Abbildung 1).

Abbildung 1: Hochlauf von ÖV-integrierten digitale On-Demand-Verkehrsprojekte



© VDV | Repräsentative Umfrage | Anzahl gemeldeter On-Demand/LEV-Verkehre, Zeitraum 01.01.2019-01.01.2023.

Quelle: "Hochlauf der On-Demand-Verkehre im ÖPNV | VDV - Die Verkehrsunternehmen" n.d.

Nahezu die Hälfte dieser Projekte werden im ländlichen Raum umgesetzt (Vgl. Abbildung 2). Dies ist plausibel, da gegeben durch eine geringe Nachfrage und großer Fläche die Bedienung mit einem festen Linienweg zu hohen Kosten führt. Entscheidend für die erfolgreiche Umsetzung eines bedarfsgesteuerten Verkehrs ist die Betriebs- und Organisationsstruktur des neuen Dienstes. Um ODVe nachhaltig über einen längeren Zeitraum und unabhängig von Forschungsprojekten zu etablieren, sind Engagement und klare Aufgabenverteilungen in der Organisationsstruktur erforderlich. Klar ist aber auch, dass die neuen Bedarfsverkehre nicht rentabel sind. Fast alle neuen bedarfsgesteuerten Projekte werden mit Landes- oder Bundesmitteln gefördert. Der VDV rechnet mit einer Finanzierungslücke von 3,8 Mrd. Euro bis 2030, damit bis dahin flächendeckend bedarfsgesteuerte Verkehre im Regelbetrieb fahren können [VD22].

Im Projekt OSLO wurden daher im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zum Einsatz von Open Source Software für die konzeptionelle Einbindung eines neuen ODVs in Spremberg Ergebnisse in folgenden Bereichen erarbeitet: Zunächst wurde auf Basis der vorhandenen Datenbasis und gemeinsam mit der Bevölkerung eine Bedarfsanalyse im Raum Spremberg erarbeitet. Der Entwicklungsstand verfügbarer Open Source Software im Bereich Mobilitätsplattformen, Routing und On-Demand-Konzessionen wurde zusammengefasst und die Softwarearchitektur der Open-Source-Mobilitätsplattform bnavi aufbereitet. Verfügbare Routingalgorithmen und -logiken wurden analysiert und die Möglichkeiten der algorithmischen Parallelverkehrsvermeidung und Anschlusssicherung diskutiert. Aus den genannten Vorarbeiten ergeben sich erste Grundlagen für ein Betriebs- und Organisationsmodell in einer hypothetischen Umsetzung eines On-Demand-Pooling-Verkehre. Die Ergebnisse sind im Folgenden zusammengefasst und dargestellt.

Gefördert durch:



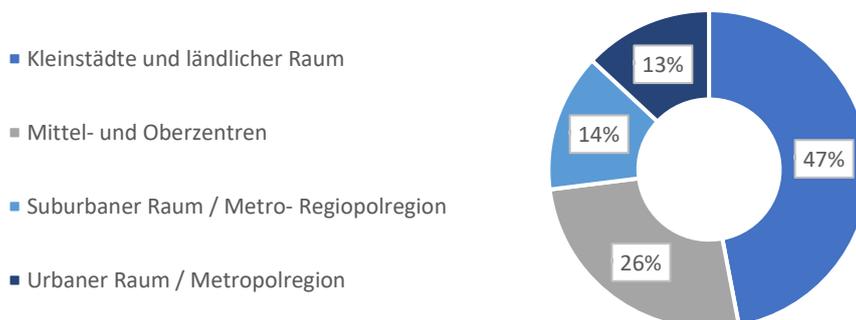
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



Abbildung 2: Verteilung der On-Demand-Verkehr-Projekte nach Raumtyp



© VDV | Repräsentative Umfrage, räumliche Verteilung von On-Demand / LBV-Verkehren nach Siedlungs- und Raumstruktur im Zeitraum 01.01.2019. – 01.01.2023.

Kleinstädte und ländlicher Raum = (sehr) periphere Lagetypen + ländliche Siedlungsstruktur + Einwohner < 20.000.

Mittel- und Oberzentren = periphere bis zentrale Lagetypen + (teilweise) städtische Siedlungsstruktur + 20.000 < Einwohner < 100.000.

Suburbaner Raum / Metro- Regiopolregion = zentrale Lagetypen + (überwiegend) städtische Siedlungsstruktur + Einwohner > 100.000 + Bedienebiet vorwiegend außerhalb des Stadtzentrums.

Urbaner Raum / Metropolregion = sehr zentrale Lagetypen + städtische Siedlungsstruktur + Einwohner > 200.000 + zentrales Stadtgebiet

Quelle: "Hochlauf der On-Demand-Verkehre im ÖPNV | VDV - Die Verkehrsunternehmen" n.d.

1 Implementierungsszenarien

In Deutschland wurden bereits viele ODVe erfolgreich eingeführt. Gleichzeitig sind jedoch zahlreiche gescheitert. Aus den bisherigen Erfahrungen mit On-Demand-Pooling-Verkehren lassen sich einige Rückschlüsse auf Erfolgsfaktoren der Umsetzung sowie Optimierungsmöglichkeiten ziehen: Die meisten Angebote scheitern an der Wirtschaftlichkeit des bedarfsgerechten Verkehrs. Mit zu kleinen Kostendeckungsgraden ist ein wirtschaftlicher Betrieb des Angebots nicht möglich, was oft in der Abschaffung des Angebots nach Auslauf der Förderung endet. Es sind grundsätzlich zwei erfolgreiche Implementierungen von On-Demand-Pooling-Verkehren identifizierbar:

- Innerstädtische Substitution von Individualverkehr, um eine lebenswerte Innenstadt mit weniger Emissionen, Parkplätzen und Parkraumproblemen zu schaffen.
- Erweiterung des ländlichen ÖPNV, um große Gebiete mit geringer Nachfrage an den getakteten ÖPNV anzuschließen, um abgehängte Regionen wieder in das ÖPNV-Netz zu integrieren.

Zur Verbesserung oder auch erfolgreichen Implementierung von On-Demand-Angeboten gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder es wird auf eine Serviceoptimierung, also eine Verbesserung des ÖPNV-Angebots wie die Erschließung neuer Linien, die Substitution von nicht genutzten Haltestellen oder eine Takterhöhung bzw. -anpassung gesetzt. Oder es wird eine technische Optimierung entwickelt und implementiert, die zu einer Verbesserung des Zugangs zu dem bestehenden Service führt. Bei Letzterem werden im Zuge der Digitalisierung bspw. App-basierte Lösungen entwickelt, die einen besseren Zugang zum bestehenden ÖPNV über intermodale Routenabfragen ermöglichen [Gi21].

Im Projekt OSLO werden beide Ansätze miteinander verbunden. Es soll die Machbarkeit einer Serviceoptimierung unter der Prämisse einer technischen Optimierung geprüft werden. Hierzu wird zunächst die Machbarkeit der intermodalen Integration des bestehenden ÖPNV-Netzes über eine OS-Software geprüft und darauf aufbauend die Bedingungen und Möglichkeiten einer Serviceerweiterung über einen On-Demand-Pooling-Verkehr definiert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



2 Anwendungsfälle im Raum Spremberg

In Spremberg wurden zur Erstellung von nutzerzentrierten Anwendungsfällen und resultierenden Anforderungen zwei Workshops durchgeführt. Im initialen Bedarfsworkshop wurde gemeinsam mit den Bürger:innen die bisher noch nicht abgedeckte Mobilitätsnachfrage erörtert. Anschließend wurden unter Rücksprache mit dem ÖPNV-Aufgabenträger drei Anwendungsfälle für einen ODV in Spremberg abgeleitet. Unter der Einschränkung ein ODV in Spremberg sollte nicht zu den regulären ÖPNV-Zeiten verkehren, exkludiert wurde die Bedienung der morgendlichen und abendlichen Pendlerverkehre, resultierten die Anwendungsfälle Pendeln, Querverbindungen und abendliche Randzeiten. Auf den ersten Workshop aufbauend wurde ein zweiter gemeinsam mit den Fahrdienstleistern in Spremberg durchgeführt. Ziel war es die wichtigsten Anforderungen zur funktionalen und konkurrenzfreien Umsetzung der Anwendungsfälle abzuleiten und ein mögliches Rollen- und Organisationsmodell zu erstellen. Im Folgenden werden die Anwendungsfälle mit zufällig ausgewählten Vergleichsstrecken und den resultierenden Anforderungen der Umsetzung vorgestellt. In Kapitel 4 und 5 wird auf das Betriebs- und Organisationsmodell eingegangen.

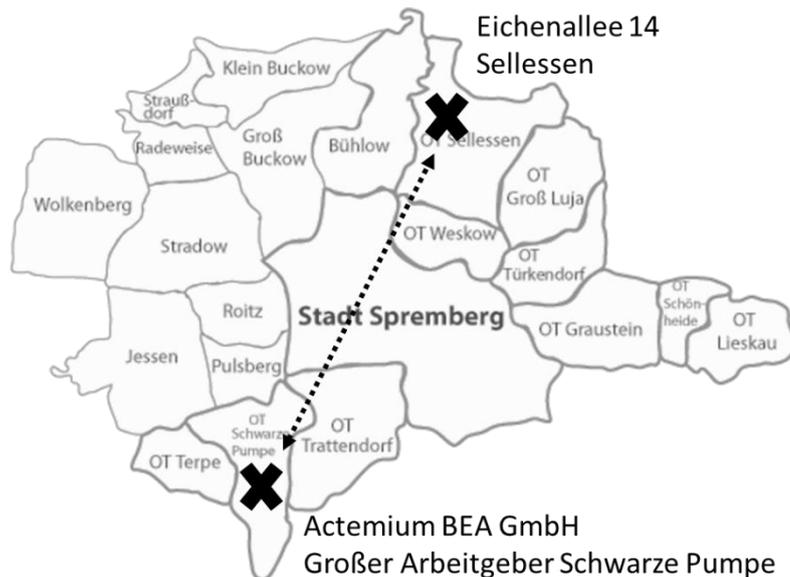
2.1 Pendeln

Als erster Anwendungsfall wird der Arbeitsweg detailliert. Dies liegt zum einen an der hohen Priorisierung des Bedürfnisses nach einem effizienten Arbeitsweg ohne privaten Pkw im ersten Workshop zur Bedarfserhebung in Spremberg und zum anderen an der großen potenziellen Nutzergruppe. Der Wegezweck Arbeit ist mit 18% aller Wege der dritt wichtigste Wegezweck nach Einkaufen und Freizeit [Ge20].

2.1.1 Vergleichsstrecke

Als repräsentative Vergleichsstrecke für einen Arbeitsweg in Spremberg wurde die Route von einer zufällig ausgewählten Adresse in einem Wohngebiet in Sellessen Haidemühl zu der Actemium BEA GmbH, einem Großarbeitgeber im Industriepark Schwarze Pumpe, ausgewählt (vgl. Abbildung 3).

Abbildung 3: Vergleichsstrecke Anwendungsfall 1



Quelle: Eigene Darstellung

Mit dem Auto beträgt die durchschnittliche Wegzeit mit einer Ankunft um 09:00 Uhr am Ziel oder für eine Rückfahrt ab 16:00 Uhr 20 Minuten, während die gleiche Strecke im ÖPNV mit einem Umstieg am Busbahnhof Spremberg in der Kernstadt durchschnittlich 49 Minuten dauert [VB22]. Ziel des Anwendungsfalls ist es, eine effizientere Reisezeit unter der Prämisse einer Minimierung der Verwendung des Privatautos in der Hauptwegstrecke zu ermöglichen. Hierfür sollen emissionsarme Verkehrsträger wie Fahrrad, Fußgänger und ODV mit dem ÖPNV effizient verzahnt werden.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus

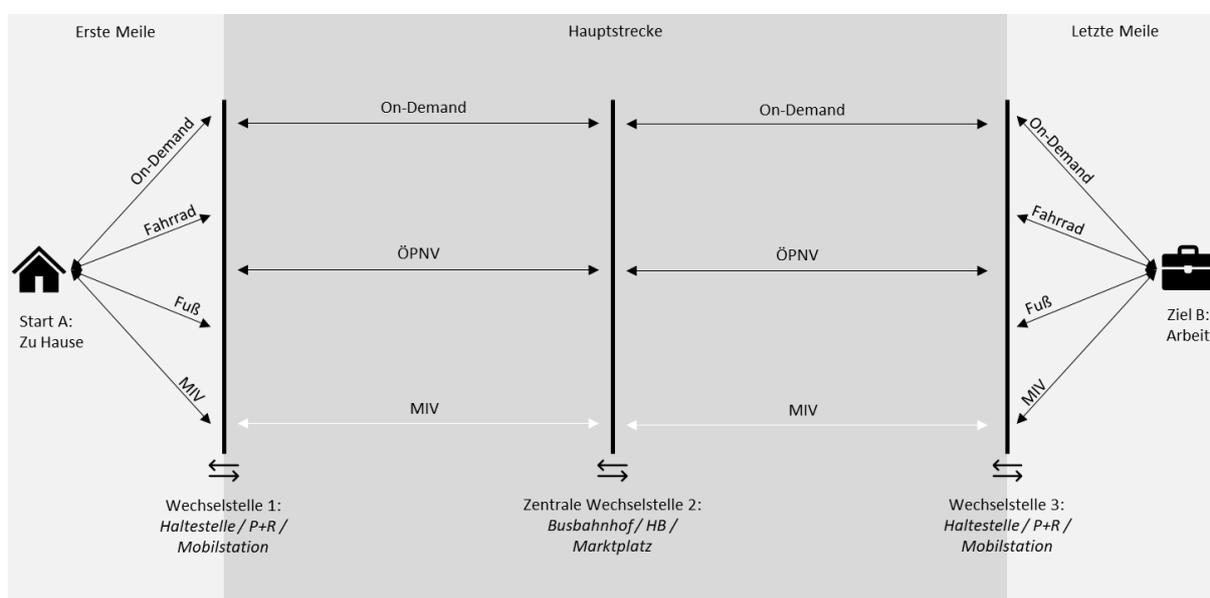


2.1.2 Prozessdiagramme

Zur Darstellung des Anwendungsfalls werden die erste Meile der Weg zur ÖPNV Haltestelle), die Hauptstrecke, (die Kernstrecke des Gesamtwegs) sowie die letzte Meile (der Weg von der Haltestelle zum Ziel), einzeln betrachtet. Es ist möglich, die gesamte Strecke mit dem eigenen Auto, dem motorisierten Individualverkehr (MIV), zu bewältigen. Jedoch geht es im Anwendungsfall darum, die Gesamtstrecke des MIV zu minimieren. Dies soll nicht ausschließen, dass zur Überbrückung einer Teilstrecke, wie der ersten oder letzten Meile, der MIV nicht die effizienteste Verkehrsform darstellen kann.

Abbildung 4 und Abbildung 5 stellen die Prozessdiagramme für die Hin- und Rückfahrt zum Arbeitsplatz dar. Im folgenden Kapitel 3 werden die technischen, rechtlichen und organisatorischen Anforderungen für die Umsetzung des Anwendungsfalls beschrieben. Hin- und Rückfahrt unterscheiden sich in den Anforderungen nur insofern, als dass die Rückfahrt nicht extrem auf die Ankunftszeit abgestimmt sein muss und auf der Rückfahrt auch Zwischenhalte bei beispielsweise Supermärkten oder allgemeine Erledigungen nach der Arbeit berücksichtigt werden müssen.

Abbildung 4: Prozessdiagramm Anwendungsfall 1 - Hinfahrt



Quelle: Eigene Darstellung

Gefördert durch:



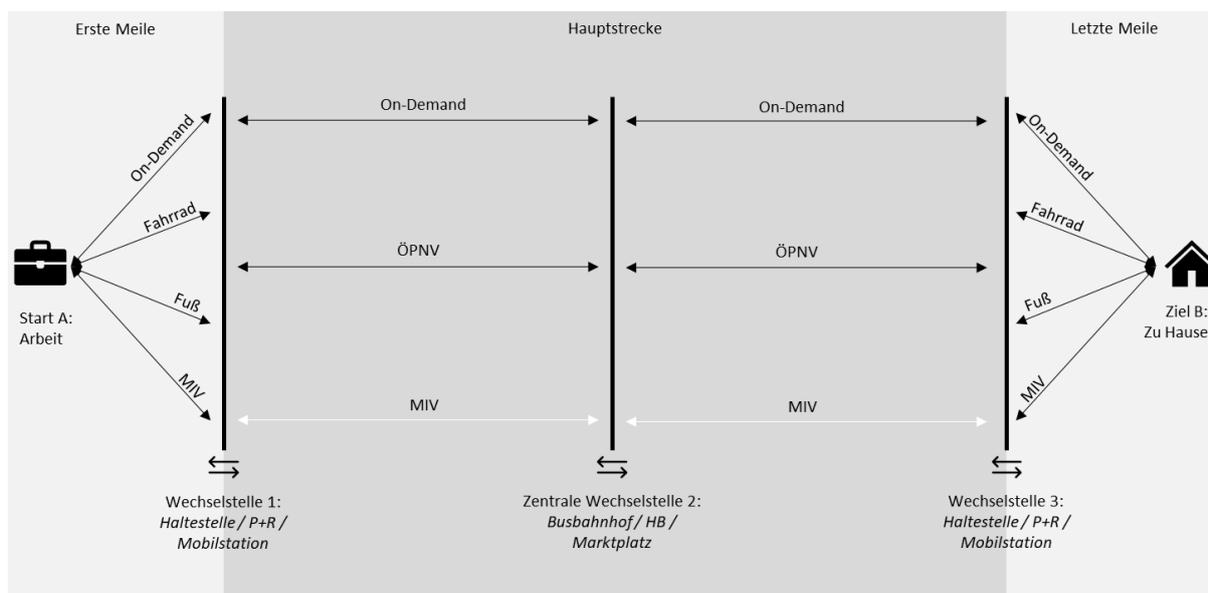
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



Abbildung 5: Prozessdiagramm Anwendungsfall 1 - Rückfahrt



Quelle: Eigene Darstellung

2.1.3 Anforderungen

Tabelle 1: Anforderungen Anwendungsfall 1

1. Betrieb		
1.1	Schneller Umstieg	Umstieg an den Wechselstellen (1,2,3) muss mit kurzem Fußweg möglich sein.
1.2	Verspätungsinformationen	Verspätungen müssen klar ersichtlich sein.
1.3	Anschlussgarantie	Ein Ausfall eines Anschlusses muss ersetzt werden.
1.4	Komfortabler Umstieg	Umstiege zwischen Verkehrsträgern müssen komfortabel sein. Es müssen Unterstände und Schließanlagen vorhanden sein.
1.5	Personal	Es müssen genügend Fahrer:innen vorgehalten werden.
1.6	Fahrzeuge	Es müssen genügend Fahrzeuge vorgehalten werden.
1.7	Versicherung	Versicherung für den Flächenbetrieb muss abgeschlossen sein.
1.8	Barrierefreiheit	Feste Haltestellen müssen einen barrierefreien Zustieg ermöglichen.
1.9	Tarifsystem	Integration in das bestehende ÖPNV-Tarifsystem plus Komfortzuschlag für eine einfache Abrechnung muss umgesetzt sein.
1.10	Zeiteffizienz	Die Gesamtzeit der Verbindung muss vergleichbar (weniger als doppelt so lange) mit der Reisezeit im Privatauto sein.
1.11	Pooling	Es müssen viele Fahrtwünsche auf einer Strecke gebündelt werden, wenn eine Hauptstrecke gefahren wird (>3).
1.12	Virtuelle Haltestellen	Auch Zu- und Ausstiege abseits der bereits existierenden Haltestellen muss ermöglicht werden.
1.13	Zeitfenster	Zeitfenster müssen definiert sein: Hinfahrt: 07:00 – 10:00 Uhr Rückfahrt: 16:00 – 18:00 Uhr
2. Algorithmus		

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Startkapital für die Mobilität der Zukunft

Ein Verbund aus



2.1	Verzahnung	Anschlussmöglichkeiten müssen bestmöglich kombiniert werden.
2.2	Abhol-Optimierung	Personen können nur mitgenommen werden, wenn der Anschluss der ersten mitfahrenden Person weiterhin erreicht wird.
2.3	Umweg	Zeiten für Umwege müssen so optimiert werden, dass die Wegzeiten für Mitfahrende weiterhin akzeptabel sind, aber auch möglichst hohe Pooling-Quoten erzielt werden können.
2.4	Vermeidung Parallelverkehr	Die Vermeidung von simultanen Fahrten von ODV und ÖPNV muss forciert werden; Fokus liegt auf der Funktion Zubringer und Querverbinder.
2.5	Fixe Ankunftszeit	Hinfahrt: Es müssen feste Ankunftszeiten (09:00 Uhr Arbeitsbeginn) ermöglicht werden.
2.6	Zwischenausstieg	Rückfahrt: Ein Ausstieg an gewissen POIs auf der Strecke muss ermöglicht werden (Bspw. Supermarkt).
3. Software		
3.1	Funktionalität	Umfangreiche Informationen (Verspätungen, verfügbare Verkehrsmittel, etc.), Navigation, integrierte Buchung, Reservierung und Zahlung.
3.2	Benutzerfreundlichkeit	Verständliche Oberfläche (UI/UX Design), Individualisierbarkeit, Prozesseffizienz.
3.3	Interaktion/Kommunikation	Sicherheit (Datenschutz), Service (Kundentelefon), Feedback (Kundenrezensionen), Integration in das bereits existierende System.
3.4	Rahmenbedingungen	Spremborg als Bedienegebiet, bestenfalls Grenzüberschreitend, Intermodale Integration der Verkehrsträger, Öffentliche Finanzierung, Integration in das ÖPNV-Tariffsystem.
4. Rechtsrahmen		
4.1	Genehmigung Plattform	Nach § 1 Abs. 1 a (PbefG) sind digitale Vermittlungsplattformen, wenn sie „die Vermittlung und Durchführung der Beförderung organisatorisch und vertraglich verantwortlich kontrollieren“, genehmigungspflichtig.
4.2	Linienbedarfsverkehr	§ 44 (neu) PbefG: ÖPNV-Form des Linienverkehrs ohne festen Linienweg. Flächenerschließung mit Pkw und Bus zw. Haltepunkten und nach ÖPNV-Tarif (ggf. mit Komfortzuschlag). Weitere Möglichkeit ist der „Gebündelte Bedarfsverkehr“: § 50 (neu) PbefG: Flächenerschließung als Gelegenheitsverkehr. Verpflichtete zur Erhebung sog. Mindestentgelte höher als der ÖPNV-Tarif. Nur für Pkws.

2.1.4 Zusammenfassung

Neben den für alle Anwendungsfälle gültigen Anforderungen sind zur effizienten Gestaltung des Anwendungsfalls 1 „Pendeln“ folgende wesentliche Anforderungen identifiziert worden:

- Vergleichbare Reisezeit gegenüber dem MIV
- Effiziente Umsteigezeiten und Anschlussgarantie
- Kurze Fußwege
- Ausstattung der Umstiege mit Schließanlagen und Unterstand für die Kombinationen von ÖPNV mit Fuß- Rad- und ODV
- Geringe Umwege
- Planbare Ankunftszeiten (Hinfahrt)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



2.2 Querverbindungen und kurze Wege

Als zweiter Anwendungsfall wurden die kurzen Wege sowie die Querverbindungen zwischen den Ortsteilen gewählt. Dies begründet sich durch das Zeitfenster von 10:00 bis 16:00 Uhr für eine mögliche Nutzung zwischen Hin- und Rückweg im Anwendungsfall 1. Zum anderen hat der Wegezweck Einkaufen mit 31% aller Wege eine hohe Bedeutung in Spremberg [Ge20].

Da in Spremberg einige Verbindungen zwischen den Ortsteilen mit einem Umstieg am Busbahnhof bestehen, ergibt sich auch die Chance zur effizienteren Gestaltung von gewissen Querverbindungen. Hier können Verbindungen zwischen nahegelegenen Ortsteilen durch nicht an Haltestellen gebundene Bedienformen gestellt werden und damit den MIV auf Kurzstrecken ablösen, auf welchen der ÖPNV durch einen Umstieg nicht konkurrenzfähig ist.

Zusammenfassend werden im Anwendungsfall 2 die Verbindungen gebündelt, welche keine langen Mobilitätsketten benötigen und sich auf den späten Vormittag und frühen Nachmittag konzentrieren. Beispiele sind Einkaufsfahrten, Arztbesuche, Behördengänge und der Besuch sozialer Kontakte in nahegelegenen Ortsteilen.

2.2.1 Vergleichsstrecke

Als repräsentative Vergleichsstrecke für eine kurze Querverbindung in Spremberg wurde die Route von einer zufällig ausgewählten Adresse in Groß Luja, Ringweg 16, 03130 Spremberg, zu einer Gaststätte in Bühlow, Hauptstraße 9, 03130 Spremberg, ausgewählt (vgl. Abbildung 6).

Abbildung 6: Vergleichsstrecke Anwendungsfall 2



Quelle: Eigene Darstellung

Mit dem Auto beträgt die durchschnittliche Wegzeit 10 Minuten, während die gleiche Strecke mit einem Umstieg am Busbahnhof Spremberg in der Kernstadt durchschnittlich 1 Stunde und 8 Minuten dauert [VB22]. Die vielfach längere Zeit mit dem ÖPNV ergibt sich aus einer langen Umsteigezeit am Busbahnhof. Es ist zudem verständlich, dass nicht stark nachgefragte Querverbindungen nicht durch einen Linienbetrieb abgedeckt werden können. Hier könnten flexible Bedienformen die Lücke zwischen MIV und ÖPNV schließen. Ziel des Anwendungsfalles ist es, eine effizientere Reisezeit unter der Prämisse einer Minimierung der Verwendung des Privatautos in der Hauptwegstrecke zu ermöglichen. Dazu sollen emissionsarme Verkehrsmittel wie Fahrrad, Fuß- und Bedarfsverkehr genutzt werden. Sofern verfügbar, sind auch effiziente Kombinationen aus ÖPNV und Bedarfsverkehr denkbar. Der Fokus des Anwendungsfalles liegt jedoch auf Direktverbindungen mit einem der Verkehrsmittel, um vergleichbare Reisezeiten wie mit dem MIV zu generieren.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



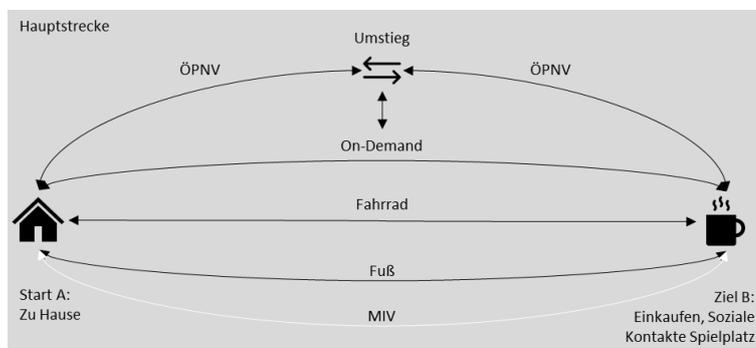
2.2.2 Prozessdiagramm

Für die Darstellung des Anwendungsfalles wird im Vergleich zu Anwendungsfall 1 nur auf die Hauptstrecke fokussiert. Besonderes Augenmerk wird im Anwendungsfall auf Verbindungen gelegt, die aufgrund geringer Nachfrage keine effiziente Bedienung durch einen Linienverkehr zulassen. Es sollen auch Verbindungen mit einer Kombination aus zwei Verkehrsmitteln möglich sein, sofern effiziente und kurze Umsteigevorgänge gewährleistet werden können.

Abbildung 7 und Abbildung 8 stellen die Prozessdiagramme für den Hin- und Rückweg des Anwendungsfalles 2 dar. Die Verbindung beschreibt eine relativ kurze Strecke mit dem MIV (<20 Minuten) mit dem Wegzweck Freizeit und Einkaufen. Das anschließende Kapitel beschreibt die technischen, rechtlichen und organisatorischen Anforderungen an die Umsetzung des Anwendungsfalles. Im Anwendungsfall 2 unterscheiden sich Hin- und Rückfahrt in den Anforderungen nicht.

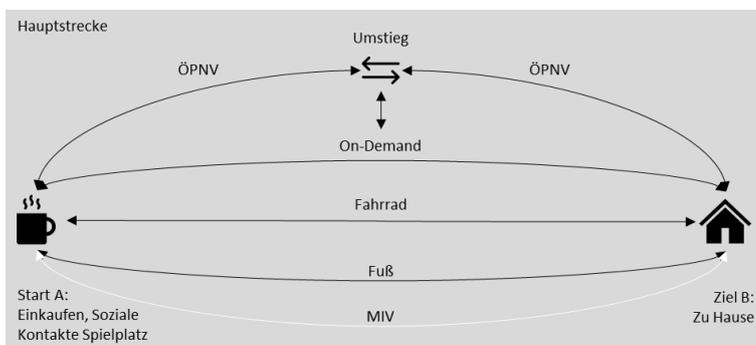
Der ODV ist besonders für mobilitätseingeschränkte Nutzer:innen und schlechte Wetterbedingungen ausgelegt. Wie die Vergleichsstrecke bereits zeigt, sind auf den kurzen Querverbindungen auch Fuß- und Radverkehr als Mobilitätslösung möglich. Der ODV soll diese nicht substituieren, sondern lediglich die Nutzung des MIV reduzieren und für Zielgruppen, welche den Fuß- und Radverkehr nicht nutzen können, eine Alternative bieten.

Abbildung 7: Prozessdiagramm Anwendungsfall 2 - Hinfahrt



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 8: Prozessdiagramm Anwendungsfall 2 – Rückfahrt



Quelle: Eigene Darstellung

2.2.3 Anforderungen

Tabelle 2: Anforderungen Anwendungsfall 2

1. Betrieb		
1.1	Spontan Buchungen	Buchungen mit geringer zeitlicher Vorlaufzeit (30 min) müssen ermöglicht werden (Rückfahrt nach Einkauf nicht planbar).
1.2	Optimaler Abholpunkt	Falls Fußweg möglich (Angabe bei Buchung) kann Abholort und dadurch die Gesamtzeit der Strecke optimiert werden.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



1.3	Schneller Umstieg	Umstieg (falls nötig) muss aufeinander abgestimmt sein.
1.4	Verspätungsinformationen	Verspätungen müssen klar ersichtlich sein.
1.5	Personal	Es müssen genügend Fahrer:innen vorgehalten werden.
1.6	Fahrzeuge	Es müssen genügend Fahrzeuge vorgehalten werden.
1.7	Versicherung	Versicherung für den Flächenbetrieb muss abgeschlossen sein.
1.8	Barrierefreiheit	Feste Haltestellen müssen einen barrierefreien Zustieg ermöglichen.
1.9	Tarifsystem	Integration in das bestehende ÖPNV-Tarifsystem plus Komfortzuschlag für eine einfache Abrechnung.
1.10	Zeiteffizienz	Die Gesamtzeit der Verbindung muss konkurrenzfähig (weniger als dreimal so lange) mit der Reisezeit im Privatauto sein.
1.11	Virtuelle Haltestellen	Auch Zu- und Ausstiege abseits der bereits existierenden Haltestellen muss ermöglicht werden.
1.12	Zeitfenster	Definiertes Zeitfenster von 09:00 – 16:00 Uhr.
2. Algorithmus		
2.1	Verzahnung	Anschlussmöglichkeiten müssen bestmöglich kombiniert werden.
2.2	Räumliche Bündelung	Fahrten im gleichen Gebiet müssen aufeinander abgestimmt werden. Ausstieg und Zustieg müssen effizient gestaltet werden.
2.3	Umweg	Zeiten für Umwege müssen so optimiert werden, dass die Wegzeiten für Mitfahrende weiterhin tragbar sind, aber auch möglichst hohe Pooling-Quoten erzielt werden.
2.4	Vermeidung Parallelverkehr	Keine Fahrten von ODV auf ÖPNV Linien.
2.6	Zwischenstopps	Ausstiege und Zustiege auf der geplanten Route müssen möglich sein.
3. Software		
3.1	Funktionalität	Umfangreiche Informationen (Verspätungen, verfügbare Verkehrsmittel, etc.), Navigation, integrierte Buchung, Reservierung und Zahlung.
3.2	Benutzerfreundlichkeit	Verständliche Oberfläche (UI/UX Design), Individualisierbarkeit, Prozesseffizienz.
3.3	Interaktion/Kommunikation	Sicherheit (Datenschutz), Service (Kundentelefon), Feedback (Kundenrezensionen), Integration in das bereits existierende System.
3.4.	Rahmenbedingungen	Spremborg als Bediengebiet, bestenfalls grenzüberschreitend, Intermodale Integration der Verkehrsträger, Öffentliche Finanzierung, Integration in das ÖPNV-Tarifsystem.
4. Rechtsrahmen		
4.	Genehmigung Plattform	Nach § 1 Abs. 1 a (PbefG) sind digitale Vermittlungsplattformen, wenn sie „die Vermittlung und Durchführung der Beförderung organisatorisch und vertraglich verantwortlich kontrollieren“, genehmigungspflichtig.
4.2	Linienbedarfsverkehr	§ 44 (neu) PbefG: ÖPNV-Form des Linienverkehrs ohne festen Linienweg. Flächenerschließung mit Pkw und Bus zw. Haltepunkten und nach ÖPNV-Tarif (ggf. mit Komfortzuschlag). Weitere Möglichkeit ist der „Gebündelte Bedarfsverkehr“: § 50 (neu) PbefG: Flächenerschließung als Gelegenheitsverkehr. Verpflichtete zur Erhebung sog. Mindestentgelte höher als der ÖPNV-Tarif. Nur für Pkws.

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Ein Verbund aus



2.2.4 Zusammenfassung

Neben den für alle Anwendungsfälle gültigen Anforderungen sind zur effizienten Gestaltung des Anwendungsfalls 2 „Querverbindungen“ folgende wesentliche Anforderungen identifiziert worden:

- Bedienung kurzer Strecken, für welche keine passende liniengebundene ÖPNV-Verbindung existiert
- Spontane Buchungen, da Rückfahrt zeitlich oft nicht planbar ist
- Optimierung der Abholpunkte für kontinuierliche Fahrtwege
- Geringe Umwege

2.3 Abendliche Randzeiten

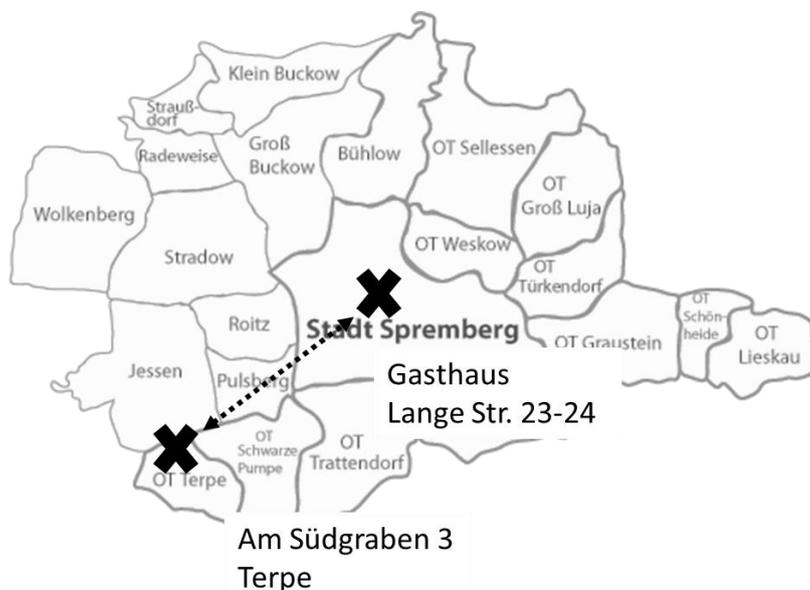
Der dritte Anwendungsfall skizziert einen Betrieb mit On-Demand-Bussen in den abendlichen Randzeiten. Dies liegt an einem verringerten ÖPNV-Betrieb in den abendlichen Zeiten und der hohen Priorisierung einer Rückfahrt nach abendlichen Aktivitäten (bspw. Restaurantbesuch) im ersten Workshop zur Bedarfserfassung in Spremberg.

Der Anwendungsfall zielt darauf ab, eine komfortable Alternative zum MIV auf der Rückfahrt von einer abendlichen Unternehmung zu schaffen. Hier können Anwendungsfall 1 und 2 als Hinfahrt genutzt werden und Anwendungsfall 3 schließt die Lücke für eine Rückfahrt in den jeweiligen Ortsteil bis 21:30 Uhr.

2.3.1 Vergleichsstrecke

Als repräsentative Vergleichsstrecke für eine Verbindung zur abendlichen Randzeit in Spremberg wurde die Route von einem Restaurant mit Biergarten in der Kernstadt, Lange Str. 23-24, 03130 Spremberg, zu einer zufällig ausgewählten Adresse im Ortsteil Terpe, Am Südgraben 3, 03130 Spremberg, gewählt (vgl. Abbildung 9).

Abbildung 9: Vergleichsstrecke Anwendungsfall 3



Quelle: Eigene Darstellung

Mit dem Auto beträgt die durchschnittliche Wegzeit 12 Minuten, während die gleiche Strecke entweder 29 Minuten als Direktverbindung (Buslinie 886) oder 1 Stunde und 24 Minuten mit einem Umstieg von der Linie 800 am Busbahnhof Schwarze Pumpe dauert. Die Haltestelle in Terpe ist eine Rufbushaltestelle und bedarf einer Anmeldung der Fahrt mit dem Bus 886 anderthalb Stunden vor Abfahrt. Die Strecke von Terpe zum Busbahnhof Schwarze Pumpe kann auch in 29 Minuten zu Fuß begangen werden. Nach 16:30 Uhr gibt es jedoch keine Möglichkeit für eine Reisekette ohne langen Fußweg [VB22]. Durch flexible Verbindungen zu abendlichen Randzeiten können auch wenig nachgefragte Strecken effizient bedient werden. Zusätzlich bietet die Kombination aus den drei Anwendungsfällen eine komplett flexible Tagesgestaltung ohne die Nutzung des MIV. So können sich Personen nach der Arbeit direkt zum Abendessen treffen und gemeinsam in den gleichen Ortsteil

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



mit dem ODV fahren. Darüber hinaus bieten kürzere Fußwege mobilitätseingeschränkten Personen die Möglichkeit, leichter auf den privaten Pkw zu verzichten.

Die Anwendungsfälle 2 und 3 ähneln sich in der Ausgestaltung, neben einer klaren zeitlichen Abgrenzung, stark. Die Unterschiede liegen in der möglichen längeren Strecke zu den abendlichen Randzeiten und einer vermutlichen Bündelung der Fahrtwünsche in der Kernstadt in die Außenbereiche, während Anwendungsfall 2 die kurzen Querverbindungen zwischen den Ortsteilen bedient.

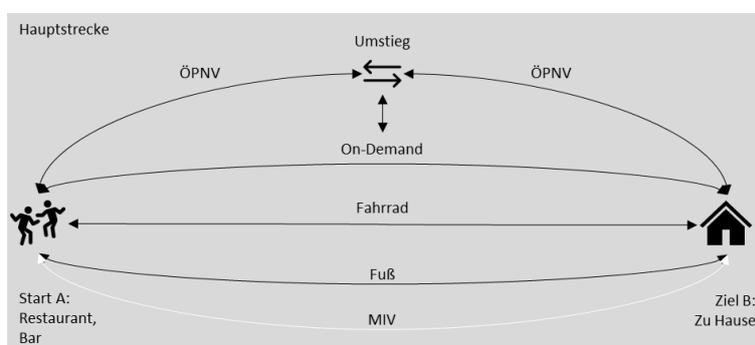
2.3.2 Prozessdiagramme

Zur Darstellung des Anwendungsfalls wird im Vergleich zu Anwendungsfall 1 nur die Hauptstrecke fokussiert. Explizit bildet der Anwendungsfall 3 Verbindungen zu abendlichen Tageszeiten ab, zu welchen keine oder eine mit langen Fußwegen beziehungsweise Wartezeiten verbundene ÖPNV-Verbindung besteht. Es werden auch Verbindungen mit einem Umstieg einbezogen, solange keine langen Wartezeiten entstehen. Besonders die Linie 800 und die Bahnverbindung mit dem RB 65 haben eine stündliche Taktung bis 23 Uhr [VB22]. Hier kann der ODV auch als Zubringer genutzt werden.

Abbildung 10 stellt das Prozessdiagramm für den Rückweg nach einer Unternehmung bis 21:30 Uhr dar. Die Verbindung beschreibt eine Strecke aus der Kernstadt oder einem Zentrum für kulturelle Veranstaltungen nach Hause. Das anschließende Kapitel 4 beschreibt die technischen, rechtlichen und organisatorischen Anforderungen an die Umsetzung des Anwendungsfalls. Im Anwendungsfall 3 wird nur die Fahrt nach Hause betrachtet.

Wie die Vergleichsstrecke zeigt, gibt es oft auch die Möglichkeit den existierenden ÖPNV in Kombination mit Fuß- und Radverkehr oder auch ausschließlich Fuß- und Radverkehr für kurze Strecken zu nutzen. Der ODV soll diese nicht substituieren, sondern lediglich die Nutzung des MIV reduzieren und für Zielgruppen, welche den Fuß- und Radverkehr nicht nutzen können oder welche in großer Distanz zur Kernstadt wohnen, eine Alternative bieten.

Abbildung 10: Prozessdiagramm Anwendungsfall 3



Quelle: Eigene Darstellung

2.3.3 Anforderungen

Tabelle 3: Anforderungen Anwendungsfall 3

1. Betrieb		
1.1	Spontan-Buchungen	Buchungen mit geringer zeitlicher Vorlaufzeit (30 min) müssen ermöglicht werden (Rückfahrt nach Einkauf nicht planbar).
1.2	Optimaler Abholpunkt	Falls Fußweg möglich (Angabe bei Buchung) kann Abholort und dadurch die Gesamtzeit der Strecke optimiert werden.
1.3	Schneller Umstieg	Umstieg (falls nötig) muss aufeinander abgestimmt sein.
1.4	Verspätungsinformationen	Verspätungen müssen klar ersichtlich sein.
1.5	Personal	Es müssen genügend Fahrer:innen vorgehalten werden.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



1.6	Fahrzeuge	Es müssen genügend Fahrzeuge vorgehalten werden.
1.7	Versicherung	Versicherung für den Flächenbetrieb muss abgeschlossen sein.
1.8	Barrierefreiheit	Feste Haltestellen müssen einen barrierefreien Zustieg ermöglichen.
1.9	Tarifsystem	Integration in das bestehende ÖPNV-Tarifsystem plus Komfortzuschlag für eine einfache Abrechnung.
1.10	Virtuelle Haltestellen	Auch Zu- und Ausstiege abseits der bereits existierenden Haltestellen muss ermöglicht werden.
1.11	Zeitfenster	Definiertes Zeitfenster von 18:00 – 21:30 Uhr.
2. Algorithmus		
2.1	Verzahnung	Anschlussmöglichkeiten müssen bestmöglich kombiniert werden.
2.2	Räumliche Bündelung	Fahrten im gleichen Gebiet müssen aufeinander abgestimmt werden. Ausstieg und Zustieg müssen effizient gestaltet werden.
2.3	Umweg	Umwege können für Verbindungen in eine ähnliche Richtung in Kauf genommen werden. Wichtig ist, möglichst viele Fahrtwünsche zu bündeln, da lange Rückfahrzeiten entstehen können.
2.4	Vermeidung Parallelverkehr	Keine Fahrten von ODV auf ÖPNV-Linien.
2.6	Zwischenstopps	Ausstiege und Zustiege auf der geplanten Route müssen möglich sein.
3. Software		
3.1	Funktionalität	Umfangreiche Informationen (Verspätungen, verfügbare Verkehrsmittel, etc.), Navigation, integrierte Buchung, Reservierung und Zahlung.
3.2	Benutzerfreundlichkeit	Verständliche Oberfläche (UI/UX Design), Individualisierbarkeit, Prozesseffizienz.
3.3	Interaktion/Kommunikation	Sicherheit (Datenschutz), Service (Kundentelefon), Feedback (Kundenrezensionen), Integration in das bereits existierende System müssen gewährleistet sein.
3.4.	Rahmenbedingungen	Spremborg als Bediengebiet, bestenfalls grenzüberschreitend, Intermodale Integration der Verkehrsträger, Öffentliche Finanzierung, Integration in das ÖPNV-Tarifsystem.
4. Rechtsrahmen		
4.1	Genehmigung Plattform	Nach § 1 Abs. 1 a (PbefG) sind digitale Vermittlungsplattformen, wenn sie „die Vermittlung und Durchführung der Beförderung organisatorisch und vertraglich verantwortlich kontrollieren“, genehmigungspflichtig.
4.2	Linienbedarfsverkehr	§ 44 (neu) PbefG: ÖPNV-Form des Linienverkehrs ohne festen Linienweg. Flächenerschließung mit Pkw und Bus zw. Haltepunkten und nach ÖPNV-Tarif (ggf. mit Komfortzuschlag). Weitere Möglichkeit ist der „Gebündelte Bedarfsverkehr“: § 50 (neu) PbefG: Flächenerschließung als Gelegenheitsverkehr. Verpflichtete zur Erhebung sog. Mindestentgelte höher als der ÖPNV-Tarif. Nur für Pkws.

2.3.4 Zusammenfassung

Neben den für alle Anwendungsfälle gültigen Anforderungen sind zur effizienten Gestaltung des Anwendungsfalls 3 „Abendliche Randzeiten“ folgende wesentliche Anforderungen identifiziert worden:

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



- Bedienung der abendlichen Randzeiten, für welche keine passende liniengebundene ÖPNV-Verbindung existiert
- Spontane Buchungen, da Rückfahrt zeitlich oft nicht planbar ist
- Optimierung der Mitnahme entlang der Strecke, da Streckenführung meist von der Kernstadt in die äußeren Ortsteile führt und damit lange leere Rückfahrten bedeutet
- Umwege können zur Erhöhung der Pooling-Quote in Kauf genommen werden

2.4 Zwischenfazit

Aus der Zusammenfassung der drei entwickelten Anwendungsfälle, „Pendeln“, „Querverbindungen“ und „Abendliche Randzeiten“ lassen sich folgende Rückschlüsse ziehen: Zum einen sind die betrieblichen, technischen und rechtlichen Anforderungen an die Umsetzung sehr ähnlich. Die größten Unterschiede bestehen in der Verzahnung mit dem existierenden Linienverkehr gegenüber der Bedienung von bisher nicht in Linien abgebildeten kurzen Querverbindungen oder bisher zeitlich nicht abgebildeten Verbindungen zu Randzeiten.

Daraus lässt sich ableiten, dass bei der Umsetzung des ersten Anwendungsfalls ein starker Fokus auf effizienten Umsteigevorgängen zwischen verschiedenen Verkehrsträgern und einer fixen Ankunftszeit liegt, während die beiden anderen Anwendungsfälle bisher nichtexistierende Verbindungen darstellen und daher einen stärkeren Fokus auf effiziente Abholpunkte und flexible Buchbarkeit legen.

Durch die Routine des Arbeitsweges sind die Abholungen im ersten Anwendungsfall gut planbar und über einen längeren Zeitraum konstant, während es in den beiden anderen Anwendungsfällen auch zu spontanen Buchungen und nicht planbaren Verbindungen kommt, da der zeitliche Umfang eines Restaurantbesuches oder eines Treffens mit sozialen Kontakten nicht im Voraus planbar ist. Dabei ist zu beachten, dass in der abendlichen Schwachverkehrszeit bei Verbindungen vor allem von der Kernstadt in die peripheren Ortsteile längere Warte- bzw. Vorbuchungszeiten sowie längere Umwege auf der Strecke in Kauf genommen werden müssen, um möglichst viele Fahrgäste auf einer Fahrt zu befördern.

In Bezug auf die Flottengröße ist für eine Stadt im Umfang von Spremberg davon auszugehen, dass für die Bedienung der Anwendungsfälle zunächst ein bis zwei Fahrzeuge ausreichend sind [Me23]. Dies ist mit der Ausdehnung des Betriebsgebietes oder eines spezifischen Anwendungsfalls skalierbar und kann dadurch in Zukunft auch zu einem höheren Bedarf an verfügbaren Fahrzeugen führen.

Während der Betrieb bzw. die organisatorische Hoheit über das Angebot entweder beim ÖPNV-Aufgabenträger oder bei einer Gebietskörperschaft zu sehen ist, sind die Teilbereiche des Betriebs auf viele verschiedene Akteure verteilt. Das zugrundeliegende Rollenmodell wird im weiteren Projektverlauf weiter ausgearbeitet. So können z.B. Fahrzeuge und Personal auch von lokalen Verkehrsunternehmen gestellt werden und die Wartung und der Betrieb der Software durch einen lokalen Softwaredienstleister erfolgen. Hier sind viele Konstellationen vorstellbar, welche durch die Integration ansässiger Stakeholder im weiteren Verlauf geschärft wird.

3 Rahmenbedingungen

In Vorbereitung auf das Betriebs- und Organisationsmodell werden im Folgenden zunächst die wichtigsten Rahmenbedingungen zur Etablierung eines On-Demand-Pooling-Verkehrs zusammengefasst.

3.1 Rechtlich

Mit der Zustimmung des Bundesrats vom 26. März 2021 wurde das Gesetzesvorhaben zur Modernisierung des Personenbeförderungsrechts abgeschlossen. Das Gesetz wurde Ende April 2021 im Bundesgesetzblatt verkündet (BGBl I, S. 822), und die Verkündung führte zur Inkraftsetzung der meisten neuen Regelungen ab dem 1. August 2021.

Die Anpassungen betreffen hauptsächlich das Personenbeförderungsgesetz (PBefG). Treiber der Novellierung war das im Koalitionsvertrag von CDU, CSU und SPD 2018 festgehaltene Ziel einer rechtssicheren Regelung von sogenannten plattformbasierten Mobilitätsdiensten. Die durch die Digitalisierung ermöglichten Geschäftsmodelle zur bedarfsgerechten Vermittlung von Verkehrsleistungen sollten im PBefG eine rechtssichere Grundlage finden. Bei diesen "digitalen Geschäftsmodellen" erfolgt die Bestellung, Buchung, Streckenführung

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



und Zahlungsabwicklung der Beförderungen automatisiert über Smartphone-Apps. Je nach Geschäftsmodell können auch Beförderungswünsche separater Parteien auf eine Fahrt gebündelt und (virtuelle) Abhol- oder Absetzpunkte vorgesehen werden. Nachfrage und Angebot werden algorithmusbasiert zusammengeführt. Ebenso automatisiert erfolgen die Bündelung und Preisfestlegung im Rahmen vorgegebener Kriterien. Die Novellierung hat großen Einfluss auf die Zulassung neuer bedarfsorientierter Verkehre, auch als Teil des ÖPNV und hat daher großen Einfluss auf das im Zuge von OSLO zu entwickelnde Betriebs- und Organisationsmodell.

Im Folgenden werden die wichtigsten Teilbereiche der Novelle kurz beleuchtet und ein Resümee zu den Auswirkungen für eine mögliche Projektumsetzung gezogen.

Tabelle 4: Rechtsgrundlagen Bedarfsverkehre im Personenbeförderungsgesetz (PBefG)

PBefG	Erläuterung	Abgrenzung
§ 42: Linienverkehr	Zulassung über § 2 Abs. 6 iVm. § 42 Abs. 1 PBefG als „atypischer Linienverkehr“	Genehmigung als atypischer Linienverkehr. Damit müssen die Mehrheit der Merkmale, fester Linienweg, Haltestellen, Bedienzeiten, Gebiet erfüllt sein
§ 44: Linienbedarfsverkehr	Linienverkehr gemäß § 42, der öffentlicher Personennahverkehr gemäß § 8 Absatz 1. Jedoch Möglichkeit der vorherigen Bestellung und die Beförderung ohne festen Linienweg zwischen bestimmten Einstiegs- und Ausstiegspunkten innerhalb eines festgelegten Gebietes und festgelegter Bedienzeiten (Linienbedarfsverkehr).	PBefG-Novelle zur rechtlichen Grundlage für On-Demand-Pooling-Verkehre, die als Ergänzung des ÖPNV durch öffentliche Aufgabenträger betrieben werden. Abgrenzung zu § 50 ist der Fokus auf ÖPNV und damit ein Betrieb in Zuschussfinanzierung
§ 50: gebündelter Bedarfsverkehr	Gebündelter Bedarfsverkehr bezeichnet den Transport von Personen mittels Personenkraftwagen, bei dem mehrere Fahraufträge entlang ähnlicher Routen zusammengefasst werden. Der Unternehmer ist ausschließlich dazu berechtigt, die Aufträge auf vorherige Bestellung hin, auszuführen.	PBefG-Novelle zur rechtlichen Grundlage für On-Demand-Pooling-Verkehre, die von wirtschaftlichen Akteuren betrieben werden. Abgrenzung zu § 44 ist der Fokus nicht dem ÖPNV-zugehörige Unternehmer.

Quelle: Stallmann 2022

Auf die vorgestellten Ergebnisse aufbauend wird für eine Umsetzung des OSLO Betriebskonzepts eine Genehmigung als Linienbedarfsverkehr auf der Rechtsgrundlage des § 44 PBefG empfohlen. Jedoch birgt die gewählte Umsetzung des Linienbedarfsverkehrs als eine Form des Linienverkehrs mit Kraftfahrzeugen im Rahmen der PBefG-Novelle bestimmte rechtliche Risiken. Die Unterscheidung zwischen Linienbedarfsverkehr und gebündeltem Bedarfsverkehr, insbesondere im Hinblick auf die Integration in den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV), wurde zwar beabsichtigt, aber nicht explizit auf der Ebene der rechtlichen Bestimmungen festgelegt. Dies könnte unerwünschte rechtliche Auswirkungen auf die Genehmigung von gebündelten Bedarfsverkehren haben. Sollten diese Risiken jedoch eintreten, könnte der Gesetzgeber schnell reagieren, um ihnen entgegenzuwirken [St22]. Im Folgenden sind die Anforderungen für eine Anwendung des § 44 zusammenfassend dargestellt.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



Abbildung 11: Anforderungen zur Zuordnung § 44 als Linienverkehr des ÖPNV



Quelle: Stallmann 2022

Mit der Einführung des neuen § 44 PBefG wurde eine rechtliche Grundlage für ÖPNV-integrierte ODVe geschaffen. Gemäß § 44 Satz 1 PBefG gilt als Linienverkehr (§ 42), der öffentlicher Personennahverkehr gemäß § 8 Absatz 1 ist, auch der Verkehr, der auf vorherige Bestellung ohne festen Linienweg zwischen bestimmten Einstiegs- und Ausstiegspunkten innerhalb eines festgelegten Gebiets und zu festgelegten Bedienzeiten stattfindet (Linienbedarfsverkehr).

Gemäß den Sätzen 2 und 3 des § 44 PBefG dürfen nur vom Aufgabenträger festgelegte Beförderungsentgelte und -bedingungen angewendet werden, wobei Zuschläge erhoben werden dürfen. Die ursprünglich vorgesehene Beschränkung auf "pauschale" Zuschläge wurde in der endgültigen Fassung aufgrund erfolgreicher Intervention der Verbände fallen gelassen.

Die Einordnung des Linienbedarfsverkehrs als Linienverkehr (vgl. Abbildung 11) hat zur Folge, dass alle gesetzlichen Regelungen, die auf den Linienverkehr anwendbar sind, auch hier gelten. Dies betrifft Genehmigungsvoraussetzungen, -verfahren und -folgen (Betriebspflicht, Beförderungspflicht). Der ermäßigte Umsatzsteuersatz von derzeit 7 % findet Anwendung auf Fahrausweise. Die unentgeltliche Beförderung schwerbehinderter Menschen und die entsprechenden Ausgleichsregelungen gelten auch im Linienbedarfsverkehr. Auch die Finanzierungsregeln des Bundes (§ 45a PBefG, soweit im Land noch angewendet) und der Länder, die sich auf den Linienverkehr beziehen, beziehen automatisch den Linienbedarfsverkehr mit ein.

Durch die Einordnung als ÖPNV gelten auch die Bestimmungen zum Nahverkehrsplan und zur Zielsetzung der vollständigen Barrierefreiheit [St22].

3.2 Technisch

3.2.1 Softwarearchitektur

Die Analyse ergab vier wesentliche, notwendige Erweiterungen zur Umsetzung von ODV auf der Basis von bbnavi:

- 1) Die Nutzung von GTFS-Flex-V2 für die Nahe-Echtzeit-Generierung dynamischer Fahrpläne,
- 2) die Integration des angepassten Routing-Algorithmus (BTU) in die OTP-Architektur,
- 3) die Entwicklung einer Schnittstelle für die Anbindung von Buchungssystemen und
- 4) die Anbindung von bbnavi über eine Schnittstelle mit der Fahr-App.

Grundlage dafür sind die vorhandenen Open-Source-Komponenten (vgl. Tabelle 5).

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



Liste der eingesetzten Komponenten

Tabelle 5: Liste eingesetzter Open-Source-Komponenten

Komponente	Version	Lizenz
digitransit-ui https://digitransit.fi/en/developers/services/5-digitransit-ui/	V 3	EUPL v1.2 and AGPL v3
GTFS Flex https://github.com/bbnavi/gtfs-flex	V 2	Creative Commons Zero v1.0 Universal
OpenTripPlanner https://docs.opentripplanner.org/en/v2.3.0/	V 2.3.0	Apache 2.0

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

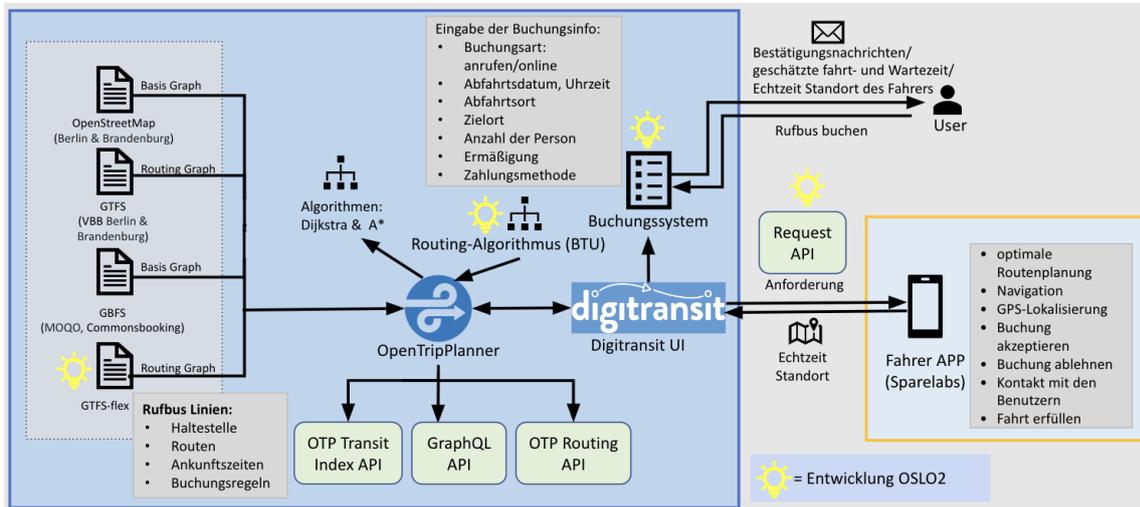


Ein Verbund aus



Das bedeutet, dass eine Erweiterung der bestehenden Software-Projekte für die Umsetzung des geschilderten ODV grundsätzlich möglich ist. Zentral ist die Nutzung von GTFS-Flex-V2 für die dynamische Generierung von Datendateien. In Abbildung 12 wird die Software-Architektur dargestellt, bei der die vier wesentlichen Erweiterungen gelb (Glühbirne) markiert sind. Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

Abbildung 12: Darstellung der Software-Architektur

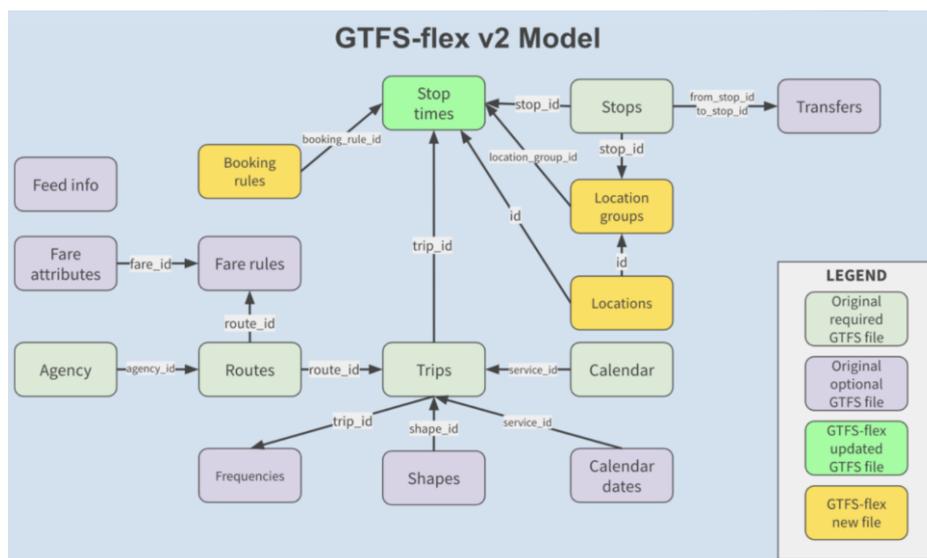


Quelle: Eigene Darstellung

Datenquellen

OTP greift auf verschiedene Datenquellen zu, wie zum Beispiel *General Transit Feed Specification (GTFS)* Daten, die den Fahrplan- und Routeninformationen der Verkehrsbetriebe in Berlin und Brandenburg entsprechen. Weitere Datenquellen sind OpenStreetMap (Berlin-Brandenburg) für Straßennetze und Echtzeitdaten über die Standorte von mehreren hundert Fahrradvermietungen in Berlin und Brandenburg (GBFS). Darüber hinaus gibt es GTFS-Flex-Daten, die den Routeninformationen der Rufbus-Linien entsprechen. Da GTFS-Flex eine Erweiterung des GTFS-Formats ist, enthalten GTFS-Flex-Daten in der Regel die gleichen Grundelemente wie GTFS-Daten (Agentur, Haltestellen, Routen usw.), aber auch zusätzliche Informationen, die speziell für die Darstellung von flexiblen Verkehrsdiensten relevant sind, z. B. Buchungsregeln, wie in Abbildung 13.

Abbildung 13: Darstellung des GTFS-Flex v2 Modells



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an "MobilityData/Gtfs-Flex." 2016. Reprint, MobilityData IO.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



Die neueste Version, GTFS-Flex v2, besteht aus zwei Erweiterungen, die darauf abzielen, die Vielfalt der nachfrageabhängigen Dienste zu modellieren, die nicht immer denselben festen Haltestellen folgen. Die folgenden beiden Erweiterungen tragen diesem Bedarf Rechnung:

- **GTFS-FlexibleTrip:** Flexible Dienste, die nach einem bestimmten Fahrplan verkehren, aber auf die Nachfrage einzelner Fahrgäste reagieren.
- **GTFS-BookingRules:** Buchungsinformationen für von Fahrgästen angeforderte Dienste, die GTFS-FlexibleTrips verwenden, z. B., wie weit im Voraus die Buchung erfolgen soll oder welche Telefonnummer für Nachfragen oder Buchungen angerufen werden kann.

Mit der Generierung von Dateien innerhalb dieser Spezifikation ist es möglich, einen mit der bestehenden Architektur kompatiblen Transit Feed für On-Demand-Verkehre zu erzeugen.

OpenTripPlanner

OpenTripPlanner (OTP) bietet verschiedene APIs und Endpunkte, die es Entwicklern ermöglichen auf verschiedene Funktionalitäten im Zusammenhang mit dem öffentlichen Nahverkehr und der multimodalen Reiseplanung zuzugreifen. Die OTP-Transit-Index-API liefert Informationen, die aus den GTFS-Feeds abgeleitet wurden. OTP erstellt einen transitiven Graphen aus den Datenquellen, um die öffentlichen Verkehrsrouten berechnen zu können. Dieser Graph enthält Informationen über Haltestellen, Routen, Fahrpläne, Umsteigeverbindungen usw. Die GraphQL API ermöglicht den Zugriff auf den zugrundeliegenden Verkehrsnetzgraph, den OTP für die Routenberechnung verwendet. Die Berechnung des Graphen ermöglicht effiziente Routenplanungen. OTP verwendet Algorithmen wie Dijkstra oder A* für die Berechnung der besten Routen unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren wie Entfernung, Reisezeit, Umstiege, Fußwege usw. Der günstigste Routing-Algorithmus (vgl. AP 6) muss in die Routing-Komponente (OTP-Routing-API) integriert werden, um die besten Routen für kommunal betriebene On-Demand-Verkehre (ODV) zu ermitteln. Die Routing-API bietet eine Möglichkeit zur Planung von Routen und zur Abfrage von Informationen über Haltestellen und Fahrpläne im öffentlichen Nahverkehr mit GraphQL. Über diese Komponente können also auch Zusatzinformationen eingespeist werden, die für das Routing relevant sind.

Digitransit UI

Digitransit-ui ist eine mobilfreundliche Benutzungsoberfläche. Digitransit UI ermöglicht den Nutzer:innen die Eingabe von Start- und Zielorten sowie Reisepräferenzen. Es verarbeitet Eingaben (Mobilitätsanfragen) und sendet entsprechende Anfragen an OTP, um die Routenplanung anzustoßen und mögliche Verbindungen als Reiseplanungsdaten abzurufen.

Buchungssystem

Für den Betrieb von On-Demand-Verkehr ist es notwendig, ein Buchungssystem zu entwickeln, an das der Fahrtwunsch weitergegeben werden kann. Die Nutzer:innen können den Rufbus telefonisch oder online buchen und die Buchungsinformationen (Zeit, Abfahrtsort, Zielort usw.) eingeben. Die Unterstützung diverser Zahlungsmöglichkeiten ist ebenfalls erforderlich. Wenn Nutzer:innen eine Zahlungsmethode auswählen, werden sie auf die entsprechende Zahlungsseite weitergeleitet. Darüber hinaus sollten die Buchungsinformationen rechtzeitig bearbeitet und durch die Request-API an die Fahr-App übermittelt werden.

Fahr-App

Für den Betrieb von On-Demand-Verkehr ist es notwendig, dass Fahrzeuge zu jeder Zeit neue Routen-Informationen erhalten und die Route bedarfsgerecht verändert werden kann. Navigationsanwendungen für mobile Endgeräte sind in der Praxis etabliert und es existiert die Erwartungshaltung von Echtzeit-Geo-Informationen in allen Anwendungen. Daneben ist auch für die Routenplanung ein genauer Standort der Fahrzeuge unerlässlich. Die Standorte im Netzgraph sollten annähernd in Echtzeit und möglichst feingranular, also auf Knotenebene des Straßennetzes, zur Verfügung stehen, um eine praxistaugliche Routenplanung in angemessener Zeit zu ermöglichen. Die Datenbeschaffung dafür kann über separate GPS-Sensoren innerhalb der Fahrzeuge oder über eine Schnittstelle der Fahr-App realisiert werden. Dabei wird die übliche GPS-Lokalisierung der mobilen Endgeräte genutzt. Bei der Realisierung über die Fahr-App müssen diese Koordinaten

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



jedoch explizit an bnavi zurückgegeben werden, um für die Routenplanung genutzt werden zu können. Für Fahrer:innen ist darüber hinaus eine Funktion zur Bearbeitung von Mobilitätsanfragen notwendig. Nach Erhalt der Buchungsinformation, kann die Buchung angenommen oder aufgrund unvermeidbarer Faktoren abgelehnt werden. Damit ist eine direkte, digitale Rückmeldung an die Nutzer:innen innerhalb der verschiedenen Apps möglich. Auch voraussichtliche Wartezeiten und sonstige Veränderungen können so kurzfristig strukturiert kommuniziert werden.

Die Analyse der Anforderungen hat ergeben, dass von der Realisierung einer eigenen mobilen Fahr-App abzusehen ist. Die Erwartungen von Nutzer:innen in Bezug auf Komfort (Geschwindigkeit, Sprachausgabe), Visualisierung (2D/3D, Karten, Verkehrsdichte), Funktionsumfang (Offline-Modus, Stauumfahrung) sind zu hoch für eine eigene Entwicklung im Rahmen eines Umsetzungsprojekts. Es wird daher empfohlen, mit Dritten zusammenzuarbeiten, um diese Funktionalität zufriedenstellend umzusetzen. Im Projekt hat sich der Partner "SpareLabs" offen für eine Zusammenarbeit gezeigt, weshalb für Folgeprojekte eine Kooperation angestrebt wird. Auf technischer Ebene muss hier lediglich eine offene Referenzimplementierung einer Schnittstelle entwickelt werden, sodass auch verschiedene Dienstleister diese Lücke füllen und ggf. mit eigenen Mehrwertdiensten für die Fahr-Dienstleister, z. B. die Integration mit offenen oder proprietären Software-Lösungen für Fuhrparkverwaltung oder Vermietung, anreichern können.

Nicht-funktionale Anforderung

Aus der Architektur-Analyse und den abgeleiteten Anforderungen von Nutzer:innen und Fahr-Dienstleistern ergeben sich mehrere nicht-funktionale Anforderungen:

- **Leistungsfähigkeit:** Durch die zusätzlichen Routenoptionen des neuen Verkehrsmodus "Rufbus" und der Einbeziehung von Echtzeitdaten ist von erhöhter Komplexität in der Berechnung möglicher Routen auszugehen. Daher ist darauf zu achten, dass entsprechende Geschwindigkeitstests durchgeführt werden, um wesentliche Abweichungen von den üblichen Latenzen für die Routenplanung (aktuell ca. 450 Millisekunden) zu ermitteln und ggf. mit dem vermehrten Einsatz von Heuristiken gegenzusteuern.
- **Sicherheit und Datenschutz:** Personenbezogene Daten wie beispielsweise Buchungsinformationen werden außerhalb des Systems verarbeitet und werden gemäß den geltenden Datenschutzbestimmungen sicher behandelt.
- **Kompatibilität:** Die Benutzungsoberflächen müssen auf verschiedenen Betriebssystemen und Geräten (z. B. Windows, macOS, Android, iOS) ordnungsgemäß funktionieren.
- **Benutzungsfreundlichkeit:** Die Benutzungsoberfläche (Routenplanung mit Rufbus/Buchungssystem) sollte intuitiv und leicht verständlich sein, um die Einarbeitungszeit für neue Benutzer:innen und fehlerhafte Eingaben zu reduzieren.
- **Wartbarkeit:** Der Code muss gut strukturiert und dokumentiert sein, um eine einfache Wartung und Erweiterung des Systems zu ermöglichen.
- **Skalierbarkeit:** Das System sollte in der Lage sein, die aktuelle und die zu erwartende gestiegene Last durch den ODV zu bewältigen und muss bei Bedarf erweitert werden können. Das trifft insbesondere auf den Routing-Algorithmus und die Generierung des GTFS-Feeds zu.
- **Zuverlässigkeit:** Das System sollte eine Verfügbarkeit von mindestens 99,9 % aufweisen.

Aus der Analyse der Architektur, dem Open-Source-Entwicklungsstand und den erfassten Anforderungen in Workshops haben sich zahlreiche funktionale und nicht-funktionale Anforderungen ergeben, die hier wiedergegeben wurden. Insgesamt lässt sich festhalten, dass sich die Implementierung dieser Anforderungen im Rahmen eines Umsetzungsprojekts grundsätzlich als möglich und realistisch darstellt.

3.2.2 Routing-Algorithmen

Die nachfolgenden Ausführungen wurden im Wesentlichen als wissenschaftlicher Beitrag beim "MOC 2023 - 15. Workshop {KI-basiertes} Management und Optimierung komplexer Systeme" eingereicht und akzeptiert. Die Präsentation der Arbeit erfolgte am 29. September 2023 auf dem Workshop als Teil der Jahrestagung Informatik 2023 der Gesellschaft für Informatik (<https://informatik2023.gi.de/>). Zusätzlich zu dem hier aufgeführten theoretischen Vorgehen wurde mittlerweile auch damit begonnen, diese exemplarisch für kleine Einsatzbereiche (einzelne Bereiche von Spremberg) und eine Teilmenge der Anforderungen an ein solches System prototypisch zu implementieren.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



Straßen- und Verkehrsnetze, wie die der Stadt Spremberg und Umgebung, können durch gewichtete Graphen repräsentiert werden. Ein gewichteter Graph $G = (V, E)$ besteht aus einer Menge V von Knoten (engl. vertices) und einer Menge $E \in V \times V$ von Kanten (engl. edges) sowie einer Gewichtsfunktion $d : E \rightarrow \mathbb{R}$, die die Kanten mit Gewichten oder Kosten bewertet. Für die Problemdomäne "Routing-Algorithmen" in unserem Projekt sind zwei wesentliche mathematische Problemstellungen relevant: A) die Berechnung kürzester Pfade (engl. shortest-path) und B) die Tourenplanung. Zunächst werden beide eingeordnet und dann wird die algorithmische Behandlung beider Problemstellungen in den darauffolgenden Unterabschnitten detailliert. Am Ende des Abschnitts werden C) Kombinationsmöglichkeiten betrachtet.

Ein *Shortest Path-Algorithmus* findet den kürzesten Weg zwischen einem Start ($s \in V$) und einem Zielknoten ($z \in V$) in einem gewichteten Graphen. Mit Hilfe eines solchen Algorithmus kann sowohl für den privaten Straßenverkehr als auch für den ÖPNV ein kürzester Weg ermittelt werden. Für den Straßenverkehr sind die Knoten Kreuzungen, Haltepunkte und Orte, die durch Straßen (Kanten) miteinander verbunden sind. Die Gewichtsfunktion ordnet dabei jeder Straße eine geschätzte Fahrtdauer zu. Analog kann für den ÖPNV ein Graph verwendet werden, bei dem die Busstationen und Bahnhöfe die Knoten darstellen und die Schienen bzw. Buslinien durch Kanten repräsentiert werden.

Bei einem On-Demand-Service soll ein Fahrzeug oder eine Flotte von Fahrzeugen dazu genutzt werden, die Transportwünsche möglichst vieler Teilnehmer zu erfüllen und dabei die geringsten Kosten verursachen. Die beschriebene Problemstellung wird in der Literatur als *Tourenplanung* (englisch Vehicle Routing Problem, VRP) bezeichnet. Ziel ist dabei die Gruppierung und optimale Aneinanderreihung verschiedener Transportaufträge [TV02]. Aus den Gegebenheiten in Spremberg leiten sich weitere Einordnungen des Problems in Unterklassen des VRP [Zh22] ab. So handelt es sich um ein Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP), d.h. es müssen die verschiedenen Kapazitäten der Fahrzeuge (Auto, Kleinbus, Bus) berücksichtigt werden. Es genügt auch nicht, die Transporte einfach nur durchzuführen, sondern dies muss auch innerhalb zulässiger Zeitfenster geschehen (Vehicle Routing Problem with Time Window, VRPTW). Diese Zeitfenster steuern auf der einen Seite, dass die Fahrgäste ihren Anschlusszug rechtzeitig erreichen können und auf der anderen Seite, dass die Gesamtdauer des Transports für den jeweiligen Gast nicht zu groß wird (denn dann könnte auch der bisherige ÖPNV genutzt werden). Um eine kurzfristige Buchung des On-Demand-Services zu ermöglichen, müssen im späteren Verlauf dynamisch weitere Fahrgäste und Transporte zu bestehenden Routen hinzugefügt werden können (Dynamic Vehicle Routing Problem, DVRP).

Für die Unterstützung des bestehenden ÖPNV mittels eines On-Demand-Services ist es nicht nur notwendig, geeignete einzelne Verfahren zum Finden kürzester Wege und optimierte Routen zu finden, sondern auch diese geeignet zu kombinieren. So besteht zum Beispiel die Möglichkeit von Spremberg nach Bautzen mittels Bussen (Linie 800 und 500) oder Zügen (RB 65 und RB 60) zu gelangen. Dem Fahrgast ist dabei die Art der Verbindung egal, was bedeutet, dass er entweder zu einer der Bushaltestellen oder zum Bahnhof gebracht werden muss, ehe er mit dem ÖPNV weiterfahren kann. Die Tourenplanung (im Folgenden auch "Routing") soll dabei gewährleisten, dass der Fahrgast so schnell wie möglich und rechtzeitig zu einem der Haltepunkte gebracht wird, wohingegen ein Shortest-Path-Algorithmus zunächst die infrage kommenden Haltepunkte ermitteln muss.

Im Folgenden wird nun auf die beiden Teilproblemstellungen "Shortest Path-Algorithmen" und "Vehicle Routing" eingegangen.

A) Shortest-Path-Algorithmen

Das Shortest Path-Problem ist ein sehr gut erforschtes und in verschiedene Unterkategorien differenzierbares Problem. In [Ma17] sind diverse Unterkategorien des Shortest Path-Problems aufgeführt. Die Problemstellung des statischen Ermitteln der schnellsten Bus- oder Bahnverbindung fällt in die Kategorie (static) Single Source Shortest Path (SSSP). In diesem Abschnitt werden verschiedene Shortest-Path-Algorithmen zur Lösung des SSSP-Problems vorgestellt und miteinander verglichen.

Der Dijkstra-Algorithmus

Der Dijkstra-Algorithmus [Co01] ist ein bekannter Algorithmus zur Berechnung des kürzesten Pfades in einem gewichteten Graphen mit nicht-negativen Kantengewichten. Der Algorithmus arbeitet inkrementell und wählt iterativ den Knoten mit dem geringsten Abstand vom Startknoten aus. Wurde der Knoten mit dem geringsten Abstand ausgewählt, so werden die Abstände aller Knoten, die noch nicht besucht wurden und mit dem aktuellen Knoten verbunden sind, angepasst und der aktuelle Knoten als besucht markiert. Der Abstand eines

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



markierten Knotens kann sich nicht mehr verringern und ist somit der kürzeste Abstand vom Startknoten zu diesem Knoten. Wird der Abstand zu einem bestimmten Knoten gesucht, so bricht der Algorithmus ab, sobald der gewünschte Knoten besucht wurde.

Der Dijkstra-Algorithmus ist exakt und hat eine Zeitkomplexität von $O(n^2)$, wobei n die Anzahl der Knoten ist. Ein Vorteil des Algorithmus ist, dass er nicht alle Kanten untersuchen muss. Dies ist besonders nützlich, wenn die Gewichte an einigen Kanten teuer sind. Ein Nachteil besteht darin, dass der Algorithmus nur mit nicht-negativ gewichteten Kanten umgehen kann und er nur für statische Graphen anwendbar ist. Fredman und Willard [FW90; FW93; FW94] konnten eine Erweiterung des Dijkstra-Algorithmus unter Verwendung von AF-Heaps (allocation free Heaps) entwickeln, die lediglich einen Aufwand von $O(m + n \cdot \log(n)/\log(\log(n)))$ hat.

Der A*-Algorithmus

Der A*-Algorithmus [HNR68] ist eine Verallgemeinerung des Dijkstra-Algorithmus, der diesen um eine Kostenschätzfunktion erweitert. Eine gute Kostenschätzfunktion kann die Menge der Knoten, die untersucht werden müssen, bevor die Lösung gefunden wird und somit den Suchraum, signifikant verkleinern. Es wird dabei in jedem Schritt der Knoten als nächster ausgewählt, dessen geschätzte Kosten zum Zielknoten zusammen mit den bisherigen Kosten am geringsten sind. Wenn die verwendete Kostenschätzfunktion die tatsächlichen Kosten nie überschätzt, so ist der A*-Algorithmus optimal, das heißt, er findet immer eine Lösung mit niedrigsten Kosten.

Der Arcflag-Algorithmus

Der Arcflag-Algorithmus [Hi06] ist eine zielgerichtete Beschleunigungstechnik für den Dijkstra-Algorithmus zur Suche des kürzesten Pfades zwischen zwei Knoten in einem gewichteten Graphen. Die Grundidee besteht darin, die Menge der zu betrachtenden Kanten geschickt auf einen Bruchteil im Vergleich derer zu verringern, welche bei Ausführung des Dijkstra-Algorithmus betrachtet werden müssten. Dabei wird zunächst jede Kante des Graphen um Flaggeninformationen angereichert, welche schließlich bei der Pfadsuche entscheiden, ob diese Kante für die Suche in Betracht gezogen werden muss. Die Vorberechnungsphase des Arcflags-Algorithmus verläuft in zwei Schritten. Zuerst wird das Straßennetz in Regionen eingeteilt. Anschließend wird für jede Region bestimmt, über welche Kanten kürzeste Wege in diese Region führen. Die Information, ob eine Kante Teil eines kürzesten Pfades ist, wird Arcflag genannt.

In der Anfragephase bestimmt der Algorithmus zunächst die Region des Zielknotens. Anschließend wendet er den Dijkstra-Algorithmus an, folgt dabei aber nur den Kanten, die laut Zusatzinformationen in die Zielregion führen. Er lässt also gezielt Kanten aus, die nichts mit der Zielanfrage zu tun haben. Die Komplexität des Dijkstra-Algorithmus kann durch das Verwenden von Arcflags nicht reduziert werden, nichtsdestotrotz verringert sich in der Praxis der Suchraum durch das Weglassen von Kanten, die keine kürzesten Wege zur Zielregion darstellen, signifikant.

Der ALT-Algorithmus

ALT steht für **A*** Search, **L**andmarks und **T**riangle Inequality, da dies die Hauptbestandteile des Algorithmus sind. Der ALT-Algorithmus verwendet als Kostenschätzfunktion für den A*-Algorithmus, sogenannte Landmarken [GH05]. Landmarken sind eine Teilmenge der Knoten des Graphen, für die die Distanzen aller anderen Knoten zu diesen Landmarken aus der Vorverarbeitungsphase bekannt sind. In der Folge können Entfernungsschätzungen innerhalb des Graphen mittels der Dreiecksungleichung durchgeführt werden. Die Dreiecksungleichung besagt, dass sich für beliebige drei Knoten u, v, l im Graphen der minimale Abstand von u und v kleiner oder gleich dem Abstand von u zu l plus dem Abstand von l zu v sein muss: $d(u, v) \leq d(u, l) + d(l, v)$. Aus dieser Ungleichung lassen sich Grenzen ableiten: Wie in Abbildung 14 dargestellt, ist der Abstand von u nach v kleiner oder gleich $dist(l1, v) + dist(l1, u)$ sowie $dist(u, l2) + dist(v, l2)$ und größer oder gleich $dist(l1, v) - dist(l1, u)$ sowie $dist(u, l2) - dist(v, l2)$. Eine Frage die verbleibt ist: Wie müssen geeignete Orientierungspunkte aus dem Eingabegraphen ausgewählt werden?

Gefördert durch:



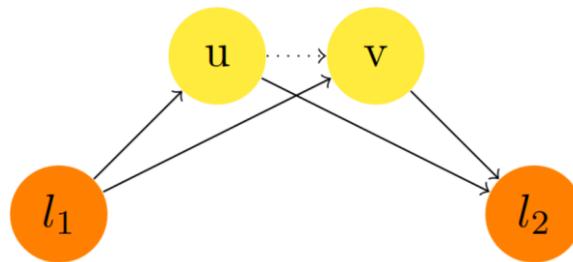
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



Abbildung 14: Visualisierung der Dreiecksungleichung (Triangle Inequality)



Quelle: Eigene Darstellung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Shortest Path-Problem für den statischen ÖPNV mittels Dijkstra-Algorithmus bzw. Weiterentwicklungen davon lösen lässt. Die Eingangsbedingung, dass keine negativen Kantengewichte vorliegen, ist sowohl für das Berechnen kürzester Wege als auch für das Berechnen preisgünstigster Wege erfüllt. Nach einer Studie von [Ba22] ist bereits der Dijkstra-Algorithmus in seiner Grundform in der Lage europaweite SSSP-Anfragen in ca. 6s zu beantworten. Die vorgestellten weiterentwickelten Formen benötigten dafür teilweise sogar nur wenige Millisekunden. Eine Anfrage für ländliche Regionen mit deren abgehenden und eingehenden ÖPNV-Verbindungen sollte somit mit allen vorgestellten Algorithmen realisierbar sein.

B) Vehicle Routing-Algorithmen

Ebenso wie das Shortest Path-Problem, ist auch das Vehicle Routing-Problem prinzipiell zunächst sehr gut erforscht. Es existiert eine Vielzahl an Algorithmen, die das Problem entweder zeitaufwändig und exakt oder aber schnell heuristisch lösen. Abbildung 15 klassifiziert existierende Lösungsverfahren für Vehicle Routing-Probleme nach Korrektheit und heuristischem Vorgehen. An dieser Stelle soll aufgrund der großen Vielfalt an existierenden Algorithmen nur auf je ein vielversprechendes exaktes und ein heuristisches Verfahren eingegangen werden, die verwendet werden können, um das VRP für den On-Demand-Service zu lösen.

Ein Constraint-Ansatz (Branch and bound) - ein exaktes Verfahren

Die Constraint-Programmierung ist ein mächtiges Werkzeug zum Modellieren und Lösen komplexer Probleme [MS98]. Das generelle Vorgehen bei der Constraint-Programmierung unterteilt sich in zwei Teile: 1. die deklarative Modellierung des Problems als Constraint-Modell, 2. das selbstständige Lösen des Constraint-Modells durch einen Constraint-Solver. Der Constraint-Anwender ist dabei nur dafür verantwortlich, das Constraint-Modell zu erzeugen und den Solver zu konfigurieren. Der Solver selbst fungiert als Blackbox und reduziert schrittweise durch Propagation (Branch and Bound) und einer Backtracking-basierten Tiefensuche den Lösungsraum solange bis eine (optimale) Lösung gefunden wurde (falls eine solche existiert).

Für das sich aus unserer Anwendung ergebende VRP inklusive der spezifizierten Subklassen Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) und Vehicle Routing Problem with Time Window (VRPTW) sind in [Zh22] bereits mathematische Beschreibungen angegeben, die sich prinzipiell direkt in Constraints überführen lassen. Einziger, aber wesentlicher und potentiell kritischer Stolperstein, der bei der Verwendung der Constraint-Programmierung, wie bei jedem anderen exakten Verfahren auch, auftreten kann, ist dass das Problem und damit verbunden dessen Suchraum zu groß wird, als dass in akzeptabler Zeit eine gute oder sogar eine optimale Lösung gefunden werden kann. Da hier allerdings Graphen betrachtet werden, die den ländlichen Raum widerspiegeln (und keine Großstädte), sollten deren Ausmaße handhabbar sein. Sollte die Problemstellung wider Erwarten trotzdem zu groß sein, um einen Constraint-Solver anzuwenden, so wird auf ein heuristisches Verfahren umgestellt.

Bisher wurden im Rahmen dieses Projekts mit Hilfe des Constraint Solvers "Google OR Tools" erste kleinere Instanzen mit einer Teilmenge der Anforderungen an die gegebene Problemstellung zufriedenstellend prototypisch gelöst, so dass von einer Umsetzbarkeit der gesamten Tourenplanung mittels eines Constraint Solvers ausgegangen werden kann.

Gefördert durch:

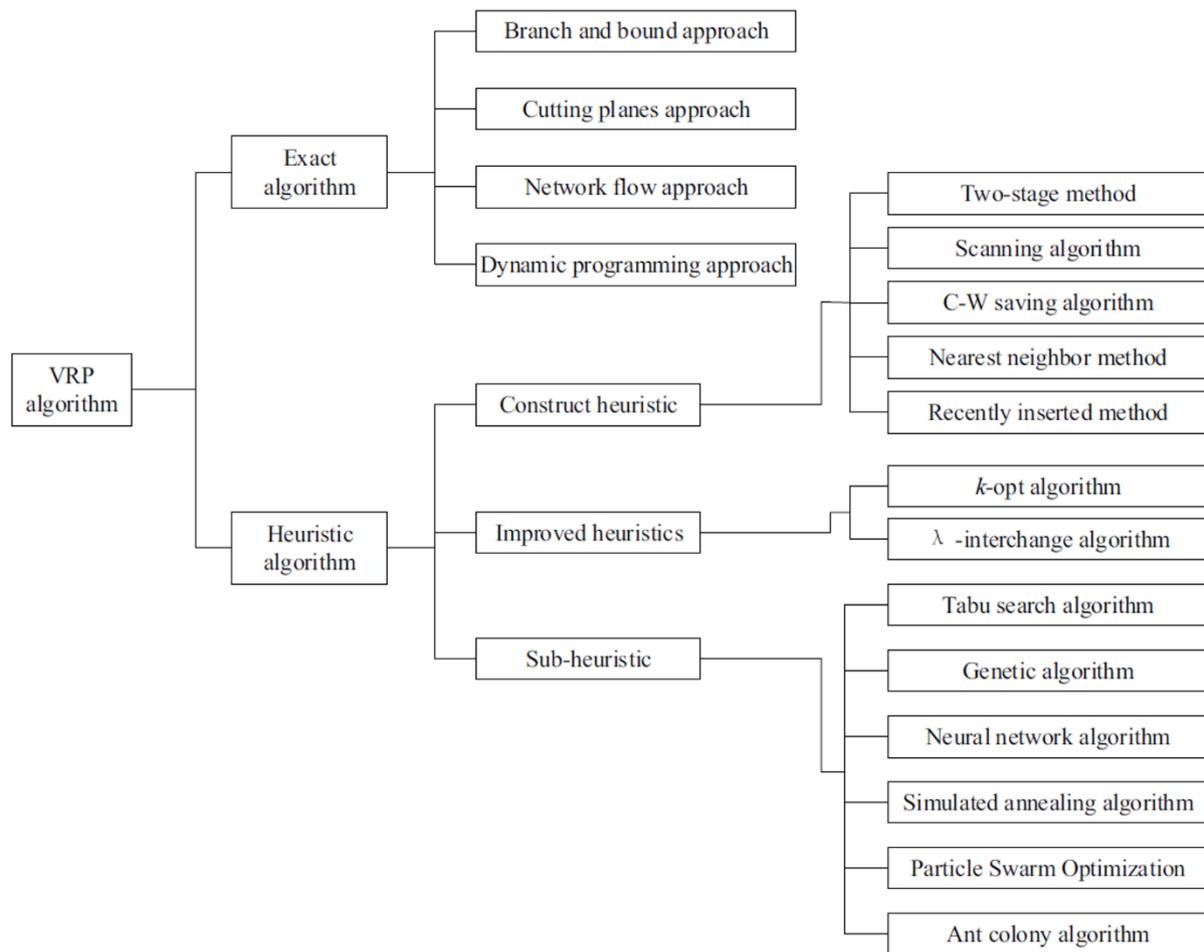
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Startkapital für die Mobilität der Zukunft

Ein Verbund aus



Abbildung 15: Existierende Algorithmen zum Lösen von Vehicle Routing-Problemen



Quelle: Zhang 22

Ein heuristischer Zwei-Phasen-Ansatz (Two-stage method) - ein heuristisches Verfahren

Der Zwei-Phasen-Ansatz probiert in Phase 1 eine initiale Lösung für das Routing-Problem zu finden und in Phase 2 die bestehende Lösung sukzessive zu verbessern [Wa14]. Die erste Phase wird dabei oftmals erneut in zwei Phasen unterteilt. In Phase 1.1 wird dabei zunächst ein Clustering C_1, \dots, C_n der abzufahrenden Knotenpunkte angelegt. In Phase 1.2 wird dann eine initiale Tour innerhalb jedes Clusters von einem Startknoten (Depot) hin über alle Knoten und wieder zum Startknoten zurück angelegt. Mittels verschiedener lokaler Optimierungen wird in Phase 2 dann versucht, die initiale Lösung zu verbessern.

Im Gegensatz zu den exakten Verfahren handelt es sich bei diesem Vorgehen um eine lokale Suche, die ein lokales Optimum findet. Ob das gefundene lokale Optimum nah am globalen Optimum ist oder dieses sogar erreicht, kann nicht garantiert werden. Aufgrund der lokalen Suche kann allerdings i.d.R. schnell eine gute Lösung gefunden werden, so dass sichergestellt werden kann, dass, wenn der Constraint-Ansatz keine Lösung findet, mittels dem beschriebenen heuristischen Verfahren eine zufriedenstellende Lösung gefunden werden kann.

C) Kombinationsmöglichkeiten

Weil der On-Demand-Service als Zubringer für den weiteren ÖPNV dienen soll, müssen die beiden vorgestellten Problemstellungen SSSP und VRP kombiniert werden. Ein Fahrgast möchte zum Beispiel von Spremberg nach Schwarze Pumpe fahren. Ihm ist es dabei egal, ob er mit dem On-Demand-Service direkt von Zuhause zum Zielort gebracht wird oder ob er mit dem On-Demand-Service zu einer der regulären Haltestellen der entsprechenden Verbindung innerhalb von Spremberg gebracht wird und von dort aus mit dem ÖPNV weiterfahren kann. Für

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Startkapital für die Mobilität der Zukunft

Ein Verbund aus



den Fahrgast ist dabei in der Regel nur die benötigte Zeit von Start bis Ziel interessant. Für die Routenberechnung macht es allerdings einen erheblichen Unterschied zu welchem Bahnhof der Passagier gebracht werden muss. Befinden sich mehrere solcher Fahrgäste mit flexiblen Zielen gleichzeitig in einer Tour, so erschwert das die Tourenplanung zusätzlich erheblich. Nachfolgend werden zwei, im Projekt herausgearbeitete, Vorgehen erläutert, mit solchen Alternativen umzugehen.

- Single-SSP-VRP: Es wird zunächst der statische ÖPNV (SSSP) geplant und im Anschluss daran der On-Demand-Service (VRP).
- Alternative-VRP: Das VRP wird um Alternativen in der Routenplanung erweitert. Es ergeben sich somit für jeden Fahrgast verschiedene mögliche Start- und Zielorte und -Zeiten.

Single-SSP-VRP

In diesem Fall würden zunächst die ÖPNV-Verbindungen der einzelnen Fahrgäste ermittelt werden. Diese würden mit den vorgestellten Algorithmen berechnet werden. Dabei würde als Start und Ziel jeweils die für den einzelnen Reisenden passende Haltestelle mit zugehöriger Start- und Ankunftszeit gewählt werden. Dieses Vorgehen würde für alle Reisenden analog erfolgen, so dass alle eine minimale ÖPNV-Reisedauer haben. Im Anschluss daran wird der On-Demand-Service für die zuvor ermittelten Start- und Ankunftsorte und -zeiten ermittelt. Bei diesem Vorgehen handelt es sich um einen greedy-Algorithmus, bei dem versucht wird, die lokalen Optima (die ÖPNV-Verbindungen für die einzelnen Fahrgäste) zu einer Gesamtlösung (durch den On-Demand-Service) zu vereinen. Positiv daran ist, dass das VRP dabei so klein wie möglich gehalten wird und auch die einzelnen ÖPNV-Verbindungen nur einmal für jeden Fahrgast mittels SSSP-Algorithmen gelöst werden müssen. Dieses Vorgehen kann sehr schnell eine erste, gute Lösung ermitteln, allerdings kann nicht sichergestellt werden, dass ein globales Optimum gefunden wird. Denkbar ist z.B., dass durch das Ändern des Zielortes einer oder mehrerer ÖPNV-Anbindungen (Wahl einer früheren oder späteren Haltestelle) die Tourenplanung ggf. deutlich bessere Ergebnisse erlaubt.

Eine Erweiterungsmöglichkeit besteht darin, zunächst alle ÖPNV-Anbindungen, die für die einzelnen Fahrgäste infrage kommen, zu berechnen. Das beinhaltet also nicht nur die Haltestelle, die am nächsten am Start- bzw. Zielort ist, sondern auch die, die sich in einer akzeptablen Umgebung für den On-Demand-Service befinden. Anschließend wird für jeden Fahrgast eine Verbindung ausgewählt und das Routing durchgeführt. Nachfolgend wird eine andere Kombination an Fahrgastverbindungen ausgesucht und dafür ein Routing durchgeführt. Sobald es ersichtlich ist, dass ein VRP keine bessere Lösung finden kann, kann die Berechnung abgebrochen und die nächste Kombination ausprobiert werden. Mit diesem Vorgehen können globale Optima ermittelt werden, allerdings steigt der Rechenaufwand exponentiell an.

Alternative-VRP

Für jeden Fahrgast werden zunächst alle infrage kommenden ÖPNV-Anbindungen ermittelt (SSSP). Anders als zuvor wird das VRP nicht auf einer möglichen Kombination dieser ÖPNV-Anbindungen aufgerufen, sondern um die möglichen Alternativen erweitert. Das VRP muss dann entweder dafür sorgen, dass Fahrgast F_1 rechtzeitig von Ort A zu Ort B oder zu Ort C gebracht wird. Es ergeben sich also Alternativen für die Start- bzw. Zielorte und -zeiten. Bei der Constraint-Programmierung können solche Alternativen durch logische Meta-Constraints (*and*, *or* oder *not*, die jeweils wieder Constraints als Eingaben erhalten) problemlos eingebaut werden. Auch hier wächst das Problem mit zunehmender Anzahl an Alternativen exponentiell, allerdings können durch den branch-and-bound-Ansatz deutlich eher solche ÖPNV-Anbindungen ermittelt und ausgeschlossen werden, die in keiner guten Lösung vorkommen können. Im Vergleich zum zuerst vorgestellten Vorgehen Single-SSP-VRP besteht hierbei die Gefahr, dass das Finden einer ersten Lösung länger dauert. Da wir uns aber im ländlichen Raum mit wenigen Alternativen im ÖPNV befinden, scheint eine Umsetzung mittels Constraint-Programmierung realistisch.

3.3 Organisatorisch

Neben den bereits beschriebenen rechtlichen und technischen Rahmenbedingungen beeinflussen auch besonders organisatorische Rahmenbedingungen eine ODV-Umsetzung. Im Folgenden werden die einflussreichsten organisatorischen Dimensionen vorgestellt und zusammengefasst.

Fahrer*innenmangel

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



Die Umsetzung neuer On-Demand-Pooling-Verkehre bedarf zusätzlicher Fahrer*innen. Dies stellt besonders in einem geplanten Eigenbetrieb eine Herausforderung dar, da im ÖPNV, speziell im Fahrdienst, vielerorts der Fachkräftemangel akut wird. Eine Möglichkeit ist die Beauftragung der Fahrdienstleistung anstelle eines eigenen Betriebs des Angebots. In den meisten Landkreisen bestehen bereits Dienstleister für Fahraufträge, wie beispielsweise Taxi-Unternehmen, Krankentransporte oder Fahrdienstleister aus anderen Segmenten. Dies hat zum Vorteil, dass das mit dem ÖPNV konzessionierte Verkehrsunternehmen weder Personal noch Fahrzeuge für den On-Demand-Pooling-Verkehr vorhalten muss [Mü23]. Welche der beiden Möglichkeiten die wirtschaftlichere Alternative für den Aufgabenträger darstellt, ist bisher noch nicht abschließend geklärt und bedarf weiterer Forschung.

Kosten

Ein neuer Bedarfsverkehr führt im Betrieb zu höheren Kosten im Vergleich zum Fahrplankilometer im klassischen Linienbetrieb. Dies resultiert aus den geringeren Auslastungen im Vergleich zu einem Linienbus. Bei der Gegenüberstellung von bedarfsorientiertem und klassischem Linienverkehr ist es jedoch schwierig, die Kosten im Verhältnis zum Nutzen zu bewerten. Insbesondere bestehen langfristig große Chancen, unrentable Linien durch den neuen bedarfsorientierten Linienverkehr zu ersetzen. Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, besteht auch hier weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der langfristigen Wirtschaftlichkeit [Me23] [Ha23].

Unternehmensgröße

Sowohl beim Eigenbetrieb als auch bei der Beauftragung ergeben sich organisatorische Rahmenbedingungen aus der Größe des verantwortlichen konzessionierten Verkehrsunternehmens. Je größer das Unternehmen ist, desto einfacher und störungsfreier kann der Betrieb durchgeführt werden. So kann ein großes Verkehrsunternehmen mehr Personal und Fahrzeuge für einen bedarfsgesteuerten Betrieb vorhalten. Dies gilt entsprechend auch für die Auftragsvergabe. Ein Verkehrsunternehmen mit einer größeren Flotte kann den Betrieb ausfallfreier und längerfristig übernehmen, während kleinere Unternehmen den Betrieb zwar kostengünstiger, aber schwieriger übernehmen können [Gi21].

Softwareinfrastruktur

Die für die Disposition und Betriebsplanung eingesetzte Softwareinfrastruktur hat einen großen Einfluss auf die Einführung von On-Demand-Pooling-Verkehren. Die Einfachheit der Implementierung von Schnittstellen zwischen der verwendeten ÖPNV-Betriebssoftware und anderen Softwarekomponenten, die für Planung, Disposition, Pooling und Routing eines On-Demand-Pooling-Verkehrs erforderlich sind, hat Einfluss auf die Einführungskosten und die Umsetzbarkeit [Mü23].

Politische Entscheidungsträger

Die monetäre Ausstattung, die politische Agenda, die Nahverkehrspläne und die erteilten ÖPNV-Konzessionen bestimmen maßgeblich die Umsetzung neuer bedarfsorientierter Bedienungsformen. Inwieweit neue Verkehre kooperativ und kohärent zum bestehenden Nahverkehrsplan umgesetzt werden können, bestimmt den möglichen Erfolg eines neuen Angebotes [KI23].

Sozialgesellschaft

Die Realisierbarkeit hängt letztlich von den Zielgruppen des neuen Bedarfsverkehrs ab. Das neue Angebot muss eine breite Unterstützung in der Bevölkerung finden, um das Angebot entlang der Bedürfnisse der Nutzerinnen und Nutzer zu entwickeln. Zunächst muss in der Bevölkerung der Bedarf nach neuen Bedienungsformen vorhanden sein und darüber hinaus die Bereitschaft das Angebot gemeinsam zu entwickeln, um daraus ein passendes Betriebsmodell ableiten zu können [KI23].

4 Betriebsmodell

Das Betriebsmodell umfasst einen konzeptionellen Entwurf zur strukturellen Aufgaben- beziehungsweise Rollenverteilung in einem prototypischen Betrieb eines On-Demand-Pooling-Verkehrs. Es wird insbesondere auf die Open-Source-Routing-Software, die Fahrtenplanungs- beziehungsweise Navigations-Software, Organisation des Fahrpersonals sowie des Fuhrparks, mögliche Tarifmodelle und die Abschätzung des finanziellen Aufwands auf Basis des Anwendungsfalls eingegangen.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



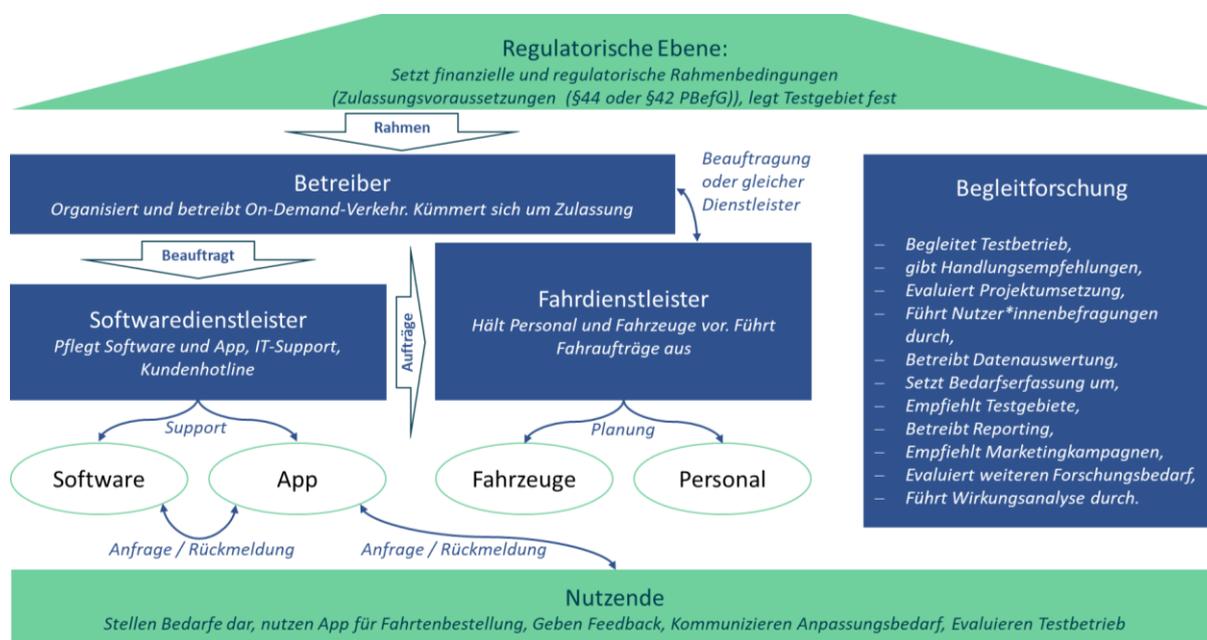
Ein Verbund aus



Generell lassen sich zwei wesentliche Organisationsformen eines bedarfsgesteuerten Verkehrs unterscheiden. Zum einen kann der gesamte Verkehrsbetrieb komplett an ein Unternehmen vergeben werden und somit aus einer Hand kommen. Das bedeutet, dass Software, Buchungsapplikation und Fahrdienst vom gleichen Dienstleister betrieben werden. Zum anderen können getrennte Dienstleister für Plattform, Fahrzeugflotte und Betrieb beauftragt werden.

In der ersten Alternative wird der Gesamtbetrieb durch einen Dienstleister gestellt und ist damit mit einem kleineren Monitoring- und Abspracheaufwand für den ÖPNV-Aufgabenträger verbunden. Falls bereits Vorerfahrungen existieren, wurde das Gesamtkonzept bereits in anderen Kommunen erprobt, wodurch bereits Kompetenzen in der Abschätzung des wirtschaftlichen und organisatorischen Aufwandes existieren. Ist der beauftragte Dienstleister das lokale Verkehrsunternehmen, wird der Betrieb und der Fahrdienst von dieser Institution übernommen und voraussichtlich die Softwaredienstleistung von dieser zusätzlich ausgeschrieben, da eigene Kompetenzen zur Softwareentwicklung vermutlich nicht existieren. Dies würde eine Zwischenstufe der separaten und gesamtheitlichen Beauftragung bedeuten, da zwar nur ein Dienstleister durch den ÖPNV-Aufgabenträger beauftragt wird, jedoch die IT-Dienstleistung im Unterauftrag vergeben wird.

Abbildung 16: Betriebsmodell On-Demand-Verkehr (Testbetrieb)



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Workshop- und Projektergebnisse

Es ist ebenso möglich, alle Dienstleistungen einzeln zu beauftragen. Somit existiert in allen Bereichen (Software, Betrieb und Fahrdienst) die höchste Kompetenz und die Dienstleistungen können auf Basis der Anwendungsfälle für den kommunalen ODV optimiert werden. Dies bedeutet jedoch auch einen höheren Koordinationsaufwand zwischen den Beteiligten für eine optimale Betriebsausgestaltung. Ein Zwischenschritt wäre einen Betreiber zu beauftragen, welcher wiederum den Fahrdienstleister und Plattform- beziehungsweise IT-Dienstleister in den Unterauftrag nimmt [KI23]

Abbildung 16 fasst das Betriebsmodell eines ODVs im Testbetrieb zusammen. Im regulären Betrieb fällt die Begleitforschung weg und der ODV wird mit einem festen finanziellen und organisatorischen Rahmen in den Nahverkehrsplan aufgenommen.

5 Umsetzungskonzept Modellprojekt

Aus den vorherigen Ergebnissen lassen sich verschiedene Rückschlüsse sowohl auf die Konzeption als auch die Ausgestaltung eines möglichen anschließenden Umsetzungsprojektes ziehen. Zum einen wird es als umsetzbar bewertete bbnavi um ein Informations- und Buchungstool für ODVe zu erweitern. Durch die Rücksprache mit

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Das Startkapital für die Mobilität der Zukunft

Ein Verbund aus



verschiedenen Entwicklern konnte auch die Anbindung bereits existierender Fahrer-Navigations-Apps als sinnvoll erarbeitet werden. Des Weiteren ist eine Optimierung des Routingalgorithmus in Zusammenhang mit einem ODV, speziell auch als Zubringer zum existierenden liniengebundenen ÖPNV ein wichtiger Teil eines sich an die Machbarkeitsstudie anschließenden Modellprojektes zu betrachten.

Da die Aufgabenträgerschaft und somit auch die Beauftragung eines ODVs beim Landkreis liegt hat sich im Zuge der Machbarkeitsstudie in Spremberg herausgestellt, dass das Potential zwar erkannt wird eine Umsetzung jedoch gegeben durch Haushaltsverteilungen in anderen Berichten und einem akuten Zeitmangel ein Modellprojekt vorerst nicht als sinnvoll betrachtet wird. Eine zukünftige Zusammenarbeit wurde jedoch verabredet. Aus dem vertieften Austausch im Land Brandenburg, durch die OSLO-Workshops und -Interviews konnte jedoch der bereits in Betrieb genommene ODV, DALLI- dein Brandebus, im Landkreis Oder-Spree für ein Modellprojekt gewonnen werden. Die Projektskizze, OSLO2, wurde erarbeitet und eingereicht.

Ziel des geplanten Modellprojektes ist es, Routing und Echtzeitlokalisierung für den DALLI-Verkehr auf der Open-Source-Mobilitätsplattform bnavi zu entwickeln und modellhaft umzusetzen. Zur Verbesserung der Planbarkeit und Sicherstellung der Übertragbarkeit von Open-Source-basierten ODV wird im Austausch mit vier Regionen eine szenarienbasierte Kosten-Nutzen-Analyse erarbeitet und ein Leitfaden erstellt. Neben dem Landkreis Oder-Spree als Umsetzungspartner, beteiligen sich auch Teltow-Fläming als Datenlieferant aus 13 Jahren Erfahrung im Rufbussystem, sowie Barnim und Spremberg als interessierte zukünftige Umsetzungsregionen am Vorhaben.

Wie die vorliegende Machbarkeitsstudie zeigt, sind On-Demand-Verkehre in ländlichen Räumen eine bedarfsorientierte Ergänzung des ÖPNV. Voraussetzung für hohe Nutzungs- und Poolingquoten sind Umstiegsmöglichkeiten in den ÖPNV und dafür optimiertes Routing. Doch geschlossene Schnittstellen proprietärer Plattformen verhindern diese Integration. Für Nutzende leidet die Angebotsqualität, Betreiber zahlen hohe Lizenzgebühren, ohne Bedarfsdaten zu erhalten (Drittanbieter-Data-Governance), was zu einem ineffizienten Betrieb und hohen Kosten führt.

Zur Schaffung einer lizenzfrei verfügbaren Alternative soll im Modellprojekt bnavi um eine ODV-Routen- und Tourenplanung erweitert und Schnittstellen zu einer Navigations-App entwickelt werden. Der ODV-Rollout im Landkreis Oder-Spree soll als Reallabor begleitet und modellhaft in bnavi integriert werden. Geplant ist die Veröffentlichung der Buchungsdaten als Open Data sowie Kosten und Nutzen anhand der Betriebsdaten von den vier partizipierenden Regionen zu evaluieren und in einem Leitfaden für andere Regionen aufzubereiten.

Das Umsetzungsprojekt gliedert sich in mehrere Arbeitspakete. Geplant ist die Erweiterung der Softwarearchitektur um eine ODV-Steuerung sowie die Einbindung des DALLI ODVs in bnavi samt Datenauswertung (AP2). Hierzu wird ein Routing-Algorithmus entwickelt und integriert (AP3). Der Rollout und eine Nutzerbefragung in Oder-Spree (AP4/5) sowie die Betriebsdaten der Partnerregionen sind die Basis für eine szenarienbasierte Kosten-Nutzen-Analyse. Darauf aufbauend werden Handlungsempfehlungen und Übertragbarkeitskriterien für weitere Regionen abgeleitet (AP6/7).

Nach Projektabschluss soll ein bnavi-Zusatzmodul für die Buchung von On-Demand-Verkehren existieren. Die Integration des DALLI-ODV in bnavi und dessen Gebietsausweitung in LOS ist dann abgeschlossen. Die Unabhängigkeit von proprietärer Software erleichtert kommunalen Akteuren den Zugang zu Mobilitätsdaten und nutzerzentrierte Anpassungen. Tragfähige Einföhrungsszenarien für ländliche ODV auf Basis der Vergleichsdaten der assoziierten Partner sind in einem Leitfaden für andere Regionen zusammengefasst.

Zur Möglichkeit der Umsetzung des beschriebenen Modellprojektes bedarf es einer Förderung, da die Weiterentwicklung einer Open-Source-Plattform zur vereinfachten Integration ländlicher ODV eigenwirtschaftlich nicht umsetzbar ist.

5.1 Betriebsstruktur

Für einen funktionierenden Betrieb eines On-Demand-Pooling-Verkehrs bedarf es des Zusammenspiels der einzelnen Teilbereiche, welche durch verschiedene Stakeholder abgedeckt werden können. Es ist möglich, dass diverse Teilbereiche durch den gleichen Stakeholder bedient werden können. Dies entscheidet sich nach den organisatorischen Strukturen vor Ort, wie auch der geplanten Ausgestaltung. Der Betrieb lässt sich in folgende Teilbereiche gliedern.

Regulatorische Ebene

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



Die regulative Ebene stellt zusammenfassend die politischen Entscheidungsträger dar. Im Bereich des ÖPNV ist dies ein Zusammenspiel zwischen dem Landkreis, insbesondere dem ÖPNV-Aufgabenträger, in Spree-Neiße der Stabsstelle ÖPNV, den gesetzlichen Rahmenbedingungen, wie im vorherigen Kapitel angesprochen, insbesondere der Novellierung des PBefG, den Stadtverwaltungen der Kommunen, in denen der Testbetrieb stattfinden soll, sowie politischen Gremien und Verbänden. Weitere wichtige ordnungspolitische Akteure sind das Landesamt für Bauen und Verkehr (LBV) zur Umsetzung notwendiger genehmigungspflichtiger Änderungen sowie der überregionale Verkehrsverbund, am Beispiel Spremberg der Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg (VBB).

Je nachdem, ob die konzessionierte lokal ansässige Verkehrsgesellschaft als Organisator des Betriebs oder als Kooperationspartner fungiert, ist auch diese als regulatorischer Stakeholder zu sehen. Dies hängt davon ab, ob das neue Angebot von einer anderen Institution, also parallel zum regulären ÖPNV-Betrieb oder von der Verkehrsgesellschaft betrieben wird. Denn der neue Service muss passgenau in das bestehende ÖPNV-Angebot eingegliedert werden, weshalb im zweiten Fall die beschlossenen Fahrpläne, Linien und Betriebsstrukturen als regulatorische Rahmen für das neue Angebot gelten.

Betreiber

Die betreibende Institution des neuen Angebots organisiert den gesamten Betrieb von der Planung bis zur Durchführung. Im Falle einer Beauftragung der Fahrleistung, im Gegensatz zu einem Eigenbetrieb, organisiert der Betreiber alle auszuführenden Prozesse. Spezifisch ist dies die Fahrauftragsplanung, der Kundenservice, die Beauftragung der Fahrdienstleistung, die Beschaffung und Einrichtung der nötigen Software und das gesamte Projektmanagement sowie die Öffentlichkeitsarbeit. Der Betreiber ist somit der Organisator des Betriebs. Im Falle eines Eigenbetriebs kommen noch die Aufgaben der Personalplanung, Fahrzeugbeschaffung, inklusive Wartung, Abschreibung, Finanzierung und Fuhrparkmanagement hinzu. Der Betreiber bildet das Herzstück des neuen Angebots und hat für alle Aufgaben die Möglichkeit der Servicebeschaffung oder des Eigenbetriebs.

Fahrdienstleister

Der Verkehrsdienstleister sorgt für die effiziente Durchführung der Fahraufträge. Aufgabenbereiche sind die Fahrzeug- und Personaldisposition sowie die Planung im Vorfeld. Weitere Aufgaben sind eine eventuelle Fahrzeugbeschaffung, wenn der Auftrag die Kapazität des vorhandenen Fuhrparks übersteigt. Weitere organisatorische Aufgaben wie Wartung, Reparatur und Reinigung ergeben sich aus der Betriebsabwicklung. Der Betreiber kann im Falle des Eigenbetriebs auch selbst der Verkehrsdienstleister sein. Der Fahrdienstleister ist zudem die Instanz mit direktem Kundenkontakt und somit wichtig für die Übermittlung von positiven und negativen Rückmeldungen zum Betrieb.

IT-Dienstleister

Der IT-Dienstleister entwickelt und betreibt die Software, die Routingplattform und die App und kümmert sich um den Kundendienst bei Softwareproblemen. Der Dienstleister pflegt alle verfügbaren Daten, wie ÖPNV-Linien, Kartenmaterial, Baustellendaten, Straßeninformationen, virtuelle Haltestellen, in die Software ein, macht den Service über eine Plattform und App buchbar und organisiert des Fahrtenrouting und die Konzession der Fahrenden. Bei Problemen mit dem IT-Service stellt der Dienstleister den Kundenservice zur schnellen Lösung des Problems.

Nutzende

Die Nutzenden nehmen den neuen Service an und geben schnelle Rückmeldung zu auffallenden Problemen im Fahrdienst und auf der Plattform beziehungsweise App. Es ist wichtig, dass der neue On-Demand-Service auf großen Rückhalt in der Bevölkerung stößt, um den Service weiter an die Bedarfe der einzelnen Zielgruppen anzupassen.

5.2 Rollenmodell

Aus den Projekt- und Workshopergebnissen lässt sich ein strukturiertes Rollenmodell von der ersten Planung bis zum Regelbetrieb eines bedarfsgesteuerten Verkehrs ableiten. Das Rollenmodell (vgl. Abbildung 17) stellt einen stereotypen Ablauf von der Planung über einen Testbetrieb bis hin zum Roll-Out dar. Die Ergebnisse beziehen sich aufgrund des Projektfokus auf die Modellregion Spremberg, sind aber mit individuellen Anpassungen auch auf andere Regionen übertragbar.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus

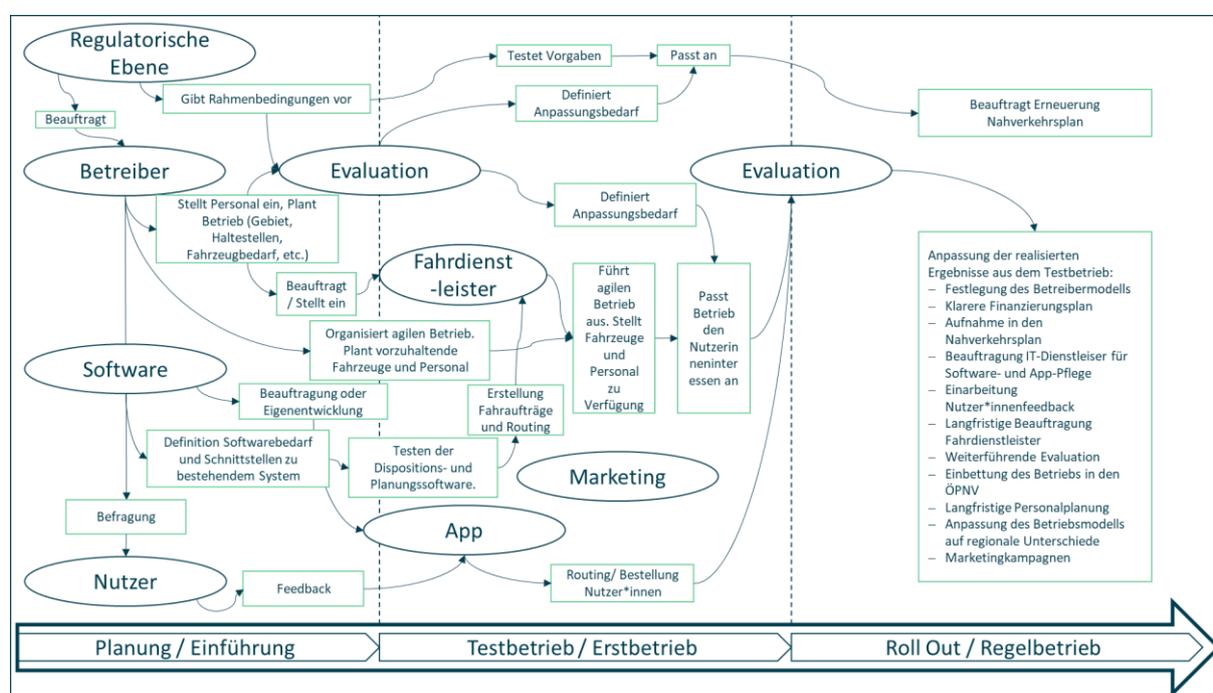


Es ist zu erkennen, dass der Rolle des Betreibers, besonders wenn dieser zugleich Fahrdienstleister ist, eine hohe Verantwortung zukommt. Des Weiteren ist die Aufgabe des Marketings nicht abschließend zu klären. Die Frage, in welcher Hand die Verantwortung der Bewerbung des neuen Angebots liegt, ist stark von der Betriebsausgestaltung abhängig. Ist der Betreiber des Gesamtbetriebs ein externer Dienstleister, kommt es auf den Dienstleistungsvertrag an, ist es das lokale Verkehrsunternehmen, so liegt die Verantwortung voraussichtlich bei diesem oder aber beim initialen Aufgabenträger auf der regulatorischen Ebene.

Die Einholung der Rückmeldungen zur Servicequalität, Verständlichkeit der App und Software wie alle weiteren Bereiche der Kundenzufriedenheit liegt voraussichtlich beim Fahrdienstleister, da dieser den direkten Kundenkontakt hat. Die Auswertung, Verarbeitung und Anpassung der jeweiligen Betriebsbereiche liegen wiederum bei den einzelnen verantwortlichen Dienstleistern für die jeweiligen Bereiche.

Generell soll über eine kontinuierliche Evaluation und Anpassung des Betriebs in der Planungs- und Testbetriebs-Phase alle nötigen Grundsteine für einen wirtschaftlich tragbaren und langfristig betreibbaren ODV gelegt werden. Die Ergebnisse sollen dann im Nahverkehrsplan festgeschrieben werden, um die Leistung langfristig als Teil des ÖPNV zu verfestigen.

Abbildung 17: Rollenmodell On-Demand-Verkehr. Von der Planung zum Regelbetrieb



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Workshop- und Projektergebnisse

5.3 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit eines ODVs hängt von vielen Faktoren ab, wesentlich aber von der Betriebsphase. Zunächst ist es wichtig herauszustellen, dass der Betrieb von ODVen im ländlichen Raum ein defizitäres Geschäft ist. Da eine Initiierung nur als Teil oder komplementär zum ÖPNV sinnvoll ist, ist als Resultat auch der ODV nur durch Zusatzfinanzierung zu betreiben. Die Kostendeckungsgrade im ÖPNV sind sehr unterschiedlich zu berechnen, je nachdem welche Erlöse und Kosten miteinbezogen werden. In der VDV Hochrechnung [VD23] liegen die ÖPNV Kostendeckungsgrade deutschlandweit bei 75,6% (SPNV ausgeschlossen). Im ländlichen Raum liegen jedoch noch weitaus niedrigere Kostendeckungsgrade vor, was sich aus langen Strecken und einer geringeren Bevölkerungsdichte ergibt [Sc23].

Gefördert durch:



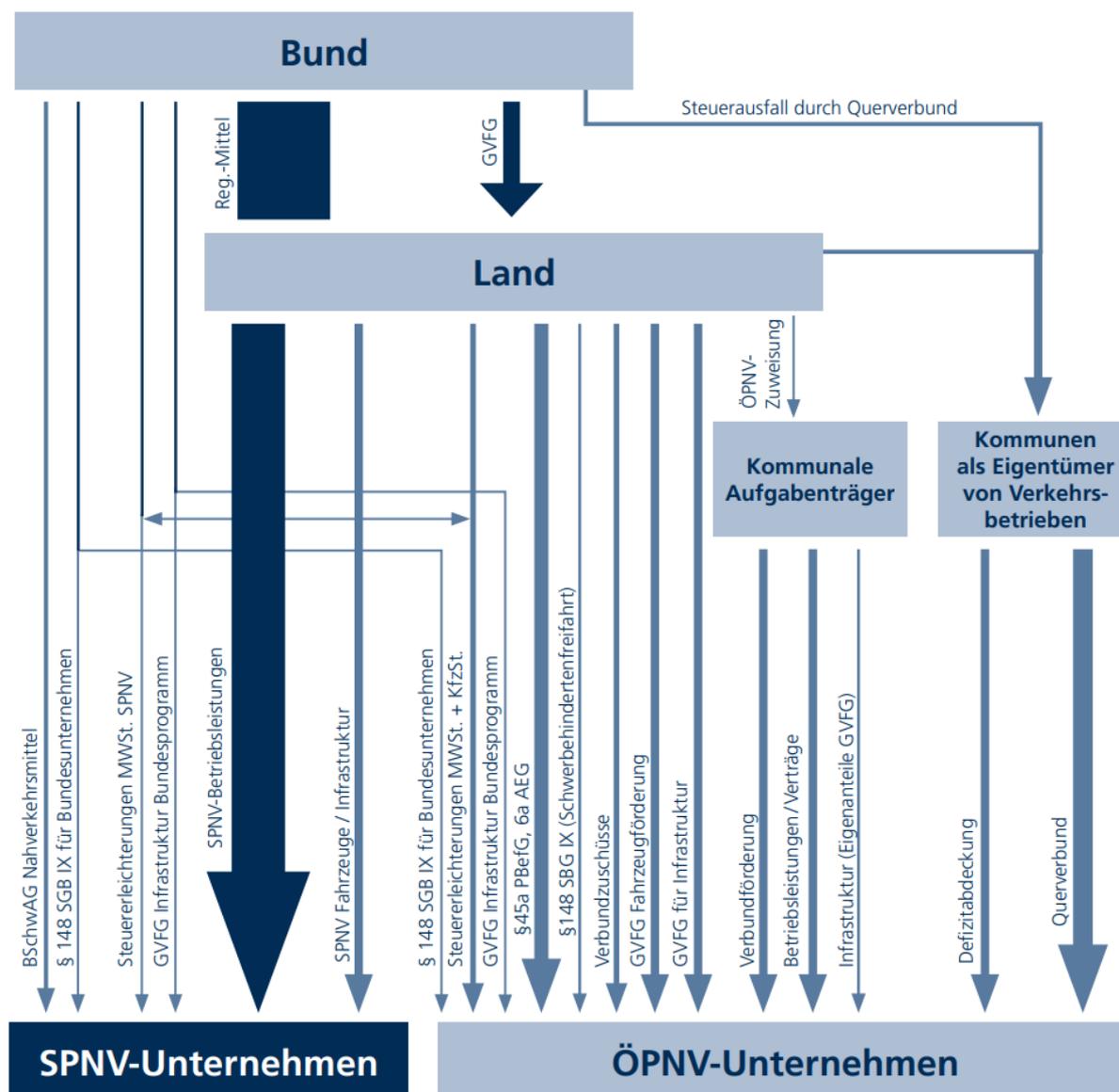
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



Abbildung 18: Finanzierung des ÖPNV in Deutschland (Überblick)



Quelle: Bormann 2010 (S. 9)

Daher bedarf es im ÖPNV immer der Zusatzfinanzierung. Diese ist, wie Abbildung 18 verdeutlicht, sehr komplex und schwer abschließend zu beziffern. Das komplexe Finanzierungsgebilde schafft jedoch wenig Anreiz für einen wirtschaftlichen Betrieb, was auch in der Initialisierung eines neuen ODV berücksichtigt werden muss. Der VDV beziffert die nötige Zusatzfinanzierung für einen deutschlandweit flächendeckenden ODV mit Fokus auf ländliche Regionen auf 3,8 Milliarden Euro [VD22]. Deshalb bleiben die meisten der 80 ODV-Projekte momentan Förderprojekte. Ohne Zusatzfinanzierung aus Forschungsprojekten und Förderbekanntmachung sind die entstehenden Zusatzkosten vom ÖPNV-Aufgabenträger schwer zu tragen.

Die Bundesregierung stellte bis 2024 rund 250 Mio. Euro in Form von Fördertöpfen für die Entwicklung neuer ODVe zur Verfügung. Hierzu kommen noch die zur Verfügung gestellten Landesmittel. In Nordrhein-Westfalen waren es rund 120 Mio. Euro. In der vom Nordhessisches Verkehrsverbund (NVV) bei KCW beauftragten Studie soll der Hochlauf der ODVe an der erwarteten Wirtschaftlichkeit gemessen werden [Me23].

Zur Bewertung der erwarteten Potentiale gegenüber den Kosten wurde in der Studie [Me23] eine Mengen-Kosten-Analyse mit stark vereinfachten Annahmen durchgeführt. Im Ergebnis können im NVV-Gebiet maximal 700.000 Personen einem schlechten oder nichtexistierenden ÖPNV-Angebot zur schwächsten Verkehrszeit

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Startkapital für die Mobilität der Zukunft

Ein Verbund aus



durch den ODV versorgt werden, während maximal 70 On-Demand-Shuttles gleichzeitig im Einsatz sind. Über alle Verkehrszeiten hinweg ergeben sich so 700.000 Fahrgäste jährlich. Aus diesen Annahmen ergeben sich für den NVV ein Zusatzfinanzierungsaufwand von 9 Millionen Euro pro Jahr oder 12,86 Euro pro Fahrgast [Me23].

Da keine Wirtschaftlichkeitsanalysen auf Basis eines ODVs im Realbetrieb in der Forschungsliteratur vorliegen, wird im Folgenden auf die Kostenschätzungen von KCW [Me23] sowie einen intern vorliegenden Kostenvoranschlag zur Initiierung eines ODVs durch einen wirtschaftlichen Betreiber aufgebaut.

Die Datenlage der vorliegenden Literatur erlaubt keine ex-post-Analyse der real anfallenden Kosten. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Dies ergibt sich auch durch den raschen Hochlauf der ODVe seit der PBefG-Novelle im Jahr 2021 [VD22], weshalb sich die meisten ODV-Projekte noch im Testbetrieb befinden. Dies erlaubt noch keine Abschätzung der tatsächlichen Kosten im Normalbetrieb.

Daher werden im Folgenden zur Kostenschätzung auf Anwendungsfallbasis für einen hypothetischen ODV in Spremberg die vorliegenden ex-ante-Kostenschätzungen herangezogen und aufbauend folgende Annahmen getroffen.

- Die Betriebszeit über alle Anwendungsfälle hinweg ist 7 Tage die Woche von 06:00 bis 22:00 Uhr (ausgeschlossen der Anwendungsfall Pendeln, welcher nur an 5 Tagen pro Woche stattfindet).
- Es wird ein Fahrzeug für 10.000 Einwohner pauschal für alle Anwendungsfälle veranschlagt. Für Spremberg sind dies zwei Fahrzeuge.
- Die Hauptverkehrszeiten 06:00 bis 09:00 Uhr und 16:00 bis 19:00 Uhr entfallen auf den Anwendungsfall Pendeln. Es wird von einer Kostendeckung von 15% ausgegangen und die Fahrdienststunde wird mit 25 Euro (inklusive aller Kosten) kalkuliert.
- Die Nebenverkehrszeiten 09:00 bis 16:00 Uhr entfallen auf den Anwendungsfall Querverbindungen. Es wird von einer Kostendeckung von 10% ausgegangen und die Fahrdienststunde wird mit 25 Euro (inklusive aller Kosten) kalkuliert.
- Die schwachen Verkehrszeiten 19:00 bis 22:00 Uhr entfallen auf den Anwendungsfall „abendliche Randzeiten“. Es wird von einer Kostendeckung von 5% ausgegangen und die Fahrdienststunde wird mit 30 Euro (inklusive aller Kosten) kalkuliert.
- Für Softwarepflege wird eine Vollzeitstelle mit 60.000€ Jahresgehalt und für Marketingmaßnahmen eine 50% Teilzeitstelle mit gleichem Jahresgehalt einbezogen.
- Zur Berechnung der Stundenlöhne aus dem Vollzeitäquivalent wird ein Monat mit 4,35 Wochen mit je 40 Arbeitsstunden einbezogen.
- Für Lizenzgebühren entfallen gegeben durch den Open-Source Charakter keine Kosten. Anpassungen der verwendeten Open-Source-Software sind unter der Vollzeitstelle zur Softwarepflege verortet.

Tabelle 6 fasst die Ergebnisse der Analyse auf Basis der beschriebenen Annahmen zusammen. Aus den Ergebnissen können einige Rückschlüsse auf die Umsetzung gezogen werden. Es wird ersichtlich, dass Anwendungsfall 1, gegeben durch einen höheren Kostendeckungsgrad zu den Hauptverkehrszeiten, der pro Betriebsstunde günstigste umsetzbare Anwendungsfall ist. Anwendungsfall 3 zu den abendlichen Randzeiten ist gegeben durch einen niedrigeren Kostendeckungsgrad aufgrund geringerer Nachfrage und den höheren Kosten der Fahrdienstleistung der auf Stundenbasis unwirtschaftlichste. Insgesamt ergibt die Hochrechnung jährliche Gesamtkosten für die Umsetzung aller Anwendungsfälle in Höhe von 343.900,80 Euro.

Es ist wichtig klarzustellen, dass die errechneten Kosten in der gegebenen Pauschalrechnung unter Zuhilfenahme der diversen Annahmen weit von den realen Kosten der Initiierung eines neuen On-Demand-Angebots entfernt sind. In projektinternen Gesprächen wurden die jährlichen Gesamtkosten für ein bis zwei Testgebiete mit zwei bis drei Fahrzeugen auf 1.2 Millionen Euro geschätzt. Grund hierfür sind in der Rechnung nicht beachteten Zusatzkosten für die Betriebsentwicklung und -aufsetzung. Kosten wie Fahrzeuganschaffung, initiale Softwareanpassung, Begleitforschung, Datenauswertung, Kundenbefragungen und viele nicht quantifizierbare weitere Kostenpunkte werden in der vorliegenden Pauschalrechnung nicht beachtet.

Es wird von einem hypothetischen Normalbetrieb ausgegangen, in dem die Skaleneffekte vom Testbetrieb bis zum Roll-Out bereits eingerechnet sind. Die benannten zusätzlichen Kostenpunkte eines Testbetriebs sind abhängig von den Rahmenbedingungen, wie dem gewählten Organisationsmodell, der Anschubfinanzierung,

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



möglicher Fördergelder und lokalen Implementierungsunterschieden. Welche exakten Effekte diese Rahmenbedingungen auf die Kosten haben, lässt sich ex-ante nicht berechnen und wird daher aus der Kalkulation ausgeschlossen. Die Thematik der Wirtschaftlichkeit verschiedener Implementierungsszenarien und Betriebsmodelle vom Test- bis zum Regelbetrieb ist jedoch ein wichtiger offener Forschungsbedarf, besonders unter dem Gesichtspunkt des bemerkenswerten Hochlaufs von ODVs-Projekten.

Tabelle 6: Kostenaufschlüsselung je Anwendungsfall

Variablen	AW 1: Pendeln	AW 2: Querverb.	AW 3: Randzeiten	Alle Anwendungsfälle	
A: Betriebstage pro Woche	5	7	7	∅	6,33
B: Betriebszeit (Std./Tag)	6	7	3	Σ	16
C: Fahrzeug pro 10.000 EW	2	2	2	∅	2
D: Kosten Fahrdienst (€/Std.):	25	25	30	∅	26,67
E: Kostendeckung	15%	10%	5%	∅	10%
F: Softwarepflege (€/Monat) (Vollzeitstelle)	5.000,00 €			Σ	5.000,00 €
G: Marketing (€/Monat) (Teilzeitstelle 50%)	2.500,00 €			Σ	2.500,00 €
Kosten pro Betriebsstunde $C \cdot D \cdot (1-E) + ((F+G)/4,35/40)$	85,60 €	88,10 €	100,10 €		91,10 €
Gesamtkosten (Monat) $4,35 \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot (1-E) + F + G$	13.046,25 €	17.091,75 €	12.706,95 €		28.658,40 €
Gesamtkosten (Jahr) $12 \cdot \text{Gesamtkosten (Monat)}$	156.555,00 €	205.101,00 €	152.483,40 €		<u>343.900,80 €</u>

6 Fazit

Im Raum Spremberg lassen sich drei ODV Anwendungsfälle identifizieren. Anwendungsfall 1, „Pendeln“, beschreibt den morgendlichen und abendlichen Weg zur und von der Arbeit zum Wohnort. In Spremberg führt dieser Weg im ÖPNV meist über den Hauptbahnhof oder den Busbahnhof und bedeutet eine lange Reisezeit, gegeben durch lange Umsteigezeiten. Der ODV kann hier als Zubringer fungieren und die Reisezeit in Kombination verkürzen. Anwendungsfall 2, „Querverbindungen“, beschreibt die Verbindungen zwischen den einzelnen Ortsteilen. Auch hier existiert in der ÖPNV-Verbindung meist ein Umstieg in der Kernstadt, was wiederum für lange Reisezeiten im ÖPNV für eine kurze Entfernung von Start- und Zielpunkt sorgt. Dies liegt an der geringen Nachfrage der vielen Querverbindungen. Diese kann für das ganze Stadtgebiet und alle Ortsteile auch durch den ODV gestellt werden. Der letzte Anwendungsfall 3, „Abendliche Randzeiten“, beschreibt die Rückführung aus der Kernstadt in die Ortsteile nach 18 Uhr, da zu dieser Zeit viele Verbindungen mit dem ÖPNV von der Kernstadt in die Ortsteile in Randlage nicht mehr bedient werden.

Zur Initiierung eines neuen On-Demand-Angebotes bildet der §44 PBefG die rechtliche Grundlage für eine Zulassung als dem ÖPNV angegliederter Bedarfslinienverkehr. Seit der PBefG-Novelle 2021 können auch Bedarfslinienverkehre ohne feste Abfahrtszeiten und Linienweg sowie mit zusätzlichen virtuellen Haltestellen als Teil des ÖPNV zugelassen werden. ODVe erleben in Deutschland seit der Gesetzesnovellierung insbesondere im ländlichen Raum einen Boom und werden langfristig ein wichtiges Puzzleteil der Mobilität in peripheren Räumen sein.

Aus den Ergebnissen lässt sich ein konzeptionelles Betriebsmodell ableiten. Dieses beschreibt die Strukturen eines Testbetriebs, bestehend aus Regulierungsebene, Betreiber, Softwaredienstleister, Verkehrsdienstleister, Begleitforschung und Nutzer:innen, sowie das Verhältnis der Teilsysteme Software, Applikation, Fahrpersonal

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



und Fahrzeuge. Es lassen sich drei zu unterscheidende Umsetzungsszenarien ableiten. Der Gesamtbetrieb wird durch den Aufgabenträger des ÖPNV an eine einzelne Institution vergeben. Dies wäre ein Betrieb aus einer Hand. Als zweite Variante kann das örtliche Verkehrsunternehmen mit dem Betrieb beauftragt werden, übernimmt die Rolle des Betreibers und Fahrdienstleisters und vergibt die Softwaredienstleistung an einen Drittanbieter. Die dritte Variante wäre die Vergabe aller drei Rollen an unterschiedliche Drittanbieter, die die jeweilige Expertise als Fahrdienstleister, Betreiber und Softwaredienstleister nachweisen können und so ein Konsortium bilden.

Im Projekt wurde auch die Machbarkeit auf technischer Ebene untersucht. Aus der Analyse der Architektur bestehender Software-Komponenten, dem Open-Source-Entwicklungsstand und den erfassten Anforderungen von Nutzer:innen und Akteuren haben sich zahlreiche funktionale und nicht-funktionale Anforderungen an die neu zu entwickelnden Software-Komponenten ergeben. Diese erweitern das bestehende technische Ökosystem von bbnavi um Schnittstellen für Fahr-Apps und Buchungssysteme sowie Erweiterungen für die individuelle Routenplanung von ODV anhand von Nutzer:innen-Präferenzen. Insgesamt lässt sich festhalten, dass sich die Implementierung dieser Anforderungen im Rahmen eines Umsetzungsprojekts als möglich und realistisch darstellt. Auf Software-technischer Ebene konnte die Machbarkeit des Projekts demnach bestätigt werden.

Technisch gesehen ist das optimale Planen von On-Demand-Zubringerfahrzeugen für den ÖPNV möglich. Es handelt sich dabei um eine Verknüpfung zweier bekannter Logistikprobleme: dem Vehicle Routing Problem (VRP) und dem Single Source Shortest Path-Problem (SSSP). Für beide einzelnen Problemstellungen sind Lösungsalgorithmen bekannt. Die Herausforderung für die Umsetzung einer On-Demand-Planung liegen einerseits in der Umsetzung der Kombination der Algorithmen zur Lösung der Problemstellung und der geschickten Formulierung von Bedingungen um einen Konkurrenzbetrieb zum herkömmlichen ÖPNV zu vermeiden und als Zubringer für diesen zu dienen. Zwei Möglichkeiten der Kombination der Algorithmen zum Lösen von VRP- und SSSP-Problemen wurden vorgestellt und können in der Umsetzungsphase realisiert werden. Für das Vermeiden eines Konkurrenzbetriebs für den herkömmlichen ÖPNV können zum Beispiel zeitliche Constraints oder Orthogonale Richtungen (zwischen On-Demand-Service und herkömmlichen ÖPNV) bei den Fahrten garantiert werden.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit lässt sich festhalten, dass die tatsächlichen Kosten für einen Testbetrieb aufgrund fehlender Datengrundlagen schwer abzuschätzen sind. Eine Kostenanalyse auf Basis von in der Literatur verfügbaren Beispielrechnungen für einen hypothetischen Normalbetrieb in Spremberg ohne Forschungscharakter ergibt Gesamtkosten für die Umsetzung aller drei Anwendungsfälle in Höhe von 323.472 Euro. Der wirtschaftlichste Anwendungsfall ist dabei Anwendungsfall 1, der unwirtschaftlichste Anwendungsfall ist Anwendungsfall 3. Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Wirtschaftlichkeitsanalyse verschiedener Umsetzungsszenarien von Testbetrieben, um den Hochlauf bedarfsgesteuerter Verkehre mit belastbaren Kosten über alle Phasen von der Angebotsentwicklung bis zum Regelbetrieb unterstützen zu können.

Das Umsetzungskonzept für ein Modellprojekt wurde gemeinsam mit dem Landkreisen Oder-Spree erarbeitet. Große Unterstützung zur Ausgestaltung ergab sich aus dem engen Austausch mit der Verkehrsgesellschaft Teltow-Fläming der Stadt Spremberg dem Landkreis Potsdam-Mittelmark. Dieser resultierte aus der kontinuierlichen Einbindung in die verschiedenen Vernetzungsveranstaltungen im Rahmen des Projektes OSLO. Das Konzept wurde für eine Förderung eingereicht. Die vorliegende Machbarkeitsstudie bietet die Grundlage für eine erfolgreiche Umsetzung eines ODV in Kombination mit der Open-Source-Mobilitätsplattform bbnavi. Definiert jedoch auch den noch offenen Forschungsbedarf sowie die nötigen Entwicklungen. Eine Förderung des Umsetzungsprojektes könnte Grundlage zur flächendeckenden ODV-Umsetzung sowie die wirtschaftliche Evaluation verschiedener Einführungszenarien in Brandenburg und ganz Deutschland sein.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ein Verbund aus



7 Literaturverzeichnis

- [Ba22] Bayer, S.; Kluge, R.; Kohl, A.; Messmer, S.: Studentisches Projekt: Gläserner Routenplaner, Betreuer: M. Kobitzsch, S. Meinert, I. Rutter, Prof. P. Sanders, Prof. D. Wagner. KIT - Karlsruhe Institute of Technology. n.n., letzmal besucht am 5. Mai 2023, url: https://i11www.iti.kit.edu/_media/projects/rpkit/techniken_poster.pdf.
- [Ba23] Baur, Tilman. "Wie Kommunen ihr Stadtnavi fördern lassen." Tagesspiegel Background Smart City & Verwaltung, May 2, 2023. <https://background.tagesspiegel.de/smart-city/wie-kommunen-ihr-stadtnavi-foerdern-lassen>.
- [BM23] BMDV mFUND-Projekte. "BMDV - Projekte." Accessed July 19, 2023. <https://bmdv.bund.de/DE/Themen/Digitales/mFund/Projekte/mfund-projekte.html>.
- [Co01] Cormen, T. H.; Leiserson, C. E.; Rivest, R. L.; Stein, C.: Introduction to Algorithms. The MIT Press, 2001, isbn: 0262032937.
- [Fr90] Fredman, M. L.; Willard, D. E.: BLASTING through the Information Theoretic Barrier with FUSION TREES. In (Ortiz, H., Hrsg.): Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on Theory of Computing, May 13-17, 1990, Baltimore, Maryland, USA. ACM, S. 1-7, 1990, url: <https://doi.org/10.1145/100216.100217>.
- [Fr93] Fredman, M. L.; Willard, D. E.: Surpassing the Information Theoretic Bound with Fusion Trees. J. Comput. Syst. Sci. 47/3, S. 424-436, 1993, url: [https://doi.org/10.1016/0022-0000\(93\)90040-4](https://doi.org/10.1016/0022-0000(93)90040-4).
- [Fr94] Fredman, M. L.; Willard, D. E.: Trans-Dichotomous Algorithms for Minimum Spanning Trees and Shortest Paths. J. Comput. Syst. Sci. 48/3, S. 533-551, 1994, url: [https://doi.org/10.1016/S0022-0000\(05\)80064-9](https://doi.org/10.1016/S0022-0000(05)80064-9).
- [Ge20] Gerike, Regine, Stefan Hubrich, Frank Ließke, Sebastian Wittig, and Rico Wittwer. Sonderauswertung „Mobilität in Städten – SrV 2018“: Städtevergleich (Comparison of the Results for the Participating Cities in the 2018 Round of the German HTS "Mobility in Cities - SrV"), 2020.
- [Gi21] Gies, Jürgen, and Victoria Langer. "Mit On-Demand-Angeboten ÖPNV Bedarfsverkehre Modernisieren." Werkstattbericht Zu Chancen Und Herausforderungen (Difu Sonderveröffentlichung). S 40 (2021).
- [Gi23] "MobilityData/Gtfs-Flex." 2016. Reprint, MobilityData IO, October 26, 2023. <https://github.com/MobilityData/gtfs-flex>.
- [Go05] Goldberg, A. V.; Harrelson, C.: Computing the shortest path: A* search meets graph theory. In: Proceedings of the Sixteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, SODA 2005, Vancouver, British Columbia, Canada, January 23-25, 2005. SIAM, S. 156-165, 2005, url: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1070432.1070455>.
- [Go05] Goldberg, A. V.; Harrelson, C.: Computing the shortest path: A* search meets graph theory. In: Proceedings of the Sixteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, SODA 2005, Vancouver, British Columbia, Canada, January 23-25, 2005. SIAM, S. 156-165, 2005, url: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1070432.1070455>.
- [Ha23] Hartmann, Thomas, and Michael Hacker. "Bericht zur Evaluation des On-Demand-Verkehrs DALLI im Landkreis Oder-Spree." tamen. Entwicklungsbüro Arbeit und Umwelt GmbH, March 31, 2023.
- [Ha68] Hart, P. E.; Nilsson, N. J.; Raphael, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE Trans. Syst. Sci. Cybern. 4/2, S. 100-107, 1968, url: <https://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136>.
- [Hi06] Hilger, M.; Köhler, E.; Möhring, R. H.; Schilling, H.: Fast Point-to-Point Shortest Path Computations with Arc-Flags. In (Demetrescu, C.; Goldberg, A. V.; Johnson, D. S., Hrsg.): The Shortest Path Problem, Proceedings of a DIMACS Workshop, Piscataway, New Jersey, USA, November, 2006. Bd. 74. DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, DIMACS/AMS, S. 41-72, 2006, url: <https://doi.org/10.1090/dimacs/074/03>.

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Ein Verbund aus



- [KI23] Klinge, Alexander. "Präsentation OSLO Betriebsmodell. Workshop Im Rathaus Spremberg Zur Erarbeitung Möglicher Organisationsmodelle." Presented at the 2. OSLO Workshop, July 6, 2023.
- [Lö23] Löffler, S.; Becker, I.; Hofstedt, P.; Nietze, A.; Hennig, S.; Klinge, A.: Planung des Ländlichen On-Demand-Verkehr - Probleme, Analyse und Algorithmen. MOC 2023 - 15. Workshop {KI-basiertes} Management und Optimierung komplexer Systeme. 29.09.2023. Berlin. Lecture Notes in Informatics (LNI) Band Nr. 337; ISBN 978-3-88579-731-9, Springer, 2023.
- [Ma17] Madkour, A.; Aref, W. G.; Rehman, F. U.; Rahman, M. A.; Basalamah, S. M.: A Survey of Shortest-Path Algorithms. CoRR abs/1705.02044/, 2017, arXiv: 1705.02044, url: <http://arxiv.org/abs/1705.02044>.
- [Ma98] Marriott, K.; Stuckey, P. J.: Programming with Constraints - An Introduction. MIT Press, Cambridge, 1998, isbn: 978-0-262-13341-8.
- [Me23] Mehler, Christian, and Martin Weißhand. "Wirtschaftlichkeit von On-Demand-Verkehren | KCW." Der Nahverkehr 1+2/2023, S. 56-59.
- [Mü23] Müller, Dirk. "Präsentation Rufbussystem Teltow-Fläming. Workshop Zur Bedarfsanalyse in Spremberg." Presented auf dem 1. OSLO Workshop, August 3, 2023.
- [No18] Nobis, Claudia, and Tobias Kuhnimhof. "Mobilität in Deutschland– MiD: Ergebnisbericht," 2018.
- [Öf22] "Öffentliche Ausschreibung Berlin 2022 VBB HIM Erweiterung 2022-08-08." Accessed July 19, 2023. https://ausschreibungen-deutschland.de/949748_VBB_HIM_Erweiterung_2022_Berlin.
- [Op07] Open Source Initiative: The Open Source Definition, 2007, <https://opensource.org/osd/>, abgerufen am 30.06.2023.
- [Sc23] Scheier, Benedikt, Filiz Kurt, Evnika David, and Tim Ole John. "Analyse von On-Demand ÖPNV Als Bahnhofszubringerverkehr Im Urbanen Und Ländlichen Raum." In Towards the New Normal in Mobility: Technische Und Betriebswirtschaftliche Aspekte, 475–86. Springer, 2023.
- [St22] Stallmann, Martin. Personenbeförderungsgesetz-Novelle 2021. Umweltbundesamt, 2022. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/personenbefoerderungsgesetz-novelle-2021>.
- [To02] Toth, P.; Vigo, D.: The Vehicle Routing Problem. Society for Industrial und Applied Mathematics, 2002, isbn: 0-89871-579-2.
- [VB22] VBB Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg, GmbH. "Fahrinfo." Accessed December 20, 2022. <https://www.vbb.de/fahrinfo/>.
- [VD22] VDV. "Hochlauf der On-Demand-Verkehre im ÖPNV | VDV - Die Verkehrsunternehmen," 2022. <https://www.vdv.de/unsere-themen/oepnv-deutschland/on-demand-im-oepnv-/ondemandumfrage22.aspx>.
- [VD23] VDV, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. "Finanzierung/Kostendeckungsgrad VDV - Mobili-Wissen." Accessed September 18, 2023. <https://www.mobili-wissen.de/Finanzierung/Kostendeckungsgrad>.
- [Wa14] Wang, Y.; Ma, X.; Lao, Y.; Yu, H.; Liu, Y.: A two-stage heuristic method for vehicle routing problem with split deliveries and pickups. J. Zhejiang Univ. Sci. C 15/3, S. 200–210, 2014, url: <https://doi.org/10.1631/jzus.C1300177>.
- [Zh22] Zhang, H.; Ge, H.; Yang, J.; Tong, Y.: Review of Vehicle Routing Problems: Models, Classification and Solving Algorithms. Arch Computat Methods Eng 29/, S. 195–221, 2022.

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Ein Verbund aus

