Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

Im Auftrag des
Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

Die Entwicklung des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs in China

Auswirkungen auf die Verkehrsverlagerung und das CO_2-Reduktionspotenzial

Impressum

Herausgeber
Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Sitz der Gesellschaft
Bonn und Eschborn

GIZ in China
Tayuan Diplomatic Office Building 2-5
14 Liangmahe South Street, Chaoyang District
100600 Beijing, P. R. China
T +86 (0) 10 8527 5589
F +86 (0) 10 8527 559
E info@giz.de
I www.giz.de
I www.transition-china.org/mobility

Projekt
Deutsch-Chinesische Kooperation zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) als Beitrag zur Verkehrswende

Projektleiter
Alexander von Monschaw, GIZ in China
alexander.monschaw@giz.de

Autoren
OU Xunmin, Außerordentlicher Professor, Tsinghua Universität
YUAN Zhiyi, PhD Kandidat, Tsinghua Universität
WANG Yanzhe, Masterstudent, Tsinghua Universität
REN Lei, PhD Kandidat, Tsinghua Universität

Review und Editierung
Projekt-Team, Deutsch-Chinesische Kooperation zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) als Beitrag zur Verkehrswende. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und Verständlichkeit wurde diese deutsche Fassung der Studie, basierend auf der chinesischen Originalstudie, in Teilen gekürzt und restrukturiert. Das GIZ Projekt-Team ist haftbar für sämtliche Überarbeitungen.

Design
Bejing Orca Team Co., Ltd

Bildrechte
Knorr-Bremse AG (Titelbild)

URL Links

Diese Publikation enthält Links zu externen Webseiten. Die entsprechenden Anbieter sind für die Inhalte auf den gelisteten externen Webseiten verantwortlich. Während des Reviews wurden die Inhalte dritter Parteien auf mögliche zivilrechtliche oder strafrechtliche Haftung geprüft. Eine dauerhafte Kontrolle des Inhalts externer Links kann ohne konkrete Hinweise auf die Verletzung zivil- bzw. strafrechtlicher Haftung nicht gewährleistet werden. Sobald die GIZ auf eine solche Verletzung stößt bzw. darauf aufmerksam gemacht wird, wird der Verweis auf den betroffenen externen Inhalt unmittelbar gelöscht. Die GIZ distanziert sich ausdrücklich von solchen Inhalten.

Im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV)
Das BMDV macht sich den Inhalt dieser Publikation nicht zu Eigen.
Peking, 2022

Inhaltsverzeichnis

- Abkürzungsverzeichnis 4
- Abbildungsverzeichnis 5
- Tabellenverzeichnis 5
- Zusammenfassung 6
- Einleitung 9
  - 1.1 Forschungshintergrund 10
  - 1.2 Entwicklungsgeschichte und -plan des chinesischen Hochgeschwindigkeitszugverkehrs 11
  - 1.3 Politik und Institutionalisierung zur Förderung der HGV-Entwicklung in China 16
    - (1) Allgemeine Konstruktionsspezifikationen und HGV-bezogene Technologien 16
    - (2) Umweltverträglichkeitsprüfung für HGV-Projekte 16
  - 1.4 Zusammenfassende Analyse der Auswirkungen der chinesischen HGV-Entwicklung 17
    - (1) Räumliche und zeitliche Verdichtung 17
    - (2) Verbesserte Erreichbarkeit 17
    - (3) Veränderungen auf dem Verkehrsmarkt 18
    - (4) Preisentwicklung im Hochgeschwindigkeitszugverkehr 21
    - (5) Analyse der wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Auswirkungen 21
- Analyse der Verkehrsverlagerung sowie deren emissionsreduzierende Leistung 23
  - 2.1 Verkehrsverlagerung vom zivilen Luftverkehr auf den Hochgeschwindigkeitszugverkehr: Grundlage der Literaturauswertung 24
  - 2.2 Analysemethoden 26
    - (1) Differenzenmodell 26
    - (2) Auswahl der zu erforschenden Variablen 26
  - 2.3 Eckdaten 28
    - (1) Daten der Stichproben 28
    - (2) Daten der Variablen 28
  - 2.4 Ergebnisse der Analyse 30
    - (1) Ergebnisse im Allgemeinen 32
    - (2) Auswirkung der Fahrzeit auf die Wettbewerbsfähigkeit des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs 32
    - (3) Die Auswirkung der Streckenlänge auf die Wettbewerbsfähigkeit des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs 33
    - (4) Die Auswirkung der geografischen Lage auf die Wettbewerbsfähigkeit des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs 33
  - 2.5 Ausblick: Auswirkung der künftigen HGV-Entwicklung auf den zivilen Luftverkehr 34

Inhaltsverzeichnis

(1) Auswirkungen des HGV-Netzes aus acht Nord-Süd- und acht Ost-West-Schnellfahrstrecken nach dessen Fertigstellung 34
(2) Auswirkungen nach Anschluss sämtlicher chinesischer Städte mit einer Bevölkerung über 500.000 Einwohnern an das HGV-Netz 35
2.6 Geschätzte emissionsreduzierende Wirkung durch die Entwicklung des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs als Substitut für den zivilen Luftverkehr 36

- HGV-Strecke Peking-Shanghai: Analyse der CO_2-Emissionen während des gesamten Lebenszyklus 37
3.1 Grundlegende Informationen der Fallstudie 38
3.2 Eckdaten und Annahmen 39
3.3 Ergebnisse der Analyse 41
3.4 Vergleich zwischen dem Hochgeschwindigkeitszugverkehr und anderen Verkehrsträgern in Bezug auf CO_2-Emissionen 44

- Schlussfolgerungen und politische Empfehlungen 45
4.1 Rückblick auf bisherige HGV-Entwicklung und Handlungsempfehlungen 46
4.2 Analyse der Verkehrsverlagerung vom zivilen Luftverkehr auf den Hochgeschwindigkeitszugverkehr 48
4.3 Analyse der CO_2-Emissionen während des gesamten Lebenszyklus des chinesischen Hochgeschwindigkeitszugverkehrs 49

- Literaturverzeichnis 50

- Bildnachweise 54

Abkürzungsverzeichnis

BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr der Bundesrepublik Deutschland
CNY	Chinesischer Yuan
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CRC	China Railway Corporation
CREC	China Railway Group Limited
DiD	Differences-in-Differences Modell
EUR	Euro
FuE	Forschung und Entwicklung
GIZ	Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
HGV	Hochgeschwindigkeitszugverkehr
LCA	Lebenszyklusanalyse
MoT	Verkehrsministerium der Volksrepublik China
MKS	Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie
NDRC	Nationale Kommission für Entwicklung und Reform
NRA	Nationale Eisenbahnverwaltung der Volksrepublik China
UIC	Internationaler Eisenbahnverband

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 In Betrieb genommene Streckenlänge und Passagieraufkommen des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs in China

Abbildung 2 Die Entwicklung des chinesischen HGV-Netzes

Abbildung 3 Karte des HGV-Gitternetzes mit acht parallelen Nord-Süd-Strecken und acht Ost-West-Strecken (2016-2030)

Abbildung 4 Abgrenzung der Lebenszyklus-Forschung im HGV

Abbildung 5 Energieverbrauch und Kohlenstoffemissionen über den gesamten Lebenszyklus der Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Shanghai

Abbildung 6 Energieverbrauch und Kohlenstoffemissionen verschiedener Verkehrsträger im gesamten Lebenszyklus

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Auswirkungen auf den Personenstraßenverkehr durch die Inbetriebnahme des chinesischen HGV-Netzes

Tabelle 2 Festlegung und Beschreibung der Variablen für das Analyse-Modell zur Verkehrsverlagerung des zivilen Luftverkehrs auf den Hochgeschwindigkeitszugverkehr

Tabelle 3 Übersicht der Anzahl der beförderten Personen und der Flugverbindungen, die für die Stichprobe der vorliegenden Studie gelten

Tabelle 4 Übersicht der Variablen in Bezug auf Städtepaare und den Hochgeschwindigkeitszugverkehr

Tabelle 5 Mögliche Auswirkungen durch die Einführung des HGV-Gitternetzes mit acht Nord-Süd-Schnellfahrstrecken und acht Ost-West-Strecken auf der Grundlage der Flugverbindungen des Jahres 2018

Tabelle 6 Geschätzte Auswirkungen, nachdem sämtliche Städte mit einer Bevölkerungsgröße von über 500.000 Bewohnern ans HGV-Netz angeschlossen sind (Grundlage: Flugverbindungen aus dem Jahr 2018)

Tabelle 7 Betroffene Luftlinien mit Passagierreduktion durch die Eröffnung des HGV-Netzes aus acht Nord-Süd-Strecken und acht Ost-West-Strecken

Tabelle 8 Werte für die wichtigsten Parameter des Fallbeispiels Peking-Shanghai

Tabelle 9 Energieverbrauch und Kohlenstoffemissionen der Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Shanghai über den gesamten Infrastrukturzyklus

Tabelle 10 Energieverbrauch und Kohlenstoffemissionen der Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Shanghai über den gesamten Fahrzeugzyklus

Tabelle 11 Ergebnisse der Fallstudie zum Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs über den gesamten Lebenszyklus

◆ Zusammenfassung ◆

Der chinesische Hochgeschwindigkeitszugverkehr (HGV) hat sich in den vergangenen zwanzig Jahren rasant entwickelt.[1] Nach der Inbetriebnahme der ersten Schnellfahrstrecke Qinhuangdao-Shenyang im Jahr 2003 folgte ab 2004 eine detaillierte Gesamtplanung zum Bau von Hochgeschwindigkeitsstrecken unter Leitung der China Railway Corporation (ehemals Eisenbahnministerium). 2008 wurde in der mittel- und langfristigen Planung des chinesischen Eisenbahnnetzes erstmals der Aufbau von vier Nord-Süd- und vier Ost-West-Verkehrskorridoren bis 2020 erwähnt, die im Rahmen einer überarbeiteten Planung aus 2016 auf jeweils acht Verkehrskorridore bis 2030 aufgestockt wurden. Im Jahr 2020 benannte der „Leitfaden für den Eisenbahnnetzbau zur Stärkung der staatlichen Kompetenz" das Ziel, bis 2035 sämtlichen Städten über 500.000 Einwohnern einen flächendeckenden Zugang zum Hochgeschwindigkeitszugverkehr zu gewähren. Erste Bilanzen zeigen, dass der HGV-Ausbau in China die Mobilität der Bevölkerung erheblich verbessert, die räumlichen und zeitlichen Verbindungen zwischen Städten gestärkt sowie die soziale und wirtschaftliche Entwicklung gefördert hat, negative Umwelteffekte durch den Ausbau jedoch mitberücksichtigt werden sollten.

Im Auftrag des Projektes „Deutsch-Chinesische Kooperation zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) als Beitrag zur Verkehrswende" beauftragt durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) in Kooperation mit dem chinesischen Verkehrsministerium (MoT) implementiert von der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH hat die Forschungsgruppe unter der Leitung von Prof. Ou Xunmin an der Tsinghua-Universität die vorliegende Studie zu Entwicklungen und entsprechenden Politikmaßnahmen des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs in China erarbeitet. Aufbauend auf einer Literaturauswertung und einer Analyse der Auswirkungen von Hochgeschwindigkeitszügen auf den Verkehrssektor wurden Aspekte der sozioökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit betrachtet sowie eine Fallstudie zur Quantifizierung der Verkehrsverlagerung vom zivilen Flug- auf den Hochgeschwindigkeitszugverkehr und dessen Kohlenstoffemissionen durchgeführt.

Der vorliegende Bericht konzentriert sich dabei auf die folgenden Inhalte:

(1) Allgemeine Einführung in die grundlegende Situation der HGV-Entwicklung in China, in das politische System und die Zugänglichkeit, das Mobilitätsverhalten der Passagiere, die Kosten und die Auswirkungen des HGV unter ökonomischen, sozialen, ökologischen und umweltpolitischen Gesichtspunkten,

(2) Berechnung der substituierenden Wirkung des umfangreichen Ausbaus des HGV-Netzes auf den zivilen Luftverkehr auf der Makroebene,

(3) Mikroanalyse der Kohlenstoffemissionen der Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Shanghai über die gesamte Lebensdauer,

(4) Zusammenfassung und politische Empfehlungen für die künftige HGV-Entwicklung.

Das zweite und das dritte Kapitel bilden den Kern des vorliegenden Berichts. Unter Verwendung eines Differenzenmodells (Differences-in-Differences – DiD) wurden zunächst die Verkehrsverlagerung vom zivilen Luftverkehr auf den Hochgeschwindigkeitszugverkehr analysiert und Schlüsselergebnisse ermittelt:

Unter Berücksichtigung des aktuellen HGV-Betriebszustandes nimmt der HGV-Einsatz signifikanten negativen Einfluss auf das Passagieraufkommen des zivilen Luftverkehrs, wobei durch die Inbetriebnahme der HGV-Strecken die Anzahl der Flüge (im Weiteren synonym verwendet zum Begriff Flugverbindung) und der beförderten Reisenden in den entsprechenden Städten innerhalb des HGV-Netzes insgesamt um 28,7 % bzw. 31,8 % gesunken ist. Die Verlagerung vom zivilen Luftverkehr

1 刘璐 . 我国高速铁路对民航客运的影响研究 . 北京 : 北京交通大学 , 2018.

hin zu HGV-Reisen wirkt sich hierbei positiv auf Dekarbonisierungsmaßnahmen im Verkehrssektor aus.

In der Konkurrenz zwischen beiden Verkehrsträgern ist die Wettbewerbsfähigkeit des HGV stark von der Fahrzeit abhängig, wobei die stärksten Auswirkungen bei einer Fahrzeit unter vier Stunden erreicht werden. Die Zahl der Flugverbindungen und die Passagierzahlen zwischen den entsprechenden Städtepaaren gehen hierbei um jeweils 74,2 % bzw. 82,5 % zurück. Ein Teil der betroffenen Flugstrecken wurde unter Einfluss des HGV stillgelegt. Der Fahrzeitbereich, in dem der HGV weiterhin starken Wettbewerbsvorteil aufweist, liegt innerhalb von 6 Stunden, was einer Reiseentfernung von etwa 1.400 km entspricht.

Das geplante HGV-Netz in China mit jeweils acht Verkehrskorridoren in Nord-Süd- bzw. Ost-West-Richtung wird 69 zusätzliche Inlandsflughäfen abdecken im Vergleich zum vorherigen Netz mit vier Nord-Süd- und vier Ost-West-Schnellfahrstrecken. Weitere 834 Flugstrecken sind hierbei betroffen. Die Zunahme der HGV-Strecken wird weitere 8,8 % der gesamten Passagierflüge ersetzen. Unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitssteigerung auf den HGV-Strecken entlang des Yangtse-Flusses und der Küste steigt die Anzahl der ersetzten Passagierflüge weiterhin um 0,7 %.

Sofern alle chinesischen Städte mit einer Bevölkerungszahl ab 500.000 Einwohnern einen Zugang zum HGV erhalten, könnten Berechnungen zufolge sämtliche Binnenflughäfen durch HGV-Verkehr abgedeckt werden. Entsprechend weiteren Prognosen werden zukünftig 26,2 % der Gesamtanzahl bestehender Inlandsflüge für Personentransport auf den Hochgeschwindigkeitszugverkehr umgelagert.

Eine Lebenszyklusanalyse (LCA) wird im dritten Kapitel angewandt, um den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen von Hochgeschwindigkeitszügen über den gesamten Lebenszyklus zu modellieren. Am Beispiel der Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Shanghai werden der fossile Primärenergieverbrauch und die CO2-Emissionen pro Personenkilometer während des gesamten Lebenszyklus des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs ermittelt.

Die Studien ergeben: Der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen der Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Shanghai über ihren gesamten Lebenszyklus lassen sich jeweils auf 0,4 MJ/Personenkilometer und 40 g CO2e/Personenkilometer schätzen.

Der HGV-Verkehr birgt enorme Vorteile bei der Energieeinsparung und der Verringerung des Kohlenstoffausstoßes. Für eine Verkehrsleistungseinheit machen die Kohlenstoffemissionen des HGV jeweils 10 %, 24 %, 26 %, 32 % und 38 % der Emissionen von Flugzeugen, Benzin- und Dieselfahrzeugen, Elektroautos und Linienbussen aus.

Eine saubere Stromversorgungsstruktur bei erhöhter Auslastung des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs kann die energiesparenden und kohlenstoffreduzierenden Potentiale des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs weiter stärken.

Aufbauend auf der Studie wird abschließend empfohlen, den Hochgeschwindigkeitszugverkehr weiter auszubauen und eine kohlenstoffarme Entwicklung im Verkehrssektor zu fördern. Dabei sollten das HGV-Netz erweitert, die Fahrzeuge modernisiert und eine kohlenstoffarme Entwicklung des Strommixes realisiert werden. Durch eine angemessene Fahrplangestaltung und erhöhte Auslastungsquoten können die ökologischen Vorteile des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs weiter ausgebaut werden.

◆ Kapitel 1 ◆

Einleitung

1.1 Forschungshintergrund

In den vergangenen zwanzig Jahren hat sich der Ausbau des chinesischen Hochgeschwindigkeitszugnetzes rasant entwickelt und das Mobilitätsangebot der chinesischen Bevölkerung erheblich verbessert. Während räumliche und zeitliche Verbindungen zwischen Städten gestärkt und die soziale und wirtschaftliche Entwicklung gefördert wurden, sollten potentielle negative Umwelteffekte des HGV-Ausbaus jedoch ebenso berücksichtigt und analysiert werden.

Im Rahmen des Projekts "Deutsch-Chinesische Kooperation zur Mobilitäts- und Kraftstofftrategie (MKS) als Beitrag zur Verkehrswende", beauftragt durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) und in Zusammenarbeit mit dem chinesischen Ministry of Transport (MoT) umgesetzt durch die Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, hat die Forschungsgruppe unter der Leitung von Prof. Ou Xunmin der Tsinghua-Universität die vorliegende Studie zur Entwicklung des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs in China erarbeitet. Aufbauend auf einer Literaturauswertung und Analyse der Auswirkungen des Hochgeschwindigkeitsnetzausbaus auf den Gesamtverkehr wurden Aspekte der sozioökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit betrachtet sowie eine Fallstudie zur Quantifizierung der Verkehrsverlagerung des zivilen Flugverkehrs auf den Hochgeschwindigkeitszugverkehr und dessen Kohlenstoffemissionen durchgeführt.

1.2 Entwicklungsgeschichte und -plan des chinesischen Hochgeschwindigkeitszugverkehrs

Im Jahr 2003 ist mit der Eröffnung der Zugstrecke Qinhuangdao-Shenyang der Startschuss für den chinesischen Intercity-Personenverkehr in der Ära des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs (HGV) gefallen.[2] Während die gesamte Schnellfahrstrecke auf eine Geschwindigkeit von 250 km/h ausgelegt ist, können einige Abschnitte ebenso mit Geschwindigkeiten über 300 km/h befahren werden, was dem Standard für Hochgeschwindigkeitszüge gemäß dem Internationalen Eisenbahnverband (International Union of Railways, UIC) entspricht.[3]

Der Aufbau der chinesischen Hochgeschwindigkeitsstrecken unter Leitung der China Railway Corporation (ehemals Eisenbahnministerium) begann im Jahr 2004 mit einer sehr detaillierten Gesamtplanung, die die sechste erhebliche Geschwindigkeitssteigerung auf Zugstrecken in China darstellte. Im Jahr 2008 erwähnte die mittel- und langfristige Planung des chinesischen Eisenbahnnetzes mit Fokus auf Geschwindigkeitssteigerung und Streckenerweiterung erstmals den Bau von vier Nord-Süd- und vier Ost-West-Verkehrskorridoren bis 2020[4], als Teil derer die erste Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Tianjin bereits im August 2008 in Betrieb genommen wurde.

Der 11. Fünfjahresplan zur Entwicklung bedeutsamer Technologien und Anlagen sowie zur Entwicklung von industriellen Schlüsseltechnologien wurde durch die nationale Kommission für Entwicklung und Reform (NDRC) im Januar 2008 erlassen. Das planungspolitische Dokument enthielt Arbeitsschwerpunkte, um den Anlagenbau im Hochgeschwindigkeitszugverkehr und Schienenverkehr sowie im Bereich Umweltschutz und integrierte Ressourcenanwendung zu lokalisieren. Dabei sollten die Forschung und Entwicklung (FuE) für Schlüsselanlagen vorangetrieben und das FuE-Niveau im Anlagenbauwesen erhöht werden. Die HGV-Industrie erlebte durch die Initiierung dieser Förderpolitiken einen starken Aufschwung.

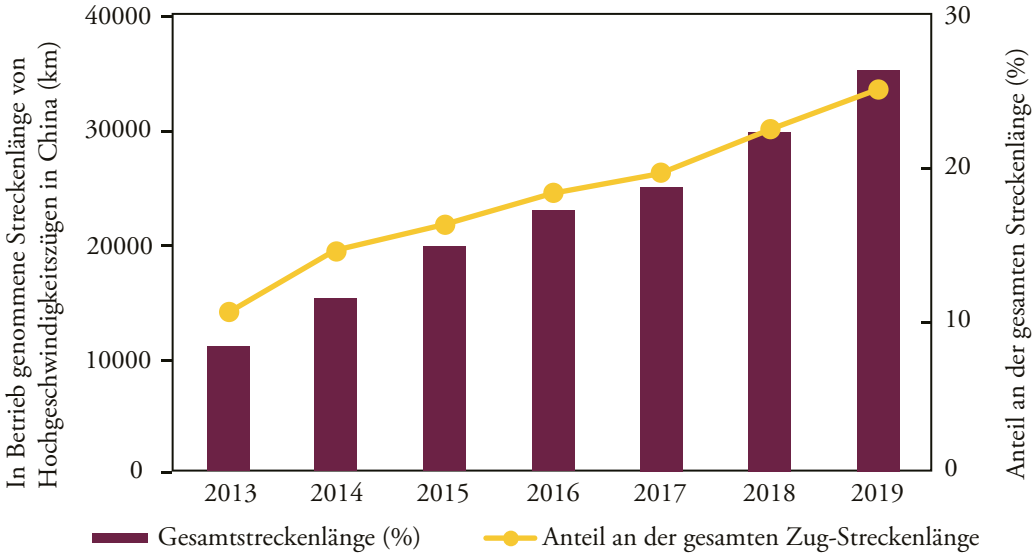
2012 gab der Staatsrat den 12. Fünfjahresplan zum Bau eines umfassenden Verkehrssystems bekannt, der anknüpfend an vorangegangene Pläne ein integriertes Verkehrsnetz mit jeweils fünf Verkehrsadern in Nord-Süd- bzw. Ost-West-Richtung als Hauptkonstrukt festlegte, den Bau von HGV-Strecken und Autobahnen schwerpunktmäßig förderte und 42 intermodale Verkehrsknotenpunkte als Hub-Stationen benannte.[5]

Nachdem eine Überarbeitung der mittel- und langfristigen Planung 2016 eine Aufstockung auf jeweils acht Verkehrskorridore bis 2030 festlegte[6], konnte der Aufbau eines grundlegenden HGV-Gitternetzes mit der Fertigstellung der Hochgeschwindigkeitsstrecke Shijiazhuang-Jinan und der Strecke Peking-Shenyang-Harbin bereits im Jahr 2018 realisiert werden.

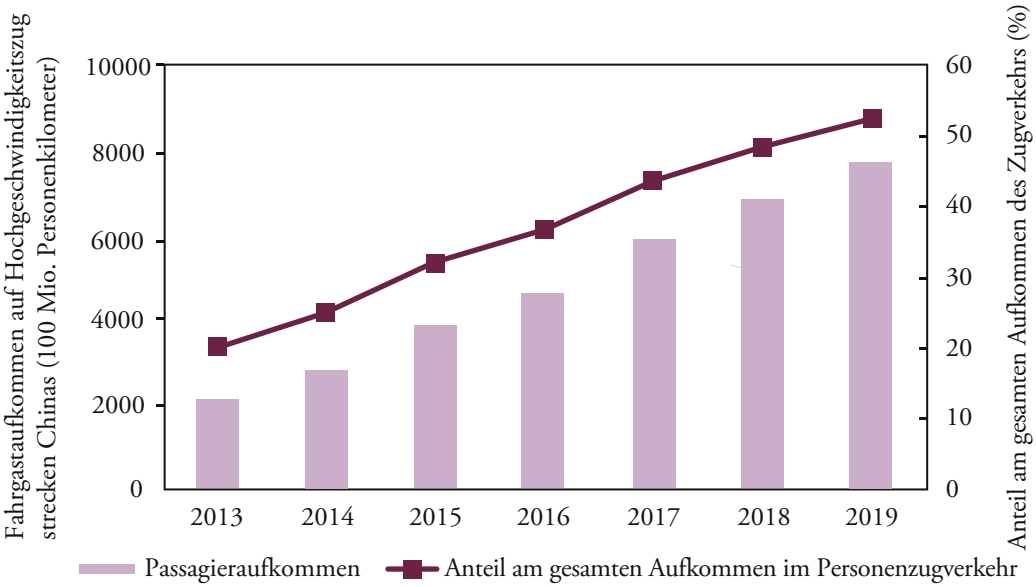
In den vergangenen Jahren sind die sich im Betrieb befindenden HGV-Strecken, deren Anteil am Gesamtzugnetz, sowie die Anzahl von Fahrgästen im HGV und ihr Anteil am gesamten Fahrgastaufkommen im Zugverkehr landesweit schnell und kontinuierlich gestiegen. Die gesamte in Betrieb genommene Streckenlänge des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs belief sich 2019 auf 35.388 Kilometer und stieg damit um einen Faktor von 2,2 im Vergleich zum Bestand 2013. Das HGV-Passagieraufkommen stieg um den Faktor 2,6 im Vergleich zu 2013 auf 774,67 Mrd. Passagierkilometer (siehe **Abbildung 1**), entsprechend 52,7 % der Passagierkilometer im gesamten Zugsektor. Im gleichen Jahr wurden 2,36 Mrd. Passagiere in Hochgeschwindigkeitszügen befördert, entsprechend 64,4 % des Passagieraufkommens im Zugverkehr in 2019. Bis Ende 2020 betrug die gesamte in Betrieb genommene Streckenlänge des Eisenbahnwesens in China 146.000 Kilometer, inklusive 38.000 Kilometern als Teil des HGV-Netzes.[7]

[2] 刘璐 . 我国高速铁路对民航客运的影响研究 . 北京 : 北京交通大学 , 2018.
[3] 中国高铁断代史 . 第一高铁秦沈客专如何被湮没 . [2011-06-11].
[4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会 . 中长期铁路网规划（2008 年调整）. [2019-8-7].
[5] 中国交通运输部 . 交通运输“十二五”规划 . [2011-04-13].
[6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会 . 中长期铁路网规划 . [2019-9-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-07/20/5093165/files/1ebe946db2aa47248b799a1deed88144.pdf.
[7] 吴佳潼 . 中国发布丨国家发改委：截至 2020 年底全国铁路运营里程达 14.6 万公里 . [2021-04-19]. http://news.china.com.cn/txt/2021-04/19/content_77419086.htm.

Abbildung 1: In Betrieb genommene Streckenlänge und Passagieraufkommen des chinesischen Hochgeschwindigkeitszugverkehrs[8]



(a) In Betrieb genommene Streckenlänge des HGV und dessen Anteil an der gesamten Streckenlänge

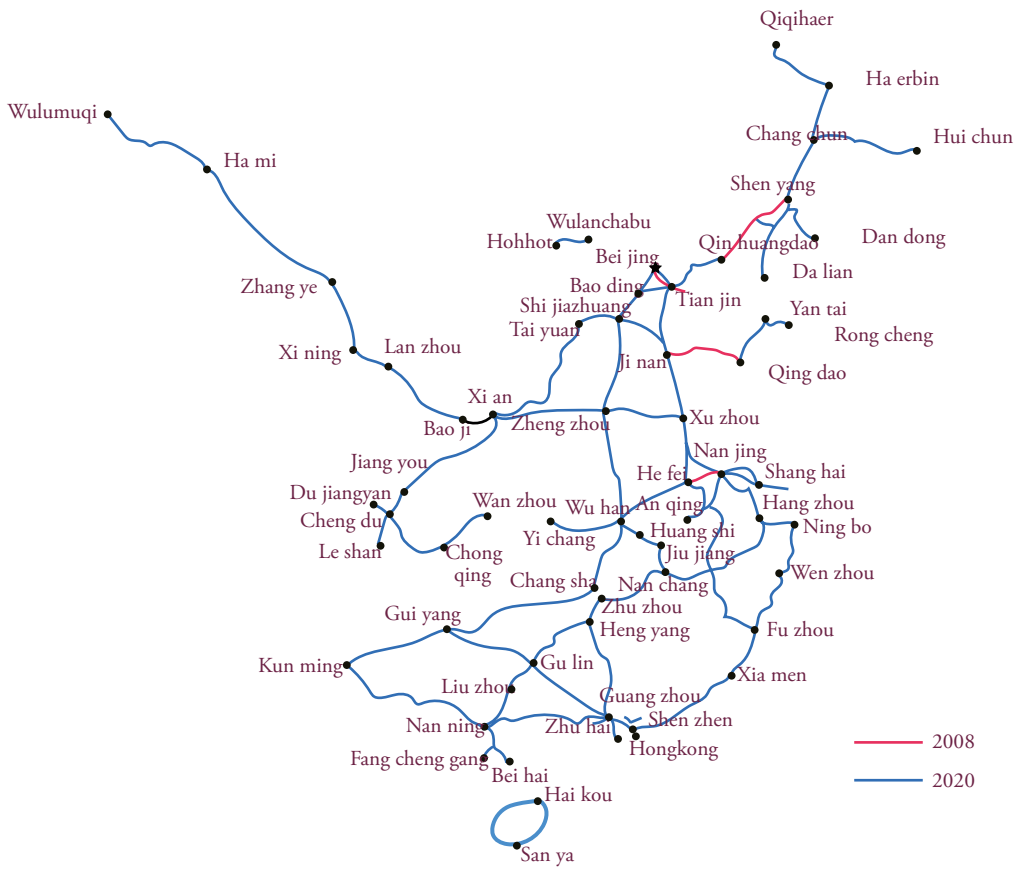


(b) Passagieraufkommen des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs und dessen Anteil am gesamten Fahrgastaufkommen im Zugverkehr landesweit

[8] 国家统计局 . 2020 中国统计年鉴 . 北京 : 中国统计出版社 , 2020.

Die kontinuierliche Ausweitung des HGV-Netzes in China ist in **Abbildung 2** dargestellt. Mit Bezug auf die räumliche Verteilung der bestehenden vier Nord-Süd- und vier Ost-West-Verkehrsachsen ist eine geografische Dominanz der Provinzen in östlichen Küstengebieten zu beobachten. Unter den Standorten entlang der Küste ist ein dichtes HGV-Netz bereits vorhanden, während der HGV-Ausbau in Zentral- und Westchina vergleichsweise im Rückstand steht. Die Hauptstrecken Peking-Kanton und Peking-Shanghai sind für eine Höchstgeschwindigkeit von 350 km/h ausgelegt, während die Strecke Shanghai-Wuhan-Chengdu und die Strecken im Südostküstengebiet dem regionalen Intercity-Verkehr dienen, deren Auslegung eine Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h vorsieht.

Abbildung 2: Entwicklung des chinesischen HGV-Netzes (Vergleich der Jahre 2008 und 2020)[9]



[9] Eigene Darstellung, basierend auf: Lawrence, Martha, Richard Bullock, and Ziming Liu. 2019. China's High-Speed Rail Development. International Development in Focus. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1425-9. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.

Das geplante HGV-Gitternetz bestehend aus acht Nord-Süd- und acht Ost-West-Schnellfahrstrecken ist in der nachstehenden **Abbildung 3** dargestellt. Zu den acht Nord-Süd-Verkehrsadern gehören die Schnellfahrstrecken entlang der Küste, die Strecken Peking-Shanghai, Peking-Hongkong (Taiwan), Peking-Harbin/Peking-Hongkong-Macao, Hohhot-Nanning, Peking-Kunming, Baotou (Yinchuan)-Haikou und Lanzhou (Xining)-Kanton. Die acht Ost-West-Verkehrskorridore umfassen die HGV-Strecken Suifenhe-Manzhouli, Peking-Lanzhou, Qingdao-Yinchuan, die „Landbrücke" (Lianyungang-Urumuqi), die Yangtse-Strecke (Shanghai-Chengdu), Shanghai-Kunming, Chongqing-Xiamen und Kanton-Kunming. Aufbauend auf jenen Verkehrskorridoren ist die Integration weiterer Intercity-Zugstrecken sowie regionaler Verbindungen geplant.

Im Jahr 2020 wurde daher im Rahmen des „Leitfadens für den Eisenbahnnetzbau zur Stärkung des Verkehrssektors in der neuen Ära"[10] festgelegt, die Entwicklung des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs als wichtige Aufgabe während des Zeitraums von 2035 bis 2050 zu priorisieren und bis 2035 die Anbindung aller Städte mit über 500.000 Einwohnern an den HGV zu realisieren. Damit können Mobilitätskreise mit jeweils einstündiger, zweistündiger bzw. dreistündiger HGV-Fahrzeit sowie Städtecluster geformt werden. Die Hauptstädte der Nachbarprovinzen sind innerhalb von drei Stunden Reisezeit mit dem Hochgeschwindigkeitszug zu erreichen und relevante Städte im Umkreis der städtischen Ballungszentren innerhalb von zwei Stunden.

Der kontinuierliche Ausbau des HGV-Netzes wurde zuletzt im Transportplan des 14. Fünfjahresplan im Januar 2022 bekräftigt, der vorsieht, die in Betrieb genommene Gesamtlänge des Zugstreckennetzes in China auf 165.000 Kilometer, inklusive 50.000 Kilometer Hochgeschwindigkeitsstrecken, bis 2025 zu erweitern.[11]

[10] 中国经济网 . 新时代交通强国铁路先行规划纲要》发布 明确 2035 年和 2050 年任务目标 . [2020-08-13]. http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202008/13/t20200813_35513476.shtml.

[11] 中国国务院。国务院关于印发“十四五”现代综合交通运输体系发展规划的通知 . [2022-01-18]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/18/content_5669049.htm.

Abbildung 3: Karte des HGV-Gitternetzes mit acht parallelen Nord-Süd-Strecken und acht Ost-West-Strecken (2016-2030)[12]

[12] Eigene Darstellung, basierend auf: 中国高铁八纵八横规划（2016~2030）. https://www.sohu.com/a/446657295_682294.

1.3 Politik und Institutionalisierung zur Förderung der HGV-Entwicklung in China

◆ (1) Allgemeine Konstruktionsspezifikationen und HGV-bezogene Technologien

Der Hochgeschwindigkeitszugverkehr in China wird mittels Makroplanungen und Eisenbahnbauplänen systematisch weiterentwickelt. Das für die Planung zuständige Eisenbahnministerium wurde 2013 in zwei separate Institutionen überführt: Zum einen in die Nationale Eisenbahnverwaltung (NRA), die dem Verkehrsministerium untersteht; zum anderen in die China Railway Corporation (CRC), ein staatliches Unternehmen, das für die Verwaltung des Eisenbahnnetzes zuständig ist. Die CRC wurde im Nachgang in China National Railways Corporation (CREC) umbenannt. Der größte Teil der HGV-Infrastruktur wird von Joint Ventures fertiggestellt, die von der Zentral- bzw. den Provinzregierungen und den entsprechenden privaten bzw. staatseigenen Unternehmen gegründet wurden.[13,14] Seit 2005 wird in den "Bestimmungen zum Neubau personenbefördernder Zugstrecken mit einer Geschwindigkeit von 300 bis 350 km/h" festgehalten, Neubaustrecken mit Geschwindigkeiten von 250 km/h bzw. 300-500 km/h klar in die Kategorie des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs zu zählen und explizite HGV-Konstruktionsnormen geltend zu machen.

Im Bereich der HGV-Technologie hat die chinesische Regierung ein groß angelegtes Paket an Förderpolitiken beschlossen, um Unternehmen, Hochschulen, Forschungsinstitutionen, Schlüssellabore und technische Forschungszentren im Rahmen nationaler wissenschaftlicher und technologischer Förderprojekte zusammenzuschließen und Durchbrüche in relevanten Kerntechnologien hervorzubringen.

◆ (2) Umweltverträglichkeitsprüfung für HGV-Projekte

Während des Baus und des Betriebs von Hoch-geschwindig keitszugstrecken bestehen erhöhte Risiken durch Lärm- und Umweltbelastungen sowie elektromagnetische Einflüsse, unter anderem mit negativen Auswirkungen auf die lokale Ökologie, inklusive der Atmosphäre und dem Grundwasser. Dementsprechend muss vor Baubeginn eines HGV-Projekts ein Umweltverträglichkeitsbericht erstellt werden, der obligatorisch der Überprüfung und Genehmigung durch die nationale Kommission für Entwicklung und Reform unterliegt, um umweltschädliche Auswirkungen von HGV-Projekten zu verhindern.

[13] 中国国家铁路集团有限公司简介 . http://www.china-railway.com.cn/gsjs/gsjj.

[14] 国务院办公厅关于印发国家铁路局主要职责内设机构和人员编制规定的通知 . [2013-05-15]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2013-05/15/content_7608.htm.

1.4 Zusammenfassende Analyse der Auswirkungen der chinesischen HGV-Entwicklung

◆ (1) Räumliche und zeitliche Verdichtung

Die rasante Entwicklung des HGV in China hat zahlreiche Auswirkungen auf Städte, Regionen und die zugrundeliegende Raumstruktur.[15,16,17,18] Der Einfluss auf städtischer Ebene spiegelt sich hierbei in erster Linie in der Umgestaltung des inneren Raums der betroffenen Bahnhofsstädte wider, während regional gesehen die räumliche Struktur innerhalb von Stadtagglomerationen und Metropolregionen durch den HGV-Ausbau verändert und ein räumlicher und zeitlicher Verdichtungseffekt bewirkt wird. Die Entwicklung des HGV in China ist daher eng mit der rapiden Urbanisierung der vergangenen Jahre verknüpft.[19] Die räumliche Verteilung von HGV-Bahnhöfen ist weitgehend auf den Bedarf der urbanen räumlichen Ausdehnung in Bahnhofsstädten abgestimmt und gilt als eines der wichtigen Instrumente zur Urbanisierungsbeschleunigung im städtischen Peripheriegebiet.[20,21,22,23,24]

◆ (2) Verbesserte Erreichbarkeit

Erreichbarkeit spielt eine wichtige Rolle in der Bewertung von Verkehrsinfrastrukturen und Transportnetzen.[25] Seit der Inbetriebnahme von HGV-Strecken dominiert der Intercity-HGV als Verkehrsträger den Personenverkehr zwischen benachbarten Städten. So liegt Studien zufolge nach Inbetriebnahme der Schnellfahrstrecke Peking-Tianjin der HGV-Anteil im Modal Split des Personenverkehrs bei 73 %, was einen erheblichen Verdrängungseffekt gegenüber den anderen Intercity-Verkehrsträgern aufzeigt.[26] Ebenso führt der Ausbau von HGV-Strecken zwischen benachbarten Städten zu allgemein höheren Reisefrequenzen. Die Anzahl an Fahrgästen, die ein- bis zweimal pro Woche oder regelmäßiger auf den entsprechenden HGV-Strecken pendeln, bildet hierbei den größten Anteil der Reisenden, während der Anteil der Reisenden, die nur einmal halbjährlich HGV-Strecken nutzen, stetig sinkt.[27]

[15] 陈健昌 , 保继刚 . 旅游者的行为研究及其实践意义 . 地理研究 , 1988, 7(3): 44-50.
[16] 汪德根 , 陈田 , 陆林 , 等 . 区域旅游流空间结构的高铁效应及机理：以中国京沪高铁为例 . 地理学报 , 2015, 70(2): 213-232.
[17] Givoni M, Banister D. Airline and railway integration. Transport policy, 2006, 13(5): 386-397.
[18] Masson S, Petiot R. Can the high-speed rail reinforce tourism attractiveness? the case of the high-speed rail between Perpignan (France) and Barcelona (Spain). Technovation, 2009, 29(9): 611-617.
[19] 郭宁宁 , 于涛 . 高铁新城的空间效应研究进展及思考 . 现代城市研究 , 2018(8): 115-122.
[20] 姜博 , 初楠臣 , 王媛 , 等 . 高速铁路对城市与区域空间影响的研究述评与展望 . 人文地理 , 2016, 31(1): 16-25.
[21] 侯雪 , 张文新 , 吕国玮 , 等 . 高铁综合交通枢纽对周边区域影响研究——以北京南站为例 . 城市发展研究 , 2012, 19(1): 41-46.
[22] 王昊 , 龙慧 . 试论高速铁路网建设对城镇群空间结构的影响 . 城市规划 , 2009, 33(4): 41-44.
[23] Javier G. Location, economic potential and daily accessibility：an analysis of the accessibility impact of the high-speed line Madrid-Barcelona-French border. Journal of transport geography, 2001(9): 229-242.
[24] Pol P M J. A renaissance of stations, railways and cities: economic effects, development strategies and organizational issues of European high-speed train stations. Delft: DUP Science, 2002.
[25] Park Y, Ha H K. Analysis of the impact of high-speed railroad service on air transport demand. Transportation research part e: logistics and transportation review, 2006, 42(2): 95-104.
[26] 侯雪 , 刘苏 , 张文新 , 等 . 高铁影响下的京津城际出行行为研究 . 经济地理 , 2011, 31(9): 1573-1579.
[27] 吴康 , 方创琳 , 赵渺希 , 等 . 京津城际高速铁路影响下的跨城流动空间特征 . 地理学报 , 2013, 68(2): 159-174.
张新生 . 同城化社会变迁中的跨界钟摆族群体研究 . 南京大学 , 2015.

◆ (3) Veränderungen auf dem Verkehrsmarkt

Die rasante Entwicklung des HGV hat den Verkehrsmarkt, insbesondere durch Verkehrsverlagerungen vom Straßen- und Luftverkehr hin zum Schienenverkehr, erheblich beeinflusst. Konkrete Fallstudien erlauben hierbei erste Erkenntnisse zum Einfluss des HGV-Ausbaus auf den gesamten Verkehrssektor.

Allgemein gesehen besitzt der Hochgeschwindigkeitszugverkehr in China im Entfernungsbereich zwischen 150 bis 800 Kilometern (d. h. drei bis vier Stunden Reisezeit) eine enorme Wettbewerbsfähigkeit. Bei kürzeren Fahrstrecken wird das Auto bzw. der Bus von Reisenden bevorzugt, während man sich bei längeren Strecken eher für den Luftverkehr entscheidet.[28] Individuelles Reiseverhalten wird hierbei unmittelbar durch Faktoren der Wirtschaftlichkeit, Geschwindigkeit, Komfort, Bequemlichkeit und Sicherheit beeinflusst. Studien haben bereits festgestellt, dass die Marktschwellen mit gleicher Wahlbereitschaft für verschiedene Verkehrsträger für den HGV gegenüber dem Auto und dem Flugzeug jeweils 152 Kilometer und 633 Kilometer betragen, während die höchsten Verlagerungseffekte des HGV gegenüber Bussen, dem konventionellen Schienenverkehr und dem Luftverkehr jeweils im Entfernungsbereich 100-300 Kilometer, 300-700 Kilometer bzw. 700-1.000 Kilometer liegen.[29,30,31] Weitere Studien aus dem Jahr 2019 haben gezeigt, dass die Marktschwellen für den Hochgeschwindigkeitszugverkehr gegenüber dem Auto und dem Flugzeug von Stadt zu Stadt variieren und die Höhe der Grenzwerte stark mit dem lokalen Pro-Kopf-Zeitwert in Verbindung steht. So wurde belegt, dass die Marktschwellen für den HGV gegenüber dem Luftverkehr indirekt proportional mit dem Pro-Kopf-Zeitwert korrelieren. Je höher der Zeitwert pro Person, desto wahrscheinlicher die Entscheidung für einen schnelleren und effizienteren Verkehrsträger.[32]

Mit Blick auf die Entwicklung des Straßenpersonenverkehrs verzeichnet dieser einen drastischen Rückgang der Auslastung, der Abfahrtsfrequenz, der Einnahmen und des Fahrgastaufkommens auf den mit den HGV-Neubaustrecken überschneidenden Buslinien, nachdem die Schnellfahrstrecken Nanjing-Hangzhou, Peking-Tianjin, Hefei-Fuzhou, Changsha-Loudi und Shenzhen-Kanton eröffnet wurden (siehe **Tabelle 1**). Die täglichen Einnahmen der relevanten Buslinien sanken durch die Inbetriebnahme der HGV-Strecke Nanjing-Hangzhou um 68 % mit einer Auslastungsabnahme in Höhe von 25,89 %. Auch auf der Buslinie Peking-Tianjin wurde ein Jahr nach Inbetriebnahme der entsprechenden HGV-Strecke ein Rückgang der täglichen Bus-Abfahrtsfrequenz von 48,2 % festgestellt.[33]

[28] Lawrence, Martha, Richard Bullock, and Ziming Liu. 2019. China’s High-Speed Rail Development. International Development in Focus. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1425-9. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.
[29] 王绍博 , 郭建科 , 罗小龙 , 等 . 高速铁路对中心城市航空客运市场的空间影响——基于人均时间价值视角 . 地理科学进展 , 2019(11): 1-10. [61].
[30] 孙枫 , 汪德根 , 牛玉 . 高速铁路与汽车和航空的竞争格局分析 . 地理研究 , 2017, 36(1): 171-187.
[31] 王姣娥 , 景悦 , 杨浩然 . 高速铁路对国内民航旅客运输的替代效应测度 . 自然资源学报 , 2019, 34(9): 1933-1944.
[32] 王绍博 , 郭建科 , 罗小龙 , 等 高速铁路对中心城市航空客运市场的空间影响——基于人均时间价值视角 . 地理科学进展 , 2019(11): 1-10.
[33] 孙枫 , 汪德根 , 牛玉 . 高速铁路与汽车和航空的竞争格局分析 . 地理研究 , 2017, 36(1): 171-187.

Tabelle 1: Auswirkungen auf den Personenstraßenverkehr[34] durch die Inbetriebnahme des chinesischen HGV-Netzes

Strecke	Streckenlänge (km)	Verkehrsverlagerung
Strecke Nanjing-Hangzhou	236	Nach Inbetriebnahme der Schnellfahrstrecke Nanjing-Hangzhou im Juli 2013 sank die tatsächliche Auslastung der Buslinien Nanjing-Hangzhou von 54,39 % auf 28,51 %. Das tägliche Passagiervolumen ging von 500 auf 150 zurück und die Tageseinkommen sanken von CNY 50.000 (ca. EUR 6124 [35]) auf CNY 16.000 (ca. EUR 1960).
Strecke Peking-Tianjin	112	Im August 2008 wurde die Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Tianjin eröffnet. Innerhalb des darauffolgenden Jahres reduzierte sich die Anzahl täglich abfahrender Busse für die Strecke Peking-Tianjin von 83 auf 43, während das monatliche Passagiervolumen im Durchschnitt von 47.400 auf 36.700 sank.
Strecke Hefei-Fuzhou	675	Die Inbetriebnahme der Schnellfahrstrecke Hefei-Fuzhou im Juni 2015 führte zur Stilllegung bzw. zu einer verringerten Abfahrtsfrequenz auf den mit der HGV-Strecke überschneidenden Buslinien aufgrund niedrigerer Auslastung. Das Fahrgastaufkommen sank um 40 % auf der Strecke Fuzhou-Nanping.
Strecke Changsha-Loudi	114	Im Dezember 2014 wurde der Abschnitt der Hochgeschwindigkeitsstrecke Shanghai-Kunming in der Provinz Hunan offiziell in Betrieb genommen. Einen Monat später ging das Fahrgastaufkommen der abgefahrenen Busse von den Busbahnhöfen Changsha West und Süd nach Huaihua, Fenghuang, Loudi und Shaoyang um jeweils mehr als 50 % bzw. 80 % zurück.
Strecke Shenzhen-Kanton	105	Der Abschnitt Shenzhen-Kanton der HGV-Verbindung Wuhan-Kanton wurde im Dezember 2011 eingeweiht. Nach einem Monat gingen die Reisendenzahlen während des Frühlingsfests von Kanton aus in Richtung Dongguan und Shenzhen um jeweils 19,13 % bzw. 30,32 % zurück.

[34] 孙枫 , 汪德根 , 牛玉 . 高速铁路与汽车和航空的竞争格局分析 . 地理研究 , 2017, 36(1): 171-187.
[35] Umrechnungen basierend auf dem durchschnittlichen Umrechnungskurs des Jahres 2013. Siehe Deutsche Bundesbank. 2013.

Bis dato beschäftigen sich nur wenige Studien, unter anderem bedingt durch die relativ schwer zugängliche Datenlage, mit der empirischen Analyse von Substitutionseffekten vom Straßenverkehr auf den HGV. Die Ergebnisse bestehender Analysen deuten jedoch darauf hin, dass das Passagieraufkommen auf den überschneidenden Strecken im Straßenpersonenverkehr durch die Inbetriebnahme von Neubaubahnstrecken auf den HGV verlagert wird. Zum Beispiel beträgt der Anteil der beförderten Personen zwischen den Städten Changchun und Jilin, die etwa 90 Kilometer voneinander entfernt sind, auf Autobahnen und im HGV etwa 30 % bzw. 70 %. Zwischen Shenzhen und Shanwei mit einer Entfernung von rund 200 Kilometern ist der Personenverkehr fast identisch zwischen dem Straßenverkehr und dem HGV aufgeteilt.[36,37]

In einer kürzlich durchgeführten Studie wurde der Substitutionseffekt des HGV gegenüber dem Luft- und Straßenverkehr nach Fertigstellung des chinesischen Hochgeschwindigkeitszugnetzes mit acht Nord-Süd- und acht Ost-West-Verkehrskorridoren abgeschätzt. Die Ergebnisse verweisen auf einen deutlichen zu erwartenden Substitutionseffekt, manifestiert in einer Verlagerung von 32 % des Straßenverkehrsmarkts sowie 12 % des Luftverkehrsmarkts hin zum HGV.[38]

Darüber hinaus haben weitere Studien den Verkehrsverlagerungseffekt und das induzierte Wachstum des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs messbar gemacht. Während sich der Verkehrsverlagerungseffekt auf den Wettbewerb um Fahrgäste auf dem Verkehrsmarkt bezieht, stellt der induzierte Wachstumseffekt die stimulierende Wirkung des HGV auf den Personenverkehrsmarkt insgesamt mit verschiedenen Verkehrsträgern dar, wie z. B. die vergrößerten Verkehrsströme im Straßenverkehr zu und von HGV-Bahnhöfen.

Der HGV weist eine starke substituierende Wirkung auf den zivilen Luftverkehr im überschneidenden Verkehrsnetz auf, wobei der Substitutionseffekt umso ausgeprägter ist, je schneller die Hochgeschwindigkeitszüge sind und je kürzer die Entfernung zwischen Städten ist.[39] Weitere Studienergebnisse zeigen, dass die Auswirkungen der HGV-Neubaustrecken auf den Luftverkehr in kleinen und mittleren Städten größer sind als in Großstädten und die Auswirkungen in Zentralchina bedeutender sind als im östlichen bzw. westlichen Teil des Landes.[40] Hierbei ist insbesondere das Billigflugangebot in China überproportional von Verkehrsverlagerungen hin zu HGV-Reisen betroffen.[41,42] Eine detaillierte Analyse der Verkehrsverlagerung vom Luftverkehr auf den Hochgeschwindigkeitszugverkehr folgt in Kapitel 2.

[36] 沙峻林 . 高速铁路影响下的公路客运方式分担率及发展策略研究 . 长春 : 吉林大学 , 2012.
[37] 罗云辉 . 高铁对中小城市公路客运的影响及其对策研究 . 广州 : 华南理工大学 , 2015.
[38] 翁瑾 , 肖嘉颖 , 李鑫 . 高铁的需求替代效应评估： 基于全局网络的研究 . 新疆财经 . 2021, (2), 5-16.
[39] 王姣娥 , 景悦 , 杨浩然 . 高速铁路对国内民航旅客运输的替代效应测度 . 自然资源学报 , 2019, 34(9): 1933-1944.
[40] 王姣娥 , 焦敬娟 , 金凤君 . 高速铁路对中国城市空间相互作用强度的影响 . 地理学报 , 2014, 69(12): 1833-1846.
[41] Su M, Luan W, Fu X, et al. The competition effects of low-cost carriers and high-speed rail on the Chinese aviation market.Transport Policy, 2020, 95: 37-46.
[42] Clewlow R R, Sussman J M, Balakrishnan H. The impact of high-speed rail and low-cost carriers on European air passenger traffic. Transport Policy, 2014, 33: 136-143.

◆ (4) Preisentwicklung im Hochgeschwindigkeitszugverkehr

Der chinesische HGV-Fahrpreis beträgt zirka ein Viertel des europäischen Preisniveaus, stellt allerdings gleichzeitig das Dreifache bis Vierfache des Fahrkartenpreises für reguläre Züge in China dar.[43] Die Preisbildung für den chinesischen HGV berücksichtigt dabei sowohl die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber anderen Verkehrsträgern als auch das durchschnittliche Einkommen und die Zahlungsfähigkeit. Im Zeitraum von 2007 bis 2016 blieb der Fahrpreis für Hochgeschwindigkeitsstrecken beinahe unverändert. Die rasante Zunahme des Passagieraufkommens im Hochgeschwindigkeitszugverkehr im gleichen Zeitraum spiegelt die hohe Attraktivität des HGV für zahlreiche chinesische Reisende wider. Ab 2017 wurden die Fahrpreise für einen Teil der Schnellfahrstrecken erhöht, mit einer Preissteigerung von 10 % bis 50 %.[44]

Weitere Studien haben ergeben, dass der chinesische HGV hauptsächlich Geschäftsleute und Touristen anzieht. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass die Einkommen von HGV-Fahrgästen 30 % bis 50 % höher sind als die Einkommen von Passagieren auf regulären Zugverbindungen. Alle Einkommensgruppen sind jedoch grundsätzlich bereit, wahlweise mit dem HGV oder dem regulären Zugverkehr zu reisen.[45]

◆ (5) Analyse der wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Auswirkungen

(a) Auswirkungen auf die wirtschaftliche Entwicklung

Die Entwicklung des HGV in China hat nicht nur neuen Mobilitätsbedarf im Bereich Geschäftsreisen und Tourismus generiert, sondern darauf aufbauend ebenso die wirtschaftliche Interaktion zwischen Städten gefördert. Wissenschaftliche Studien haben ergeben, dass der Hochgeschwindigkeitszugverkehr einen positiven Einfluss auf die integrierte ökonomische Entwicklung in den chinesischen Zielregionen ausübt[46] und ebenfalls Einfluss auf demografische Entwicklungen nimmt.[47,48,49]

Im Rahmen umfangreicher Bauprojekte mit öffentlichen Investitionen trägt der HGV-Bau zum Wachstum des chinesischen Bruttoinlandsproduktes (BIP) bei und befördert hierbei insbesondere Bau- und materialrelevante Industrien. Der durchschnittliche Tagesverbrauch von Stahl, Beton und Zement im Rahmen des HGV-Bauprojekts für die Schnellfahrstrecke Peking-Shanghai lag beispielshaft bei 10.000 Tonnen, 110.000 Kubikmeter bzw. 35.000 Tonnen.

[43] Lawrence, Martha, Richard Bullock, and Ziming Liu. 2019. China’s High-Speed Rail Development. International Development in Focus. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1425-9. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.

[44] 陆娅楠 . 高铁调价了 你想搭哪趟 . [2017-04-12]. http://finance.people.com.cn/BIG5/n1/2017/0412/c1004-29203849.html.

[45] Lawrence, Martha, Richard Bullock, and Ziming Liu. 2019. China’s High-Speed Rail Development. International Development in Focus. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1425-9. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.

[46] Chen Z, Haynes K E. Impact of high-speed rail on housing values: an observation from the Beijing-Shanghai line. Journal of Transport Geography, 2015, 43: 91-100.

[47] Ke X, Chen H, Hong Y, et al. Do China’s high-speed-rail projects promote local economy? - New evidence from a panel data approach. China Economic Review, 2017, 44: 203-226.

[48] Diao M. Does growth follow the rail? The potential impact of high-speed rail on the economic geography of China. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, 113: 279-290.

[49] Gao Y, Song S, Sun J, et al. Does high-speed rail connection really promote local economy? Evidence from China’s Yangtze River Delta. Review of Development Economics, 2020, 24(1): 316-338.

(b) Auswirkungen auf die soziale Entwicklung

Die Beschäftigtenzahl in HGV-relevanten Industriezweigen, von der Forschung und Entwicklung bis hin zur Bauausführung, nimmt weiter zu. Die Entwicklung des HGV-Sektors unterstützt ebenfalls die Bemühungen zur Armutsbekämpfung in China. In den wirtschaftlich unterentwickelten Regionen entlang der Schnellfahrstrecken wie Baoji-Lanzhou, Xi'an-Chengdu und Chongqing-Guiyang sowie in den angrenzenden Gebieten hat der HGV-Ausbau die Wiederbelebung des ländlichen Raums und die koordinierte regionale Entwicklung stark vorangetrieben.

Der Aufschwung der HGV-Industrie belebt ebenfalls die Stadtentwicklung und den Tourismus in China. Der massive Ausbau des HGV-Netzes ist eng mit der umfangreichen Entwicklung neuer Stadtviertel in einer Reihe von kleinen und mittelgroßen Städten verknüpft, wobei die Stadtentwicklung sogenannter „HGV New Towns" häufig unmittelbar mit HGV-Bauprojekten einhergeht.

(c) Umweltauswirkungen und weitere Nachhaltigkeitsaspekte

Der HGV bringt einerseits neue ökonomische Dimensionen, andererseits sollten ökologische Folgewirkungen und Faktoren einer nachhaltigen Entwicklung in der Gesamtplanung berücksichtigt werden. Über den gesamten Lebenszyklus von HGV-Projekten, von der Planung und dem Entwurf über die Materialherstellung, den Bau, den Betrieb und die Wartung bis hin zur Stilllegung, werden Emissionen verursacht.[50]

Gleichzeitig weisen HGV-Technologien klare Vorteile in der Gesamtenergieeinsparung sowie allgemeinen Emissionseinsparung im Verkehrssektor auf. Insbesondere die Verlagerung vom Straßenpersonen- sowie zivilen Luftverkehr auf den HGV kann dazu beitragen, kohlenstoffarme, energieeffiziente Mobilität zu fördern.[51,52] Das Verhältnis des Energieverbrauchs pro Personenkilometer bei Hochgeschwindigkeitszügen, Nutzfahrzeugen und Passagierflugzeugen beträgt etwa 1:5:6.[53] Der HGV hat die CO_2-Emissionen in Städten erheblich reduziert, wobei jede zusätzliche 100. HGV-Verbindung China zu einer Emissionsreduktion um 0,14 %[54] führt. Weitere Informationen zur Analyse von CO_2-Emissionen über den gesamten HGV-Lebenszyklus sind in Kapitel 3 zu finden.

[50] Lawrence, Martha, Richard Bullock, and Ziming Liu. 2019. China's High-Speed Rail Development. International Development in Focus. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1425-9. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.

[51] 周新军 . 高速铁路行车低碳环保效应分析 . 电力与能源 , 2013, 34(03): 212-216.

[52] Wang Y, Zhou S, Ou X. Development and application of a life cycle energy consumption and CO_2 emissions analysis model for high-speed railway transport in China. Advances in Climate Change Research, 2021, 12(2): 270-280.

[53] 崔力心 . 高速铁路与其他交通方式节能减排比较研究 . 北京 : 北京交通大学 , 2010.

[54] Jia R, Shao S, Yang L. High-speed rail and CO_2 emissions in urban China: A spatial difference-in-differences approach. Energy Economics, 2021, 99: 105271.

◆ Kapitel 2 ◆

Analyse der Verkehrsverlagerung sowie deren emissionsreduzierende Leistung

Das vorliegende Kapitel konzentriert sich unter Verwendung des Differenzenmodells (Differences-in-Differences – DiD) auf eine quantitative Analyse der Verkehrsverlagerung vom zivilen Luftverkehr auf den HGV in China. Die Auswirkungen der Inbetriebnahme von HGV-Neubaustrecken werden anhand einer Analyse von unterschiedlichen Entfernungsabschnitten, Betriebsdauern und geografischen Lagen betrachtet. Die ausgewählten Daten beziehen sich auf den Zeitraum von 2008 bis 2017 auf der jeweiligen Route. Das obige Zeitfenster inkludiert die Bauphasen zu Beginn der HGV-Planungsphase bis hin zur grundlegenden Einweihung des HGV-Gitternetzes. Angesichts des staatlich angekündigten Bauplans für die acht Nord-Süd- und acht Ost-West-Korridore und des Vorhabens für einen flächendeckenden Anschluss sämtlicher Städte über 500.000 Einwohnern an das HGV-Netz wird in der vorliegenden Analyse die Verkehrsverlagerung vom zivilen Luftverkehr auf den Hochgeschwindigkeitszugverkehr nach der Realisierung des Bauplans ermittelt.

2.1 Verkehrsverlagerung vom zivilen Luftverkehr auf den Hochgeschwindigkeitszugverkehr: Grundlage der Literaturauswertung

Das bis dato etablierte HGV-Netz umfasst zahlreiche wirtschaftlich hochentwickelte Städte, deren zwischenstädtische Flugrouten ebenfalls stark ausgelastet sind. Aus diesem Grund besteht ein signifikantes Konkurrenzverhältnis zwischen dem HGV und dem zivilen Luftverkehr auf dem Mobilitätsmarkt.[55] Die neu eröffneten Schnellfahrstrecken wirken sich vor allem auf Kurzstreckenflüge aus, was teilweise zur Stilllegung von Flugrouten geführt hat.[56] Die Flugrouten Zhengzhou-Xi'an, Nanjing-Wuhan und Chengdu-Chongqing, die vor der Inbetriebnahme der entsprechenden HGV-Strecken täglich mindestens einen Flug beibehielten, wurden innerhalb von sechs Monaten nach dem Erbau der Schnellfahrstrecken weitgehend stillgelegt.[57] Datenanalysen des Zeitraums 1994-2012 bestätigen, dass die substituierende Wirkung des HGV in der Entfernungsgruppe 500-800 Kilometer am größten ist.[58] Flugrouten mit einer Reiseentfernung von weniger als 900 Kilometern werden ebenfalls von der substituierenden Wirkung des HGV beeinflusst. Die Anzahl der beförderten Passagiere auf der Flugstrecke Kanton-Wuhan halbierte sich von 120.000 Personen pro Monat vor dem Erbau der HGV-Strecke auf 60.000 im Monat nach der Inbetriebnahme der Strecke. Mit der fortschreitenden Ausweitung des HGV-Netzes wird der HGV mehr Reisende auf weiteren Routen vom Luftverkehr abziehen.

Eine Vielzahl von Studien widmet sich bestimmten Schnellfahrstrecken bzw. einem bestimmten Gebiet und modelliert die Präferenz zwischen HGV und zivilem Luftverkehr sowie die Auswahl unterschiedlicher HGV-Transit-Dienstleistungen. Auf der Grundlage von Daten aus dem Zeitraum 2011-2014 für die Strecke Peking-Chongqing (ca. 1.800 Kilometer) beträgt der HGV-Anteil am Modal-Split nur 0,9 %, woraus hervorgeht, dass der HGV im Langstrecken-Personentransport in China nur

[55] 丁金学 , 金凤君 , 王姣娥 , 等 . 高铁与民航的竞争博弈及其空间效应——以京沪高铁为例 . 经济地理 , 2013, 33(05): 104-110.
[56] 马跃强 . 高速铁路对航空客运的影响——基于京沪线的分析 . 北京 : 对外经济贸易大学 , 2020.
[57] Bullock Richard, Sakzberg Andrew, 金鹰 . 把脉中国高铁发展计划： 高铁运行头三年 . 北京： 世界银行驻华代表处 , 2013.
[58] Wan Y, Ha H, Yoshida Y, et al. Airlines' reaction to high-speed rail entries: Empirical study of the Northeast Asian market. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 94: 532-557.

eine untergeordnete Rolle spielt.[59] In einem weiteren Forschungsprojekt, das sich mit dem Konsumverhalten der Reisenden mit einer Abreise von Chongqing aus auf eine längere Strecke auseinandersetzt, wurde ermittelt, dass die Verbraucher mit niedrigeren Einkommen zu konventionellen Zugangeboten tendieren und Mobilitätsverbraucher in Zentral- und Westchina seltener den HGV als Transportmittel auswählen.[60] Einige Studien haben weiterhin Erkenntnisse bezüglich der Entwicklung des Passagieraufkommens sowie der Preisbildung im Luftverkehr unter dem Einfluss des HGV ermöglicht. Ohne Berücksichtigung regionaler Differenzen wurde demzufolge nach Inbetriebnahme von HGV-Strecken die Auslastung konkurrierender Flugverbindungen im Durchschnitt um 50 % gesenkt.[61] In einer Studie, die Daten der erbauten HGV-Strecken von 2010 bis 2013 erfasste und die Gegenstrategien der drei größten chinesischen Fluggesellschaften im Wettbewerb mit dem HGV analysierte, wurde festgestellt, dass insbesondere der Preisunterschied eine große Rolle in der Konkurrenz mit dem HGV spielt.[62]

Die Wettbewerbsfähigkeit des HGV ist stark von Transportentfernung bzw. Zeitdauer abhängig. Die Ergebnisse einer Panelstudie von 2007 bis 2014 zeigen, dass Schnellfahrstrecken mit einer Fahrzeit von weniger als zwei Stunden die größte verkehrsverlagernde Wirkung aufweisen. Der größte Wettbewerbsvorteil des HGV zeigt sich auf den Strecken mit einer Reisezeit von weniger als fünf Stunden und einer Entfernung von weniger als 1.350 Kilometern (z. B. entsprechend einer Distanz zwischen Berlin-Paris mit einer Länge von 1.088 Kilometer) gegenüber dem zivilen Luftverkehr.[63] Bei weiteren Forschungsprojekten wurden die Strecken je nach Reiseentfernung in drei Kategorien aufgegliedert, klassifiziert als weniger als 500 Kilometer, 500 bis 800 Kilometer und länger als 800 Kilometer. Laut den Forschungsergebnissen aus dem Jahr 2016 hat der HGV den größten Substitutionseffekt auf den Strecken mit einer Länge von 500 bis 800 Kilometer (z. B. die Strecke Berlin-München mit einer Länge von 585 Kilometer). Dabei ist das Passagieraufkommen des zivilen Luftverkehrs im Durchschnitt um 34 % gesunken.[64]

[59] Li Z, Sheng D. Forecasting passenger travel demand for air and high-speed rail integration service: A case study of Beijing-Guangzhou corridor, China. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 94: 397-410.

[60] Ren X, Chen Z, Wang F, et al. Impact of high-speed rail on social equity in China: Evidence from a mode choice survey. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2020, 138: 422-441.

[61] Li H, Strauss J, Lu L. The impact of high-speed rail on civil aviation in China. Transport Policy, 2019, 74: 187-200.

[62] Zhang Q, Yang H, Wang Q. Impact of high-speed rail on China’s Big Three airlines. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2017, 98: 77-85.

[63] 刘璐 . 我国高速铁路对民航客运的影响研究 . 北京： 北京交通大学 , 2018.

[64] Chen Z. Impacts of high-speed rail on domestic air transportation in China. Journal of Transport Geography, 2017, 62: 184-196.

2.2 Analysemethoden

◆ (1) Differenzenmodell

Das Differenzen- oder DiD-Modell ist eine Methode zur Analyse und Bewertung der Auswirkungen von eingesetzten Maßnahmen. Die DiD-Methode wird häufig verwendet, um kausale Wirkungen zu prüfen, insbesondere wenn die Auswirkungen einer Maßnahme auf einen bestimmten Zielgegenstand bewertet werden sollen. Auf der Grundlage von einer Zeit- sowie einer Gruppen-Dimension lassen sich vier Datensätze untersuchen: Daten einer Versuchsgruppe, die von der Intervention betroffen ist, und Daten einer Kontrollgruppe, jeweils vor Eintreten der Maßnahme (Ausgangspunkt), als auch nach Eintreten der Maßnahme (Wirkungsanalyse). Der DiD-Ansatz entspricht der Annahme eines parallelen Entwicklungstrends zwischen Versuchs- und Kontrollgruppe, sofern die Maßnahme nicht eingetreten wäre.

Die Planung und der Bau des HGV-Gitternetzes unterliegen einer gemeinsamen Entscheidung der zuständigen nationalen Behörden. Die Inbetriebnahme der HGV-Strecken wird als eine „Maßnahme“ angesehen, die jedoch nicht durch die Entwicklung der Luftverkehrsrouten bedingt ist. Das DiD-Modell kann im vorliegenden Fall verwendet werden, um die Auswirkungen des HGV-Ausbaus auf die Anzahl der Flüge und die Reisendenzahlen der inländischen Zivilluftfahrt in China zu bewerten. Die Versuchsgruppe in der vorliegenden Studie besteht aus Paaren von Städten, zwischen denen eine HGV-Verbindung während der Zeitspanne 2008-2017 entstanden ist. Städtepaare, die in diesem Zeitraum noch keinen direkten HGV-Anschluss hatten, gelten als Kontrollgruppe.

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden Flugdaten und Reisendenzahlen auf Streckenebene untersucht. Für die Strecken in der Versuchsgruppe liegen sowohl HGV-Dienstleistungen als auch Angebote des zivilen Luftverkehrs vor.

◆ (2) Auswahl der zu erforschenden Variablen

In dieser Studie werden das BIP (in CNY 10.000), die Bevölkerungszahl (in 10.000 Einwohnern) und die Anzahl der Internetanschlüsse (je 10.000 Einwohner) als Kontrollvariablen herangezogen, um den Entwicklungsstand der betroffenen Städtepaare im Luftverkehrsnetz darzustellen. Die BIP-Summe bezieht sich auf die Summierung der BIP-Werte der Städtepaare auf der jeweiligen Strecke. Die registrierte Bevölkerung mit einem Dauerwohnsitz und die Zahl der Internetnutzer sind jeweils die Summe der entsprechenden Indikatoren beider Städte.

Die jährliche Zahl der beförderten Personen bzw. die Anzahl der Flüge auf der ausgewählten Strecke dienen als abhängige Variablen der Studie, womit Schwankungen und Veränderungen der luftverkehrsbezogenen Aktivitäten beschrieben werden. Die Anzahl der Flüge ist repräsentativ für die Wiedergabe des Aktivitätsniveaus der Luftverkehrsrouten, während die Bevölkerungszahl die Dimension der beförderten Fluggäste zwischen den Städten widerspiegelt. Die beiden Werte können ein unmittelbares Bild über die Veränderungen in Verkehrsaktivitäten auf der jeweiligen Strecke vermitteln.

Zu den Variablen, die den Stand des HGV widerspiegeln, gehören die benötigte Fahrzeit für eine durchgängige HGV-Fahrt ohne Umstieg, die zurückgelegte Streckenlänge und die Frequenz der Hochgeschwindigkeitszüge. Im Hochgeschwindigkeitszugverkehr werden Züge mit einer Fahrgeschwindigkeit von 350 km/h oder 250 km/h eingesetzt. Die benötigte Fahrzeit mit einer durchgehenden Fahrt ohne Umsteigen zwischen verschiedenen Städtepaaren variiert je nach der Geschwindigkeit bzw. der Anzahl der Zwischenhalte. Die Betriebszeit und die Frequenz der täglichen Abfahrten bestimmen unmittelbar die Wettbewerbsfähigkeit des HGV. Die HGV-Fahrzeit wird herangezogen, um die Flugrouten entsprechend zu klassifizieren, damit die HGV-Wettbewerbsfähigkeit bei unterschiedlicher Fahrzeitdauer analysiert werden kann. Die Reiseentfernung stellt die Länge der Schnellfahrstrecke zwischen dem Städtepaar dar, die eine ähnliche Rolle wie die Fahrzeit spielt und die Wettbewerbsfähigkeit des HGV ebenfalls beeinflusst. Die Frequenz der HGV-Abfahrten gibt die Anzahl der HGV-Fahrten pro Tag zwischen Städtepaaren an und wird verwendet, um die Verfügbarkeit des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs zu beschreiben.

Die für die Studie ausgewählten Variablen sind in **Tabelle 2** aufgeführt.

Tabelle 2: Festlegung und Beschreibung der Variablen für das Analysemodell der Verkehrsverlagerung vom zivilen Luftverkehr auf den Hochgeschwindigkeitszugverkehr

Variabletyp	Beschreibung der Variable
Abhängige Variable	Anzahl der Flüge, stattgefunden auf der Strecke im laufenden Jahr
Abhängige Variable	Beförderte Passagiere auf der Strecke im laufenden Jahr
Kontrollvariable	BIP-Summe des Städtepaars
Kontrollvariable	Gesamteinwohnerzahl mit einem Internetanschluss im Städtepaar (in 10.000 Personen)
Kontrollvariable	Gesamtbevölkerung: Summe der registrierten Bevölkerung des Städtepaars (in 10.000 Personen)
Variable in Bezug auf Hochgeschwindigkeitszugverkehr	Abfahrtsfrequenz der HGV-Züge pro Tag zwischen beiden Städten
Variable in Bezug auf Hochgeschwindigkeitszugverkehr	Fahrzeit mit dem Hochgeschwindigkeitszug zwischen beiden Städten (in Std.)
Variable in Bezug auf Hochgeschwindigkeitszugverkehr	Länge der Schnellfahrstrecke des Städtepaars (in Kilometern)

2.3 Eckdaten

◆ (1) Daten der Stichproben

Die Studie hat einen Stichprobendatensatz mit Daten auf Streckenebene in China für den Zeitraum 2008 bis 2017 erstellt, der die Entwicklung und die Aktivitäten des zivilen Luftverkehrs seit der Inbetriebnahme der ersten Hochgeschwindigkeitszugstrecke bis zur grundlegenden Fertigstellung der vier Nord-Süd- und vier Ost-West-Schnellfahrstrecken abdeckt.

Die vorliegende Studie umfasst die Flugdaten von 2007 bis 2018 aus dem Jahrbuch „From the Statistical View of Civil Aviation“[65] und der Big-Data-Plattform „Variflight.com“[66]. Geprüft wurden die Daten über die Strecken unter 362 Städtepaaren aus 32 wichtigen Verkehrsknotenstädten im Rahmen des HGV-Gitternetzes.

Zu den 32 Schwerpunktstädten (Versuchsgruppe) gehören: Peking, Shijiazhuang, Zhengzhou, Wuhan, Changsha, Kanton, Shenzhen, Harbin, Dalian, Tianjin, Jinan, Xuzhou, Nanjing, Shanghai, Ningbo, Fuzhou, Xiamen, Taiyuan, Qingdao, Shenyang, Lanzhou, Xi‘an, Chengdu, Chongqing, Hefei, Kunming, Guiyang, Nanchang, Hangzhou, Wenzhou, Wuxi und Changzhou.

Die anderen in der Stichprobe berücksichtigten Städte (Kontrollgruppe) wurden angesichts ihrer jährlichen Flugverbindungen ausgewählt, wobei die vorliegende Studie hauptsächlich Flugstrecken mit einem hohen Verkehrsaufkommen berücksichtigt. Sämtliche Flugrouten gehören zu relativ aktiven Routen. Die Kontrollgruppe enthält 22 Städte, die als überdurchschnittlich entwickelte Wirtschaftsstandorte oder touristische Ziele in der jeweiligen Provinz gelten: Haikou, Sanya, Urumqi, Erdos, Yinchuan, Hohhot, Lhasa, Xining, Kashgar, Yunnan Manshi, Yinchuan, Baotou, Zhuhai, Guilin, Yining, Jiuzhaigou in Aba, Altay, Diqing, Dali, Shantou, Kulle und Aksu.

Unter den in der Stichprobe enthaltenen 362 Strecken zählen 285 Strecken zur Versuchsgruppe und 77 zur Kontrollgruppe. Die betroffenen Standorte in der Kontrollgruppe haben bis 2017 noch keine HGV-Strecken erbaut.

◆ (2) Daten der Variablen

Im Datensatz sind insgesamt 285 Zugstrecken unter Städtepaaren abgebildet, darunter ein Städtepaar, dessen HGV-Verbindung 2008 in Betrieb genommen wurde und 5 Städtepaare mit einem HGV-Anschluss seit 2009. Von 2010 bis 2017 betrug die jährliche Anzahl der Städtepaare, die neu ans HGV-Netz angeschlossen sind, jeweils 12, 12, 31, 59, 49, 70, 40 und 6.

Die bis 2017 noch nicht ans HGV-Netz angeschlossenen Städte, die jedoch durch den Luftverkehr bedient werden, weisen einen im Vergleich niedrigeren wirtschaftlichen bzw. sozialen Entwicklungsstand auf. Aus diesem Grund sind die Fluglinien in der Kontrollgruppe im Vergleich zu denen in der Versuchsgruppe weniger aktiv. Das Gesamtprofil der Stichprobe wird in **Tabelle 3** dargestellt. Flüge für Städtepaare mit einer Entfernung von 1.000 bis 1.500 Kilometer sind hierbei überproportional vertreten, wohingegen die Flugverbindungen im Entfernungsbereich 0 bis 600 Kilometer den geringsten Anteil ausmachen. Die statistischen Ergebnisse der anderen Variablen zeigen sich in **Tabelle 4**.

[65] 中国民用航空局发展计划司 . 从统计看民航 2018. 北京 : 中国民航出版社 , 2019.
[66] 飞常准大数据 . 飞常准大数据平台 . [2019-10-2]. https://data.variflight.com/.

Tabelle 3: Übersicht über die Anzahl der beförderten Personen und der Flugverbindungen, die für die Stichprobe der vorliegenden Studie gelten

Entfernung des Städtepaars (in Kilometern)	Beobachteter Wert	Anzahl der beförderten Personen (10.000)		Anzahl der Flüge	
	(Städtepaar*Jahr)	Durchschnittlicher Wert	Standardabweichung	Durchschnittlicher Wert	Standardabweichung
Sämtliche Stichproben	3.620	58,20	72,65	5.598,37	4.215,05
0~600	280	29,78	26,12	4.313,03	1.770,55
600~1.000	590	46,00	42,65	5.118,37	2.687,37
1.000~1500	750	65,89	92,41	6.037,91	5.124,4
1.500~2.000	880	62,53	73,44	5.731,18	4.666,33
über 2.000	1.120	63,17	75,02	5.773,89	4.181,70
Kontrollgruppe	770	48,01	38,69	4.161,59	2.696,99
Versuchsgruppe	2.850	60,95	79,15	5.986,55	4.460,54

Tabelle 4: Übersicht der Variablen in Bezug auf Städtepaare und den Hochgeschwindigkeitszugverkehr

	Einheit	Durchschnittlicher Wert	Standardabweichung
Gesamtbevölkerung des Städtepaars	10.000 Personen	1.596,18	829,56
BIP-Summe des Städtepaars	CNY 100 Mio.	15.092,50	8.751,07
Gesamtzahl der Einwohner mit Internetanschluss	10.000 Personen	345,59	409,02
HGV-Frequenz	Mal	4,02	11,11
HGV-Fahrzeit	Std.	6,87	9,16

2.4 Ergebnisse der Analyse

Mithilfe der im Abschnitt 2.2 beschriebenen DiD-Methode wurde ein analytisches Modell erstellt (siehe unten). Die im Abschnitt 2.3 genannten Daten haben nach einer statistischen Auswertung zu den folgenden Ergebnissen geführt.

Die Auswirkungen der Einführung des Hochgeschwindigkeitszugverkehr werden in den folgenden Gleichungen (2-1) und (2-2) dargestellt:

$$\ln(FreqAvi_{i,t}) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(TGDP_{i,t}) + \alpha_2 \ln(TPop_{i,t}) + \alpha_3 \ln(TInt_{i,t}) + \alpha_4 HSRIntro_{i,t} + Dyear_t + DRoute_i + \varepsilon_{i,t} \quad (2\text{-}1)$$

$$\ln(QuantityTrans_{i,t}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(TGDP_{i,t}) + \beta_2 \ln(TPop_{i,t}) + \beta_3 \ln(TInt_{i,t}) + \beta_4 HSRIntro_{i,t} + Dyear_t + DRoute_i + \varepsilon_{i,t} \quad (2\text{-}2)$$

FreqAvi = Anzahl der Flüge auf der jeweiligen Strecke
TGDP = Gesamt-BIP des Städtepaars
TPop = Gesamtbevölkerung des Städtepaars
TInt = Gesamtanzahl von Internetanschlüssen des Städtepaars
HSRIntro = Binäre Variable der Inbetriebnahme von HGV-Verkehr (zutreffend/unzutreffend)
Dyear = Kontrollvariable für fixierten Zeiteffekt
DRoute = Kontrollvariable für fixierten Routeneffekt
i = Jedes Städtepaar mit jeweiliger Strecke
t = Stichprobe des beobachtenden Zeitraums
α4 = Durchschnittliche substituierende Auswirkung des HGV auf die Anzahl der Flüge im zivilen Luftverkehr

Das Regressionsmodell für die Passagieranzahl ähnelt dem der Anzahl von Flügen:
QuantityTrans = Anzahl der Reisenden auf der entsprechenden Flugstrecke pro Jahr
β4 = durchschnittliche substituierende Wirkung des HGV auf die Passagieranzahl auf der überschneidenden Luftlinie
Die Faktoren α4 und β4 sind für die Datenauswertung von besonderer Bedeutung.

Die HGV-Frequenz wird getrennt bewertet, wie in den Gleichungen (2-3) bis (2-4) dargestellt wird.

Dabei bezeichnet HSRFreq die Zahl der Hochgeschwindigkeitszüge, die täglich zwischen Städtepaaren verkehren und eine direkte HGV-Verbindung darstellen.

Die Gleichungen (2-3) und (2-4) spiegeln die Auswirkungen der HGV-Komforts auf den substituierenden Effekt des HGV wider.

$$\ln(FreqAvi_{i,t}) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(TGDP_{i,t}) + \alpha_2 \ln(TPop_{i,t}) + \alpha_3 \ln(TInt_{i,t}) + \alpha_4 HSRFreq_{i,t} + Dyear_t + DRoute_i + \varepsilon_{i,t} \quad (2\text{-}3)$$

$$\ln(QuantityTrans_{i,t}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(TGDP_{i,t}) + \beta_2 \ln(TPop_{i,t}) + \beta_3 \ln(TInt_{i,t}) + \beta_4 HSRFreq_{i,t} + Dyear_t + DRoute_i + \varepsilon_{i,t} \quad (2\text{-}4)$$

In dieser Studie werden Interaktionsterme eingeführt, um die relative Wettbewerbsfähigkeit des HGV bei verschiedenen Transportentfernungen zu analysieren. Als Grundlage dient eine Heterogenitätsanalyse der zwischenstädtischen Flugstrecken, Binnenflugstrecken sowie Küstenflugstrecken unter verschiedenen HGV-Fahrzeit-Szenarien, wie in den Gleichungen (2-5) und (2-6) dargestellt wird.

$$\ln(FreqAvi_{i,t}) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(TGDP_{i,t}) + \alpha_2 \ln(TPop_{i,t}) + \alpha_3 \ln(TInt_{i,t}) + \alpha_4 HSRIntro_{i,t} + \alpha_6 HSRIntro_{i,t} \cdot Dum_{i,t} + Dyear_t + DRoute_i + \varepsilon_{i,t} \quad (2\text{-}5)$$

$$\ln(QuantityTrans_{i,t}) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(TGDP_{i,t}) + \alpha_2 \ln(TPop_{i,t}) + \alpha_3 \ln(TInt_{i,t}) + \alpha_4 HSRIntro_{i,t} + \alpha_6 HSRIntro_{i,t} \cdot Dum_{i,t} + Dyear_t + DRoute_i + \varepsilon_{i,t} \quad (2\text{-}6)$$

Dum (Distance/Entfernung > 1.400) nimmt den Wert 1 an, wenn die Intercity-HGV-Entfernung 1.400 km übersteigt, und 0, wenn die Distanz weniger als 1.400 km beträgt. Dum (Time/Zeit > 4) nimmt den Wert 1 an, wenn die Intercity-HGV-Fahrzeit mehr als vier Stunden dauert, und 0, wenn sie weniger als vier Stunden beträgt.

Die Koeffizienten α4 und α6 sind für die Analyse besonders relevant. Sie bezeichnen jeweils die substituierende Wirkung der HGV-Einführung auf den zivilen Luftverkehr bzw. den zusätzlichen substituierenden Effekt, sofern die Strecke eine bestimmte Bedingung erfüllt.

◆ (1) Ergebnisse im Allgemeinen

Die substituierende Wirkung der Einführung der vier Nord-Süd- und vier Ost-West-Hochgeschwindigkeitsstrecken auf die Anzahl der Flüge und Passagiere auf den sich überlagernden Strecken beträgt jeweils 28,7 % bzw. 31,8 %. Die erhöhte HGV-Fahrfrequenz reduziert die Zahl der beförderten Personen im Luftverkehr erheblich.

Ein signifikanter Verzögerungseffekt ist zu verzeichnen. Dieser besteht darin, dass die Inbetriebnahme einer HGV-Strecke im Erbauungsjahr nur begrenzte substituierende Wirkung zeigt und sich der Einfluss hauptsächlich in den folgenden zwei bis drei Jahren entfaltet. Die Zahl der Flugverbindungen und der beförderten Personen in den vom HGV-Netz abgedeckten Städten weist zwei Jahre nach der Inbetriebnahme der betroffenen Hochgeschwindigkeitszugstrecke jeweils einen Verlust von etwa 40 % auf. Die substituierende Auswirkung des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs auf den Flugverkehr und die Fluggastzahl in den vom HGV-Netz abgedeckten Städten im Jahr der Inbetriebnahme des HGV beträgt etwa 30 %.

◆ (2) Auswirkung der Fahrzeit auf die Wettbewerbsfähigkeit des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs

Lange Fahrzeiten im HGV können den Komfort beeinträchtigen und die Reisezeitkosten von Reisenden erhöhen, was die Wahl der Verbraucher auf den HGV negativ beeinflusst.

Bei einer Fahrzeit über vier bzw. sechs Stunden nimmt der Hochgeschwindigkeitszugverkehr weiterhin einen großen Anteil am Modal Split ein, jedoch verringert sich seine substituierende Auswirkung auf den Luftverkehr. In Städten mit HGV-Anschlüssen mit einer HGV-Reisezeit über vier bzw. sechs Stunden sind 17,6 % bzw. 13,5 % der Flüge vom HGV-Ausbau negativ betroffen. Gleichzeitig sinkt das Passagiervolumen im Luftverkehr um jeweils 14,8 % bzw. 11,8 %.

Bei einer Fahrzeit von zwei bis vier Stunden zeichnet der HGV den größten Substitutionseffekt auf. 75,3 % der Passagierflüge in den vom HGV-Netz abgedeckten Städten werden entsprechend ersetzt. Je nach Dauer werden für eine Zeitspanne von vier bis sechs Stunden, sechs bis acht Stunden, acht bis 10 Stunden und länger als 10 Stunden jeweils 42,3 %, 12,8 %, 10,8 % und 5,5 % der Flugverbindungen in den vom HGV-Netz abgedeckten Städten substituiert. Den obigen Daten ist zu entnehmen, dass die Hochgeschwindigkeitszugstrecken mit einer Reisezeit über 10 Stunden keine signifikante Auswirkung auf den Luftverkehr haben. Weniger als 10 % der Flüge sind hierbei betroffen. Den größten substituierenden Effekt zeigen die Schnellfahrstrecken mit einer Fahrzeit innerhalb von sechs Stunden, womit die Ergebnisse vorangegangener Studien bestätigt werden.

Die Entwicklung des Passagiervolumens im Luftverkehr zeigt ähnliche Trends wie die Analyse der Anzahl an Flugverbindungen. Bei den fünf Kategorien der HGV-Fahrzeit mit unterschiedlicher Reisedauer werden sich jeweils 83,5 %, 62,5 %, 15,2 %, 13,1 % bzw. 11,1 % der Fluggäste für den HGV umentscheiden.

◆ (3) Die Auswirkung der Streckenlänge auf die Wettbewerbsfähigkeit des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs

Je länger die HGV-Fahrstrecke, umso mehr sinkt der Anteil des HGV auf dem Intercity-Verkehrsmarkt. Die untersuchten Reiseentfernungen können in vier Gruppen, 0 bis 600 Kilometer, 600 bis 1.000 Kilometer, 1.000 bis 1.500 Kilometer und länger als 1.500 Kilometer eingeteilt werden. Bei jenen vier Entfernungsklassen werden jeweils 71,8 %, 56,4 %, 24,5 % bzw. 9,9 % der Anzahl der Flugverbindungen in den vom HGV-Netz abgedeckten Städten durch den Hochgeschwindigkeitszugverkehr substituiert. Ab einer Reiseentfernung über 1.000 Kilometern nimmt die Wettbewerbsfähigkeit des Hoch-geschwindigkeitszugverkehrs in China deutlich ab.

◆ (4) Die Auswirkung der geografischen Lage auf die Wettbewerbsfähigkeit des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs

Studien haben belegt, dass die Flugrouten von Westen nach Osten in geringerem Maße betroffen sind als der nationale Durchschnitt, was möglicherweise auf die frühe Erbauung der Yangtse-Strecke (Shanghai-Chengdu) zurückzuführen ist, da diese eine geringere Fahrgeschwindigkeit aufweist und im Langstreckenfernverkehr kaum Vorteile besitzt. Die Flugrouten von Zentral- nach Westchina bleiben ebenfalls unterdurchschnittlich betroffen: 25,2 % der Anzahl der Flüge und 42,1 % der beförderten Personen auf den entsprechenden Strecken wurden auf den HGV umgelagert. Für die Strecken von Zentral- nach Westchina und von West- nach Ostchina sind Reisende somit weniger beeinflusst bei ihrer Wahl, mit dem Flugzeug zu reisen. Einerseits verdichtet sich das HGV-Netz im östlichen Teil des Landes, während nur eine begrenzte Anzahl von HGV-Strecken in Zentral- und Westchina angesiedelt ist. Andererseits findet die Verkehrsverlagerung vom Luftverkehr auf den HGV bei längeren Strecken eher begrenzt statt.

2.5 Ausblick: Auswirkung der künftigen HGV-Entwicklung auf den zivilen Luftverkehr

◆ (1) Auswirkungen des HGV-Netzes aus acht Nord-Süd- und acht Ost-West-Schnellfahrstrecken nach dessen Fertigstellung

Mit der schrittweisen Umsetzung des chinesischen HGV-Entwicklungsplans wird die Zahl der Flughäfen mit HGV-Anschlüssen weiter erhöht und die abgedeckte Fläche weiter vergrößert. Während aktuell 71 Flughäfen vom HGV-Netz aus vier Nord-Süd sowie vier Ost-West-Schnellfahrstrecken erfasst sind, werden weitere 69 Flughäfen nach Fertigstellung der geplanten acht Verkehrskorridore bis 2030 zusätzlich intermodal mit dem Hochgeschwindigkeitszugverkehr verbunden sein. Die neu anzubindenden Flughäfen befinden sich hauptsächlich im östlichen bzw. zentralen Teil des Landes, während die Anzahl der Flughäfen in den westlichen Regionen viel geringer ist.

Die Auswirkungen des künftigen HGV-Entwicklungsplans auf den Luftverkehr lassen sich in zwei Trends identifizieren: (1) Das Luftverkehrsnetz mit neu anzubindenden Flughäfen und bereits angeschlossenen Flughäfen wird durch den HGV-Einsatz einen Verlust an Passagieren erleben; (2) Durch eine verkürzte Reisezeit aufgrund einer Geschwindigkeitssteigerung auf den bestehenden HGV-Strecken wird das Flugangebot auf den entsprechenden Flugrouten weiter abgebaut.

Das Passagiervolumen der Flugverbindungen zwischen den bereits an das HGV-Netz angeschlossenen und den neu anzubindenden Flughäfen ist in **Tabelle 5** erfasst. Die neuen ans HGV-Netz anzubindenden Flughäfen umfassen insgesamt 834 inländische Passagierflugrouten im Betrieb, deren Reiseentfernung einer HGV-Fahrzeit von null bis acht Stunden entspricht. Auf Grundlage der Statistik aus dem Jahr 2018 zur Anzahl von Flügen könnten die HGV-Verbindungen mit einer Reisezeit von null bis vier Stunden, vier bis sechs Stunden, sechs bis acht Stunden und acht bis 10 Stunden jeweils zum Abbau von 174.000, 128.000, 45.000 bzw. 13.000 Flügen führen. Dies bedeutet einen Rückgang von insgesamt 366.000 Flügen, was 8,8 % der Gesamtzahl von Flügen im Jahr 2018 entspricht. In Bezug auf die geografische Verteilung der reduzierten Flugverbindungen haben 72,3 % der ersetzten Flüge einen Anschluss an die Ostregion.

Darüber hinaus werden die bestehenden HGV-Strecken teilweise im Rahmen des HGV-Entwicklungsplans aufgewertet und mit einer höheren Geschwindigkeit befahren. Die Geschwindigkeitserhöhung betrifft insgesamt 64 Schnellfahrstrecken der Verkehrskorridore entlang des Yangtse-Flusses sowie entlang der Küste. Die Fahrzeit wird sich auf weniger als vier Stunden verkürzen. Geht man von der gleichen Substitutionsquote aus, werden weitere 24.000 Flüge als Folge der HGV-Geschwindigkeitserhöhung ersetzt, entsprechend einer Zunahme in substituierten Flügen im Jahr 2018 um 0,7 %. Die Berechnung beruht auf den statistischen Daten des zivilen Luftverkehrs aus dem Jahr 2018.

Tabelle 5: Mögliche Auswirkungen durch die Einführung des HGV-Gitternetzes mit acht Nord-Süd-Schnellfahrstrecken und acht Ost-West-Strecken auf Grundlage der Anzahl von Flügen im Jahr 2018

Fahrzeit	Substituierende Wirkung	Anzahl der betroffenen Flugrouten	Anzahl der betroffenen Flüge	Anzahl der substituierten Flüge
0 bis 4 Std.	75 %	205	232.579	174.434
4 bis 6 Std.	42 %	243	303.884	127.631
6 bis 8 Std.	13 %	225	349.898	45.487
8 bis 10 Std.	11 %	101	119.302	13.123
über 10 Std.	6 %	59	85.373	5.122

◆ (2) Auswirkungen nach Anschluss sämtlicher chinesischer Städte mit einer Bevölkerung über 500.000 Einwohnern an das HGV-Netz

Hätten alle chinesischen Städte mit einer Bevölkerungszahl ab 500.000 Einwohnern einen Zugang zum Hochgeschwindigkeitszugverkehr, wären beinahe sämtliche Binnenflughäfen durch das HGV-Netz abgedeckt. Auf Grundlage der Flugbewegungsstatistik aus dem Jahr 2018 könnten die HGV-Verbindungen mit einer Reisezeit von null bis vier Stunden, vier bis sechs Stunden, sechs bis acht Stunden und acht bis 10 Stunden jeweils zum Abbau von 513.000, 331.000, 112.000 bzw. 76.000 Flügen führen. Das bedeutet einen Rückgang von insgesamt 1.087.000 Flugbewegungen, was 26,2 % der Gesamtzahl von Flügen im Jahr 2018 entspricht. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 6** abgebildet.

Tabelle 6: Geschätzte Auswirkungen nach Anschluss sämtlicher Städte mit einer Bevölkerungsgröße von über 500.000 Einwohnern an das HGV-Netz (Berechnung beruht auf der Anzahl von Flügen aus dem Jahr 2018)

Fahrzeit	Substituierende Wirkung	Anzahl der betroffenen Flüge	Anzahl der substituierten Flüge
0 bis 4 Std.	75 %	683.393	512.545
4 bis 6 Std.	42 %	787.143	330.600
6 bis 8 Std.	13 %	864.389	112.371
8 bis 10 Std.	11 %	686.863	75.555
über 10 Std.	6 %	938.623	56.317

2.6 Geschätzte emissionsreduzierende Wirkung durch die Entwicklung des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs als Substitut für den zivilen Luftverkehr

Angesichts des HGV-Entwicklungsplans findet eine Verlagerung des Passagieraufkommens vom zivilen Luftverkehr auf den Hochgeschwindigkeitszugverkehr statt. Die Senkung der Anzahl an Flügen führt dabei zur Emissionsminderung im zivilen Luftverkehr. Mithilfe der kombinierten Datensätze auf Streckenebene inkl. Energieverbrauch beim Abflug, Reiseentfernung, Energieeffizienz im Reiseflug sowie weiterer Parameter der jeweiligen Flugzeugbauart können die Entwicklung der Betriebsbedingungen des zivilen Luftverkehrs auf Grundlage des Referenzjahres 2018 prognostiziert und die emissionsreduzierenden Effekte des HGV-Entwicklungsplans messbar dargestellt werden.

Für die Fluglinien in der Reichweite des HGV-Netzes aus jeweils acht Verkehrsachsen werden hauptsächlich Schmalrumpfflugzeuge und Regionalflugzeuge zur Personenbeförderung eingesetzt. Der Anteil der Schmalrumpfflugzeuge im Einsatz beträgt 88,2 %. Unter Berücksichtigung der Energieeffizienz und der Flugdistanz des jeweiligen Flugzeugtyps sind die Vorteile des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs in Bezug auf Energieeinsparung und Emissionsminderung in **Tabelle 7** dargestellt, nachdem die Energieeffizienz im Reiseflug korrigiert wurde.

Auf Basis des Flugbewegungsprofils 2018 ergibt sich für die betroffenen Luftlinien bei unterschiedlichen Reisezeitkategorien von null bis vier Stunden, vier bis sechs Stunden, sechs bis acht Stunden, acht bis 10 Stunden und länger als 10 Stunden eine Minderung des Energieverbrauchs um jeweils 42.000, 201.000, 134.000, 172.000 bzw. 72.000 Tonnen Kerosin, was insgesamt einer jährlichen Reduktion von 1,878 Millionen Tonnen CO_2-Emissionen entspricht. Da der Personenbeförderungsbedarf im zivilen Luftverkehr in China in Zukunft weiter steigen wird, ist die aus der vorgestellten Analyse ergebene Emissionsreduzierung relativ konservativ berechnet. Der tatsächliche emissionsreduzierende Effekt des HGV-Netzes mit acht Verkehrsachsen dürfte nach Fertigstellung höher sein als die Ergebnisse der vorliegenden Berechnung. In ähnlicher Berechnungsweise belaufen sich die jährlichen Energieeinsparungen bzw. Emissionsminderungen durch die Anbindung sämtlicher Städte mit 500.000 oder mehr Einwohnern an das HGV-Netz auf insgesamt 2,089 Mio. Tonnen Kerosin bzw. 6,311 Mio. Tonnen Kohlenstoffemissionen.

Tabelle 7: Betroffene Luftlinien mit Passagierverlust durch die Eröffnung des HGV-Netzes aus acht Verkehrskorridoren

Fahrzeit	Substituierende Wirkung	Reduzierter Kerosinverbrauch (10.000 Tonnen)	Reduzierte CO_2-Emissionen (10.000 Tonnen)
0 bis 4 Std.	75 %	4,2	12,8
4 bis 6 Std.	42 %	20,1	60,7
6 bis 8 Std.	13 %	13,4	40,6
8 bis 10 Std.	11 %	17,2	52,0
über 10 Std.	6 %	7,2	21,7

◆ Kapitel 3 ◆

HGV-Strecke Peking-Shanghai: Analyse der CO_2-Emissionen während des gesamten Lebenszyklus

In der Fallstudie im vorliegenden Kapitel wird eine quantitative Berechnung der Emissionsreduktion der Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Shanghai unter Anwendung der Lebenszyklusanalyse (LCA)[67] durchgeführt.

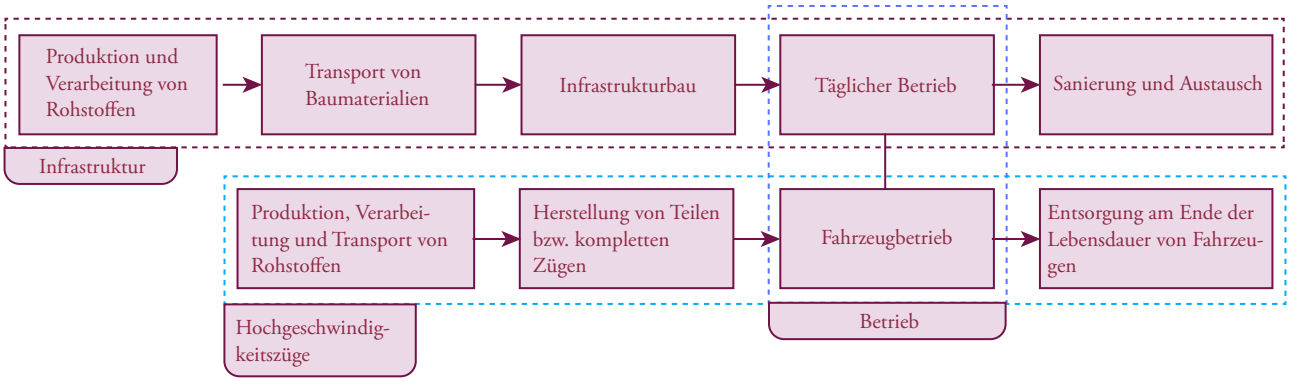
3.1 Grundlegende Informationen der Fallstudie

Im Hochgeschwindigkeitszugverkehr verursachen sowohl der Bau als auch der Betrieb signifikanten Energieverbrauch sowie Treibhausgasemissionen. Die Analyse des Energieverbrauchs und der Kohlenstoffemissionen über den gesamten Lebenszyklus des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs ermöglicht eine sachliche Bewertung der CO_2-Einsparpotentiale und Energieeffizienz.

Im vorliegenden Text erfolgt die Berechnung für drei Lebenszyklen (Infrastrukturzyklus, Fahrzeugzyklus und Betriebszyklus), wie in **Abbildung 4** dargestellt wird. Der Infrastrukturzyklus des HGV besteht aus sechs Sub-Bauprojekten: Baugrund, Brückenbau, Tunnelbau, Gleisbau, Einbau von Elektrifizierungssystemen und Bau von Hochgeschwindigkeitsbahnhöfen. Der HGV-Fahrzeugzyklus besteht aus drei Hauptphasen: Herstellung, Wartung und Entsorgung am Ende der Lebensdauer. Der Energieverbrauch und die CO_2-Emissionen entstehen hauptsächlich während des Betriebszyklus, bedingt durch den hohen Stromverbrauch, der für den täglichen Betrieb von Hochgeschwindigkeitszügen bzw. von HGV-Bahnhöfen benötigt wird. Das Passagieraufkommen kann zur Erfassung des HGV-Aktivitätsniveaus im Zyklus herangezogen werden.

Die konkreten Eckdaten der sechs Teilprojekte für die Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Shanghai sind aus öffentlich zugänglichen Informationen ersichtlich: Die Strecke ist 1.318 Kilometer lang, umfasst 24 Bahnhöfe und eine bauartbedingte Höchstgeschwindigkeit von 380 km/h. Die kumulative Passagieranzahl pro Jahr beträgt 200 Millionen.[68,69] Die Länge der Bettung beträgt 464 Kilometer, die Länge der Brücken und Durchlässe ca. 1.160 Kilometer, die Länge der Tunnel 16 Kilometer, die Länge der verlegten schotterlosen Gleise ca. 1.200 Kilometer und die Schottergleise 366 Kilometer. Das Elektrifizierungssystem ist auf der gesamten Länge der Strecke verlegt.[70,71]

Abbildung 4: Abgrenzung der Lebenszyklus-Forschung im HGV



[67] Weitere Informationen zur vorliegenden Arbeit finden sich unter: Wang Y, Zhou S, Ou X. Development and application of a life cycle energy consumption and CO_2 emissions analysis model for high-speed railway transport in China. Advances in Climate Change Research, 2021, 12(2): 270-280.
[68] 王兰，王灿，陈晨，顾浩．高铁站点周边地区的发展与规划 —— 基于京沪高铁的实证分析．城市规划学刊，2014(04):31-37.
[69] 交通运输部．2018 年交通运输行业发展统计公报．中国交通报，[2019-04-12(002)].
[70] 赵勇，田四明．截至 2018 年底中国铁路隧道情况统计．隧道建设（中英文），2019, 39(02):324-335.
[71] 付博音．高速铁路生命周期能耗与碳排放研究．石家庄铁道大学，2017.

3.2 Eckdaten und Annahmen

Die wichtigsten Eckdaten und Annahmen sind in **Tabelle 8** aufgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass ausschließlich CRH380B-Züge für die Schnellfahrstrecke Peking-Shanghai eingesetzt werden, die über 16 Waggons mit einem Fahrzeuggewicht von 980 Tonnen und einer Volllast von 1.060 Passagieren (einschließlich Besatzung) verfügen. Das Pro-Kopf-Gewicht wird mit 100 Kilogramm (inkl. Gepäck) berechnet. Die Fahrzeuge haben eine durchschnittliche Lebensdauer von 20 Jahren und benötigen während ihrer Nutzungsdauer regelmäßige Wartungsarbeit. Das Fahrzeug fährt mit einer Zielgeschwindigkeit von 300 km/h und einer durchschnittlichen Auslastung von 80 %. Die Reiseentfernung pro Fahrt liegt im Durchschnitt bei 900 Kilometer, die jährliche Fahrgastzahl bei 200 Mio. Die Züge absolvieren jeden Tag eine Hin- und Rückfahrt (insgesamt 1.800 Kilometer).

Unter der Annahme, dass der Energieverbrauch und die Kohlenstoffemissionen für den täglichen Betrieb eines HGV-Bahnhofs gänzlich aus der Nutzung von elektrischer Energie stammen, wird der Stromverbrauch des täglichen Bahnhofbetriebs, bedingt durch das Passagieraufkommen, auf 6 % des insgesamt im Zugbetrieb verwendeten Stromverbrauchs geschätzt.[72,73,74] Der spezifische Energieverbrauch des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs bezieht sich auf den durchschnittlichen Stromverbrauch pro Masseneinheit eines HGV-Fahrzeugs für eine Entfernungseinheit (in kWh/t km). Der nach den Parametern in **Tabelle 8** berechnete revidierte spezifische Energieverbrauch für eine Einheit des Passagieraufkommens auf der Schnellfahrstrecke Peking-Shanghai beträgt 445,7 kWh/10.000 Personenkilometer. Dieser Wert wird nachfolgend als Maß für die Berechnung des Energieverbrauchs und der Kohlenstoffemissionsintensität des HGV verwendet.

Unter Berücksichtigung der verwendeten Baumaterialien während der Bauphase der Peking-Shanghai-Hochgeschwindigkeitsstrecke, der für den Transport und die Bauausführung verwendeten Energien sowie des Wartungsplans inklusive einmaligem Gleisaustausch und viermaligem Wechsel des Elektrifizierungssystems während des 100-jährigen HGV-Betriebszyklus, können der Energieverbrauch und die Kohlenstoffemissionen im Infrastrukturzyklus berechnet werden, wie in **Tabelle 9** dargestellt wird.

Unter Verwendung der in **Tabelle 8** benannten Parameter können der Energieverbrauch und die Kohlenstoffemissionen ebenso während des gesamten Fahrzeugzyklus berechnet werden, wie in **Tabelle 10** dargestellt wird.

Tabelle 8: Werte für die wichtigsten Parameter der Fallstudie

Parameter	Durchschnittlich zurückgelegte Kilometer	Zielgeschwindigkeit	Durchschnittliche Auslastung	Gesamtgewicht (Fahrzeug + Passagiere)	Jährliche Fahrgastzahl
Werte	900 km	300 km/h	80 %	1.064,8 t	200 Mio. Passagiere

Parameter	Durchschnittliche Abstände zwischen Stationen	Nutzungsdauer von Zügen	Stromverbrauch für den Bahnhofbetrieb zum Stromverbrauch für den Zugbetrieb	
Werte	57,3 km	20 Jahre	6 %	

[72] Yue Y, Wang T, Liang S, et al. Life Cycle Assessment of High Speed Rail in China. Transportation Research Part D Transport and Environment, 2015, 41:367-376.
[73] 许宗芳，李江涛，许钟匀．京沪高速铁路运营后有关问题回顾分析和思考．铁道经济研究，2019(04):18-20+24.
[74] 陈进杰，王兴举，王祥琴，等．高速铁路全生命周期碳排放计算．铁道学报，2016, 38(12):47-55.

Tabelle 9: Energieverbrauch und Kohlenstoffemissionen der Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Shanghai über den gesamten Infrastrukturzyklus

Phase	Energieverbrauch (MJ)	Anteil (%)	CO_2-Emissionen (kg CO_2e)	Anteil (%)
Produktion von Rohstoffen	$2{,}082\times10^{11}$	63,20	$3{,}158\times10^{10}$	75,43
Transport und Bauausführung	$5{,}215\times10^{10}$	15,83	$4{,}464\times10^{9}$	10,66
Sanierung und Austausch	$6{,}906\times10^{10}$	20,97	$5{,}824\times10^{9}$	13,91
Summe	$3{,}294\times10^{11}$	100	$4{,}187\times10^{10}$	100

Tabelle 10: Energieverbrauch und Kohlenstoffemissionen der Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Shanghai über den gesamten Fahrzeugzyklus

Phase	Energieverbrauch (MJ)	Anteil (%)	CO_2-Emissionen (kg CO_2e)	Anteil (%)
Fahrzeugbau	$9{,}685\times10^{7}$	42,55	$8{,}620\times10^{6}$	48,16
Wartung von Fahrzeugen	$1{,}307\times10^{8}$	57,45	$9{,}279\times10^{6}$	51,84
Entsorgung am Ende der Lebensdauer von Fahrzeugen	8,854	0,00	5,536	0,00
Summe	$2{,}276\times10^{8}$	100	$1{,}790\times10^{7}$	100

3.3 Ergebnisse der Analyse

Unter Bezugnahme auf **Abbildung 4** im Abschnitt 3.1 und unter Verwendung des analytischen Modells (siehe unten) wurde für die im vorangehenden Abschnitt genannten Daten eine rechnerische Analyse durchgeführt, die die folgenden Ergebnisse liefert.

Der Endenergie- und Materialverbrauch, das Transportaufkommen, der Energieverbrauch sowie der CO_2-Emissionsfaktor sind für die Berechnung als Werte herangezogen worden. Die Formeln zur Berechnung des Gesamtenergieverbrauchs Q, der gesamten Kohlenstoffemissionen C sowie des spezifischen Energieverbrauchs q und der spezifischen Kohlenstoffemissionen c pro Personenkilometer im gesamten HGV-Lebenszyklus sind in den Gleichungen (3-1) bis (3-4) dargestellt.

$$Q = \sum_{j=1}^{3} \sum_{k} \sum_{i} m_{ijk} \cdot \rho_i(t) \qquad (3\text{-}1)$$

$$C = \sum_{j=1}^{3} \sum_{k} \sum_{i} m_{ijk} \cdot \sigma_i(t) \qquad (3\text{-}2)$$

$$q = \frac{Q}{S} \qquad (3\text{-}3)$$

$$c = \frac{C}{S} \qquad (3\text{-}4)$$

m_{ijk} = Menge der genutzten Energie während Phase k im Zyklus j, unter Berücksichtigung von Material oder Verkehrsträger i

$\rho_i(t)$ = Verbrauch von fossiler Primärenergie in Phase t

$\sigma_i(t)$ = Treibhausgasemissionen in Phase t

S = Gesamtmenge an Verkehrsleistungen während des HGV-Lebenszyklus (in Personenkilometern)

Da für den Betriebszyklus des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs keine detaillierte Auflistung des Stromverbrauchs verfügbar ist, können der Energieverbrauch und die Emissionen, die sich aus dem HGV-Betrieb ergeben, anhand der Gleichungen (3-5) und (3-6) geschätzt werden.

$$Q_{yx} = \sum_{t} \sum_{i} q_i(t) \cdot N_i(t) \cdot L \cdot \chi_e \qquad (3\text{-}5)$$

$$C_{yx} = \sum_{t} \sum_{i} q_i(t) \cdot N_i(t) \cdot L \cdot \delta_e \qquad (3\text{-}6)$$

$q_i(t)$ = Energieverbrauch pro Transporteinheit (in kWh/10.000 Personenkilometer) des HGV-Fahrzeugs in der Phase i

L = Durchschnittlich zurückgelegte Streckenlänge des HGV-Zugs

N(t) = Zahl der beförderten Fahrgäste des Fahrzeugs i in der Phase t

χ_e = Fossiler Primärenergieverbrauch (in MJ/kWh) für elektrische Energie

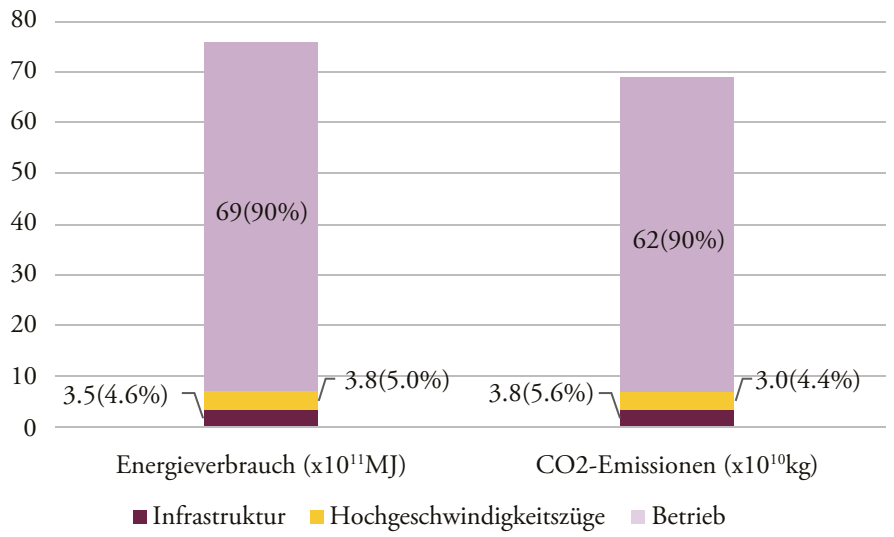
δ_e = Kohlenstoffemissionsfaktor (in $kgCO_2e/kWh$) für Strom

Unter Berücksichtigung der aktuellen Energiestruktur (ca. 60 % Kohle) und des Strommixes Chinas (ca. 70 % Kohlestrom) wurden Berechnungen und Schätzungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Betriebszyklus zu ca. 90 % des Energieverbrauchs und der Kohlendioxidemissionen im Zugbetrieb beiträgt, während der Infrastrukturzyklus und der Fahrzeugzyklus jeweils ca. 5 % ausmachen, wie in **Tabelle 11** und **Abbildung 5** dargestellt. Bezogen auf eine einzelne Transportleistungseinheit des HGV liegt der Energieverbrauch den vorliegenden Berechnungen zufolge bei 0,423 MJ/Personenkilometer, sowie die Treibhausgasemissionen bei 0,0384 kg CO_2e/Personenkilometer.

Tabelle 11: Ergebnisse der Fallstudie zum Energieverbrauch und den Treibhausgasemissionen des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs über den gesamten Lebenszyklus (Bauphase und 100-jährige Betriebsphase der Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Shanghai)

	Einheit	Phase			Summe
		Infrastruktur	Hochgeschwindigkeitszug	Betrieb	
Energieverbrauch	MJ	$3{,}50\times10^{11}$	$3{,}80\times10^{11}$	$6{,}88\times10^{12}$	$7{,}58\times10^{12}$
CO_2-Emissionen	Kg CO_2e	$3{,}87\times10^{10}$	$3{,}02\times10^{10}$	$6{,}22\times10^{11}$	$6{,}93\times10^{11}$
Anteil des Energieverbrauchs	%	4,6	4,99	90,41	100
Anteil der Emissionen	%	5,61	4,37	90,02	100

Abbildung 5: Energieverbrauch und Kohlenstoffemissionen über den gesamten Lebenszyklus der Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Shanghai



Die Studie hat ebenfalls ergeben, dass der Energieverbrauch und die Kohlenstoffemissionen des HGV über den gesamten Lebenszyklus unter Einspeisung eines grüneren Strommixes erheblich zurückgehen werden und der Energieverbrauchs- sowie der Kohlenstoffemissionsfaktor der elektrischen Energie entsprechend sinken können.

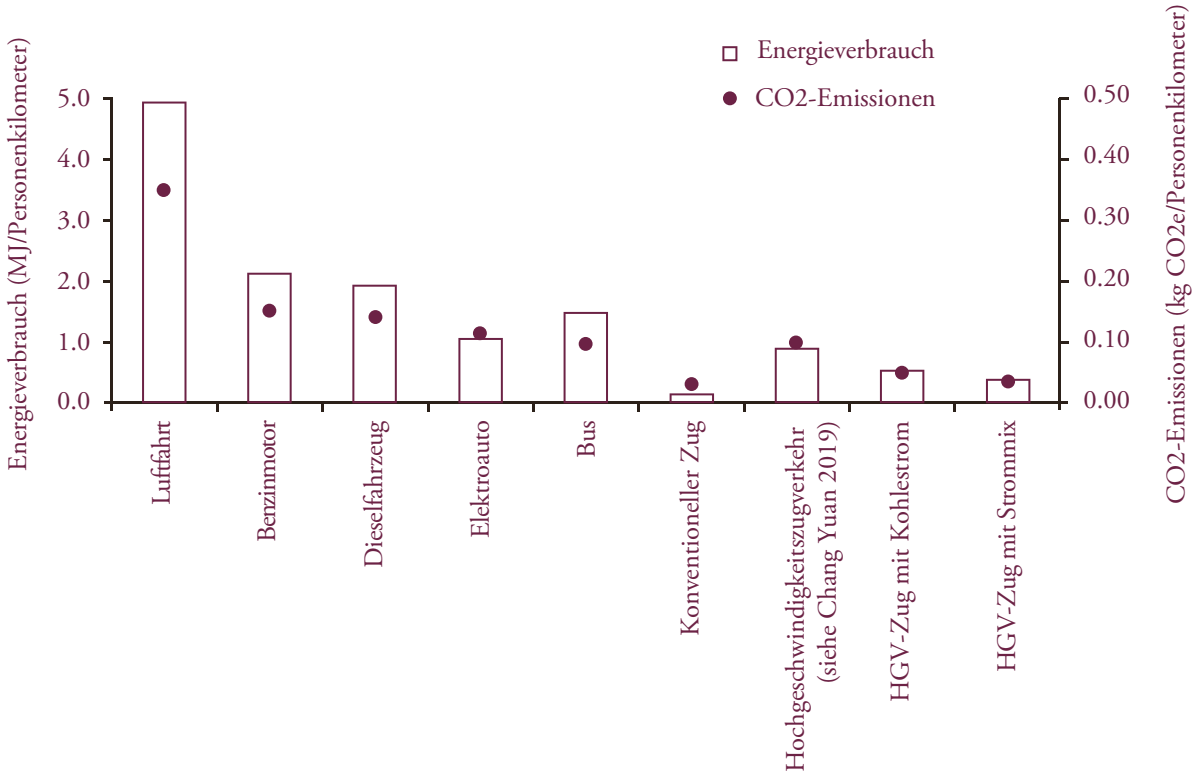
Invers zu zunehmender Auslastung nehmen der Energieverbrauch und die CO_2-Emissionen pro Einheit der erbrachten HGV-Verkehrsleistung ab. Während die Ergebnisse bei niedriger Auslastung stark variieren, nehmen diese Schwankungen ab einer Auslastung über 80 % tendenziell ab. Im Falle eines niedrigen Auslastungsfaktor (< 40 %) kann die gewünschte energieeinsparende bzw. emissionsreduzierende Wirkung des HGV nur schwer erzielt werden. Gleichzeitig erweist sich bei einer Auslastung von über 90 % der marginale Nutzen einer weiteren Erhöhung des Auslastungsfaktors als gering.

3.4 Vergleich zwischen dem Hochgeschwindigkeitszugverkehr und anderen Verkehrsträgern in Bezug auf CO_2-Emissionen

Der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen pro Verkehrsleistungseinheit wurden je nach Verkehrsträger getrennt quantifiziert, wie in **Abbildung 6** dargestellt wird. Für einen Personenkilometer machen die Kohlenstoffemissionen des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs jeweils 10 %, 24 %, 26 %, 32 % und 38 % der Emissionen von Flugzeugen, Benzin- und Dieselfahrzeugen, Elektroautos und öffentlichen Linienbussen aus. Damit ist ersichtlich, dass der HGV erhebliche Vorteile bei der Energieeinsparung und Emissionsreduktion aufweist.

Die Vorteile, die der HGV in Bezug auf Energieeinsparung und Emissionsminderung genießt, hängen mit der hohen Beförderungskapazität und der hohen Effizienz der elektrischen Energieumwandlung zusammen. Nichtsdestotrotz verbrauchen Hochgeschwindigkeitszüge aufgrund der hohen Fahrgeschwindigkeit pro Einheit des Passagieraufkommens deutlich mehr Energie als konventionelle Züge. Der im Hochgeschwindigkeitszugverkehr entstandene CO_2-Ausstoß ähnelt dem herkömmlicher Züge, deren Verbrennungsmotoren fossile Brennstoffe verwenden und daher einen hohen Kohlenstoffemissionsfaktor pro verbrauchte Energieeinheit aufweisen.[75,76,77,78,79,80]

Abbildung 6: Energieverbrauch und Kohlenstoffemissionen verschiedener Verkehrsträger im gesamten Lebenszyklus



[75] Tianduo Peng, Sheng Zhou, Zhiyi Yuan, et al. Life Cycle Greenhouse Gas Analysis of Multiple Vehicle Fuel Pathways in China. Sustainability, 2017, 9(12):2183.

[76] Alexander Bigazzi, Comparison of marginal and average emission factors for passenger transportation modes, Applied Energy, Volume 242, 2019, Pages 1460-1466.

[77] 张铁映 . 城市不同交通方式能源消耗比较研究 . 北京 : 北京交通大学 , 2010.

[78] Dimoula, V., F. Kehagia, and A. Tsakalidis, A Holistic Approach for Estimating Carbon Emissions of Road and Rail Transport Systems. Aerosol and Air Quality Research, 2017. 16(1): p. 61-68.

[79] Feng, X., Optimization of target speeds of high-speed railway trains for traction energy saving and transport efficiency improvement. Energy Policy, 2011. 39(12): p. 7658-7665.

[80] 常远 . 中国高铁全生命周期环境影响研究报告 . 北京 : 中央财经大学 , 2019.

◆ Kapitel 4 ◆

Schlussfolgerungen und politische Empfehlungen

4.1 Rückblick auf bisherige HGV-Entwicklung und Handlungsempfehlungen

Durch die rasante Entwicklung des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs wurde die Mobilität der chinesischen Bevölkerung erheblich verbessert und zwischenstädtische Verkehrsverbindungen gestärkt. Das erweiterte Mobilitätsangebot fördert dabei die ökonomische und soziale Entwicklung, führt jedoch ebenso zu ökologischen Auswirkungen. Anhand der gesammelten Erfahrungen können Schlussfolgerungen bezüglich der Entwicklung des HGV in China getroffen und allgemeine Handlungsempfehlungen formuliert werden.

Die Ausarbeitung und Anpassung des Entwicklungsplans für den Hochgeschwindigkeitszugverkehr in China befördern die Integration und Intermodalität des HGV, des konventionellen Schienenverkehrs und des Stadtverkehrs zugleich. Insbesondere eine langfristige Planung erweist sich hierbei als zentral, um die Kontinuität und erfolgreiche Realisierung von HGV-Bauprojekten zu sichern.[81] Planungsrelevante Maßnahmen bestärken den Ausbau des HGV-Netzes, die Verbesserung der Konnektivität und des HGV-Zugangs, die Vergrößerung der Deckungsfläche, die Modernisierung der Fahrzeuge bei einer Qualitätsverbesserung im Verkehrsnetz sowie die Effizienzsteigerung von Fahrzeugen.

Die schnelle Entwicklung des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs hat den Verkehrsmarkt, insbesondere den Straßen- und Luftverkehr sowie den konventionellen Schienenverkehr, erheblich beeinflusst, was zu einer ersichtlichen Umstrukturierung geführt hat. Die höchsten Verdrängungseffekte des HGV gegenüber dem Straßenverkehr, den konventionellen Zügen und Flugzeugen liegen jeweils in den Entfernungsbereichen 100-300 Kilometer, 300-700 Kilometer bzw. 700-1.000 Kilometer. Mit Bezug auf den zivilen Luftverkehr ist der Wettbewerb mit dem HGV im Bereich 500 bis 1.500 Kilometer am stärksten. Übertragen auf den europäischen Kontext umspannt dieser Entfernungsbereich beispielhaft die Strecken Berlin-München (ca. 600 Kilometer) sowie Berlin-Paris (ca. 1.100 Kilometer).

[81] Lawrence, Martha, Richard Bullock, and Ziming Liu. 2019. China's High-Speed Rail Development. International Development in Focus. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1425-9. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.

Die Fahrpreise für den Hochgeschwindigkeitszugverkehr in China werden nach staatlichen Vorgaben festgesetzt bzw. angepasst. Das HGV-Preislevel ist insgesamt niedrig. Die rasante Zunahme des Passagieraufkommens im HGV in den letzten zehn Jahren zeigt, dass zahlreiche chinesische Verbraucher dazu neigen, sich für den Hochgeschwindigkeitszugverkehr zu entscheiden. Zukünftige Preisanpassungen sollten gemäß des „Randoptimum-Preises" ermittelt werden, der einerseits Betriebseinkünfte sicherstellt und andererseits im Vergleich zu den anderen Verkehrsträgern preislich wettbewerbsfähig bleibt. Eine Preisstaffelung sollte weiterhin für HGV- und reguläre Schienenverkehrsdienste vorliegen, um den unterschiedlichen Bedürfnissen der Fahrgäste gerecht zu werden.[82] Des Weiteren sollten Fahrpläne an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden, um die Auslastung von HGV-Zügen zu erhöhen: Eine angemessene Auslastungsquote muss beibehalten werden, um die Effizienz der Hochgeschwindigkeitszüge zu steigern, Angebot und Nachfrage aufeinander abzustimmen und Energieeinsparung sowie Emissionsreduktion fortgehend im Verkehrssektor zu realisieren.

Die Entwicklung des chinesischen Hochgeschwindigkeitszugverkehrs beeinflusst sowohl unmittelbare Einkünfte als auch die allgemeine ökonomische Entwicklung, und generiert durch das neue Mobilitätsangebot verstärktes Reiseaufkommen im Bereich Geschäftsreise und Tourismus. Im Rahmen umfangreich angelegter Bauprojekte mit öffentlichen Investitionen leistet der HGV-Bau einen großen Beitrag zum Bruttoinlandsprodukt und spielt eine bedeutsame Rolle zur Förderung der relevanten Industrien. Die Entwicklung des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs steigert ebenso die Beschäftigungsquote und hat in China in einigen Regionen aktiv zur Armutsbekämpfung beigetragen.

Die HGV-bezogene technologische Entwicklung leistet einen großen Beitrag zur Emissionsminderung im Hochgeschwindigkeitszugverkehr und unterstützt damit ein umweltfreundliches Verkehrsnetz. Gleichzeitig sind weitere Analysen und Verbesserungsmaßnahmen notwendig, um Risiken in Bezug auf Umweltschutz, Boden- und Wassernutzung zu mindern. Insbesondere die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien muss ausgebaut werden, um durch eine optimierte Energieproduktionsstruktur die energieeinsparenden und kohlenstoffreduzierenden Wirkungen des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs weiter zu erweitern.

[82] Lawrence, Martha, Richard Bullock, and Ziming Liu. 2019. China' s High-Speed Rail Development. International Development in Focus. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1425-9. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.

4.2 Analyse der Verkehrsverlagerung vom zivilen Luftverkehr auf den Hochgeschwindigkeitszugverkehr

Die Inbetriebnahme der HGV-Neubaustrecken im Zeitraum 2008 bis 2017 hat die Gesamtanzahl an Flügen und beförderten Personen in den entsprechenden Städten innerhalb des HGV-Verkehrsnetzes um jeweils 28,7 % bzw. 31,8 % reduziert. Dieser Bedarfsabbau im zivilen Luftverkehr wirkt sich dementsprechend positiv auf die Dekarbonisierung des Transportsektors aus.

In der Konkurrenz zwischen dem HGV und dem zivilen Luftverkehr ist die Wettbewerbsfähigkeit des HGV stark von der Fahrzeit abhängig. Der Hochgeschwindigkeitszugverkehr weist die höchste Wettbewerbsfähigkeit bei einer Fahrzeit unter vier Stunden auf. Die Auswirkungen auf den zivilen Luftverkehr auf den entsprechenden Strecken sind signifikant: Die Zahl der Flüge und der Fluggäste geht um jeweils 74,2 % bzw. 82,5 % zurück. Der Fahrzeitbereich, in dem der HGV einen deutlichen Wettbewerbsvorteil aufweist, liegt innerhalb von sechs Stunden, was einer Reiseentfernung von 1.400 Kilometern entspricht. Der substituierende Effekt des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs lässt jedoch mit zunehmender Fahrzeit nach, sodass die Auswirkung von HGV-Strecken mit einer Reisezeit über acht Stunden auf den zivilen Luftverkehr bereits nicht mehr signifikant ist.

Das geplante HGV-Netz mit jeweils acht Verkehrskorridoren in Nord-Süd-bzw. Ost-West-Richtung wird 69 zusätzliche Inlandsflughäfen inklusive 834 weiterer Flugrouten abdecken. Die Ausweitung der HGV-Strecken wird zusätzlich 8,8 % der gesamten Flugverbindungen ersetzen. Unter Berücksichtigung der Auswirkungen der Geschwindigkeitssteigerung auf den HGV-Strecken steigt die Anzahl der ersetzten Passagierflüge weiterhin um 0,7 %. Hätten alle chinesischen Städte mit einer Bevölkerungszahl ab 500.000 Einwohnern einen Zugang zum HGV, wären sämtliche Binnenflughäfen beinahe vollständig durch das HGV-Netz abgedeckt. Mehr als 20 % des Luftverkehrsmarktes könnten demzufolge durch den Hochgeschwindigkeitszugverkehr verdrängt werden.

4.3 Analyse der CO_2-Emissionen während des gesamten Lebenszyklus des chinesischen Hochgeschwindigkeitszugverkehrs

In der vorliegenden Studie wurde ein LCA-Modell entwickelt und eine Schnellfahrstrecke (Hochgeschwindigkeitszugstrecke Peking-Shanghai) als Fallstudie ausgewählt. Unter Berücksichtigung des Material- und Energieverbrauchs für den Infrastruktur- und Fahrzeugbau sowie für den Betrieb wurden Energieverbrauch und Emissionen in jeder Phase ermittelt. Die wesentlichen Erkenntnisse sind folgt:

Bei der aktuellen Energiestruktur und dem derzeitigen Strommix in China stellt der HGV einen Verkehrsträger mit klaren Vorteilen der Energieeinsparung und Emissionsreduktion dar. Über den gesamten Lebenszyklus hinweg beträgt der fossile Primärenergieverbrauch des HGV für jede Einheit der Verkehrsleistung jeweils 8 %, 19 %, 21 %, 37 % und 27 % der Verbrauchsmenge des Luftverkehrs, der Benzin-, Diesel- und Elektrofahrzeugen bzw. der öffentlichen Linienbusse. Die Treibhausgasemissionen des HGV betragen jeweils 10 %, 24 %, 26 %, 32 % bzw. 38 % der Emissionen des Luftverkehrs, der Benzin-, Diesel- und Elektrofahrzeugen bzw. der öffentlichen Linienbusse.

Der Strommix sowie die Fahrzeugauslastung bilden die Faktoren, die sich am stärksten auf den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen des HGV auswirken. Der Betriebszyklus der Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Shanghai trägt zu mehr als 90 % des gesamten Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen während des gesamten Lebenszyklus bei, hauptsächlich bedingt durch den Stromverbrauch für den Fahrzeugbetrieb. Je ökologischer der Strommix und je höher die Auslastung der Hochgeschwindigkeitszüge ist, desto geringer gestalten sich der Energieverbrauch sowie die Treibhausgasemissionen.

Literaturverzeichnis

Englische Publikationen

Bigazzi, A. Comparison of marginal and average emission factors for passenger transportation modes, Applied Energy, Volume 242, 2019, Pages 1460-1466.

Chen Z, Haynes K E. Impact of high-speed rail on housing values: an observation from the Beijing-Shanghai line. Journal of Transport Geography, 2015, 43: 91-100.

Chen Z. Impacts of high-speed rail on domestic air transportation in China. Journal of Transport Geography, 2017, 62: 184-196.

Clewlow R R, Sussman J M, Balakrishnan H. The impact of high-speed rail and low-cost carriers on European air passenger traffic. Transport Policy, 2014, 33: 136-143.

Diao M. Does growth follow the rail? The potential impact of high-speed rail on the economic geography of China. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, 113: 279-290.

Dimoula, V., F. Kehagia, and A. Tsakalidis, A Holistic Approach for Estimating Carbon Emissions of Road and Rail Transport Systems. Aerosol and Air Quality Research, 2017. 16(1): p. 61-68.

Feng, X., Optimization of target speeds of high-speed railway trains for traction energy saving and transport efficiency improvement. Energy Policy, 2011. 39(12): p. 7658-7665.

Gao Y, Song S, Sun J, et al. Does high-speed rail connection really promote local economy? Evidence from China’s Yangtze River Delta. Review of Development Economics, 2020, 24(1): 316-338.

Givoni M, Banister D. Airline and railway integration. Transport policy, 2006, 13(5): 386-397.

Javier G. Location, economic potential and daily accessibility: An analysis of the accessibility impact of the high-speed line Madrid-Barcelona-French border. Journal of transport geography, 2001(9): 229-242.

Jia R, Shao S, Yang L. High-speed rail and CO_2 emissions in urban China: A spatial difference-in-differences approach. Energy Economics, 2021, 99: 105271.

Ke X, Chen H, Hong Y, et al. Do China’s high-speed-rail projects promote local economy? - New evidence from a panel data approach. China Economic Review, 2017, 44: 203-226.

Lawrence, Martha, Richard Bullock, and Ziming Liu. 2019. China’s High-Speed Rail Development. International Development in Focus. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1425-9. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.

Masson S, Petiot R. Can the high-speed rail reinforce tourism attractiveness? The case of the high-speed rail between Perpignan (France) and Barcelona (Spain). Technovation, 2009, 29(9): 611-617.

Park Y, Ha H K. Analysis of the impact of high-speed railroad service on air transport demand. Transportation research part e: logistics and transportation review, 2006, 42(2): 95-104.

Pol P M J. A renaissance of stations, railways and cities: economic effects, development strategies and organizational issues of European high-speed train stations. Delft: DUP Science, 2002.

Sasaki K, Ohashi T, Ando A. High-speed rail transit impact on regional systems: does the Shinkansen contribute to dispersion?. The annals of regional science, 1997, 31: 77-98.

Su M, Luan W, Fu X, et al. The competition effects of low-cost carriers and high-speed rail on the Chinese aviation market. Transport Policy, 2020, 95: 37-46.

Tianduo Peng, Sheng Zhou, Zhiyi Yuan, et al. Life Cycle Greenhouse Gas Analysis of Multiple Vehicle Fuel Pathways in China. Sustainability, 2017, 9(12):2183.

Wang Y, Zhou S, Ou X. Development and application of a life cycle energy consumption and CO_2 emissions analysis model for high-speed railway transport in China. Advances in Climate Change Research, 2021, 12(2): 270-280.

Yue Y, Wang T, Liang S, et al. Life cycle assessment of High-Speed Rail in China. Transportation Research Part D Transport and Environment, 2015, 41:367-376.

Zhang Q, Yang H, Wang Q. Impact of high-speed rail on China’s Big Three airlines. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2017, 98: 77-85.

◆ Chinesische Publikationen

常远 . 中国高铁全生命周期环境影响研究报告 . 北京 : 中央财经大学 , 2019.

陈健昌 , 保继刚 . 旅游者的行为研究及其实践意义 . 地理研究 , 1988, 7(3): 44-50.

陈进杰 , 王兴举 , 王祥琴 , 等 . 高速铁路全生命周期碳排放计算 . 铁道学报 , 2016, 38(12):47-55.

崔力心 . 高速铁路与其他交通方式节能减排比较研究 . 北京 : 北京交通大学 , 2010.

飞常准大数据 . 飞常准大数据平台 . [2019-10-2]. https://data.variflight.com/.

付博音 . 高速铁路生命周期能耗与碳排放研究 . 石家庄铁道大学 , 2017.

郭宁宁 , 于涛 . 高铁新城的空间效应研究进展及思考 . 现代城市研究 , 2018(8): 115-122.

国家统计局 . 2020 中国统计年鉴 . 北京 : 中国统计出版社 , 2020.

国务院办公厅关于印发国家铁路局主要职责内设机构和人员编制规定的通知 . http://www.gov.cn/zhengce/content/2013-05/15/content_7608.htm.

侯雪 , 刘苏 , 张文新 , 等 . 高铁影响下的京津城际出行行为研究 . 经济地理 , 2011, 31(9): 1573-1579.

侯雪 , 张文新 , 吕国玮 , 等 . 高铁综合交通枢纽对周边区域影响研究——以北京南站为例 . 城市发展研究 , 2012, 19(1): 41-46.

姜博 , 初楠臣 , 王媛 , 等 . 高速铁路对城市与区域空间影响的研究述评与展望 . 人文地理 , 2016, 31(1): 16-25.

交通运输部 . 2018 年交通运输行业发展统计公报 . 中国交通报 , 2019-04-12(002).

金凤君 , 焦敬娟 , 齐元静 . 东亚高速铁路网络的发展演化与地理效应评价 . 地理学报 , 2016, 71(4): 576-590.

金一 , 王绍博 . 高速铁路的空间效应及其热点问题 . 城乡研究 , 2020-03-27.
梁雪松 . 基于双重区位空间的湖南旅游业发展机遇探讨： “武广高铁” 开通视阈 . 经济地理 , 2010, 30(5): 859-864.

刘璐 . 我国高速铁路对民航客运的影响研究 . 北京： 北京交通大学 , 2018.

陆娅楠 . 高铁调价了 你想搭哪趟 . [2017-04-12]. http://finance.people.com.cn/BIG5/n1/2017/0412/c1004-29203849.html.

罗云辉 . 高铁对中小城市公路客运的影响及其对策研究 . 广州 : 华南理工大学 , 2015.

孟玮 . 国家发展改革委 4 月新闻发布会 . [2021-04-19]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/xwfb/202104/t20210419_1273739.html?code=&state=123.

沙峻林 . 高速铁路影响下的公路客运方式分担率及发展策略研究 . 长春 : 吉林大学 , 2012.

孙枫 , 汪德根 , 牛玉 . 高速铁路与汽车和航空的竞争格局分析 . 地理研究 , 2017, 36(1): 171-187.

汪德根 , 陈田 , 陆林 , 等 . 区域旅游流空间结构的高铁效应及机理： 以中国京沪高铁为例 . 地理学报 , 2015, 70(2): 213-232.

王昊 , 龙慧 . 试论高速铁路网建设对城镇群空间结构的影响 . 城市规划 , 2009, 33(4): 41-44.

王缉宪 , 林辰辉 . 高速铁路对城市空间演变的影响： 基于中国特征的分析思路 . 国际城市规划 , 2011, 26(1): 16-23.

王姣娥 , 焦敬娟 , 金凤君 . 高速铁路对中国城市空间相互作用强度的影响 . 地理学报 , 2014, 69(12): 1833-1846.

王姣娥 , 景悦 , 杨浩然 . 高速铁路对国内民航旅客运输的替代效应测度 . 自然资源学报 , 2019, 34(9): 1933-1944.

王兰 , 王灿 , 陈晨 , 顾浩 . 高铁站点周边地区的发展与规划——基于京沪高铁的实证分析 . 城市规划学刊 ,2014(04):31-37.

王绍博 , 郭建科 , 罗小龙 , 等 . 高速铁路对中心城市航空客运市场的空间影响——基于人均时间价值视角 . 地理科学进展 , 2019(11): 1-10.

王绍博 , 罗小龙 , 唐蜜 , 等 . 基于共生理论的临京临沪地区跨界融合发展对比研究 . 地理科学 , 2019, 39(11): 1681-1690.

翁瑾 , 肖嘉颖 , 李鑫 . 高铁的需求替代效应评估： 基于全局网络的研究 . 新疆财经 . 2021, (2), 5-16.

吴佳潼 . 中国发布丨国家发改委 [2021-04-19]. http://news.china.com.cn/txt/2021-04/19/content_77419086.htm.

吴康 , 方创琳 , 赵渺希 , 等 . 京津城际高速铁路影响下的跨城流动空间特征 . 地理学报 , 2013, 68(2): 159-174.

许宗芳 , 李江涛 , 许钟匀 . 京沪高速铁路运营后有关问题回顾分析和思考 . 铁道经济研究 , 2019(04):18-20+24.

张铁映 . 城市不同交通方式能源消耗比较研究 . 北京 : 北京交通大学 , 2010.

张新生 . 同城化社会变迁中的跨界钟摆族群体研究 . 南京大学 , 2015.

赵勇 , 田四明 . 截至 2018 年底中国铁路隧道情况统计 . 隧道建设 (中英文), 2019, 39(02):324-335.

中国国务院 . 国务院关于印发“十四五”现代综合交通运输体系发展规划的通知 . [2022-01-18]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/18/content_5669049.htm.

中国高铁断代史 . “第一高铁”秦沈客专如何被湮没 . [2011-06-11]. http://finance.sina.com.cn/roll/20110611/00069974415.shtml.

中国国家铁路集团有限公司 . 新时代交通强国铁路先行规划纲要 . [2021-1-3]. http://fzggw.zj.gov.cn/art/2020/8/18/art_1620995_54544557.

中国国家铁路集团有限公司简介 . http://www.china-railway.com.cn/gsjs/gsjj/.

中国交通运输部 . 交通运输“十二五”规划 . [2011-04-13]. https://www.mot.gov.cn/zhengcejiedu/daoluyunshushierwughgyjd/xiangguanzhengce/201510/t20151014_1900816.html.

中国经济网。(2020-08-13). 新时代交通强国铁路先行规划纲要》发布 明确 2035 年和 2050 年任务目标 . http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202008/13/t20200813_35513476.shtml.

中国民用航空局发展计划司 . 从统计看民航 2018. 北京 : 中国民航出版社 , 2019.

中华人民共和国国家发展和改革委员会 . 中长期铁路网规划（2008 年调整）. [2019-8-7]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/zcssfz/zcgh/200906/W020190910670447076716.pdf.

中华人民共和国国家发展和改革委员会 . 中长期铁路网规划 . [2019-9-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-07/20/5093165/files/1ebe946db2aa47248b799a1deed88144.pdf.

周新军 . 高速铁路行车低碳环保效应分析 . 电力与能源 , 2013, 34(03): 212-216.

Bildnachweise

Abbildung 1: Fahrleistung und Passagieraufkommen des chinesischen Hochgeschwindigkeitszugverkehrs in China: Nationales Statistikamt, Statisches Jahrbuch Chinas Peking: China Statistics Press, 2020

Abbildung 2: Eigene Darstellung basierend auf: Entwicklung des chinesischen HGV-Netzes: Lawrence, Martha, Richard Bullock, and Ziming Liu. 2019. China's High-Speed Rail Development. International Development in Focus. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1425-9. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.

Abbildung 3: Eigene Darstellung basierend auf: Karte des HGV-Gitternetzes mit acht parallelen Nord-Süd-Strecken und acht Ost-West-Strecken (2016-2030): https://www.sohu.com/a/446657295_682294)

Abbildung 4: Abgrenzung der Lebenszyklus-Forschung im HGV: Eigene Berechnung.

Abbildung 5: Energieverbrauch und Kohlenstoffemissionen für den gesamten Lebenszyklus der Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Shanghai: Eigene Berechnung.

Abbildung 6: Energieverbrauch und Kohlenstoffemissionen verschiedener Verkehrsträger im gesamten Lebenszyklus: Eigene Berechnung.

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Sitz der Gesellschaft:
Bonn und Eschborn

GIZ in China
Tayuan Diplomatic Office Building 2-5
14 Liangmahe South Street, Chaoyang District
100600 Beijing, P. R. China
T +86 (0)10 8527 5589
F +86 (0)10 8527 5591
E info@giz.de
I www.giz.de
I www.transition-china.org/mobility