

Demand Responsive Transport im Schienenverkehr – Eine Analyse des Systemdesigns

Demand Responsive Transport im Schienenverkehr ist geeignet, auch nachfrageschwache Strecken mit Direktverbindungen zu bedienen. Kurzen Reisezeiten stehen jedoch mitunter lange Vorlaufzeiten zur Buchung gegenüber. Anhand eines Anwendungsbeispiels im Großraum Braunschweig wird untersucht, wie grundlegende Systemparameter wie Infrastruktur, Fahrzeuganzahl und Planungsalgorithmen die Qualität des Angebots beeinflussen.



1. Motivation und Problemstellung

Bedarfsorientierte Betriebskonzepte sind eine interessante Option, um auf weniger stark befahrenen oder stillgelegten Regionalstrecken ein attraktives Angebot auf der Schiene zu ermöglichen. Ein solches System, welches im Folgenden als Demand Responsive Rail Transport (DRRT) bezeichnet wird, profitiert zudem von der zunehmenden Digitalisierung und Automatisierung im Bahnsektor. Zahlreiche Technologien, die für hoch automatisiertes oder autonomes DRRT Voraussetzung sind, stehen bereits zur Verfügung oder befinden sich in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium. Dazu zählen bspw. Aspekte der Leit-, Sicherungs- oder Kommunikationstechnik [1].

In einem früheren Beitrag wurde ein potenzielles DRRT-Konzept für das Unter-

suchungsgebiet Braunschweig-Gifhorn-Salzgitter entworfen sowie dessen Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit bewertet [2]. Die Simulation des DRRT-Betriebs wurde dabei mit einem konventionellen Linienbetrieb verglichen. Erste Ergebnisse zeigten eine grundsätzliche Machbarkeit sowie vergleichbare Kosten im automatisierten Betrieb, während sich bezüglich der Angebotsqualität Vor- und Nachteile für die Reisenden ergaben: Einerseits bietet das DRRT-Angebot im Mittel 20 % kürzere Reisezeiten, da durch die Direktfahrten keine Umstiege notwendig sind. Andererseits kommt es im bedarfsorientierten Angebot zu erheblich längeren Vorlaufzeiten zwischen dem Stellen der Anfrage und dem Beginn der Reise. Mit DRRT fielen mittlere Vorlaufzeiten von über einer Stunde an, was die Attraktivität des Betriebs für potenzielle Fahrgäste fraglich erscheinen lässt [2].

In diesem Artikel wird daher untersucht, welche Einflüsse das Systemdesign auf die Vorlaufzeiten im DRRT-Betrieb hat. Damit verknüpft ist die Frage, unter welchen Voraussetzungen ähnliche Bedienzeiten wie im Linienbetrieb erreicht werden können.

2. Konzept und Methodik

Grundlage der Untersuchung ist das sekundäre Regionalbahnnetz rund um Braunschweig. Dieses enthält längere eingleisige Abschnitte, welche zwar die Flexi-



Dipl.-Ing. Philip Ritzer

Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
DLR-Institut für Verkehrssystem-
technik, Braunschweig
philip.ritzer@dlr.de



M. Sc. Michael Mönsters

Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
DLR-Institut für Verkehrssystem-
technik, Braunschweig
michael.moensters@dlr.de



Dipl.-Ing. Leander Flamm

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
(bis 03/2022),
DLR-Institut für Verkehrssystem-
technik, Braunschweig
leander.flamm@dlr.de



Dr. Norman Weik

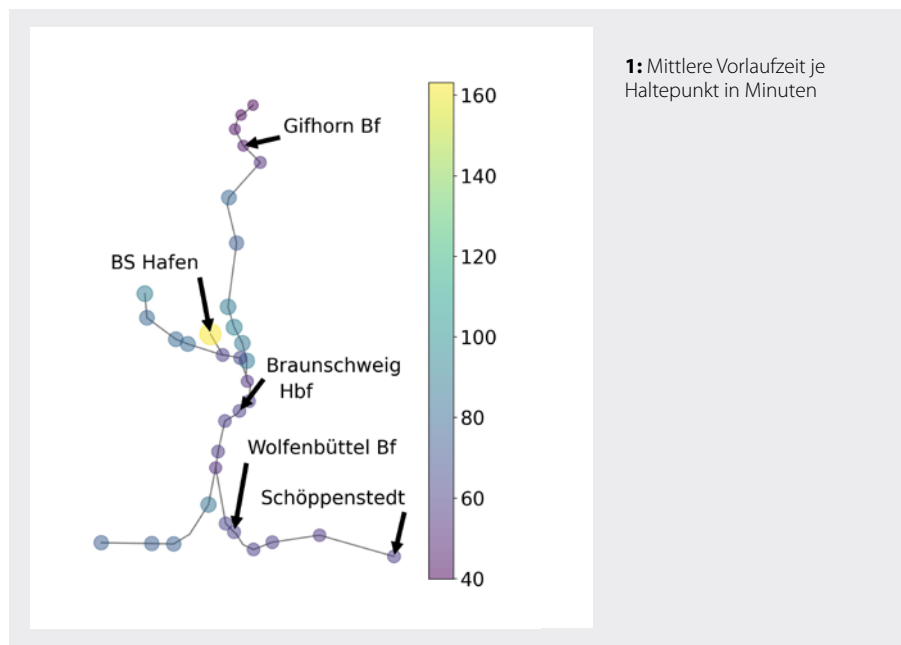
Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
DLR-Institut für Verkehrssystem-
technik, Braunschweig
norman.weik@dlr.de

Besonderes Augenmerk sollte bei bedarfsorientierten Betriebskonzepten auf Bedienzeiten und die räumliche Disposition der Fahrzeuge gelegt werden.



Parameter	Basiswert	Variationsbereich
Anzahl der Fahrzeuge	10	2 bis 70
Kapazität der Fahrzeuge	50	10 bis 350
Anfragen pro Tag	7000	1000 bis 35 000

Tabelle 1: Basiswerte und Variationsbereiche für die Sensitivitätsanalyse



bilität des nachfragegesteuerten Betriebs einschränken, aber gerade in sekundären Netzen häufig anzutreffen sind. Die Nachfrage orientiert sich an den Daten aus dem Nahverkehrsplan 2020 für den Großraum Braunschweig [3] und bildet einen typischen Wochentag mit entsprechender Tagesganglinie ab. Der DRRT-Betrieb wird durch hoch automatisierte oder autonome kleinere Fahrzeuge realisiert, die im wandernden Raumabstand („Moving Block“) verkehren. Konzept und Aufbau des Simulationsmodells sind ausführlich in [2] beschrieben.

2.1. Dispositionsheuristik

Aktuell wird eine Heuristik eingesetzt, welche lokal die Anzahl der bedienten Anfragen maximiert. Nachdem ein Fahrzeug eine Fahrt abgeschlossen hat, werden alle Alternativen, die vom aktuellen oder nächstgelegenen Haltepunkt starten, anhand der bedienten Anfragen gewichtet und die Fahrt mit den meisten Anfragen durchgeführt. Durch eine verbesserte Fahrzeugauslastung konnten gegenüber der vergangenen Untersuchung Vorteile bei hohem Belegungsgrad der Fahrzeuge erreicht werden.

2.2. Sensitivitätsanalyse

Unter Verwendung dieses Modells werden nun Design-Parameter wie die Anzahl der Fahrzeuge und die Fahrzeugkapazität variiert und die Auswirkungen auf die Bedienzeiten analysiert. Dabei liegt der Fokus auf der Vorlaufzeit, da die Reisezeit aufgrund des Direktverbindungscharakters weitgehend stabil gegenüber den Änderungen ist. Außerdem werden verschiedene Intensitäten der Nachfrage betrachtet. Bei diesen Sensitivitätsanalysen wird jeweils ein Parameter variiert, während alle anderen Parameter konstant bleiben. Die Basiswerte und Variationsbereiche sind in Tabelle 1 abgebildet.

2.3. Zweigleisbetrieb

Zusätzlich werden Simulationen durchgeführt, in denen Fahrstraßenkonflikte ignoriert werden. Damit kann näherungsweise ein hypothetischer Zweigleisbetrieb mit Parallelfahrmöglichkeiten in den Knoten abgebildet werden. Auch wenn ein vollständig zweigleisiger Ausbau vermutlich nicht realistisch ist, kann so eine obere Grenze der Bedienqualität ermittelt werden, die durch gezielte Ausbauten maximal erreichbar wäre.

3. Ergebnisse

In der Folge werden die Ergebnisse der Simulationsstudie vorgestellt: Hierbei wird zunächst die räumliche Erreichbarkeit des DRRT-Angebots innerhalb des Netzes analysiert. Anschließend wird der Einfluss von Fahrgastaufkommen, Fahrzeuganzahl, Fahrzeugkapazität sowie Infrastruktur auf die Buchungsvorlaufzeit betrachtet. Für die Analyse werden die Wartezeiten der bedienten Buchungsanfragen betrachtet. Weiter wird der Anteil der innerhalb eines Betriebstages nicht bedienten Anfragen ausgewiesen.

3.1. Netzüberblick Servicequalität

Bild 1 stellt die mittleren Vorlaufzeiten innerhalb des Netzes je Haltepunkt für das Basiszenario (vgl. Tabelle 1) schematisch dar. Es ist ersichtlich, dass die Vorlaufzeiten insbesondere in und zwischen Braunschweig und Wolfenbüttel vergleichsweise gering sind. Die angesetzte Nachfragestruktur führt zu zahlreichen Fahrten innerhalb der Stadtgebiete Braunschweig und Gifhorn, was in kurzen Reise- und Vorlaufzeiten resultiert. Ebenso besteht eine hohe Fahrt-nachfrage nach Wolfenbüttel. Die Strecke bis Schöppenstedt profitiert möglicherweise von dem eingleisigen Abschnitt östlich von Wolfenbüttel, da Züge, die bis Wolfenbüttel-Linden fahren, im Falle eines folgenden Zuges ihre Fahrt nur in Richtung Schöppenstedt fortsetzen können. Die kurze Stichstrecke zum Hafen Braunschweig (gelb) hat nur ein geringes Fahrgastaufkommen und dazu nur eine einzige Station. Hierdurch scheint die Bedienung sehr unregelmäßig zu sein, da die Priorität der wenigen Fahrgäste meist von anderen Anfragen überwogen wird.

3.2. Nachfrage

Das grundlegende Mobilitätsbedürfnis kann aus dem regionalen Nahverkehrsplan abgeleitet werden. Aufgrund fehlender Referenzfälle ist jedoch schwer vorherzusehen, welcher Anteil der Fahrten das DRRT-Angebot nutzen würde. Die Nachfrage für DRRT wird auf 7000 Reisende pro Tag bzw. 1000 bis 2000 Reisende pro Streckenast eingeschätzt. Die Betrachtung unterschiedlicher Nachfrageniveaus hilft zu verstehen, unter welchen Voraussetzungen DRRT eine geeignete Alternative zu klassischen Verkehrsangeboten sein kann.

In Bild 2 sind die Vorlaufzeiten und der Bediengrad für eine Nachfrage von 1000

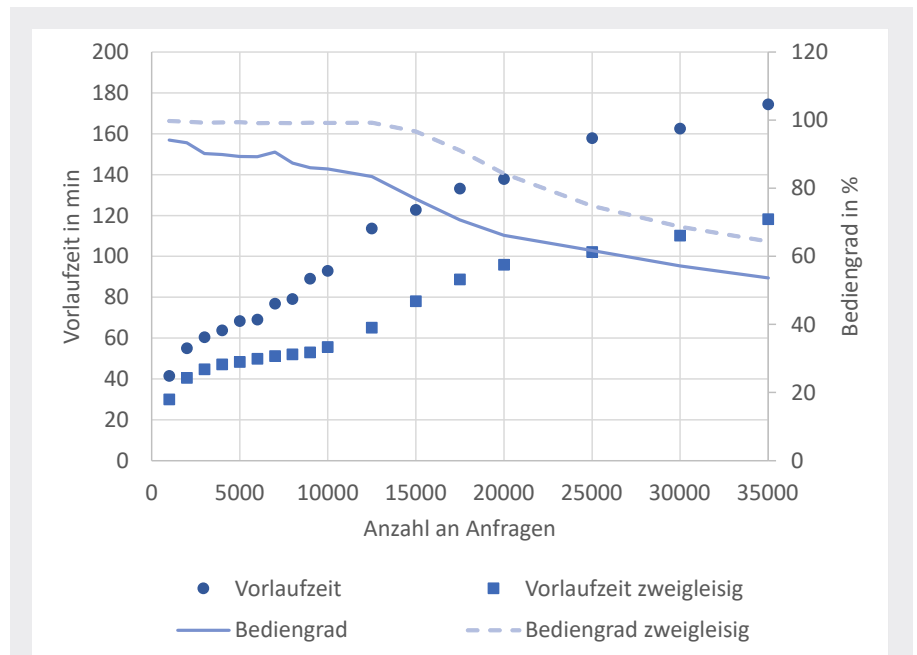
bis 35 000 Anfragen pro Tag dargestellt. Der Bediengrad gibt den Anteil der Anfragen an, die innerhalb des simulierten Betriebstages am Zielort angekommen sind. Nach einem steilen Anstieg der Vorlaufzeit von 1000 auf 2000 Anfragen ergibt sich näherungsweise ein linearer Zusammenhang zwischen der Nachfrage und der mittleren Vorlaufzeit. Mit zunehmender Anzahl an Anfragen können aufgrund von Bündelungseffekten zwar immer mehr Reisende bedient werden, jedoch sinkt der relative Anteil an bedienten Anfragen. Selbst bei nur 1000 Anfragen pro Tag und bei Annahme von Zweigleisigkeit (Ignorieren der Fahrstraßenkonflikte) können die Vorlaufzeiten des Linienbetriebs von etwa 25 Minuten nicht erreicht werden. Grund dafür ist die räumliche Ausdehnung des Untersuchungsgebietes (ca. 38 x 30 km) und die damit einhergehenden Fahrzeiten, welche die zehn Fahrzeuge zurücklegen müssen, um alle im Netz verteilten Anfragen abzudecken.

3.3. Anzahl der Fahrzeuge

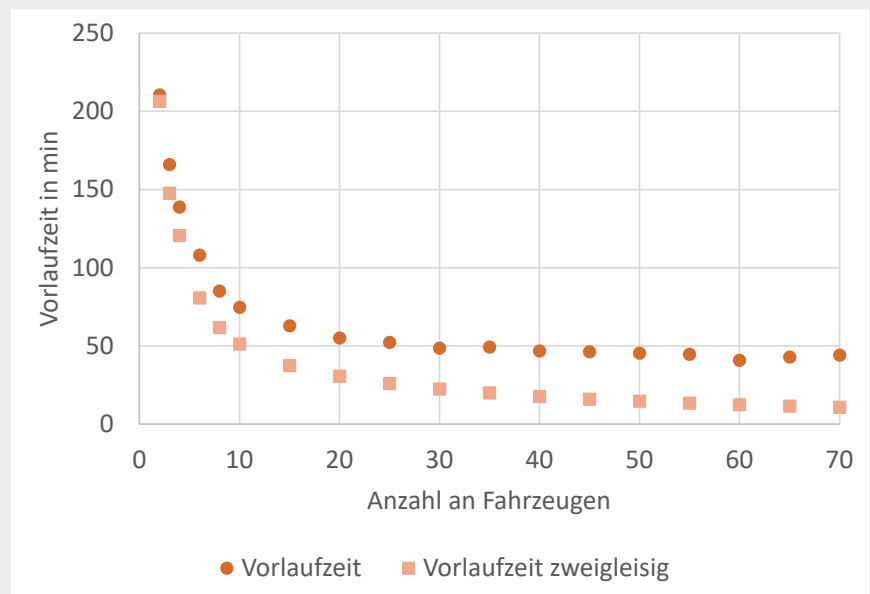
Die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge hat einen großen Einfluss auf die Vorlaufzeiten. Wie in Bild 3 dargestellt, kann der Zusammenhang gut durch eine Potenzfunktion mit ihrem asymptotischen Verlauf dargestellt werden. Bei Einsatz von bis zu zehn Fahrzeugen kann eine deutliche Reduzierung der Vorlaufzeiten erreicht werden. Mit zusätzlichen Fahrzeugen sind weitere Verbesserungen der Angebotsqualität möglich, jedoch fallen die Gewinne zunehmend geringer aus. Bei mehr als 30 Fahrzeugen ergeben sich durch die Restriktionen aufgrund von Eingleisigkeit oder Fahrstraßenkonflikten kaum noch Verbesserungen. Wird stattdessen von einer durchgehend zweigleisigen Infrastruktur ausgegangen, so können die Bedienzeiten weiter verbessert werden. Hervorzuheben ist, dass bei gezieltem Ausbau der Infrastruktur (Zweigleisigkeit) und 25 Fahrzeugen näherungsweise die Vorlaufzeiten des Linienbetriebs von 25 Minuten erreicht werden könnten.

3.4. Kapazität der Fahrzeuge

Als weiterer Design-Parameter wird die Fahrgastkapazität der Fahrzeuge, also die Anzahl der zur Verfügung stehenden Steh- und Sitzplätze, schrittweise verändert. Ähnlich wie bei der Anzahl an Fahrzeugen können im Bereich niedriger Kapazität durch leichte Erhöhungen bereits deutli-



2: Vorlaufzeiten und Bediengrad in Abhängigkeit von der Anzahl der Anfragen



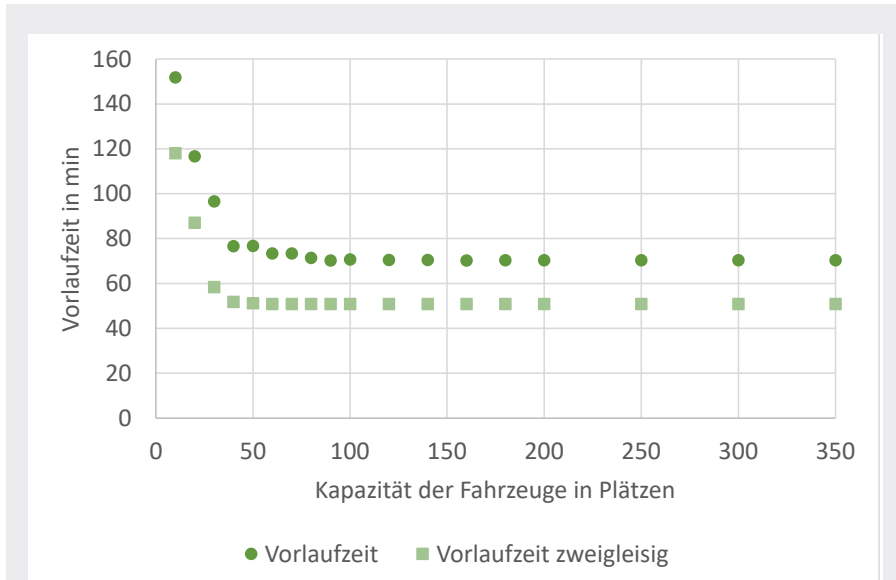
3: Vorlaufzeiten in Abhängigkeit von der Anzahl der Fahrzeuge

che Verbesserungen der Angebotsqualität erreicht werden. Im simulierten Zweigleisbetrieb ergeben sich ab einer Kapazität von 40 Personen keine wesentlichen Vorteile mehr. Bei Berücksichtigung der Zugkonflikte kann es zur Akkumulation von Anfragen kommen, wodurch eine Kapazität von bis zu 90 Personen noch weitere Reduzierungen erlaubt. Im Unterschied zur Anzahl von Fahrzeugen tritt die Sättigung gleichermaßen mit und ohne Fahrstraßenkonflikten auf. Da die Anzahl der Fahrzeuge konstant gehalten wird, bleibt das Potenzial an Fahr-

straßenkonflikten weitgehend unabhängig von der Fahrzeugkapazität.

4. Diskussion und weiterer Forschungsbedarf

Durch die Untersuchung unterschiedlicher Systemdesigns konnten die Relevanz der untersuchten Design-Parameter und ihr Einfluss auf die Vorlaufzeit des DRRT besser verstanden werden. Abschließend werden die Ergebnisse diskutiert und Optimierungspotenziale für die weitere Forschung beschrieben.



4: Vorlaufzeiten in Abhängigkeit von der Kapazität der Fahrzeuge

Wie aus den Sensitivitätsanalysen hervorgeht, sind die Vorlaufzeiten des Linienbetriebs im untersuchten DRRT-Betrieb mit Ausbau der Infrastruktur (Zweigleisigkeit) und dem Einsatz von 25 Fahrzeugen erreichbar. Die Ergebnisse lassen erwarten, dass für die Flexibilität des Betriebs das Vorhalten kleiner „Kreuzungsinself“ zielführend ist. Dabei ist allerdings zu bedenken, dass die Dispositionsheuristik des DRRT nur lokal anhand der maximal bedienten Anfragen optimiert und daher noch deutliche Verbesserungspotenziale aufweist. Durch eine optimierte Netzabdeckung könnte die Vorlaufzeit vermutlich auch mit weniger Fahrzeugen auf das Niveau des Linienbetriebs gesenkt werden. In Verbindung mit den geringeren Reisezeiten und dem Wegfall von Umstiegen könnte mit DRRT dann ein deutlich attraktiveres Angebot erreicht werden. Allerdings würden die Kosten für ein solches DRRT-Design je nach Anzahl und Kosten der Fahrzeuge voraussichtlich höher ausfallen. In einer vergleichenden Betrachtung der Lebenszykluskosten ergab sich bei etwa acht DRRT-Fahrzeugen Kostenparität mit dem Linienbetrieb [2].

Festzuhalten bleibt, dass die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge eine große Rolle für die Vorlaufzeiten in DRRT spielt. Demgegenüber fällt die Kapazität der Fahrzeuge weniger stark ins Gewicht, wenn im untersuchten System ein Mindestmaß von 40 bis 60 Plätzen gegeben ist. Das vorliegende DRRT-Konzept funktioniert also besser mit vielen kleinen Fahrzeugen statt mit

wenigen großen. Die Gegenüberstellung unterschiedlicher Nachfrageintensitäten zeigt, dass DRT auf der Schiene tendenziell besser für niedrigere Nachfrageniveaus geeignet ist. Je höher die Nachfragedichte, desto mehr bietet sich ein klassischer Linienbetrieb mit größeren Zugeinheiten an, bei welchem die Bahn ihre Vorteile als Massentransportmittel ausspielen kann.

4.1. Direktverbindungen

Charmant und gleichzeitig Begrenzung des entworfenen DRRT ist die Auslegung auf Direktverbindungen. Reisende freuen sich darüber, dass Umsteige wegfallen, was einen großen Komfortgewinn darstellt. Zudem profitieren die Fahrgäste von geringeren Reisezeiten. Die Direktverbindungen stellen aber auch eine Begrenzung dar, weil ein pendelnder Betrieb wie im konventionellen Fahrplan auf den eingleisigen Strecken nicht darstellbar ist. Allerdings hat sich auch gezeigt, dass die Einschränkungen der eingleisigen Abschnitte nicht alleine verantwortlich sind für die deutlich höheren Vorlaufzeiten. Trotz Ignorieren der Fahrstraßenkonflikte sanken die Bedienzeiten immer noch nicht auf das Niveau des Linienbetriebs. Dies könnte auf das Optimierungspotenzial der Fahrzeugdisposition hinweisen.

4.2. Verbesserung der Planungsalgorithmen

Zur Verbesserung der Disposition könnten beispielsweise globale Einfüge-Heuristiken

eingesetzt werden, wie sie aus dem straßengebundenen DRT bekannt sind [4]. Diese müssten jedoch an die Besonderheiten und Einschränkungen des Bahnbetriebs wie Mindestzugfolgezeiten und eingleisige Abschnitte angepasst werden. Weitere Verbesserungen könnten erzielt werden, wenn auch eine Vorreservierung von Anfragen berücksichtigt wird. Nicht zuletzt wird gerade bei hoher Anzahl von Fahrzeugen relevant, wie sich die Fahrzeuge verhalten, wenn keine oder wenige Anfragen vorliegen. Eine intelligente Verteilung der Fahrzeuge, welche mit einer auf Mobilitätsdaten basierenden Prognose der Nachfrage kombiniert wird [5, 6], könnte eine verbesserte Netzabdeckung und damit auch akzeptable Bedienzeiten bei geringen Fahrzeugzahlen ermöglichen [7].

4.3. Ausbau der Infrastruktur

Angesichts der identifizierten Probleme, auf eingleisigen Strecken nachfrageorientiert und gleichzeitig wirtschaftlich Bahnbetrieb durchzuführen, stellt sich die Frage, inwieweit Nebenstrecken kostengünstig und gezielt mit zweigleisigen Begegnungsabschnitten oder kurzen Kreuzungsinself ausgebaut werden können. Während dies in klassischen Betriebsformen (EBO) sehr große Aufwände und Flächenverbräuche mit sich bringt, könnte gerade bei Fahrzeugen mit einer geringen Kapazität auf schmalere Lichtraumprofile, beispielsweise nach BOStrab, ausgewichen werden. Hierdurch wäre ein zweigleisiger Ausbau auch in engen örtlichen Situationen und kostengünstiger möglich. Über die weiteren Implikationen eines Betriebs nach BOStrab (z. B. niedrigere Höchstgeschwindigkeit) wäre allerdings noch zu forschen. Vermutlich könnten Fahrzeuge dann mit geringerem Gewicht ausgelegt und kostengünstiger produziert werden, was wirtschaftlichen Spielraum bezüglich der Anzahl an DRRT-Fahrzeugen erlaubt.

4.4. Fazit

Durch die systematische Untersuchung verschiedener Designs konnten neue Erkenntnisse für die Gestaltung von bedarfsorientierten Schienenverkehrssystemen gewonnen werden. Trotz der Einschränkungen des Modells ergeben sich daraus wichtige Hinweise bezüglich des Systemdesigns, die in weiteren Arbeiten an DRRT berücksichtigt werden können und so zu besseren Lösungen beitragen. Besonderes

Augenmerk sollte bei bedarfsorientierten Betriebskonzepten auf Bedienzeiten und die räumliche Disposition der Fahrzeuge gelegt werden. Einen weiteren Schlüsselaspekt könnte die Gewährleistung von Anschlussverbindungen darstellen, welche bei Anbindung an Taktknoten von hoher Relevanz sind. Nicht zuletzt wird das DLR auch die energetischen Aspekte näher betrachten, die insbesondere in sekundären Netzen ohne Oberleitung und aufgrund der flexiblen Einsatzplanung der Fahrzeuge eine große Rolle spielen. •

Literatur

[1] Zieger, S.; Niessen, N.: „Opportunities and Challenges for the Demand-Responsive Transport Using Highly Automated and Autonomous Rail Units in Rural Areas“, 2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 11-17 Juli 2021.

[2] Ritzer, P.; Flamm, L.; Scheier, B.; Mönsters, M.: „Demand Responsive Rail Transport auf Regionalstrecken - Konzept, Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit“, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, 6/2021, pp. 38-43.

[3] Regionalverband Großraum Braunschweig, Nahverkehrsplan 2020 Großraum Braunschweig, Braunschweig: Regionalverband Großraum Braunschweig, 2020.

[4] Quadrioglio, L.; Dessouky, M.; Palmer, K.: „An insertion heuristic for scheduling Mobility Allowance Shuttle Transit (MAST) services“, Journal of Scheduling, 2007, pp. 25-40.

[5] Franco, P.; Johnston, R.; McCormick, E.: „Demand responsive transport: Generation of activity patterns from mobile phone network data to support the operation of new mobility services“, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Bd. 131, 2020, pp. 244-266.

[6] Alsaleh, N.; Faroo, B.: „Interpretable Data-Driven Demand Modelling for On-Demand Transit“, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Bd. 154, 2021, pp. 1-22.

[7] Quadrioglio, L.; Dessouky, M. M.; Ordóñez, F.: „A simulation study of demand responsive transit system design“, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Bd. 42, Nr. 4, 2008, pp. 718-737.

Summary

Demand Responsive Transport in rail transport – an analysis of the system design

Demand Responsive Transport in rail transport is suitable to also serve low-demanded routes with direct connections. Short travel times are sometimes facing long preparation times for the booking. An examination of different system designs shows, that the preparation times can be lowered by systemized expansion of the infrastructure and an increased number of vehicles which, however, have to be distributed intelligently in the network.



Zuverlässigkeit, die immer gut ankommt.

BLITZDUCTORconnect



Anforderungen der Ril 819.0808 zuverlässig erfüllen

- Sicher: Rückwirkungsfreiheit und Fernüberwachung für hohe Anlagenverfügbarkeit und maximale Betriebssicherheit
- Kompakt: Zwei Signaladern auf 6 mm Baubreite lösen Platzprobleme
- Einfach: Schnell und ohne Werkzeug montiert



de.hn/4VmVH

DEHN protects.

www.dehn.de