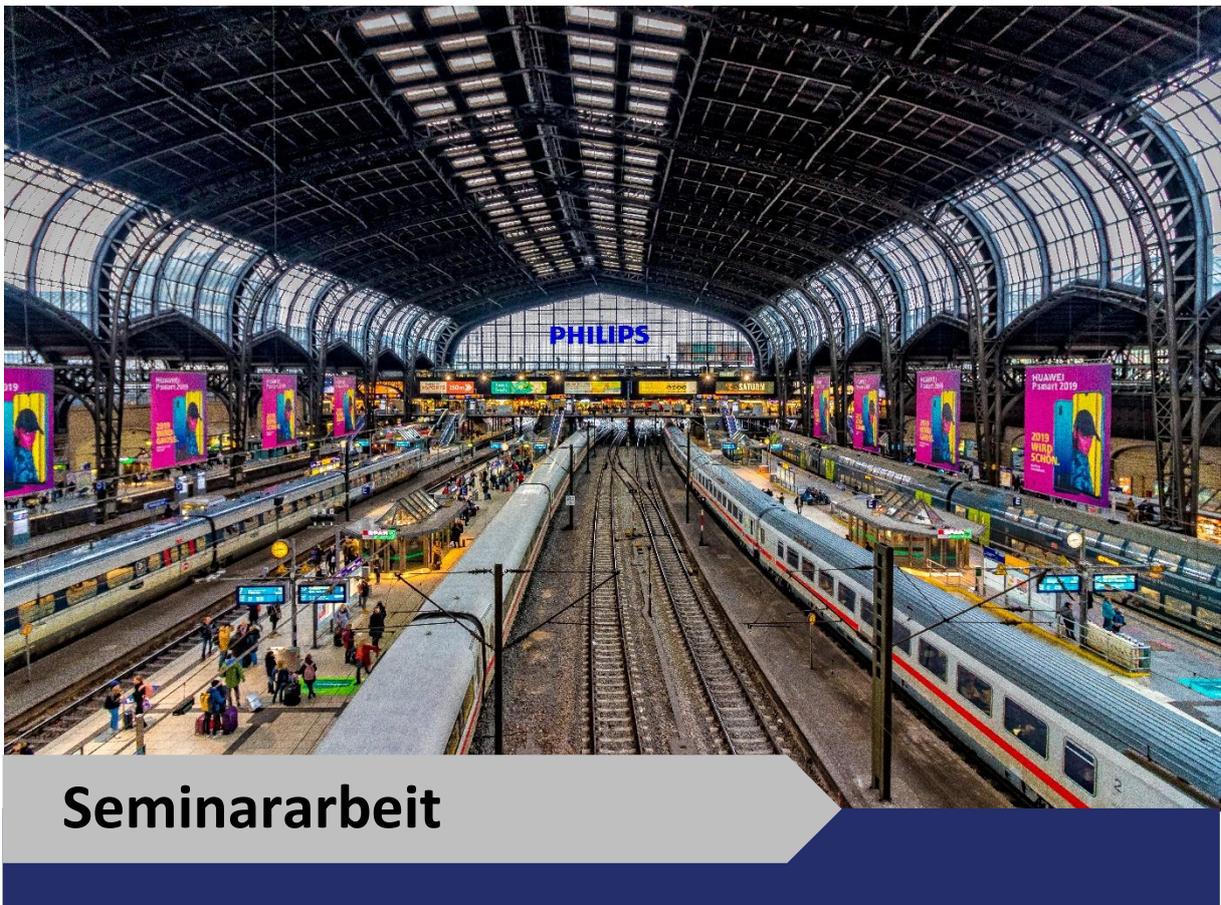


Effizienzverbesserungen bei der Berechnung eines Fahrplanes (zum Beispiel bei der Deutschen Bahn)



von Juliane Victoria Gastrop
(Matrikelnummer WInf102885)

Prof. Dr. Iwanowski

Wintersemester 2019/2020

Inhaltsverzeichnis

0.	Aufgabenstellung und Einführung	1
0.1	Allgemeine Ausführungen	1
0.2	Kundenwunsch vs. Betriebsstabilität	2
0.3	Ausmaße des Problems	3
1.	Möglichkeit der mathematischen Optimierung	4
1.1.	Taktzeit.....	5
1.1.1.	Integraler Taktfahrplan	5
1.1.2.	Exkurs: Arbeit des Zukunftsbündnis Schiene	6
1.1.3.	Optimierung auf zwei Ebenen.....	8
1.2.	Fahrzeiten.....	9
1.2.1.	Geschwindigkeitsdifferenzen der unterschiedlichen Züge.....	9
1.2.2.	Exkurs: Lösungen anderer Länder	10
1.2.3.	Unterschied zwischen Personen- und Güterverkehr	12
1.3.	Normung der Standzeiten.....	14
1.4.	Streckenausbau	15
1.5.	Anwendung des PESP	17
1.5.1.	Darstellung der Funktionsweise an stark vereinfachten Beispielen	17
1.5.2.	Konkrete Anwendungsbeispiele	19
2.	Voraussetzungen.....	20
2.1.	Allgemeine Voraussetzungen.....	20
2.2.	European Train Control System	21
3.	Fazit.....	24
Quellen	27
Literaturverzeichnis	27
Abbildungsverzeichnis	28

0. Aufgabenstellung und Einführung

0.1 Allgemeine Ausführungen

Das Thema meiner Seminararbeit lautet:

Effizienzverbesserungen bei der Berechnung eines Fahrplanes (zum Beispiel bei der Deutschen Bahn)

Dieses Thema ist aus diversen Gründen bereits jetzt hoch relevant und wird für die Zukunft noch an Relevanz hinzugewinnen. Die Klimaziele des Pariser Klimaschutz-Abkommens – Verringerung CO₂-Ausstoß um 55 % bis 2030 und Begrenzung der Erderwärmung bis zum Ende dieses Jahrhunderts auf deutlich unter 2°C¹ – werden nur mit dem Verkehrsmittel der Bahn² zu erreichen sein, da die Bahn es im Gegensatz zum Auto leisten kann viele Menschen (relativ) umweltfreundlich zu befördern. Aktuell stößt der gesamte Straßenverkehr 72 % des gesamten CO₂ aller Verkehrsmittel aus (siehe *Abbildung 1*), ein Handeln ist somit geboten.

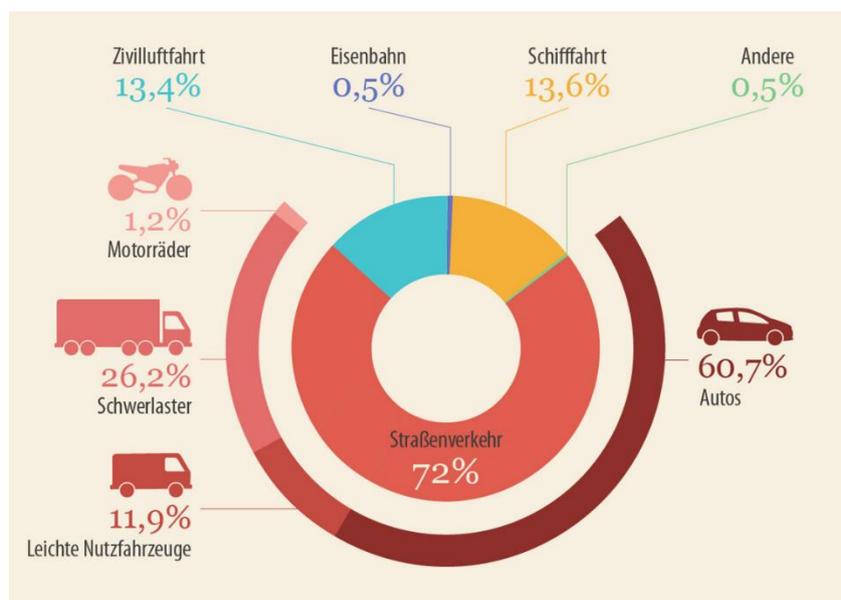


Abbildung 1 – CO₂-Emissionen des Verkehrs in der EU im Jahr 2016
Aufschlüsselung nach Verkehrsträgern

lich unter 2°C¹ – werden nur mit dem Verkehrsmittel der Bahn² zu erreichen sein, da die Bahn es im Gegensatz zum Auto leisten kann viele Menschen (relativ) umweltfreundlich zu befördern. Aktuell stößt der gesamte Straßenverkehr 72 % des gesamten CO₂ aller Verkehrsmittel aus (siehe *Abbildung 1*), ein Handeln ist somit geboten.

Im Vergleich zum Flugverkehr ist die Bahn ebenfalls eine echte Alternative, da gerade bei innerdeutschen Reisen das Flugzeug wenig bis keinen Zeitvorteil mit sich

bringt. Anhand des Vergleiches mit dem Flugverkehr kann man jedoch auch erkennen, was das Problem der Bahn ist. Flugzeuge sind (aufgrund ihrer strikten Sicherheitsbestimmungen zwangsläufig) deutlich zuverlässiger und halten dadurch ausgegebene Flugpläne ein. Zudem gibt es innerdeutsche Verbindungen auf denen das Flugzeug sogar noch einen Preisvorteil gegenüber der Bahn aufweist.

Um die Bahn zukunftsfähig zu machen und vor allem in der Bevölkerung in ihrem Ansehen zu steigern, müssen höchstwahrscheinlich mehrere Maßnahmen ergriffen werden, nur eine davon ist die Effizienzverbesserung bei der Berechnung eines Fahrplanes.

Zur Umsetzung eines theoretisch perfekten Fahrplanes müssen strukturelle Mängel bei der Bahn beseitigt werden. Die Infrastruktur des Schienennetzes sei unterfinanziert, zudem seien das Wagenmaterial und die Technik aufgrund ihres Alters zunehmend störanfällig und wichtige Finanzierungsfragen

¹ <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaziele-und-sektoren-1669268> (Stand: 11.02.2020)

² Die „Bahn“ wird in dieser Seminararbeit stellvertretend für das Verkehrsmittel und als Synonym für die Gesamtheit der 433 öffentlichen Deutschen Bahnunternehmen verwendet werden.

– wie beispielsweise die Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung (LuFV) – seien immer noch offen, führte Herr Torsten Westphal aus³.

Die Verbesserungen bei der Bahn betreffen nicht nur mehrere Maßnahmenpakete, sie spielen auch auf verschiedenen Ebenen in Deutschland eine Rolle. Der gesamte Prozess betrifft die Politik – im Bund sowie im Land –, die beteiligten Unternehmen und nicht zuletzt die Bevölkerung/Gesellschaft. Aus diesem Grund geht die Betrachtung des Themas in dieser Seminararbeit über den rein wissenschaftlichen (mathematischen) Gesichtspunkt hinaus und weist teilweise allgemeinere Exkurse auf.

0.2 Kundenwunsch vs. Betriebsstabilität

Welche Auswirkungen die Probleme der Deutschen Bahn⁴ bei der Einhaltung des Fahrplanes haben, lässt sich sehr gut an der Idee zu der sogenannten „Pofalla-Wende“⁵ erklären. An diesem Beispiel kann man erkennen, dass sich die Deutsche Bahn aktuell im Spannungsfeld zwischen einer möglichst hohen Betriebsstabilität und dem Eingehen auf die Kundenwünsche befindet. In der derzeitigen Situation besteht hier ein Spannungsfeld, da die beiden Ziele nicht immer identisch sind und sich teilweise sogar gegenseitig ausschließen.

Die Pofalla-Wende soll in der Theorie der Deutschen Bahn die Möglichkeit geben, den Fahrplan trotz der Verspätung eines Zuges einzuhalten. Dazu soll ein Zug, wenn er zwischen zwei Endhaltestellen pendelt, ab einer Verspätung, die es ihm unmöglich macht den Fahrplan einzuhalten, vor dem Erreichen der einen Endhaltestelle bereits umdrehen, um so bei einer späteren Fahrt wieder im Fahrplan zu sein. Der Zug fährt dabei nicht alle Haltestellen seiner beabsichtigten Strecke an, sondern „wendet“ tatsächlich auf einem Unterwegshalt. Grafisch ließe sich dies, wie folgt, darstellen:

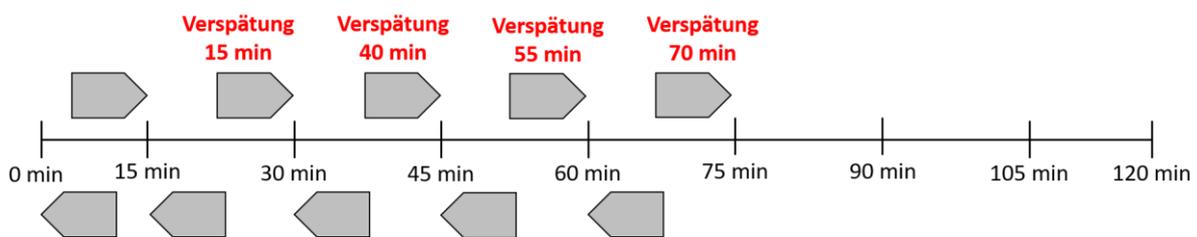


Abbildung 2 – schematische Darstellung der Pofalla-Wende

Im Beispiel weist der Zug beim fünften Halt bereits 70 min Verspätung auf und ist insgesamt 145 min unterwegs, obwohl der Zug im Normalfall lediglich 120 min für die gesamte Strecke brauchen darf. Wenn der Zug nun die Strecke bis zum rechten Ende durchfährt, weist er auf dem Rückweg ebenfalls eine Verspätung auf und ist beim nächsten Losfahren am linken Ende ebenfalls nicht pünktlich. Insgesamt lässt sich so keine pünktliche Abfahrt mehr realisieren.

Problematisch an diesem Vorgehen ist, dass Fahrgäste, welche an einer Haltestelle nach der Pofalla-Wende warten, diesen Zug nicht mehr nehmen können und auf den nächsten Zug warten oder eine alternative Zugverbindung nutzen müssen.

³ Vorsitzender der Eisenbahn- und Verkehrsgewerkschaft (EVG) in einer Pressemeldung am 14. November 2019, <https://www.lok-report.de/news/deutschland/verkehr/item/14506-evg-bund-muss-strukturelle-probleme-bei-der-deutschen-bahn-angehen.html> (Stand 01.02.2020).

⁴ Mit dem Ausdruck „Deutsche Bahn“ ist das Unternehmen Deutsche Bahn AG gemeint.

⁵ Der ehemalige CDU-Kanzleramtsminister und heutige Bahnvorstand Ronald Pofalla ist der Urheber und damit Namensgeber dieses Manövers.

Hieran sieht man eindeutig, dass es grundsätzliche Überlegungen bei der Deutsche Bahn gibt, welche zum Erreichen einer entsprechenden Betriebsstabilität den Kundenwunsch hinten anstellen. Allein diese Überlegung zeigt, mit welchen Problemen die Deutsche Bahn zu kämpfen hat und welche – aus Sicht der Bahnpassagiere – verzweifelten Maßnahmen ergriffen werden sollen. Die Pofalla-Wende wäre aktuell notwendig, da solche Verspätungen eines einzelnen Zuges häufig Verspätungen weiterer Züge nach sich ziehen können und so ein Kaskaden ähnlicher Verlauf für ganz Deutschland bzw. große Teile Deutschlands entstehen kann.

Man stelle sich eine Strecke in der Metropolregion des Ruhrgebietes vor, welche von mehreren unterschiedlichen Zugtypen genutzt wird und auf welcher ein verspäteter Zug unterwegs ist. Dieser verspätete Zug könnte dazu führen, dass andere Züge auf derselben Strecke Verspätungen aufbauen. Fahren diese verspäteten Züge dann auf anderen Strecken weiter, als der ursprünglich verspätete Zug, entsteht dieser Effekt auf diesen weiteren Strecken ebenfalls usw. Es könnte tatsächlich zu deutschlandweit messbaren mittelbaren Verspätungen führen.

Was unternommen werden muss, damit der Idealfall eintritt – bei dem sich Kundenwunsch und Betriebsstabilität nicht ausschließen –, wird im Folgenden untersucht werden. Vorher werden jedoch noch einmal die Ausmaße des Problems bei der Deutschen Bahn aufgezeigt.

0.3 Ausmaße des Problems

Die derzeitigen Ausmaße der Verspätung bei der Deutschen Bahn sind enorm! Es gibt also sehr viel Verbesserungsbedarf.

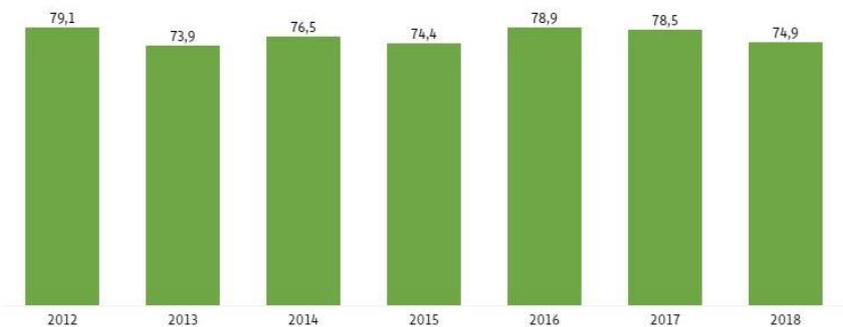


Abbildung 3 – Pünktlichkeit der Züge der Deutschen Bahn in Prozent

Im Jahr 2018 waren lediglich 74,9 % aller Züge der Deutschen Bahn pünktlich. Ein Trend im Vergleich zu den Vorjahren ist nicht erkennbar. Die Pünktlichkeit der Züge der Deutschen Bahn betrug seit 2012 immer zwischen ca. 74 % und 79 % (siehe Abbildung 3).

Im Jahr 2018 waren 25,1 % aller Züge der Deutschen Bahn unpünktlich, also mehr als 6 min bzw. 16 min verspätet⁶. Bei einem Zugaufkommen von ca. 8,78 Mio. Zügen pro Jahr⁷ summiert sich dies auf insgesamt 3,7 Mio. Minuten Verspätung auf. Auch bei der Verspätung ist keine ernsthaft positive Entwicklung seit 2012 zu erkennen. Es hat sogar eher den Anschein, dass die Verspätung seit 2012 sich negativ entwickelt hat, von

⁶ <https://www.deutschebahn.com/resource/blob/1187698/4ec4a0d0470d6389556725b1775e563d/fragenantworten-data.pdf> (Stand: 11.02.2020).

⁷ Deutsche Bahn – Daten & Fakten 2018 https://www.deutschebahn.com/resource/blob/3992278/1d136e983334750ef4f24072d49c7cdf/20190325_bpk_2019_daten_fakten-data.pdf (Stand: 01.02.2020).

„nur“ 3,1 Mio. Minuten Verspätung in 2012 auf den aktuellen Wert von 3,7 Mio. Minuten (siehe *Abbildung 4*). Eine Verspätung von 3,7 Mio. Minuten bedeutet umgerechnet, dass die Züge der Deutschen Bahn im Jahr 2018 insgesamt ca. 61 667 Stunden oder ca. 2 570 Tage Verspätung aufgewiesen haben. Dies bedeutet wiederum, dass innerhalb eines Jahres eine Verspätung von ungefähr 7 Jahren bestand.

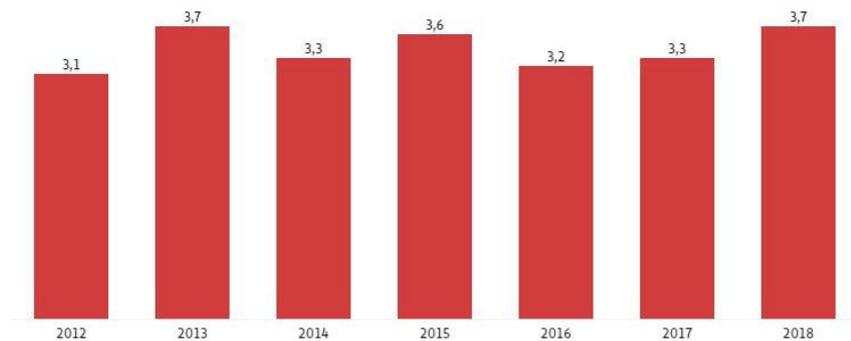


Abbildung 4 – Verspätung der Züge der Deutschen Bahn in Mio. Minuten

1. Möglichkeit der mathematischen Optimierung

Eine Möglichkeit einen Fahrplan mathematisch zu optimieren besteht in der Lösung des „Periodic Event Scheduling Problem“ (kurz: PESP), d. h. im Planen eines bzw. mehrerer periodisch auftretender Ereignisse. Dieses Problem wurde 1989 von den Herren Serafini und Ukovich titulierte und bietet Einsatzmöglichkeiten bei der Erstellung von Lichtsignalplänen, der Einsatzplanung von Personal und Fahrzeugen sowie einer Taktfahrplanerstellung.

Bei der Lösung des PESP wird ein Fahrplan und jede einzelne Zugverbindung in eine Vielzahl von Ereignissen zerlegt und diese Ereignisse werden in der Folge mittels eines Solvers (dazu in [Kapitel 1.5.1.](#) später mehr) mathematisch aufeinander abgestimmt. Bei der Lösung des Problems sind eine hohe Anzahl von Eingabe-Parameter – neben der Vielzahl der Ereignisse – zu beachten, da sich diese unmittelbar auf die Ereignisse auswirken. Einige der Input-Daten werden im weiteren Verlauf der Seminararbeit näher betrachtet. Eine abschließende Aufzählung der Input-Daten wird jedoch im Rahmen dieser Seminararbeit nicht möglich sein.

An erster Stelle muss man sich über eine Zielvorgabe für den zukünftigen Fahrplan einigen, d. h. welcher Zielzustand erreicht werden soll. Möglich ist, dass ein gewisser Takt umgesetzt wird oder dass möglichst viele Züge unabhängig von einem Takt fahren, also lieber eine große Anzahl von Verbindungen erreicht wird, ohne diese aufeinander abzustimmen (hierzu Näheres in [Kapitel 1.1.1.](#)).

In der Folge stellt sich die Frage, auf welcher Ebene bzw. bei welchem Unternehmen die Fahrpläne optimiert werden. Hier bestehen die Probleme der Diversifikation der deutschen Eisenbahnverkehrsunternehmen sowie die Problematik der Eigenständigkeit des für das Schienennetz zuständigen Unternehmens, der DB Netz AG. Auf diese Problematik wird in [Kapitel 1.1.3.](#) eingegangen.

Im Rahmen der Lösung des Problems ist auch die Zeit zwischen den Ereignissen zu beachten. Diese wird durch die unterschiedlichen Fahrzeiten der Züge beeinflusst, welche wiederum abhängig sind von Typ und Modell des Zuges sowie den Gegebenheiten des Schienennetzes. Die Schwierigkeiten im Zusammenhang mit den Fahrzeiten werden in [Kapitel 1.2.](#) erläutert.

Es stellt sich natürlich auch noch die Frage nach den Ereignissen selbst. Hier könnte man als Zielvorgabe minimale oder fest genormte Halte vorgeben (müssen). Darüber hinaus bestehen teilweise Vorgaben

auf unterschiedlichen gesetzlichen Ebenen, wie lange solche Halte mindestens sein müssen, sodass keine beliebigen Vorgaben gemacht werden können. [Kapitel 1.3](#) wird auf die Standzeiten eingehen.

Weitere Input-Parameter sind die Gegebenheiten des Schienennetzes selber. Hier ergeben sich weitere Schwierigkeiten in Bezug auf eingleisige Strecken oder Strecken, die nur gewisse Geschwindigkeiten zulassen, z. B. aufgrund verschiedener baulicher Umstände. Zusätzlich gibt es Restriktionen bezüglich mancher Strecken – speziell im Schienengüterverkehr – durch Brücken oder Streckenabschnitte mit Steigungen, welche nicht von jedem Zug befahren werden können. Auf den Streckenausbau wird in [Kapitel 1.4](#) eingegangen.

An dieser nicht abschließenden Aufzählung der Input-Parameter kann man sehr schnell ablesen, dass die Lösung des Problems äußerst komplex ist. Es gilt jedes einzelne Ereignis in Abhängigkeit der Parameter perfekt zu planen und gleichzeitig die Wechselwirkungen der Ereignisse und Parameter untereinander zu beachten.

1.1. Taktzeit

1.1.1. Integraler Taktfahrplan

Im Rahmen der Taktzeiten hat die Initiative „Deutschland-Takt“ u. a. die Idee zu einem integralen Taktfahrplan⁸ als Zielvorgabe. In diesem Zusammenhang bedeutet *Taktfahrplan*, dass jede Stunde an jedem Tag zur selben Zeit ein Zug abfährt. Daraus ergibt sich mittelbar der Vorteil, dass weitere Verkehrsmittel auf diesen Takt abgestimmt werden können, wie zum Beispiel der öffentliche Nahverkehr oder regionale Buslinien. Das *integral* bedeutet, dass die Takte der einzelnen Fahrpläne und Züge aufeinander abgestimmt sind. D. h., dass sich in Knotenbahnhöfen zu jeder Stunde die Züge treffen, also gemeinsam einfahren, einige Minuten halten und somit das Umsteigen ermöglichen. Es fährt nicht nur jeder Zug nach einem eigenen Takt, sondern ganz Deutschland „im Takt ist“.

Zusätzlich zum gesellschaftlichen Willen bzw. Wunsch nach einem zuverlässigen Bahnverkehr gibt es eine weitere Ebene – die politische Ebene –, auf der es gewollt ist, dass die Bahn ein sehr bedeutendes Verkehrsmittel der Zukunft wird.

Politisch ist es gewollt, dass der „Deutschland-Takt“ bis 2030 umgesetzt ist. Hierzu wurde von Herrn Andreas Scheuer⁹ bereits das Zukunftsbündnis Schiene gegründet, welches am 09. Oktober 2018 seine Auftaktsitzung hatte¹⁰ und sich aus Mitgliedern der Politik, Wirtschaft und der Verbände zusammensetzt. Im Rahmen der Arbeit dieses Bündnisses wurden bereits einige Ergebnisse vorgelegt. Zudem wurden bereits zwei Gutachterentwürfe zur Umsetzung des „Deutschland-Takt“ erstellt.

Mit der definierten Zielvorgabe „Deutschland-Takt einführen“ gilt es die weiteren Input-Parameter zu betrachten und auf ihre Schwierigkeit hin zu untersuchen.

⁸ <https://deutschland-takt.de/wp-content/uploads/2017/03/Zielepapier-Deutschland-Takt-10-2009.pdf> (Stand 01.02.2020).

⁹ Mitglied des Deutschen Bundestages und Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur.

¹⁰ <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/auftakt-zukunftsbuendnis-schiene.pdf?blob=publication-File> (Stand: 01.02.2020).

1.1.2. Exkurs: Arbeit des Zukunftsbündnis Schiene

Die übergeordneten und detaillierten Ziele bzw. Lösungsansätze der angesprochenen Arbeitsgruppe sind¹¹:

1. Deutschland-Takt einführen (Pünktlichere Bahn)

Zur Einführung des Deutschland-Taktes soll der Bund die koordinierende Rolle einnehmen, es soll so ermöglicht werden, dass im Abschlussbericht des Bündnisses – dem sog. Masterplan Schienenverkehr – Vorschläge vorgelegt werden, die eine Umsetzung des Deutschland-Taktes realisierbar machen. Die Einführung des Deutschland-Taktes solle bereits in kleinen Etappen vor 2030 erfolgen und mittels einer entsprechenden kommunikativen Begleitung gegenüber den Passagieren hervorgehoben werden. Aktuelle Infrastrukturmaßnahmen sollen umgesetzt und weitere geplant werden, sodass die Voraussetzungen zur Umsetzung des deutschlandweiten Taktes geschaffen werden. Zudem wird das Ziel ausgegeben, dem Schienengüterverkehr einen angemessenen Anteil bei der Planung zukommen zu lassen.

2. Kapazitäten ausbauen (Zuverlässigere Bahn)

Laut dem Bericht des Vorsitzenden des Lenkungskreises über die Arbeit des Zukunftsbündnis Schiene untergliedert sich dieses übergeordnete Ziel in zwei Unterziele, erstens der Ausbau der Kapazität des Schienennetzes und zweitens die Nutzung der Potenziale der Digitalisierung, um die Netzkapazität zu steigern.

Die Problematik des ersten Unterziels liegt darin, dass die Netzbelastung seit nunmehr ca. 20 Jahre stetig gestiegen ist, von 1999 bis 2017 stieg das Verhältnis der Zugfahrten pro Streckenlänge um 23 %. Die Steigerung hat zwei Gründe, einerseits wurde seit langer Zeit das Schienennetz zurückgebaut und andererseits wurde das verbliebende Streckennetz stärker genutzt. Der Trend des steigenden Verkehrsaufkommens auf der Schiene wird sich voraussichtlich fortsetzen, aus diesem Grund wurden verschiedene Absichten und Ziele definiert. Das Schienennetz soll insgesamt besser auf die maximal zulässige Länge für Güterzüge von 740 m ausgelegt werden, damit diese besser in den Personenverkehr integriert werden können und sich die beiden Zugarten nicht gegenseitig im Schienennetz behindern. Zudem sollen Großknoten und Engpässe im bestehenden Schienennetz ausgebaut werden, sodass das Schienennetz schnell leistungsfähiger wird. Um die höhere Leistungsfähigkeit zu erreichen, sollen prioritäre Maßnahmen im Vorwege ihrer Realisierung bereits vollständig finanziert sein. Zur zeitnahen Reduzierung der bestehenden Engpässe sollen verschiedene Maßnahmen kurz- bis mittelfristig umgesetzt werden. Neu- und Ausbaumaßnahmen sollen in ihrer Umsetzung beschleunigt werden, kleine und mittlere Maßnahmen-Pakete sollen außerhalb der bestehenden LuFV umgesetzt werden und das „Gesetz über die Bundesförderung der Investitionen in den Ersatz der Schienenwege der öffentlichen nicht bundeseigenen Eisenbahnen im Schienengüterfernverkehrsnetz“ (SGFFG) soll weiterentwickelt werden. Darüber hinaus soll die Elektrifizierung des bestehenden Netzes vorangetrieben und es soll „kapazitätsschonend“ gebaut werden, d. h. die Baustellen sollen mittels eines vernünftigen Baustellenmanagements geplant werden.

Die Digitalisierung soll bei der Steigerung der Netzkapazität helfen, da u. a. mittels des European Train Control Systems (siehe dazu in [Kapitel 2.2.](#)) das Gesamtsystem leistungsfähiger werden soll.

¹¹ Bericht des Vorsitzenden des Lenkungskreises über die Arbeit des Zukunftsbündnis Schiene vom 09.10.2018 bis zum 30.04.2020 <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/zukunftsbuendnis-schiene.html>.

3. Wettbewerbsfähigkeit der Schiene stärken (Flexiblere Bahn)

Der Trassenpreis soll für die Eisenbahnverkehrsunternehmen gesenkt, im Schienengüterverkehr soll dieser Preis sogar halbiert werden. Die Anzahl der Gleisanschlüsse hat sich von ehemals 11 000 auf aktuell lediglich 3 250 Anschlüsse reduziert, dies hat verständlicherweise zur Folge gehabt, dass viele Regionen oder Gemeinden keinen Anschluss (mehr) haben. Diese fehlende Anbindung soll (wieder) hergestellt werden, damit die Bevölkerung eine komfortable Anbindung an den Schienenverkehr erhält. Andere Unterziele im Zusammenhang mit diesem Punkt sind nur von der Politik umzusetzen. So soll der Bahnverkehr z. B. von der Stromsteuer und der EEG-Umlage (Erneuerbare-Energien-Gesetz) befreit werden. Ein bereits eingelöstes Versprechen der Politik ist die Senkung der Umsatzsteuer auf den ermäßigten Steuersatz von 7 %. Die Senkung der Umsatzsteuer zeigt jedoch auch sehr anschaulich die Problematik der teilweise fehlenden Zusammenarbeit oder Einigkeit zwischen den unterschiedlichen Akteuren, denn ob die Senkung der Umsatzsteuer an den Kunden weitergegeben wird, stand zuerst nicht fest. Am Anfang war es die Absicht der Deutschen Bahn den Mehr-Gewinn aufgrund der Reduktion des Umsatzsteuersatzes einzubehalten. Dieses Vorgehen hätte die Wettbewerbsfähigkeit im Auge des Kunden nicht erhöht und das Ansehen des Verkehrsmittels Bahn verringert.

4. Lärmemissionen senken (Leisere Bahn)

Die Verringerung des entstehenden Lärmes beim Fahren der Züge betrifft beide Arten, die Personen- sowie die Güterzüge. Dieses Ziel erscheint im ersten Augenblick als wenig relevant. Es ist bezüglich der Akzeptanz in der Bevölkerung jedoch sehr wichtig, da leisere Züge eine geringere Lärmbelastigung bedeuten und so die Trassen auch dichter an Wohngebieten verlegt werden können. Eine größere Freiheit bei der Planung neuer Trassen steigert wiederum die Wettbewerbsfähigkeit der Bahn, da so Strecken kostengünstiger realisiert werden können und die Anbindung für den Kunden besser wird.

Laut dem definierten Ziel des Zukunftsbündnis Schiene sind aktive Maßnahmen unmittelbar an der Quelle passiven Maßnahmen vorzuziehen, d. h. die Unterdrückung des Lärmes am Zug ist Baumaßnahmen an der Strecke vorzuziehen. Auch diese Vorgabe steigert die Akzeptanz des Verkehrsmittels Bahn beim Kunden, da die bekannten Lärmschutzwände im Allgemeinen wenig ansehnlich sind bzw. so empfunden werden.

Gerade im Hinblick auf das definierte Ziel der Passagierverdoppelung bis 2030 sind leisere Züge von hoher Relevanz, da die täglichen Fahrten – die aktuell noch teilweise starken Lärm verursachen – zunehmen werden. Außerdem profitieren auch die Bahnpassagiere von leiseren Zügen, denn das Fahrerlebnis wird komfortabler und damit verbessert.

5. Innovationen fördern (Innovative Bahn)

Ein weiteres ausgegebenes Ziel ist es, dass Innovationen auf den Gebieten „Wirtschaftlichkeit“, „Umwelt und nachhaltige Mobilität“ sowie „Sicherheit“ gefördert werden.

Hierbei betreffen die Innovationen nicht nur den Zug selber, es geht z. B. auch um Innovationen bei der Passagierlenkung am Bahnsteig und im Bahnhof, große Fahrgastströme müssen – im doppelten Sinne – intelligent in Bahnen gelenkt werden. Leichteres Orientieren im Bahnhof fördert schnelleres Vorankommen, was wiederum zu einer effizienteren Planung der Halte führt.

Selbstverständlich geht es auch um Erfindungen rund um den Zug. Diese betreffen alternative Antriebskonzepte und die Weiterentwicklung der Motoren sowie zum großen Teil das autonome Fahren.

1.1.3. Optimierung auf zwei Ebenen

In Deutschland gibt es insgesamt 433 öffentliche Eisenbahnverkehrsunternehmen sowie 155 nicht-öffentliche Eisenbahnverkehrsunternehmen¹², welche aus unterschiedlichen Gründen nicht öffentlich sind, z. B. weil ihre Genehmigung ruht oder sie nur in sehr begrenzten Gebieten (Häfen o. ä.) operieren. Der Vollständigkeit halber ist hierbei zu sagen, dass von den 433 öffentlichen Eisenbahnverkehrsunternehmen mehrere weder im Fernverkehr noch im flächendeckenden Regionalverkehr tätig sind und es sich teilweise um Eisenbahnverkehrsunternehmen handelt, die lediglich in örtlich sehr begrenzten Gebieten operieren, wie z. B. auf Inseln oder in Gebirgen. Diese örtlich sehr begrenzt agierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen sind in der gesamtdeutschen Betrachtung des Problems zu vernachlässigen und müssen nicht beachtet werden, da eine Insel- oder Gebirgsbahn keine Interferenzen in Bezug auf den übrigen Bahnverkehr aufweist.

Zusätzlich zu den Eisenbahnverkehrsunternehmen gibt es in Deutschland noch die DB Netz AG, welche für den Betrieb des Schienennetzes zuständig ist. Der Betrieb des Schienennetzes beinhaltet dabei nicht den Betrieb der Bahnhöfe, hierfür ist ein weiteres Unternehmen zuständig, die DB Station&Service AG. Die Problematiken, die aus der Trennung zwischen diesen Zuständigkeiten entstehen können, werden im Rahmen der allgemeinen Voraussetzungen in [Kapital 2.1.](#) deutlich.

Problematisch bei der Optimierung ist, dass es keinen gemeinsamen Optimierungsprozess der zwei Ebenen gibt, obwohl die DB Netz AG ein hundertprozentiges Tochterunternehmen der Deutschen Bahn ist. Ganz im Gegenteil, jedes der Eisenbahnverkehrsunternehmen – die Deutsche Bahn eingeschlossen – optimiert in einem ersten Schritt den eigenen Fahrplan unter Berücksichtigung der eigenen Möglichkeiten und Kapazitäten sowie der Kundenwünsche. Diese Fahrpläne beachten nicht oder nur sehr begrenzt die Fahrpläne der anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen, es gilt der Grundsatz: „Jeder plant für sich“. Im Folgenden werden diese unternehmenseigenen Fahrpläne an die DB Netz AG gemeldet. Die DB Netz AG legt alle gemeldeten Fahrpläne übereinander und stellt fest, inwiefern diese zueinander passen oder eben nicht zueinander passen und ob aus diesem Grund Bedarf zum Abstimmen und erneuten Optimieren besteht. Am Ende des Optimierungsprozesses bei der DB Netz AG gibt es einen deutschlandweit einheitlichen Fahrplan, welcher an die Eisenbahnverkehrsunternehmen zurückgemeldet wird und die Fahrpläne dieser mehr oder weniger gut umsetzt.

Das übergeordnete Problem bei diesem Vorgehen ist, beide an der Fahrplanoptimierung beteiligten Ebenen haben unterschiedliche Ziele, vorgegeben durch ihren unterschiedlichen Kundenkreis. Die Eisenbahnverkehrsunternehmen stimmen ihren Fahrplan auf die Passagiere ab, um diesen ein möglichst komfortables Bahnerlebnis zu ermöglichen. Die DB Netz AG hat andere Kunden, sie muss nicht den Fahrgast „versorgen“, sondern ihre Kunden sind die einzelnen Eisenbahnverkehrsunternehmen.

Aufgrund der Monopol-Stellung der DB Netz AG ist ihr Ziel jedoch auch nicht unbedingt, die gemeldeten Fahrpläne der Eisenbahnverkehrsunternehmen bestmöglich umzusetzen, sondern der DB Netz AG geht es primär darum, das Schienennetz möglichst effektiv auszunutzen. Teilweise kann dies sogar

¹² https://www.eba.bund.de/DE/Themen/Eisenbahnunternehmen/eisenbahnunternehmen_node.html;jsessionid=56E5C54F994CE9D977F9F4B64763FF7F.live11292#doc1527822bodyText2 (Stand 01.02.2020).

dazu führen, dass die Züge stark unterhalb ihren möglichen Höchstgeschwindigkeiten fahren oder Umwege in Kauf nehmen sollen.

Aufgrund des Zieles der DB Netz AG sind in diesem Prozess der Erstellung des deutschlandweiten Fahrplanes die einzelnen Eisenbahnverkehrsunternehmen zwingend zu beteiligen, da sie als Korrektiv zur DB Netz AG fungieren und den Fahrgastwunsch beachten.

1.2. Fahrzeiten

1.2.1. Geschwindigkeitsdifferenzen der unterschiedlichen Züge

Das Problem der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den unterschiedlichen Zügen unterteilt sich einerseits in die unterschiedlichen Zugtypen und andererseits innerhalb der Zugtypen in die Zugmodelle sowie die Tatsache, dass im Zweifelsfall alle auf derselben Strecke unterwegs sind.

Anhand der folgenden Tabelle soll der Umfang des Problems exemplarisch (die Tabelle hat nicht den Anspruch auf Vollständigkeit) dargestellt werden:

Zugtyp	Zugmodell	Baureihe	Höchstgeschwindigkeit
ICE	ICE 1	401	280 km/h
	ICE 2	402	280 km/h
	ICE 3	403	330 km/h
	ICE 4	412	250 km/h
	ICE T7, ICE T5 ¹³	411, 415	230 km/h
IC	IC 1	101	220 km/h
		4110, 120.1	200 km/h
		245	160 km/h
		241	140 km/h
	IC 2	146.5	160 km/h
RE/RB		182	230 km/h
		120.2	200 km/h
		146.0, 612	160 km/h
		425, 620	140 km/h
		143, 642	120 km/h
Güterzug¹⁴		247, 187.1	160 km/h
		145, 152, 187.0	140 km/h
		156	125 km/h
		233	120 km/h

Diese hohe Diversifikation führt aufgrund der unterschiedlichen Bauart bedingten Höchstgeschwindigkeiten zu einer Vielzahl zu beachtender Variablen bei der Berechnung der Fahrzeiten. Interessant in

¹³ Das „T“ steht für Triebzug oder Triebwagen, dabei bezeichnet die Zahl hinter dem „T“, wie viele Teile der Zug lang ist, d. h. ein ICE T7 ist ein Zug bestehend aus einem Triebwagen und 7 Waggonen.

¹⁴ Maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit hauptsächlich abhängig von der Zuglänge, der Beladung sowie der Art der Waggonen (Bremsensystem etc.), im Schnitt werden lediglich Geschwindigkeiten zwischen 90-120 km/h erreicht.

diesem Zusammenhang ist, dass die Deutsche Bahn im Rahmen der unterschiedlichen ICE-Modelle beim Wechsel vom ICE 3 auf den ICE 4 festgestellt zu haben scheint, die Höchstgeschwindigkeit ist aktuell nicht sonderlich wichtig. Der ICE 4 hat lediglich eine Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h, im Gegensatz dazu kann der ICE 3 bis zu 330 km/h schnell fahren.

1.2.2. Exkurs: Lösungen anderer Länder

Die deutsche Diversifikation führt eindeutig zu Schwierigkeiten. Dies lässt sich leicht an den zwei Nationen erklären, die jeweils als Klassenprimi beim Bahnverkehr zu nennen sind, Japan und die Schweiz. Beide Länder werden oft als mustergültige Beispiele eines funktionierenden Systems beim Bahnbetrieb angeführt. Die beiden Lösungsansätze funktionieren ausgesprochen gut und sind gleichzeitig von Grund auf verschieden:

- Japan

In Japan werden die unterschiedlichen Zugtypen strikt voneinander getrennt. Der berühmte Höchstgeschwindigkeitszug „Shinkansen“ hat ein völlig eigenständiges Schienennetz, er fährt auf eigenes für ihn entwickelten und gebauten Strecken. Die Strecken weisen besondere Kurvenradien auf, dürfen nach gesetzlichen Vorgaben nur bestimmte Neigungen haben und sind extra gegen Einflüsse durch Erdbeben gesichert. So wird der Shinkansen unter (möglichst) optimalen Bedingungen betrieben.

Um diese Strecken zu erhalten werden in Japan zudem besondere Maßnahmen unternommen. Alle Shinkansen-Züge sind mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet, die den Zustand der Bahngleise pausenlos messen und speichern, sodass Instandhaltungsbedarf frühzeitig erkannt und proaktiv repariert werden kann. Durch die proaktive Instandsetzung, die nur nachts stattfindet, während die Züge nicht betrieben werden, ist der Bahnverkehr äußerst betriebsstabil und wird damit zum Vorzeigemodell. Die unglaubliche logistische Leistung, die hinter dem Shinkansen-Zugverkehr steht, ermöglicht es der aktuellen Generation von Zügen Höchstgeschwindigkeiten von durchschnittlich 320 km/h zu erreichen¹⁵.

Insgesamt gilt der gesamte japanische Zugverkehr als der pünktlichste der Welt. Verspätungen werden lediglich in Sekunden gemessen. Dies führte dazu, dass sich eines der Eisenbahnverkehrsunternehmen entschuldigen musste, weil einer der Züge zu früh abfuhr¹⁶ – ein für Deutschland unvorstellbarer Vorfall.

Dieses hohe Niveau an Effizienz und Genauigkeit hat jedoch auch seinen Preis, denn eine Kleinigkeit kann enorme Auswirkungen haben. Dies zeigte sich am 30. Mai 2019. An diesem Tag wies der japanische Zugverkehr mehr als die durchschnittliche Verspätung von nur 54 Sekunden auf, skurril war der Schuldige, es handelte sich um eine Nacktschnecke. Diese nur knapp 3 cm große Nacktschnecke sorgte für einen Stromausfall, indem sie einen Kurzschluss in einer elektrischen Anlage auslöste und so einen beachtlichen Teil des Zugverkehrs lahmlegte¹⁷. Die exakte Berechnung und sekundengenaue Planung der Fahrzeiten im Zusammenhang mit der Abstimmung der Züge untereinander wurde somit zum Verhängnis für das System.

¹⁵ <https://www.jrailpass.com/de/shinkansen-zuege> (Stand: 01.02.2020).

¹⁶ <https://orange.handelsblatt.com/artikel/52264> (Stand: 01.02.2020).

¹⁷ <https://www.stern.de/panorama/weltgeschehen/japan--nacktschnecke-sorgt-fuer-aussergewoehnliches-bahn-chaos-8767200.html> (Stand: 10.02.2020).

An diesem Beispiel sieht man, dass die japanische Lösung zwar in der Regel unter normalen Umständen das Spannungsfeld zwischen Betriebsstabilität und Kundenwunsch aufzulösen vermag, aber dass diese Lösung wenig resistent gegen Störungen sein kann.

- Schweiz

Der Ansatz unseres Nachbarlandes ist ein völlig anderer, jedoch auch dieser liefert im internationalen Vergleich herausragende Ergebnisse. Die Schweizer betreiben kein Hochgeschwindigkeitsschiennetz, nur wenige der vielen Strecken des Schweizer Schienennetzes erlauben Höchstgeschwindigkeiten von 200 km/h. Dieses vermeintliche Manko ist jedoch keines. Da die Schweiz mit einer Fläche von 41 285 km²¹⁸ nur ungefähr eine Größe zwischen Niedersachsen (47 710 km²¹⁹) und Baden-Württemberg (35 751 km²²⁰) aufweist, sind Höchstgeschwindigkeitszüge letztlich nicht notwendig.

Die verhältnismäßig geringe flächenmäßige Ausdehnung der Schweiz in Kombination mit der Anbindung nahezu jeder Ortschaft ermöglicht es überhaupt nicht, hohe Geschwindigkeiten zu erreichen und dennoch wird eine sehr schnelle Reise ermöglicht. Die Schweiz unternimmt mehrere Maßnahmen um die Bahnreise für die Passagiere trotz geringerer Durchschnittsgeschwindigkeiten effizient und schnell zu gestalten. Es gibt einen sehr hohen Anteil an zweigleisigen Strecken, d. h. die Züge können – wie bei der U- oder S-Bahn – in der jeweiligen Richtung unabhängig vom entgegenkommenden Zug betrieben werden. Zudem ist die Signaltechnik zur Zugüberwachung sowie -steuerung sehr hoch entwickelt und es werden aufwendige Bauten in Kauf genommen, um im bergigen Land den Zugverkehr zu ermöglichen.

Die Vorteile der Zweigleisigkeit bzw. die Probleme von eingleisigen Zugstrecken werden in [Kapitel 1.4.](#) aufgezeigt und auf die Vorteile guter Signaltechnik wird in [Kapitel 2.2.](#) näher eingegangen.

Keiner der Lösungsansätze ist in Deutschland zeitnah bzw. überhaupt umsetzbar.

Die Trennung der Schienen für die einzelnen Zugtypen – wie in Japan – wäre grundsätzlich eine Möglichkeit, jedoch erfordert dies enorm hohe Investitionen und ein Maximum an Planung. Problematisch hierbei ist darüber hinaus, dass der Zugverkehr in Japan ein höheres Ansehen hat und die Bevölkerung daher eher gewillt ist, Beeinträchtigungen hinzunehmen. Die Akzeptanz in der deutschen Bevölkerung – gerade der ländlichen – ist teilweise sehr gering, es werden Interessenverbände gegründet, die den Neubau von bestimmten Trassen zu verhindern versuchen. Dies ist natürlich nicht gänzlich unverständlich, da eine neue Bahntrasse deutliche Einschränkungen nach sich ziehen kann, wenn sie z. B. eine zusammenhängende landwirtschaftliche Fläche durchschneidet oder bei ihrem Bau und darüber hinaus große Einschränkungen im täglichen Autoverkehr nach sich zieht. Solche Einschränkungen müssen aber in Kauf genommen werden. Ohne Einschränkungen ist es letztlich nicht möglich, alle „Ecken“ Deutschlands an das Schienennetz anzuschließen und ohne Anschluss an das Schienennetz kann sich die Meinung der Bevölkerung zur Bahn auch nicht ändern. Opportunes Handeln in Bezug auf Interessen der Bevölkerung scheint aus diesem Grund nicht immer zielführend zu sein. Es wird teilweise gefordert sein, gegen Widerstände zu agieren bzw. diese im Ausnahmefall zu ignorieren.

¹⁸ <https://de.wikipedia.org/wiki/Schweiz> (Stand: 01.02.2020).

¹⁹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Niedersachsen> (Stand: 01.02.2020).

²⁰ <https://de.wikipedia.org/wiki/Baden-W%C3%BCrttemberg> (Stand: 01.02.2020)

Der Lösungsansatz der Schweiz ist allgemein in Deutschland nicht umsetzbar. Wie bereits beschrieben, weist die Schweiz lediglich die Größe eines unserer Bundesländer auf. Das Umstellen auf lediglich Regionalbahnen würde die Wettbewerbsfähigkeit der Bahn nicht im Geringsten steigern, im Gegenteil, sie würde stark sinken. Die drei längsten Zugstrecken Deutschlands sind alle deutlich über 1 000 km lang (Offenburg-Stuttgart-Mainz-Köln-Hamburg-Stralsund-Greifswald 1 300 km; Kiel-Hamburg-Köln-Frankfurt-Nürnberg-Passau 1 225 km; Leipzig-Hannover-Dortmund-Köln-Mainz-Stuttgart-Ulm-Oberstdorf 1 080 km)²¹. Eine Zugfahrt ohne Halten mit 200 km/h auf diesen dauert über 5 Stunden, dies wäre dem Kunden gegenüber nicht vermittelbar. Der generelle Ausbau auf zweigleisige Strecken hätte einen großen Vorteil gegenüber eingleisigen Strecken (siehe [Kapitel 1.4.](#)), jedoch stößt er auf dieselben Probleme wie ein separates Hochgeschwindigkeitsschiennetz, es erfordert maximale Planungen und Investitionen.

1.2.3. Unterschied zwischen Personen- und Güterverkehr

Bei der Beachtung der Fahrzeiten besteht ein weiteres Problem darin, dass die zwei Gattungen von Bahnen – der Schienenpersonen- und der Schienengüterverkehr – völlig unterschiedliche Zielsetzungen besitzen.

- Personenverkehr

Beim Schienenpersonenverkehr ist ein ständiges Bereithalten von Kapazitäten unabhängig von dem tatsächlichen Bedarf notwendig, d. h. es ist teilweise geboten, dass Züge nicht voll besetzt sind und „Luft durch die Gegend gefahren wird“. Der Schienenpersonenverkehr beachtet somit keine oder nur geringe auftretende Schwankungen im Passagieraufkommen, z. B. in Bezug auf Berufs- bzw. Wochenendverkehr. Es ist Pflicht, dass der Zug im Rahmen des Fahrplanes immer fährt und an jeder Haltestelle stoppt. Zudem geht es dem Kunden darum, möglichst schnell zwischen seinem Start- und Zielort zu reisen.

Der Schienenpersonenverkehr ist somit durch ständiges Halten und maximale Beförderungsgeschwindigkeiten geprägt. Er ist auf Effektivität ausgelegt, da die Beförderungskapazitäten nicht immer ideal ausgenutzt werden.

- Güterverkehr

Der Schienengüterverkehr ist hingegen von Effizienz geprägt. Mit der Bahn soll eine maximale Menge an Gütern mit möglichst wenigen Halten in exakt der richtigen Zeit befördert werden. Dazu müssen keine Kapazitäten unabhängig vom Bedarf an Beförderungsgut bereitgehalten werden, der Schienengüterverkehr muss so ideal wie möglich auf den tatsächlichen Bedarf abgestimmt sein. Dies ist langfristig nicht planbar, da es große Schwankungen im Güteraufkommen gibt. Eine möglichst schnelle Beförderung ist im Falle der meisten Güter nicht notwendig, da z. B. Autos nicht maximal schnell zum weltweiten Verschiffen aus den Fabriken in Süddeutschland an einen Norddeutschen Hafen gebracht werden müssen.

Ein Planen des Schienenpersonenverkehrs ist insgesamt langfristiger möglich und nötig. Der Schienengüterverkehr ist im Vergleich schwer zu planen und m. E. nicht so notwendig, wie sich am CO₂-Ausstoß der *Abbildung 1* zeigt, da der Straßengüterverkehr lediglich für ca. ein Viertel (27,4 % = 72 % * (11,9 % + 26,2 %)) davon verantwortlich ist.

²¹ <https://inside.bahn.de/laengste-zugstrecken-deutschlands/> (Stand: 02.02.2020).

Im Gegensatz dazu legt das Zukunftsbündnis Schiene und auch die Bundesregierung ein besonderes Augenmerk auf den Schienengüterverkehr, wie in [Kapitel 1.1.2.](#) durchklang. Diese starke Gewichtung erscheint aus den o. g Gründen als wenig praktikabel.

Warum die starke Gewichtung des Schienengüterverkehrs auch falsch erscheint, kann man zudem mathematisch mit der Betrachtung des tatsächlichen CO₂-Ausstoßes aufzeigen (die Zahlen basieren auf Daten des Umweltbundesamtes²²):

CO₂-Ausstoß Pkw-Verkehr in Deutschland 2018:

$$147 \frac{g_{CO_2}}{\text{Personen} * km} * 642\,400\,000\,000 km * 1,5 \text{ Personen (im } \emptyset) = 141\,649\,200\,000\,000 g_{CO_2}$$

CO₂-Ausstoß Lkw-Verkehr in Deutschland 2018:

$$112 \frac{g_{CO_2}}{t * km} * 90\,800\,000\,000 km = 10\,169\,600\,000\,000 \frac{g_{CO_2}}{t}$$

In Abhängigkeit der Menge an befördertem Gut ergibt sich folgende Betrachtung. Unter der Annahme, dass ein 40 t-Lkw bis zu 30 t Gut befördern kann (aufgrund des Eigengewichtes von bis zu 13 t), ist der Graph begrenzt:

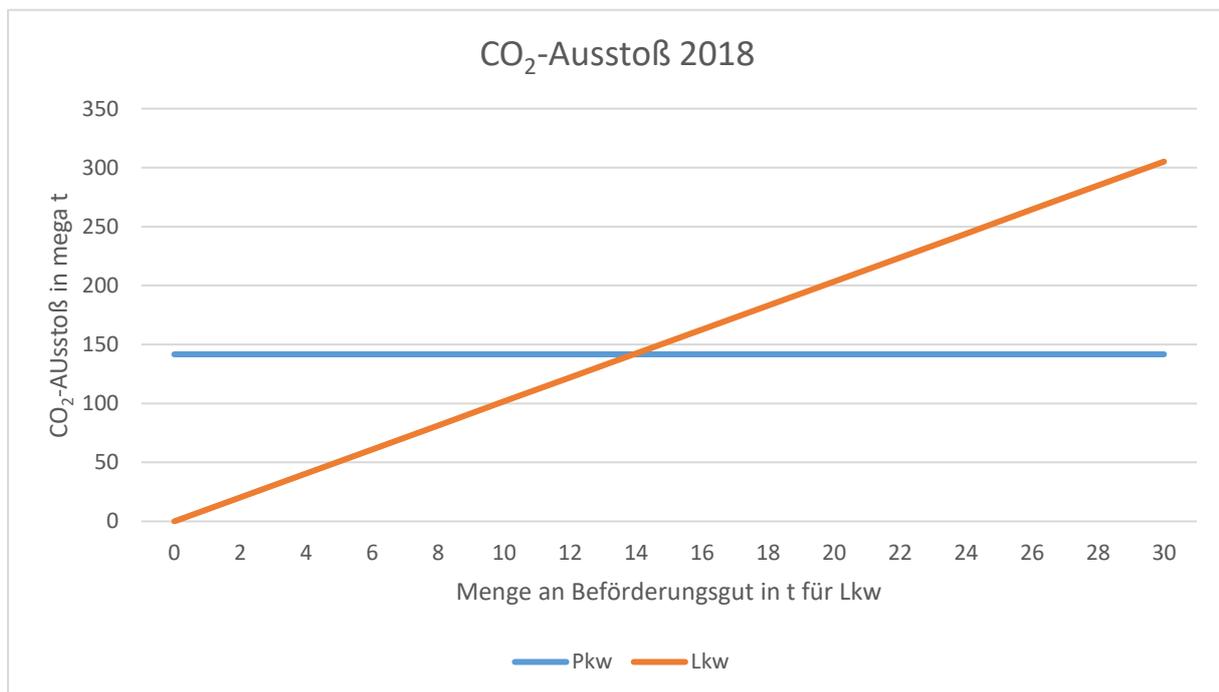


Abbildung 5 – CO₂-Ausstoß des Pkw- sowie des Lkw-Verkehrs in Abhängigkeit der Menge an befördertem Gut in Tonnen

Um den CO₂-Ausstoß des gesamten Pkw-Verkehrsaufkommens ins Verhältnis zu setzen: Das größte jemals gebaute Passagierschiff – die Symphony of the Seas – weist eine Verdrängung von 100 000 t

²² <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#fahrleistung-im-personen-und-guterverkehr> (Stand: 08.02.2020).

Wasser auf²³, d. h. alle – nur in Deutschland fahrenden – Pkw stoßen jährlich circa 1 400 Mal das Gewicht des größten Kreuzfahrtschiffes der Welt aus.

Der Punkt bei dem der gesamte Straßengüterverkehr und der gesamte Straßenpersonenverkehr eines Jahres den identischen Ausstoß von CO₂ aufweisen, ist erreicht, wenn jeder Lkw auf jedem Kilometer jeder Fahrt im Schnitt 14 t Waren befördert. In Anbetracht von Leerfahrten, leichtem aber voluminösem Beförderungsgut, nicht optimaler Ausnutzung der Ladekapazität von jedem Lkw und der nicht effizienten Planung des gesamten Straßengüterverkehrs sind diese 14 t im Durchschnitt nicht zu erreichen. Dies zeigt sich auch eindeutig an *Abbildung 1*.

Aus diesem Grund ist zwar auch ein Augenmerk auf die Integration des Güterverkehrs in den Fahrplan zu legen, aber die „Priorität Nummer 1“ muss es sein, den Personenverkehr auf die Schiene zu verlagern. Einerseits aufgrund der Tatsache, dass jedes Auto im Schnitt mit lediglich 1,5 Personen besetzt ist und Autos immer größer und schwerer werden, sodass umweltfreundliche Entwicklungen beim Auto konterkariert werden und andererseits, weil der Güterverkehr wahrscheinlich noch Verbesserungspotentiale bietet, die auch auf der Straße von großem Nutzen sein können. Es könnten bspw. die Leerfahrten reduziert werden oder Vorgaben für intelligentere Auftragsvergaben eingeführt werden, ähnlich dem Konzept von Sammeltaxen.

1.3. Normung der Standzeiten

Im Rahmen der Standzeiten muss über verschiedene Ansätze nachgedacht werden. Die Standzeit ließe sich minimieren oder maximieren. Das Minimieren hätte den Vorteil, dass sich die Reisezeiten reduzieren, gleichzeitig entstünde der Nachteil, dass es den Passagieren erschwert werden würde, ihre Anschlusszüge zu erreichen. Das Maximieren würde exakt das Gegenläufige verursachen, das Umsteigen würde sicherer ermöglicht werden, aber Reisezeiten würden sich verlängern.

Die Festlegung der Standzeiten von Zügen in Bahnhöfen ist jedoch nicht beliebig wählbar, es gibt gewisse Mindest- und Maximalhaltezeiten, die aufgrund unterschiedlichen Vorgaben entstehen. Diese Vorgaben resultieren aus der Bauart des Zuges, den Bahnhöfen und dem Schienennetz, zudem gibt es Vorgaben durch die Schienennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG.

Die Richtlinie 402.0202 der DB Netz AG legt in Abschnitt 2 Absatz 3 folgende Mindesthaltezeiten fest:

- 0,5 Minuten bei Zügen des Nahverkehrs
- 0,7 Minuten bei Zügen des Nahverkehrs, wenn die technischen Bedingungen des Fahrzeugs (z. B. ausfahrbare Trittstufen) eine längere Haltezeit erfordern
- 2,0 Minuten bei veröffentlichten Kundenhalten von Zügen des Schienenpersonenfernverkehrs, Wechsel der Zugnummer, Übergang von Stammfahrplan auf Flügelfahrplan²⁴ und umgekehrt oder auf/von Doppelfahrpläne(n), Wirbelstrombremse sperren/entsperren
- 3,0 Minuten bei Flügeln/Schwächen (Zeit von Ankunft des Zugverbandes bis Abfahrt des Zugteils 1), gilt nur für Triebzüge/Triebwagen mit automatischer Kupplung; darüber hinaus sind die örtlichen Besonderheiten zu beachten

²³ https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_gr%C3%B6%C3%9Ften_Schiffe_der_Welt.

²⁴ Ein Flügelfahrplan hängt mit einer Zugteilung zusammen, mittels der Zugteilung - einer sogenannten Flügellung - soll das Erreichen von zwei verschiedenen Endbahnhöfen erreicht werden bzw. es ist das Wiedervereinigen von zwei Zügen von unterschiedlichen Startbahnhöfen gemeint.

- 5,0 Minuten bei Vereinigen/Stärken (Zeit von Ankunft des letzten Zugteils am Zwischen-signal/Zugdeckungssignal bis Abfahrt Zugverband), gilt nur für Triebzüge/Triebwagen mit automatischer Kupplung; darüber hinaus sind die örtlichen Besonderheiten zu beachten
- 8,0 Minuten bei Vereinigen konventioneller Züge mit wirksamer Magnetschienenbremse
- Beim Wenden am Jugendbahnhof für Triebwagen, Triebzüge und Wendezüge; für ETCS-geführte Züge ist eine weitere Zusatzminute anzusetzen.
- Bei Fahrtrichtungswechsel innerhalb eines Zuglaufes kann in Abhängigkeit von der Zuglänge ein zweiter Triebfahrzeugführer gefordert werden, andernfalls ist eine höhere Wendezeit anzumelden.

Zusätzlich zu diesen Richtlinien-Vorgaben ist es im integralen Taktfahrplan das Ziel, dass alle Züge in Knotenbahnhöfen gleichzeitig einfahren und gemeinsam mehrere Minuten halten, um den Passagieren das Umsteigen zu ermöglichen. Hierbei würde diese Zeit durch die Orientierung und das damit verbundene Vorankommen am Bahnhof sowie die Gesamtzahl aller Passagiere beeinflusst werden. Diese Fahrgastströme wirken sich auf die Umsteigewegezeiten am Bahnhof aus, dabei geht es auch, um die baulichen Gegebenheiten am Bahnhof. Je nach Bahnhof können die Entfernungen zwischen den einzelnen Bahnsteigen und Gleisen größer oder kleiner sein. Selbst bei einer optimalen Orientierung am Bahnhof könnte die Haltezeit relativ lang werden müssen, einfach weil der Bahnhof – wie z. B. der Berliner Hbf – riesige Ausmaße aufweist, sodass die Wege weit sind.

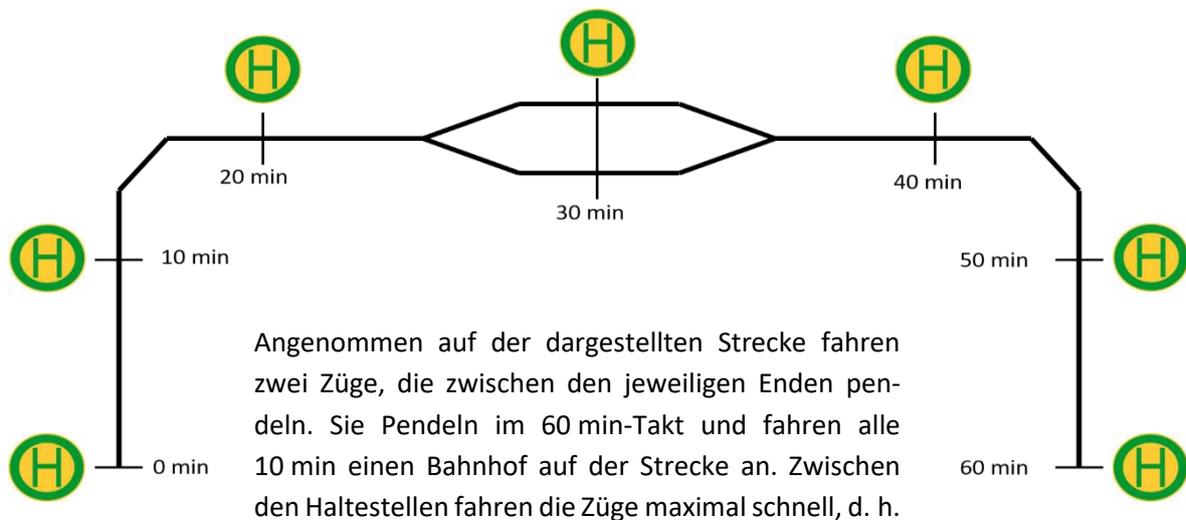
Darüber hinaus bestehen Vorgaben und natürliche Gegebenheiten für Wendezeiten von Zügen, diese sind an erster Stelle abhängig von der Länge des Zuges, da nicht jeder Zug an beiden Enden mit einem Zugführer fährt, sondern der Zugführer – mindestens bei Kopfbahnhöfen – den Triebwagen wechseln muss.

1.4. Streckenausbau

Die Probleme des Streckenausbaus sind vielschichtig. Es gibt Strecken, auf denen die Züge nicht maximal schnell fahren dürfen oder können. Wenn eine Bahnstrecke Bahnübergänge aufweist, darf ein ICE auf dieser Strecke nicht seine Höchstgeschwindigkeit fahren. Auf anderen Strecken kann ein ICE trotz fehlender Bahnübergänge dennoch nicht seine Höchstgeschwindigkeit fahren, da die Kurvenradien und/oder die Kurvenneigung nicht ausreichend sind. Weitere Restriktionen ergeben sich aufgrund von Brücken und Tunnel oder weil die Bahnstrecken nur eingleisig sind, d. h. für beide Richtungen dasselbe Gleis genutzt werden muss. Aus der Eingleisigkeit ergeben sich Schwierigkeiten bezüglich der Mindestkreuzungs- und Mindestzugfolgezeiten²⁵ sowie weitere Probleme, wenn zu wenige Begegnungspunkte vorhanden sind. Das Problem der Eingleisigkeit mit verhältnismäßig zu wenigen Begegnungspunkten lässt sich am besten an einem Beispiel erklären:

²⁵ Die Mindestkreuzungszeit bezeichnet den geringsten zulässigen Zeitabstand zwischen zwei Zügen in unterschiedlicher Richtung auf einer eingleisigen Strecke und die Mindestzugfolgezeit bezeichnet den geringsten Zeitabstand zwischen dem Beginn der Sperrzeiten zweier Züge der gleichen Richtung auf einem Überholabschnitt auf einer grundsätzlich eingleisigen Strecke, sie hängt maßgeblich von den Belegungszeiten und der Länge des Überholungsabschnittes ab.

Abbildung 6 – schematische Darstellung einer eingleisigen Bahntrasse mit einem Begegnungspunkt



es besteht keine Möglichkeit zum Aufholen von Verspätungen. Auf der Hälfte der Strecke befindet sich ein sog. Begegnungspunkt, bei dem idealerweise beide Züge simultan einfahren und sich treffen. Idealerweise ist in diesem Zusammenhang das entscheidende Wort. Denn wenn nur einer der beiden Züge eine (geringe) Verspätung aufbaut, muss der andere Zug am Begegnungspunkt warten, bis der verspätete Zug eintrifft. Mit einer angenommenen Verspätung eines Zuges von lediglich 10 min vor dem Begegnungspunkt baut auch der andere Zug eine Verspätung von 10 min auf, sodass in der Folge beide Züge 10 min verspätet sind. Diese Verspätung kann erst wieder abgebaut werden, wenn der Fahrplan einen Betriebsschluss vorsieht.

Ein weiteres Problem an der Eingleisigkeit mit zu wenigen Begegnungspunkten lässt sich mit Hilfe des Beispiels ebenfalls erkennen. Aufgrund der Beschaffenheit der Strecke mit nur einem Begegnungspunkt ist lediglich ein stündlicher Takt möglich. Ein halbstündiger Takt ist unmöglich, da dazu zwei weitere Begegnungspunkte (auf exakt der Hälfte der Strecke zwischen dem vorhandenen und den Endhaltestellen) benötigt werden würden.

Der Gegenentwurf zu dem Prinzip eingleisiger Strecken mit Begegnungspunkten wird im öffentlichen Personennahverkehr und in der Schweiz genutzt, siehe [Kapitel 1.2.2](#). Alle Strecken sind zweigleisig, sodass die minimale Taktzeit theoretisch nur durch den mindestens einzuhaltenden Abstand zwischen zwei Zügen vorgegeben wird.

Im Rahmen des Streckenausbaus zeigt sich aktuell auch ein strukturelles Problem, das ebenfalls von der Initiative Deutschland-Takt bemängelt wird. Die Reihenfolge der Planung sollte laut Initiative Deutschland-Takt sein „erst der Fahrplan, dann der Bauplan“²⁶. Aktuell werden kostspielige Prestigeobjekte beim Infrastrukturausbau eher durchgeführt als kleine aber wichtige – eventuell wenig öffentlichkeitswirksame – Projekte. Die Umsetzung eines integralen Taktfahrplanes wird dabei nicht im Auge behalten.

Es sollte nicht eine Strecke gebaut und dann der Fahrplan berechnet werden. Mit der Forderung der Initiative Deutschland-Takt wird diese Logik umgekehrt. Die Baumaßnahmen werden auf den möglichen Fahrplan abgestimmt, sodass der Fahrplan möglichst schnell umgesetzt bzw. stetig verbessert werden kann.

²⁶ Deutschlandtakt Faltblatt https://www.vcd.org/fileadmin/user_upload/Redaktion/Themen/Bahn/Deutschland-Takt/Deutschland-Takt - Immer_gut_verbunden_FlyerVCD.pdf (Stand: 01.02.2020).

1.5. Anwendung des PESP

1.5.1. Darstellung der Funktionsweise an stark vereinfachten Beispielen

An zwei Beispielen soll exemplarisch dargestellt werden, wie das PESP funktioniert und welche Schritte zu Anfang zu unternehmen sind, um das aufgeworfene Problem zu lösen.

Eines der Beispiele ist ein einzelner Pendelzug, welcher zwischen zwei Bahnhöfen hin- und zurückfährt und dabei unterwegs einen Zwischenhalt einlegt.

Im zweiten Beispiel wird das Problem anhand von zwei Pendelzügen untersucht, die zwischen lediglich zwei Bahnhöfen hin- und herfahren. Die Bahnhöfe sind mit einer eingleisigen Strecke verbunden, sodass immer nur ein Zug unterwegs sein kann.

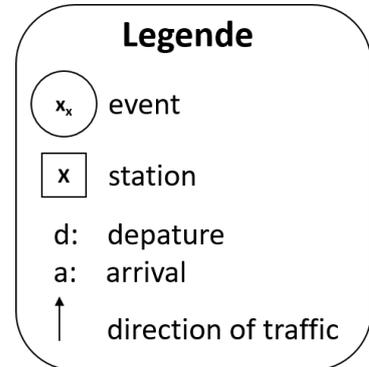


Abbildung 7 – Legende zum PESP

Für die folgenden beiden Beispiele gilt die Legende in *Abbildung 7*.

- Beispiel 1: Pendelzug mit drei Bahnhöfen:



Abbildung 8 – schematische Darstellung einer Bahnstrecke mit drei Bahnhöfen

A und C sind in diesem Beispiel die beiden Endbahnhöfe und B ist der Zwischenhalt. Wird dieses Beispiel entsprechend der Vorgaben des PESP in Ereignisse zerlegt, ergeben sich acht einzelne Ereignisse, jede An-

kunft und jede Abfahrt stellt ein Ereignis dar. Es ergibt sich daraufhin das Schema in *Abbildung 9*, welches vereinfacht als kreisförmige Skizze dargestellt werden kann. Aufgrund der kreisförmigen Anordnung lässt sich ablesen, dass in diesem Beispiel Vorgaben durch Wendezeiten (a_A-d_A und a_C-d_C), Fahrzeiten (z. B. d_A-a_B) und Standzeiten (z. B. a_B-d_B) bestehen.

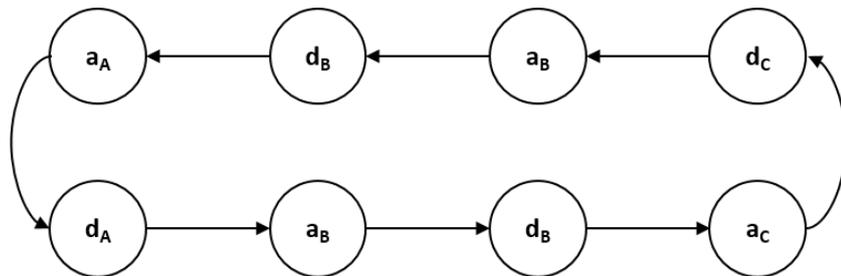


Abbildung 9 – Zerlegung der Bahnstrecke entsprechend des PESP

- Beispiel 2: Zwei Pendelzüge mit zwei Bahnhöfen:

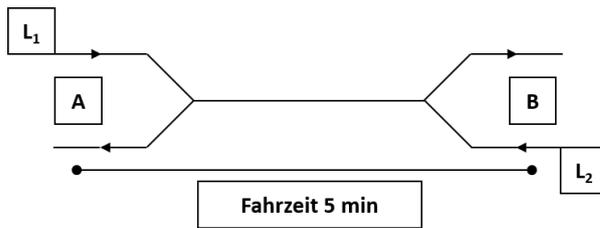


Abbildung 9 – schematische Darstellung einer Bahnstrecke mit zwei Bahnhöfen und zwei Linien

In diesem Beispiel gibt es zwei Zuglinien (L_1 und L_2), die für die Strecke zwischen den Bahnhöfen A und B jeweils 5 min Fahrzeit benötigen. In diesem Fall wird dieselbe Zerlegung der einzelnen Züge wie im ersten Beispiel durchgeführt. Aufgrund der zwei Ankünfte und zwei Abfahrten jedes Zuges entstehen für jeden Zug vier Ereignisse. In Summe ergeben sich somit ebenfalls acht Ereignisse, die in diesem Fall sogar miteinander interferieren, da beide Züge dasselbe Gleis befahren. Es tritt die Problematik der Mindestkreuzungszeiten auf, weil die jeweils andere Linie erst nach einer bestimmten Zeit anfahren kann, nachdem der andere Zug im Bahnhof angekommen ist. Zudem stellt jede Standzeit auch eine Wendezeit dar, da es nur Endbahnhöfe gibt. Die Wendezeit wird dabei maßgeblich durch die andere Linie bestimmt, da sie mindestens 5 min betragen muss zusätzlich der Vorgabe der Mindestkreuzungszeit.

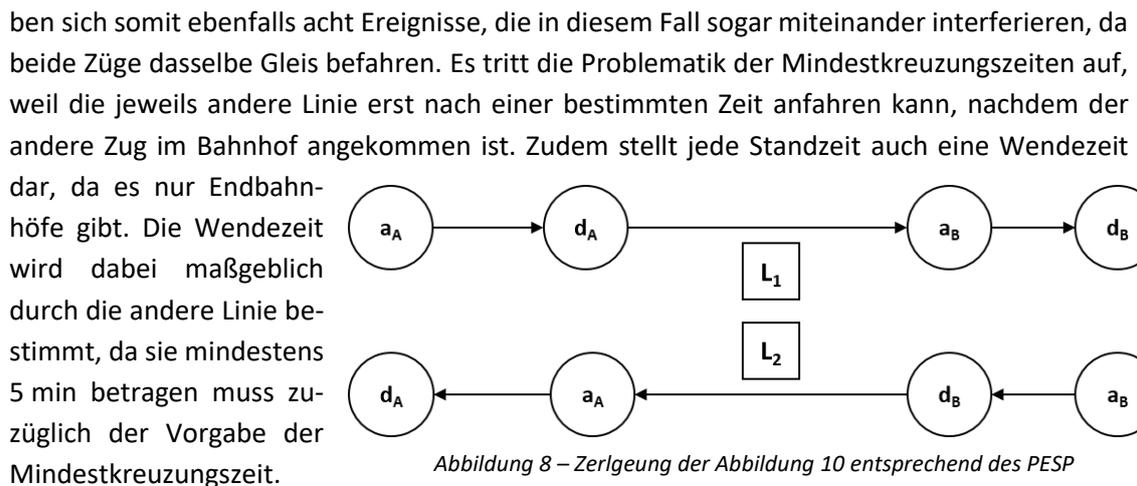


Abbildung 8 – Zerlegung der Abbildung 10 entsprechend des PESP

In beiden Beispielen ist sehr schnell zu erkennen, welche hohe Komplexität im Rahmen der Berechnung eines Fahrplanes für ganz Deutschland entsteht und diese Beispiele sind sehr stark vereinfacht.

Um die tatsächlichen Ausmaße zu begreifen, muss beachtet werden, dass allein die Deutsche Bahn im Jahr 2018 deutschlandweit 24 068 Züge pro Tag betrieb, d. h. ca. 8,78 Mio. Züge pro Jahr. Hinzukommen die Züge der übrigen ca. 400 Eisenbahnverkehrsunternehmen und 2 873 Güterzüge pro Tag (ca. 1,05 Mio. Züge pro Jahr)²⁷. Diese Züge fahren insgesamt 5 663 Personenbahnhöfe²⁸ an und das in den meisten Fällen mehrmals am Tag und jeder Bahnhof stellt für jeden Zug immer zwei Ereignisse dar wegen der Zerlegung des Bahnhofes in ein Ankunfts- und ein Abfahrtsereignis.

Im Rahmen der Anwendung des PESP wird jede Zugverbindung des Fahrplanes in einzelne Ereignisse aufgeteilt und aus den Ereignissen des Gesamtproblems wird in der Folge eine Vielzahl von Ungleichungen erstellt. Diese Vielzahl von Ungleichungen muss dann mittels eines leistungsfähigen Solvers gelöst werden.

Die Ungleichungen werden in der Form bestimmt, dass die minimale Fahrtzeit zwischen zwei Ereignissen (Abfahrt und Ankunft) vorgegeben wird, diese wird durch die faktischen Gegebenheiten festgelegt, z. B. maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der Strecke oder des Zuges. Diese minimale Fahrt-

²⁷ Deutsche Bahn – Daten & Fakten 2018 https://www.deutschebahn.com/resource/blob/3992278/1d136e983334750ef4f24072d49c7cdf/20190325_bpk_2019_daten_fakten-data.pdf (Stand: 01.02.2020).

²⁸ Anzahl der Personenbahnhöfe laut statista <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13357/umfrage/anzahl-der-bahnhoefe-im-besitz-der-db-ag/> (Stand: 01.02.2020).

zeit muss kleiner oder gleich der Zeit sein, die zwischen dem Ereignis „Ankunft im Bahnhof“ und „Abfahrt im vorherigen Bahnhof“ liegt. Zudem gibt es eine maximale Fahrzeit, welche ebenfalls extern vorgegeben werden kann, aufgrund von anderen Zügen, die auf der Strecke unterwegs sind o. ä. Diese maximale Fahrzeit muss größer oder gleich der Zeit zwischen den eben genannten Ereignissen sein. Eine auf diese Art aufgestellte Ungleichung ergäbe sich in *Beispiel 1*, wie folgt:

$$\text{minimale Fahrzeit}_{A-B} \leq a_B - d_A \leq \text{maximale Fahrzeit}_{A-B}$$

In einem stündlichen Taktfahrplan ergibt es Sinn, die Abfahrts- (departures) und Ankunftszeiten (arrivals) nur in Minutenintervallen bis 60 anzugeben, da ein Zug stündlich eintreffen und abfahren soll. Aufgrund dieser Vorgabe ist die Ungleichung nicht immer lösbar, z. B. wenn die minimale Fahrzeit eines Zuges mehr als eine Stunde beträgt. Damit eine lösbare Ungleichung entsteht wird in den mittleren Term zusätzlich ein Summand eingefügt, welcher sich aus der Taktzeit multipliziert mit einem (ganzzahligen) Faktor ergibt:

$$\text{minimale Fahrzeit}_{A-B} \leq a_B - d_A + p_{\text{Anzahl der Takte}} * T_{\text{Taktzeit}} \leq \text{maximale Fahrzeit}_{A-B}$$

Diese Ungleichung ließe sich je nach Zielvorgabe auflösen, da – wie oben festgestellt – lediglich die minimale Fahrzeit vorgegeben ist und die übrigen Teile der Ungleichung mehr oder weniger beliebig festgelegt werden können oder Variablen darstellen, nach denen die Ungleichung aufgelöst wird.

Wird dieses Vorgehen auf den ganzen deutschen Fahrplan angewendet, ergibt sich die besagte Unmenge an Ungleichungen, welche simultan zu lösen sind bzw. so zu lösen sind, dass sie einander nicht ausschließen. Es entsteht ein lineares Optimierungsproblem, das mittels Mixed-Integer-Programming (kurz: MIP; zu Deutsch: gemischt-ganzzahlige Planung) gelöst werden kann. Um das System von Ungleichungen zu lösen gibt es grundlegend zwei Herangehensweisen, einmal ließe es sich heuristisch lösen und einmal exakt. Eine Möglichkeit zur exakten Bestimmung einer Lösung stellen die MIP-Solver „CPLEX“, „Gurobi“ und „SCIP“ dar, die das entstandene (Un)Gleichungssystem u. a. mittels des Simplex-Algorithmus lösen. Der leistungsfähigste PESP-Solver ist aktuell beim Zuse Institut Berlin implementiert²⁹.

1.5.2. Konkrete Anwendungsbeispiele

Herr Prof. Dr. Christian Liebchen von der Technischen Hochschule Wildau hat bereits mehrere Fahrpläne mathematisch optimiert, u. a. den des Berliner U-Bahn-Netzes, die Strecke Münster-Lünen sowie die Strecke Wolfsburg-Braunschweig-Hildesheim.

Diese Beispiele stellen mehr oder weniger komplexe Anwendungsbeispiele dar. Sie sind ohne Frage Erfolge und zeigen, dass das PESP funktioniert, aber sie sind nur kleinere Teilprobleme des gesamten Deutschen Fahrplanes.

²⁹ Mail von Herrn Prof. Dr. Christian Liebchen vom 19. November 2019.

Die Strecken Münster Lünen sowie Wolfsburg-Braunschweig-Hildesheim sind relativ kurze Strecken mit wenigen Bahnhöfen bzw. Umsteigemöglichkeiten zwischen unterschiedlichen Zügen.

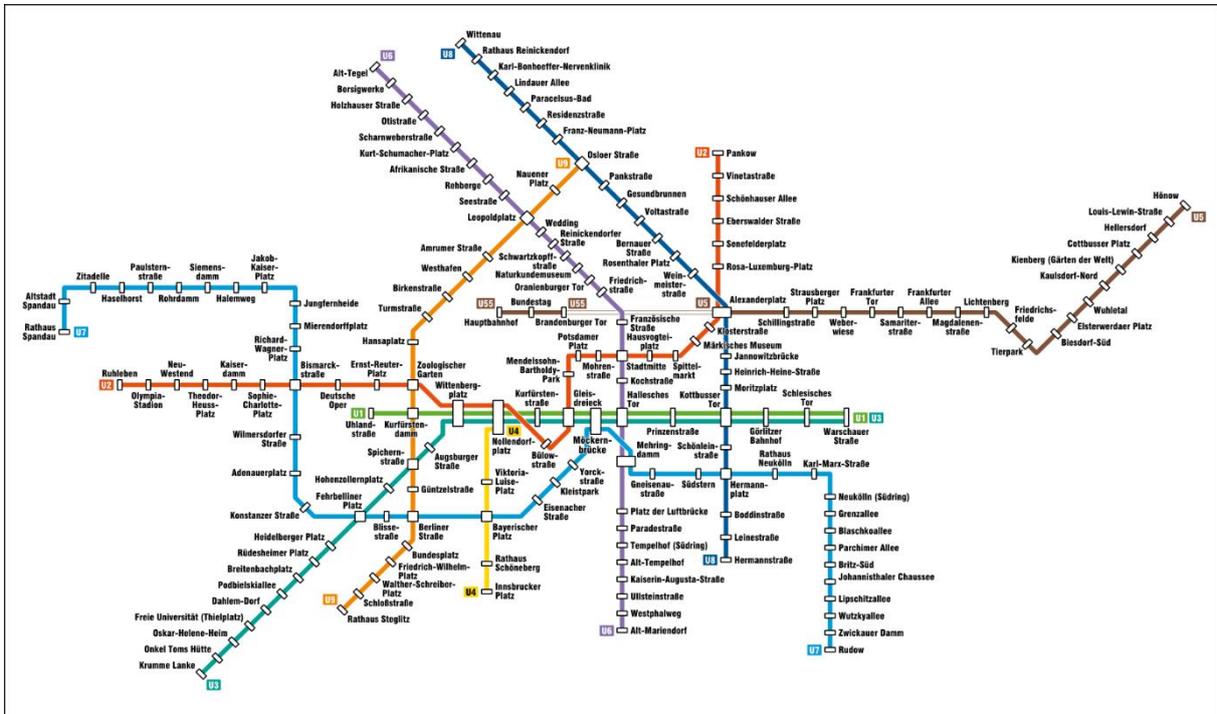


Abbildung 10 – Netzplan der U-Bahn Berlin

Das Berliner U-Bahn-Netz ist im Vergleich zu den o. g. Strecken deutlich komplexer, jedoch bietet es aufgrund seiner Beschaffenheit Vorteile, z. B. wegen der durchgängigen Zweigleisigkeit. Einander entgegenkommende Züge behindern sich nicht und Züge aus unterschiedlichen Richtungen nutzen eigene Gleise, d. h. Züge die in Nord-Süd-Richtung verkehren, fahren auf einem anderen Gleis als Züge die in Ost-West-Richtung verkehren. Zudem fahren die U-Bahnen mit vergleichsweise ähnlicher Geschwindigkeit und das Schienennetz ist von vornherein auf diese Geschwindigkeiten ausgelegt. Somit sind weniger Abhängigkeiten und Beeinflussungen untereinander zu beachten. Zudem erübrigt sich ein Abstimmen der Haltezeiten aufgrund der engen Taktung im öffentlichen Personennahverkehr.

2. Voraussetzungen

2.1. Allgemeine Voraussetzungen

Die reine Berechnung eines mathematisch optimierten Fahrplanes ist die eine Sache, die Umsetzung – des mittels der Anwendung der im vorangegangenen [Kapitel 1.5.1.](#) dargestellten Methode – desselbigen ist die andere. Zur Umsetzung müssen die folgenden Voraussetzungen gegeben sein:

- Die Züge müssen gut gewartet sein, damit sie zuverlässig sind und selten bis (idealerweise) nie ausfallen. Zudem müssen ausreichend Züge vorhanden sein, um das ausgegebene Ziel der Fahrgastverdoppelung auf 300 Mio. Beförderungen pro Jahr umzusetzen.

Die Nicht-Anschaffung der neuen IC 2-Züge³⁰ ist dabei ein wichtiger Schritt und das richtige Signal seitens der Deutschen Bahn, da unzuverlässige Züge der Absicht der Deutschen Bahn nach mehr Pünktlichkeit abträglich wären.

- Wenn eine hohe Menge an Zügen unterwegs ist, muss das Schienennetz auf dieses Zugaufkommen ausgelegt sein, sodass dies nicht kollabiert. Das Schienennetz muss auch konsequent weiter ausgebaut werden, damit ausreichend Reserven vorhanden sind, um Engpässe überbrücken zu können und das Schienennetz auch für die Zukunft zu wappnen.
- Neben dem Schienennetz braucht es leistungsfähige Bahnhöfe. Welche theoretischen Möglichkeiten durch einen „intelligenten“ Bahnhof bestehen, kann man am Projekt Stuttgart 21 sehen. Durch den Umbau des aktuellen Stuttgarter Hauptbahnhofes von einem Sack- oder Kopfbahnhof in einen Durchgangsbahnhof wird die Kapazität des Bahnhofs voraussichtlich trotz geringer Gleisanzahl gesteigert werden, außerdem soll der neue Bahnhof dabei helfen, Zugverspätungen abzubauen.
- Um dem gesteigerten Zugaufkommen Herr zu werden, wird eine Technik benötigt, die es ermöglicht, die Züge zu überwachen, zu steuern und zu kontrollieren bis hin zum völligen Abstoppen. Eine solche Signaltechnik wird aktuell auf Ebene der Europäischen Union eingeführt und weiterentwickelt, zum Teil ist sie bereits im Einsatz. Es handelt sich um das European Train Control Systems (kurz: ETCS), um das es im nächsten [Kapitel 2.2.](#) explizit gehen soll.

2.2. European Train Control System

Wie bereits dargestellt, bedarf es für die Umsetzung des mathematisch optimierten und berechneten idealen Fahrplanes gewisser Voraussetzungen. Die Signaltechnik ist dabei von entscheidender Bedeutung, da sie bei der Lenkung des Zugaufkommens unterstützt bzw. die Bewältigung des Zugaufkommens erst ermöglicht.

Aktuell bestehen zwei unterschiedliche Klassen von Zugbeeinflussungssystemen, sogenannte Klasse-A- und Klasse-B-Systeme. Klasse-B-Systeme sind dabei nationale Lösungen zur Zugbeeinflussung, die bereits vor Inkrafttreten der Richtlinie 2001/16/EG bestanden. Auf europäischer Ebene gibt es Bestrebungen/Richtlinien zur Einführung eines Klasse-A-Systems – das European Train Control System –, welches als einheitliches Zugbeeinflussungssystem für die Mitgliedstaaten der europäischen Union verpflichtend werden soll und teilweise schon ist. Das ETCS wird auch bereits außerhalb Europas genutzt, z. B. in Israel und Indien.

Das ETCS weist derzeit drei verschiedene Level auf, die unterschiedliche Möglichkeiten bieten. Auf lange Sicht soll das ETCS als Grundlage für vollautonom fahrende Züge dienen. Es besitzt jetzt bereits die Möglichkeit in den laufenden Betrieb steuernd einzugreifen, d. h. im Zweifelsfall sogar Züge durch manuellen Eingriff einer Leitstelle vollständig zum Anhalten zu bringen. Die Level untergliedern sich, wie folgt³¹:

³⁰ <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/artikel/bombardier-transportation-deutsche-bahn-nimmt-ic-2-zuege-nicht-ab-a-1304390.html> (Stand: 10.02.2020).

³¹ Textziffer 2.2.3. Anwendungsstufen - Amtsblatt der Europäischen Union I. 284/9.

- Level 1
Bei diesem Level erfolgt die Datenübertragung punktförmig, sodass keine kontinuierliche Überwachung des Zuges möglich ist. Der Zug wird dabei streckenseitig geortet. Zudem werden zusätzlich zu den im Führerstand angezeigten Fahrtinformationen Signale an der Strecke verwendet.
Aufgrund der lediglich punktförmigen Übertragungsmöglichkeiten ist dieses System nur für Geschwindigkeiten unterhalb von 160 km/h zugelassen, da keine Vollüberwachung des Zuges möglich ist. Level 1 ermöglicht es dem Zug vorgegebene Geschwindigkeitsprofile zu aktualisieren und diese aufzuwerten. Eine Aufwertung des Geschwindigkeitsprofils bedeutet, dass die gefahrene Geschwindigkeit für den weiteren Streckenverlauf erhöht und somit an freie Kapazitäten angepasst wird. Hierzu sind jedoch die punktförmigen Übertragungspunkte notwendig.
- Level 2
Im Gegensatz zu Level 1 wird bei Level 2 der Zug streckenseitig mittels linienförmiger Funkübertragung überwacht, sodass eine durchgängige Überwachung/Ortung möglich ist. Das System wird teilweise um punktförmige Datenübertragungen sowie Signale an der Strecke ergänzt.
Level 2 ermöglicht Geschwindigkeiten von oberhalb 160 km/h, zudem werden sämtliche relevanten Daten übertragen, sodass dynamische Geschwindigkeitsprofile berechnet werden können. Die Aufwertung des Geschwindigkeitsprofils kann hier zu jedem Zeitpunkt der Fahrt erfolgen und ist unabhängig von fest verbauten Einrichtungen. Es wird so insgesamt eine höhere Leistungsfähigkeit der Strecke erreicht, da durch die flexiblere Steuerung von Geschwindigkeitsprofilen die freie Kapazität einer Trasse umgehend genutzt werden kann.
- Level 3
Dieses Level befindet sich aktuell noch in der Entwicklung. Es soll zukünftig die Möglichkeit bieten, dass der Zug fahrzeugseitig mittels drahtloser Technik (GSM-R) geortet werden kann, dies soll ebenfalls kontinuierlich erfolgen.

Im Gegensatz zu den Klasse-B-Systemen bietet das ETCS den Vorteil, dass es weniger wartungsintensiv ist, da es ein softwarebasiertes System ist, sodass nicht zwangsläufig physische Bauteile bei einer Verbesserung ausgetauscht werden müssen.

Im aktuellen deutschen Klasse-B-System besteht ebenfalls die Unterscheidung zwischen Punktförmiger Zugbeeinflussung (PZB 90) und Linienförmiger Zugbeeinflussung (LZB). Das PZB 90 überträgt dabei lediglich drei Arten von Signalen, welche sich durch eine unterschiedliche Hertz-Zahl ergeben (500, 1 000 und 2 000 Hz). Da es sich um sogenannte „Gleismagnete“ handelt, ist keine streckenseitige Stromversorgung notwendig, es handelt sich vielmehr um ein passives System, welches mittels Induktion durch den Zug selber funktioniert. Aufgrund der geringen technischen Möglichkeiten des Systems wurde es sehr restriktiv ausgelegt und mindert die Kapazitäten der Strecke. Zudem kann bewusst seitens des Zugpersonals gegen das System verstoßen werden, sodass ein grundlegendes Sicherheitsrisiko besteht, außerdem werden defekte oder entfernte Magnete nicht erkannt. Das LZB ermöglicht Geschwindigkeiten von mehr als 160 km/h, in der letzten Entwicklungsstufe (LZB CE-II) wurde die mög-

liche Höchstgeschwindigkeit sogar auf 350 km/h gesteigert. Aufgrund der kontinuierlichen Überwachung werden Systemausfälle registriert und die Sicherheit des Systems steigt. Problematisch im Zusammenhang mit dem LZB-System ist, dass es nur noch bis 2030 verfügbar ist und von der Industrie nicht mehr weiterentwickelt wird.

Wegen der Verordnungen der EU hat Deutschland am 11. Dezember 2017 die Version 1.11 eines Nationalen Umsetzungsplanes ETCS vorgestellt. In diesem werden der Ist- sowie der Zielzustand dargestellt. Aktuell ist das ETCS in Deutschland auf lediglich 252,4 km des Schienennetzes im Einsatz, bis 2023 soll diese ausgerüstete Strecke um 1 817,8 km anwachsen und für die Zeit nach 2023 sind weitere 202,2 km Strecke zur Ausrüstung mit ETCS vorgesehen. Bei diesen Ausrüstungen geht es um einen Mix der Level 1 und 2. In Anbetracht einer Gesamtlänge des Deutschen Schienennetzes von 33 440 km in 2018³² scheinen diese Zielvorgaben zurückhaltend. Als langfristiges Ziel für 2050 ist vorgegeben, dass 17 000 km des deutschen Schienennetzes – d. h. lediglich ca. 50 % - mit ETCS ausgerüstet sind.

Im Nationalen Umsetzungsplan ETCS war eine Machbarkeitsstudie vorgesehen, welche im Dezember 2018 von McKinsey&Company vorgelegt wurde. In dieser Studie wird die zurückhaltende Zielvorgabe im Rahmen der Kosten-Nutzen-Analyse als falsch angesehen. McKinsey&Company stellt für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einen Vergleich zwischen einem umfassenden Rolloutszenario von ETCS und einem Referenzszenario an. Im Referenzszenario werden lediglich die Mindestanforderungen/-vorgaben der EU eingehalten und es findet keine gesamte Umrüstung auf ETCS statt.

McKinsey&Company führt bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse aus, dass der Nutzen von ETCS sehr umfangreich sei, jedoch mangels Quantifizierbarkeit nicht jeder einzelne Gesichtspunkt in die Analyse einbezogen wird. Dinge wie der Klimabeitrag, bedingt durch die effizientere Schienennetznutzung, oder die erhöhte Demografiefestigkeit des Bahnbetriebs wegen der Personalsituation werden nicht mit einbezogen. Auch eine erhöhte Qualität des Schienenverkehrs aufgrund von geringer Störanfälligkeit spielt bei der quantifizierten Analyse keine Rolle, wenngleich dieser Nutzen sehr wichtig ist. Eine hohe Qualität des Schienenverkehrs ist m. E. von entscheidender Bedeutung in Bezug auf die Fahrgäste, denn nur wenn der Vorteil der Bahn auch spürbar wird, gelingt es die Bevölkerung von diesem Verkehrsmittel zu überzeugen. McKinsey&Company betrachtet auf der Nutzenseite lediglich die Effizienzsteigerung in der Betriebsführung, den reduzierten Personalbedarf, die Reduktion der Instandhaltungskosten sowie Energieeinsparungen.

Insgesamt kommt McKinsey&Company zu dem Ergebnis, dass die Kosten für die vollständige Umrüstung des gesamten Streckennetzes bis 2040 die Kosten für das Referenzszenario übersteigen, jedoch würden sich die Investitionen im Referenzszenario voraussichtlich bis 2046 verlängern. Eine komplette Umrüstung auf ETCS wäre am Ende 1 Mrd. € günstiger (32 Mrd. € für das Rolloutszenario bis 2040 im Vergleich zu 33 Mrd. € für das Referenzszenario bis 2046) und würde zudem noch einen hohen Vorteil beim Nutzen von kumulierten 6 Mrd. € bis 2040 und danach einen weiter zunehmenden finanziellen Nutzen aufweisen³³.

³² <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13349/umfrage/laenge-vom-schienennetz-der-db-ag/> (Stand: 11.02.2020).

³³ Textziffer 2.4 der Machbarkeitsstudie zum Rollout von ETCS/DSTW.

3. Fazit

Wie in dieser Seminararbeit dargestellt, bedarf es vieler Verbesserungen bei der Deutschen Bahn bzw. den öffentlichen Eisenbahnverkehrsunternehmen. Wie beschrieben ist ein optimal berechneter Fahrplan dabei nur ein Teil der Lösung – zugegeben ein wichtiger Teil –, jedoch bedarf es auch anderer Maßnahmen damit ein solcher Zielfahrplan überhaupt eingehalten werden kann.

Bezüglich der Berechnung des Fahrplanes führte Herr Prof. Dr. Christian Liebchen Folgendes aus:

„Unter detaillierter Einbeziehung des kompletten Nahverkehrs halte ich die Aufgabe für zu komplex (streckenweise Kapazitätsreserven für Regional- und Güterverkehr vorzusehen sollte hingegen funktionieren), aber den (stündlichen) Fernverkehr halte ich für beherrschbar.“³⁴

Um die Voraussetzungen zu erfüllen, damit die „beherrschbare“ Berechnung umgesetzt werden kann, werden aktuell und zukünftig hohe Investitionen notwendig. Es ist bereits angekündigt, dass innerhalb der nächsten 10 Jahre Beträge in Höhe von insgesamt 183 Mrd. € investiert werden. Davon werden 83 Mrd. € in den Ausbau sowie die Instandhaltung der Signaltechnik und 86 Mrd. € in den Ausbau sowie die Instandhaltung des Schienennetzes investiert. Weitere 12 Mrd. € werden für die Anschaffung sowie Wartung der Züge fällig, davon werden allein 8,5 Mrd. € für die Anschaffung neuer Züge aufgewendet.

Ob diese Summe ausreicht, sei dahingestellt. Hier sei lediglich der Vergleich angeführt, dass die Volksrepublik China im Jahr 2019 (umgerechnet) allein 102 Mrd. €³⁵ in den Schienenverkehr investierte. Selbstverständlich ist die Volksrepublik China flächenmäßig deutlich größer als Deutschland und muss das Eisenbahnnetz grundlegend aufbauen, aber die Größenordnung für eine optimale Planung eines voll durchdachten Vorhabens wird an dieser Zahl doch sehr deutlich. Auch im nationalen Vergleich erscheinen 183 Mrd. € verteilt auf 10 Jahre eher gering, da der Wehretat für die Bundeswehr allein in 2019 schon 43,2 Mrd. € betrug³⁶.

Wie gering die Investitionen in Deutschland in die Schieneninfrastruktur sind, zeigt sich auch im internationalen Vergleich bei den Pro-Kopf-Investitionen im Jahr 2018. Deutschland ist gegenüber mehreren anderen europäischen Nationen (deutlich) abgeschlagen. Die Schweiz ist bei den Pro-Kopf-Investitionen in die Schieneninfrastruktur in Europa führend und investiert nahezu das Fünffache der Deutschen Summe

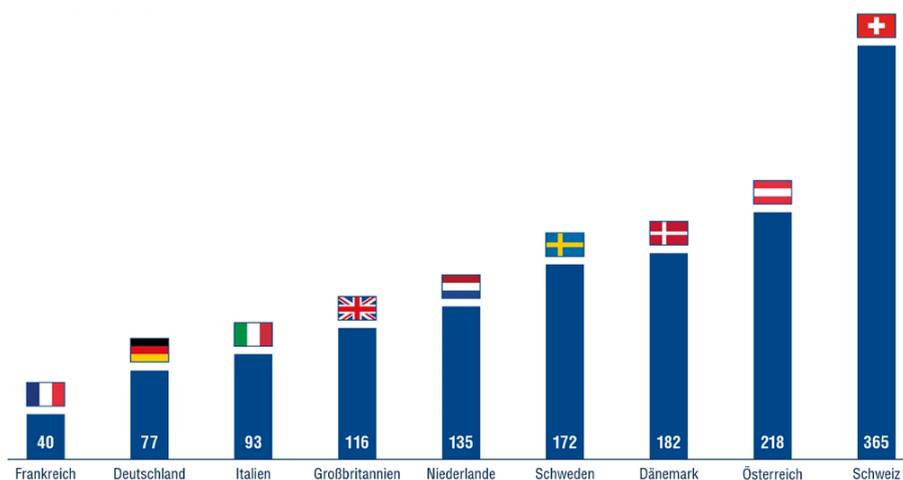


Abbildung 13 – Pro-Kopf-Investitionen in die Schieneninfrastruktur in Euro in 2018

³⁴ Mail-Antwort von Herrn Prof. Dr. Christian Liebchen vom 19. November 2019.

³⁵ <https://www.spiegel.de/politik/ausland/eisenbahn-in-china-co2-ersparnis-ist-gering-noch-a-1300727.html> (Stand: 11.02.2020).

³⁶ <https://www.bmvg.de/de/themen/verteidigungshaushalt> (Stand: 11.02.2020).

(Schweiz: 365 € pro Kopf; Deutschland: 77 € pro Kopf). Auch andere Länder deren Wirtschaftskraft kleiner als die Deutschlands und/oder deren Pro-Kopf-Einkommen geringer ist, wie z. B. Italien oder Österreich, investieren mehr Geld in die Schieneninfrastruktur.

Um das eventuell höhere Investitionsvolumen zu rechtfertigen und gegenüber der Öffentlichkeit sowie Politik rechtfertigen zu können, bedarf es m. E. auch eines Umdenkens bei der Deutschen Bahn. Anstelle der Einführung eigener Definitionen von pünktlichen Zügen müssen Missstände offen angesprochen werden.

Heutzutage ist bei der Bahn ein Fernzug pünktlich, wenn er weniger als 6 min bzw. 17 min verspätet ist, d. h. bei einer Verspätung von bis zu 5:59 min oder 16:59 min gilt ein Zug noch als pünktlich. Dies bedeutet wiederum, dass, wenn ein Anschlusszug im Nahverkehr erreicht werden muss und die Umsteigezeit lediglich 5 min beträgt, die Passagiere auf den meisten Verbindungen eine Verspätung von ca. einer Stunde in Kauf nehmen müssen, da Regionalbahnen in der Regel lediglich stündlich fahren.

Zudem darf die Deutsche Bahn in der öffentlichen Debatte nicht verkünden, dass das eigene Pünktlichkeitsziel erreicht oder nur knapp verfehlt wird, immerhin war 2019 das ausgegebene Ziel nur, dass eine Pünktlichkeit von 76,4-76,5 % (Steigerung um 1,5-1,6 % im Vergleich zu 2018) erreicht werden sollte³⁷. Dies ist als übergeordnetes Unternehmensziel nicht ausreichend und führt im öffentlichen Diskurs in die falsche Richtung. Beim Kunden könnte so der Eindruck entstehen, dass die Deutsche Bahn pünktlich ist, bei den Gelegenheiten zu denen er die Bahn nutzt, jedoch im überwiegenden Teil unpünktlich ist. Immerhin kann von den ca. 75 % pünktlichen Zügen theoretisch jeder fast 6 min verspätet sein und so die Passagiere die Anschlusszüge im Regionalverkehr tatsächlich zu einem Großteil verpassen. Eine ehrliche Debatte über den Investitionsbedarf bei der Deutschen Bahn bzw. den Deutschen Eisenbahnverkehrsunternehmen ist so nicht möglich und von vornherein zum Scheitern verurteilt. Außerdem schadet solch eine Debatte dem Ansehen des Verkehrsmittels allgemein, sodass dies als nicht zukunftsfähig empfunden wird.

Im Rahmen der Ziele des Zukunftsbündnisses Schiene ist unter anderem geplant, die Passagierzahl zum aktuellen Ist-Wert von 150 Millionen Passagieren pro Jahr zu verdoppeln. Diese Zielvorgabe von 300 Millionen Passagieren pro Jahr muss jedoch ins Verhältnis gesetzt werden, immerhin bedeutet dies, dass jeder Einwohner Deutschlands nicht einmal vier Fahrten pro Jahr durchführt (300 Millionen auf ca. 82 Millionen Einwohner verteilt). Unter der Annahme, dass jede Hinfahrt auch eine Rückfahrt bedingt, handelt es sich bei 300 Millionen beförderten Passagieren lediglich um ca. zwei Fernreisen pro Person im Jahr. Es werden bei diesen 300 Millionen beförderten Passagieren nicht nur die weiten Strecken – nicht nur ICE-Fahrten – betrachtet, sondern jede Fahrt, d. h. auch Kurzstrecken im Regionalverkehr. Eine zukunftsfähige Alternative zur Rettung des Klimas – wie aktuell so oft proklamiert – stellt die Bahn bei dieser Zielvorgabe noch lange nicht dar. Bei Erreichen dieser Zielvorgabe – was nach aktuellen Maßstäben noch fraglich ist – wäre lediglich ein geringer Teil des individuellen Verkehrs mit dem Auto reduziert.

Um die Bahn zukunftsfähig zu machen, wird hoher Aufwand betrieben werden müssen und dies auf zwei Ebenen, einmal in der Politik und einmal bei den Unternehmen. Ernsthafte Bestrebungen müssen erkennbar und für den Kunden spürbar werden. Zum Beispiel sollte das von McKinsey&Company er-

³⁷ Abbildung 3 und <https://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/deutsche-bahn-verpasst-puenktlichkeitsziel-a-1299818.html> (Stand: 10.02.2020).

dachte Rolloutszenario ernsthaft in Erwägung gezogen werden, da seine Vorteile die Nachteile in solchem Maß überwiegen, dass es unbegründet wäre, sich dagegen zu entscheiden. In diesem Zusammenhang ist in besonderem Maße die Politik gefordert, da McKinsey&Company eine Finanzierung durch den Bund als sinnvollste Alternative – neben der Finanzierung aus Eigenmitteln der DB oder Mitteln von Dritten — erachtet³⁸. Diese Finanzierung setzt eine langfristige Verpflichtung der Politik voraus, welche der normalen Diskontinuität des Deutschen Bundestages widerspricht, jedoch alternativlos ist.

Um auf das eigentliche Thema meiner Seminararbeit zurückzukommen: Effizienzverbesserungen bei der Berechnung eines Fahrplanes sind „relativ“ einfach zu erreichen, da die Berechnung theoretisch beliebig an die faktischen Gegebenheiten angepasst werden kann.

Die reine mathematische Optimierung des Fahrplanes stellt somit im gesamten Prozess der Einführung eines deutschlandweiten integralen Taktfahrplanes (scheinbar) das geringste Problem dar! Die Probleme eines optimierten Fahrplanes sind viel elementarer und eklatanter! Es hat nur leider den Anschein, dass auf keiner Ebene – sei es in der Politik, bei den Unternehmen oder innerhalb der Gesellschaft – ernsthaft ein Interesse an einer Lösung der Probleme besteht, geschweige denn eine Änderung in der Bereitschaft eintritt, Unwägbarkeiten für diese Lösung in Kauf zu nehmen!

³⁸ Textziffer 4.2 der Machbarkeitsstudie zum Rollout von ETCS/DSTW.

Quellen

- Barkleit, Stefan – Mail vom 14.11.2019
Fahrgastverband PRO Bahn e. V. – Landesvorsitzender Schleswig-Holstein/Hamburg
- Prof. Dr. Liebchen, Christian – Mail vom 19.11.2019
Technische Hochschule Wildau – Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften – Studiengangssprecher Verkehrssystemtechnik
- Naumann, Karl-Peter – Telefonat am 08.11.2019
Fahrgastverband PRO Bahn e. V. – Ehrenvorsitzender
- Straub, Johannes – Mail vom 12.11.2019
DB Netz AG – Regionalbereich Ost – Teamleiter Reisesonderzug

Literaturverzeichnis

- Bahn investiert Milliarden – ICE sollen häufiger fahren – tagesschau.de
<https://www.tagesschau.de/wirtschaft/bahn-547.html> (Stand: 08.02.2020)
- Entscheidung der Kommission vom 28. März 2006 – 2006/679/EG
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006D0679&from=DE>
(Stand: 10.02.2020)
- Gemeinsam auf dem Weg zum Schienenverkehr der Zukunft – erste Ergebnisse des Zukunftsbündnis Schiene
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/schienengipfel-zwischenbericht-psts-f.pdf?__blob=publicationFile (Stand: 08.02.2020)
- Initiative Deutschland-Takt – Mehr Verkehr auf die Schiene
<https://deutschland-takt.de/> (Stand: 08.02.2020)
- Investitionen ins Schienennetz – 86 Milliarden sind der SPD zu wenig – Spiegel Online
<https://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/deutsche-bahn-86-milliarden-euro-fuers-schiennetz-sind-der-spd-zu-wenig-a-1279219.html> (Stand: 08.02.2020)
- Machbarkeitsstudie zum Rollout von ETCS/DSTW – McKinsey&Company
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/machbarkeitsstudie-digitalisierung-schiene.pdf?__blob=publicationFile (Stand: 11.02.2020).
- OptiV – Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr
<http://www.optiv.de/Fallbsp/13-Linientakt/13-Linientakt/index.htm?5> (Stand: 08.02.2020)
- Schienennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG 2020 (SNB 2020) – Gültig ab 15.12.2019
<https://fahrweg.dbnetze.com/re-source/blob/4606064/3697a45c09425f103b6833b657b7949e/SNB-2020-data.pdf> (Stand: 08.02.2020)

- Vorlesung „Algorithmische Diskrete Mathematik III – Angewandte Netzwerkoptimierung – SS 2006“ – Herr Prof. Dr. Rolf H. Möhring – Online Mitschrift in LaTeX von Christina Puhl
<http://page.math.tu-berlin.de/~moehring/adm3/adm3-2006/Kapitel/adm3-mitschrift-par6.pdf>
(Stand: 11.02.2020)
- Zwischenberichte der Arbeitsgruppen des Zukunftsbündnisses Schiene – Stand 09.04.2019
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/schienengipfel-zwischenbericht-ag.pdf?__blob=publicationFile (Stand: 08.02.2020)
- 52 Milliarden für Investitionen – Marodes Schienennetz bekommt Geldspritze – ntv
<https://www.n-tv.de/wirtschaft/Marodes-Schienennetz-bekommt-Geldspritze-article21031981.html> (Stand: 08.02.2020)

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1 – CO₂-Emissionen des Verkehrs in der EU im Jahr 2016 Aufschlüsselung nach Verkehrsträgern
https://www.europarl.europa.eu/resources/library/images/-/20190507PHT44957/20190507PHT44957_original.jpg (Stand: 08.02.2020)
- Abbildung 2 – schematische Darstellung der Pofalla-Wende
- Abbildung 3 – Pünktlichkeit der Züge der Deutschen Bahn in Prozent
<https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/schneller-schlau/deutsche-bahn-kommt-2570-tage-zu-spaet-im-jahr-16404359.html> (Stand: 08.02.2020)
- Abbildung 4 – Verspätung der Züge der Deutschen Bahn in Mio. Minuten
<https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/schneller-schlau/deutsche-bahn-kommt-2570-tage-zu-spaet-im-jahr-16404359.html> (Stand: 08.02.2020)
- Abbildung 5 – CO₂-Ausstoß des Pkw- sowie des Lkw-Verkehrs in Abhängigkeit der Menge an befördertem Gut in Tonnen
- Abbildung 6 – schematische Darstellung einer eingleisigen Bahntrasse mit einem Begegnungspunkt
- Abbildung 7 – Legende zum PESP
- Abbildung 8 – schematische Darstellung einer Bahnstrecke mit drei Bahnhöfen
- Abbildung 9 – Zerlegung der Abbildung 9 entsprechend des PESP
- Abbildung 10 – schematische Darstellung einer Bahnstrecke mit zwei Bahnhöfen und zwei Linien
- Abbildung 11 – Zerlegung der Abbildung 10 entsprechend des PESP
- Abbildung 12 – Netzplan der U-Bahn Berlin– Urheber: Arbalete; Creative-Commons-Lizenz
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9a/U-Bahn_Berlin_-_Netzplan.png
(Stand: 11.02.2020)
- Abbildung 13 – Pro-Kopf-Investitionen in die Schieneninfrastruktur in Euro in 2018
<https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/infrastruktur/daten-fakten/> (Stand: 13.02.2020).