

Bewertung innovativer Fahrzeug- und Betriebskonzepte für Nebenstrecken – Eine Fallstudie

Um auf (zu reaktivierenden) Nebenstrecken im ländlichen Raum ein tragfähiges Angebot schaffen zu können, bietet sich der Einsatz kleiner, kostengünstiger Fahrzeuge einerseits und bedarfsorientierter Betriebskonzepte andererseits an. Zur gesamtwirtschaftlichen Bewertung solcher Einsatzszenarien ist ein methodischer Ansatz notwendig, der hier dargestellt und an einem Fallbeispiel demonstriert wird.



1. Einleitung

Mitte des letzten Jahrhunderts gewann der private Pkw eine immer größere Bedeutung in der Mobilität, zulasten von Eisenbahnnebenstrecken gerade in ländlichen Räumen. Mit dem Schienenbus und einem eingeschränkten Angebot wurde versucht, die wirtschaftliche Tragfähigkeit zu wahren, doch letztendlich wurden viele Nebenstrecken, die keine Bedeutung für den Güterverkehr hatten, stillgelegt oder gar rückgebaut. Seit Anfang dieses Jahrhunderts erlebt der Schienenverkehr eine Renaissance. Als Massentransportmittel und auf den meisten Strecken schon lange elektrifiziert, ist er eines der klimaschonendsten Verkehrsmittel und ist mehr denn je gefragt. In Folge wurden bereits einige Nebenstrecken reaktiviert und weitere Strecken werden hinsichtlich Eignung für eine Reaktivierung untersucht. Insbesondere Strecken, die Güterverkehr aufweisen, werden für den Schienenpersonenverkehr ertüchtigt.

Lokal emissionsfreie, fahrdrahtunabhängige Antriebe für nicht-elektrifizierte Strecken sowie die Automatisierung des Betriebs können zur Vermeidung von Klimagasen und Betriebskosten führen und die Streckenreaktivierungsabsichten begünstigen. Damit das Angebot auf diesen Strecken, insbesondere in Neben- und Schwachverkehrszeiten, wirtschaftlich tragfähig und qualitativ hochwertig ist, werden aktuell wieder kostengünstige

Fahrzeugkonzepte mit kleinerer Gefäßgröße entwickelt [1,2,3]. Abbildung 1 zeigt das vom DLR entwickelte Fahrzeugkonzept NGT TAXI [1].

Diese Fahrzeugkonzepte bringen auch die Möglichkeit für bedarfsorientierte Angebots- und Betriebskonzepte mit sich, die in diesem Beitrag als Demand-Responsive Rail Transport (DRRT) bezeichnet werden, in Analogie zu ähnlichen bedarfsorientierten Angeboten auf der Straße wie On-Demand Service, Ridepooling oder Demand-Responsive Transport. In früheren Veröffentlichungen [4,5] wurde auf einem Teilnetz bestehend aus mehreren Nebenstrecken um Braunschweig Hbf nachgewiesen, dass ein DRRT-Betrieb auf eingleisigen Strecken betrieblich durchführbar ist und für Fahrgäste Vorteile wie eine verringerte Reisezeit, aber auch Herausforderungen wie zum Teil lange Buchungsvorläufe mit sich bringt. Offen ist, wie geeignet dieses Konzept auch für den Betrieb einzelner Reaktivierungsstrecken ist.

Dieser Beitrag beschreibt eine Methode zur Bewertung neuer Fahrzeug- und Betriebskonzepte mittels Nutzen-Kosten-Untersuchung und anschließender Sensitivitätsanalyse und wendet diese auf ein Fallbeispiel an. Mit Blick auf Nebenstrecken im ländlichen Raum werden diese Innovationen separat betrachtet: Einerseits der Einsatz kleiner und leichter Fahrzeugkonzepte anstatt konventioneller Fahrzeuge, andererseits, ob und wann ein DRRT-Betrieb Vorteile im Vergleich



Philipp Widmann, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig
philipp.widmann@dlr.de



Benedikt Scheier, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig
benedikt.scheier@dlr.de



Benedikt Hertel, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Fahrzeugkonzepte, Berlin
benedikt.hertel@dlr.de



Christoph Streuling, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Fahrzeugkonzepte, Berlin
christoph.streuling@dlr.de



1: NGT TAXI Fahrzeugkonzept entwickelt am DLR

zu einem Linienbetrieb mit identischen, kleinen Fahrzeugen bieten kann.

2. Methodik der Nutzen-Kosten-Analyse des DRRT-Betriebs

2.1. Allgemeine Methodik und Zielsetzung

Es wurde die Bewertungsmethode Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) gewählt, die aus einem ressourcenbezogenen gesamtwirtschaftlichen Ansatz besteht, angelehnt an das Verfahren „Vereinfachtes Verfahren für Reaktivierungsvorhaben; Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im öffentlichen Personennahverkehr (Version 2016+)“ [6]. Das Verfahren sieht einen sogenannten Mitfall-Ohnefall-Vergleich vor. Der Mitfall sieht die reaktivierte Strecke und den darauf ablaufenden Betrieb des Schienenpersonennahverkehrs (SPNV) vor, während im Ohnefall unterstellt wird, dass der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) ohne die reaktivierte Eisenbahnstrecke abläuft (i. d. R. Linienbusbetrieb). Das Ergebnis der NKA ist ein Nutzen-Kosten-Verhältnis, das im Nenner (Kosten) aus dem Kapitaldienst für die Infrastrukturinvestitionen besteht, die für die Reaktivierung der Eisenbahnstrecke und der Ladeinfrastruktur aufgewendet werden müssen. Im Zähler (Nutzen) werden die Differenzen zwischen dem Mitfall und dem Ohnefall berechnet für folgende Indikatoren:

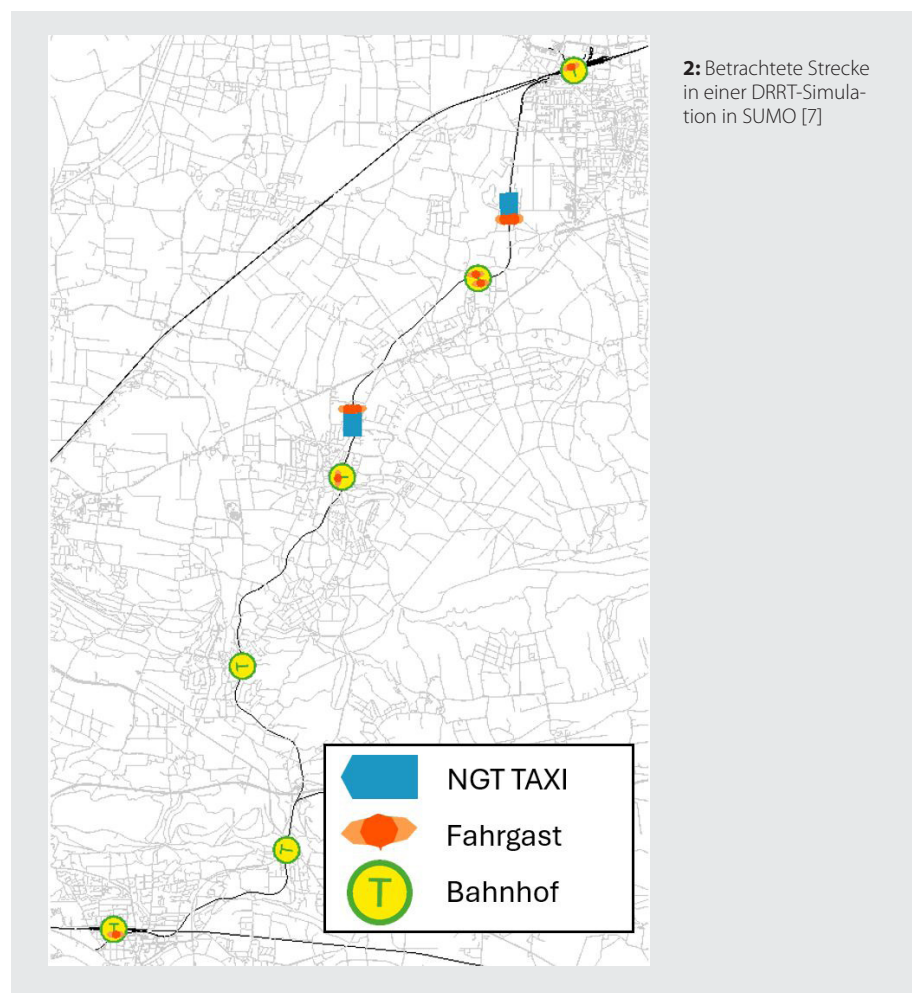
- verkehrlicher Nutzen bestehend aus vermiedenen Pkw-Betriebskosten und möglichen Reisezeitersparnissen
- Differenz der Unfallfolgekosten

- Nutzen aus vermiedenen CO₂-Emissionen
- Nutzen aus vermiedenen Schadstoffemissionen
- Differenz der Betriebskosten ÖPNV inklusive der Fahrzeugkosten

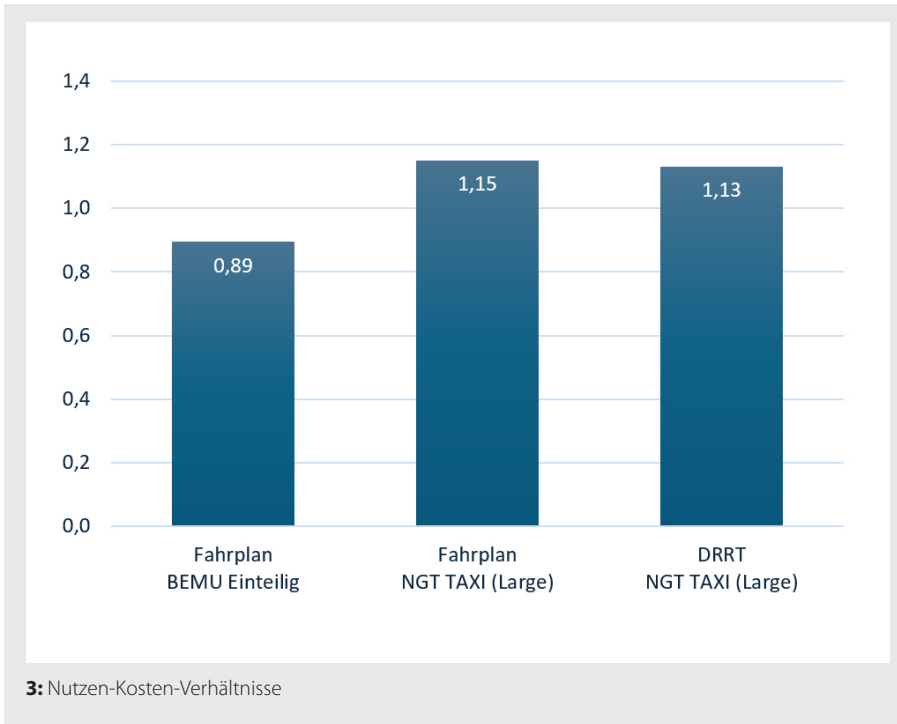
- Differenz der Unterhaltungskosten Infrastruktur.

Ein wichtiger Inputparameter zur Bestimmung dieser Indikatoren ist die Verkehrsverlagerung von der Straße und dem substituierten ÖPNV zu dem reaktivierten SPNV, gemessen in Personenkilometer je Jahr (Pkm/a). Im Ergebnis der Bewertung werden verschiedene Mitfälle miteinander mittels des Nutzen-Kosten-Verhältnisses verglichen.

Durch einen DRRT-Betrieb ändern sich die Zugkilometer, die in die Kostenberechnung eingehen. Je geringer die Zugkilometer, umso geringer der Aufwand bzw. die Betriebskosten. Auf Nutzenseite bietet der DRRT-Betrieb Fahrten zeitlich flexibel an, was für die Reisenden günstigere Anschlüsse ermöglichen kann, um Reisezeiten zu verringern. Dies bringt positive Effekte und mögliche Verkehrsverlagerungen, deren Wirkungen außerhalb des Untersuchungsgebietes liegen. Großräumigere Verkehrsnachfragemodelle wären nötig, um dies in einer Nutzen-Kosten-Untersuchung quan-



2: Betrachtete Strecke in einer DRRT-Simulation in SUMO [7]



tifizieren zu können. Um die Wirkungen des DRRT im Vergleich zum Linienbetrieb analysieren zu können, wird deshalb der Indikator der Wartezeit (zwischen gewünschtem Abfahrtszeitpunkt und Fahrtantritt) analysiert. Je geringer die Wartezeit, umso höher ist der Nutzen bzw. die Angebotsqualität. In einer Sensitivitätsanalyse für den DRRT-Betrieb wurde die Entwicklung dieser Indikatoren in Abhängigkeit von der Nachfrage ausgewertet.

2.2. Simulation des DRRT-Betriebs

Zugkilometer und Wartezeit ergeben sich im DRRT-Betrieb nicht aus einem angesetzten Fahrplan, sondern hängen von der Anzahl sowie der räumlichen und zeitlichen Verteilung der zu bedienenden Fahrtanfragen ab. Sie werden deshalb simulativ mittels der DLR-Open Source-Verkehrssimulationssoftware SUMO [7] erhoben. In der intermodalen Simulation können sowohl die Züge inklusive ihrer Fahrdynamik und des Ladezustands der Akkumulatoren als auch die einzelnen Fahrgäste und ihre Fahrtanfragen simuliert werden. Zusätzlich erlaubt SUMO, mittels einer Python-Schnittstelle interaktiv in die Simulation einzugreifen, um neue Fahrtanfragen einzufügen sowie die Züge zu disponieren. So wird der dynamische Charakter des bedarfsorientierten Verkehrs modelliert.

Zur Zuweisung der Fahrtanfragen auf die Züge und zur Disposition der Fahrzeu-

ge wird im Hintergrund ein heuristischer Optimierungsansatz verfolgt. Dabei werden neben der Erfüllung möglichst vieler Fahrtanfragen als oberstes Ziel auch die Gesamtreisezeit der Fahrgäste als Qualitätsmetrik und die Zugkilometer als Kostenfaktor gegeneinander abgewogen. Eine zusätzliche Funktion der Heuristik ist es, zu geeigneten Zeitpunkten Zwischenhalte zum Aufladen der Traktionsbatterien einzuplanen, da diese nicht im Vorherein in eine feste Umlaufplanung integriert werden können.

Je Szenario werden in der Analyse mehrere Simulationsdurchläufe mit jeweils zufällig generierten Fahrtanfragen simuliert, deren Verteilung auf einer räumlichen Nachfrageverteilung und Tagesganglinie basiert, und die Ergebnisse gemittelt.

Tabelle 1: Fahrzeugparameter

Fahrzeug		NGTTAXI (Large)	NGTTAXI (Small)	BEMU - einteilig
Länge	m	16,7	11,3	27
Sitzplätze	[1]	44	21	75
Sitzplätze + 15% Stehplätze	[1]	51	24	84
Betriebsgewicht	T	22	15	55
Maximalgewicht	T	32	20	69,4
Energiezuführung	[-]	DC	DC	AC 15/25 kV
Anschaffungskosten	[€]	2,5 Mio.	1,5 Mio.	4,5 Mio.
Anschaffungskosten Ladestation	[€]	0,8 Mio.	0,8 Mio.	2,25 Mio.

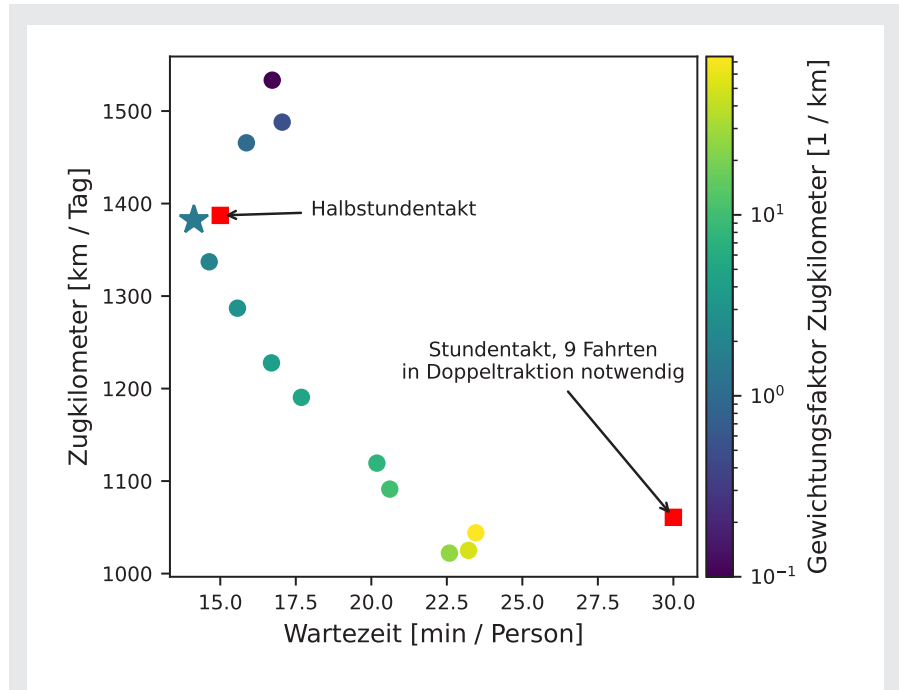
3. Fallstudie

3.1. Einsatzgebiet

In einer Fallstudie wird diese Methodik auf einen Repräsentanten für ein mögliches Streckenreaktivierungsprojekt angewendet, der in großen Teilen auf einer realen Strecke in Niedersachsen basiert. Folgende Kerncharakteristika wurden angenommen: Auf einer eingleisigen Strecke von 20,4 km werden sechs Kreuzungsbahnhöfe bedient. Die einfache Fahrzeit bei Bedienung aller Halte beträgt 24 min, sodass ein Linienverkehr im Stundentakt inklusive Wendezeiten mit einem Fahrzeug gerade abgedeckt werden kann. Die Nachfrage wird basierend auf Verkehrsmodellen auf ca. 1250 Fahrgäste (entsprechend ca. 12.000 Personenkilometer) pro Tag angesetzt, die entsprechend einer typischen Tagesganglinie mit Spitzen im Berufsverkehr und der räumlichen Nachfrage verteilt sind. Vereinfachend wird für den DRRT-Betrieb angenommen, dass sich die Fahrgäste gleichmäßig innerhalb der Stunde verteilen. Abbildung 2 zeigt eine DRRT-Simulation auf der betrachteten Strecke.

3.2. Vergleich Fahrzeugkonzepte

In dieser Untersuchung werden zwei Fahrzeugtypen betrachtet (Tabelle 1): Das vom DLR entwickelte Fahrzeugkonzept NGT TAXI [1] als Beispiel für neuartige Schienenbuskonzepte und ein generischer einteiliger Batteriezug (Battery Electric Multiple Units / BEMU). Bei beiden Fahrzeugen handelt es sich um einteilige, batterieelektrische Fahrzeuge. Das NGT TAXI ist durch den modularen Aufbau in verschiedenen Größen konfigurierbar. Für diese Arbeit wird die größte Variante, NGT TAXI (Large)



4: Zielkonflikt zwischen Wartezeit und Zugkilometern für unterschiedliche Gewichtungen in der DRRT-Heuristik

mit 44 Sitzplätzen, sowie die kleinste Variante NGT TAXI (Small) mit 21 Sitzplätzen betrachtet. Die Nachladung der Traktionsbatterien erfolgt mittels Ladestationen an den Endbahnhöfen.

4. Ergebnisse

4.1. Nutzen-Kosten-Analyse

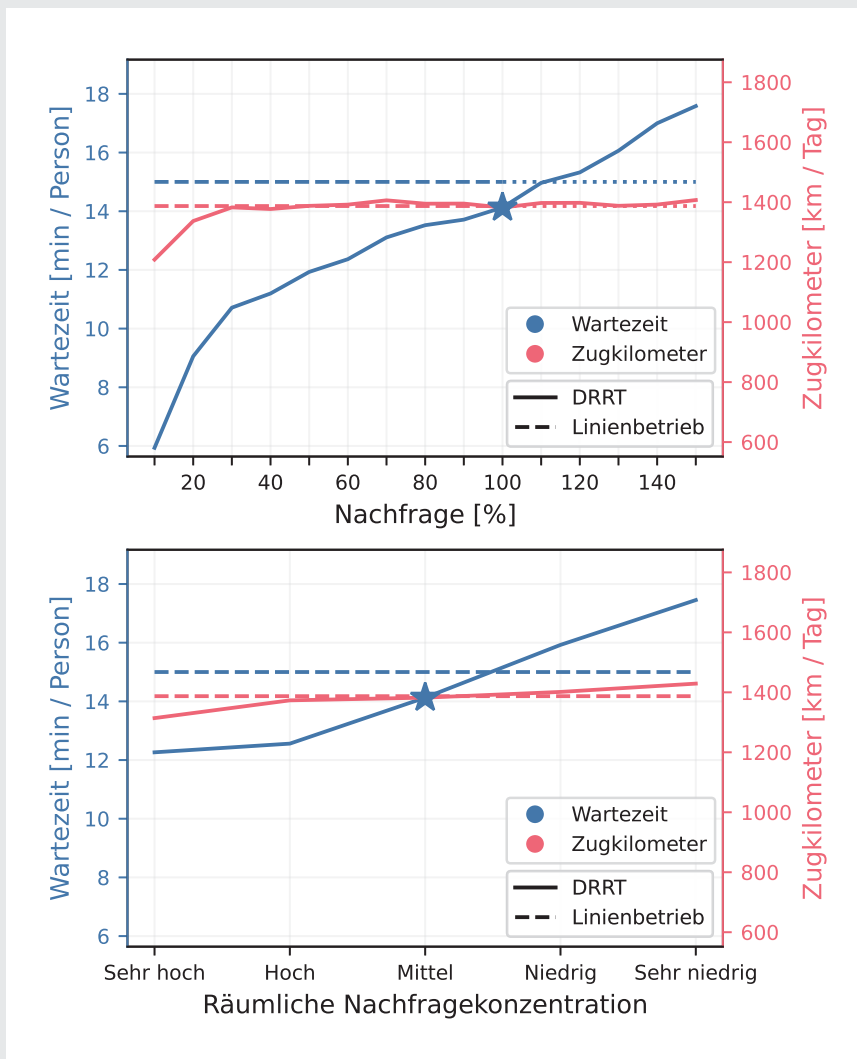
Die Nutzen-Kosten-Analyse erfolgt für den Vergleich des einteiligen BEMU mit dem NGT TAXI (Large). Für den Vergleich des starren fahrplanbasierten Betriebs gegenüber dem flexiblen bedarfsorientierten Betrieb wird der DRRT mit dem NGT TAXI (Large) herangezogen. Die Abbildung 3 zeigt die Nutzen-Kosten-Verhältnisse (NKV) der drei Fälle. Ein NKV größer 1 bedeutet, dass der Nutzen die Kosten durch Infrastrukturinvestitionen für die Reaktivierung der Nebenstrecke und der Ladeinfrastruktur übertrifft.

In allen drei Fällen ist der verkehrliche Nutzen gleich, da eine gleiche Verkehrsverlagerung unterstellt ist. Ebenso ist in allen Fällen das Fahren in Einfachtraktion hinreichend, wobei das NGT TAXI bei der zugrunde gelegten Nachfrage höher ausgelastet ist. Das NGT TAXI erreicht durch geringere Kosten für Fahrzeugbeschaffung, -instandhaltung und Traktionsenergie einen höheren NKV als der BEMU. In Folge sind auch die CO₂- und Schadstoffemissionen geringer.

In beiden NGT TAXI-Mitfällen (Fahrplan und DRRT) bewegt sich das NKV in der gleichen Größenordnung. Das eingesetzte Fahrzeug ist im DRRT-Fall fast die gesamte Betriebszeit im Einsatz, um die Nachfrage zu bedienen, was einem Linienbetrieb sehr nahekommt. Dabei steigen dennoch im DRRT-Fall die gefahrenen Kilometer leicht, was einen leichten Anstieg der Betriebskosten und der CO₂- und Schadstoffemissionen verursacht. Fahrgäste warten im Schnitt 30,6 Minuten, was ebenfalls keine Verbesserung gegenüber einem Linienbetrieb darstellt.

4.2. DRRT-Betrieb mit kleinen Fahrzeugen

Um das Angebot für Fahrgäste zu verbessern, wird als Alternativszenario zu einem NGT TAXI (Large) zusätzlich der DRRT-Betrieb mit zwei NGT TAXI (Small) untersucht, die zusammen eine vergleichbare Fahrgastkapazität aufweisen. Auf eine Wirtschaftlichkeitsbewertung wird hier verzichtet, da sowohl zum erhöhten verkehrlichen Nutzen durch das verbesserte Angebot als



5: Auswirkung unterschiedlicher Fahrgastnachfragen auf Wartezeit und Zugkilometer im DRRT-Betrieb

auch zu den Kosten einer Automatisierung, die für einen wirtschaftlichen Betrieb mit mehreren Fahrzeugen notwendig ist, keine belastbaren Abschätzungen vorliegen.

Stattdessen wird das verbesserte Angebot eines DRRT-Betriebs mit zwei Fahrzeugen mit einer Taktverdichtung auf einen Halbstundentakt verglichen. Dabei wird die Wartezeit der Fahrgäste (zwischen gewünschtem und tatsächlichem Fahrtantritt) und die Zugkilometer ausgewertet. Als durchschnittliche Wartezeit für den Linienverkehr wird die halbe Taktzeit angesetzt, auch wenn Fahrgäste ihre Abfahrtszeit in der Praxis an den Fahrplan anpassen. Im DRRT-Betrieb wird eine kurze Vorbestellzeit von 10 Minuten angenommen, die nicht Teil der Wartezeit ist, um eine effizientere Bündelung der Fahrtanfragen bei weiterhin hoher Flexibilität zu ermöglichen.

Zwischen Wartezeit und Zugkilometern existiert ein Zielkonflikt, der in der DRRT-Heuristik unterschiedlich gewichtet werden kann. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis für unterschiedliche Gewichtungen, wobei gelbere Punkte die Reduktion der Zugkilometer höher priorisieren. Die Referenzfälle des Linienbetriebs sind rot eingezeichnet. Es ist gut zu erkennen, dass der DRRT-Betrieb ein Angebotskontinuum zwischen Stunden- und Halbstundentakt ausfüllen kann. Eine zu starke Vernachlässigung der gefahrenen Kilometer scheint für die genutzte Heuristik dagegen ungeeignet, da sie überraschenderweise zu leicht erhöhten Wartezeiten führt. Für geeignete Priorisierungen ergeben sich im Vergleich zum Halbstundentakt nur geringfügige Vorteile, im Vergleich zum Stundentakt mit kleinen Fahrzeugen zeigt sich eine niedrigere durchschnittliche Wartezeit bei gleichen Zugkilometern. Die als Stern markierte Gewichtung, die das beste Angebot bietet, wird im Folgenden weiter verfolgt.

In Abbildung 5 wird analysiert, wie sich eine Variation der Nachfrage auf die Wartezeit (blau) und Zugkilometer (rot) des DRRT-Betriebs auswirkt. Die gestrichelten Linien stellen die Referenzwerte für einen Halbstundentakt dar, der Stern das Basiszenario. Im oberen Diagramm wird die Nachfrage skaliert, wobei ein klarer Zusammenhang zwischen der Auslastung des DRRT-Betriebs und der Wartezeit deutlich wird. Bei niedriger Nachfrage entsteht ein sehr attraktives Angebot, während DRRT für die Basisnachfrage, die in den Spitzenstunden einer Vollaustattung auf einigen Streckenabschnitten entspricht, noch geringe Vorteile gegenüber einem

Halbstundentakt bietet. Für weiter steigende Nachfrage bleibt ein DRRT-Betrieb zwar durchführbar, die Fahrzeuge sind aber zunehmend überlastet, was längere Wartezeiten zu den Spitzenstunden erzeugt. Analoges gilt auch für einen Linienbetrieb, sodass in beiden Fällen der Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge notwendig würde. Die Zugkilometer hingegen bewegen sich fast durchgehend auf dem Niveau des Linienbetriebs, sodass eher nicht von einem Effizienzgewinn auszugehen ist.

Das untere Diagramm in Abbildung 5 zeigt den Effekt alternativer räumlicher Nachfrageszenarien: Im Basisfall (Mittel) konzentriert sich das Fahrgastaufkommen etwas stärker auf den nördlichen Endbahnhof und benachbarte Halte, während an den anderen Halten eine etwas niedrigere Nachfrage herrscht. Diese Konzentration wird nun verstärkt (Hoch, Sehr hoch) oder reduziert (Niedrig, Sehr niedrig). Es wird deutlich, dass ein DRRT-Betrieb für konzentrierte Nachfrageprofile, wie sie bei Anbindung an einen zentralen Verkehrsknoten oft auftreten, eher geeignet ist – erklärbar dadurch, dass zwischen stärker nachgefragten Stationen mehr Fahrten durchgeführt werden können. Auch hier zeigt sich jedoch ein nur geringer Einfluss auf die Zugkilometer.

5. Fazit und Ausblick

Die Reaktivierung und Ertüchtigung von Nebenverkehrsstrecken bietet das Potenzial, den umweltfreundlichen SPNV zu stärken und auszubauen. Die hier durchgeführte gesamtwirtschaftliche Betrachtung macht deutlich, dass die Entwicklung von Fahrzeugen mit kleinen Gefäßgrößen und umweltfreundlichen Antrieben ein entscheidender Baustein ist, um Anschaffungs- und Betriebskosten zu senken und bereits bei niedrigerer Nachfrage ein positives Nutzen-Kosten-Verhältnis zu erzielen.

Der Einsatz kleiner Fahrzeuge bietet darüber hinaus prinzipiell die Möglichkeit zur Durchführung eines bedarfsorientierten Verkehrs auf der Schiene. In der analysierten Fallstudie zeigt sich diese Betriebsform durchaus kompetitiv mit einem Linienbetrieb mit gleich vielen Fahrzeugen, ohne dabei jedoch bei hoher Auslastung entscheidende Effizienzgewinne zu erzielen. Interessant bleibt hier die Untersuchung zusätzlicher Strecken unterschiedlicher Länge und Charakteristik. Gegenstand weiterer Forschung bleibt außerdem, wie sich der Betrieb mit mehreren kleinen Fahr-

zeugen im DRRT- oder Linienbetrieb mit verdichteter Taktfrequenz auf den Nutzen in einem größeren Betrachtungsgebiet (in Form von höherer Verkehrsverlagerung und vorteilhafteren Umstiegen) und die Kosten (durch Automatisierung und den Wegfall von Personalkosten) auswirkt. Dabei ist insbesondere auch die Akzeptanz eines DRRT-Betriebs im Vergleich zum Linienbetrieb entscheidend. •

DOI 10.61067/260132

Literatur

- [1] J. König, L. Gebhardt, B. Hertel, M. Konrad, C. Meirich und T. Müller, „Neuartiges, modulares Schienenfahrzeugkonzept für Neben- und Reaktivierungsstrecken,“ ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, Nr. 3/2025, pp. 44-49, März 2025.
- [2] C. Schindler, „Aachener Rail Shuttle auf der Innotrans vorgestellt – wie geht es weiter?,“ ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, Nr. 1+2/2025, pp. 60-65, Januar+Februar 2025.
- [3] „DRAISY - Lohr,“ [Online]. Available: <https://www.lohr.fr/de/catalogue/draisy-de/>. [Zugriff am 15 10 2025].
- [4] P. Ritzer, L. Flamm, B. Scheier und M. Mönsters, „Demand Responsive Rail Transport auf Regionalstrecken – Konzept, Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit,“ ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, Nr. 6/2021, pp. 38-43, Juni 2021.
- [5] P. Ritzer, M. Mönsters, L. Flamm und N. Weik, „Demand Responsive Transport im Schienenverkehr – Eine Analyse des Systemdesigns,“ ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, Nr. 6/2022, pp. 35-39, Juni 2022.
- [6] „Standardisierte Bewertung von Verkehrsweginvestitionen im öffentlichen Personennahverkehr Version 2016+ – Verfahrensanleitung,“ [Online]. Available: <https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/standardisierte-bewertung-2016plus-verfahrensanleitung.html>. [Zugriff am 15 10 2025].
- [7] P. Alvarez Lopez, M. Behrisch, L. Bieker-Walz, J. Erdmann, Y.-P. Flötteröd, R. Hilbrich, L. Lücken, J. Rummel, P. Wagner und E. Wießner, „Microscopic Traffic Simulation using SUMO,“ in 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), Maui, USA, 2018.

Summary

Evaluation of innovative vehicle and operating concepts for branch lines – A case study

An assessment methodology for the benefit-cost ratio of servicing or reactivating regional railway lines is described, with a focus on the effects of using small-scale, electric vehicles and demand-responsive transport concepts. In a case study, the smaller, more cost-efficient vehicles prove important in achieving a positive benefit-cost ratio. Demand-responsive transport performs competitively with line operation, but does not significantly outperform line operation in the analyzed case.