



Artikel

Überlegungen zum Optimierungsdesign von Stadtbussen Netzwerkplanung

Xi Yu ¹, Huan Cao ², Ke Cao ², Liang Zou ² und Lingxiang Zhu ^{3,*}¹ Hangzhou Chuangtou Film and Television Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 13806523777@139.com² Hochschule für Bau- und Verkehrswesen, Universität Shenzhen, Shenzhen 518060, China; 1910473029@email.szu.edu.cn (HC); 2110474187@email.szu.edu.cn (KC); zouliang@szu.edu.cn (LZ)³ Hochschule für Mathematik und Informatik, Südchinesische Landwirtschaftsuniversität, Guangzhou 510642, China

* Korrespondenz: hcitsy@163.com

Zusammenfassung: Derzeit werden die Optimierung des öffentlichen Verkehrsnetzes und die Fahrzeugplanung unabhängig voneinander schrittweise durchgeführt. Durch Analysen wurde jedoch festgestellt, dass Planungsinformationen wie Streckenpläne ein wichtiger Faktor bei der Routenauswahl der Passagiere sind. Um den Optimierungseffekt weiter zu verbessern, schlägt dieser Artikel daher eine innovative Idee zur gleichzeitigen Optimierung des Liniennetzes und der Planung vor. Basierend auf dem Aufbau eines real-virtuellen öffentlichen Verkehrsnetzes erstellt dieser Artikel ein synchrones Optimierungsmodell für das Liniennetz und die Planung, indem sowohl die Warte- als auch die Bordzeit der Fahrgäste berücksichtigt werden. Um die Berücksichtigung der Fahrgäste bei unterschiedlichen Routenoptionen zu erreichen, wurde ein auf Yen basierender Algorithmus zur Durchquerung des kürzesten Pfades vorgeschlagen, um die Anzahl und Gewichtung der kürzesten Pfade zwischen demselben Linienweg zu analysieren, und zur Lösung des Modells wurde ein genetischer Algorithmus verwendet. Schließlich wurde die Wirksamkeit des Modells anhand von Zahlenbeispielen verifiziert und die Ergebnisse zeigten, dass die synchrone Optimierung der phasenweisen Optimierung überlegen war: Die Kosten für die Fahrgastzeit wurden um 21,5 % gesenkt, die Kosten für den Busbetrieb um 13,7 % und die Gesamtkosten des Bussystems um 18,0 %.

Schlüsselwörter: Routenauswahl; Abfahrtsintervall; Planung; Relevanz; synchrone Optimierung



Zitat: Yu, X.; Cao, H.; Cao, K.; Zou, L.; Zhu, L. Überlegungen zum Optimierungsdesign der Planung städtischer Busnetze. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 6337. <https://doi.org/10.3390/app14146337>

Empfangen: 22. Juni 2024

Überarbeitet: 15. Juli 2024

Akzeptiert: 18. Juli 2024

Veröffentlicht: 20. Juli 2024



Copyright: © 2024 bei den Autoren.

Lizenznehmer MDPI, Basel, Schweiz.

Dieser Artikel ist ein Open Access-Artikel vertrieben unter den Bedingungen und Bedingungen der Creative Commons

Namensnennungslizenz (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Einleitung

Mit der Beschleunigung der Urbanisierung und der rasanten wirtschaftlichen Entwicklung in unserem Land steigen auch die Zahl der Kraftfahrzeuge und der Reisebedarf der Einwohner rasant an. Verkehrsstaus sind an der Tagesordnung und werden immer schwerwiegender.

Um den aktuellen Druck auf den Verkehr zu verringern, fördert unser Land energisch die Entwicklung des öffentlichen Nahverkehrs, insbesondere in Großstädten, in denen sich der öffentliche Nahverkehr rasch entwickelt. In Shenzhen beispielsweise überstieg die Länge der in Betrieb befindlichen Schienenverkehrslinien im Jahr 2020 400 km und erreichte 422,6 km, ein Anstieg von 33,9 % gegenüber dem Vorjahr. Die Länge der in Betrieb befindlichen Buslinien erreichte 21.310,53 km, ein Rückgang von 1,4 % gegenüber dem Vorjahr. Derzeit bilden in den Großstädten des Landes Verkehrsmittel wie Busse, U-Bahnen, Taxis und Straßenbahnen zusammen ein öffentliches Verkehrsnetz, wobei der Gesamtpassagierstrom kontinuierlich zunimmt. Im Jahr 2019 betrug das durchschnittliche tägliche Passagieraufkommen im öffentlichen Nahverkehr in Shenzhen 11,06 Millionen Passagiere pro Tag, was einem Anstieg von 2,65 Millionen Passagieren pro Tag gegenüber 2011 entspricht. Im Jahr 2020 betrug das durchschnittliche tägliche Passagieraufkommen aufgrund der Auswirkungen der COVID-19-Pandemie für das gesamte Jahr 8,226 Millionen Passagiere, was einem Rückgang von 25,6 % gegenüber dem Vorjahr entspricht. Als sich die Pandemielage entspannte und neue U-Bahn-Linien eröffnet wurden, stieg der Passagieraufkommen im öffentlichen Nahverkehr im Dezember auf den höchsten Stand des Jahres und erreichte ein durchschnittliches tägliches Passagieraufkommen von 10,603 Millionen Passagieren, was einer Erholung auf 94,1 % des gleichen Zeitraums im Jahr 2019 entspricht.

Um die Transporteffizienz von Bussen zu verbessern und Angebot und Nachfrage des Bussystems auszugleichen, ist es notwendig, das Busnetz neu zu planen und zu gestalten. Dadurch werden erhebliche Überschneidungen mit Schienenverkehrslinien vermieden, redundante Routen und Ressourcen werden vermieden.

Abfall. Gleichzeitig ist es von entscheidender Bedeutung, nahtlose Verbindungen und Umstiege zwischen Bussen und Schienenverkehr sicherzustellen, um so den Reisebedürfnissen der Passagiere gerecht zu werden und die Reisekosten zu senken.

Nach der Durchführung nationaler und internationaler Forschungen und Analysen zu Busnetzen wurde festgestellt, dass bestehende Studien die Auswirkungen der Fahrplangestaltung auf die Optimierung von Busnetzen übersehen. Sie berücksichtigen auch nicht die Wartekosten der Passagiere bei der Berechnung der Gesamtreisekosten für Passagiere. Die Analyse der Daten zum Durchziehen von Fahrkarten ergab eine moderate Korrelation zwischen der Routenwahl der Passagiere und der Häufigkeit der Busverbindungen. Daher berücksichtigt dieses Dokument die Fahrplangestaltung bei der Optimierung von Busnetzen.

Wissenschaftler im In- und Ausland haben relativ ausgereifte Forschungen zur Optimierung städtischer Busnetze durchgeführt. Der Großteil der Forschung zur Netzwerkoptimierung konzentriert sich auf drei Aspekte: Theorie, Modellkonstruktion und Algorithmenentwicklung.

Theoretische Methoden: Pu Han et al. schlugen eine Busnetzwerk-Optimierungsmethode auf Basis mehrschichtiger komplexer Netzwerke vor [1]. Mitra Subhro et al. präsentierten eine mehrzielige Busnetzwerk-Optimierungsmethode [2]. Petit Antoine et al. führten eine Busnetzwerk-Entwurfsmethode auf Basis aggregierter Netzwerke und kontinuierlicher Approximationsmodelle ein [3]. Szeto et al. schlugen eine Netzwerkoptimierungsmethode für städtische Verkehrsnetze und Straßennetze vor [4]. Zhang L entwickelte eine Hilfoptimierungsmethode für öffentliche Verkehrsnetze (PTRN), die auf Verbindungsvorhersagen basiert [5]. Klier MJ stellte eine neuartige Optimierungsmethode für die Gestaltung öffentlicher Verkehrsnetze vor, die die erwartete Gesamtzahl der Fahrgäste im öffentlichen Nahverkehr unter Budgetbeschränkungen maximiert [6].

Yin J untersuchte die koordinierte Fahrplanoptimierung von städtischen Schienenverkehrsnetzen und schlug eine mathematische Formel zur synchronen Generierung des am besten koordinierten Fahrplans vor [7]. Liang M entwickelte ein Mehrzielmodell auf der Grundlage zweier widersprüchlicher Ziele und entwickelte zwei Populationen zur gleichzeitigen Optimierung des Netzes und der Frequenz [8]. Wang C stellte eine mehrstufige Methode zur mehrstufigen Netzwerkgestaltung vor [9].

Huang A untersuchte einen bedarfsgesteuerten öffentlichen Nahverkehrsdienst (DRT), der die Routen kontinuierlich auf Grundlage der dynamischen Fahrgastnachfrage anpasst und so die Systemleistung maximiert und gleichzeitig die bevorzugten Zeitfenster der Fahrgäste berücksichtigt [10]. Gong M schlug vor, ein modularisiertes, flottenbasiertes CB-Netzwerk auf Basis von Umstiegen zu entwerfen und gleichzeitig die Routenzuweisungen für die Fahrgäste zu optimieren [11]. Yang J schlug einen neuartigen Algorithmus zur anfänglichen Routensatzgenerierung und einen heuristischen Algorithmus zur alternierenden Routensatzgröße vor, eingebettet in ein Lösungsframework basierend auf dem nicht dominierten sortierenden genetischen Algorithmus II (NSGA-II), um ungefähre Pareto-Grenzen zu erzeugen [12]. Yao E stellte eine neue Methode (MVT-E-VSP) zur Planung von Elektrofahrzeugen verschiedener Typen vor [13]. Guo R optimierte die Betriebsleistung eines bilateralen BRT mit elastischer Nachfrage und minimierte so die allgemeinen Zeitkosten pro Fahrgast [14]. Li Wenyong et al. schlugen eine auf hierarchischem Clustering basierende Methode zur Planung von Mikrozirkulationsbusnetzwerken vor [15]. Shi Xiaowei et al. schlug eine Methode zur Optimierung des Schienenverkehrs-Zubringerbusnetzes vor, die auf dem Kürzestrouten-Beschriftungsmodell basiert [16]. Huang Min et al. schlugen eine Methode vor, um Busrouten verschiedener Ebenen zu konstruieren und diese separat nach verschiedenen Ebenen und Funktionen zu optimieren [17].

Yight F et al. lieferten einen hybriden Ansatz zur Optimierung der theoretischen Methode für reihenfolgeabhängige Pip

Modellaufbau: Ren Hualing et al. schlugen ein neues Buszuteilungsmodell auf Basis von Linien- und Knotenstrategien vor [19]. Shi Qingshuai et al. schlugen ein Bewertungsmodell zur Optimierung öffentlicher Transportrouten auf Basis von Busdaten aus mehreren Quellen vor [20]. Fan W führte eine heuristische Methode auf Basis von Tabu Search (TS) ein und wandte sie auf die Gestaltung öffentlicher Transportnetzwerke mit variabler Nachfrage an [21]. Huang D entwickelte ein neues Optimierungsmodell für die Gestaltung bedarfsgerechter, maßgeschneiderter Busnetzwerke (CB), einschließlich dynamischer und statischer Phasen [22]. Li X schlug ein gemeinsames Optimierungsmodell für die Planung konventioneller Ladenetze für Elektrobusse und den Einsatz fester Ladegeräte vor, das Teilladerichtlinien und zeitabhängige Strompreise berücksichtigt [23]. Steiner K entwickelte ein Optimierungsmodell für die strategische Netzwerkplanung von Buslinien [24]. Chai S entwickelte ein mehrzieliges Busnetzwerk-Designmodell, das nicht nur die Auswirkungen auf Umsteigeverbindungen, sondern auch Verzögerungen der Fahrgastreisezeit aufgrund von Staus berücksichtigt [25]. Wei M präsentierte ein mathematisches

Modell zur Gestaltung von Zubringerbusverkehren zur Verbesserung der Servicequalität und Erreichbarkeit von Verkehrsknotenpunkten [26].

Algorithmenentwicklung: Z. Tang et al. schlugen vor, lokale deterministische Such- und globale Evolutionsalgorithmen zur Busnetzoptimierung zu koppeln [27]. Kuan et al. führten Forschungen zur Busnetzoptimierung durch, bei denen sie eine Kombination aus genetischen Algorithmen und Ameisenkolonialgorithmen verwendeten [28]. Ngamchai et al. führten eine Methode ein, die verschiedene genetische Operationsmechanismen für den Entwurf einer Busnetzoptimierung kombiniert [29]. Bourbonnais PL verwendete präzise Daten zum lokalen Straßennetz und repräsentative Daten zur Nachfrage des öffentlichen Nahverkehrs zur genetischen Algorithmusoptimierung, um vernünftige Lösungen zu generieren [30]. Ding Jianxun et al. schlugen vor, einen verbesserten K-Shortest-Path-Algorithmus für die Busnetzoptimierungsforschung zu verwenden [31]. Luo Xiaoling et al. schlugen vor, den K-Means-Clustering-Algorithmus zu verwenden, um Clusteranalysen an Bushaltestellen für die Netzwerkoptimierungsforschung durchzuführen [32]. Gao Mingyao et al. schlugen vor, einen verbesserten Particle Swarm Optimization (PSO)-Algorithmus zur Lösung des Busnetzoptimierungsmodells zu verwenden [33]. Xin Yi et al. schlug vor, den NSGA-II-Algorithmus zu verwenden, um das mehrzielige Busnetzwerk-Optimierungsmodell zu lösen [34]. Wang Ning et al. schlugen vor, einen zellulargenetischen Algorithmus zu verwenden, um das Feeder-Busnetzwerk-Modell zu lösen [35]. Yu Lijun et al. entwickelten einen verbesserten Simulated-Annealing-Algorithmus, um das Netzwerkoptimierungsmodell zu optimieren und zu lösen [36]. Wu Kexin et al. verwendeten einen verbesserten Ant-Colony-Algorithmus zur Netzwerkoptimierung von Busnetzwerken [37].

Insgesamt hat die Optimierungsforschung für Busnetze zahlreiche hervorragende Forschungsergebnisse sowohl in theoretischen Methoden und Modellkonstruktion als auch in der Algorithmenentwicklung erzielt, die eine theoretische Forschungsgrundlage für die Optimierungsdesignarbeit des in diesem Artikel beschriebenen Netzes bilden. Diese Erfolge weisen jedoch noch einige Mängel in ihrer praktischen Anwendung auf: (1) Ignorierte Routenwahl der Passagiere:

Sowohl inländische als auch internationale Wissenschaftler gehen bei der Optimierung von Busnetzen häufig davon aus, dass Passagiere die kürzeste Zeit oder die wenigsten Umstiege wählen. Wenn jedoch mehrere Routen zwischen denselben Ausgangs- und Zielbahnhöfen (OD) die Kriterien der Passagiere erfüllen, können Passagiere selektiv unterschiedliche Routen für ihre Fahrt wählen.

(2) Der Einfluss der Fahrplangestaltung auf die Optimierung des Busnetzes wurde nicht berücksichtigt: Frühere Untersuchungen haben den Einfluss der Streckenplanung auf die Routenwahl der Fahrgäste während der Netzgestaltungsphase oft übersehen. Bei der Berechnung der Gesamtreisekosten für Fahrgäste wurden die Wartekosten an Bushaltestellen nicht berücksichtigt. Diese unvollständige Berücksichtigung bei der Berechnung der Gesamtzeitkosten für Fahrgäste steht in direktem Zusammenhang mit der Fahrzeugplanung, da die Wartekosten der Fahrgäste direkt mit der Planung korrelieren.

Damit die Leser die Struktur und den Inhalt dieses Dokuments besser verstehen, ist in Abbildung 1 die technische Roadmap der Kapitelinhalte dargestellt. Im Folgenden finden Sie einen kurzen Überblick über jedes Kapitel:

Abschnitt 2 stellt die Konstruktion und Lösung des integrierten Optimierungsmodells für das Busnetz und die Busfahrpläne vor. Zunächst wird der Forschungsumfang des Busnetzproblems in diesem Dokument definiert, die Annahmen für die Modellkonstruktion vorgestellt und dann die Zielfunktion und die Einschränkungen des integrierten Optimierungsmodells beschrieben. Basierend auf dem Aufbau eines realen und virtuellen Busnetzes, das die Interessen von Fahrgästen und Betreibern in Einklang bringt, wird in diesem Kapitel das integrierte Optimierungsmodell entwickelt.

Abschnitt 3 wendet Yens Algorithmus an, um erreichbare Pfade zwischen denselben Ursprungs-Ziel-Paaren (OD) zu analysieren. Die Pfade werden anhand ihrer Gewichte sortiert und der Parameter K wird flexibel eingestellt, um verschiedene ODs zu berücksichtigen. Da solche Probleme typischerweise NP-schwer sind und einen hohen Rechenaufwand und eine hohe Komplexität aufweisen, werden normalerweise intelligente Optimierungsalgorithmen eingesetzt. Angesichts der Rechenkomplexität beim Aufbau groß angelegter Busnetze haben wir den effizienten genetischen Algorithmus gewählt, um das integrierte Optimierungsmodell zu lösen.

auf Basis des genetischen Algorithmus anhand spezifischer Fallstudien. Durch die Festlegung von Gewichten zwischen den Stationen wurde die Wirksamkeit des Algorithmus im Optimierungsprozess überprüft. Die Fälle wurden schrittweise und synchron optimiert und die Ergebnisse miteinander verglichen. Abschließend wurde eine Sensitivitätsanalyse mit Fokus auf verschiedene Interessengruppen durchgeführt, die die Schlussfolgerung bestätigte, dass die Kostensenkungseffekte signifikanter sind.

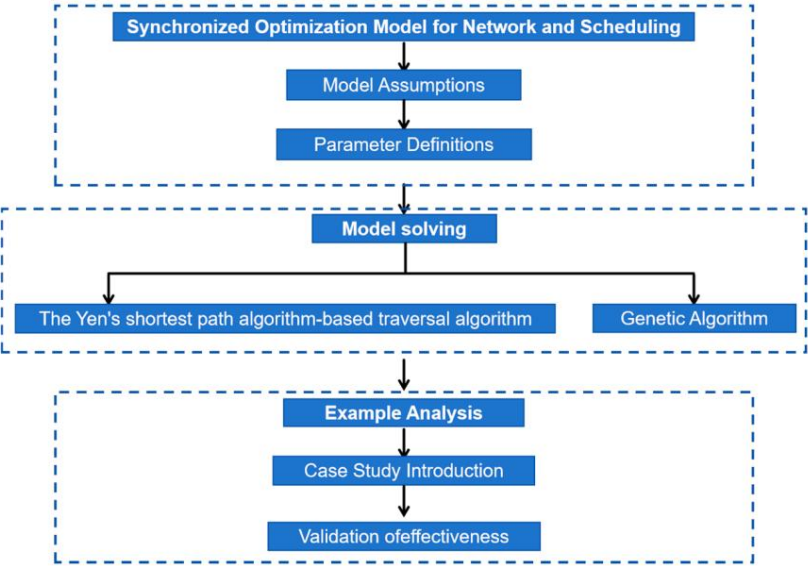


Abbildung 1. Technische Roadmap der Abschnittsinhalte.

2. Synchronisiertes Optimierungsmodell für Netzwerk und Planung

Aufgrund der Vielschichtigkeit der Einflussfaktoren auf das Bussystem wurde folgender Prozess verifiziert. Die Fälle wurden schrittweise und synchron optimiert, mit Ergebnissen verglichen. Schließlich wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, die sich auf verschiedene behandelten Interessengruppen bestätigen die Schlussfolgerung, dass die Kostensenkungseffekte bedeutender sind.

- (1) Die Fahrgäste wählen die Route mit der kürzesten Reisezeit. Wenn mehrere Routen die kürzeste Reisezeit bieten, wählen die Fahrgäste die Route auf der Grundlage des Anteils der Gesamtstrecke .
- (2) Die Wartekosten für die Fahrgäste werden mit der Hälfte der durchschnittlichen Wartezeit angenommen. Aufgrund der Vielschichtigkeit der Faktoren, die das Bussystem beeinflussen, werden für die ausgewählte Route, die der Hälfte des Abfahrtsintervalls der Fahrzeuge entspricht, folgende Annahmen getroffen, um das angesprochene Problem der Busnetzoptimierung genau zu definieren
- (3) Die Fahrzeuge auf jeder Route werden als identisch angenommen, mit Ausnahme der Anzahl der (1) Passagiere wählen die Route mit der kürzesten Reisezeit; wenn mehrere Routen möglich sind
- (4) Die Gesamtreisezeit für Passagiere umfasst Wartezeiten, Zeit im Fahrzeug und (2) Die Wartekosten für Passagiere werden mit der Hälfte der durchschnittlichen Wartezeit angenommen.
- (5) Der Umstieg von Fahrgästen ist auf dieselbe Haltestelle beschränkt. Wenn es keine direkte Verbindung gibt (3) Die Fahrzeuge auf jeder Route werden als identisch angenommen, mit Ausnahme der Anzahl der
- (6) Es wird davon ausgegangen, dass die Fahrgäste das nächste verfügbare Fahrzeug des gewünschten Fahrzeugs besteigen können, die Gehzeit vom Ausgangspunkt zur Bushaltestelle und die Gehzeit von der Bushaltestelle zum Ziel.
- (7) Die Gehzeit vom Ausgangspunkt zur Bushaltestelle und Gehzeit von der Bushaltestelle zur für die gewählte Route, die das Ziel. gewählte Route.
- (8) Der Umstieg von Fahrgästen ist auf dieselbe Haltestelle beschränkt. Wenn keine direkte Verbindung besteht, Zwischen dem Start- und Zielort müssen die Passagiere an einer Haltestelle auf der ersten Route aussteigen und in einen anderen Bus umsteigen, der diese Haltestelle passiert, um zum Ziel zu gelangen, nur unter Berücksichtigung Umsteigen an der gleichen Haltestelle.
- (9) Es wird davon ausgegangen, dass die Fahrgäste das nächste verfügbare Fahrzeug zur gewünschten Fahrtstrecke nach Ankunft an der Haltestelle, ohne dass es zu Kapazitätseinschränkungen der Fahrzeuge kommt.

2.2. Parameterdefinitionen

Tij(X): Im Busnetz X ist die kürzeste Reisezeit für Passagiere nach Reise von Station i zu Station j (s);

T_{wij} : Die Wartezeit für Passagiere, die von Standort i zu Standort j auf dem von ihnen gewählten kürzesten Weg reisen;

T_{Sij} : Die Haltezeit des Busses während seiner Fahrt vom Standort i zum Standort j (s);

T_{dij} : Bordzeit des Passagiers vom Standort i zum Standort j (s);

T_{Sij} : Die Haltezeit eines Busses während seiner Fahrt von der Station i zur Station j (s);

T_s : Die durchschnittliche Verweildauer eines Busses an einer Bushaltestelle (s);

T_r : Die Betriebszeit der Route r (s);

F: Betriebskosten (s);

M: Die Kosten für den Kauf eines Busses (bzw. Busse);

$\underline{N}$: Die Betriebskosten jeder Buslinie(n);

$\underline{N}$: Kosten pro Entfernungseinheit für einen Bus (s);

M: Die täglichen Anschaffungskosten pro Bus(s);

X: Busnetz;

Q_{ij} : Verkehrsnachfrage von Station i zu Station j; n: Die

Anzahl der Haltestellen zwischen den Stationen i und j auf der ausgewählten Route;

M^R Die Länge des Abschnitts zwischen den Stationen i und j auf der Route r (km); ij:

S: Die Gesamtzahl der dargestellten Stationen; Die Anzahl

r^S der Stationen zwischen den Stationen i und j auf der Route r; ij: lmin: Die

Mindestlänge einer Buslinie (km); lmax: Die maximale Länge

einer Buslinie (km); fmin: Das Mindestabfahrtsintervall für Busse

auf einer Buslinie; fr : Abfahrtsintervall für Busse auf der Route r; fmax: Das maximale Abfahrtsintervall für Busse auf einer Buslinie;

Lr : Die Länge der Route r (km); dr : Die geradlinige Entfernung zwischen Start- und Endpunkt der Route r (km); γ : Der

Gewichtungskoeffizient zwischen Zeitkosten und Betriebskosten; γ : Der Umrechnungskoeffizient zwischen

Zeitkosten und Betriebskosten; γ_w : Der Wartekoeffizient für Passagiere ergibt sich aus

der gleichmäßigen Anzahl an ankommenden Passagieren und der Poisson-Verteilung für ankommende Fahrzeuge , $\gamma_w = 0,5$;

X^R Der Wert ist 1, wenn der kürzeste Pfad von Standort i zu Standort j über Route r führt, und 0 ij: wenn dies nicht der Fall ist.

V: Die Durchschnittsgeschwindigkeit eines Busses (m/

S_{0i}^R Das Segment lij zwischen den benachbarten Stationen i und j auf der Route r hat den Wert 1, wenn ij: es auf der Route r liegt, und den Wert wenn dies nicht der Fall ist; Oder : Die Station i auf der Route r. i

2.3. Modellkonstruktion

Die Optimierung des Designs von Stadtbusnetzen mit Fahrplan zielt darauf ab, die Fahrgastzeit und die Busbetriebskosten zu minimieren. Zu den Einschränkungen zählen die Streckenlänge, die Taktfrequenz, nicht wiederkehrende Haltestellen und nichtlineare Streckenkoeffizienten. Für das Netz und die Fahrplangestaltung wird ein synchrones Optimierungsmodell entwickelt.

2.3.1. Die Zielfunktion

Das Optimierungsziel des Busnetzes sollte die Interessen von Fahrgästen und Busbetreibern umfassend berücksichtigen. Fahrgäste suchen kurze Reisezeiten, während Betreiber eine effiziente Ressourcennutzung und minimierte Investitionskosten anstreben. Daher werden bei der Optimierung des Busnetzes und des Fahrplanmodells in diesem Dokument die Interessen von Fahrgästen und Busbetreibern gleichzeitig berücksichtigt. Das Ziel besteht darin, die Reisezeit der Fahrgäste zu verkürzen und die Betriebskosten des Busses zu senken, um die Kosten für Fahrgäste und Busbetreiber im Busnetz zu minimieren.

Reisekosten des Passagiers

Die Reisekosten der Passagiere beziehen sich hauptsächlich auf die Gesamtreisezeit der Passagiere innerhalb der Netzwerk, das Warte- und Fahrzeugzeiten einschließt.

(1) Wartezeit In den

zuvor genannten Modellannahmen wird angenommen, dass die Fahrgäste bei ihrer Ankunft am Bahnhof den ersten Bus der Zielroute besteigen können, d. h. alle Fahrgäste können den nächsten planmäßigen Bus der Zielroute nehmen. Daher hängt die Wartezeit der Fahrgäste hauptsächlich von der Taktfrequenz der Route ab, auf die sie warten, wobei die Wartezeit der Fahrgäste die Hälfte der Taktfrequenz der ausgewählten Route beträgt. Die Wartezeit der Fahrgäste wird wie folgt ausgedrückt:

$$T_{wij} = \sum_{r=1}^R \frac{1}{f_r} \cdot \frac{x_{ij}^r}{y_r} \cdot \frac{1}{f_r} = \sum_{r=1}^R \frac{x_{ij}^r}{y_r} \cdot \frac{1}{f_r} \quad (1)$$

(2) Fahrzeugzeit Die

Fahrzeugzeit besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen: der Reisezeit zwischen den Haltestellen und der Verweilzeit an den Haltestellen. Lässt man den Einfluss der Straße und anderer externer Faktoren außer Acht, hängt die Reisezeit von der Entfernung und der Reisegeschwindigkeit ab, während die Verweilzeit von der Anzahl der Zwischenstopps abhängt. Daher werden Reisezeit und Verweildauer wie folgt dargestellt:

$$T_{dij} = \frac{1}{v} \sum_{r=1}^R \frac{x_{ij}^r}{y_r} \cdot \frac{1}{f_r} \cdot L_{ij}^R \quad (2)$$

$$T_{Sij} = T_s \sum_{r=1}^R \frac{x_{ij}^r}{y_r} \cdot \frac{1}{f_r} \cdot r_{S_{ij}} \quad (3)$$

Auf dieser Grundlage lassen sich die gesamten Zeitkosten für Passagiere wie folgt ausdrücken:

$$T = \sum_{i,j=1}^S \sum_{j=1}^S \frac{1}{f_r} \cdot \frac{x_{ij}^r}{y_r} \cdot \frac{1}{f_r} + \frac{1}{v} \sum_{r=1}^R \frac{x_{ij}^r}{y_r} \cdot \frac{1}{f_r} \cdot L_{ij}^R + T_s \sum_{r=1}^R \frac{x_{ij}^r}{y_r} \cdot \frac{1}{f_r} \cdot r_{S_{ij}} \quad (4)$$

Kosten des Busbetriebs Die

Kosten der Busbetreiber umfassen hauptsächlich die Beschaffung von Bussen, den Bau von Haltestellen, Löhne und Gehälter des Personals, Verwaltungsgebühren, Fahrzeugversicherung, Treibstoffkosten, Fahrzeugabschreibungskosten und Steuern usw. In diesem Dokument werden bei der Kostenbetrachtung nur die Betriebskosten von Bussen berücksichtigt, die sich hauptsächlich in den wirtschaftlichen Kosten niederschlagen. Dies bezieht sich insbesondere auf die Fahrzeugbeschaffungskosten und die Betriebskosten jeder Route innerhalb des Busnetzes.

(1) Kosten für die Fahrzeugbeschaffung

Um die Kosten für die Fahrzeugbeschaffung zu minimieren und die Fahrzeugauslastung zu maximieren, ist es notwendig, die Anzahl der Fahrzeuge so weit wie möglich zu reduzieren. Es ist jedoch auch wichtig sicherzustellen, dass an der Abfahrtsstation ein Bus verfügbar ist, um die nächste planmäßige Abfahrt für jede Route zu erreichen. Dies erfordert die Gewährleistung, dass die kumulierte Taktfrequenz größer ist als die Dauer jeder Route, was bedeutet, dass die für jede Route erforderliche Mindestanzahl an Fahrzeugen die folgende Bedingung erfüllen sollte:

$$y_{2n \min} \geq \frac{L_r}{v} \cdot \frac{1}{f_r} \quad (5)$$

Daher betragen die Mindestkosten für die Fahrzeugbeschaffung:

$$M = \sum_{r=1}^R \frac{n_r}{\min M} \quad (6)$$

(2) Kosten des Streckenbetriebs

Die Betriebskosten einer Buslinie umfassen hauptsächlich die Betriebskosten des Fahrzeugs, die in erster Linie von der Häufigkeit der Fahrten und den Kosten pro Fahrt abhängen. Daher werden die Mindestbetriebskosten einer Linie wie folgt dargestellt:

$$N = \sum_{r=1}^R \frac{2Tr}{\dot{y}_{SUBST\ r}} \quad (7)$$

Daher stellen sich die Kosten für den Busbetrieb wie folgt dar:

$$F = 2 \left(\sum_{r=1}^R \frac{Lr}{V} \cdot \frac{1}{fr} M + \frac{Tr}{N} \right) \quad (8)$$

2.3.2. Zwangsbedingungen

Um die im Modell festgelegten Bedingungen genauer zu definieren, werden die folgenden Einschränkungen auferlegt, um das Modell weiter einzuschränken:

(1) Streckenlänge Bei der Optimierung von Busnetzen erhöhen zu kurze Busstrecken die Betriebskosten, während zu lange Strecken den Fahrgastkomfort verringern. Um den Bedürfnissen der Fahrgäste besser gerecht zu werden, sollten die Strecken daher weder zu kurz noch zu lang sein. Die Länge jeder Strecke muss die folgende Einschränkung erfüllen:

$$l_{min} \leq L_r < l_{max} \quad (9)$$

(2) Taktfrequenz

Die richtige Taktfrequenz ist entscheidend. Eine zu große Taktfrequenz erhöht die Wartezeit der Fahrgäste, was zu höheren Kosten für die Fahrgastzeit führt. Andererseits führt eine zu kurze Taktfrequenz dazu, dass mehr Fahrzeuge benötigt werden, was zu höheren Betriebskosten für die Busbetreiber führt. Daher muss die Taktfrequenz die folgende Bedingung erfüllen:

$$f_{min} \leq f_r < f_{max} \quad (10)$$

(3) Nicht wiederkehrende Bushaltestellen

Um zu vermeiden, dass Buslinien Schleifen bilden, die die Fahrtkosten für die Passagiere erhöhen und zu einer Verschwendung von Ressourcen führen, wird im geplanten Busnetz die Einschränkung festgelegt, dass jede Buslinie nicht wiederkehrende Bushaltestellen enthalten darf. Dies bedeutet, dass jede Bushaltestelle auf jeder Buslinie nur einmal vorkommen darf.

$$\dot{O}_i^R = \dot{O}_j^R \quad ; i, j = 1, \dots, S; i \neq j; r = 1, \dots, R \quad (11)$$

(4) Nichtlinearer Koeffizient Um

übermäßige Umwege auf den festgelegten Routen zu vermeiden, die Reisezeitkosten für die Fahrgäste zu senken und die Qualität des Busverkehrs zu verbessern, wird der nichtlineare Koeffizient der Routen im synchronen Optimierungsmodell dieses Dokuments auf Grundlage des „Urban Road Traffic Planning and Design Code“ eingeschränkt.

$$\frac{Lr}{dr} \leq 1,4 \quad (12)$$

Traversierungsalgorithmus In diesem Dokument wird die Situation betrachtet, in der Passagiere während ihrer Reise eine Route wählen . Bei der Berechnung der Gesamtreisekosten für Passagiere zwischen verschiedenen Ausgängen

An Zielbahnhöfen (OD) wird davon ausgegangen, dass die Fahrgäste stets den kürzesten Weg wählen. In Fällen, in denen es jedoch mehrere kürzeste Pfade zwischen OD-Paaren gibt, ist es notwendig, die Auswahl der Fahrgäste zwischen diesen Pfaden zu berücksichtigen. Deshalb ist es wichtig, die kürzesten Pfade zwischen jedem OD-Paar zu analysieren und zu berechnen. Um diesem analytischen Bedarf gerecht zu werden, wird Yens kürzester Pfadalgorithmus ausgewählt, um die Szenarien mit den kürzesten Pfaden zwischen verschiedenen OD-Paaren zu analysieren. Der Yen-Algorithmus, der 1971 von Jin Y. Yen zur Lösung des KSP-Problems (K-Shortest Paths) vorgeschlagen wurde, basiert auf dem Kürzeste-Pfad-Algorithmus und berechnet die ersten K-kürzesten Pfade zwischen OD-Stationen. Er eignet sich zur Berechnung der K-kürzesten Pfade mit einer Quelle in gerichteten azyklischen Graphen mit nicht-negativ gewichteten Kanten [38]. In diesem Dokument ist der grundlegende Prozess der auf dem Yen-Algorithmus basierenden Kürzeste-Pfad-Durchquerung wie folgt

(1) Bei gegebener Ausgangsstation o und Zielstation d ist für die erste Durchquerung der Wert von K auf 1 zu setzen. Dadurch wird der erste kürzeste Pfad P1 für das OD-Paar und das entsprechende Gewicht Y1 ermittelt. (2) Bei der Suche nach dem zweitkürzesten

Pfad P2 mit $K = 2$ ist der Prozess wie folgt: γ_1 Aktualisieren Sie die kürzesten Pfade für jedes Segment: Setzen Sie zunächst die Gewichte aller Segmente auf dem Pfad P1 auf unendlich. Berechnen Sie den neuen kürzesten Pfad für jedes Segment, indem Sie die Gewichte der Segmente auf dem Pfad P1 nacheinander auf unendlich setzen. Verketteten Sie die resultierenden neuen kürzesten Pfade mit dem ursprünglichen Pfad P1. Die Anzahl der Berechnungen ist gleich der Anzahl der Segmente im Pfad. γ_2 Initialisieren Sie den Kandidatenroutensatz X. Wenn die im vorigen Schritt neu erhaltenen Pfade nicht leer sind und die Bedingungen nicht wiederkehrender Stationen erfüllen und sich vom zuvor ausgewählten Pfad P1 unterscheiden, fügen Sie sie dem Kandidatenroutensatz X hinzu. Entfernen Sie sämtliche Duplikate aus dem Kandidatenroutensatz X. γ_3 Wählen Sie die kürzeste Route und aktualisieren Sie den Kandidatenroutensatz X. Wählen Sie aus dem nicht leeren Kandidatenroutensatz X den Pfad mit der geringsten Gewichtung als zweitkürzesten Pfad P2 mit einer Gewichtung von Y aus. Entfernen Sie diesen Pfad aus dem Kandidatenroutensatz X. Dieser Prozess stellt sicher, dass der zweitkürzeste Pfad unter Berücksichtigung nicht wiederkehrender Stationen gefunden wird und Duplikate mit dem zuerst ausgewählten Pfad P1 vermieden werden.

2
od.

(3) Um den i-ten kürzesten Pfad P_i mit K gleich i zu finden, ist der Prozess wie folgt: γ_1 Aktualisieren Sie die kürzesten Pfade für jedes Segment: Beginnen Sie, indem Sie die Gewichte aller Segmente auf dem P_{i-1} -Pfad auf unendlich setzen. Berechnen Sie den neuen kürzesten Pfad für jedes Segment, indem Sie die Gewichte der Segmente auf dem P_{i-1} -Pfad nacheinander auf unendlich setzen. Verketteten Sie die resultierenden neuen kürzesten Pfade mit dem ursprünglichen P_{i-1} -Pfad. Die Anzahl der Berechnungen entspricht der Anzahl der Segmente im Pfad. γ_2 Initialisieren Sie den Kandidatenroutensatz X. Wenn die neu erhaltenen Pfade aus dem vorigen Schritt nicht leer sind und die Bedingungen nicht wiederholender Stationen erfüllen und sich von den zuvor ausgewählten Pfaden P_1 bis P_{i-1} unterscheiden, fügen Sie sie dem Kandidatenroutensatz X hinzu. Entfernen Sie alle Duplikate aus dem Kandidatenroutensatz X. γ_3 Wählen Sie die kürzeste Route und aktualisieren Sie den Kandidatenroutensatz X. Wählen Sie aus dem nicht leeren Kandidatenroutensatz X den Pfad mit dem minimalen Gewicht als i-ten kürzesten Pfad P_i mit einem Gewicht von Y. Entfernen Sie diesen Pfad aus dem Kandidatenroutensatz X. Wenn es mehrere Pfade mit demselben Gewicht Y_i gibt, wiederholen Sie den obigen Vorgang für jeden Pfad des i-ten kürzesten Pfades, der mit dem Gewicht Y erhalten wurde.

(4) Vergleiche das Gewicht Y_{od} mit dem Gewicht Y_{i-1} . Wenn Y_{od} größer ist als Y_{i-1} , setze K auf $i + 1$ und wiederhole Schritt (3) bis Y_{od} als Y ist, wird dieser Prozess fortgesetzt, bis die Schleife beendet wird. Das Ergebnis sind die Anzahl der kürzesten Wege und ihre entsprechenden Gewichte zwischen den angegebenen Ausgangs- und Zielstationen.

1
od
i
ist
od

3.2. Genetischer

Algorithmus Der genetische Algorithmus (GA) wurde in den 1970er Jahren von John Holland vorgeschlagen und ist ein intelligenter Optimierungsalgorithmus, der das evolutionäre Prinzip des „Überlebens des Stärkeren“ aus der Natur auf die Lösung von Optimierungsproblemen anwendet. Es handelt sich um einen iterativen Algorithmus, der nach der optimalen Lösung sucht und für seine breite Anwendbarkeit, Effizienz und gute Gesamtleistung bekannt ist [39].

Kombinieren Sie das oben erwähnte Optimierungsmodell für Netzwerk und Fahrplansynchronisation und entwerfen Sie anschließend einen genetischen Algorithmus für das Forschungsproblem. Der konkrete Entwurfsprozess ist wie folgt: 1.

Kodierung von Lösungen: Das in diesem Kapitel erstellte Optimierungsmodell für Netzwerk und Synchronisation dient hauptsächlich dazu, die Stationen, die Reihenfolge und die Abfahrtsintervalle aller Buslinien im Busnetzwerk zu bestimmen. Daher ist es notwendig, die Stationen, die Reihenfolge und die Abfahrtsintervalle aller Linien als Entscheidungsvariablen zu kodieren. Die Kodierung der Lösungen verwendet die Gleitkomma-Kodierungsmethode, die sich für die Kodierung genetischer Algorithmen mit großen Bereichen, hohen Genauigkeitsanforderungen und großen genetischen Suchräumen eignet. Sie ist besonders effektiv für das hochdimensionale Problem der Stationen großer Netzwerke in dieser Studie. Die anfängliche Methode zur Lösungskonstruktion in diesem Dokument ist wie folgt: (1) Bestimmung der Dimensionen der Entscheidungsvariablen:

Wenn Kodierungsoperationen für Lösungen durchgeführt werden, ist es notwendig, zuerst die Dimensionen der Entscheidungsvariablen zu bestimmen.

Im Fall dieser Studie, bei der die Netzstationen und Abfahrtsintervalle der Buslinien als Entscheidungsvariablen festgelegt werden, werden die Dimensionen der Entscheidungsvariablen durch die Anzahl der Stationen n und die Anzahl der Linien K (entsprechend den jeweiligen Abfahrtsintervallen für jede Linie) bestimmt. Die Bestimmung der Anzahl der Stationen auf jeder Linie basiert auf Faktoren wie der Linienlänge und der durchschnittlichen Entfernung zwischen den Stationen.

Normalerweise wird die Zahl der Haltestellen einer Buslinie auf 15 bis 30 festgelegt. Die konkrete Zahl der Haltestellen sollte auf Grundlage der tatsächlichen Gestaltung der Linienlänge und des durchschnittlichen Stationsabstands festgelegt werden, wobei n die Zahl der Haltestellen bezeichnet. Die Bestimmung der Zahl der Linien basiert normalerweise auf dem Produkt der Zahl der Haltestellen auf jeder Linie und liegt normalerweise im Bereich von 1 bis 2 mal der Differenz zwischen der Gesamtzahl der Busnetzstationen und der Zahl der Haltestellen auf jeder Linie. In diesem Fall wird die Zahl der Linien mit K bezeichnet. Außer den Netzstationen umfassen die Entscheidungsvariablen auch die Festlegung der Abfahrtsintervalle für jede Linie, mit Dimensionen, die mit der Zahl der Linien K übereinstimmen. Deshalb wird die Dimension der Entscheidungsvariablen in dieser Studie wie folgt festgelegt: $K \times n + K$. Während des eigentlichen Optimierungsprozesses des Netzwerks sollte die endgültige Zahl der Haltestellen und Linien vom Planer des Verkehrsnetzwerks anhand der tatsächlichen Anforderungen weiter bestimmt werden.

(2) Auswahl der Routenstationen Nachdem die Anzahl der Stationen und Routen im Netzwerk bestimmt wurde, wird auch der Bereich der Anzahl der Buslinien und der entsprechenden Stationen festgelegt. Um die Rechenleistung weiter zu verbessern und nachfolgende Vorgänge zu erleichtern, werden die Stationen für jede Route ausgewählt, um realisierbare Anfangslösungen mit guter Eignung zu konstruieren. Der konkrete Ablauf ist wie folgt: (a) Festlegen der ersten und letzten Stationen: Die erste und letzte Station der Routen wird mit der Roulette-Rad-Auswahlmethode ausgewählt. Die Passagiernachfrage für jede OD-Station wird in einen Anteil der gesamten Passagiernachfrage umgerechnet, und dieser Anteil wird als Wahrscheinlichkeit verwendet, die OD als erste und letzte Station einer Route festzulegen. Basierend auf diesen Wahrscheinlichkeiten werden K OD-Paare ausgewählt, die als erste und letzte Station jeder Route dienen. (b) Festlegen von Zwischenstationen: Nach dem Festlegen der ersten und letzten Stationen der Routen werden die Entfernungen zwischen allen anderen Netzstationen und der ersten und letzten Station berechnet. Die Station mit der kleinsten Summe der Entfernungen zur ersten und letzten Station wird als Zwischenstation festgelegt. Dann werden die Entfernungen zwischen den verbleibenden Stationen und der ausgewählten Zwischenstation und letzten Station berechnet, und die Station mit der kleinsten Summe der Entfernungen wird als nächste Zwischenstation festgelegt. Dieser Vorgang wird fortgesetzt, bis $n-2$ Zwischenstationen für jede Route ausgewählt sind.

(3) Darstellung des öffentlichen Nahverkehrsnetzes: Nach der Bestimmung der Dimensionen der Entscheidungsvariablen und der Auswahl der Routenstationen stellt diese Studie die Lösung in zwei Teilen dar, um das öffentliche Nahverkehrsnetz darzustellen. Der erste Teil besteht aus der Bestimmung und Anordnung der Stationen für jede Buslinie, und der zweite Teil entspricht den Abfahrtsintervallen für jede Linie. Beispielsweise stellt die Lösung „12345678959678432518“ ein Netzwerkschema dar, das aus zwei Buslinien mit jeweils neun Stationen besteht. In dieser Darstellung stellen der erste Teil „123456789“ und „967843251“ jeweils die beiden Routen als „1-2-3-4-5-6-7-8-9“ und „9-6-7-8-4-3-2-5-1“ dar; der zweite Teil „5“ und „8“ stellen die Abfahrtsintervalle dar.

Intervalle für die beiden Routen sind 5 min bzw. 8 min. Die Bestimmung der Haltestellen für jede Route im Netz folgt dem in Schritt (2) beschriebenen Auswahlprozess. Zusätzlich werden die Abfahrtsintervalle für jede Route zufällig im Bereich von 5 min bis 15 min generiert.

(4) Diese Kodierungsmethode bestimmt zunächst die Abmessungen des Netzwerks, die Anzahl der Buslinien und die Anzahl der Haltestellen für jede Linie. Durch Auswahl der Haltestellen für jede Linie und zufällige Generierung der entsprechenden Abfahrtsintervalle werden die Haltestellen und Abfahrtsintervalle für jede Linie im anfänglichen Netzwerk bestimmt. Infolgedessen sind die konstruierten anfänglichen Lösungen realisierbare Lösungen mit relativ guter Eignung, was die Komplexität der Berechnung erheblich reduziert. Darüber hinaus stellt diese Kodierungsmethode die Realisierbarkeit der Lösungen während der nachfolgenden Operationen des genetischen Algorithmus sicher und verhindert die Generierung nicht realisierbarer Lösungen.

2. Populationsinitialisierung: Gemäß dem Konstruktionsformat der Anfangslösungen in Schritt 1 werden Individuen für die Population zufällig generiert, wobei die zufällige Generierung entsprechend der eingestellten Populationsgröße wiederholt wird. Die Population wird als $P = \{x_1, x_2, \dots, x_\mu\}$ dargestellt, wobei μ die Populationsgröße ist, und jedes Individuum wird als x dargestellt, wobei n die Dimension der Entscheidungsvariablen ist, genauer gesagt die Summe der Anzahl der Stationen für jede Route und der Anzahl der Routen im Netzwerk.

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

3. Fitnessbewertung: Nehmen Sie die während der Initialisierung ermittelten Entscheidungsvariablen und geben Sie sie in das synchronisierte Optimierungsmodell für das Netzwerk und die Planung ein. Berechnen Sie die Fahrgastzeitkosten und die Betriebskosten des öffentlichen Nahverkehrs unter diesem anfänglichen Netzwerk und ermitteln Sie den Zielfunktionswert. Das in diesem Dokument erstellte Modell zielt darauf ab, die Fahrgastzeitkosten und die Betriebskosten des öffentlichen Nahverkehrs zu minimieren. Die Fitness jedes Einzelnen wird anhand des Mindestwerts der Zielfunktion bewertet.

4. Auswahl: In dieser Studie wird die Roulette-Auswahlmethode verwendet, um Individuen in der Population auszuwählen. Das Prinzip dieser Auswahlmethode besteht darin, die Wahrscheinlichkeit zu berechnen, mit der ein Individuum in der nächsten Generation erscheint, basierend auf seinem Fitnesswert. Anschließend werden Individuen ausgewählt, um entsprechend dieser Wahrscheinlichkeit die Nachkommenpopulation zu bilden. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass Individuen mit besseren Fitnesswerten eine höhere Wahrscheinlichkeit haben, ausgewählt zu werden.

5. Crossover: Nachdem der Auswahlvorgang für die Population durchgeführt wurde, wird ein Einzelpunkt-Crossover mithilfe zufällig generierter Crossover-Punkte durchgeführt.

6. Mutation: Individuen in der Population werden Mutationsoperationen auf der Grundlage der Mutationswahrscheinlichkeit P_m unterzogen. Für die Individuen, die eine Mutation durchlaufen, wird eine zufällige Mutationsposition ausgewählt und die Mutation wird mithilfe der Zweipunkt-Austauschmutationsmethode durchgeführt.

4. Beispielanalyse 4.1.

Einführung in die Fallstudie

4.1.1. Dateneinführung

(1) Standort- und

Abfahrtsdaten Die Fallstudie in diesem Dokument konzentriert sich auf fünf Buslinien, die durch die beiden Stationen (Station 98 bis Station 101) mit dem höchsten Wiederholungsverkehr in einem bestimmten Gebiet der Stadt Guangzhou f. Der ausgewählte Fall umfasst insgesamt 134 Stationen im Netzwerk, davon 102 Stationen im Straßennetz. Davon befinden sich 38 Stationen im Bezirk Haizhu, 7 im Bezirk Baiyun, 13 im Bezirk Liwan, 7 im Bezirk Yuexiu, 13 im Bezirk Tianhe und 24 im Bezirk Panyu. Es gibt 18 Stationen, die mehrfach im Netzwerk vorkommen und sich hauptsächlich in den Bezirken Haizhu und Liwan befinden. Alle fünf ausgewählten Routen verlaufen durch den Straßenabschnitt zwischen Station 98 und Station 101.

Die Fahrgastnachfrage zwischen den einzelnen Stationen basiert auf den Daten zum Durchziehen der Fahrgastkarten während der morgendlichen Hauptverkehrszeiten (7:00–9:00 Uhr) am 25. April 2018 in der Stadt Guangzhou. Es gibt insgesamt 10.302 OD-Paare zwischen den ausgewählten Stationen mit insgesamt 19.938 Fahrgästen.

Bei den OD-Paaren mit einer Passagiernachfrage von über 100 Personen ist der Abflug Die Bahnhöfe konzentrieren sich hauptsächlich auf die Bezirke Haizhu und Yuexiu, während die Zielbahnhöfe hauptsächlich auf die Bezirke Tianhe, Panyu und Haizhu konzentriert sind. Bezirk. Darunter ist die höchste Passagiernachfrage von Station 101 bis Station 35, mit

371 Passagiere.

(2) Überarbeitete Netzdaten

Nach der Verfeinerung der Basisdaten besteht der nächste Schritt darin, die Dimensionen weiter zu bestimmen der gewählten Busnetzlösung. Nach der Analyse der Basisdaten der fünf ausgewählten Buslinien im optimierten Netzwerkfall wurde festgestellt, dass die durchschnittliche Entfernung zwischen Stationen in jeder Route beträgt 668 m, mit einem Durchschnitt von 26,8 Stationen und einer durchschnittlichen Routenlänge von 17,32 km. Typischerweise sind Stadtbuslinien mit einer Länge zwischen 10 km und 30 km, die Anzahl der Stationen liegt zwischen 15 und 30. Um den Bedürfnissen der Passagiere gerecht zu werden und Betreibern streben die Netzplaner eine unveränderte Anzahl von Routen an und Versuchen Sie, die Streckenlänge und die Anzahl der Stationen mit den ursprünglichen Strecken zu vereinbaren. während des Optimierungsprozesses. Daher sind die Dimensionen der Busnetzlösung wie folgt ermittelt: 5 Routen mit je 25 Stationen.

Basierend auf der obigen Einführung ist die Dimension der Lösungen in diesem Netzwerk und Das Modell zur Fahrplanoptimierung ist auf 130 eingestellt; 5 Linien mit jeweils 25 Haltestellen, insgesamt 125 Haltestellen im Netz; und 5-Minuten-Intervalle für jede Linie. Die Dimension der Adjazenzmatrix im Das tatsächlich-virtuelle öffentliche Verkehrsnetz ist die Summe der Haltestellen des Straßennetzes und des Netzes Haltestellen, insgesamt 227.

4.1.2. Parametereinstellungen

Der nächste Schritt wird die Konstruktion eines synchronisierten Optimierungsmodells für den Bus sein. Netzwerk und Scheduling basierend auf genetischen Algorithmen, mit einem Schwerpunkt auf der Bestimmung der Modell- und Algorithmusparameter.

(1) Modellparameter

In dieser Studie wird der Umrechnungskoeffizient γ auf 0,5 gesetzt, da die Fahrgastzeitkosten und die öffentlichen Die Transportbetriebskosten werden bei der Optimierung als ebenso wichtig angesehen Prozess. Basierend auf dem Durchschnittsgehalt in Guangzhou im Jahr 2021 von 10.843 Yuan beträgt der Wert von γ beträgt 36,1 Yuan/h. Um die Kosten für die Fahrgastzeit und die Kosten für den öffentlichen Nahverkehr zu vereinen in der Zielfunktion (Gleichung (13)) und vermeiden Sie eine signifikante Lücke zwischen Zeitaufwand und Betriebskosten, beides wird für Forschungszwecke in einen Tageszyklus umgerechnet. der Guangzhou Public Transport Development Annual Report im Jahr 2021, die Durchschnittsgeschwindigkeit auf den Straßen im zentralen Stadtgebiet von Guangzhou beträgt an Wochentagen 30,57 km/h und Die Durchschnittsgeschwindigkeit der Busse V wird auf 30,57 km/h festgelegt. Basierend auf den Kosten eines einzelnen Busses von 3 Millionen Yuan und einer durchschnittlichen Buslebensdauer von 15 Jahren werden die täglichen Fahrzeugbeschaffungskosten M festgelegt auf 548,1 Yuan/Fahrzeug. Nach der Analyse der Fahrzeugbetriebsdaten für die ausgewählten Routen, Die durchschnittliche Haltestellenzeit T_s für die ausgewählten Linien wird auf 36 s festgelegt. Daher sind die Werte Die Parameter des in dieser Studie vorgeschlagenen synchronisierten Optimierungsmodells lauten wie folgt: in der folgenden Tabelle 1 dargestellt :

Tabelle 1. Parameter des synchronisierten Optimierungsmodells.

Parameter	Wert
Betonungskoeffizient γ	0,5
Zeit- und Kostenumrechnungsfaktor γ	45,1 RMB/Std.
Durchschnittsgeschwindigkeit V	30.57 km/h
Einheitskilometerverbrauchskosten N	2,8/km
Durchschnittliche Verweilzeit T_s	36 Sek.
Tageskosten für die Fahrzeuganschaffung M	548.1/Fahrzeug
Minimale Routenlänge l_{min}	10 km
Maximale Routenlänge l_{max}	30 km
Minimales Abfahrtsintervall f min	5 Minuten
Maximales Abfahrtsintervall f max	15 Minuten

(2) Algorithmusparameter

Ausgehend von der tatsächlichen Situation der Auswahl des Liniennetzwerks in diesem Fall und der Bestimmung der Entscheidungsvariablendimension dieses Falls als 130 anhand der obigen Analyse werden die relevanten Parameter des genetischen Algorithmus entsprechend den Eigenschaften des synchronen Optimierungsmodells zur Lösung des Liniennetzwerks dieses Falls bestimmt. Einstellung der Populationsgröße: Wird die Populationszahl zu klein eingestellt, kann dies zu großen Fehlern führen, sodass die Ergebnisse nicht konvergieren können; wird sie zu groß eingestellt, wird die Lösung des Problems schwieriger. Im Allgemeinen wird die Populationsgröße auf das 20- bis 100-fache der Entscheidungsvariablendimension eingestellt . In diesem Fall wird die Populationsgröße für die Entscheidungsvariablendimension des Liniennetzwerks dieses Falls auf 5000 eingestellt. Einstellung der Iterationszahl: Durch mehrere Probeberechnungen wurde festgestellt, dass die Zielwerte bei etwa 150.000 Iterationen konvergierten. Um die Konvergenz der Ergebnisse sicherzustellen, wird in diesem Dokument die Iterationszahl auf 200.000 erhöht . Festlegen der Crossover-Wahrscheinlichkeit: Um die Single- Point-Crossover-Methode zum Austausch nur eines Gensegments wie im vorherigen Kapitel beschrieben zu erreichen, wird die Crossover- Wahrscheinlichkeit P_c auf 0,2 festgelegt , da die Anzahl der Gensegmente für dieses Liniennetzwerk 5 beträgt . Festlegen der Mutationswahrscheinlichkeit: Im Allgemeinen wird die Mutationswahrscheinlichkeit auf einen Wert zwischen 0,0001 und 0,1 festgelegt. In diesem Dokument wird die Mutation mildern die Auswirkungen ungültiger Lösungen durch die Konstruktion einer Straffunktion.

Parameteroptimierung: In Bezug auf die Einstellung von Parametern wie Populationsgröße, Anzahl der Iterationen, Mutation und Crossover-Wahrscheinlichkeit im entworfenen genetischen Algorithmus dauerte es aufgrund der hohen Dimension und der großen Rechenlast bei der Optimierung des Liniennetzwerks fast einen Tag, es einmal zu lösen, und nach 10 Berechnungen zeigten die Optimierungsergebnisse eine gute Leistung. Aufgrund der begrenzten Rechenkapazitäten wurden in diesem Dokument die Parameterwerte im Algorithmus jedoch nicht gründlich optimiert. Die spezifischen Werte der Parameter des genetischen Algorithmus, die in diesem Dokument zur Lösung des synchronen Optimierungsmodells entworfen wurden, sind in Tabelle 2 wie folgt aufgeführt:

Tabelle 2. Mit dem genetischen Algorithmus verbundene Parameter.

Parameter	Werte
Populationsgröße	5000
Anzahl der Iterationen	200.000
Crossover-Wahrscheinlichkeit	0,2
Mutationswahrscheinlichkeit	0,01

Unter Verwendung der oben genannten Straßennetz- und Nachfragedaten, Modellparameter und Algorithmusparameter als Basisdaten sowie der Einstellungen jeder Station und der Abfahrtsintervalle jeder Route im Netzwerk als Eingaben wird das in dieser Arbeit erstellte synchrone Optimierungsmodell mithilfe des relevanten, in Abschnitt 4 entwickelten Algorithmus

4.2. Validierung der Wirksamkeit

Lösen Sie das synchrone Optimierungsmodell des Netzwerks und der Planung auf der Grundlage des Straßennetzes und der Nachfragedaten sowie der oben genannten festgelegten Modell- und Algorithmusparameter . Führen Sie eine phasenweise Optimierung des Netzwerks in diesem Fall durch. Vergleichen und analysieren Sie die Ergebnisse der synchronen Optimierung mit den Ergebnissen der phasenweisen Optimierung, um die Wirksamkeit des synchronen Optimierungsmodells und des entwickelten Algorithmus

4.2.1. Analyse der Algorithmuswirksamkeit

In diesem Dokument wird das optimale Layoutschema des Busnetzes zwischen ausgewählten Stationen auf der Grundlage der Gewichtung zwischen den Stationen festgelegt. Anschließend wird eine synchrone Optimierung des Testbusnetzes durchgeführt. Nach dem entworfenen Algorithmus wird das Optimierungsproblem 10 Iterationen lang kontinuierlich gelöst, wodurch durchgängig die optimale Lösung für den Testfall erzielt wird. Die Konvergenz des entworfenen genetischen Algorithmus tritt nach etwa 150.000 Iterationen ein, wobei die nachfolgenden Ergebnisse unverändert bleiben. In den Iterationsergebnissen sind zwar die besten Zielfunktionswerte und die durchschnittlichen Zielfunktionswerte

Tabelle 3. Datentabelle mit den Ergebnissen der synchronen Optimierung.

Routennummer	Streckenstationen	Abfahrt Intervall (min)	Flottengröße Aufbau	Streckenlänge (km)	Nichtlinear Koeffizient
1	7-99-71-27-100-11-92-45- 97-49-53-95-43-69-70-78- 88-21-89-51-41-54-77-14-8	12	8	18.4	1.39
2	77-50-14-8-44-18-101-98- 62-17-60-37-24-6-23-25- 12-38-61-19-56-57-65-102-73	8	10	16.8	1.13
3	63-79-62-59-74-75-29-30- 52-32-13-81-82-94-93-36- 34-64-40-28-96-39-2-85-87	7	14	21.8	1.29
4	87-86-84-85-83-35-3-15- 40-22-72-31-55-1-26-80- 46-91-20-90-44-62-76-58-63	12	8	21.4	1.36
5	4-12-66-25-67-9-59-62- 10-48-33-5-98-101-18-16- 44-50-77-47-54-42-78-7-49	10	8	19.5	1.23

Aus der obigen Grafik können wir die Ergebnisse der Optimierung des Busnetzes erkennen und Planung. Die Länge jeder Route im Netzwerk ist auf den Bereich von beschränkt 10 km bis 30 km; die Abfahrtsintervalle der Fahrzeuge auf jeder Strecke erfüllen die Einschränkung von 5 min bis 15 min; die Stationen auf jeder Route im Netzwerk erfüllen die nicht wiederkehrenden Stationsbeschränkung; und der nichtlineare Koeffizient für jede Route liegt unter 1,4. Daher Wir kommen zu dem Schluss, dass die Ergebnisse der Optimierung des Busnetzes und der Fahrpläne möglich. Der Vergleich zwischen der Heatmap der wiederholten Senderfrequenzen vor und nach der Optimierung, sowie die Vergleichstabelle der Anzahl der verschiedenen Routen und die entsprechenden wiederholten Stationsnummern vor und nach der Optimierung werden angezeigt in Abbildungen 3 und 4.

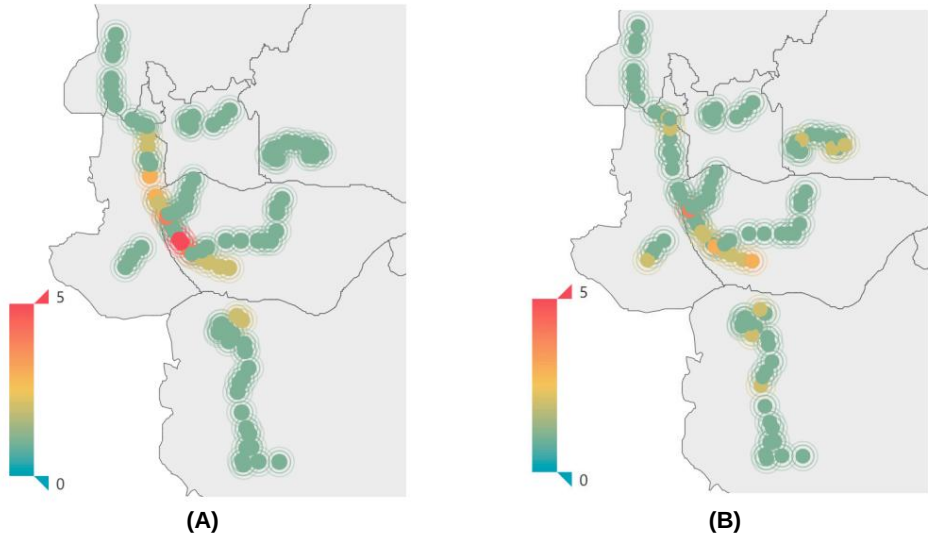
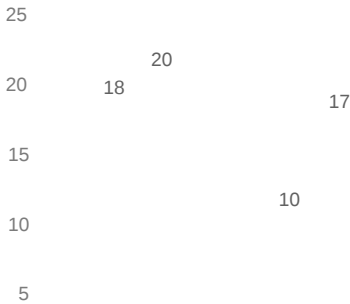


Abbildung 3. (a) Optimierte Heatmap der wiederholten Senderfrequenzen vor der Optimierung. (b) Optimierte Heatmap der wiederholten Senderfrequenzen nach der Optimierung.



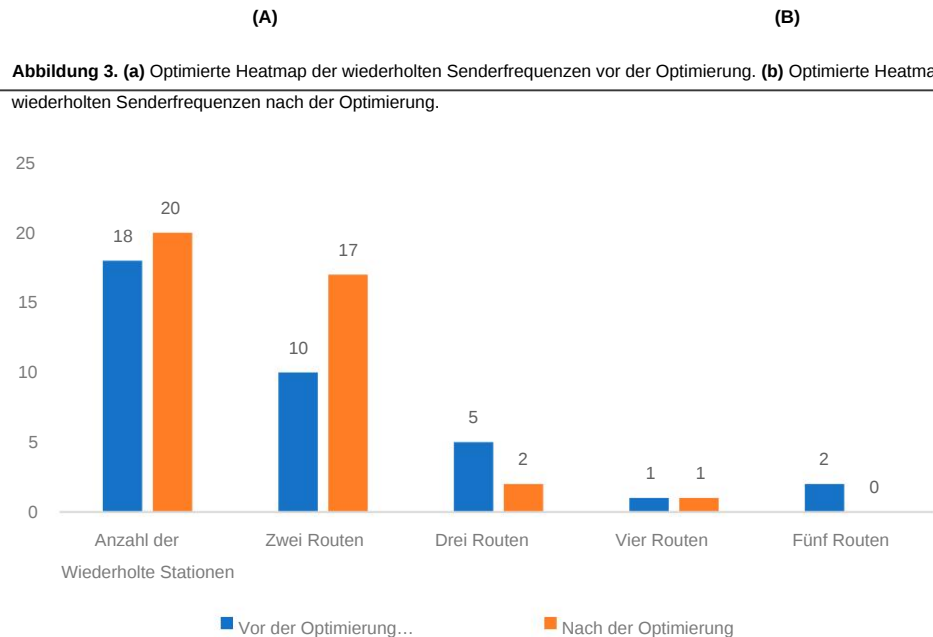


Abbildung 4: Vergleichsdiagramm der Anzahl unterschiedlicher Routen und der entsprechend wiederholten Stationen zwischen dem Optimaler der Optimierung.

Aus der obigen Abbildung können wir erkennen, dass in den Busnetzstationen nach synchronen Aus-der-Ganges-Abbildung keine Routen im Netzwerk vorhanden sind, dass im Busnetz nach der synchronen Optimierung. Die Anzahl der Stationen, die in allen fünf Routen vorhanden sind, ist von zwei Stationen auf null Stationen gesunken. Die Anzahl der Stationen, die in drei Routen vorhanden sind, ist von zwei Stationen auf null Stationen gesunken. Die Anzahl der Stationen, die in zwei Routen vorhanden sind, ist von vier Stationen auf zwei Stationen gesunken. Die Anzahl der Stationen, die in einer Route vorhanden sind, ist von fünf Stationen auf zwei Stationen gesunken. Die Anzahl der Stationen, die in keiner Route vorhanden sind, ist von null Stationen auf zwei Stationen gesunken. Die Anzahl der Stationen, die in allen fünf Routen vorhanden sind, ist von zwei Stationen auf null Stationen gesunken. Die Anzahl der Stationen, die in drei Routen vorhanden sind, ist von zwei Stationen auf null Stationen gesunken. Die Anzahl der Stationen, die in zwei Routen vorhanden sind, ist von vier Stationen auf zwei Stationen gesunken. Die Anzahl der Stationen, die in einer Route vorhanden sind, ist von fünf Stationen auf zwei Stationen gesunken. Die Anzahl der Stationen, die in keiner Route vorhanden sind, ist von null Stationen auf zwei Stationen gesunken.

5. Diskussion

5. Diskussion: Der Artikel schlägt ein synchrones Optimierungsmodell für das Busnetz vor und der Planung unter Berücksichtigung der Wahl verschiedener Routen durch die Fahrgäste während der Fahrt. Dieser Artikel schlägt ein synchrones Optimierungsmodell für das Busnetz vor und im Vergleich zu früheren Studien verfeinert dieses Modell die Wartezeitkosten der Fahrgäste weiter und Planung, bei der die Wahl der Fahrgäste für verschiedene Routen während der Fahrt berücksichtigt wird. Berücksichtigt umfassend die gesamten Zeitkosten für die Fahrgäste. Außerdem werden statistische Analysen durchgeführt Im Vergleich zu früheren Studien verfeinert dieses Modell die Wartezeitkosten der Passagiere und die Wahl verschiedener Routen, um reale Szenarien besser widerzuspiegeln. Synchron und berücksichtigt umfassend die gesamten Zeitkosten für Passagiere. Es analysiert auch statistisch die Optimierung ist effektiver als die stufenweise Optimierung, aber es gibt immer noch Mängel analysiert die Wahl der Passagiere für verschiedene Routen, um reale Szenarien besser widerzuspiegeln. Synchron- die in zukünftigen Forschungsarbeiten weiter verbessert werden müssen. Die Verbesserungen in zukünftigen Forschungsarbeiten kann auf mehreren Ebenen erfolgen:

- (1) Berücksichtigung der Fahrzeugbesetzungsraten: Der Artikel geht davon aus, dass Passagiere können alle während der Wartezeit in die Fahrzeuge der Zielroute einsteigen und belasten die Kapazität nicht Begrenzungen für Busse. Nachfolgende Forschung kann Beschränkungen für die Kapazität von Bussen einführen, Wenn die Busse ihre volle Kapazität erreichen, müssen die Fahrgäste auf den nächsten Bus warten. Diese Überlegung kann in den Optimierungsprozess einbezogen werden, um Bus Belegungsraten.
- (2) Integration zwischen Bussen und Schienenverkehr: Der Artikel konzentriert sich nur auf Buslinien Einsatz und optimiert nicht das Verhältnis zwischen Buslinien und Schienennetzen. Mit der rasanten Entwicklung des Schienenverkehrs hat dies erhebliche Auswirkungen auf den Buspassagierverkehr. Dennoch wird in diesem Artikel die gegenseitige Beeinflussung von Schienenverkehr und Bussen nur eingeschränkt untersucht. Zukünftige Forschung kann Reisedaten zwischen Bussen und Schienenverkehr weiter analysieren, nutzen Busbetriebsdaten und U-Bahn-Fahrtplan, um Änderungen im Fahrgastfluss zu untersuchen, die Verbindung zwischen Bussen und Schienenverkehr und rechtzeitige Anpassungen der Busnetze um die Nutzung der Ressourcen des öffentlichen Nahverkehrs zu maximieren.

6. Zusammenfassung

Basierend auf dem real-virtuellen Aufbau des Busnetzes und unter Berücksichtigung der Warte- und Bordzeit berücksichtigt dieses Dokument außerdem die Auswirkungen der Passagier

Routenauswahl während der Fahrt und erstellt ein synchrones Optimierungsmodell für das Busnetz und die Planung. Durch die separate Durchführung der synchronen Optimierung und der stufenweisen Optimierung im Fallnetz zeigen die Ergebnisse, dass die synchrone Optimierung bei der Reduzierung der Fahrgastzeitkosten und der Busbetriebskosten effektiver ist als die stufenweise Optimierung. Die Fahrgastzeitkosten sanken um 21,5 %, die Busbetriebskosten um 13,7 % und die Gesamtkosten des Bussystems um 18,0 %. Allerdings steigt die Rechenkomplexität des vorgeschlagenen Modells mit der Anzahl der Stationen rapide an. Daher ist es derzeit nur für die Optimierung von Busrouten in lokalen Stadtgebieten geeignet. Zukünftige Forschung wird sich darauf konzentrieren, wie es auf wirklich große Netzwerke angewendet werden kann.

7. Patente

Die Forschungsergebnisse dieser Studie wurden zur Beantragung eines chinesischen Erfindungspatents verwendet.

Beiträge der Autoren: Konzeptualisierung, LZ (Liang Zou) und HC; Methodik, HC und XY; Software, XY; Validierung, XY; formale Analyse, LZ (Lingxiang Zhu); Untersuchung, HC; Ressourcen, LZ (Liang Zou); Datenkuratierung, XY; Schreiben – Vorbereitung des Originalentwurfs, XY und LZ (Lingxiang Zhu); Schreiben – Überprüfung und Bearbeitung, KC und XY; Visualisierung, LZ (Lingxiang Zhu) und HC; Aufsicht, LZ (Liang Zou); Mittelbeschaffung, LZ (Liang Zou) Alle Autoren haben die veröffentlichte Version des Manuskripts gelesen und stimmen ihr zu.

Finanzierung: Diese Arbeit wird vom Shenzhen Science and Technology Plan Project (Nr. KJZD20230923115223047) und Shenzhen Higher Education Stable Support Plan-Projekt (Nr. 20231123103157001).

Erklärung zur Datenverfügbarkeit: Die zur Untermauerung der Ergebnisse dieser Studie verwendeten Daten sind auf Anfrage beim entsprechenden Autor erhältlich.

Interessenkonflikte: Der Autor Xi Yu war bei der Firma Hangzhou Chuangtou Film and Television Co., Ltd. angestellt. Die übrigen Autoren erklären, dass die Forschung ohne kommerzielle oder finanzielle Beziehungen durchgeführt wurde, die als potenzieller Interessenkonflikt ausgelegt werden könnten.

Verweise

1. Pu, H.; Li, Y.; Ma, C. Topologieanalyse des öffentlichen Verkehrsnetzes von Lanzhou basierend auf der Theorie komplexer Doppelschichtnetzwerke. *Phys. Eine Stat. Mech. Seine Appl.* **2022**, *592*, 126694. [\[CrossRef\]](#)
2. Rao, KR; Mitra, S.; Szmerekovsky, J. Auswahl der Bus-Transit-Netzwerkstruktur mit mehreren Zielen. *Int. J. Oper. Res. Inf. Syst.* **2021**, *12*, 13. [\[CrossRef\]](#)
3. Petit, A.; Yildirimoglu, M.; Geroliminis, N.; Ouyang, Y. Entwurf eines dedizierten Busspurnetzes unter Nachfrageumleitung und dynamischer Verkehrsüberlastung: Ein aggregierter Netzwerk- und kontinuierlicher Näherungsmodellansatz. *Transp. Res. Part C* **2021**, *128*, 103187. [\[Querverweis\]](#)
4. Farahani, RZ; Miandoabchi, E.; Szeto, WY; Rashidi, H. Eine Übersicht über das Problem der Gestaltung städtischer Verkehrsnetze. *Eur. J. Oper. Res.* **2013**, *229*, 281–302. [\[CrossRef\]](#)
5. Zhang, L.; Lu, J.; Yue, X.; Zhou, J.; Li, Y.; Wan, Q. Eine Hilfoptimierungsmethode für komplexe öffentliche Verkehrswegenetze basierend auf Linkvorhersage. *Mod. Phys. Lett. B* **2018**, *32*, 1850066. [\[CrossRef\]](#)
6. Klier, MJ; Haase, K. Optimierung des städtischen öffentlichen Nahverkehrsnetzes mit flexibler Nachfrage. *Or Spectr.* **2015**, *37*, 195–215. [\[CrossRef\]](#)
7. Yin, J.; D'Ariano, A.; Wang, Y.; Yang, L.; Tang, T. Fahrplankoordination in einem Schienenverkehrsnetz mit zeitabhängiger Fahrgastnachfrage. *Eur. J. Oper. Res.* **2021**, *295*, 183–202. [\[CrossRef\]](#)
8. Liang, M.; Wang, W.; Dong, C.; Zhao, D. Ein kooperatives koevolutionäres Optimierungsdesign des städtischen Verkehrsnetzes und Betriebsfrequenzen. *Expert Syst. Appl.* **2020**, *160*, 113736. [\[CrossRef\]](#)
9. Wang, C.; Ye, Z.; Wang, W. Eine mehrzielige Optimierung und ein hybrider heuristischer Ansatz für die Gestaltung städtischer Busliniennetze. *IEEE Access* **2020**, *8*, 2154–2167. [\[CrossRef\]](#)
10. Huang, A.; Dou, Z.; Qi, L.; Wang, L. Flexible Routenoptimierung für bedarfsgesteuerten öffentlichen Nahverkehr. *J. Transp. Eng. Part A Syst.* **2020**, *146*, 04020132. [\[CrossRef\]](#)
11. Gong, M.; Hu, Y.; Chen, Z.; Li, X. Transferbasiertes, maßgeschneidertes modulares Bussystemdesign mit optimierter Fahrgast-Routenzuweisung. *Transp. Res. Teil E Logist. Transp. Rev.* **2021**, *153*, 102422. [\[CrossRef\]](#)
12. Yang, J.; Jiang, Y. Anwendung des modifizierten NSGA-II auf das Problem des Transitnetzwerk-Designs. *J. Adv. Transp.* **2020**, *2020*, 3753601. [\[Querverweis\]](#)
13. Yao, E.; Liu, T.; Lu, T.; Yang, Y. Optimierung der Einsatzplanung von Elektrofahrzeugen mit mehreren Fahrzeugtypen im öffentlichen Verkehr. *Nachhaltig. Cities Soc.* **2020**, *52*, 101862. [\[CrossRef\]](#)

14. Guo, R.; Antunes, F.; Zhang, J.; Yu, J.; Li, W. Gemeinsame Optimierung der Taktfrequenz und der Haltestellenzahl für bilateralen Bus Rapid Transit. *PLoS ONE* **2024**, *19*, e0300286. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
15. Li, WY; Gao, BQ; Lian, G. Methode zur Planung von Mikrozirkulationsbusnetzwerken basierend auf hierarchischer Clusterbildung. *Heilongjiang Transp. Sci. Technol.* **2021**, *44*, 166–168.
16. Shi, XW; Su, PT; Zou, YJ; Shao, LX Forschung zur Optimierung des konventionellen Busnetzes für Schienenverkehr basierend auf zum Kürzestpfad-Beschriftungsmodell. *Comput. Appl. Res.* **2020**, *37*, 1–8.
17. Huang, M. Mehrstufige Analyse der topologischen Struktur von Busnetzwerken. *Highw. Transp. Technol.* **2010**, *27*, 93–99.
18. Yigit, F.; Basilio, MP; Pereira, V. Ein hybrider Ansatz für die multikriteriell-basierte Optimierung von sequenzabhängigen Setups. *Basierte Flow Shop Scheduling. Mathematics* **2024**, *12*, 2007. [\[CrossRef\]](#)
19. Ren, H.; Song, Y.; Long, J.; Si, B. Ein neues Transitzuweisungsmodell basierend auf Linien- und Knotenstrategien. *Transp. Res. Part B* **2021**, *150*, 121–142. [\[CrossRef\]](#)
20. Shi, Q.; Zhang, K.; Weng, J.; Dong, Y.; Ma, S.; Zhang, M. Bewertungsmodell eines Busroutenoptimierungsschemas basierend auf Busdaten aus mehreren Quellen. *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.* **2021**, *10*, 100342. [\[CrossRef\]](#)
21. Fan, W.; Machemehl, RB Tabu-Suchstrategien zur Optimierung öffentlicher Verkehrsnetze bei variabler Transitznachfrage. *Comput. Aided Civ. Infrastruct. Eng.* **2008**, *23*, 502–520. [\[CrossRef\]](#)
22. Huang, D.; Gu, Y.; Wang, S.; Liu, Z.; Zhang, W. Ein zweiphasiges Optimierungsmodell für den bedarfsgesteuerten, maßgeschneiderten Bus Netzwerkdesign. *Transp. Res. Teil C Emerg. Technol.* **2020**, *111*, 1–21. [\[CrossRef\]](#)
23. Li, X.; Wang, T.; Li, L.; Feng, F.; Wang, W.; Cheng, C. Gemeinsame Optimierung des Zeitplans für regelmäßiges Laden von Elektrobussen und des Einsatzes stationärer Ladegeräte unter Berücksichtigung der Teilladerichtlinie und der zeitabhängigen Strompreise. *J. Adv. Transp.* **2020**, *2020*, 8863905. [\[CrossRef\]](#)
24. Steiner, K.; Irnich, S. Strategische Planung für integrierte Mobility-on-Demand- und städtische öffentliche Busnetze. *1616–1639.* [\[CrossRef\]](#)
25. Chai, S.; Liang, Q. Ein verbesserter NSGA-II-Algorithmus für Transitznetzwerkdesign und Frequenzeinstellungsprobleme. *J. Adv. Transp.* **2020**, *2020*, 2895320. [\[CrossRef\]](#)
26. Wei, M.; Liu, T.; Sun, B.; Jing, B. Optimales integriertes Modell für die Gestaltung von Zubringerstrecken und das Frequenzeinstellungsproblem bei der Haltestellenauswahl. *J. Adv. Transp.* **2020**, *2020*, 6517248. [\[CrossRef\]](#)
27. Tang, Z.; Hu, X.; Périaux, J. Mehrstufige hybridisierte Optimierungsmethoden, die lokale Suche, deterministische und globale Suche Evolutionäre Algorithmen. *Arch. Comput. Methods Eng.* **2019**, *27*, 939–975. [\[CrossRef\]](#)
28. Kuan, SN; Ong, HL; Ng, KM Lösung des Feeder-Bus-Netzwerk-Design-Problems durch genetische Algorithmen und Ameisenkolonie-Optimierung. *Adv. Ing. Softw.* **2006**, *37*, 351–359. [\[CrossRef\]](#)
29. Ngamchai, S.; Lovell, DJ Optimale Zeitübertragung bei der Gestaltung von Busliniennetzen mithilfe eines Genetischen Algorithmus. *J. Transp. Eng. Asce* **2003**, *129*, 510–521. [\[CrossRef\]](#)
30. Bourbonnais, PL; Morency, C.; Trépanier, M.; Martel-Poliquin, É. Transitznetzwerkdesign unter Verwendung eines genetischen Algorithmus mit integriertem Straßennetz und disaggregierten O–D-Nachfragedaten. *Transportation* **2021**, *48*, 95–130. [\[CrossRef\]](#)
31. Ding, JX; Zhong, YW; Li, B.; Zhang, S. Forschung zur Busnetzwerkoptimierung basierend auf einem verbesserten K-Shortest-Path-Algorithmus. *J. Hefei Univ. Technol.* **2019**, *42*, 1388–1393+1423.
32. Luo, XL; Jiang, SY Entwurf eines Vorortbusnetzes basierend auf K-Means-Clustering. *Highw. Transp. Technol.* **2018**, *35*, 115–120+134.
33. Gao, MY; Shi, HG Optimierung von Zubringerbuslinien für den Schienenverkehr basierend auf einem verbesserten PSO-Algorithmus. *J. Traffic Transp. Eng. Inf.* **2019**, *17*, 49–54.
34. Xin, Y.; Huo, YM Mehrzieliges Busnetzwerk-Optimierungsmodell basierend auf dem NSGA-II-Algorithmus für bedarfsgesteuerten Transit. *Integr. Transp.* **2022**, *44*, 68–72.
35. Wang, N.; Cao, WZ; Chu, XL Optimierung von Zubringerbusrouten für den Schienenverkehr mittels zellulargenetischem Algorithmus. *Transp. Technol.* **2018**, *20*, 13–18.
36. Yu, LJ; Liang, MP Optimierungsdesign eines städtischen konventionellen Busnetzes basierend auf ganzzahliger nichtlinearer Programmierung. *J. China Highw.* **2016**, *29*, 108–115+135.
37. Wu, KX Busnetzwerkpfadoptimierung basierend auf einem verbesserten Ant Colony-Algorithmus. *Microcomput. Appl.* **2021**, *37*, 134–136.
38. Yen, JY Die k kürzesten schleifenlosen Pfade in einem Netzwerk finden. *Manag. Sci.* **1971**, *17*, 712–716. [\[CrossRef\]](#)
39. Holland, JH Genetische Algorithmen. *Sci. Am.* **1992**, *267*, 44–50. [\[CrossRef\]](#)

Haftungsausschluss/Anmerkung des Herausgebers: Die in allen Veröffentlichungen enthaltenen Aussagen, Meinungen und Daten sind ausschließlich die der einzelnen Autoren und Mitwirkenden und nicht die von MDPI und/oder den Herausgebern. MDPI und/oder die Herausgeber lehnen jegliche Verantwortung für Personen- oder Sachschäden ab, die aus den im Inhalt erwähnten Ideen, Methoden, Anweisungen oder Produkten resultieren.