

Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Thilo Muthmann
aus Frankfurt am Main

Referenten: Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Stefan Bald
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Edmund Mühlhans

Datum der Einreichung: 17. Dezember 2003
Datum der Prüfung: 27. September 2004

Darmstadt 2004

D 17

Herausgeber

Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik der Technischen Universität Darmstadt
Petersenstraße 30
64287 Darmstadt
<http://www.tu-darmstadt.de/fb/bi/ifv/bs>
eisenbahn@verkehr.tu-darmstadt.de

Schriftenreihe des Instituts für Verkehr
Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik
Heft B4

ISSN 1614-9300

Darmstadt 2004

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik der Technischen Universität Darmstadt.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Stefan Bald für die Übernahme des Referats und seine Anregungen zu meiner Arbeit bedanken.

Mein besonderer Dank gilt dem Korreferenten meiner Arbeit, Herrn Prof. Dr.-Ing. Edmund Mühlhans. Er hat mich in jeder Phase der Arbeit mit großer Hilfsbereitschaft und durch seine sehr konstruktiven und hilfreichen Anmerkungen und Hinweise unterstützt.

Für die zahlreichen Gespräche und offenen Diskussionen über meine Arbeit möchte ich mich außerdem bei Herrn Dr.-Ing. Hans-Joachim Hollborn vom Zentrum für integrierte Verkehrssysteme und bei meinen Kollegen am Fachgebiet, Herrn Josef Becker und Herrn Martin Pächer, bedanken. Besonderer Dank gebührt auch Herrn Carsten-Rainer Warninghoff und Herrn Dr.-Ing. Frank Lademann, die früher am Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik beschäftigt waren und mir wichtige fachliche Unterlagen und Materialien für meine Arbeit zur Verfügung gestellt haben.

Allen jetzigen und ehemaligen Kollegen am Institut für Verkehr und am Zentrum für integrierte Verkehrssysteme danke ich für die gute Zusammenarbeit und das freundschaftliche Arbeitsklima.

Zum Schluss möchte ich mich auch bei meinen Freunden und meiner Familie für ihre Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit bedanken, besonders bei meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht und damit auch das Entstehen dieser Arbeit erst möglich gemacht haben.



Inhaltsverzeichnis

	Seite
Verzeichnis der Bilder	7
Verzeichnis der Tabellen	8
Verzeichnis der Abkürzungen	10
1 Einleitung	12
1.1 Der Begriff der Leistungsfähigkeit und seine Anwendung auf Eisenbahnstrecken	12
1.2 Gegenwärtige Probleme bei der Berechnung optimaler Streckenauslastungen	14
1.3 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	15
1.4 Abgrenzung	16
1.5 Vorgehensweise	17
1.6 Definition wichtiger Parameter	18
2 Bisherige Verfahren zur rechnerischen Bestimmung der Streckenleistungsfähigkeit	20
2.1 Ansätze von Dilli und Zwernemann	20
2.2 Verfahren von Potthoff	22
2.3 Berechnung der Leistungsfähigkeit mit Hilfe des Programmpaketes SLS (Verfahren von Schwanhäuser)	24
2.4 Bestimmung des optimalen Leistungsbereichs nach Hertel	28
2.5 Die Leistungsfähigkeit als Maximum der Gewinnlinie	30
2.6 Die Transportkraft als Messgröße der Leistungsfähigkeit	32
3 Beschreibung des neuen Ansatzes zur Leistungsfähigkeitsermittlung zweigleisiger Strecken	35
3.1 Entwicklung des Ansatzes	35
3.2 Ermittlung eines optimalen Leistungsbereiches	47
3.3 Ablauf einer Streckenleistungsfähigkeitsberechnung und Interpretation der Ergebnisse	51
3.4 Validierung des Ansatzes für zweigleisige Strecken	57
3.4.1 Die Strecke Stuttgart – Ulm	59
3.4.2 Die Strecke Heidelberg – Bruchsal	65
3.4.3 Die Schnellfahrstrecke Hannover - Würzburg (Teilabschnitt Jühnde-Mottgers)	69
3.4.4 Der Frankfurter S-Bahn-Tunnel	75
4 Übertragung des Ansatzes auf eingleisige Strecken	79
4.1 Notwendige Anpassungen zur Abbildung der betrieblichen Besonderheiten eingleisiger Strecken	79
4.2 Anwendung des Ansatzes auf verschiedene Beispiele aus der Praxis	79
4.2.1 Die Strecke Freiberg (Sachsen) – Holzgau	81
4.2.2 Die Odenwaldbahn	84
4.2.3 Die Strecke Sorsum – Fallersleben	91

5	Die Leistungsfähigkeitsermittlung drei- und mehrgleisiger Strecken mit Hilfe des neuen Ansatzes	97
5.1	Vorgehensweise zur Berechnung der Leistungsfähigkeit dreigleisiger Strecken	97
5.2	Praxisbeispiel: Die Strecke Hanau – Gelnhausen	98
5.3	Berechnung der Leistungsfähigkeit von vier- und mehrgleisigen Strecken	104
6	Zusammenfassung	106
7	Literaturverzeichnis	108
8	Anhang	111

Verzeichnis der Bilder

- Bild 1:** Ergebnisse einer Leistungsfähigkeitsuntersuchung nach dem Verfahren von Hertel [HERTEL 1992]
- Bild 2:** Prinzipdarstellung der Gewinnlinse [SCHWANHÄUßER 1998]
- Bild 3:** Transportkraft in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Ulm – Stuttgart, fahrplanunabhängige Variante
- Bild 4:** Schematischer Ausschnitt des Bildfahrplans für eine Beispielstrecke mit gemischtem bzw. artreinem Betrieb
- Bild 5:** Folge von Zugfahrten mit und ohne Linienzugbeeinflussung [nach REICHARDT 1989]
- Bild 6:** Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades in Abhängigkeit der Größe der Teilzeiträume, Richtung Ulm – Stuttgart
- Bild 7:** Abhängigkeit der Streckendurchsatzleistung vom Gewichtungsfaktor c
- Bild 8:** Zugehörigkeitsfunktionen bei scharfen und unscharfen Zuständen [KIRSCHFINK 1993]
- Bild 9:** Zugehörigkeitsfunktionen zu verschiedenen Betriebsqualitäten
- Bild 10:** Obere und untere Begrenzung des optimalen Leistungsbereichs
- Bild 11:** Streckendurchsatzleistung, Richtung Ulm – Stuttgart, fahrplanunabhängige Variante
- Bild 12:** Lage der Strecke Stuttgart – Ulm im Eisenbahnnetz [DB REISE & TOURISTIK AG 2001]
- Bild 13:** Lage der Strecke Heidelberg – Bruchsal im Eisenbahnnetz [DB REISE & TOURISTIK AG 2001]
- Bild 14:** Lage der Strecke Jühnde – Mottgers im Eisenbahnnetz [nach DB REISE & TOURISTIK AG 2001]
- Bild 15:** Lage des Frankfurter S-Bahn-Tunnels im Eisenbahnnetz [SCHWEERS 2000]
- Bild 16:** Lage der Strecke Freiberg – Holzgau im Eisenbahnnetz [DB REISE & TOURISTIK AG 2001]
- Bild 17:** Lage der Odenwaldbahn im Eisenbahnnetz [DB REISE & TOURISTIK AG 2001]
- Bild 18:** Lage der Strecke Sorsum – Fallersleben im Eisenbahnnetz [nach DB REISE & TOURISTIK AG 2001]
- Bild 19:** Lage der Strecke Hanau – Gelnhausen im Eisenbahnnetz [DB REISE & TOURISTIK AG 2001]
- Bilder 20 - 149:** Wartezeiten bzw. Streckendurchsatzleistungen der verschiedenen untersuchten Strecken und Varianten in Abhängigkeit der Zugzahl

Verzeichnis der Tabellen

- Tabelle 1:** Definitionen verschiedener Wartezeiten und Verspätungen [nach SCHWANHÄUSER 1998]
- Tabelle 2:** Ursachen geringer Streckendurchsatzleistung und mögliche Abhilfen
- Tabelle 3:** Modellzüge auf der Strecke Stuttgart – Ulm, Zugzahlen nach Jahresfahrplan 2000/2001
- Tabelle 4:** Leistungskennwerte der Strecke Stuttgart – Ulm, ursprüngliche Varianten
- Tabelle 5:** Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse der Leistungsfähigkeitsberechnung für die Strecke Stuttgart – Ulm
- Tabelle 6:** Veränderung der Leistungskennwerte der Strecke Stuttgart – Ulm bei Entmischung von Personen- und Güterverkehr
- Tabelle 7:** Modellzüge auf der Strecke Heidelberg – Bruchsal, Zugzahlen nach derzeitigem Fahrplan
- Tabelle 8:** Leistungskennwerte der Strecke Heidelberg – Bruchsal
- Tabelle 9:** Modellzüge auf der Strecke Jühnde – Mottgers, Zugzahlen nach Fahrplan 1992
- Tabelle 10:** Leistungskennwerte der Strecke Jühnde – Mottgers im Personenverkehr (Untersuchungszeitraum von 5.30 Uhr bis 22.30 Uhr)
- Tabelle 11:** Leistungskennwerte der Strecke Jühnde – Mottgers im Güterverkehr (Untersuchungszeitraum von 22.30 Uhr bis 5.30 Uhr)
- Tabelle 12:** Veränderung der Leistungskennwerte der Strecke Jühnde - Mottgers bei Mischung von Personen- und Güterverkehr
- Tabelle 13:** Modellzüge im Frankfurter S-Bahn-Tunnel, Zugzahlen nach derzeitigem Fahrplan
- Tabelle 14:** Leistungskennwerte des Frankfurter S-Bahn-Tunnels
- Tabelle 15:** Modellzüge auf der Strecke Freiberg – Holzgau, Zugzahlen nach Fahrplan 2001
- Tabelle 16:** Leistungskennwerte der Strecke Freiberg – Holzgau
- Tabelle 17:** Modellzüge auf dem Streckenteil Erbach – Wiebelsbach-Heubach, Zugzahlen nach Fahrplan 2001
- Tabelle 18:** Leistungskennwerte des Streckenteils Erbach – Wiebelsbach-Heubach der Odenwaldbahn
- Tabelle 19:** Modellzüge auf dem Streckenteil Darmstadt – Wiebelsbach-Heubach, Zugzahlen nach Fahrplan 2001
- Tabelle 20:** Leistungskennwerte des Streckenteils Darmstadt – Wiebelsbach-Heubach der Odenwaldbahn
- Tabelle 21:** Modellzüge auf dem Streckenteil Wiebelsbach-Heubach – Hanau, Zugzahlen nach Fahrplan 2001
- Tabelle 22:** Leistungskennwerte des Streckenteils Wiebelsbach-Heubach – Hanau der Odenwaldbahn
- Tabelle 23:** Modellzüge auf der Strecke Sorsum – Groß Gleidingen, Zugzahlen nach Fahrplan 2001
- Tabelle 24:** Leistungskennwerte der Strecke Sorsum – Groß Gleidingen
- Tabelle 25:** Modellzüge auf der Strecke Groß Gleidingen – Fallersleben, Zugzahlen nach Fahrplan 2001
- Tabelle 26:** Leistungskennwerte der Strecke Groß Gleidingen – Fallersleben
- Tabelle 27:** Modellzüge auf der Strecke Hanau - Gelnhausen, Zugzahlen nach aktuellem Fahrplan
- Tabelle 28:** Leistungskennwerte der Ferngleise der Strecke Hanau – Gelnhausen, Variante RE auf Ferngleisen

- Tabelle 29:** Leistungskennwerte des dritten Gleises der Strecke Hanau – Gelnhausen, Variante RE auf Ferngleisen
- Tabelle 30:** Leistungskennwerte der Ferngleise der Strecke Hanau – Gelnhausen, Variante RE auf drittem Gleis
- Tabelle 31:** Leistungskennwerte des dritten Gleises der Strecke Hanau – Gelnhausen, Variante RE auf drittem Gleis

Verzeichnis der Abkürzungen

AG	Aktiengesellschaft
bzw.	beziehungsweise
CB	Cargo-Bedienungsfahrt
D	Schnellzug
DB	Deutsche Bahn
d.h.	das heißt
EDV	elektronische Datenverarbeitung
f.	folgende
FD	Fernschnellzug
GC	Gruppen-Cargo-Zug
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
h	Stunde
Hbf	Hauptbahnhof
IC	Intercity
ICE	Intercity-Express
ICG	Inter-Cargo-Zug
ICGE	Inter-Cargo-Express-Zug
i.d.R.	in der Regel
IKE	Inter-Kombi-Express
inkl.	inklusive
IR	Interregio
IRC	Interregio-Cargo-Zug
IRE	Interregio-Express
Kap.	Kapitel
kg	Kilogramm
km	Kilometer
LZB	Linienzugbeeinflussung
N	Newton
m	Meter
min	Minute
RB	Regionalbahn
Rbf	Rangierbahnhof
RE	Regionalexpress
RMCon	Rail Management Consultants GmbH
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
s	Sekunde
S-Bahn	Stadtschnellbahn
SE	Stadtexpress
t	Tonne
Tab.	Tabelle

TEC	Trans-Euro-Combi
TU	technische Universität
u.U.	unter Umständen
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

1.1 Der Begriff der Leistungsfähigkeit und seine Anwendung auf Eisenbahnstrecken

Die Leistungsfähigkeit eines Verkehrssystems bezeichnet allgemein dessen Fähigkeit, die Nachfrage nach dem Transport von Personen, Gütern oder Informationen nach Menge und Verkehrsrelation mit einer gewünschten Qualität (z.B. in Bezug auf Schnelligkeit, Zuverlässigkeit und marktgerechte Kosten) zu befriedigen. Angewendet auf eine Eisenbahnstrecke ist die Leistungsfähigkeit die Anzahl von Zügen, die durch Eisenbahnverkehrsunternehmen in einem Bezugszeitraum unter bestimmten Qualitätsmerkmalen auf der Strecke befördert werden können. Aus der Sicht des Infrastrukturbetreibers ist die Streckenleistungsfähigkeit die Zahl der zu marktgerechter Qualität verkäuflichen Fahrplantrassen, wobei unter einer Fahrplantrasse die planmäßig vorgesehene Inanspruchnahme der Eisenbahninfrastruktur durch eine Zugfahrt verstanden wird.

Die Leistungsfähigkeit stellt damit sowohl für Eisenbahnverkehrsunternehmen als auch für Eisenbahninfrastrukturbetreiber eine grundlegende Bezugsgröße dar. Über die Anzahl der maximal verkäuflichen Fahrplantrassen und deren Preise beeinflusst die Streckenleistungsfähigkeit direkt den Ertrag eines Infrastrukturbetreibers. Für ein Eisenbahnverkehrsunternehmen begrenzt die Leistungsfähigkeit die maximal auf einem Streckenabschnitt anzubietende Zugzahl und damit die maximal zu befriedigende Verkehrsnachfrage. Anhand der Streckenleistungsfähigkeit lässt sich außerdem erkennen, ob und in welchem Maße eine politisch immer wieder geforderte zusätzliche Abwicklung von Verkehren auf den betrachteten Strecken möglich ist.

Die auf einer Strecke mögliche Zugzahl ist jedoch keine feste Größe, sondern stets von verschiedenen Faktoren wie z.B. dem auf der Strecke gefahrenen Betriebsprogramm und insbesondere der angestrebten Betriebsqualität abhängig. So können beispielsweise auf reinen S-Bahn-Strecken sehr große Zugzahlen gefahren werden, die auf Strecken mit gemischtem Betrieb aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungswerte der verkehrenden Züge niemals erreichbar sind. Ebenso ist es zwar möglich, eine Eisenbahnstrecke mit einer Zugzahl zu betreiben, die von der vorhandenen Sicherheitstechnik gerade noch bewältigt werden kann, jede wie auch immer geartete Störung im Betriebsablauf wird sich dann jedoch

auf viele folgende Züge übertragen und aufgrund der übermäßig hohen Auslastung der Strecke nur sehr langsam wieder abbauen lassen. Die auf einer Strecke zu fahrende Zugzahl darf jedoch auch nicht so weit abgesenkt werden, dass dadurch ein wirtschaftlicher Betrieb unmöglich wird.

In diesem Zusammenhang erscheint es daher sinnvoll, den Begriff der Leistungsfähigkeit zusätzlich zu spezifizieren. Dementsprechend soll im Rahmen dieser Arbeit unter der **theoretischen Leistungsfähigkeit** die Zahl von Zügen verstanden werden, die eine Strecke zwar mit einem definierten Fahrtverlauf, aber unbegrenztem Stau vor der Strecke (d.h. unbegrenzter Wartezeit bis zum Befahren der Strecke) passieren kann. Die Angabe dieses Wertes ist für den praktischen Bahnbetrieb belanglos, da jede Abweichung vom definierten Fahrtverlauf aufgrund fehlender zeitlicher Reserven zu (theoretisch) unendlich großen weiteren Wartezeiten für nachfolgende Züge führt. Als **praktische Leistungsfähigkeit** wird diejenige Zugzahl bezeichnet, bei der eine definierte Länge des Staus vor Streckenanfang nicht überschritten wird. Von Potthoff [POTTHOFF 1968] wird der Begriff der **leistungsstabilen Auslastung** geprägt, bei der die Summe aller Wartezeiten auf einer Eisenbahnstrecke oder allgemein in einer Eisenbahnbetriebsanlage genauso groß ist wie die Zeit, in der die Anlage nicht belegt ist. Bei leistungsstabiler Auslastung kann in den meisten Fällen nur eine unbefriedigende Betriebsqualität erreicht werden, die leistungsstabile Auslastung ist jedoch beispielsweise im Falle von Baubetriebszuständen mit zeitweise eingleisigem Betrieb von Bedeutung. Die **optimale Streckenauslastung** (auch **Nennleistung** oder **festgesetzte Leistungsfähigkeit** genannt) wird dann erreicht, wenn unter Berücksichtigung des Betriebsprogramms und der Lage der Strecke im Netz die Wartezeiten der Züge auf der Strecke aufgrund gegenseitiger Behinderung und die Auslastung der Bahnstrecke in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander stehen, das heißt zuvor zu definierenden Qualitätskriterien entsprechen.

Andere, eher allgemeine Definitionen der Leistungsfähigkeit (z.B. in [GRÜN 1987]) versuchen, auf deren nähere Spezifikation zu verzichten und sehen die Leistungsfähigkeit als Zufallsgröße an. Sie erscheinen hier weniger zielführend, da für die oben genannten Leistungsfähigkeitsbegriffe Randbedingungen festgesetzt sind, die nur zu einem geringen Teil der Zufälligkeit unterliegen.

1.2 Gegenwärtige Probleme bei der Berechnung optimaler Streckenauslastungen

Zur Berechnung der Streckenleistungsfähigkeit sind bereits verschiedene Verfahren entwickelt worden, von denen einige im Kapitel 2 dieser Arbeit ausführlicher dargestellt werden. Viele dieser Vorgehensweisen nutzen zur Leistungs-fähigkeitsbestimmung empirisch ermittelte Messwerte des Eisenbahnbetriebs, wie zum Beispiel das am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen entstandene Programmpaket SLS. Das Teilprogramm STRELE dieses Programm-pakets errechnet die Streckenleistungsfähigkeit anhand von zulässigen Verspätungs-summen, die anhand einer groß angelegten Untersuchung einer Vielzahl von Eisen-bahnstrecken in den siebziger Jahren festgesetzt wurden. Das Programm liefert in vielen Fällen auch heute noch plausible Ergebnisse und soll daher im Rahmen dieser Arbeit für Vergleichsrechnungen verwendet werden. Für einige Betriebsverhältnisse erscheint es jedoch weniger geeignet, weil die zulässige Verspätungssumme nur von wenigen Parametern abhängt. Darüber hinaus wäre jedoch eine in Zukunft möglicherweise erforderlich werdende Neueichung des Ansatzes, beispielsweise aufgrund veränderter Fahrplanstrukturen, mit erheblichem Aufwand verbunden. Wiederum müsste eine große Zahl von Eisenbahnstrecken untersucht werden.

Die Abhängigkeit von derartigen aufwendigen Datenermittlungen versuchen mehrere neuere Verfahren zur Leistungsfähigkeitsermittlung zu umgehen. Das Verfahren der so genannten „Gewinnlinse“ versucht, die Streckenleistungsfähigkeit rein betriebs-wirtschaftlich als diejenige Zugzahl zu definieren, mit der auf einer Strecke der maximale Gewinn möglich ist. Hierbei ist die Betriebsqualität indirekt über Kosten und Erlöse berücksichtigt, die zunächst möglichst exakt zu ermitteln sind. Eine solche Betrachtungsweise kann jedoch eine Kapazitätsermittlung auf verkehrs-wissenschaftlicher Basis nicht in allen Fällen ersetzen, da das Ergebnis solcher Rechnungen nicht darüber Auskunft gibt, ob die ermittelte optimale Zugzahl mit für das übrige Netz tolerierbaren Verspätungen gefahren werden kann. Außerdem ist es in verschiedenen Betriebssituationen (z.B. bei starken Sonderverkehren oder Betriebsstörungen) und auf manchen Streckenabschnitten, beispielsweise vor Streckenverzweigungen, nicht immer möglich, mit der so ermittelten optimalen Zugzahl zu fahren. Darüber hinaus gestaltet sich eine exakte Ermittlung der Kosten und insbesondere der Erlöse als schwierig.

Ein weiterer neuer Forschungsansatz nutzt zur Kapazitätsbestimmung von Eisenbahnstrecken das Produkt aus Zugmassen und Beförderungsgeschwindigkeiten geteilt durch einen Bezugszeitraum (vgl. [OETTING 2000]). Physikalisch betrachtet ist dieses Produkt aufgrund der Einheiten der verwendeten Eingangsparameter eine Kraft, die von den Entwicklern des Ansatzes „Transportkraft“ genannt wird. Trägt man diese Transportkraft über der Zugzahl auf, steigt die so entstehende Kurve zunächst unterproportional an, um nach dem Erreichen eines Maximalwerts relativ schnell abzufallen. Dieser Verlauf lässt sich durch die bei hohen Zugzahlen überproportional zunehmenden Wartezeiten erklären, die zu einem deutlichen Absinken der Beförderungsgeschwindigkeit führen. Die Zugzahl, bei der die Transportkraftkurve ihr Maximum erreicht, stellt nach diesem Ansatz die optimale Streckenauslastung dar.

Im Rahmen der in dieser Arbeit und weiterer vom Verfasser durchgeführten Untersuchungen [MUTHMANN 1999] liefert dieses Verfahren jedoch deutlich zu optimistische, d.h. zu hohe Ergebnisse, die höchstens auf Strecken mit artreinem Betrieb erreichbar sind. Ein weiterer wesentlicher Mangel ist, dass in der verwendeten Berechnungsformel für die Transportkraft die Zugmassen zur Gewichtung der einzelnen Züge verwendet werden, obwohl durch stark unterschiedliche Massen beispielsweise von Personen- und Güterzügen eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht zwangsläufig gesichert ist.

1.3 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Wie das Kapitel 1.2 zeigt, weist die Berechnung der optimalen Auslastung von Bahnstrecken derzeit je nach verwendetem Ansatz unterschiedliche Schwierigkeiten auf. Die Notwendigkeit, einen allgemeingültigen, hinreichend genauen Ansatz zur Berechnung der Streckenleistungsfähigkeit auf verkehrswissenschaftlicher Basis zu entwickeln, erscheint somit noch immer gegeben.

Im ersten Teil dieser Arbeit soll daher ein derartiger Ansatz gefunden werden, der mit möglichst geringem Aufwand für die Neuerhebung von Daten zu Ergebnissen führt, die die unterschiedlichen Betriebssituationen der jeweils untersuchten Strecken

möglichst genau berücksichtigen. Zu diesem Zweck sind zunächst die erforderlichen Einflussfaktoren zu bestimmen.

Um das Verfahren universell anwenden zu können, ist eine Übertragung des Ansatzes vom einfacheren Fall der im Einrichtungsbetrieb befahrenen zweigleisigen Strecke auf Strecken mit Zweirichtungsbetrieb (z.B. eingleisige Strecken oder das dritte Gleis einer dreigleisigen Strecke) erforderlich. Dazu müssen geringfügige Anpassungen im Ablauf des Berechnungsverfahrens vorgenommen werden.

1.4 Abgrenzung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein mathematischer Ansatz zur Ermittlung der optimalen Auslastung von Eisenbahnstrecken entwickelt. Statt eines derartigen Ansatzes können im Grundsatz auch durch Simulationen Aussagen zum Leistungsverhalten von Eisenbahnstrecken getroffen werden. In den letzten Jahren sind zahlreiche Simulationsprogramme entstanden, beispielhaft sei hier auf die Programme RailSys (Rail Management Consultants GmbH), UX-SIMU (Universität Hannover) oder STRESI (RWTH Aachen) verwiesen. Mit Hilfe derartiger Programme können fahrplantechnische und betriebliche Details mit beinahe uneingeschränkter Genauigkeit abgebildet und untersucht werden, während den mathematischen Ansätzen aufgrund der geringeren Anzahl von Eingangsparametern und der verwendeten mathematischen Zusammenhänge (die jedoch andererseits auch erheblich kürzere Eingabe- und Rechenzeiten bewirken) hier Grenzen gesetzt sind. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse einer Simulation, z.B. auf veränderte Auslastungsgrade oder Betriebsqualitäten, ist jedoch im Gegensatz zu mathematischen Modellen nicht möglich, da stets ein vorgegebener Fahrplan (u.U. modifiziert durch gemäß vorgegebener Verteilungen eingespielte Verspätungen) simuliert wird. Aufgrund dieser Einschränkungen und anderen Einsatzgebiete von Simulationen sowie der bereits vorhandenen guten Simulationsprogramme wird hier den mathematischen Verfahren der Vorzug gegeben.

Für die Ermittlung der Kapazität des Gesamtsystems Eisenbahn ist neben der Streckenleistungsfähigkeit weiterhin die Untersuchung der Leistungsfähigkeit der

Knotenpunkte erforderlich, die die einzelnen Strecken miteinander verknüpfen. Dies soll jedoch nicht im Rahmen dieser Arbeit geschehen, da auch zu diesem Zweck bereits verschiedene EDV-Programme für unterschiedliche Einsatzbereiche am Markt verfügbar sind (z.B. die ebenfalls an der RWTH Aachen entstandenen Programme ALFA zur Bestimmung der optimalen Auslastung von Fahrstraßenknoten und GLEISE zur Bemessung von Gleisgruppen).

1.5 Vorgehensweise

Nach einer Definition der für die Ermittlung von Streckenleistungsfähigkeiten bedeutsamen Parameter soll im anschließenden Kapitel zunächst ein Überblick über bisher bekannte Verfahren zur Leistungsfähigkeitsbestimmung gegeben werden. Danach erfolgt die Beschreibung der Anforderungen an die neue Vorgehensweise, die Ermittlung und Bestimmung der maßgebenden Einflussfaktoren sowie die Entwicklung des Ansatzes. Die erforderlichen Untersuchungen werden zunächst für zweigleisige Strecken durchgeführt, da sich hierbei die geringsten Anforderungen an das neue Verfahren stellen. Im Anschluß daran erfolgt eine Validierung des Ansatzes anhand mehrerer zweigleisiger Strecken mit unterschiedlichen Betriebsbedingungen (Mischbetrieb, artreiner Verkehr, Hochgeschwindigkeitsverkehr). Darüber hinaus wird zum einen beispielhaft für eine Streckenuntersuchung eine Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse durchgeführt, zum anderen werden für zwei der Strecken die Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit, die sich bei einer zeitlichen Entmischung der Verkehre ergeben, ermittelt und dargestellt.

Das anschließende Kapitel behandelt die Übertragung des Ansatzes auf eingleisige Strecken samt der notwendigen Anpassungen und Modifikationen. Auch in diesem Kapitel wird wiederum eine Überprüfung des Ansatzes an mehreren Bahnstrecken mit unterschiedlichen Anforderungen an den Eisenbahnbetrieb durchgeführt. Ebenso ist für die Berechnung der Leistungsfähigkeit von drei- und mehrgleisigen Strecken ein eigenes Kapitel vorgesehen.

Eine kurze Zusammenfassung schließt die Arbeit ab. Wichtige Diagramme zur Nachvollziehbarkeit der im Textteil dargestellten Ergebnisse finden sich im Anhang.

1.6 Definition wichtiger Parameter

In diesem Abschnitt sollen wichtige Parameter erläutert werden, die insbesondere für eine Leistungsfähigkeitsberechnung von Eisenbahnstrecken bedeutsam sind.

Eine die Leistungsfähigkeit direkt beeinflussende Größe ist die **Mindestzugfolgezeit**, die die Zeit darstellt, „um die bei gleichzeitiger Nachfrage nach Fahrplantrassen für zwei Züge [...] bis zur nächsten Möglichkeit zum Wechsel der Reihenfolge die zweite [im Bildfahrplan oder Sperrzeitendiagramm] maximal verschoben werden muss, um ohne Überschneidungen mit den Sperrzeiten der ersten Trasse eingelegt werden zu können“ [SCHWANHÄÜßER 1998]. Unter einer **Sperrzeit** ist hierbei die Dauer des signaltechnischen gegenseitigen Ausschlusses von Zugfahrten bezogen auf einen Gefahrenpunkt oder eine Sperrstrecke (z.B. ein Blockabschnitt) zu verstehen. Neben der Geschwindigkeit, dem Brems- und Beschleunigungsvermögen und der Länge der verkehrenden Züge ist das vorhandene Signalsystem von entscheidendem Einfluss auf die Mindestzugfolgezeit.

Wie bereits beschrieben ist ein Fahrplan ohne zeitliche Reserven zwischen zwei Zugfahrten in der Praxis undurchführbar. Daher sind zwischen zwei Zugfahrten im Fahrplan zusätzliche **Pufferzeiten**, von Dilli [DILLI 1952] auch **Toleranzen** genannt, vorzusehen. Durch die Berücksichtigung von Pufferzeiten kann eine Zugfahrt in begrenztem Umfang verschoben werden, ohne Verspätungen auf folgende Züge zu übertragen.

Ein weiterer Faktor zur Beurteilung der Auslastung einer Bahnstrecke ist der so genannte **Streckenbelegungsgrad**. Er ergibt sich als Produkt der Anzahl der auf einer Strecke verkehrenden Züge und der mittleren Mindestzugfolgezeit geteilt durch den Bezugszeitraum. Gleichwertig dazu kann der Streckenbelegungsgrad auch als das Verhältnis der vorhandenen Zugzahl zur Zugzahl im Zustand der theoretischen Leistungsfähigkeit definiert werden.

Von Einfluss auf die optimale Streckenauslastung sind weiterhin alle Arten von **Wartezeiten** und **Verspätungen**, die Züge im Bahnbetrieb oder – im Falle der Wartezeiten – zum Teil auch schon bei der Fahrplanerstellung erleiden. Dabei soll unter

dem Begriff „Wartezeit“ nicht wie z.B. in den Betriebsvorschriften der Deutschen Bahn AG die zur Anschlussaufnahme notwendige Überschreitung der Abfahrtszeit verstanden werden. Der Begriff bezeichnet hier statt dessen wie in den bisherigen Ansätzen zur Bestimmung optimaler Streckenauslastungen erforderliche Verschiebungen von Fahrplantrassen zur Erstellung konfliktfreier Fahrpläne (**Wartezeiten im Fahrplan**) bzw. Wartezeiten aufgrund von Störungen oder Unregelmäßigkeiten im Betriebsablauf (**Wartezeiten im Betrieb**). Eine Zusammenstellung der Definitionen der verschiedenen Wartezeiten und Verspätungen enthält die folgende Tabelle.

Wartezeit im Fahrplan (planmäßige Behinderung)	Verschiebung einer Fahrplantrasse aus der gewünschten Abfahrtslage zur Erstellung eines konfliktfreien Fahrplans.
Wartezeit im Betrieb (unplanmäßige Behinderung)	Wartezeit aufgrund jedweder Art von Störungen oder Unregelmäßigkeiten des Bahnbetriebs.
Verspätung	Zeitunterschied zwischen tatsächlicher und planmäßiger Durchführung eines Betriebsvorgangs.
Urverspätung	Verspätung der verschiedensten Ursachen mit unterschiedlichen Verteilungen der Wahrscheinlichkeitsdichten, die in erster Näherung unabhängig von der Belegung der Eisenbahn-Betriebsanlage sind.
Einbruchsverspätung	Abweichung vom Fahrplan am Beginn eines Betrachtungsraumes (Strecke, Netz).
Erregerverspätung	Verspätung, die in einer Eisenbahn-Betriebsanlage (Netzelement) Folgeverspätungen verursachen kann. Sie besteht aus Einbruchsverspätung und Urverspätung.
Folgeverspätung	Verspätung durch Konflikte mit anderen Belegungen. Sie würde bei vollkommen pünktlichem Betrieb oder sonst leerem Bedienungssystem nicht auftreten.
Gesamtverspätung	Summe aus Erregerverspätung und Folgeverspätung.
Ausbruchsverspätung	Gesamtverspätung abzüglich der durch Fahrzeitzuschläge getilgten Verspätung beim Verlassen des Betrachtungsraumes (z.B. Streckenabschnitt, Netzteil).
Anfangs-/ Endverspätung	Verspätung am Anfang bzw. am Ende eines Zuglaufs.
Zuwachsverspätung	Differenz zwischen Ausbruchs- und Einbruchsverspätung.
Abfahrts- und Ankunftsverspätung	Verspätung bei Abfahrt bzw. Ankunft eines Zuges.

Tabelle 1: Definitionen verschiedener Wartezeiten und Verspätungen [nach Schwanhäußer 1998]

Die **Beförderungsgeschwindigkeit** eines Zuges schließlich ergibt sich aus der Länge seines Laufwegs geteilt durch seine Fahrzeit einschließlich aller Wartezeiten.

2 Bisherige Verfahren zur rechnerischen Bestimmung der Streckenleistungsfähigkeit

Zum Thema Streckenleistungsfähigkeit sind in der einschlägigen Fachliteratur zahlreiche Quellen zu finden, die sich jedoch in vielen Fällen lediglich mit konkreten Beispielen beschäftigen. Darüber hinaus sind deren Ergebnisse häufig nur bezogen auf den zum jeweiligen Zeitpunkt erreichten Stand der Technik, beispielsweise im Bereich der einsetzbaren Triebfahrzeuge oder der vorhandenen Sicherungstechnik, anwendbar (vgl. beispielsweise [FICKERT 1958], [GOTTSCHALK 1952], [HAHN 1954]). Im Folgenden sollen jedoch solche Verfahren beschrieben werden, die eine rechnerische Ermittlung der optimalen Streckenauslastung erlauben.

2.1 Ansätze von Dilli und Zwernemann

Bereits zu Beginn der fünfziger Jahre wurde von Dilli [DILLI 1952] ein Ansatz vorgestellt, mit dem die Leistungsfähigkeit von Eisenbahnstrecken einerseits konstruktiv, andererseits jedoch auch mittels mathematischer Formeln zu bestimmen ist. Im von ihm so genannten Zeitlückenverfahren sucht Dilli im vorhandenen Fahrplan einer Strecke, den er als weitestgehend unveränderlich ansieht, nach entsprechend großen zeitlichen Abständen zwischen zwei Zugfahrten, die er dann in die Mindestzugfolgezeit für einen zusätzlichen Zug und zwei Toleranzen (Pufferzeiten) teilt. Diese Toleranzen sollen mindestens so groß wie die mittlere Pufferzeit vor dem Einlegen des zusätzlichen Zuges sein. Zusätzlich versucht Dilli jedoch auch, die Streckenleistungsfähigkeit (jeweils angegeben in Zügen pro Tag) durch eine „allgemeine Leistungsgleichung“ auszudrücken. Hierzu geht er wiederum vom gegebenen Fahrplan aus und ermittelt für die verkehrenden Züge die von ihm mit Z_0^d abgekürzte mittlere Mindestzugfolgezeit (in Minuten). Gleichzeitig muss jedoch die Leistungsfähigkeit nach dem Zeitlückenverfahren bekannt sein, um mittels der Beziehung

$$T^N = \frac{1440 - Z_0^d \cdot N}{N}$$

mit N = Leistungsfähigkeit bei größtmöglicher Zugzahl nach dem Zeitlückenverfahren

die mittlere Toleranz T^N (ebenfalls in Minuten) für den Höchstleistungszustand zu bestimmen. Aus dem Zusammenhang

$$N = \frac{1440}{Z_0^d + T^N}$$

wird daraufhin die Streckenleistungsfähigkeit ermittelt (bei Dilli ebenfalls mit N bezeichnet), die sich in der Regel von dem durch das Zeitlückenverfahren ermittelten Wert kaum unterscheidet. Differenzen können sich lediglich durch Fehler in der Fahrplankonstruktion ergeben, nämlich dann, wenn zwischen zwei Fahrplantrassen nicht die notwendige Mindestzugfolgezeit eingehalten wird. Derartige Fehler, von Dilli "negative Toleranzen" genannt, kamen zur damaligen Zeit gemäß seinen Angaben (vgl. [DILLI 1952], [DILLI 1954]) relativ häufig vor.

Zur Ermittlung einer Veränderung der Streckenleistungsfähigkeit muss diese so genannte „allgemeine Leistungsgleichung“ jedoch durch einen weiteren Summanden im Nenner zur „erweiterten Leistungsgleichung“ ergänzt werden:

$$N_{neu} = \frac{1440}{Z_0^d + T^N + \varphi \cdot (\Delta Z_0^d + \Delta T^N)}$$

mit	φ	=	Abminderungsfaktor
	ΔZ_0^d	=	Änderung der mittleren Mindestzugfolgezeit durch das Einfügen oder Streichen von Zügen [min]
	ΔT^N	=	Änderung der mittleren Toleranz durch das Einfügen/Streichen von Zügen [min]

Bei einer Steigerung der Leistungsfähigkeit wird in dieser Gleichung zumindest ΔT^N negativ, da sich die Toleranzen bei einer vergrößerten Zugzahl, gleicher Infrastruktur und gleichem Betrachtungszeitraum zwangsläufig vermindern müssen. Diese geringeren Toleranzen können nach dem Verfahren von Dilli jedoch nicht vollständig in eine erhöhte Anzahl von Zugfahrten umgesetzt werden, da stets zusätzliche Züge in einen vorgegebenen Fahrplan eingefügt werden, für die entsprechend große Fahrplanlücken vorhanden sein müssen. Dies wird durch den empirisch für jede Leistungsfähigkeitsuntersuchung neu zu ermittelnden Abminderungsfaktor φ

berücksichtigt, der nach Angaben Dillis zwischen 0 und 0,25 liegt. Eine Senkung der Leistungsfähigkeit hingegen führt zu größeren mittleren Toleranzen. Da aus einem Fahrplan jeder Zug entfernt werden kann, ist φ in diesem Fall gleich 1,0 zu setzen.

Um diese sehr aufwendige Leistungsfähigkeitsermittlung zu erleichtern, gibt Dilli zusätzlich eine „vereinfachte Leistungsgleichung“ an, in der eine feste, aus praktischen Erfahrungen des Eisenbahnbetriebs (damals im Wesentlichen mit Dampftraktion durchgeführt) gewonnene Toleranz von 5,5 Minuten eingesetzt wird:

$$N = \frac{1440}{Z_0^d + 5,5}$$

Diese Gleichung kann zwar grundsätzlich zur Berechnung von Leistungsfähigkeiten herangezogen werden, aus heutiger Sicht sollte aber die starre Festsetzung von Pufferzeiten durch je nach vorhandenem Betriebsprogramm individuell bemessene Pufferzeiten ersetzt werden. Auf die Möglichkeit unterschiedlicher Betriebsprogramme geht Dilli jedoch nicht ein, da er stets einen vorgegebenen Fahrplan voraussetzt. Dilli gibt lediglich an, dass durch eine Zugfolge bei parallelem Fahrplan die höchste Leistungsfähigkeit erreichbar ist.

Diese angesprochenen Nachteile werden zum Teil durch ein Verfahren zur Ermittlung von Streckenleistungsfähigkeiten nach Zwernemann [ZWERNEMANN 1961] aufgehoben. Anstatt von einem vorgegebenen Fahrplan auszugehen, ermittelt Zwernemann die Streckenleistungsfähigkeit anhand der mittleren Mindestzugfolgezeit der Züge des jeweils gefahrenen Betriebsprogramms und zusätzlich nötiger Toleranzen, die zwar nicht mehr pauschal (wie bei Dilli), jedoch noch immer streckenspezifisch empirisch festgesetzt werden müssen. Der Einfluss weiterer statistischer Kennwerte der Mindestzugfolgezeiten (z.B. deren Standardabweichung oder deren Variationskoeffizient) wird wie bei Dilli nicht untersucht.

2.2 Verfahren von Potthoff

Aufbauend auf dem Zeitlückenverfahren nach Dilli hat Potthoff [POTTHOFF 1968] (ergänzende Ausführungen auch von Hiller [HILLER 1968]) ein Verfahren vorgestellt, mit

dem es unter bestimmten Bedingungen möglich ist, die Zahl zusätzlich in einen Fahrplan einzulegender Züge wahrscheinlichkeitstheoretisch zu berechnen. Dazu muss die Zahl der bisher gefahrenen Züge N , die bisherige mittlere Pufferzeit (hier \bar{r} genannt) und die mittlere Mindestzugfolgezeit der einzulegenden Züge c_0 bekannt sein.

Für einen zusätzlichen Zug wird zunächst die mindestens notwendige Fahrplanlücke nach folgender Formel berechnet:

$$r_1 = c_0 + 2 \cdot r_0$$

mit r_1 = Mindestgröße der Fahrplanlücke für einen einzulegenden Zug [min]
 r_0 = Mindestpufferzeit beim Einlegen zusätzlicher Züge (aufgrund praktischer Erfahrungen mit fünf Minuten angesetzt)

Entsprechend wird die nötige Fahrplanlücke für n einzulegende Züge bestimmt:

$$r_n = n \cdot c_0 + (n + 1) \cdot r_0$$

Werden negativ-exponential verteilte Pufferzeiten angenommen, kann die Häufigkeit h_1 einer für einen zusätzlichen Zug ausreichend großen Fahrplanlücke durch folgende Gleichung ausgedrückt werden:

$$h_1 = N(e^{-r_1/\bar{r}} - e^{-r_2/\bar{r}})$$

bzw. für n Züge:

$$h_n = N(e^{-r_n/\bar{r}} - e^{-r_{n+1}/\bar{r}})$$

Mit Hilfe der Abkürzungen

$$a = (c_0 + r_0) / \bar{r}$$

$$b = r_0 / \bar{r}$$

errechnet sich die Zahl der maximal zusätzlich einzulegenden Züge N_{zus} aus der Summation der Häufigkeiten h_n multipliziert mit den jeweiligen Zugzahlen n :

$$N_{zus} = \sum n \cdot h_n = \frac{N \cdot e^{-b}}{e^a - 1}$$

Die Addition von N und N_{zus} ergibt die praktische Leistungsfähigkeit der untersuchten Eisenbahnstrecke. Durch eine Verringerung der Pufferzeiten kann diese praktische Leistungsfähigkeit überschritten werden, was jedoch eine erhöhte Anfälligkeit für Verspätungen nach sich zieht.

Dieses Verfahren setzt eine negative Exponentialverteilung der Pufferzeiten voraus. Es ist wie das Zeitlückenverfahren von Dilli nur fahrplanabhängig anwendbar; nachteilig ist weiterhin der fehlende Bezug zu Betriebsprogramm und Betriebsqualität.

2.3 Berechnung der Leistungsfähigkeit mit Hilfe des Programmpakets SLS (Verfahren von Schwanhäüßer)

Grundlage der Leistungsfähigkeitsberechnungen mit dem Rechnerprogramm STRELE (Teil des Programmpakets SLS des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen) ist das von Schwanhäüßer [SCHWANHÄÜßER 1974] vorgestellte Verfahren, das statt fester Pufferzeiten eine Bemessung von erforderlichen Pufferzeiten anhand folgender Parameter vorsieht:

$$\bar{r}_{erf} = f(T, \bar{p}, g, w_g, \bar{z}_g, \bar{z}_v, \bar{z}, P_{Fzul})$$

mit	\bar{r}_{erf}	=	erforderliche mittlere Pufferzeit zur Gewährleistung einer bestimmten Betriebsflüssigkeit, als deren Maßstab die Summe der Folgeverspätungen gilt [min]
	T	=	Bezugszeitraum (z.B. 1440 Minuten = 1 Tag)
	\bar{p}	=	durchschnittliche Einbruchverspätung über alle Züge
	g	=	Verspätungsgrad, Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Einbruchverspätung beliebiger Größe, geschätzt über den Anteil der Züge mit Einbruchverspätung
	w_g	=	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten gleichrangiger Zugfolgefälle
	\bar{z}_g	=	mittlere Mindestzugfolgezeit gleichrangiger Zugfolgefälle [min]

\bar{z}_v	=	mittlere Mindestzugfolgezeit ungleichrangiger Zugfolgefälle [min]
\bar{z}	=	mittlere Mindestzugfolgezeit [min]
P_{Fzul}	=	Summe der zulässigen Folgeverspätungen je Tag [min]

Die Pufferzeiten werden entweder als exponentialverteilt, oder, z.B. bei reinem S-Bahn-Betrieb, als konstant angenommen. Bestimmungsgleichungen der erforderlichen Pufferzeit werden iterativ oder graphisch gelöst, die Summe der zulässigen Folgeverspätungen muss je nach angestrebter Betriebsqualität festgesetzt werden. In vereinfachter Form wurde dieses Verfahren in der Richtlinie DV 405 der ehemaligen Deutschen Bundesbahn [DV 405, 1974] zur Ermittlung von Streckenleistungsfähigkeiten genutzt, wobei die Summe der zulässigen Folgeverspätungen 200 Minuten je Tag nicht überschreiten sollte.

Im Unterschied zu dieser Vorgehensweise nutzt das Programm STRELE statt der Summe der zulässigen Folgeverspätungen die sich ergebenden Längen der Warteschlangen, die sich jedoch mit Hilfe des jeweiligen Bezugszeitraumes ineinander umrechnen lassen. Des Weiteren wird statt einer pauschalen Festsetzung der Summe der Folgeverspätungen eine zulässige Länge der Warteschlange im Betriebsablauf IWB_{zul} in Abhängigkeit des Reisezuganteils einer Strecke definiert:

$$IWB_{zul} = qB \cdot 0,257 \cdot e^{-1,3 \cdot pRz}$$

mit	qB	=	Qualitätsfaktor im Zustand der Betriebsabwicklung
	pRz	=	Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Reisezügen

Bei einer nach STRELE optimalen Auslastung einer Strecke nimmt der Qualitätsfaktor qB den Wert 1,0 an, bei sehr guter (aber unwirtschaftlicher) Betriebsqualität liegt er bei 0,5, während er bei mangelhafter Betriebsqualität 1,5 beträgt. Die im Betrieb vorhandene Länge der Warteschlange IWB berechnet sich nach dem unten stehenden Zusammenhang, wobei für alle folgenden Gleichungen die heutigen Bezeichnungen für die Variablen verwendet werden:

$$lWB = \frac{pV_e - 0,5 \cdot pV_e^2}{\left(\frac{tZ_m + tP_m}{tV_m}\right) \cdot \left(\frac{tP_m}{tV_m} + 1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}}\right)} \cdot \left(pG \cdot \left(1 - e^{-\frac{tZ_g}{tV_m}}\right)^2 + (1 - pG) \cdot \frac{tZ_v}{tV_m} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot tZ_v}{tV_m}}\right) + \frac{tZ_m}{tP_m} \cdot \left(1 - e^{-\frac{tZ_m}{tV_m}}\right)^2 \right)$$

- mit
- tP_m = mittlere Pufferzeit [min]
 - tZ_m = mittlere Mindestzugfolgezeit über alle Zugfolgefälle [min]
 - tZ_g = mittlere Mindestzugfolgezeit über alle gleichrangigen Zugfolgefälle [min]
 - tZ_v = mittlere Mindestzugfolgezeit über alle ungleichrangigen Zugfolgefälle [min]
 - tV_m = mittlere Erregerverspätung je Verspätungsfall über alle Züge [min]
 - pV_e = Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Erregerverspätung
 - pG = Wahrscheinlichkeit des Auftretens gleichrangiger Zugfolgefälle

Während die bisherigen Vorgehensweisen den Fahrplan einer Strecke als gegeben annahmen (mit Ausnahme des Verfahrens von Zwernemann), ist es mit diesem Verfahren möglich, auch Leistungsfähigkeiten von Strecken zu berechnen, für die noch kein Fahrplan vorhanden ist. Hierzu werden erforderliche Eingangsgrößen, wie z.B. die mittlere Mindestzugfolgezeit, wahrscheinlichkeits theoretisch berechnet, wobei dann von einer zufälligen Verteilung der Mindestzugfolgezeiten ausgegangen wird. Wird das Verfahren fahrplanabhängig eingesetzt, müssen die einzelnen Zugfolgefälle vom Bearbeiter ermittelt und in eine Matrix eingetragen werden, anhand derer die mittlere Mindestzugfolgezeit berechnet wird. Für das Ergebnis der Leistungsfähigkeitsberechnung wird jedoch nicht berücksichtigt, ob die Zugfahrten gleichmäßig über den Tag verteilt oder stark gebündelt stattfinden.

Obwohl der Ansatz noch heute als Standardverfahren bei der DB AG im Einsatz ist, wirft er an verschiedenen Stellen Probleme auf. Neben dem bereits genannten Aufwand zur eventuellen Neubestimmung der zulässigen Verspätungssumme ist insbesondere problematisch, dass diese Verspätungssumme lediglich durch den Anteil der Reisezüge auf einer Strecke beeinflusst wird. Andere Parameter, wie z.B. die Länge der Strecke oder die verkehrende Zugzahl, bleiben unberücksichtigt. Das hat zur Folge, dass die zulässige Verspätungssumme in extremen Fällen auf einige

wenige oder aber sehr viele Züge verteilt wird bzw. auf sehr kurze oder sehr lange Streckenlängen. Beides kann jedoch die Betriebsqualität entscheidend beeinflussen. Darüber hinaus wird auch durch sehr kurze eingleisige Abschnitte, wie sie auch auf stark belasteten zweigleisigen Hauptstrecken durch Bauarbeiten zeitweilig entstehen können, eine Halbierung der zulässigen Verspätungssumme mit entsprechender Reduzierung des Rechenergebnisses für die optimale Streckenauslastung bewirkt, die sich in der Realität in diesem Maße nicht einstellt. Gelegentlich wird in solchen Fällen sogar mit der fahrplanmäßig vorgesehenen Zugzahl gefahren, wobei allerdings deutliche Betriebsbehinderungen hingenommen werden. Weitere Verzerrungen können sich dadurch ergeben, dass lediglich Wartezeiten im Betrieb, nicht aber solche im Fahrplan berücksichtigt werden. Lange planmäßige Wartezeiten, wie sie beispielsweise auf eingleisigen Strecken bei ungünstigen betrieblichen Bedingungen (z.B. Kreuzungshalte zum Abwarten von Gegenzügen) entstehen, können jedoch zu stärkeren Beeinflussungen der Betriebsqualität derartiger Strecken führen.

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass die mit diesem Verfahren ermittelte Streckenleistungsfähigkeit erheblich durch die Betriebsverhältnisse auf den Zulaufstrecken beeinflusst wird. Durch die Vorgabe veränderter Erregerverspätungen oder deren Wahrscheinlichkeiten sind größere Abweichungen der Rechenergebnisse möglich.

In den letzten Jahren ist versucht worden, die Bestimmung der zulässigen Länge der Warteschlange im Betrieb zu verfeinern. So werden im Programm KAPAZIT (ebenfalls am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen entwickelt) den verkehrenden Zuggattungen Rangziffern zugeordnet, in deren Abhängigkeit die zulässige Länge der Warteschlange für jede Zuggattung bestimmt wird. Eine niedrigere Rangziffer bedeutet hierbei eine kürzere zulässige Länge der Warteschlange. Werden die von KAPAZIT für die verschiedenen Zuggattungen vorgesehenen Rangziffern beibehalten, ergibt sich im Mischbetrieb die bereits aus STRELE bekannte zulässige Länge der Warteschlange.

Dieses Vorgehen wirft das Problem auf, dass durch das Zuordnen höherer Rangziffern die Leistungsfähigkeit einer Strecke scheinbar (in Wirklichkeit auf Kosten einer

verringerten Betriebsqualität) vergrößert werden kann, d.h. in gewissen Grenzen durch den Bearbeiter einer Streckenuntersuchung beeinflussbar ist.

Neuere Forschungsansätze verfeinern den ursprünglichen Ansatz der individuellen Bemessung von Pufferzeiten noch weiter. Von Kaminsky [KAMINSKY 2001] beispielsweise werden Pufferzeiten nicht nur für jeden einzelnen Zug, sondern sogar individuell für jeden Fahrwegabschnitt einer Zugfahrt bemessen. Der Schritt hin zur Angabe von Leistungsfähigkeiten wird jedoch nicht vollzogen, es wird lediglich eine Minimierung von Verspätungsübertragungen angestrebt und mittels Simulationen überprüft.

2.4 Bestimmung des optimalen Leistungsbereichs nach Hertel

Das von Hertel, dem damaligen Professor des Lehrstuhls für Verkehrsströmungslehre und -systemtheorie der TU Dresden Ende der achtziger bzw. Anfang der neunziger Jahre entwickelte Verfahren zur Ermittlung von Streckenleistungsfähigkeiten bestimmt im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Vorgehensweisen nicht eine auf einer Strecke zu fahrende optimale Zugzahl. Es geht statt dessen von einem optimalen Leistungsbereich aus, der durch die von Hertel so genannte „relative Fahrplanempfindlichkeit“ nach unten und die „Verkehrsleistung“ nach oben begrenzt wird.

Die relative Fahrplanempfindlichkeit $EMPF$ definiert Hertel als erste partielle Ableitung der mittleren Wartezeit eines Zuges nach dem Auslastungsgrad (Streckenbelegungsgrad) bezogen auf die mittlere Wartezeit [HERTEL 1992], wobei jedoch nur die Wartezeiten im Fahrplan berücksichtigt werden. Diese Funktion weist ein absolutes Minimum im Bereich von Belegungsgraden zwischen 0,4 und 0,6 auf.

$$EMPF = \frac{\partial EtW}{\partial \rho \cdot EtW}$$

mit EtW = Erwartungswert der Wartezeiten im Fahrplan [min]

Der in diesem Verfahren benutzte Erwartungswert der Verkehrsleistung EQ stellt eigentlich eine betriebliche statt einer verkehrlichen Größe dar, da auf beförderte Personen und Gütertonnen nicht eingegangen wird. Trotzdem soll hier die von Hertel gewählte Bezeichnung beibehalten werden. Gemäß der folgenden Gleichung ergibt sich der Erwartungswert der Verkehrsleistung aus dem Produkt aus mittlerer Beförderungsgeschwindigkeit v_b (wiederum nur unter Berücksichtigung der Wartezeiten im Fahrplan) und der mittleren Anzahl der gleichzeitig auf der zu betrachtenden Strecke verkehrenden Züge EL_b :

$$EQ = EL_b \cdot v_b$$

Die mittlere Anzahl gleichzeitig verkehrender Züge berechnet Hertel wie folgt:

$$EL_b = \frac{\sum t^F}{tU}$$

mit $\sum t^F =$ Summe aller Fahrzeiten ohne Wartezeiten [min]
 $tU =$ Bezugszeitraum [min]

Die mittlere Verkehrsleistung wird im Bereich von Belegungsgraden zwischen 0,6 und 0,8 maximal. Bei einer weiteren Steigerung der Zugzahlen nimmt durch das starke Abfallen der Beförderungsgeschwindigkeit infolge der überproportional ansteigenden Wartezeiten auch die mittlere Verkehrsleistung ab. Sie weist somit einen der Transportkraft (siehe Kapitel 2.6) sehr ähnlichen Verlauf auf, wobei jedoch die im Betrieb auftretenden Wartezeiten hier keine Berücksichtigung finden.

Ein Beispiel für den Verlauf der Funktionen der Verkehrsleistung und der relativen Fahrplanempfindlichkeit in Abhängigkeit des Streckenbelegungsgrades auf einer von Hertel untersuchten Strecke zeigt Bild 1. Darüber hinaus sind auch die Verläufe der Beförderungsgeschwindigkeit, der Anzahl der gleichzeitig verkehrenden Züge und des Erwartungswertes der Wartezeiten eingetragen. Die relative Fahrplanempfindlichkeit nimmt bei einem Belegungsgrad von 0,4716 ein Minimum an, während die Verkehrsleistung bei einem Belegungsgrad von 0,75 maximal wird. Zwischen diesen Grenzen liegt somit der optimale Leistungsbereich der untersuchten Strecke.

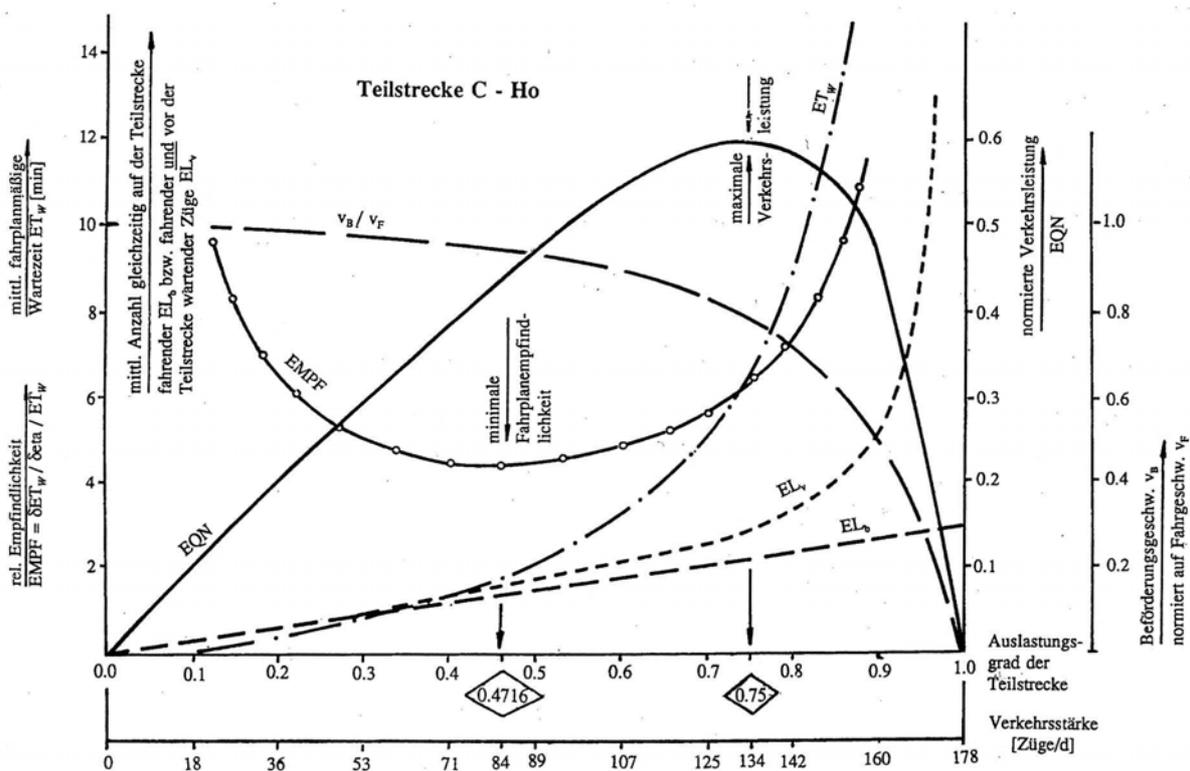


Bild 1: Ergebnisse einer Leistungsfähigkeitsuntersuchung nach dem Verfahren von Hertel [HERTEL 1992]

Die exakte Angabe einer optimalen Streckenauslastung ist mit diesem Verfahren nicht möglich. Hertel gibt jedoch an, dass die Streckenauslastung nach betrieblichen Erfahrungen eher an der unteren Grenze des so ermittelten optimalen Leistungsbereiches liegen sollte [HERTEL 1992].

2.5 Die Leistungsfähigkeit als Maximum der Gewinnlinse

Bereits in den fünfziger und sechziger Jahren ist versucht worden, verstärkt auch wirtschaftliche Kriterien in die Leistungsfähigkeitsbetrachtungen von Eisenbahnstrecken mit einfließen zu lassen. So wurden von Nebelung [NEBELUNG 1961] wirtschaftliche Zugeschwindigkeiten bestimmt, die sich aufgrund der verwendeten Triebfahrzeuge, der Zugmischung und Zuganzahl ergaben. Hierbei wurde jedoch lediglich auf eine Minimierung der Kosten geachtet, während die Erlösseite nicht betrachtet wurde. Darüber hinaus bezogen sich die Untersuchungen nicht auf ganze Strecken, sondern auf Engpassabschnitte.

Mit dem in den letzten Jahren am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen entwickelten Verfahren der „Gewinnlinse“ wird jedoch eine optimale Streckenauslastung aufgrund rein betriebswirtschaftlicher Gesichtspunkte bestimmt. Die optimale Auslastung einer Strecke wird nach dieser Vorgehensweise bei derjenigen Zugzahl erreicht, die für das Verkehrsunternehmen den höchsten Gewinn liefert.

Dieses Gewinnmaximum entspricht der größten Differenz zwischen Erträgen und Gesamtkosten. Über die Zugzahl aufgetragen, verläuft die Funktion der Gesamtkosten überproportional, weil bei steigender Zugzahl die Wartezeiten und dementsprechend auch die zeitabhängigen Kosten überproportional zunehmen. Dagegen hat eine in gleicher Weise dargestellte Ertragskurve einen unterproportionalen Verlauf, da durch die zunehmenden Wartezeiten die Zahlungsbereitschaft der Reisenden abnimmt bzw. weniger Reisende die auf dieser Strecke verkehrenden Züge nutzen. Die „Gewinnlinse“ ist somit der Bereich zwischen den Schnittpunkten beider Kurven, in dem es möglich ist, eine Eisenbahnstrecke profitabel zu betreiben (vgl. Bild 2).

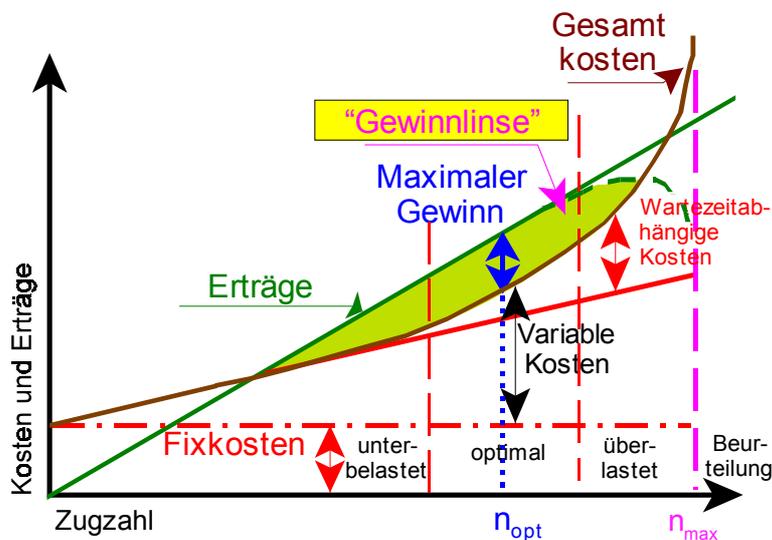


Bild 2: Prinzipdarstellung der Gewinnlinse [SCHWANHÄÜBER 1998]

Bei diesem Verfahren werden die Erlösminderungen je Verspätungsminute nach dem Ansatz von Ackermann [ACKERMANN 1996] bestimmt, während die Kosten nach festen Fahrwegkosten, zeitabhängigen Kosten einer Zugfahrt, laufwegabhängigen Kosten und Energiekosten untergliedert werden.

Eine diesem Verfahren sehr ähnliche Vorgehensweise wurde zu Beginn der neunziger Jahre von Paradissopoulos und Fotini entwickelt und auf die Strecke Athen –

Thessaloniki angewendet, wobei insbesondere auf die Schwierigkeiten der teils eingleisig, teils zweigleisig ausgebauten Strecke eingegangen wurde [PARADISSOPOULOS 1991].

Neben der mitunter schwierigen Ermittlung der einzelnen Kostenbestandteile und der vereinfachenden Annahme eines stets vorhandenen ausreichend großen Potenzials an Reisenden und zu transportierenden Gütern ist eine Bestimmung der Streckenleistungsfähigkeit mittels des Verfahrens der Gewinnlinie nicht immer ausreichend, da nicht auf allen Streckenabschnitten mit der wirtschaftlich optimalen Zugzahl gefahren werden kann. Der Streckenabschnitt vor einer Abzweigstelle muss beispielsweise relativ hoch belastet werden, um auf beiden Streckenteilen nach der Verzweigung ein marktgerechtes Zugangebot bereitstellen zu können. Obwohl es denkbar wäre, eine optimale Gesamtzugzahl für alle Streckenteile zu ermitteln, kann damit noch nicht garantiert werden, dass die ermittelte Anzahl an Zugfahrten überall ohne nicht hinnehmbare Behinderungen abgewickelt werden kann.

2.6 Die Transportkraft als Messgröße der Leistungsfähigkeit

Mit dem ebenfalls Ende der neunziger Jahre an der RWTH Aachen entstandenen Forschungsansatz der so genannten „Transportkraft“ (vgl. [OETTING 2000]) sollen Streckenleistungsfähigkeiten betriebswissenschaftlich, aber ohne Rückgriff auf empirisch ermittelte Faktoren bestimmt werden. Grundlage für diesen Ansatz ist die Gleichung zur Bestimmung der Schubkraft F_s eines Raketenmotors. Diese Kraft ist von der Masse m der pro Zeiteinheit t ausgestoßenen Gasmenge und der Ausströmgeschwindigkeit v der Gase aus der Schubdüse abhängig:

$$F_s = \frac{m \cdot v}{t}$$

Übertragen auf den Eisenbahnbetrieb wird für das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit die Summe der Produkte aus Anzahl, Masse und Beförderungsgeschwindigkeit einschließlich aller Wartezeiten über alle im Betrachtungszeitraum verkehrenden Züge eingesetzt, wobei zur Vereinfachung der Rechnung gleichartige Züge (gleiches Rollmaterial, gleiche Laufwege) zu Modellzugfamilien zusammengefasst werden. Im Gegensatz zur von Hertel verwendeten Verkehrsleistung (siehe

Kap. 2.4) erfolgt somit über die Modellzugmassen eine zusätzliche Gewichtung der einzelnen Züge gegeneinander. Zur Berechnung der nun nicht mehr Schub-, sondern Transportkraft genannten Größe werden meist modellzugspezifische Beförderungsgeschwindigkeiten verwendet, um zum einen einem Informationsverlust durch Mittelbildungen vorzubeugen und zum anderen eine möglicherweise unterschiedliche Gewichtung der Modellzüge bei der Berechnung einer mittleren Beförderungsgeschwindigkeit und der Transportkraft zu vermeiden.

Die so definierte Funktion zur Bestimmung der Transportkraft steigt mit zunehmender Zugzahl aufgrund der größer werdenden Zugmassen zunächst an, wegen der überproportional wachsenden Wartezeiten erreicht sie jedoch einen Maximalwert, nach dessen Überschreitung sie relativ schnell abfällt. Der Maximalwert stellt die optimale Streckenauslastung nach diesem Verfahren dar.

Der Ansatz in seiner ursprünglichen Form berücksichtigt nicht, dass manche Modellzüge die zu betrachtende Strecke unter Umständen nicht auf voller Länge befahren. Daher wurde vom Verfasser ein Faktor zur Gewichtung unterschiedlich langer Laufwege eingeführt, nämlich das Verhältnis der Lauflänge s_i des Modellzuges i zur Gesamtlänge s der betrachteten Strecke [MUTHMANN 1999]. Damit erhält die Berechnungsformel für die Transportkraft folgendes Aussehen:

$$F_{Tr} = \frac{\sum_{i=1}^j (n_i \cdot m_i \cdot \frac{s_i}{tF_i + \sum tW_i} \cdot \frac{s_i}{s})}{tU}$$

- mit:
- n_i = Anzahl der Modellzüge in der Zugfamilie i
 - m_i = Masse des Modellzuges i [kg]
 - s_i = Lauflänge des Modellzuges i [m]
 - tF_i = Fahrzeit (inkl. planmäßiger Halte) des Modellzuges i [s]
 - $\sum tW_i$ = Summe aller Wartezeiten des Modellzuges i [s]
 - s = Länge der untersuchten Strecke [m]
 - tU = Bezugszeitraum [s]

Auch nach dieser Modifikation liefert der Ansatz in aller Regel sehr große Leistungswerte, die als Obergrenze einer stabilen Betriebsführung unter Inkaufnahme erheb-

licher Behinderungen, nicht jedoch als allgemein verkehrlich optimale Streckenauslastung angesehen werden können. Schon bei Hertel war die der Transportkraft ähnliche Verkehrsleistung als obere Grenze des optimalen Leistungsbereiches angesehen worden; bereits dort war empfohlen worden, die Streckenbelastung eher in der Nähe des unteren Grenzwertes (der Fahrplanempfindlichkeit) zu wählen.

In Bild 3 ist beispielhaft für die Strecke Ulm – Stuttgart der im Rahmen dieser Arbeit zu Vergleichszwecken ermittelte Verlauf der Transportkraft in Abhängigkeit der Zugzahl dargestellt. Der Maximalwert der Transportkraft wird bei etwa 215 Zügen erreicht. Diese Zugzahl ist beinahe doppelt so hoch wie die gegenwärtige Streckenbelastung (vgl. Kapitel 3.4.1), die Vergleichszahlen aus STRELE werden sogar um mehr als das Doppelte übertroffen.

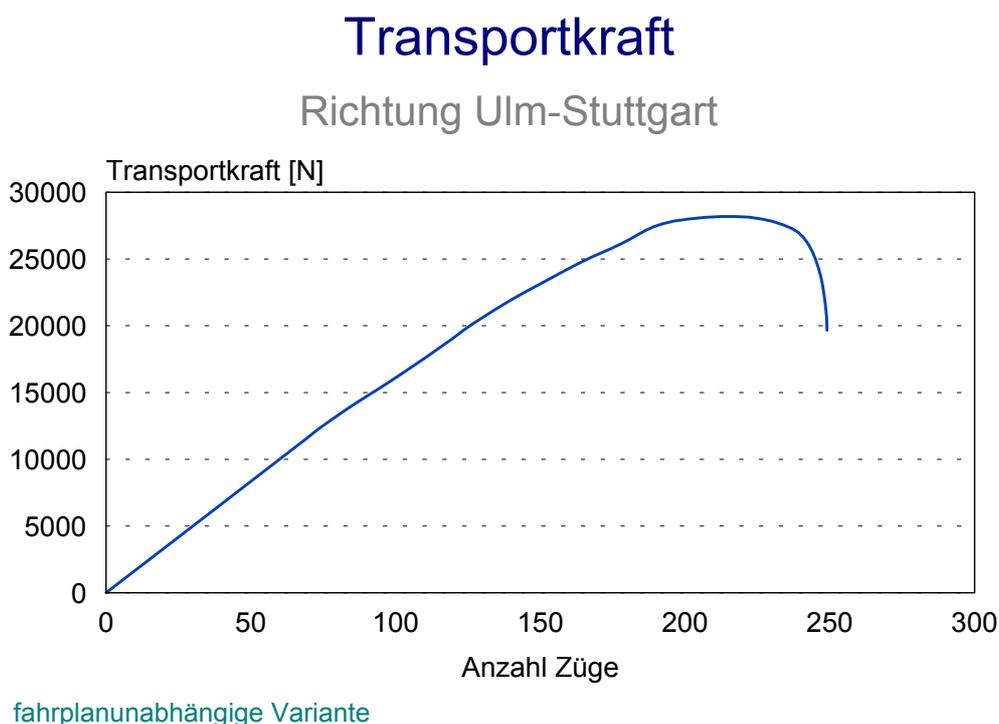


Bild 3: Transportkraft in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Ulm – Stuttgart, fahrplanunabhängige Variante

Der Ansatz der Transportkraft ist von empirisch zu ermittelnden Werten frei und erfordert keine umfangreiche Neuerhebung von Daten. Diese Vorteile sollen bei der Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Bestimmung von optimalen Streckenauslastungen erhalten werden. Zur Ermittlung genauer Ergebnisse ist jedoch die Bestimmung zusätzlicher bzw. veränderter Einflussfaktoren notwendig, die im Kapitel 3.1 (Entwicklung des neuen Ansatzes) erfolgt.

3 Beschreibung des neuen Ansatzes zur Leistungsfähigkeitsermittlung zweigleisiger Strecken

3.1 Entwicklung des Ansatzes

Ziel des zu entwickelnden Ansatzes ist die Optimierung der Streckenauslastung sowohl unter quantitativen als auch unter qualitativen Gesichtspunkten. Quantitative Messgröße ist hierbei der Streckendurchsatz, d.h. die in einem Bezugszeitraum gefahrene Zugzahl. Als Qualitätsmaßstab wird die Beförderungsgeschwindigkeit der Züge verwendet. Durchsatz und Beförderungsgeschwindigkeit stehen hierbei in Konkurrenz zueinander, da ein hoher Streckendurchsatz wegen der wachsenden gegenseitigen Behinderungen der Züge zu kleineren Beförderungsgeschwindigkeiten führt.

Zur Berücksichtigung der quantitativen und qualitativen Aspekte wird als Kerngröße des neuen Ansatzes das Produkt aus Streckendurchsatz und Beförderungsgeschwindigkeit verwendet. Dieser Wert wird im Folgenden als Streckendurchsatzleistung *SDL* bezeichnet. Physikalisch treffender wäre aufgrund der sich ergebenden Einheit und der verwendeten Einflussfaktoren zwar der Begriff „Streckendurchsatzgeschwindigkeit“, aus Gründen der besseren Vorstellbarkeit wird jedoch der Bezeichnung Streckendurchsatzleistung der Vorzug gegeben.

Eine Gewichtung der Züge durch ihre Zugmassen wie beim Verfahren der Transportkraft erfolgt in diesem Ansatz nicht. Aus eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Sicht erscheint eine solche Gewichtung nicht sinnvoll, da verschiedene Zugmassen keinen direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit einer Strecke haben. Die zur Beschleunigung und zur Überwindung der höheren Strecken- und Laufwiderstände schwererer Züge erforderlichen größeren Zugkräfte können durch eine stärkere Bespannung bereitgestellt werden. Darüber hinaus hat sich im Rahmen der für diese Arbeit durchgeführten und am Fachgebiet dokumentierten Untersuchungen gezeigt, dass eine Gewichtung der Züge über die Zugmassen die ermittelten optimalen Streckenauslastungen kaum verändert. Die Streckendurchsatzleistung ist somit eine betriebliche Messgröße, die eine durch die Verwendung der Zugmassen bedingte Vermischung verkehrlicher und betrieblicher Aspekte vermeidet.

Der neue Ansatz kann sowohl fahrplanabhängig als auch fahrplanunabhängig genutzt werden. Beim fahrplanabhängigen Verfahren können die verkehrenden Züge

und die Zugfolgefälle einem bestehenden oder für die Zukunft geplanten Bildfahrplan entnommen werden, während beim fahrplanunabhängigen Verfahren von einer zufälligen Reihung der Zugfolgefälle ausgegangen wird. Das fahrplanunabhängige Verfahren kommt dann zur Anwendung, wenn nur das Betriebsprogramm für eine zu untersuchende Strecke feststeht (z.B. weil deren Nutzung stark verändert werden soll oder die Strecke neu gebaut wurde) oder der Betriebsablauf derart vom Fahrplan abweicht, dass von einer annähernd zufälligen Reihung der Zugfahrten ausgegangen werden kann. In den übrigen Fällen bietet sich das fahrplanabhängige Vorgehen an.

Die aus anderen Verfahren (z.B. STRELE) bekannte Einteilung der verkehrenden Züge in Modellzugklassen wird für den neuen Ansatz übernommen, die gesamte Streckendurchsatzleistung ergibt sich durch die Summation der Einzelwerte der Modellzugklassen. Auch der vom Verfasser eingeführte Faktor zur Berücksichtigung unterschiedlich langer Laufwege der verschiedenen Modellzugklassen (vgl. Kap. 2.6 und [MUTHMANN 1999]) wird beibehalten. Damit ergibt sich folgender Ansatz zur Berechnung der Streckendurchsatzleistung SDL :

$$SDL = \frac{\sum_{i=1}^j (n_i \cdot \frac{s_i}{tF_i + \sum tW_i} \cdot \frac{s_i}{s})}{tU}$$

Wird anstelle der Transportkraft die Streckendurchsatzleistung über die Zugzahl aufgetragen, ergibt sich ein dem Bild 3 grundsätzlich ähnlicher Verlauf, jedoch hängt die Gewichtung der Züge nicht mehr von ihren Massen ab. Auch weiterhin weist der Kurvenverlauf ein Maximum auf, das eine sehr günstige Kombination aus gefahrener Zugzahl (quantitativer Aspekt) und Beförderungsgeschwindigkeit (Qualitätsmaßstab) und damit nach diesem Verfahren die optimale Streckenauslastung darstellt.

Die dargestellte Gleichung bezieht jedoch vorhandene Reserven (Pufferzeiten) nicht bzw. kaum in die Berechnung mit ein, solange auf der Strecke keine oder nur geringe Wartezeiten auftreten. Somit können sich für Strecken, die mit unterschiedlicher Auslastung betrieben werden, bis zu einem gewissen Punkt sehr ähnliche Streckendurchsatzleistungen ergeben. Es kann aber kein Zweifel daran bestehen, dass der Belegungsgrad bzw. die verfügbaren Pufferzeiten bei der Berechnung der optimalen Streckenauslastung nicht unberücksichtigt gelassen werden dürfen.

Die Berücksichtigung der durch größere Pufferzeiten verbesserten Betriebsqualität macht es daher erforderlich, eine weitere Größe zur Ermittlung der Streckendurchsatzleistung heranzuziehen. Diese Notwendigkeit hat sich auch bei allen für diese Arbeit durchgeführten Streckenuntersuchungen gezeigt, da die Anwendung des bisher beschriebenen Ansatzes zu deutlich zu optimistischen Ergebnissen führt. Als weitere Einflussgröße bietet sich hierfür der Streckenbelegungsgrad an, der als Produkt aus der Anzahl der auf einer Strecke verkehrenden Züge und der mittleren Mindestzugfolgezeit, geteilt durch den Bezugszeitraum, definiert ist:

$$\rho = \frac{n \cdot tZ_m}{tU}$$

mit n = Zahl aller Züge, die den Streckenabschnitt befahren
 tZ_m = mittlere Mindestzugfolgezeit [min]

Die Mindestzugfolgezeiten werden hierbei für jeden Zugfolgefall zwischen allen aufeinander folgenden Überholungsmöglichkeiten der jeweils betrachteten Strecke bestimmt, wobei die größten Werte maßgebend werden.

Teilt man in dieser Darstellung für ρ Zähler und Nenner durch die Zugzahl n , stellt sich der Streckenbelegungsgrad als Verhältnis aus mittlerer Mindestzugfolgezeit und mittlerem zeitlichem Abstand der Zugfahrten dar, der sich wiederum aus der Addition der mittleren Mindestzugfolgezeit und der mittleren Pufferzeit ergibt:

$$\rho = \frac{tZ_m}{tZ_m + tP_m}$$

Diese Gleichung für den Streckenbelegungsgrad zeigt besonders deutlich, dass er nur Werte zwischen Null (keine Zugfahrten oder „unendlich“ große Pufferzeiten) und Eins (keine Pufferzeiten) annehmen kann.

Bei einstelligen Bedienungssystemen – ein Streckengleis ist ein solches einstelliges Bedienungssystem, da eine Bedienung, d.h. eine Zugfahrt auf einem Streckengleis, bis zur nächsten Überholungsmöglichkeit jede andere Zugfahrt ausschließt – und zufälligem Auftreten von Bedienungswünschen gibt der Belegungsgrad zugleich die

Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Element nicht ohne Behinderung bedient werden kann. Eine Behinderung bedeutet hierbei das Auftreten einer Wartezeit. Dementsprechend kann mit der Gegenwahrscheinlichkeit $1-\rho$ ein Element ohne Wartezeit bedient werden, so dass sich dieser Wert unter der Randbedingung der zufällig auftretenden Fahrtwünsche als Maß für die mehr oder weniger zeitgerechte Bedienung eines Fahrtwunsches darstellt. Zur Berücksichtigung dessen wird daher der zusätzliche Faktor $1-\rho$ in die ursprüngliche Formel zur Berechnung der Streckendurchsatzleistung eingefügt. Die Bestimmung der maximalen Streckendurchsatzleistung ist somit eine Optimierung nach Zugzahl, Beförderungsgeschwindigkeit und zeitgerechter Bedienung der Fahrtwünsche. Im Gegensatz zu anderen getesteten Ansätzen hat dieses Vorgehen – kombiniert mit den nachfolgend beschriebenen Maßnahmen – im Rahmen der für diese Arbeit durchgeführten Untersuchungen auch bei nicht zufällig auftretenden Fahrtwünschen die in den folgenden Kapiteln dokumentierten realitätsnahen Ergebnisse geliefert. Es liegt daher den weiteren Ausführungen zugrunde.

$$SDL = \frac{\sum_{i=1}^j (n_i \cdot \frac{s_i}{tF_i + \sum tW_i} \cdot \frac{s_i}{s})}{tU} \cdot (1 - \rho)$$

Anschaulich kann der neu eingefügte Faktor $1-\rho$ auch als das Verhältnis aus mittlerer Pufferzeit und mittlerem zeitlichem Abstand der verkehrenden Züge angesehen werden. Die auf einer Strecke vorhandenen Pufferzeiten werden somit direkt bei der Ermittlung der Streckendurchsatzleistung berücksichtigt. In der Literatur, z.B. bei Potthoff [POTTHOFF 1968], wird dieser Faktor teilweise auch als Puffergrad bezeichnet, dort jedoch nicht für weitere Berechnungen verwendet.

$$1 - \rho = \frac{tZ_m + tP_m}{tZ_m + tP_m} - \frac{tZ_m}{tZ_m + tP_m} = \frac{tP_m}{tZ_m + tP_m}$$

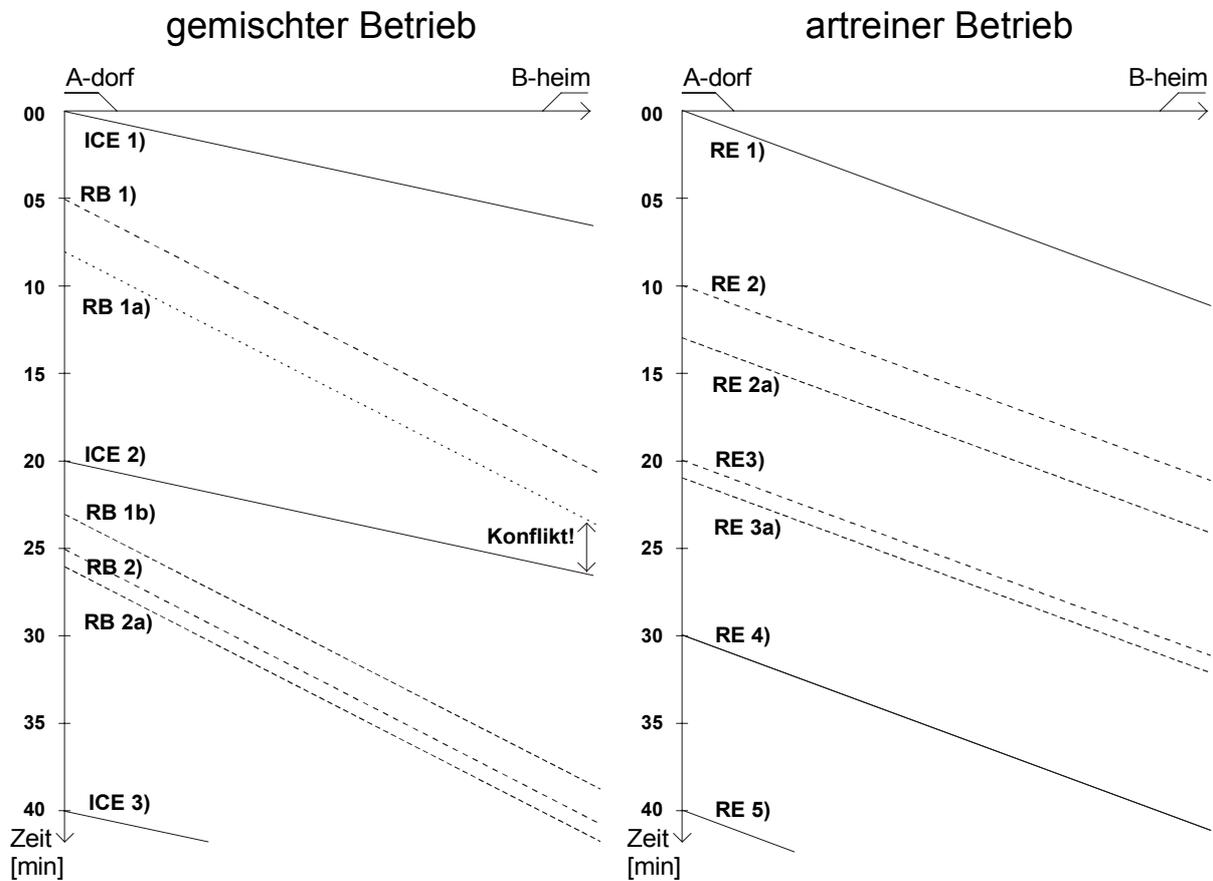
Durch den zusätzlichen Faktor $1-\rho$ sinkt die Streckendurchsatzleistung bei großen Belegungsgraden, d.h. kleinen Pufferzeiten, deutlich schneller ab, bei einem Belegungsgrad von 1 sogar bis auf den Wert 0. Zwar ist weiterhin ein Durchsatz an Zügen vorhanden, aufgrund des unbegrenzten Staus vor der betrachteten Strecke und der daher auch „unendlich“ großen Wartezeiten ist jedoch kein geordneter Eisenbahnbetrieb mehr möglich, so dass dieses Ergebnis gerechtfertigt werden kann.

Vom Verfasser [MUTHMANN 1999] wurde eine vergleichbare Modifikation der Berechnungsformel für die Transportkraft durchgeführt und auf eine mit verschiedenen Zugarten im Mischbetrieb befahrene Beispielstrecke angewendet. Wie weiter gehende, am Fachgebiet dokumentierte Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit gezeigt haben, können die dort gewonnenen Ergebnisse jedoch nicht auf andere Strecken und deren Betriebsverhältnisse übertragen werden. Insbesondere bei nicht zufälligem Auftreten der Fahrtwünsche (z.B. bei artreinem Betrieb) werden ungenaue, in der Regel zu niedrige Ergebnissen erreicht. Daher sind weitere Modifikationen des Ansatzes erforderlich.

Bei Strecken, die im gemischten Betrieb befahren werden, sind zur Berücksichtigung des Vorrangs der hochwertigen Züge bei großen Zugzahlen Überholungen erforderlich. Neben den bereits im Fahrplan vorgesehenen Überholungen müssen niederrangige Züge im Falle von Verspätungen auch außerplanmäßig überholt werden. Zwar können dadurch vielfach planmäßige Überholungen entfallen, da aber nur Güterzüge „vor Plan“ gefahren werden dürfen (und dies auch nur dann, wenn sie dadurch planmäßige Züge nicht wesentlich aufhalten), fallen insbesondere bei niederrangigen Personenzügen außerplanmäßige Wartezeiten an. Bei artreinem Betrieb hingegen verursacht die Verspätung eines Zuges in der Regel nur geringe Wartezeiten für die folgenden Züge. Überholungen sind hier höchstens im Falle technischer Defekte eines Zuges erforderlich. Eine dadurch gegebene bessere Betriebsqualität wird bisher nur über die verringerten Wartezeiten erfasst, die jedoch erst bei sehr großen Zugzahlen einen erheblichen Einfluss auf das Rechenergebnis haben.

Dieser Unterschied zwischen gemischtem und artreinem Betrieb soll anhand des folgenden Bildes beispielhaft verdeutlicht werden: Im Mischbetrieb (Bild 4 links) wird für das Streckengleis A-dorf – B-heim von einem Betriebsprogramm mit zwei Zugarten ausgegangen, die abwechselnd die Strecke befahren. Als Mindestzugfolgezeit zwischen einem schnellen Fernverkehrszug, z.B. einem ICE, und einer langsamen Regionalbahn (RB) werden in diesem Beispiel aufgrund eines relativ leistungsfähigen Blocksystems drei Minuten angesetzt. Für den Zugfolgefall Regionalbahn – ICE ergibt sich wegen der unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten eine deutlich längere Mindestzugfolgezeit. In diesem Beispiel wird mit einem Wert von 13 Minuten gerechnet. Die aufgrund des vorhandenen Fahrplans berechnete

mittlere Mindestzugfolgezeit beträgt somit acht Minuten. Zwischen allen Zugfahrten wird eine geringe Pufferzeit von zwei Minuten vorgesehen.



- ICE 1) planmäßige Lage des ersten ICE
- RB 1) planmäßige Lage der ersten RB
- RB 1a) theoretische Lage der ersten RB
(drei Minuten verspätet)
- ICE 2) planmäßige Lage des zweiten ICE
- RB 1b) tatsächliche Lage der ersten RB
- RB 2) planmäßige Lage der zweiten RB
- RB 2a) tatsächliche Lage der zweiten RB
- ICE 3) planmäßige Lage des dritten ICE

- RE 1) planmäßige Lage des ersten RE
- RE 2) planmäßige Lage des zweiten RE
- RE 2a) tatsächliche Lage des zweiten RE
(drei Minuten verspätet)
- RE 3) planmäßige Lage des dritten RE
- RE 3a) tatsächliche Lage des dritten RE
- RE 4) planmäßige Lage des vierten RE
- RE 5) planmäßige Lage des fünften RE

Bild 4: Schematischer Ausschnitt des Bildfahrplans für eine Beispielstrecke mit gemischtem bzw. artreinem Betrieb

Verkehrt die erste Regionalbahn nicht in ihrer planmäßigen Lage RB 1), sondern mit einer Verspätung von drei Minuten (Lage RB 1a)), ergibt sich kurz vor dem Bahnhof B-heim ein Konflikt mit dem nachfolgenden ICE. Da ein schneller Zug aufgrund einer Behinderung größere Fahrzeitverluste erleidet und der Fernverkehr in aller Regel

Vorrang vor dem Nahverkehr hat, muss der langsamere Zug somit im Bahnhof A-dorf zurückgehalten und dort durch den ICE überholt werden. Dadurch kann er erst in der Zeitlage RB 1b) verkehren. Unter der Annahme, dass die Mindestzugfolgezeit zwischen zwei langsamen Zügen ebenfalls drei Minuten beträgt, wird auch eine geringfügige Verspätung (eine Minute) auf die nachfolgende Regionalbahn übertragen, die dadurch von der planmäßigen Lage RB 2) in die Zeitlage RB 2a) verdrängt wird.

Bei artreinem Betrieb, z.B. mit mittelschnellen Regionalexpresszügen (Bild 4 rechts), ergeben sich trotz sonst gleicher Bedingungen (gleiche Pufferzeit, gleiche mittlere Mindestzugfolgezeit) andere, geringere Auswirkungen. Die Verspätung eines Regionalexpress (RE) von drei Minuten (Zeitlage RE 2a) statt RE 2)) führt lediglich zu einer Verschiebung des nachfolgenden Zuges um eine Minute von der Lage RE 3) in die Lage RE 3a). Weitere Wartezeiten oder Überholungen treten nicht auf.

Wenige zusätzliche Überholungen beeinflussen jedoch insbesondere bei langen Streckenabschnitten die Streckendurchsatzleistung in ihrer bisherigen Form nur geringfügig, da die zugehörigen Wartezeiten gegenüber den planmäßigen Beförderungszeiten dann kaum ins Gewicht fallen. Um die durch den artreinen Betrieb unter sonst gleichen Umständen verbesserte Betriebsqualität zu berücksichtigen, sollte daher ein weiterer Parameter in die Berechnung der Streckendurchsatzleistung einbezogen werden. Als Maß für die Verschiedenartigkeit der auf einer Strecke verkehrenden Züge kann hierbei der Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten dienen, der als der Quotient aus Standardabweichung der Mindestzugfolgezeiten und mittlerer Mindestzugfolgezeit definiert ist. Bei vollkommen artreinem Betrieb der Strecke (Standardabweichung der Mindestzugfolgezeiten gleich Null) ergibt sich somit auch ein Variationskoeffizient von Null, während bei Strecken mit gemischtem Betrieb entsprechend größere Werte erreicht werden.

Größere Unterschiede in den Reisezeiten verschiedener Zugarten und damit eine größere Zahl von zu erwartenden Überholungen untereinander können jedoch auch trotz ähnlicher Mindestzugfolgezeiten auftreten. Dies kann zum Beispiel dann der Fall sein, wenn eine Strecke mit einer relativ großen Zahl von Überholungsbahnhöfen von zwei ähnlichen Zugarten befahren wird, die sich aber durch die Anzahl der Haltebahnhöfe unterscheiden. Dies bewirkt, dass die Fahrzeiten der beiden Züge

(und damit näherungsweise auch die Mindestzugfolgezeiten) zwischen zwei Bahnhöfen nur um die Anfahr- und Bremszeitzuschläge des öfter haltenden Zuges voneinander abweichen. Die Fahrzeiten auf der Gesamtstrecke differieren jedoch aufgrund der zusätzlichen Halte deutlich stärker, so dass trotz ähnlicher Mindestzugfolgezeiten kein annähernd artreiner Betrieb unterstellt werden kann. Daher wird im neuen Ansatz neben dem Variationskoeffizienten der Mindestzugfolgezeiten auch der Variationskoeffizient der Reisegeschwindigkeiten der Modellzüge auf der Strecke berücksichtigt.

Trotz gleicher oder ähnlicher Geschwindigkeiten sind auch Fälle denkbar, bei denen sich deutliche Unterschiede in den Mindestzugfolgezeiten zeigen. Dies ist beispielsweise dann möglich, wenn auf einer mit Linienzugbeeinflussung (LZB) ausgerüsteten Strecke sowohl LZB-taugliche als auch nicht LZB-taugliche Züge verkehren. Züge, die nicht mit den Einrichtungen der LZB ausgestattet sind, müssen auch auf solchen Strecken weiterhin durch konventionelle Signale geführt werden. Diese werden für LZB-geführte Züge dunkelgeschaltet, um Widersprüche mit der LZB-Signalisierung zu vermeiden. Auf derartig ausgerüsteten Strecken, wie z.B. auf den Neubaustrassen Hannover – Würzburg oder Mannheim – Stuttgart, weisen die konventionellen Signalsysteme gegenüber der LZB relativ große Längen der Zugfolgeabschnitte auf. Dadurch ergeben sich für die nicht von der LZB geführten Züge deutlich größere Mindestzugfolgezeiten.

Bild 5 zeigt die Abfolge von Zugfahrten mit und ohne Linienzugbeeinflussung auf Strecken, deren konventionelle Blocklängen größer sind als die Blocklängen der LZB. Zum Zeitpunkt 1 befährt ein durch die LZB geführter Zug einen konventionellen Block der Strecke, der wiederum in drei LZB-Blöcke eingeteilt ist. Da der Block komplett frei ist, zeigt das ihn deckende Hauptsignal „Fahrt“. Zum Zeitpunkt 2 ist der Zug in den ersten LZB-Block eingefahren, das Hauptsignal zeigt für den folgenden, ebenfalls durch die LZB geführten Zug „Halt“, da sowohl der konventionelle Blockabschnitt als auch der erste LZB-Block belegt sind. Zum Zeitpunkt 3 kann der zweite Zug am nun dunkel geschalteten Hauptsignal vorbeifahren, da der erste LZB-Block durch den vorausfahrenden Zug geräumt ist. Für einen zum Zeitpunkt 4 folgenden konventionellen Zug kann das Hauptsignal jedoch auch dann nicht dunkel geschaltet werden, wenn der erste oder die ersten beiden LZB-Blöcke frei sind

(Zeitpunkt 5). Es zeigt solange „Halt“, bis der konventionelle Blockabschnitt komplett geräumt ist. Erst zum Zeitpunkt 6 kann der konventionell geführte Zug den nun freien konventionellen Block befahren. Ein zum Zeitpunkt 7 folgender, wiederum mit LZB ausgestatteter Zug muss jedoch nicht die vollständige Räumung des konventionellen Blockes abwarten, sondern kann bereits dann am wiederum dunkel geschalteten Hauptsignal vorbeifahren, wenn der erste LZB-Block frei ist.

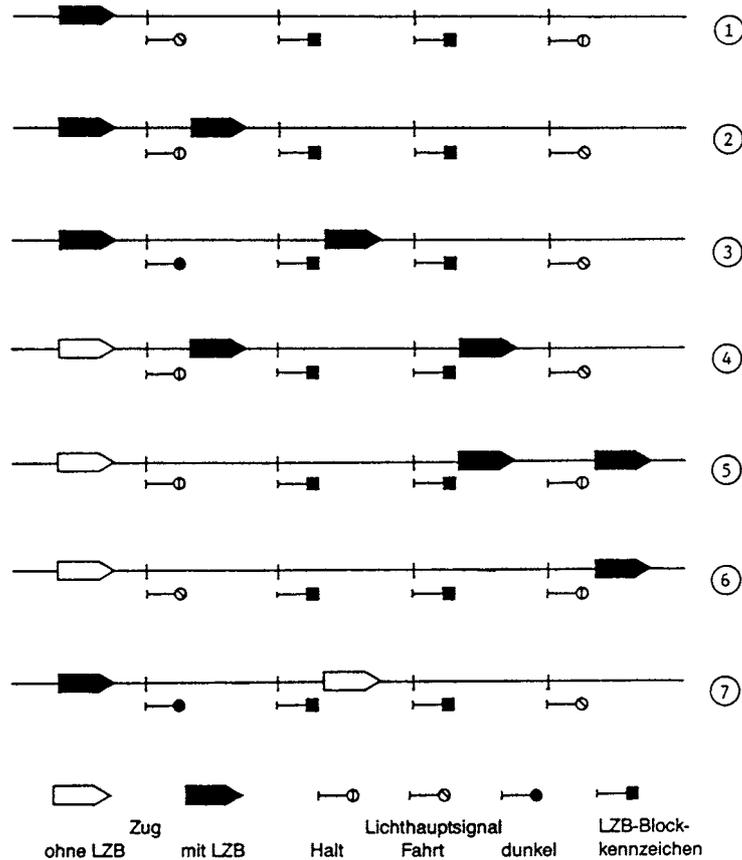


Bild 5: Folge von Zugfahrten mit und ohne Linienzugbeeinflussung [nach REICHARDT 1989]

Das Beispiel zeigt, dass auch hier trotz eventuell ähnlicher Geschwindigkeiten nicht von einem artreinen Betrieb der Strecke ausgegangen werden kann, was sich in entsprechend großen Variationskoeffizienten der Mindestzugfolgezeiten äußert.

Eine weitere Einflussgröße stellt auch die zeitliche Verteilung der Zugfahrten über den Bezugszeitraum dar. Bei einer gleichmäßigen Verteilung der Zugfahrten ist nämlich mit deutlich weniger Folgeverspätungen zu rechnen als bei einem Betriebsprogramm mit ausgeprägten Verkehrsspitzen, in dem über eine gewisse Zeit nur geringe oder gar keine Pufferzeiten zwischen den einzelnen Zugfahrten vorhanden

sind. Zu diesem Zweck wird auch der Variationskoeffizient des Belegungsgrades einer Strecke bestimmt und als weiterer zu berücksichtigender Parameter in die Leistungsfähigkeitsberechnung einbezogen. Dazu muss der Bezugszeitraum weiter untergliedert werden und für jeden der durch diese Untergliederung gewonnenen Teilzeiträume der jeweilige Belegungsgrad bestimmt werden, um die Standardabweichung des Belegungsgrades errechnen zu können.

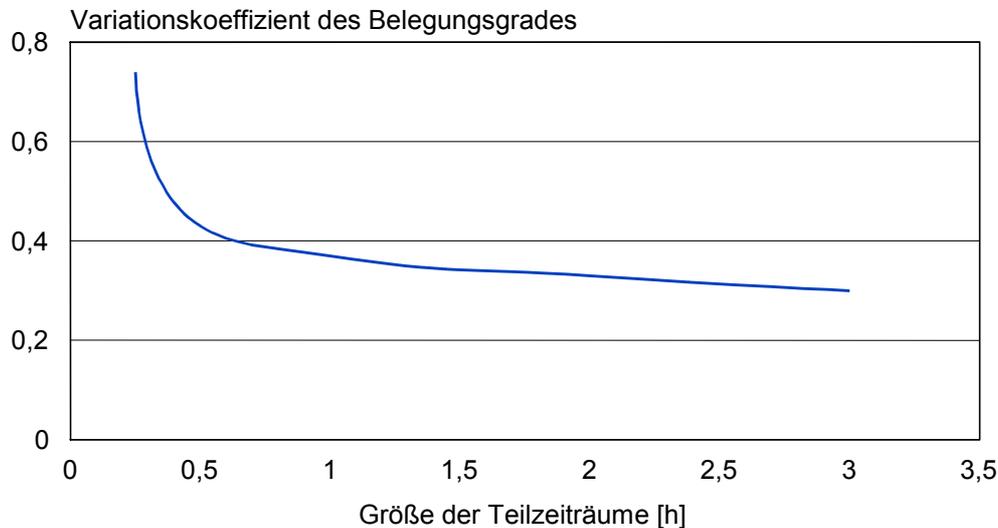
Hierbei beeinflusst die Untergliederung des Bezugszeitraumes das Rechenergebnis. Eine zu feine Untergliederung verursacht sehr große Schwankungen des Belegungsgrades in den einzelnen Teilzeiträumen. Ist die Größe der so entstehenden Teilzeiträume geringer als die Mindestzugfolgezeit eines Zugfalles, können sich sogar unplausible Ergebnisse (Belegungsgrade größer als eins) ergeben. Eine zu grobe Unterteilung des Bezugszeitraumes nivelliert dagegen die Unterschiede in der Streckenbelegung. Wird z.B. auf eine weitere Untergliederung des Bezugszeitraumes völlig verzichtet, sind Schwankungen des Belegungsgrades innerhalb des Bezugszeitraums nicht mehr messbar.

Die Streckenuntersuchungen im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, dass die zu betrachtenden Größen der Teilzeiträume sinnvollerweise den Wert von einer Stunde nicht unterschreiten sollten, da bei kürzeren Zeiträumen der Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades zu starken Schwankungen durch einzelne Zugfahrten ausgesetzt ist (vgl. Bild 6). Das Verfahren sollte jedoch ermöglichen, für möglichst kurze Zeiträume („Spitzenstunde“) Aussagen über den Belegungsgrad zu treffen, um den Einfluss von Verkehrsspitzen möglichst genau abbilden zu können.

Bei Größen der Teilzeiträume von mehr als einer Stunde nimmt der Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades nur noch sehr langsam ab (vgl. Bild 6). Dieser für die Strecke Ulm – Stuttgart beispielhaft gezeigte Verlauf des Variationskoeffizienten des Streckenbelegungsgrades ist auch für die übrigen untersuchten Strecken charakteristisch. Erst durch erheblich größere Teilzeiträume (größer als drei Stunden) wären somit maßgebliche Veränderungen des Ergebnisses der Leistungsfähigkeitsberechnung zu erwarten; Aussagen zu Verkehrsspitzen und –flauten würden jedoch stark erschwert. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher die Größe der Teilzeiträume auf den Wert von einer Stunde festgesetzt.

Variationskoeffizient des Belegungsgrades

Richtung Ulm-Stuttgart



fahrplanunabhängige Variante

Bild 6: Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades in Abhängigkeit der Größe der Teilzeiträume, Richtung Ulm – Stuttgart

Je stärker eine Eisenbahnstrecke durch Zugfahrten belegt ist, desto mehr machen sich auch große Variationen der Mindestzugfolgezeiten, der Geschwindigkeiten und des Belegungsgrades bemerkbar, da in solchen Fällen aufgrund der geringen zeitlichen Abstände der Zugfahrten die gegenseitigen Behinderungen der Züge zunehmen. Es erscheint daher sinnvoll, die Summe dieser Variationskoeffizienten als Exponent des Faktors $1-\rho$ in die Berechnung einzuführen:

$$SDL = \frac{\sum_{i=1}^j (n_i \cdot \frac{s_i}{tF_i + \sum tW_i} \cdot \frac{s_i}{s})}{tU} \cdot (1 - \rho)^{c \cdot (V_{IZ} + V_v + V_p)}$$

- mit V_{IZ} = Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten
 V_v = Variationskoeffizient der Geschwindigkeiten der Modellzüge
 V_p = Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades
 c = Gewichtungsfaktor der Variationskoeffizienten

Hierbei wird durch geringe Variationskoeffizienten der Einfluss des Puffergrades vermindert und durch große Variationskoeffizienten verstärkt. Diese Vorgehensweise ergibt in Übereinstimmung mit der Realität verschiedene Streckenleistungsfähigkeiten in Abhängigkeit der vorhandenen Zugmischung. Auch im Hinblick auf die Definition des Faktors $1-\rho$ als Wahrscheinlichkeit der behinderungsfreien Bedienung eines zufälligen Fahrtwunsches erweist sich der gewählte Ansatz als sinnvoll. Bei einer Angleichung von Mindestzugfolgezeiten, Geschwindigkeiten und Streckenbelegungsgraden kann von zufälligen Fahrtwünschen immer weniger gesprochen werden, bei völlig artreinem Betrieb mit starrem Taktfahrplan (alle betrachteten Variationskoeffizienten verschwinden) ist eine Zufallskomponente der Fahrtwünsche nicht mehr vorhanden. Dementsprechend bewirkt auch der gewählte Ansatz in diesem Falle eine Verminderung bzw. Elimination des Einflusses des Faktors $1-\rho$.

Andere denkbare Kombinationen von Puffergrad und Variationskoeffizienten führen zumindest in Randbereichen (sehr große oder sehr kleine Variationskoeffizienten) zu unrealistischen Ergebnissen. Ein modifizierter Quotient der Größen, beispielsweise

$$\frac{1-\rho}{1+V_{iZ}+V_v+V_p}$$

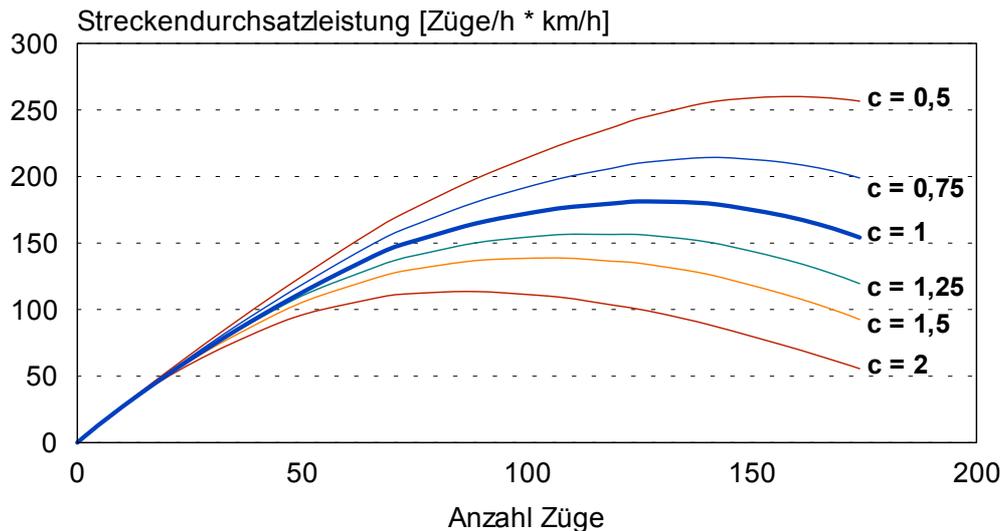
erscheint zwar nahe liegend, führt aber nicht unter allen Betriebsbedingungen zu realitätsnahen Ergebnissen. Wie sich beispielsweise bei der Untersuchung des Frankfurter S-Bahn-Tunnels (vgl. Kapitel 3.4.4) gezeigt hat, würde durch einen derartigen Ansatz die Streckendurchsatzleistung bei artreinem Betrieb deutlich zu stark abgemindert. Wie bereits angedeutet hat hier aufgrund der gleichen Geschwindigkeiten und der gleichen Mindestzugfolgezeiten der Faktor $1-\rho$ ein deutlich geringeren Einfluss als auf Strecken mit Mischbetrieb.

Von nicht zu vernachlässigendem Einfluss auf die Rechenergebnisse ist die richtige Wahl des Gewichtungsfaktors c zur Berücksichtigung der Bedeutung der verschiedenen Variationskoeffizienten für die Streckenleistungsfähigkeit. Zur Verdeutlichung dessen sind in Bild 7 beispielhaft die Funktionen der Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl und unter Berücksichtigung verschiedener Gewichtungsfaktoren c für die Strecke Ulm-Stuttgart aufgetragen. Die dick ausgezogene Linie

zeigt hierbei die Ergebnisse für den Gewichtungsfaktor mit dem Wert 1, mit dem bei allen für diese Arbeit durchgeführten Untersuchungen plausible Ergebnisse erzielt werden konnten und der daher im Folgenden verwendet wird.

Streckendurchsatzleistung

Richtung Ulm-Stuttgart



fahrplanunabhängige Variante, Variation des Faktors c

Bild 7: Abhängigkeit der Streckendurchsatzleistung vom Gewichtungsfaktor c

3.2 Ermittlung eines optimalen Leistungsbereiches

Mit dem bisher dargestellten Verfahren ist es möglich, für eine zu untersuchende Strecke in Abhängigkeit vom vorhandenen oder vorgesehenen Betriebsprogramm eine bestimmte Zugzahl anzugeben, bei der die optimale Streckenauslastung erreicht wird. Wie bei anderen mathematischen Verfahren (z.B. STRELE) üblich, soll auch hier davon ausgegangen werden, dass bei optimaler Streckenauslastung eine befriedigende Betriebsqualität erreicht wird. Das Streichen oder das zusätzliche Einlegen eines einzelnen Zuges führt aber in der Regel nicht zu erheblichen Verbesserungen oder Verschlechterungen der Betriebsqualität. Hierzu sind stärkere Veränderungen der Zugzahlen erforderlich. Daher bietet es sich an, statt einer festen Zugzahl einen „optimalen Leistungsbereich“ einer Strecke zu ermitteln, zwischen dessen oberem und unterem Grenzwert mit einer „eher befriedigenden“ Betriebsqualität gerechnet werden kann.

Zum Erreichen dieses Zieles wird in dieser Arbeit eine Kombination bisheriger, in mathematischen Programmen zur Leistungsfähigkeitsberechnung verwendeter Verfahren mit der Entscheidungsmethodik der „Fuzzy Logic“ vorgenommen. Die Fuzzy Logic bietet die Möglichkeit, unscharfe Zustände zu beschreiben, die sich nicht durch klar definierte Grenzen, sondern durch Übergangsbereiche untereinander auszeichnen. Diese Zustandsbeschreibung bedient sich so genannter „linguistischer Variablen“, die in ihrem Wertebereich verschiedene Zustände mit unterschiedlichen Zugehörigkeiten einnehmen können. Bild 8 zeigt die scharfe (oben) bzw. unscharfe (unten) Abgrenzung eines Zustandes, wobei die angegebenen Werte 30 und 80 als Beispiel zu verstehen sind.

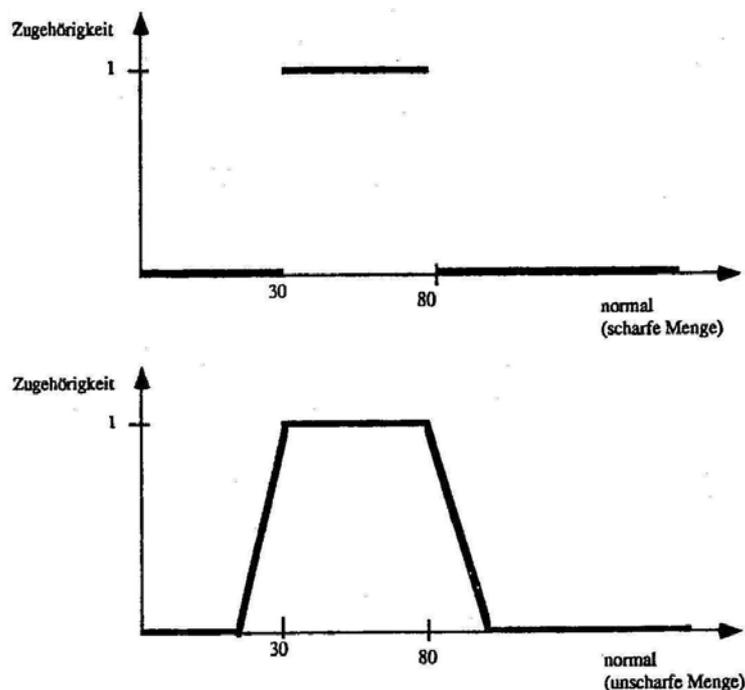


Bild 8: Zugehörigkeitsfunktionen bei scharfen und unscharfen Zuständen [KIRSCHFINK 1993]

Übertragen auf den Eisenbahnbetrieb kann somit die Betriebsqualität bei einer bestimmten Zugzahl mit einer gewissen Zugehörigkeit „sehr gut“ oder „befriedigend“ bzw. „befriedigend“ oder „mangelhaft“ sein. Sind neben der Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung zusätzlich die Zugzahlen bei sehr guter und mangelhafter Betriebsqualität bekannt (wie unten beschrieben, können sie über die Wartezeitsumme bei befriedigender Betriebsqualität sowie so genannte Qualitätsfaktoren berechnet werden) und können weiterhin Zugehörigkeitsfunktionen zu den einzelnen Zuständen definiert werden, dann ergibt sich ein Bereich der größten Zugehörigkeit

zur befriedigenden Betriebsqualität, der damit den optimalen Leistungsbereich der untersuchten Eisenbahnstrecke darstellt (vgl. Bild 9).

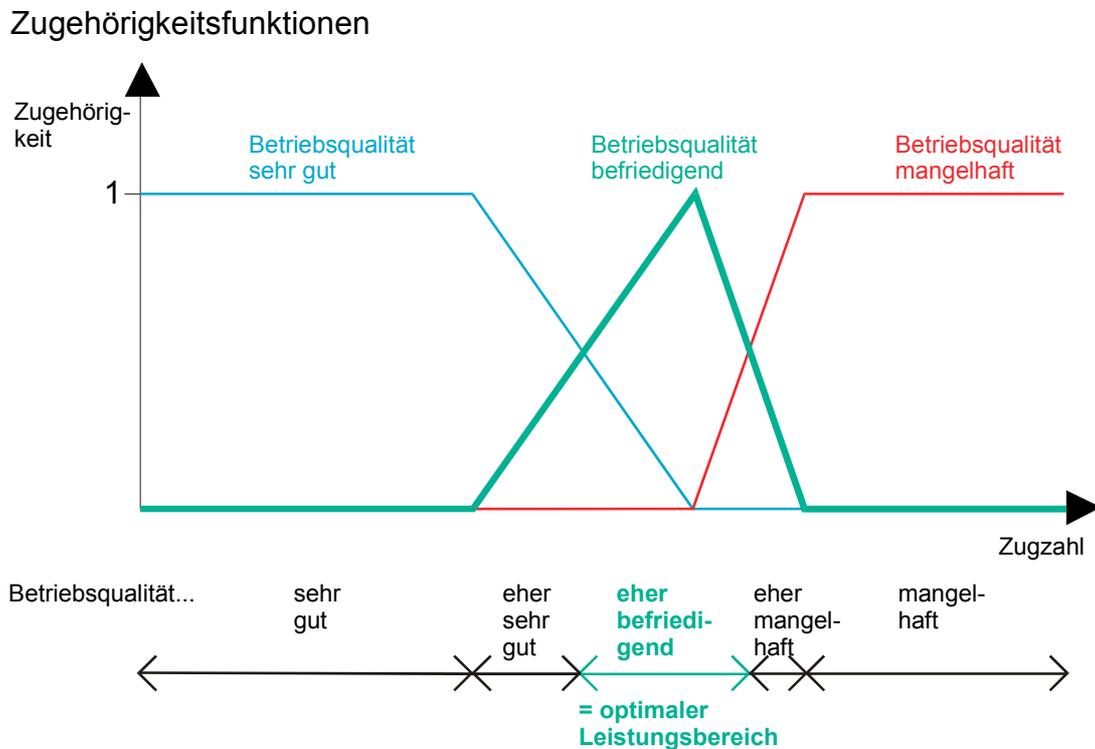


Bild 9: Zugehörigkeitsfunktionen zu verschiedenen Betriebsqualitäten

Die dick ausgezogene Kurve in Bild 9 zeigt hierbei die Zugehörigkeit zur befriedigenden Betriebsqualität. Sie erreicht den Höchstwert 1 (oder 100 %), wenn die Strecke mit optimaler Streckenauslastung betrieben wird. Bei Zugzahlen kleiner oder gleich derer für sehr gute Betriebsqualität (bzw. größer oder gleich derer für mangelhafte Betriebsqualität) nimmt sie den Wert 0 an, dazwischen liegen die Übergangsbereiche zwischen sehr guter und befriedigender bzw. zwischen befriedigender und mangelhafter Betriebsqualität. Entsprechend können die Verläufe der Zugehörigkeitsfunktionen für sehr gute und für mangelhafte Betriebsqualität erklärt werden. Die Verläufe der Zugehörigkeitsfunktionen zwischen der sehr guten, der befriedigenden und der mangelhaften Betriebsqualität werden in diesem Bild zunächst als linear angenommen. Bei jeder Zugzahl, auch in den Übergangsbereichen, ergänzen sich die Funktionswerte der Zugehörigkeitsfunktionen jeweils zu 1.

Nachdem mit dem in Kap. 3.1 vorgestellten Ansatz zunächst die Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung berechnet wurde, muss nun ein Verfahren gefunden werden, um auch die Zugzahlen bei sehr guter und mangelhafter Betriebsqualität zu

bestimmen. Hierzu kann auf die bereits im Programm STRELE benutzte Vorgehensweise zurückgegriffen werden, wonach zunächst die Wartezeiten bei sehr guter bzw. mangelhafter Betriebsqualität durch Multiplikation der Wartezeit bei optimaler Streckenauslastung mit so genannten Qualitätsfaktoren gewonnen wird. Diese Qualitätsfaktoren betragen gemäß STRELE bei sehr guter Betriebsqualität 0,5 bzw. bei mangelhafter Betriebsqualität 1,5. Daraufhin werden die Zugzahlen ermittelt, bei denen diese Wartezeiten erreicht werden. Anders als bei STRELE jedoch werden zur Ermittlung der optimalen Streckenauslastung nicht nur die Wartezeit, sondern alle im vorherigen Kapitel beschriebenen Faktoren herangezogen, so dass die so bestimmten Wartezeiten bei verschiedenen Streckenuntersuchungen in der Regel nicht gleich sind.

Wird diese Vorgehensweise zur Bestimmung der Zugzahlen bei sehr guter und bei mangelhafter Betriebsqualität genutzt, dann sollte auch der Verlauf der Zugehörigkeitsfunktionen in den Übergangsbereichen dem der Wartezeitfunktionen entsprechen. Das bedeutet, dass die ansteigenden Äste der Zugehörigkeitsfunktionen im selben Maße überproportional wachsen wie die Wartezeit im betrachteten Bereich, während die abfallenden Äste der Zugehörigkeitsfunktionen im selben Maße abnehmen wie die Wartezeit anwächst. Somit ergibt sich ein nichtlinearer Verlauf der Zugehörigkeitsfunktionen in den Übergangsbereichen (vgl. Bild 10), der im Einzelnen von der jeweils untersuchten Strecke abhängig ist. Beispielsweise können sich bei eingleisigen Strecken ab gewissen Zugzahlen steil ansteigende Verläufe der Wartezeitfunktion ergeben, wenn der Abstand der Kreuzungsbahnhöfe zur Abwicklung des vorgesehenen Betriebsprogramms zu groß wird. Trotzdem lässt sich der Bereich der größten Zugehörigkeit zur befriedigenden Betriebsqualität in jedem Fall relativ einfach bestimmen: Er beginnt im Schnittpunkt der Zugehörigkeitsfunktionen zu sehr guter bzw. befriedigender Betriebsqualität (bei 75 % der Wartezeiten, die bei optimaler Streckenauslastung erreicht werden) und endet im Schnittpunkt der Zugehörigkeitsfunktionen zu befriedigender bzw. mangelhafter Betriebsqualität (125 % der Wartezeiten bei optimaler Streckenauslastung).

Zugehörigkeitsfunktionen

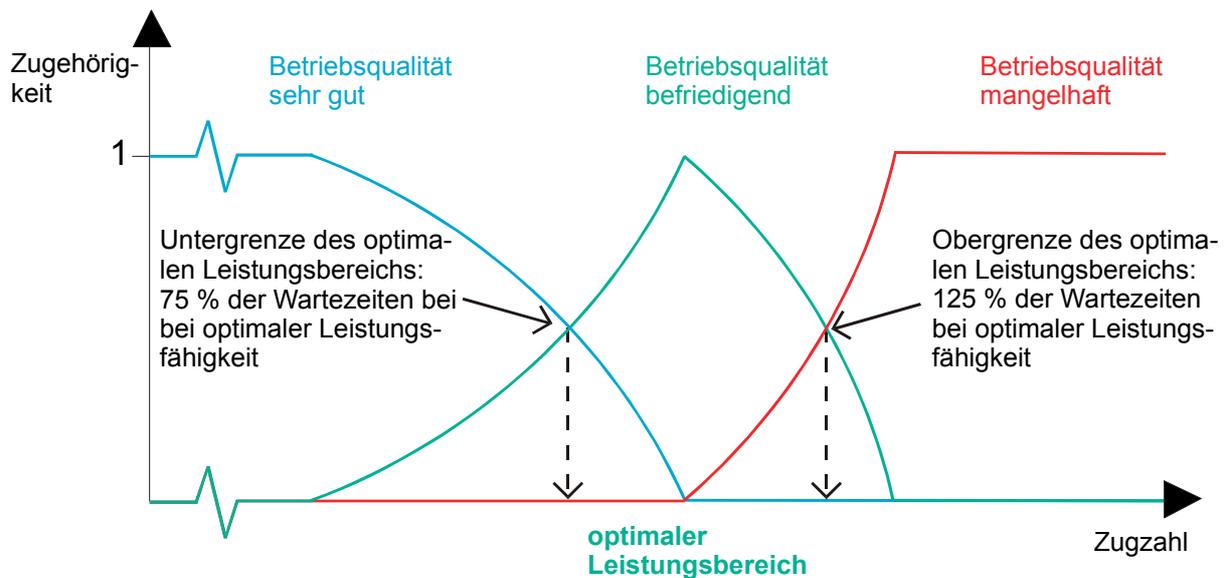


Bild 10: Obere und untere Begrenzung des optimalen Leistungsbereichs

3.3 Ablauf einer Streckenleistungsfähigkeitsberechnung und Interpretation der Ergebnisse

Zur Durchführung einer Leistungsfähigkeitsberechnung für eine Eisenbahnstrecke muss zunächst das auf der Strecke gefahrene Betriebsprogramm bekannt sein. Sofern ein Fahrplan vorliegt, kann auf diesen zurückgegriffen werden (fahrplanabhängiges Verfahren); ansonsten (beim fahrplanunabhängigen Verfahren) genügt die Angabe der Tagesganglinien der einzelnen Zugarten, d.h. die Anzahl der Abfahrten je Stunde. Hierbei werden wiederum gleichartige Züge (gleiches Rollmaterial, gleicher Laufweg) zu Modellzuggruppen zusammengefasst.

Für jede Modellzuggruppe ist anschließend eine Fahrzeitrechnung (einschließlich der planmäßigen Halte und Fahrzeitzuschläge) durchzuführen, ebenso sind die Mindestzugfolgezeiten für jeden Zugfolgefall zu bestimmen. Mit Hilfe der Häufigkeit (fahrplanabhängiges Verfahren) oder der Wahrscheinlichkeit (fahrplanunabhängiges Verfahren) eines Zugfolgefalls kann daraufhin die mittlere Mindestzugfolgezeit über alle Zugfolgefälle (tZ_m) und der Streckenbelegungsgrad ρ berechnet werden.

Der nächste Schritt besteht in der Berechnung der außerplanmäßigen und der planmäßigen Wartezeiten. Die außerplanmäßigen Wartezeiten werden im Rahmen

dieser Arbeit mit dem aus dem Programm STRELE bekannten Verfahren (vgl. Kap. 2.3) bestimmt, wobei für Strecken, für die keine Angaben zu Erregerverspätungen bekannt sind, diese Werte plausibel geschätzt werden müssen (beispielsweise anhand der Erregerverspätungen von Strecken mit ähnlichen Betriebsbedingungen). Darüber hinaus ist für jede Modellzuggruppe festzulegen, ob sie gegenüber den anderen Modellzügen vor-, gleich- oder nachrangig behandelt wird, um die entsprechenden mittleren Zugfolgezeiten für verschieden- und gleichrangige Zugfolgefälle bestimmen zu können. Einen weiteren Einfluss besitzt der Rang der Modellzüge jedoch nicht, insbesondere wird auf die Vergabe von Rangziffern verzichtet.

Die planmäßigen Wartezeiten werden beim fahrplanabhängigen Verfahren direkt aus dem Bildfahrplan ermittelt (bei gegenüber dem Bildfahrplan veränderten Zugzahlen sind Züge aus dem Bildfahrplan zu streichen bzw. zusätzlich einzulegen oder es muss ein neuer Bildfahrplan erstellt werden), während sie bei der fahrplanunabhängigen Vorgehensweise mit dem Verfahren von Wakob [WAKOB 1985] berechnet werden. Im ersten Schritt sind hierzu die so genannten primären Behinderungszeiten für alle Zugfolgefälle nach folgender Formel zu bestimmen:

$$tW_{F1,ij} = \frac{(tZ_{ij} + tD_{ij})^2 \cdot n_i \cdot n_j}{2 \cdot tU}$$

- mit: $tW_{F1,ij}$ = Behinderungszeitsumme aller Zugfolgefälle i vor j
[min]
- tZ_{ij} = Mindestzugfolgezeit für den Zugfolgefall i vor j
[min]
- tD_{ij} = Dispositionsbelegungszeit für den Zugfolgefall i vor j [min]
- n_i = Anzahl der Züge in der Modellzugfamilie i
- n_j = Anzahl der Züge in der Modellzugfamilie j

Die Dispositionsbelegungszeit hängt von der Rangfolge der am jeweiligen Zugfolgefall beteiligten Züge ab. Bei Vorrang des zweiten Zuges j wird $tD_{ij} = -tZ_{ij}$. Dadurch erhält der zweite Zug keine Wartezeit. Bei Vorrang des ersten Zuges dagegen entspricht die Dispositionsbelegungszeit der Mindestzugfolgezeit tZ_{ji} bei vertauschter Reihenfolge der Züge, da die Fahrplantrasse des folgenden Zuges im

ungünstigsten Fall um $tZ_{ij} + tZ_{ji}$ verschoben werden muss, um den Vorrang des ersten Zuges zu beachten. Bei Gleichrang beider Züge tritt keine Dispositionsbelegungszeit auf.

Die so ermittelten primären Behinderungszeitsummen müssen noch zu den gesamten Wartezeiten der Zugfolgefälle hochgerechnet werden, da sich neben den Wartezeiten für die am Zugfolgefall direkt beteiligten Züge auch Folgeverspätungen für nachfolgende weitere Züge ergeben können. Dazu bieten sich prinzipiell verschiedene Vorgehensweisen an, wobei jedoch aus Gründen der konsistenten Anwendung des Verfahrens auch hier der von Wakob verwendete Ansatz benutzt wird:

$$tW_{F,ij} = \frac{tW_{F1,ij} \cdot f(k,l)}{1 - \rho}$$

mit: $tW_{F,ij}$ = volle Wartezeit aller Zugfolgefälle i vor j [min]
 $f(k,l)$ = Faktor zur Berücksichtigung der Verteilung der
Zugfolgefälle

Im Falle einer zufälligen Verteilung der Zugfolgefälle nimmt der Faktor $f(k,l)$ den Wert 1 an. Andere Verteilungen können durch einen entsprechend abgewandelten Faktor berücksichtigt werden (vgl. [WAKOB 1985]).

Die vorgestellte Berechnung wird für alle theoretisch möglichen Zugfolgefälle durchgeführt. Für jede Modellzuggruppe ist dann die Summe der auf sie entfallenden Wartezeiten zu bestimmen. Werden durch dieses Vorgehen auch Zugfolgefälle erfasst, die auch im Falle von Störungen des Betriebsablaufes mit hinreichender Sicherheit nicht auftreten (z.B. bei großem zeitlichen Abstand im Fahrplan), können die sich daraus ergebenden Ungenauigkeiten dadurch eliminiert werden, dass der Bezugszeitraum der Streckenuntersuchung zur Berechnung der Wartezeiten weiter untergliedert wird. Diese Untergliederung ist derart vorzunehmen, dass in den so entstandenen Zeiträumen nur Zugfolgefälle stattfinden, die zur Berechnung der planmäßigen Wartezeiten relevant sind. Die gesuchten Wartezeiten ergeben sich dann durch die Summation der Einzelwerte.

Zur Berechnung der mittleren Beförderungsgeschwindigkeit der einzelnen Modellzuggruppen ist es erforderlich, die aus verschiedenen Ursachen (z.B. aufgrund von Überholungen) entstandenen Wartezeiten auf die Modellzuggruppen zu verteilen. Bei den planmäßigen Wartezeiten ist dies schon durch das Berechnungsverfahren bzw. durch die Ermittlung aus dem Bildfahrplan gegeben, die Wartezeiten im Betrieb werden jedoch mit dem gewählten Verfahren zunächst nicht für jede Modellzuggruppe, sondern als Gesamtsumme bestimmt. Zur Lösung dieses Problems werden die Wartezeiten im Betrieb proportional zu denen im Fahrplan verteilt. Wenn – wie meistens der Fall – sich die Rangfolgen der Züge im Zustand der Fahrplanerstellung und der Betriebsabwicklung nicht unterscheiden, ist aufgrund der Rangfolge der Züge mit einer ähnlichen Verteilung der Wartezeiten im Betriebsablauf zu rechnen, falls nicht besondere Gegebenheiten (z.B. das verstärkte Auftreten von Urverspätungen bei einer bestimmten Modellzuggruppe) starke Abweichungen von dieser proportionalen Verteilung erwarten lassen. Darüber hinaus verändert eine geringfügig andere Verteilung der Wartezeiten das Gesamtergebnis kaum, so dass eine weitere Steigerung der Genauigkeit an dieser Stelle nicht erforderlich erscheint.

Anschließend erfolgt die Berechnung von Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Mindestzugfolgezeiten, Beförderungsgeschwindigkeiten und des Streckenbelegungsgrades. Bei der Berechnung der Standardabweichungen ist davon auszugehen, dass aufgrund der vollständigen und nicht nur stichprobenhaften Berücksichtigung der im Bezugszeitraum verkehrenden Zugzahl die komplette Grundgesamtheit erfasst wird.

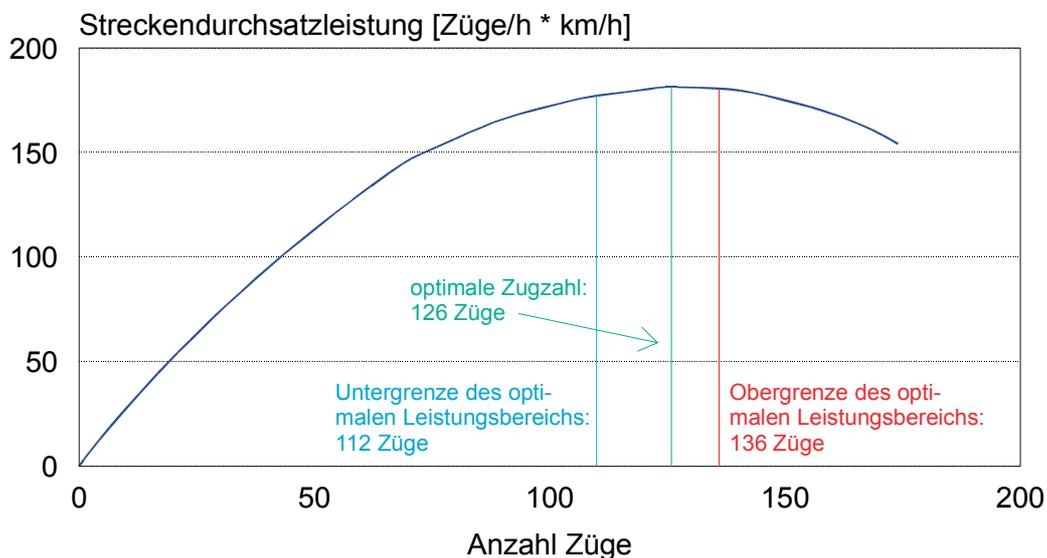
Für jede Modellzuggruppe kann danach die auf sie entfallende Streckendurchsatzleistung berechnet werden und zur gesamten Streckendurchsatzleistung bei der betrachteten Zugzahl aufsummiert werden. Der so ermittelte Wert stellt eine Stützstelle der Funktion der Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit von der Zugzahl dar. Um das Maximum dieser Funktion und damit die Zugzahl im Zustand der optimalen Streckenauslastung bestimmen zu können, sind mehrere Stützstellen erforderlich (im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden sowohl für das fahrplanunabhängige als auch für das fahrplanabhängige Verfahren zwischen sechs und zehn Stützstellen verwendet), d.h. die beschriebene Berechnung ist für veränderte Zugzahlen zu wiederholen. Hierbei sind die Zugzahlen in den einzelnen Modellzug-

gruppen im gleichen Verhältnis zu steigern oder zu senken. Bei den zunächst betrachteten, nur im Einrichtungsbetrieb befahrenen Strecken sind diese Berechnungen darüber hinaus für beide Fahrrichtungen getrennt durchzuführen.

Im Anschluss an diese Berechnung können die obere und die untere Grenze des optimalen Leistungsbereiches nach dem bereits beschriebenen Verfahren ermittelt werden. Dazu ist die Wartezeit bei optimaler Streckenauslastung aus der Funktion der Wartezeiten in Abhängigkeit der Zugzahl zu ermitteln und mit den Qualitätsfaktoren für sehr gute bzw. mangelhafte Betriebsqualität zu multiplizieren. Der letzte Schritt ist die Ermittlung des Bereiches größter Zugehörigkeit zur befriedigenden Betriebsqualität. Das Ergebnis einer derartigen Berechnung der Streckendurchsatzleistung einschließlich der Angabe von optimaler Zugzahl sowie von Ober- und Untergrenze des optimalen Leistungsbereiches ist in Bild 11 beispielhaft für die Strecke Ulm – Stuttgart dargestellt.

Streckendurchsatzleistung

Richtung Ulm-Stuttgart



fahrplanunabhängige Variante

Bild 11: Streckendurchsatzleistung, Richtung Ulm – Stuttgart, fahrplanunabhängige Variante

Um leicht vorstellbare Größenordnungen der sich ergebenden Streckendurchsatzleistungen zu erhalten, bietet es sich an, die Beförderungsgeschwindigkeiten in die im Verkehrswesen übliche Einheit Kilometer pro Stunde umzurechnen, für den Bezugszeitraum die Einheit „Stunde“ und für Längenangaben die Einheit „Kilometer“

zu verwenden. Die so ermittelte Streckendurchsatzleistung kann dann anschaulich als das Produkt aus der pro Stunde gefahrenen Anzahl von Zügen und deren Beförderungsgeschwindigkeit verstanden werden.

Exakt richtig wäre diese Sichtweise jedoch nur unter „Laborbedingungen“, d.h. es müsste zum einen die Mindestzugfolgezeit gegen Null gehen (Streckenbelegungsgrad ρ gleich Null), zum anderen müsste dies auch für die Standardabweichung der Mindestzugfolgezeiten, der Beförderungsgeschwindigkeiten und des Streckenbelegungsgrades gelten. In der Realität ist meist keine dieser Bedingungen erfüllt, so dass die Streckendurchsatzleistung durch den Streckenbelegungsgrad und die verschiedenen Variationskoeffizienten abgemindert wird. Durch den Einfluss der genannten Faktoren ermöglicht es der gewählte Ansatz, die die Leistungsfähigkeit einer Strecke begrenzenden Parameter zu bestimmen und gegebenenfalls zu verbessern, wenn diese Faktoren neben den Zugzahlen bei optimaler Streckenauslastung bzw. an der oberen und unteren Grenze des optimalen Leistungsbereiches angegeben werden. Ein Vergleich der Streckendurchsatzleistungen verschiedener Strecken sowie deren jeweiliger Einflussfaktoren ist ebenfalls möglich.

Verschiedene mögliche Ursachen einer geringen Streckendurchsatzleistung und (teilweise in Konkurrenz zueinander stehende) Maßnahmen zur Abhilfe sind in Tabelle 2 zusammengefasst:

Ursachen geringer Streckendurchsatzleistung	Maßnahmen zur Abhilfe
geringe Beförderungsgeschwindigkeit	Streckenertüchtigung für höhere Geschwindigkeiten, Kürzen von Haltezeiten und Fahrzeitzuschlägen, Steigerung des Pünktlichkeitsniveaus der Züge
hoher Streckenbelegungsgrad	Verringerung der Mindestzugfolgezeiten durch verbesserte Signaltechnik oder zusätzliche Überholungsgleise, Bau weiterer Streckengleise
hoher Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten und Beförderungsgeschwindigkeiten	Entmischung der Verkehre, Ausstattung der Züge mit einheitlicher Leit- und Sicherungstechnik (falls Unterschiede vorhanden)
hoher Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	Abbau der Verkehrsspitzen

Tabelle 2: Ursachen geringer Streckendurchsatzleistung und mögliche Abhilfen

3.4 Validierung des Ansatzes für zweigleisige Strecken

Zur Validierung des ermittelten Ansatzes wurden vier Untersuchungen von zweigleisigen Strecken mit unterschiedlichen Betriebsbedingungen durchgeführt. Im Einzelnen wurden folgende Strecken ausgewählt:

- Stuttgart – Ulm
- Heidelberg – Bruchsal
- Schnellfahrstrecke Hannover – Würzburg (Teilabschnitt Jühnde – Mottgers)
- Frankfurt/M. Hbf tief – Frankfurt Süd (Stammstrecke der S-Bahn Frankfurt)

Die ersten beiden Strecken werden jeweils im Mischbetrieb von Fern-, Nahverkehrs- und Güterzügen befahren. Die Strecke von Heidelberg nach Bruchsal ist eine Flachbahn mit relativ hohen Geschwindigkeiten, während zwischen Stuttgart und Ulm die Schwäbische Alb überquert werden muss. Diese Strecke weist deutlich höhere Neigungen und kleinere Kurvenradien auf, so dass die zulässigen Geschwindigkeiten insbesondere im unmittelbaren Bereich der Albüberquerung deutlich niedriger sind. Zusätzlich zur eigentlichen Leistungsfähigkeitsberechnung wird für diese Strecke untersucht, welchen Einfluss eine Veränderung des Betriebsprogramms, z.B. durch eine Angleichung der Zuggeschwindigkeiten und der Mindestzugfolgezeiten oder durch den Abbau von Verkehrsspitzen, auf das Rechenergebnis besitzt. Neben diesen eher theoretischen Maßnahmen erfolgt darüber hinaus eine Untersuchung für den Fall der zeitlichen Entmischung von Personen- und Güterverkehr.

Die dritte ausgewählte Strecke (Jühnde – Mottgers) ist Teil der Schnellfahrstrecke von Hannover nach Würzburg. Sie wird tagsüber für den Hochgeschwindigkeitsverkehr und nachts für den Güterverkehr genutzt. Um auch hier die leistungssteigernden Effekte der Entmischung unterschiedlicher Verkehrsarten zu ermitteln, wird vergleichend auch eine Untersuchung unter der Annahme einer zufälligen Verteilung von Personen- und Güterzügen über den gesamten Tag durchgeführt.

Der Frankfurter S-Bahn-Tunnel wird als Beispiel für eine völlig artrein betriebene Strecke untersucht.

Für alle betrachteten Strecken wurden zusätzlich zu den Berechnungen mit Hilfe des neuen Ansatzes Vergleichsrechnungen mit STRELE durchgeführt. Die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen dienen als Kontrollwerte für das neue Verfahren. An einigen Stellen, insbesondere auf nicht im Mischbetrieb befahrenen Strecken, sind die Ergebnisse aus STRELE jedoch nur eingeschränkt aussagekräftig (vgl. hierzu auch Kapitel 2.3). Auf derartige Fälle wird im Text der folgenden Unterkapitel eingegangen. Zur weiteren Kontrolle der Rechenwerte konnte für die Strecke Heidelberg – Bruchsal auf Untersuchungsergebnisse aus dem in Zusammenarbeit zwischen dem Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik der TU Darmstadt, dem Zentrum für integrierte Verkehrssysteme (Institut an der TU Darmstadt) und der Firma RMCon (Hannover) bearbeiteten Projekt zur Simulation des Betriebsablaufes im Knoten Heidelberg mittels des EDV-Programms RailSys zurückgegriffen werden.

Für die Strecke Stuttgart – Ulm sowie den Frankfurter S-Bahn-Tunnel beträgt die Länge des Untersuchungszeitraumes einen Tag. Im Falle der Entmischung von Personen- und Güterverkehr auf der Strecke Stuttgart – Ulm wurde ein Untersuchungszeitraum von 17 Stunden für den Personenverkehr und sieben Stunden für den Güterverkehr gewählt. Für den Frankfurter S-Bahn-Tunnel, in dem in der Nacht eine dreistündige Betriebsruhe herrscht, wurde zusätzlich eine Untersuchung für einen Zeitraum von 21 Stunden durchgeführt.

Für den Streckenabschnitt Jühnde – Mottgers erwies sich ein Untersuchungszeitraum von einem Tag zur Ermittlung realistischer Leistungsfähigkeitskennwerte als nicht zielführend, da auf dieser Strecke eine praktisch vollständige Entmischung der Verkehre vorliegt (Personenverkehr am Tag, Güterverkehr in der Nacht). Daher wurden hier zwei getrennte Untersuchungen für den Personenverkehr (Untersuchungszeitraum von 5.30 Uhr bis 22.30 Uhr, also 17 Stunden) und den Güterverkehr (Untersuchungszeitraum von 22.30 Uhr bis 5.30 Uhr, sieben Stunden) erforderlich, weil ansonsten die Ergebnisse durch in der Realität nicht auftretende Zugfolgefälle verfälscht würden. Die Untersuchungsergebnisse für den theoretischen Fall der Mischung von Personen- und Güterverkehr (Untersuchungszeitraum: ein ganzer Tag) werden jedoch zusätzlich angegeben, um die Leistungssteigerung durch die Entmischung der Verkehre aufzuzeigen.

Auch für die Strecke Heidelberg – Bruchsal wurde die Wahl eines anderen Untersuchungszeitraumes notwendig, da sich hier die im Rahmen der Projektarbeit vorgenommenen Auswertungen auf den Zeitraum von 15 bis 20 Uhr beschränken. Somit wurde auch der Untersuchungszeitraum auf diese fünf Stunden festgelegt.

3.4.1 Die Strecke Stuttgart - Ulm

Die insgesamt 94 km lange Strecke Stuttgart – Ulm stellt eine im Mischbetrieb von verschiedenen Zugarten befahrene Verbindung dar. Bedingt durch die Schwierigkeiten, die sich aus der Überquerung der Schwäbischen Alb ergeben, sind in Teilbereichen dieser Strecke nur geringe Geschwindigkeiten erreichbar, so z.B. im unmittelbaren Alaufstieg zwischen Geislingen und Amstetten lediglich 70 km/h. Die Lage der Strecke im Eisenbahnnetz zeigt Bild 12.

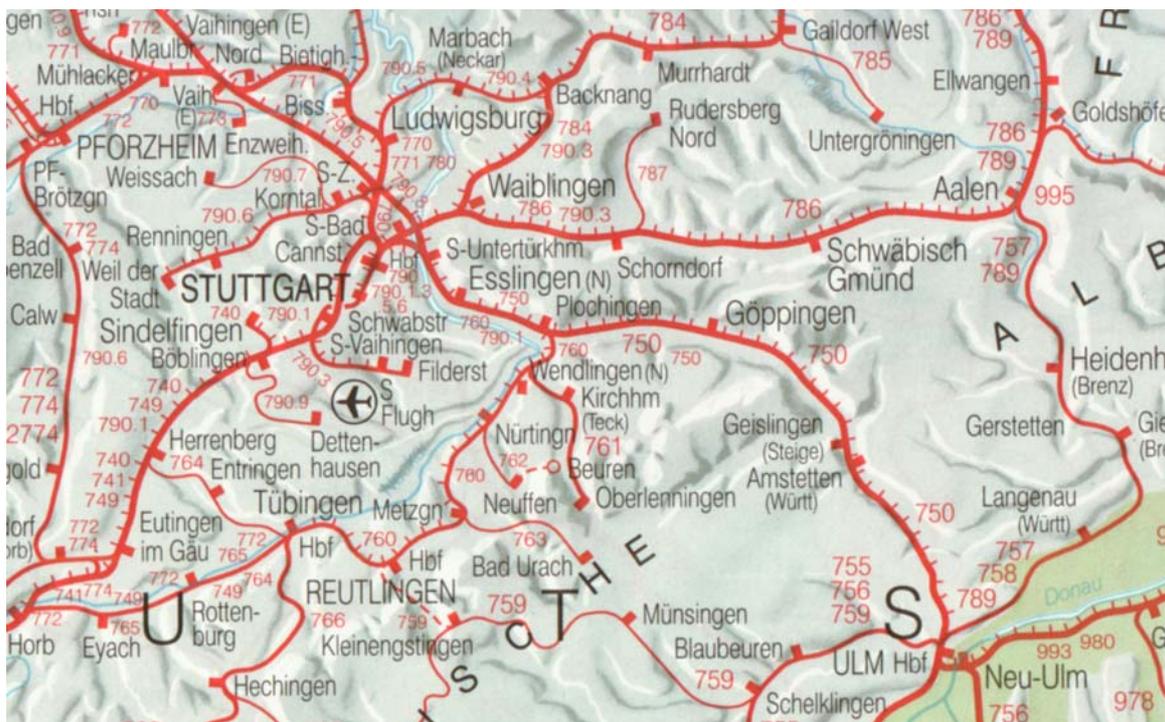


Bild 12: Lage der Strecke Stuttgart – Ulm im Eisenbahnnetz [DB REISE & TOURISTIK AG 2001]

Der auf dieser Strecke abgewickelte Fernverkehr wird für die Berechnungen dieser Arbeit durch drei Modellzuggruppen, nämlich ICE, Intercity- und Interregio-Züge abgebildet. Im Nahverkehr benutzt eine Regionalexpress-Linie die Strecke auf voller Länge, während Regionalbahnen in den Abschnitten Plochingen – Göppingen sowie

Geislingen – Ulm verkehren. Im Abschnitt Stuttgart – Plochingen benutzen die Regionalbahnen die hier nicht näher betrachteten S-Bahn-Gleise. Im Güterverkehr, der auf dieser Strecke nahezu 25% des Gesamtverkehrs ausmacht, werden je eine Modellzuggruppe für den schnelleren (IKE) und den langsameren Verkehr (IRC) gebildet. Die Züge werden, aus Richtung Kornwestheim kommend, in Stuttgart-Untertürkheim in die Strecke eingefädelt und benutzen teilweise die Streckengleise durch den Ulmer Hauptbahnhof, teilweise werden sie kurz vor Ulm ausgefädelt, um den Ulmer Rangierbahnhof anzufahren. Insgesamt verkehrten nach dem Jahresfahrplan 2000/2001 in beiden Fahrrichtungen jeweils 127 Züge, deren Verteilung auf die Modellzugklassen aus Tabelle 3 ersichtlich ist.

Bei der Einteilung der Züge in Modellzuggruppen wurden sowohl im Rahmen dieser als auch der übrigen Streckenuntersuchungen geringfügige Vereinfachungen vorgenommen, um die Zahl der Modellzuggruppen nicht unübersichtlich groß werden zu lassen. So werden beispielsweise einzelne Züge, die laut Fahrplan als Interregio-Express (IRE) gefahren werden, der Modellzugklasse „IR“ zugeordnet, da sie an denselben Bahnhöfen halten und dieselben Fahrzeiten aufweisen wie die auf der Strecke Stuttgart – Ulm verkehrenden Interregio-Züge.

Modellzuggattung	Laufweg	Anzahl Züge in Richtung	
		Stuttgart - Ulm	Ulm - Stuttgart
ICE	Stuttgart – Ulm	17	15
IC	Stuttgart – Ulm	14	15
IR	Stuttgart – Ulm	13	13
IKE	Untertürkheim – Ulm	10	10
RE	Stuttgart – Ulm	16	17
RB	Plochingen – Göppingen	20	22
RB	Geislingen – Ulm	18	17
IRC	Untertürkheim – Ulm Rbf	19	18
Summe		127	127

Tabelle 3: Modellzüge auf der Strecke Stuttgart – Ulm, Zugzahlen nach Jahresfahrplan 2000/2001

Für die Strecke Stuttgart – Ulm liegen die für die optimale Streckenauslastung errechneten Zugzahlen höher als die Werte aus STRELE, jedoch stimmen sie mit den heute gefahrenen Zugzahlen gut überein (vgl. Tabelle 4). Die relativ starke Abweichung der Werte aus STRELE von den tatsächlich gefahrenen Zugzahlen stellt

jedoch in Frage, ob das Leistungsverhalten dieser Strecke durch STRELE ausreichend genau beschrieben werden kann.

	fahrplanunabhängige Variante		fahrplanabhängige Variante	
	Richtung Stuttgart - Ulm	Richtung Ulm - Stuttgart	Richtung Stuttgart - Ulm	Richtung Ulm - Stuttgart
Untersuchungszeitraum [h]	24	24	24	24
Zugzahl an der Untergrenze des optimalen Leistungsbereichs	111	114	105	120
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	124	126	120	129
Zugzahl an der Obergrenze des optimalen Leistungsbereichs	134	137	130	134
Streckendurchsatzleistung bei optimaler Streckenauslastung [Züge/h * km/h]	174	182	180	203
Streckenbelegungsgrad bei optimaler Streckenauslastung	0,44	0,45	0,42	0,39
mittlere Beförderungsgeschwindigkeit bei optimaler Streckenauslastung [km/h]	79	79	80	82
Wartezeit im Bezugszeitraum bei optimaler Streckenauslastung [min]	703	760	568	344
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,36	0,37	0,36	0,37
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	0,49	0,40	0,48	0,53
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,24	0,23	0,25	0,20
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	103	102	105	114

Tabelle 4: Leistungskennwerte der Strecke Stuttgart – Ulm, ursprüngliche Varianten

Insgesamt stellt sich bei dieser Leistungsfähigkeitsuntersuchung kein spezieller Parameter als leistungsbegrenzend heraus. Eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit

wäre – neben den im Anschluss zur Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse durchgeführten, jedoch in der Realität zum Teil nur schwer durchsetzbaren Maßnahmen wie z.B. der Angleichung der Zuggeschwindigkeiten oder des Abbaus von Verkehrsspitzen – am ehesten durch eine Senkung der mittleren Mindestzugfolgezeit erreichbar. Sie liegt z.B. verglichen mit der Strecke Heidelberg – Bruchsal (vgl. Kap. 3.4.2) um etwa 25 % höher. Der gegenüber dieser Untersuchung geringere Maximalwert der Streckendurchsatzleistung lässt sich zum einen durch die um etwa 10 % niedrigere mittlere Beförderungsgeschwindigkeit erklären, zum anderen bewirkt auch die Tatsache, dass die relativ zahlreichen Regionalbahnen die Strecke nur auf einem Teil ihrer Länge befahren, ein Absinken der Streckendurchsatzleistung. Die höheren Werte der Streckendurchsatzleistung in der fahrplanabhängigen Variante lassen sich auf die geringeren Wartezeiten und Mindestzugfolgezeiten zurückführen.

Zur Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse wird im Folgenden beispielhaft für die Strecke Stuttgart – Ulm zunächst ein Abbau der Verkehrsspitzen, danach eine Angleichung von Mindestzugfolgezeiten und Beförderungsgeschwindigkeiten sowie anschließend eine Kombination beider Maßnahmen durchgeführt. Alle diese Maßnahmen bewirken starke Änderungen gegenüber dem bisher für die Streckenuntersuchung verwendeten Fahrplan, so dass sich die Untersuchungen auf eine fahrplanunabhängige Variante beschränken.

	Abbau der Verkehrsspitzen		Angleichung von Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten		Kombination beider Maßnahmen	
	Richtung Stuttgart - Ulm	Richtung Ulm - Stuttgart	Richtung Stuttgart - Ulm	Richtung Ulm - Stuttgart	Richtung Stuttgart - Ulm	Richtung Ulm - Stuttgart
Untersuchungszeitraum [h]	24	24	24	24	24	24
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	139	145	220	194	254	232
Veränderung der Zugzahl gegenüber der ursprünglichen fahrplanunabhängigen Variante	+ 12 %	+ 15 %	+ 77 %	+ 54 %	+ 105 %	+ 84 %
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0	0	0,36	0,37	0	0
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	0,49	0,40	0	0	0	0
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,24	0,23	0	0	0	0
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	103	102	181	169	181	169
zum Vergleich: Veränderung der optimalen Zugzahl nach STRELE gegenüber der ursprünglichen fahrplanunabhängigen Variante	± 0 %	± 0 %	+ 76 %	+ 66 %	+ 76 %	+ 66 %

Tabelle 5: Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse der Leistungsfähigkeitsberechnung für die Strecke Stuttgart – Ulm

Wie aus Tabelle 5 ersichtlich ist, führen sämtliche vorgenommenen Änderungen zu einer Steigerung der optimalen Streckenauslastung, wobei die geringsten Effekte durch einen Abbau der Verkehrsspitzen (d.h. eine vollkommen gleichmäßige Auslastung der Strecke, daraus folgend ein Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades $V_p = 0$) erzielt werden. Dieses Ergebnis ist nachvollziehbar, da durch die gleichmäßige Auslastung der Strecke zwar der Streckenbelegungsgrad, nicht aber die Mindestzugfolgezeiten und Beförderungsgeschwindigkeiten vereinheitlicht werden. So kommt es weiterhin zu Konflikten der verschiedenen Modellzüge

untereinander, die zu Wartezeiten und Überholungen verschieden schneller Züge führen. Die Ergebnisse aus STRELE lassen die Effekte einer gleichmäßigen Streckenauslastung vollständig unberücksichtigt und unterscheiden sich von denen der ursprünglichen Variante nicht. Sie können daher in diesem Fall nicht als ausreichend genau angesehen werden.

Größere Leistungsgewinne sind durch eine Angleichung der Mindestzugfolgezeiten und Beförderungsgeschwindigkeiten ($V_v = 0$ und $V_{vz} = 0$) möglich, weil in diesem Fall von artreinem Betrieb ausgegangen werden kann, der lediglich noch geringfügige Wartezeiten auf freie Trassen verursachen kann. Behinderungen in Form von zusätzlichen Überholungen fallen jedoch nicht mehr an, da alle Züge den gleichen Fahrtverlauf haben und somit – außer im Falle einer technischen oder betrieblichen Störung an einem der Züge – kein Zeitgewinn durch einen Reihenfolgewechsel der Züge erzielbar wäre.

Selbst durch eine Kombination beider Maßnahmen (d.h. artreiner Betrieb mit gleichmäßigem Fahrplan) können jedoch nicht die Leistungsfähigkeiten z.B. des Frankfurter S-Bahn-Tunnels (vgl. Kapitel 3.4.4) erreicht werden. Hierfür sind die Mindestzugfolgezeiten auf der Strecke Stuttgart – Ulm zu groß.

Neben den bisher beschriebenen, eher theoretischen Maßnahmen wird im Folgenden ebenfalls im Rahmen einer fahrplanunabhängigen Untersuchung zusätzlich auf eine Entmischung von Personen- und Güterverkehr eingegangen. Wie Tabelle 6 zeigt, kann bei einer Nutzung der Strecke über 17 Stunden im Personen- und sieben Stunden im Güterverkehr eine Leistungssteigerung von 10 % erzielt werden. Im Vergleich zur Strecke Jühnde – Mottgers (Kap. 3.4.3) erscheinen diese Werte eher gering. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass im Personenverkehr nach wie vor viele verschieden schnelle Zugarten die Strecke befahren. Die Leistungssteigerungen sind daher zum größeren Teil durch den Güterverkehr bedingt, weil dort Mindestzugfolgezeiten und Beförderungsgeschwindigkeiten stärker angeglichen werden. Eine noch größere Leistungssteigerung wäre denkbar, wenn die Strecke noch gleichmäßiger ausgelastet werden könnte, d.h. der Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades vor allem im Güterverkehr weiter abgebaut würde. Dies hätte jedoch Auswirkungen auf die Zuführung der Güterzüge aus anderen Teilen des Eisenbahnnetzes und erscheint daher nicht ohne Weiteres möglich.

Gemäß den Ergebnissen aus STRELE ist durch die Entmischung der Verkehre eine höhere Steigerung der optimalen Auslastung erreichbar. Die Zahlen sind jedoch nicht direkt vergleichbar, da STRELE für die verschiedenen Untersuchungen wegen der unterschiedlichen Reisezuganteile auch unterschiedliche zulässige Längen der Warteschlangen ermittelt. Für die Untersuchung des Güterverkehrs werden daher höhere Ergebnisse erzielt, weil erheblich höhere Verspätungen zugelassen werden.

	Entmischung von Personen- und Güterverkehr	
	Richtung Stuttgart - Ulm	Richtung Ulm - Stuttgart
Untersuchungszeitraum [h]	17 (PV*) 7 (GV*)	17 (PV) 7 (GV)
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	101 (PV) 35 (GV)	96 (PV) 43 (GV)
Veränderung der Zugzahl gegenüber der ursprünglichen fahrplanunabhängigen Variante	+ 10 %	+ 10 %
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,26 (PV) 0,45 (GV)	0,27 (PV) 0,51 (GV)
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	0,48 (PV) 0,30 (GV)	0,44 (PV) 0,10 (GV)
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,23 (PV) 0,17 (GV)	0,23 (PV) 0,16 (GV)
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	91 (PV) 39 (GV)	89 (PV) 43 (GV)
zum Vergleich: Veränderung der optimalen Zugzahl nach STRELE gegenüber der ursprünglichen fahrplanunabhängigen Variante	+ 26 %	+ 29 %
* PV = Personenverkehr, GV = Güterverkehr		

Tabelle 6: Veränderung der Leistungskennwerte der Strecke Stuttgart – Ulm bei Entmischung von Personen- und Güterverkehr

3.4.2 Die Strecke Heidelberg – Bruchsal

Die Strecke Heidelberg – Bruchsal wird wie auch die zuvor untersuchte Verbindung von Stuttgart nach Ulm im Mischbetrieb befahren, jedoch sind hier aufgrund der günstigen Trassierung höhere Geschwindigkeiten bis zu 160 km/h möglich. Die auf

der 32,5 Kilometer langen Strecke verkehrenden Züge wurden insgesamt in neun Modellzuggruppen eingeteilt, die die Strecke zum Teil jedoch nur in einer Richtung nutzen. Im Fernverkehr wird die Strecke von einer IC-Linie befahren; diese Züge verlassen den betrachteten Streckenabschnitt kurz vor Bruchsal, um auf die Neubaustrecke in Richtung Stuttgart übergeleitet zu werden. Auf voller Länge wird die Strecke von Interregio-Zügen befahren, dazu kommen einige Autoreisezüge in Richtung Norden. Der Nahverkehr wird mit Regionalexpress-Zügen, die auf kleineren Stationen durchfahren, sowie mit überall haltenden Regionalbahnen betrieben. Darüber hinaus gibt es vereinzelte Regionalbahnen, die aus Heidelberg kommend im Bahnhof Wiesloch/Walldorf enden. Der Güterverkehr ist im betrachteten Untersuchungszeitraum (fünf Stunden, 15 bis 20 Uhr) nur schwach ausgeprägt, es verkehrt lediglich ein Ferngüterzug der Gattung TEC (TransEuroCombi) in südlicher und zwei Cargo-Bedienungsfahrten in nördlicher Richtung. Die Verteilung der im Untersuchungszeitraum verkehrenden Züge auf die Modellzuggruppen fasst Tabelle 7 zusammen, die Lage der Strecke im Eisenbahnnetz zeigt Bild 13.

Modellzug- gattung	Laufweg	Anzahl Züge in Richtung	
		Heidelberg - Bruchsal	Bruchsal - Heidelberg
IC	Heidelberg – Abzweig Ubstadt-Weiher	7	7
IR	Heidelberg – Bruchsal	5	5
D	Heidelberg – Bruchsal	-	2
RE	Heidelberg – Bruchsal	4	5
TEC	Heidelberg – Bruchsal	1	-
RB	Heidelberg – Bruchsal	8	7
RB	Heidelberg – Wiesloch/Walldorf	1	2
CB	Heidelberg – Bruchsal	-	1
CB	Heidelberg – Heidelberg-Kirchheim	-	1
Summe		26	30

Tabelle 7: Modellzüge auf der Strecke Heidelberg – Bruchsal, Zugzahlen nach derzeitigem Fahrplan

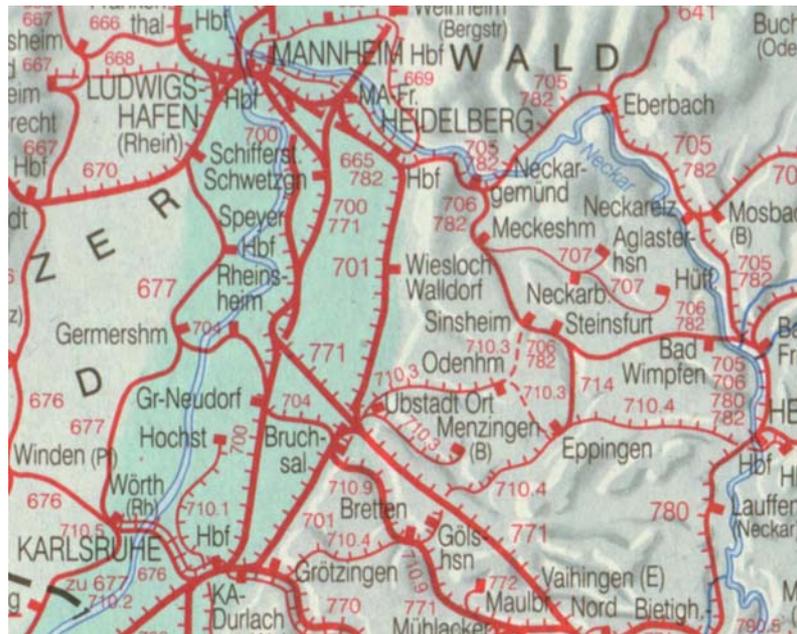


Bild 13: Lage der Strecke Heidelberg – Bruchsal im Eisenbahnnetz [DB REISE & TOURISTIK AG 2001]

Die Berechnung der Zugzahlen bei optimaler Streckenauslastung liefert auch für diese Strecke im fahrplanabhängigen wie auch im fahrplanunabhängigen Verfahren etwas größere Werte als STRELE (vgl. Tabelle 8). Die Ergebnisse aus STRELE erscheinen jedoch zum Teil nicht plausibel, da die dort für die vier Spitzenstunden zusätzlich ermittelte optimale Zugzahl (z.B. für die Richtung Heidelberg – Bruchsal im fahrplanunabhängigen Verfahren 20 Züge) deutlich zu niedrig liegt. Hochgerechnet auf den gesamten Untersuchungszeitraum von fünf Stunden ergäbe sich ein geringerer Wert als der für den gesamten Untersuchungszeitraum ausgewiesene (30 Züge). Darüber hinaus konnte mit dem Simulationsprogramm RailSys selbst für Zugzahlen an der oberen Grenze des optimalen Leistungsbereiches ein konfliktfreier Bildfahrplan konstruiert werden, und zwar ohne zusätzliche Überholungen auf den Unterwegsbahnhöfen der Strecke. Eine noch weiter gehende Vergrößerung der Zugzahlen wäre jedoch nur unter Inkaufnahme zusätzlicher Überholungen möglich.

	fahrplanunabhängige Variante		fahrplanabhängige Variante	
	Richtung Heidelberg – Bruchsal	Richtung Bruchsal - Heidelberg	Richtung Heidelberg - Bruchsal	Richtung Bruchsal - Heidelberg
Untersuchungszeitraum [h]	5	5	5	5
Zugzahl an der Untergrenze des optimalen Leistungsbereichs	29	27	30	29
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	33	31	35	31
Zugzahl an der Obergrenze des optimalen Leistungsbereichs	35	33	37	33
Streckendurchsatzleistung bei optimaler Streckenauslastung [Züge/h * km/h]	301	241	337	286
Streckenbelegungsgrad bei optimaler Streckenauslastung	0,42	0,41	0,42	0,41
mittlere Beförderungsgeschwindigkeit bei optimaler Streckenauslastung [km/h]	88	87	92	91
Wartezeit im Bezugszeitraum bei optimaler Streckenauslastung [min]	114	137	109	101
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,33	0,24	0,33	0,24
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	0,42	0,72	0,37	0,53
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,35	0,34	0,36	0,32
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	30	28	31	28

Tabelle 8: Leistungskennwerte der Strecke Heidelberg – Bruchsal

Auch auf der Strecke Heidelberg – Bruchsal wird die Leistungsfähigkeit nicht durch einen einzelnen der verwendeten Einflussfaktoren, sondern durch deren Kombination begrenzt. Auffällig ist jedoch der hohe Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten in Richtung Bruchsal – Heidelberg. Er lässt sich mit den langen Fahr- und

Haltezeiten der Cargo-Bedienungsfahrten auf diesem Abschnitt erklären. Diese bewirken für einige Zugfolgefälle sehr lange Mindestzugfolgezeiten, da auch von den folgenden Zügen die gleichen Bahnhofsgleise genutzt werden. In Verbindung mit der generell etwas längeren mittleren Mindestzugfolgezeit in dieser Fahrtrichtung werden somit geringere Zugzahlen und Streckendurchsatzleistungen erreicht.

Die größere Leistungsfähigkeit der fahrplanabhängigen Variante stellt für zweigleisige Strecken den häufigeren, wenngleich nicht stets auftretenden Fall dar. In vielen Fällen ist es möglich, durch geschickte Planung die Züge so aneinanderzureihen, dass kleinere mittlere Mindestzugfolgezeiten und geringere Streuungen der Mindestzugfolgezeiten möglich sind. Auch kann oftmals eine geringere Wartezeit und eine dadurch höhere Beförderungsgeschwindigkeit erreicht werden.

3.4.3 Die Schnellfahrstrecke Hannover - Würzburg (Teilabschnitt Jühnde-Mottgers)

Die Untersuchung des durch die Betriebsbahnhöfe Jühnde im Norden sowie Mottgers im Süden begrenzten insgesamt 158 Kilometer langen Abschnitts der Neubaustrecke Hannover – Würzburg soll nachweisen, dass der gefundene Ansatz auch für im Hochgeschwindigkeitsverkehr betriebene Strecken anwendbar ist. Die untersuchte Strecke wird nachts im schnellen Güterverkehr und tagsüber für den hochwertigen Personenfernverkehr genutzt. Außer den Bahnhöfen Kassel-Wilhelmshöhe und Fulda, an denen auch ein Wechsel auf die Strecken des Altnetzes möglich ist, sind lediglich Betriebsbahnhöfe vorhanden. Dort können beispielsweise Güterzüge durch Züge des Personenfernverkehrs überholt werden. Bild 14 bietet eine Übersicht über den betrachteten Streckenabschnitt.

Die Wahl eines anderen Untersuchungsabschnittes, z.B. zwischen zwei Knotenbahnhöfen, war aufgrund von Schwierigkeiten bei der Beschaffung erforderlicher Daten nicht möglich. Die einzig verfügbaren Bildfahrpläne stammen aus dem Jahre 1992 und beziehen sich auf den zur Untersuchung ausgewählten Streckenabschnitt, dessen Grenzen annähernd mit denen des Landes Hessen und der ehemaligen Bundesbahndirektion Frankfurt (Main) zusammenfallen. Zum Nachweis der Tauglichkeit des Ansatzes ist das relativ hohe Alter dieser Bildfahrpläne jedoch ohne Belang.



Bild 14: Lage der Strecke Jühnde – Mottgers im Eisenbahnnetz [nach DB REISE & TOURISTIK AG 2001]

Im Jahre 1992 wurde der betrachtete Streckenabschnitt von zwei ICE-Linien befahren, wovon eine Linie die komplette Strecke benutzte und die zweite in Fulda die Strecke verließ, um in Richtung Frankfurt weiterzufahren. Diesen Laufweg benutzte außerdem eine IC-Linie von Berlin nach Karlsruhe. Weitere Personenzüge des Fernverkehrs, nämlich eine IC- und eine IR-Linie sowie vereinzelte Fernschnellzüge (FD-Züge) benutzten die Strecke nur auf kürzeren Teilabschnitten. Der Güterverkehr, für den wiederum zwei Modellzuggruppen vorgesehen werden (ICGE für die schnelleren, ICG für die langsameren Züge), befuhr die Strecke größtenteils auf voller Länge.

Modellzug- gattung	Laufweg	Anzahl Züge in Richtung	
		Jühnde - Mottgers	Mottgers - Jühnde
ICE	Jühnde - Mottgers	15	16
ICE	Jühnde – Fulda Süd	17	15
IC	Jühnde – Fulda Süd	8	8
IC	Fulda Nord – Fulda Süd	3	2
ICGE	Jühnde – Mottgers	6	7
ICG	Jühnde – Mottgers	26	18
FD	Fulda Nord – Mottgers	2	2
IR	Kassel Nord – Kassel-Oberzwehren	7	8
Summe		84	76

Tabelle 9: Modellzüge auf der Strecke Jühnde – Mottgers, Zugzahlen nach Fahrplan 1992

Wie bereits beschrieben wurden für diese Strecke aufgrund des vorhandenen Betriebsprogramms zwei getrennte Untersuchungen durchgeführt, da sich bei einer gemeinsamen Untersuchung von Personen- und Güterverkehr aufgrund der verschiedenen Mindestzugfolgezeiten und Beförderungsgeschwindigkeiten von Reise- und Güterzügen deutlich geringere Leistungsfähigkeiten ergaben. Dieser Effekt ist nicht verfahrensspezifisch, sondern trat auch bei den mit STRELE durchgeführten Vergleichsrechnungen auf und ist auf die deutlich voneinander abweichenden Geschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten der Personen- und Güterzüge zurückzuführen. Durch den Vergleich der getrennten Untersuchungen mit einer Untersuchung für einen ganzen Tag werden zusätzlich die Auswirkungen der Entmischung von Personen- und Güterverkehr auf die Leistungsfähigkeit der Strecke dargestellt.

Im Folgenden wird zunächst der im Zeitraum von 5.30 Uhr bis 22.30 Uhr abgewickelte Personenverkehr betrachtet. Wie aus Tabelle 10 ersichtlich ist, stimmen die für diese Strecke mit dem neuen Ansatz ermittelten Zugzahlen bei optimaler Streckenauslastung sehr gut mit den STRELE-Daten überein. Insgesamt ergeben sich vergleichsweise hohe Zugzahlen bei optimaler Streckenauslastung, was sowohl auf die leistungsfähige Signaltechnik und die günstige Trassierung der Strecke als auch auf die Entmischung der Verkehre zurückzuführen ist.

Die für Richtung und Gegenrichtung sowie für fahrplanunabhängige und fahrplanabhängige Variante ermittelten Leistungskennwerte unterschieden sich mit Ausnahme der Wartezeiten insgesamt nur geringfügig. Aufgrund einer günstigen Fahrplan-konstruktion sind die Wartezeiten der fahrplanabhängigen Variante erheblich kleiner

(was gleichzeitig etwas höhere Beförderungsgeschwindigkeiten bewirkt), sie wachsen jedoch beim Überschreiten der optimalen Streckenauslastung rasch an. Darüber hinaus bewirkt die im Fahrplan vorgesehene Reihung der Züge auch geringfügig höhere Variationskoeffizienten der Mindestzugfolgezeiten.

	fahrplanunabhängige Variante		fahrplanabhängige Variante	
	Richtung Jühnde - Mottgers	Richtung Mottgers - Jühnde	Richtung Jühnde - Mottgers	Richtung Mottgers - Jühnde
Untersuchungszeitraum [h]	17	17	17	17
Zugzahl an der Untergrenze des optimalen Leistungsbereichs	89	88	71	88
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	98	98	99	96
Zugzahl an der Obergrenze des optimalen Leistungsbereichs	107	106	106	100
Streckendurchsatzleistung bei optimaler Streckenauslastung [Züge/h * km/h]	335	345	367	368
Streckenbelegungsgrad bei optimaler Streckenauslastung	0,45	0,44	0,42	0,42
mittlere Beförderungsgeschwindigkeit bei optimaler Streckenauslastung [km/h]	152	153	161	163
Wartezeit im Bezugszeitraum bei optimaler Streckenauslastung [min]	404	383	84	93
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,36	0,44	0,36	0,44
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	0,53	0,42	0,60	0,48
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,14	0,15	0,12	0,13
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	98	98	104	98

Tabelle 10: Leistungskennwerte der Strecke Jühnde – Mottgers im Personenverkehr (Untersuchungszeitraum von 5.30 Uhr bis 22.30 Uhr)

Im Güterverkehr (Untersuchungszeitraum von 22.30 Uhr bis 5.30 Uhr) treten erheblich größere Abweichungen zwischen den mit dem neuen Ansatz und den mit STRELE ermittelten Zugzahlen, aber auch zwischen den Ergebnissen für die beiden Fahrtrichtungen auf. Die Abweichungen zu den mit STRELE ermittelten Vergleichszahlen sind auf die relativ großen Variationskoeffizienten des Streckenbelegungsgrades zurückzuführen, die bei STRELE unberücksichtigt bleiben. Sie entstehen aufgrund der Tatsache, dass im damals vorgesehenen Betriebsprogramm insbesondere in der Fahrtrichtung Süd-Nord, in etwas geringerem Ausmaß jedoch auch in Gegenrichtung eine größere Anzahl von Güterzügen praktisch im Abstand der Mindestzugfolgezeiten gefahren wurden, während im Anschluss daran größere Zeiträume ohne nennenswerten Verkehr eingeplant waren. Die Unterschiede der Variationskoeffizienten der Streckenbelegungsgrade in den beiden Fahrtrichtungen sind in Verbindung mit den größeren Mindestzugfolgezeiten der Güterzüge in der Fahrtrichtung Süd-Nord auch Ursache für die deutlich unterschiedlichen optimalen Zugzahlen in den beiden Fahrtrichtungen.

	fahrplanunabhängige Variante		fahrplanabhängige Variante	
	Richtung Jühnde - Mottgers	Richtung Mottgers - Jühnde	Richtung Jühnde - Mottgers	Richtung Mottgers - Jühnde
Untersuchungszeitraum [h]	7	7	7	7
Zugzahl an der Untergrenze des optimalen Leistungsbereichs	34	27	32	25
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	38	30	36	29
Zugzahl an der Obergrenze des optimalen Leistungsbereichs	41	33	38	31
Streckendurchsatzleistung bei optimaler Streckenauslastung [Züge/h * km/h]	254	209	255	201
Streckenbelegungsgrad bei optimaler Streckenauslastung	0,41	0,37	0,38	0,35
mittlere Beförderungsgeschwindigkeit bei optimaler Streckenauslastung [km/h]	92	97	91	94
Wartezeit im Bezugszeitraum bei optimaler Streckenauslastung [min]	175	132	203	219
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,58	0,82	0,58	0,82
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	0,55	0,54	0,53	0,54
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,14	0,17	0,16	0,19
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	46	40	52	40

Tabelle 11: Leistungskennwerte der Strecke Jühnde – Mottgers im Güterverkehr (Untersuchungszeitraum von 22.30 Uhr bis 5.30 Uhr)

Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung für einen ganzen Tag unter Annahme einer zufällige Mischung von Reise- und Güterzügen. Da diese Annahme nur zu Vergleichszwecken dient und in der Realität kaum umsetzbar ist, wurde auf die Erarbeitung eines Bildfahrplans verzichtet und eine fahrplanunab-

hängige Untersuchung durchgeführt. Sowohl bei einer Berechnung mit STRELE als auch bei Nutzung des Verfahrens der Streckendurchsatzleistung geht die optimale Streckenauslastung unter den beschriebenen Randbedingungen um etwa 30 % zurück. Der erhebliche Rückgang der optimalen Streckenauslastung wird vor allem durch die stark unterschiedlichen Beförderungsgeschwindigkeiten im Personen- und Güterverkehr (die um etwa 20 % größere mittlere Mindestzugfolgezeiten zur Folge haben) sowie in geringerem Maße auch durch die höheren Variationskoeffizienten der Mindestzugfolgezeiten und des Streckenbelegungsgrades bewirkt.

	Mischung von Personen- und Güterverkehr	
	Richtung Jühnde – Mottgers	Richtung Mottgers – Jühnde
Untersuchungszeitraum [h]	24	24
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	92	93
Veränderung der Zugzahl gegenüber der ursprünglichen fahrplanunabhängigen Variante	- 32 %	- 27 %
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,58	0,64
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	0,67	0,59
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,31	0,30
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	101	97
zum Vergleich: Veränderung der optimalen Zugzahl nach STRELE gegenüber der ursprünglichen fahrplanunabhängigen Variante	- 30 %	- 30 %

Tabelle 12: Veränderung der Leistungskennwerte der Strecke Jühnde - Mottgers bei Mischung von Personen- und Güterverkehr

3.4.4 Der Frankfurter S-Bahn-Tunnel

Der Frankfurter S-Bahn-Tunnel ist die von allen Linien befahrene Stammstrecke des Frankfurter S-Bahn-Systems und stellt somit ein Nadelöhr dar, das Auswirkungen auf

das gesamte S-Bahn-Netz haben kann. Es wird vollkommen artrein lediglich von S-Bahn-Triebwagen der Baureihe 420/421 benutzt. Das betrachtete Streckenstück zwischen dem Frankfurter Hauptbahnhof und dem Südbahnhof wird jedoch nicht von allen Zügen auf voller Länge befahren, da die Züge in Richtung Offenbach/Hanau hinter der Station Ostendstraße an der Abzweigstelle Schlachthof höhenfrei ausgefädelt werden (vgl. Bild 15). Zur Bewältigung der hohen Zugzahlen ist die Strecke mit leistungsfähiger Signaltechnik ausgestattet, die geringe Mindestzugfolgezeiten ermöglicht.

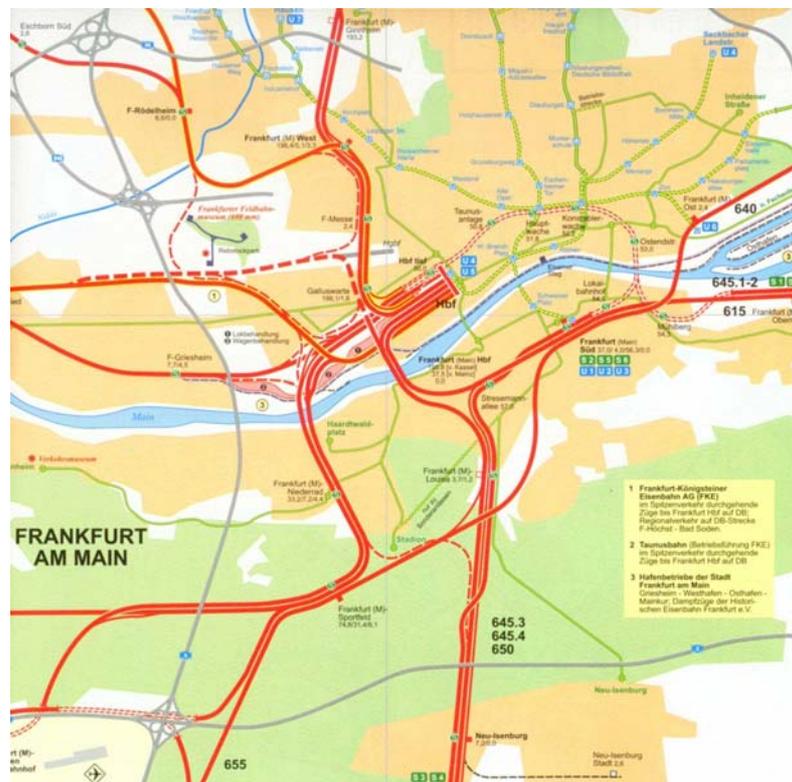


Bild 15: Lage des Frankfurter S-Bahn-Tunnels im Eisenbahnnetz [SCHWEERS 2000]

Aufgrund der einheitlichen Triebfahrzeuge und der lediglich zwei verschiedenen Linienwege werden somit für die Untersuchung nur zwei Modellzugklassen erforderlich. Diese beiden Modellzugklassen weisen darüber hinaus keine Unterschiede in den Mindestzugfolgezeiten sowie den Beförderungsgeschwindigkeiten auf, so dass die entsprechenden Variationskoeffizienten den Wert Null besitzen.

Modellzug- gattung	Laufweg	Anzahl Züge in Richtung	
		Hbf - Süd	Süd - Hbf
S	Hauptbahnhof – Südbahnhof	250	244
S	Hauptbahnhof – Abzweig Schlachthof	126	130
Summe		376	374

Tabelle 13: Modellzüge im Frankfurter S-Bahn-Tunnel, Zugzahlen nach derzeitigem Fahrplan

Während drei Stunden in der Nacht (etwa zwischen 1.30 Uhr und 4.30 Uhr) herrscht im Tunnel Betriebsruhe. Neben der fahrplanunabhängigen und der fahrplanabhängigen Variante wird zur Berücksichtigung dieser Tatsache auch eine Variante mit verkürztem Untersuchungszeitraum betrachtet.

Die Berechnungen mit Hilfe des Ansatzes der Streckendurchsatzleistung ergeben als optimale Streckenauslastung Zugzahlen, die leicht unterhalb derer liegen, mit denen der S-Bahn-Tunnel derzeit belastet wird. Teilweise wird auch die obere Grenze des optimalen Leistungsbereiches überschritten, besonders in der Variante mit Berücksichtigung der Betriebsruhe. Die leicht unterschiedlichen optimalen Streckenauslastungen für Richtung und Gegenrichtung lassen sich auf geringfügig andere Mindestzugfolgezeiten zurückführen. Die Ergebnisse decken sich mit den Beobachtungen des täglichen Eisenbahnbetriebs, wonach der S-Bahn-Tunnel als Engpass des gesamten Frankfurter S-Bahn-Systems anzusehen ist und seine Leistungsfähigkeitsgrenze erreicht hat. In der Variante mit Berücksichtigung der Betriebsruhe wirken insbesondere der höhere Streckenbelegungsgrad und die dadurch erhöhten Wartezeiten leistungsmindernd, jedoch ist der Einfluss nicht so stark, wie aufgrund des verkürzten Untersuchungszeitraumes zu erwarten wäre. Dies wird durch den verringerten Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades verursacht, da die Zugfahrten zwar in kürzerem Zeitraum abgewickelt werden, die Abweichungen vom mittleren Belegungsgrad sich jedoch dadurch verkleinern. Eine weitere Erhöhung der Zugzahlen erscheint abgesehen von infrastrukturellen Maßnahmen oder weiteren Verbesserungen der Signaltechnik nur dadurch möglich, dass Züge in verkehrsschwächeren Zeiten eingelegt werden und somit der Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades weiter sinkt.

Die mit STRELE ermittelten Vergleichswerte zeigen deutlich, dass dieses Programm nur eingeschränkt in der Lage ist, die Besonderheiten des artreinen Betriebs

abzubilden. Die ermittelten Werte liegen um mehr als 100 Züge unter der heute vorhandenen Belastung des Tunnels und unterscheiden sich kaum von Werten, die für eine Strecke im Mischbetrieb bei entsprechender Mindestzugfolgezeit zu erwarten wären.

	fahrplanunabhängige Variante		fahrplanabhängige Variante		Variante mit Betriebsruhe	
	Richtung Hbf - Süd	Richtung Süd - Hbf	Richtung Hbf - Süd	Richtung Süd - Hbf	Richtung Hbf - Süd	Richtung Süd - Hbf
Untersuchungszeitraum [h]	24	24	24	24	21	21
Zugzahl an der Untergrenze des optimalen Leistungsbereichs	330	319	329	323	313	304
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	358	346	363	350	340	332
Zugzahl an der Obergrenze des optimalen Leistungsbereichs	386	372	381	368	361	353
Streckendurchsatzleistung bei optimaler Streckenauslastung [Züge/h * km/h]	231	227	260	238	256	246
Streckenbelegungsgrad bei optimaler Streckenauslastung	0,56	0,55	0,56	0,55	0,62	0,60
mittlere Beförderungsgeschwindigkeit bei optimaler Streckenauslastung [km/h]	23	23	25	24	22	22
Wartezeit im Bezugszeitraum bei optimaler Streckenauslastung [min]	815	771	374	615	932	901
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,47	0,47	0,47	0,47	0,26	0,28
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	0	0	0	0	0	0
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0	0	0	0	0	0
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	272	268	275	272	238	234

Tabelle 14: Leistungskennwerte des Frankfurter S-Bahn-Tunnels

4 Übertragung des Ansatzes auf eingleisige Strecken

4.1 Notwendige Anpassungen zur Abbildung der betrieblichen Besonderheiten eingleisiger Strecken

Um den hergeleiteten Ansatz zur Berechnung optimaler Streckenauslastungen auf eingleisige Strecken übertragen zu können, sind geringfügige Änderungen des Berechnungsverfahrens erforderlich, die im Folgenden beschrieben werden.

Während auf zweigleisigen Strecken für jede Fahrtrichtung ein eigenes Streckengleis zur Verfügung steht, werden eingleisige Strecken im Zweirichtungsbetrieb befahren. Neben der eigentlichen Zugfolge muss somit auch das Befahren der Strecke in den unterschiedlichen Fahrtrichtungen geregelt sein. Dadurch ändert sich an den grundlegenden Definitionen der Einflussparameter, insbesondere auch der Mindestzugfolgezeit zwar nichts; da sich jedoch auf eingleisigen Strecken Züge in den verschiedenen Fahrtrichtungen häufig abwechseln, ist in aller Regel mit einem deutlichen Anstieg der mittleren Mindestzugfolgezeit zu rechnen, weil vor einer Zugfahrt in Gegenrichtung ein Streckenabschnitt zwischen zwei Bahnhöfen vollständig geräumt sein muss. Auf zweigleisigen Strecken kann dagegen der Abstand der einzelnen Züge durch eine dichte Blockteilung stark verkleinert werden, da sich das Problem des Gegenfahrtschutzes im Regelfall nicht stellt.

Aufgrund der starken gegenseitigen Beeinflussung der Züge in den beiden Fahrtrichtungen ist es nicht möglich, die verschiedenen Einflussparameter für beide Fahrtrichtungen getrennt zu berechnen und getrennte Streckendurchsatzleistungen und Zugzahlen im Zustand der optimalen Streckenauslastung auszuweisen. Statt dessen wird eine gemeinsame Berechnung für beide Fahrtrichtungen durchgeführt. Weitere Änderungen des Berechnungsverfahrens gegenüber dem Fall der zweigleisigen Strecke müssen jedoch nicht vorgenommen werden.

4.2 Anwendung des Ansatzes auf verschiedene Beispiele aus der Praxis

Für eingleisige Strecken wird der entwickelte Ansatz wiederum anhand mehrerer Streckenuntersuchungen auf seine Praxistauglichkeit hin überprüft. Hierfür wurden

drei Strecken ausgewählt, die unter unterschiedlichen betrieblichen Randbedingungen genutzt werden. Untersucht wurden die Strecken

- Freiberg (Sachsen) – Holzgau
- Erbach – Wiebelsbach-Heubach – Darmstadt/Hanau (Odenwaldbahn)
- Sorsum – Fallersleben

Die Strecke Freiberg – Holzgau wird nahezu ausschließlich im Personennahverkehr genutzt, wobei ein starrer Taktfahrplan sowie stets das gleiche rollende Material zur Anwendung kommt, so dass von artreinem Betrieb ausgegangen werden kann. In geringem Umfang (etwa ein Zugpaar pro Woche) findet darüber hinaus auf einem Teilstück der Strecke Güterverkehr statt.

Auf der Odenwaldbahn wird mit zwei Zuggattungen Nahverkehr betrieben, nämlich mit Regionalbahnen sowie Regionalexpress-Zügen, welche nur an den größeren Stationen halten. Der Verkehr ist nicht streng getaktet, statt dessen werden neben einem Grundangebot (stündlich eine Regionalbahn in jeder Richtung) zahlreiche Verstärkerzüge gefahren. Güterverkehr fand zum Untersuchungszeitpunkt in geringem Umfang noch auf dem Streckenast nach Darmstadt statt.

Die Strecke Sorsum – Fallersleben stellt die Verbindung zwischen den Schnellfahrstrecken Hannover – Würzburg und Hannover – Berlin dar. Sie ist in Teilabschnitten nur eingleisig ausgebaut und daher für den Hochgeschwindigkeitsverkehr aus Süddeutschland nach Berlin und den Regionalverkehr ein Engpass. Auf den zweigleisigen Abschnitten findet zusätzlich eine Überlagerung mit Verkehren der Verbindungen Hannover – Hildesheim und Hannover – Braunschweig – Magdeburg statt.

Wie auch bei den Untersuchungen an zweigleisigen Strecken wurde in der Regel ein Untersuchungszeitraum von einem Tag gewählt. Auf der Odenwaldbahn, wo in den Nachtstunden der Betrieb ruht, wurde darüber hinaus auch der Einfluss dieser Betriebsruhe durch eine gesonderte Untersuchungsvariante ermittelt; auf der Strecke Freiberg – Holzgau, auf der ebenfalls in der Nacht kein Betrieb stattfindet, stellten sich die planmäßigen und außerplanmäßigen Wartezeiten eindeutig als leistungsbegrenzend heraus, so dass auf eine gesonderte Untersuchung unter Berücksichtigung der Betriebsruhe verzichtet werden konnte. Wie bereits in Kapitel 4.1 erläutert,

werden die Leistungsfähigkeitskennwerte bei allen Untersuchungen eingleisiger Strecken für beide Fahrrichtungen gemeinsam errechnet.

4.2.1 Die Strecke Freiberg (Sachsen) - Holzau

Die 31 Kilometer lange Strecke Freiberg – Holzau wird durch die Freiburger Eisenbahngesellschaft betrieben, die Fahrzeuge des Typs RegioShuttle RS 1 von Adtranz im Stundentakt einsetzt. Im unteren Streckenteil, zwischen Freiberg und Berthelsdorf (vgl. Bild 16), wird etwa einmal wöchentlich Güterverkehr durch DB Cargo betrieben, dessen Einfluss in einer gesonderten Variante untersucht wurde. Für die Leistungsfähigkeitsuntersuchung der Strecke wurden je eine Modellzuggruppe für den Personen- und den Güterverkehr gebildet (siehe Tab. 15).



Bild 16: Lage der Strecke Freiberg – Holzau im Eisenbahnnetz [DB REISE & TOURISTIK AG 2001]

Modellzug- gattung	Laufweg	Anzahl Züge in Richtung	
		Freiberg - Holzau	Holzau - Freiberg
RB	Freiberg - Holzau	15	15
CB	Freiberg - Berthelsdorf	1*	1*
Summe		15 (16*)	15 (16*)

Tabelle 15: Modellzüge auf der Strecke Freiberg – Holzau, Zugzahlen nach Fahrplan 2001 (* = nur in der Untersuchungsvariante mit Güterverkehr)

Im Vergleich zu den mit STRELE ermittelten Werten ergeben sich für diese Strecke bei Anwendung des neuen Ansatzes kleinere Zugzahlen im Zustand der optimalen Streckenauslastung. Oberhalb der mit Hilfe des neuen Verfahrens berechneten Zugzahlen steigen die Wartezeiten im Fahrplan bedingt durch die großen Mindestzugfolgezeiten stark an und wirken sich als die Leistungsfähigkeit begrenzender Faktor aus. Dies wird insbesondere in der fahrplanabhängigen Variante deutlich (vgl. Anhang). Ein Taktfahrplan ist im vorgesehenen Betriebszeitraum mit den durch STRELE bestimmten optimalen Zugzahlen nicht möglich, weil dafür die Fahrzeiten zwischen den Kreuzungsbahnhöfen zu groß sind. Die mit STRELE ermittelten Zugzahlen können somit in dieser Untersuchung nicht als hinreichend genau angesehen werden, da STRELE die Wartezeiten im Fahrplan nicht berücksichtigt.

Als eine Besonderheit der Untersuchungsergebnisse dieser Strecke ist der untypische Verlauf der Funktionen der Wartezeiten in den fahrplanabhängigen Varianten anzusehen. Ab einer gewissen Zugzahl (z.B. in der Untersuchungsvariante ohne Güterverkehr ab 55 Zügen) fallen die Wartezeiten zunächst ab und steigen erst bei deutlich größeren Zugzahlen (hier: bei 65 Zügen) wieder an. Ursache hierfür ist eine auf eingleisigen Strecken mögliche ungünstige Konstellation aus Taktzeiten und Kreuzungsbahnhöfen. Bei schlecht gewählten Taktzeiten ergeben sich für die Taktzüge lange Wartezeiten auf Kreuzung durch den Gegenzug, die sowohl durch eine Verlängerung (unter Verzicht auf eine mögliche Zugkreuzung im nächsten Kreuzungsbahnhof) als auch durch eine Verkürzung der Taktzeit verringert werden können. Die optimale Streckenauslastung wird bei dieser Streckenuntersuchung durch eine Verkürzung der Taktzeit, d.h. durch die Nutzung aller Kreuzungsbahnhöfe erreicht. Beim fahrplanunabhängigen Verfahren tritt der beschriebene Effekt nicht in dieser Schärfe auf, da durch die zufälligen Lagen der Zugtrassen dann nicht zwangsläufig nach jeder Zugfahrt die Strecke in der entgegengesetzten Fahrtrichtung befahren wird.

Im Vergleich zu den Wartezeiten ist der Einfluss der übrigen Faktoren auf die Streckenleistungsfähigkeit gering. Dies gilt auch für den aufgrund des gewählten Betrachtungszeitraumes (der auch Zeiten ohne Verkehr auf der Strecke einschließt) relativ hohen Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades. Die Variationskoeffizienten der Mindestzugfolgezeiten und der Beförderungsgeschwindigkeiten

weisen dagegen wegen des starren Taktfahrplans und des einheitlichen rollenden Materials insbesondere in der Variante ohne Güterverkehr sehr niedrige Werte auf. Geringfügige Unterschiede von Mindestzugfolgezeiten und Beförderungsgeschwindigkeiten ergeben sich lediglich aufgrund der leicht abweichenden Werte für die beiden Fahrrichtungen.

Auffällig sind jedoch die in der fahrplanabhängigen Variante größeren Wartezeiten bei optimaler Streckenauslastung. Bezieht man die Werte jedoch auf die zugehörigen Zugzahlen, relativieren sich diese Unterschiede, da im fahrplanabhängigen Fall auch eine größere optimale Zugzahl erreicht wird. Darüber hinaus sind Schwankungen der Wartezeiten auch aufgrund des bereits angesprochenen Effekts mehr oder weniger günstig gewählter Taktzeiten möglich.

Der Güterverkehr beeinflusst das Leistungsverhalten der Strecke nur geringfügig, da er nur auf einem kurzen Streckenstück stattfindet und außerdem dann abgewickelt werden kann, wenn die Personenzüge den betroffenen Streckenabschnitt geräumt haben. Dadurch unterscheiden sich die Zugzahlen im gesamten optimalen Leistungsbereich der untersuchten Varianten im Wesentlichen durch die zusätzlich zum Personenverkehr stattfindenden Güterzugfahrten. Dieser Effekt wird von STRELE nicht erfasst, so dass die optimalen Zugzahlen nach STRELE für die Varianten mit und ohne Güterverkehr annähernd gleich sind.

Bei allen betrachteten Varianten ergeben sich deutlich geringere Werte für die Streckendurchsatzleistung bei optimaler Zugzahl als bei den in Kapitel 3 untersuchten zweigleisigen Strecken. Aufgrund der größeren Mindestzugfolgezeiten können erheblich weniger Züge gefahren werden, darüber hinaus ist deren Beförderungsgeschwindigkeit niedrig.

	Variante ohne Güterverkehr		Variante mit Güterverkehr	
	fahrplan-unabhängig	fahrplan-abhängig	fahrplan-unabhängig	fahrplan-abhängig
Untersuchungszeitraum [h]	24	24	24	24
Zugzahl an der Untergrenze des optimalen Leistungsbereichs	47	42	49	46
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	52	64	55	68
Zugzahl an der Obergrenze des optimalen Leistungsbereichs	57	67	59	71
Streckendurchsatzleistung bei optimaler Streckenauslastung [Züge/h * km/h]	56	59	51	50
Streckenbelegungsgrad bei optimaler Streckenauslastung	0,45	0,56	0,45	0,55
mittlere Beförderungsgeschwindigkeit bei optimaler Streckenauslastung [km/h]	43	43	43	43
Wartezeit im Bezugszeitraum bei optimaler Streckenauslastung [min]	313	340	313	400
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,74	0,74	0,77	0,77
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	0,06	0,06	0,20	0,20
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,02	0,03	0,07	0,07
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	73	73	72	72

Tabelle 16: Leistungskennwerte der Strecke Freiberg - Holzgau

4.2.2 Die Odenwaldbahn

Als „Odenwaldbahn“ wird die von Eberbach am Neckar kommende und sich in Wiebelsbach-Heubach nach Darmstadt und Hanau verzweigende Strecke bezeichnet. Eine Übersicht über die Lage dieser Strecke bietet Bild 17.

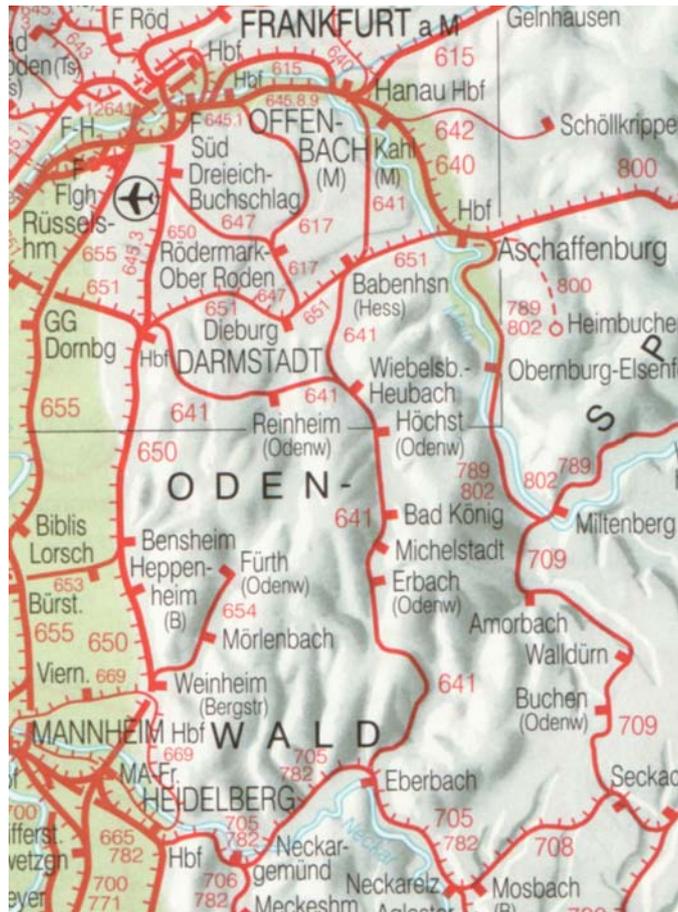


Bild 17: Lage der Odenwaldbahn im Eisenbahnnetz [DB REISE & TOURISTIK AG 2001]

Der Abschnitt Eberbach – Erbach der Odenwaldbahn wird nur von den durchgehenden Regionalexpress-Zügen von Frankfurt nach Stuttgart sowie vereinzelt von Regionalbahnen befahren und wurde aufgrund des geringen Verkehrs in der Untersuchung nicht berücksichtigt. Zwischen Erbach und Wiebelsbach-Heubach ist die Strecke jedoch deutlich stärker belastet, da neben allen durchgehenden Zügen auch die Regionalbahnen von und nach Darmstadt diesen Abschnitt befahren. Die Regionalbahnen in Richtung Hanau beginnen in Wiebelsbach-Heubach.

Auch für diese Strecke wurden wiederum Vergleichswerte mit STRELE ermittelt. Da dieses Programm auf eingleisigen Strecken jedoch alle Werte nur für den so genannten „maßgebenden Kreuzungsabschnitt“, d.h. den mit der größten Mindestzugfolgezeit ermittelt, wurde es erforderlich, die Strecke in mehrere Untersuchungsabschnitte aufzuteilen, da anderenfalls aufgrund des unterschiedlichen Verkehrs auf den verschiedenen Streckenabschnitten Engpässe durch STRELE zum Teil nicht hätten erkannt werden können. Insgesamt wurden drei Untersuchungsabschnitte, nämlich Erbach – Wiebelsbach-Heubach, Darmstadt – Wiebelsbach-Heubach sowie

Wiebelsbach-Heubach – Hanau gebildet. Für jeden Abschnitt wurde neben der fahrplanunabhängigen und der fahrplanabhängigen Untersuchung auch eine Untersuchung unter Berücksichtigung einer nächtlichen Dienstruhe durchgeführt, die in Übereinstimmung mit dem vorliegenden Fahrplan mit sechs Stunden angesetzt wurde.

Auf dem Abschnitt Erbach – Wiebelsbach-Heubach (Streckenlänge 22 Kilometer) war es möglich, die verkehrenden Züge in zwei Modellzuggruppen (je eine für RE- und RB-Züge) zusammenzufassen. Die Modellzuggruppe „RE“ beinhaltet hierbei sowohl die Züge in Richtung Frankfurt als auch in Richtung Darmstadt, die mit ähnlichem rollenden Material gebildet werden. Insgesamt befahren nach dem zugrunde liegenden Fahrplan 44 Züge pro Tag diesen Streckenteil (vgl. Tabelle 17).

Modellzuggattung	Laufweg	Anzahl Züge in Richtung	
		Erbach – Wiebelsbach-Heubach	Wiebelsbach-Heubach – Erbach
RE	Erbach – Wiebelsbach-Heubach	6	6
RB	Erbach – Wiebelsbach-Heubach	17	15
Summe		23	21

Tabelle 17: Modellzüge auf dem Streckenteil Erbach – Wiebelsbach-Heubach, Zugzahlen nach Fahrplan 2001

Wie bei der zuvor betrachteten Strecke Freiberg – Holzgau liegen die mit STRELE ermittelten Leistungsfähigkeiten deutlich über den mit dem Verfahren der Streckendurchsatzleistung berechneten Werten und sind unter Berücksichtigung der Wartezeiten kaum erreichbar. Darüber hinaus fällt auf, dass der bei verkürztem Untersuchungszeitraum (Variante mit Betriebsruhe) geringere Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten beim neuen Verfahren für ein bezogen auf die Verkürzung des Untersuchungszeitraums unterproportionales Absinken der Leistungsfähigkeit sorgt. Ursache hierfür sind die weniger stark ausgeprägten Verkehrsspitzen und -flauten (der Zeitraum ohne Verkehr wird nicht betrachtet). Aufgrund der pro Zeiteinheit höheren Zugzahl und des geringeren Variationskoeffizienten des Streckenbelegungsgrades steigt die Streckendurchsatzleistung sogar an. In STRELE dagegen wird die Leistungsfähigkeit völlig linear reduziert.

Wegen der geringeren Mindestzugfolgezeiten können auf dieser Strecke größere Zugzahlen im Zustand der optimalen Streckenauslastung erreicht werden als auf der

Strecke Freiberg – Holzau (vgl. Kapitel 4.2.1). Dementsprechend werden auch größere Streckendurchsatzleistungen erreicht, obwohl die Variationskoeffizienten der Beförderungsgeschwindigkeiten wegen der unterschiedlichen Zuggattungen höher und die Beförderungsgeschwindigkeiten aufgrund des geringeren Abstands der Haltebahnhöfe geringfügig niedriger liegen.

	fahrplanunabhängige Variante	fahrplanabhängige Variante	Variante mit Betriebsruhe
Untersuchungszeitraum [h]	24	24	18
Zugzahl an der Untergrenze des optimalen Leistungsbereichs	83	64	71
Zugzahl im Zustand optimaler Streckenauslastung	93	78	77
Zugzahl an der Obergrenze des optimalen Leistungsbereichs	101	84	83
Streckendurchsatzleistung bei optimaler Streckenauslastung [Züge/h * km/h]	88	82	106
Streckenbelegungsgrad bei optimaler Streckenauslastung	0,42	0,36	0,46
mittlere Beförderungsgeschwindigkeit bei optimaler Streckenauslastung [km/h]	41	39	40
Wartezeit im Bezugszeitraum bei optimaler Streckenauslastung [min]	374	398	372
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,75	0,75	0,41
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	0,13	0,13	0,13
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,20	0,15	0,21
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	109	106	82

Tabelle 18: Leistungskennwerte des Streckenteils Erbach – Wiebelsbach-Heubach der Odenwaldbahn

Im Streckenteil Darmstadt – Wiebelsbach-Heubach ist neben den Zügen des Personenverkehrs noch der geringe Güterverkehr zu berücksichtigen. Er wird durch eine Cargo-Bedienungsfahrt zwischen Darmstadt und dem kurz vor Reinheim liegenden Bahnhof Ober-Ramstadt abgewickelt. Gegenüber den übrigen Streckenabschnitten beschränkt sich der Verkehr mit Regionalexpress-Zügen auf zwei Züge in der Hauptverkehrszeit; das Angebot an Regionalbahnen ist jedoch relativ umfangreich. Die folgende Tabelle 19 zeigt eine Zusammenstellung der für die Leistungsfähigkeitsuntersuchung dieses Abschnittes verwendeten Modellzüge.

Modellzug- gattung	Laufweg	Anzahl Züge in Richtung	
		Darmstadt – Wiebelsbach-Heubach	Wiebelsbach-Heubach – Darmstadt
RE	Darmstadt – Wiebelsbach-Heubach	2	2
RB	Darmstadt – Wiebelsbach-Heubach	17	20
CB	Darmstadt – Ober-Ramstadt	1	1
Summe		20	23

Tabelle 19: Modellzüge auf dem Streckenteil Darmstadt – Wiebelsbach-Heubach, Zugzahlen nach Fahrplan 2001

Aufgrund größerer Mindestzugfolgezeiten im Abschnitt Darmstadt – Wiebelsbach-Heubach verringert sich die Leistungsfähigkeit dieses 28 Kilometer langen Streckenteils gegenüber der zuerst betrachteten Teilstrecke Erbach – Wiebelsbach-Heubach entsprechend. Die übrigen Leistungskennwerte, z.B. der Streckenbelegungsgrad oder der Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten, unterscheiden sich von denen des zuvor untersuchten Streckenabschnitts kaum. Die Beförderungsgeschwindigkeiten liegen infolge der größeren Bahnabstände geringfügig höher, aufgrund der ausgeprägteren Verkehrsspitzen ergeben sich auch höhere Variationskoeffizienten des Streckenbelegungsgrades.

Wegen größerer planmäßiger Wartezeiten sind die Leistungsfähigkeiten der fahrplanabhängigen Varianten sowohl des Abschnittes Erbach – Wiebelsbach-Heubach als auch des Abschnitts Wiebelsbach-Heubach – Darmstadt kleiner als die der fahrplanunabhängigen Untersuchungen. Auf der Strecke Freiberg – Holzgau hingegen konnten bis zu einer gewissen Zugzahl in der fahrplanabhängigen Variante geringere planmäßige Wartezeiten je Zug erreicht werden, was zu einer größeren Leistungsfähigkeit in der fahrplanabhängigen Variante führte.

	fahrplanunabhängige Variante	fahrplanabhängige Variante	Variante mit Betriebsruhe
Untersuchungszeitraum [h]	24	24	18
Zugzahl an der Untergrenze des optimalen Leistungsbereichs	70	60	56
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	78	71	63
Zugzahl an der Obergrenze des optimalen Leistungsbereichs	85	77	67
Streckendurchsatzleistung bei optimaler Streckenauslastung [Züge/h * km/h]	79	81	92
Streckenbelegungsgrad bei optimaler Streckenauslastung	0,42	0,37	0,46
mittlere Beförderungsgeschwindigkeit bei optimaler Streckenauslastung [km/h]	47	47	47
Wartezeit im Bezugszeitraum bei optimaler Streckenauslastung [min]	354	330	308
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,88	0,88	0,58
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	0,15	0,15	0,15
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,10	0,09	0,11
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	95	96	71

Tabelle 20: Leistungskennwerte des Streckenteils Darmstadt – Wiebelsbach-Heubach der Odenwaldbahn

Der Abschnitt Wiebelsbach-Heubach – Hanau stellt mit 35 Kilometern Streckenlänge den längsten der drei untersuchten Abschnitte der Odenwaldbahn dar. Er wird im Personenverkehr durch die Regionalexpress-Züge zwischen Stuttgart und Frankfurt sowie die Regionalbahnen von Wiebelsbach-Heubach nach Hanau genutzt. Planmäßiger Güterverkehr findet auf diesem Streckenteil nicht mehr statt. Die für die

Leistungsfähigkeitsberechnung benutzten Modellzuggattungen sind in Tabelle 21 zusammengestellt.

Modellzug- gattung	Laufweg	Anzahl Züge in Richtung	
		Wiebelsbach-Heubach – Hanau	Hanau – Wiebelsbach-Heubach
RE	Wiebelsbach-Heubach – Hanau	4	4
RB	Wiebelsbach-Heubach – Hanau	20	21
Summe		24	25

Tabelle 21: Modellzüge auf dem Streckenteil Wiebelsbach-Heubach – Hanau, Zugzahlen nach Fahrplan 2001

Aufgrund des zum Teil großen Abstandes zwischen den Kreuzungsbahnhöfen (zwischen Babenhausen und Wiebelsbach-Heubach gibt es z.B. nur eine Kreuzungsmöglichkeit) und entsprechend großer Mindestzugfolgezeiten ist die Leistungsfähigkeit dieses Abschnittes deutlich kleiner als die der übrigen Streckenteile. Bereits diese Leistungsfähigkeiten werden verglichen mit den anderen untersuchten Abschnitten der Odenwaldbahn bei etwas größeren Streckenbelegungsgraden erreicht.

Die übrigen Leistungsfähigkeitskennwerte, beispielsweise der hohe Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades, weichen wiederum nicht wesentlich von denen der zuvor untersuchten Streckenabschnitte der Odenwaldbahn ab. Jedoch ist auf diesem Streckenteil die optimale Zugzahl der fahrplanabhängigen Variante höher als die der fahrplanunabhängigen, weil die mittlere Mindestzugfolgezeit, ihr Variationskoeffizient und der Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten geringfügig kleiner sind.

Darüber hinaus ist im Gegensatz zu den anderen Streckenteilen die optimale Zugzahl durch die zur Zeit auf der Strecke gefahrenen Zugzahlen annähernd erreicht bzw. in der Variante mit Betriebsruhe bereits überschritten. Eine Steigerung der optimalen Zugzahl könnte bei gegebener Infrastruktur nur durch den Abbau von Verkehrsspitzen und durch das Einlegen von Zügen während der Zeiten erfolgen, zu denen gegenwärtig der Betrieb auf der Strecke ruht.

	fahrplanunabhängige Variante	fahrplanabhängige Variante	Variante mit Betriebsruhe
Untersuchungszeitraum [h]	24	24	18
Zugzahl an der Untergrenze des optimalen Leistungsbereichs	46	46	42
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	51	54	45
Zugzahl an der Obergrenze des optimalen Leistungsbereichs	56	60	48
Streckendurchsatzleistung bei optimaler Streckenauslastung [Züge/h * km/h]	50	52	58
Streckenbelegungsgrad bei optimaler Streckenauslastung	0,43	0,46	0,51
mittlere Beförderungsgeschwindigkeit bei optimaler Streckenauslastung [km/h]	44	44	42
Wartezeit im Bezugszeitraum bei optimaler Streckenauslastung [min]	332	353	403
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,78	0,78	0,45
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	0,17	0,16	0,17
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,15	0,12	0,18
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	71	72	53

Tabelle 22: Leistungskennwerte des Streckenteils Wiebelsbach-Heubach – Hanau der Odenwaldbahn

4.2.3 Die Strecke Sorsum - Fallersleben

Die Strecke von Sorsum nach Fallersleben besteht aus mehreren Streckenabschnitten unterschiedlicher Charakteristik, die teils eingleisig, teils zweigleisig ausgebaut sind. Insbesondere die eingleisigen Streckenabschnitte verursachen eine

Vielzahl von Zwangspunkten für die Gestaltung der Fahrpläne im Fern- und Nahverkehr.

Die untersuchte Strecke verläuft vom Abzweig Sorsum an der Neubaustrecke Hannover – Würzburg zunächst über eine eingleisige Verbindungskurve zur Abzweigstelle Himmelsthür an der von Hannover kommenden zweigleisigen Strecke nach Hildesheim. Der anschließende Streckenteil von Hildesheim nach Groß Gleidingen an der zweigleisigen Hauptbahn von Hannover nach Braunschweig ist ebenso wie der Streckenteil, der von der zweigleisigen Hauptbahn Braunschweig – Helmstedt abzweigend nach Fallersleben führt, nur eingleisig.

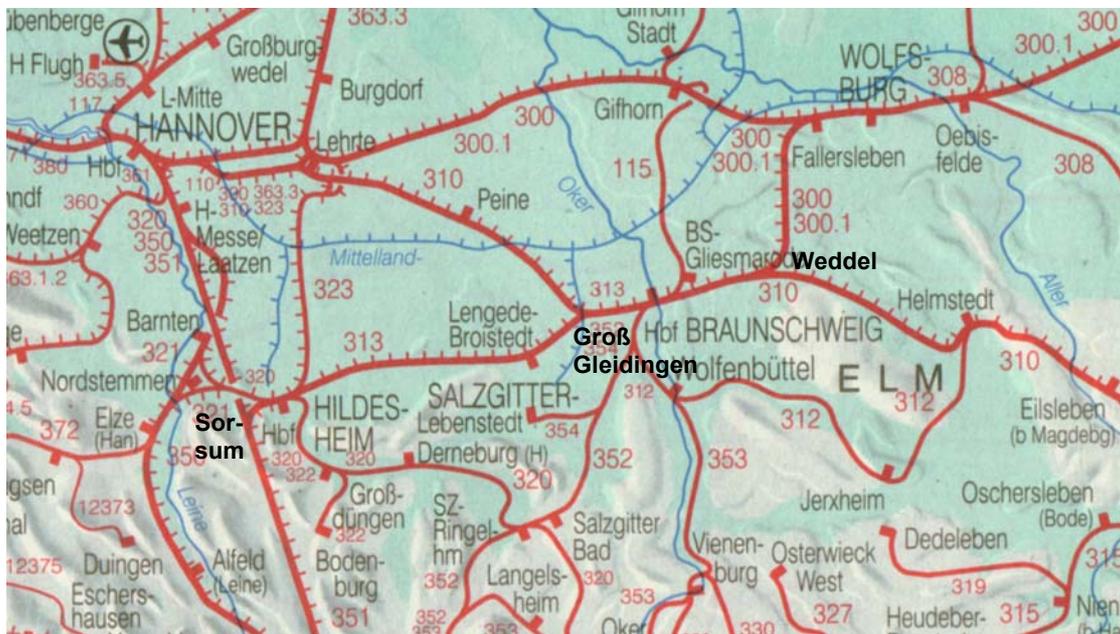


Bild 18: Lage der Strecke Sorsum – Fallersleben im Eisenbahnnetz [nach DB REISE & TOURISTIK AG 2001]

Aufgrund der verschiedenen eingleisigen Streckenabschnitte wurde es ebenso wie auch schon bei den Leistungsfähigkeitsuntersuchungen für die Odenwaldbahn erforderlich, die Strecke in Teilabschnitte zu untergliedern, um Vergleichswerte mit STRELE berechnen zu können. Die Strecke wurde daher in die Abschnitte Sorsum – Groß Gleidingen (42,5 km lang) und Groß Gleidingen – Fallersleben (35 km lang) geteilt, wovon zunächst der erstgenannte Abschnitt untersucht werden soll.

Der betrachtete Streckenabschnitt wird von verschiedenen Zugarten auf unterschiedlichen Streckenteilen befahren. Neben den ICE-Zügen aus Süddeutschland nach

Berlin verkehren Regionalbahnen im Abschnitt Himmelsthür – Hildesheim sowie Stadtexpress-Züge von Hildesheim nach Groß Gleidingen. Für den Güterverkehr wurden zwei Modellzugklassen gebildet (langsamere Güterzüge mit Laufweg Himmelsthür – Hildesheim sowie schnellere Güterzüge von Himmelsthür nach Groß Gleidingen). Tabelle 23 zeigt die Einteilung der auf dem Streckenteil verkehrenden Züge in Modellzugklassen.

Modellzug- gattung	Laufweg	Anzahl Züge in Richtung	
		Sorsum – Groß Gleidingen	Groß Gleidingen – Sorsum
ICE	Sorsum – Groß Gleidingen	14	15
TEC	Himmelsthür – Groß Gleidingen	5	7
SE	Hildesheim – Groß Gleidingen	13	14
RB	Himmelsthür – Hildesheim	45	45
IRC	Himmelsthür - Hildesheim	7	8
Summe		84	89

Tabelle 23: Modellzüge auf der Strecke Sorsum – Groß Gleidingen, Zugzahlen nach Fahrplan 2001

Auch bei dieser Streckenuntersuchung liegen die mit dem neuen Ansatz ermittelten optimalen Zugzahlen deutlich unter den mit STRELE errechneten. Diese mit STRELE bestimmten Vergleichswerte stellen eine Steigerung der Zugzahlen gegenüber dem gegenwärtigen Fahrplan dar und sind kaum erreichbar, da schon heute auf den eingleisigen Abschnitten größere Wartezeiten im Fahrplan für Regional- und Güterverkehr auftreten und für den Fernverkehr zahlreiche Fahrplanbindungen bestehen, so z.B. die Kreuzung der ICE in Hildesheim und Braunschweig.

Der Streckenbelegungsgrad bei optimaler Streckenauslastung (0,28 im fahrplanunabhängigen und 0,25 im fahrplanabhängigen Fall) erscheint auf den ersten Blick recht niedrig, er stellt jedoch einen Mittelwert für ein- und zweigleisige Streckenabschnitte dar. Der lange und damit kritische eingleisige Abschnitt zwischen Hildesheim und Groß Gleidingen ist durch die vorhandene Belastung weit höher belegt. Zusätzlich bewirken die sowohl im fahrplanunabhängigen als auch im fahrplanabhängigen Fall stark streuenden Mindestzugfolgezeiten ein Absinken der Leistungsfähigkeit.

Alle in Tabelle 24 für diese Leistungsfähigkeitsuntersuchung angegebenen Zugzahlen stellen grundsätzlich jeweils die Summen aller zwischen Sorsum und Groß Gleidingen verkehrender Züge dar. Sie beziehen sich somit nicht nur auf die eingleisigen Engpassabschnitte, sondern beinhalten auch Züge, die nur den zweigleisigen Abschnitt Himmelsthür – Hildesheim befahren. Gleiches gilt sinngemäß auch für die Untersuchung des Streckenabschnitts Groß Gleidingen – Fallersleben.

	fahrplanunabhängige Variante	fahrplanabhängige Variante
Untersuchungszeitraum [h]	24	24
Zugzahl an der Untergrenze des optimalen Leistungsbereichs	136	108
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	154	122
Zugzahl an der Obergrenze des optimalen Leistungsbereichs	168	134
Streckendurchsatzleistung bei optimaler Streckenauslastung [Züge/h * km/h]	92	82
Streckenbelegungsgrad bei optimaler Streckenauslastung	0,28	0,25
mittlere Beförderungsgeschwindigkeit bei optimaler Streckenauslastung [km/h]	71	76
Wartezeit im Bezugszeitraum bei optimaler Streckenauslastung [min]	416	273
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,53	0,53
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	1,49	1,56
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,27	0,30
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	199	188

Tabelle 24: Leistungskennwerte der Strecke Sorsum – Groß Gleidingen

Auch der Streckenteil Groß Gleidingen – Fallersleben wird von unterschiedlichen Zugarten im Nah- und Fernverkehr befahren. Neben den ICE-Zügen nach Berlin verkehrt zusätzlich eine IC-Linie, die jedoch die untersuchte Strecke an der Abzweigstelle Weddel (zwischen Braunschweig und Helmstedt) verlässt. Auch eine von Braunschweig kommende Regionalbahn fährt an der Abzweigstelle Weddel Richtung Magdeburg weiter. Eine weitere Regionalbahn benutzt die Strecke zwischen Braunschweig und Fallersleben, zusätzlich verkehrt ein Regionalexpress zwischen Groß Gleidingen und Braunschweig. Für jeden dieser Züge wurde eine eigene Modellzugklasse eingerichtet (vgl. Tabelle 25).

Für den Güterverkehr wurden zwei Modellzugklassen vorgesehen. Einer der Modellzüge befährt die Strecke zwischen dem kurz hinter Braunschweig Hbf befindlichen Abzweig Buchhorst und Fallersleben, während der zweite von Groß Gleidingen kommend weiter in Richtung Helmstedt/Magdeburg fährt.

Modellzuggattung	Laufweg	Anzahl Züge in Richtung	
		Groß Gleidingen – Fallersleben	Fallersleben – Groß Gleidingen
ICE	Groß Gleidingen – Fallersleben	14	15
IC	Groß Gleidingen – Weddel	20	20
RE	Groß Gleidingen – Braunschweig	34	36
TEC	Groß Gleidingen – Weddel	29	33
GC	Buchhorst – Fallersleben	5	11
RB	Braunschweig – Weddel	23	22
RB	Braunschweig – Fallersleben	9	9
Summe		134	146

Tabelle 25: Modellzüge auf der Strecke Groß Gleidingen – Fallersleben, Zugzahlen nach Fahrplan 2001

Die Untersuchungsergebnisse des Streckenabschnitts Groß Gleidingen – Fallersleben unterscheiden sich insofern von denen des zuvor betrachteten Streckenteils als hier im fahplanabhängigen Fall eine größere optimale Streckenauslastung erreichbar ist. Dies liegt darin begründet, dass ein längerer Teilabschnitt der Strecke Groß Gleidingen – Fallersleben zweigleisig ausgebaut ist und darüber hinaus dieser Teil auch von deutlich mehr Zügen befahren wird. Wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, können auf zweigleisigen Strecken häufig durch geschickte Fahrplankonstruktion

höhere Leistungsfähigkeiten als im fahrplanunabhängigen Fall erzielt werden, was sich hier auch in den deutlich geringeren planmäßigen Wartezeiten widerspiegelt.

Aufgrund der geringeren mittleren Mindestzugfolgezeit sind die Zugzahlen bei optimaler Streckenauslastung höher als im zuvor untersuchten Abschnitt Sorsum – Groß Gleidungen. Daher werden auch größere Streckendurchsatzleistungen erreicht.

	fahrplanunabhängige Variante	fahrplanabhängige Variante
Untersuchungszeitraum [h]	24	24
Zugzahl an der Untergrenze des optimalen Leistungsbereichs	185	216
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	208	240
Zugzahl an der Obergrenze des optimalen Leistungsbereichs	227	264
Streckendurchsatzleistung bei optimaler Streckenauslastung [Züge/h * km/h]	125	149
Streckenbelegungsgrad bei optimaler Streckenauslastung	0,31	0,35
mittlere Beförderungsgeschwindigkeit bei optimaler Streckenauslastung [km/h]	68	75
Wartezeit im Bezugszeitraum bei optimaler Streckenauslastung [min]	481	197
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,29	0,29
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	1,26	1,21
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,33	0,32
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	237	254

Tabelle 26: Leistungskennwerte der Strecke Groß Gleidungen – Fallersleben

5 Die Leistungsfähigkeitsermittlung drei- und mehrgleisiger Strecken mit Hilfe des neuen Ansatzes

5.1 Vorgehensweise zur Berechnung der Leistungsfähigkeit dreigleisiger Strecken

Im Bereich der Deutschen Bahn AG gibt es nur wenige längere dreigleisig ausgebauten Streckenteile, deren drei Gleise von allen auf der Strecke verkehrenden Zugarten genutzt werden können bzw. genutzt werden. Meist wird eines der Streckengleise in erster Linie durch eine Verkehrsart, z.B. den Güter- oder den Nahverkehr, genutzt. Alle dreigleisigen Strecken werden im Zuge der Fahrplanerstellung wie eine Kombination aus einer ein- und einer zweigleisigen Strecke behandelt, für die jeweils getrennte Bildfahrpläne erarbeitet werden. Im Regelfall wird nur eines der drei Gleise im Zweirichtungsbetrieb genutzt.

In Anlehnung an die Fahrplanerstellung wird daher auch bei der Ermittlung der Streckendurchsatzleistung eine Berechnung für die im Einrichtungsbetrieb befahrenen Gleise der „zweigleisigen Strecke“ sowie eine getrennte Berechnung für das dritte Gleis durchgeführt. Hierzu wird nach den in den beiden vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Verfahren vorgegangen.

Durch eine günstige Verteilung der durchzuführenden Zugfahrten auf die vorhandenen Streckengleise kann die Leistungsfähigkeit der zu untersuchenden Strecke optimiert werden. Dazu bietet es sich an, sinnvolle Kombinationen der zu betrachtenden Modellzüge in unterschiedlichen Untersuchungsvarianten auf unterschiedlichen Gleisen der Strecke verkehren zu lassen. Beispielsweise kann auf diese Weise versucht werden, eine Entmischung der Verkehre (z.B. des Personennah- und Fernverkehrs oder des Güter- und des Personenverkehrs) zu erreichen.

Dreigleisige Strecken bieten erheblich größere Möglichkeiten zur Disposition als zwei- und insbesondere eingleisige Strecken. Die Auswirkungen außergewöhnlicher Verspätungen oder technischer Störungen können relativ einfach durch die Verlagerung von Zugfahrten auf ein anderes als das planmäßig vorgesehene Streckengleis begrenzt werden. Diese außergewöhnlichen Ereignisse werden jedoch bei Kapazitätsberechnungen in der Regel nicht berücksichtigt und bleiben auch beim neuen Ansatz außer Betracht.

Auch für dreigleisige Strecken soll die Eignung des gefundenen Ansatzes zur Leistungsfähigkeitsberechnung anhand eines Praxisbeispiels nachgewiesen werden. Hierfür wurde die Strecke Hanau – Gelnhausen ausgewählt, die zwischen den Stationen Wolfgang (der nach Hanau in Richtung Fulda folgende Bahnhof) und Hailer-Meerholz (letzter Bahnhof vor Gelnhausen) aufgrund der durch die Neubaustrecke Hannover – Würzburg entstandenen Mehrverkehre dreigleisig ausgebaut worden ist.

5.2 Praxisbeispiel: Die Strecke Hanau – Gelnhausen

Der Abschnitt Hanau – Gelnhausen ist Teil der Strecke Frankfurt – Fulda und bindet das Rhein-Main-Gebiet an die Neubaustrecke Hannover – Würzburg an (vgl. Bild 19). Die Strecke wird sowohl durch den Personenfern- als auch durch den Nah- und Güterverkehr stark belastet. Im Fernverkehr nutzen zwei ICE-Linien und eine Interregio-Verbindung die Strecke, im Nahverkehr eine RE- und eine RB-Linie. Für jede der Zuggattungen wurde eine Modellzugklasse eingerichtet; der Güterverkehr wurde wiederum durch eine Modellzugklasse für den schnellen und eine für den langsamen Güterverkehr abgebildet (vgl. Tab. 27).

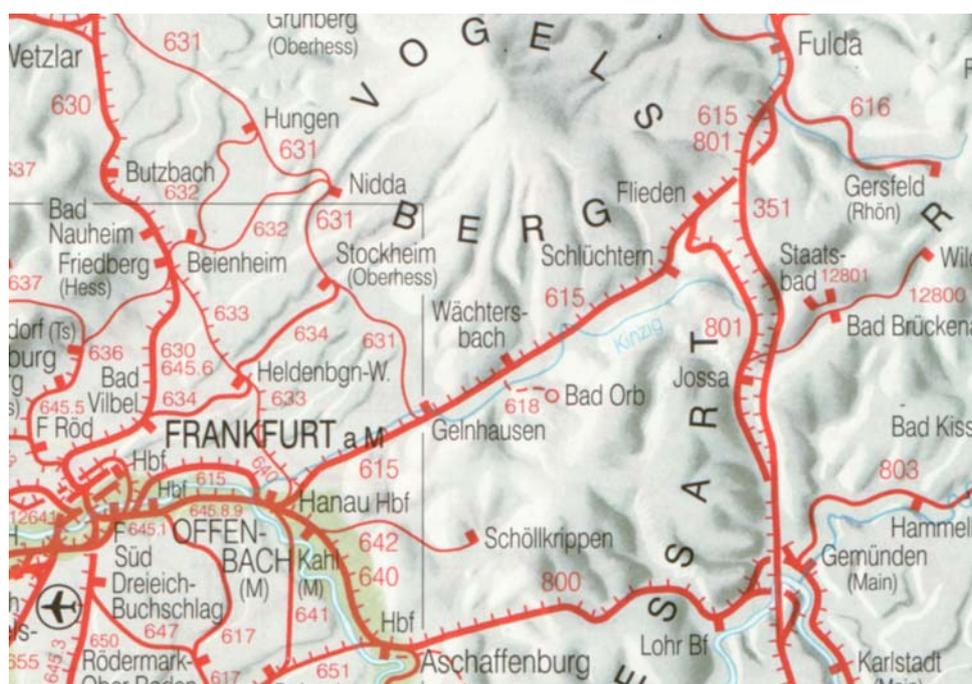


Bild 19: Lage der Strecke Hanau – Gelnhausen im Eisenbahnnetz [DB REISE & TOURISTIK AG 2001]

Modellzug- gattung	Laufweg	Anzahl Züge in Richtung	
		Hanau - Gelnhausen	Gelnhausen - Hanau
ICE	Hanau – Gelnhausen	24	25
IR	Hanau – Gelnhausen	13	11
IKE	Hanau – Gelnhausen	23	24
RE	Hanau – Gelnhausen	22	23
RB	Hanau – Gelnhausen	25	21
IRC	Hanau – Gelnhausen	25	23
Summe		132	127

Tabelle 27: Modellzüge auf der Strecke Hanau - Gelnhausen, Zugzahlen nach aktuellem Fahrplan

Über das zwischen Wolfgang und Hailer-Meerholz vorhandene dritte Gleis (in Mittellage) wird zur Zeit die Regionalbahn geleitet, die überall hält. Die übrigen Züge werden planmäßig auf den äußeren Gleisen (im Rahmen der Untersuchung „Ferngleise“ genannt) geführt. Diese Variante soll zunächst untersucht werden.

Bei allen Berechnungen ist zu beachten, dass an Streckenbeginn und Streckenende kurze zweigleisige Abschnitte vorhanden sind, die auch von den Regionalbahnen befahren werden müssen. Daher erscheinen die Regionalbahnen auch in den Leistungsfähigkeitsberechnungen der Ferngleise; da sie zwei getrennte Streckenabschnitte dieser Gleise befahren, werden sie für jeden der Abschnitte einmal, insgesamt also doppelt gezählt. Auch die in Tabelle 28 ermittelten Zugzahlen enthalten deshalb die Regionalbahnen zweifach. Da auf dem dritten Gleis der Strecke nachts kein planmäßiger Verkehr stattfindet, wurde für dieses Gleis eine zusätzliche Variante unter Berücksichtigung dieser Betriebsruhe untersucht.

Die Werte der Tabellen 28 und 29 zeigen eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse aus STRELE und dem neuen Ansatz. Auf den Ferngleisen erscheint kein einzelner Einflussfaktor als leistungsbegrenzend. Am ehesten könnte durch angeglichene Beförderungsgeschwindigkeiten der Züge versucht werden, die Kapazität zu steigern.

Das dritte Gleis ist jedoch durch die dort verkehrenden knapp 50 Regionalbahnen nicht ausgelastet. Wegen der relativ kleinen Mindestzugfolgezeiten und des artreinen Betriebs (sehr kleiner Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten, nur geringfügige Unterschiede der Mindestzugfolgezeiten aufgrund des Zweirichtungs- betriebs) sind größere Leistungsfähigkeiten als bei den zuvor untersuchten einglei-

gen Strecken möglich. Daher wird in einer weiteren Betriebsvariante untersucht, ob die Leistungsfähigkeit der Gesamtstrecke durch die Verlagerung von Zügen auf das dritte Gleis erhöht werden kann. Zur Verlagerung werden die RE-Züge ausgewählt.

	fahrplanunabhängige Variante		fahrplanabhängige Variante	
	Richtung Hanau - Gelnhausen	Richtung Gelnhausen - Hanau	Richtung Hanau - Gelnhausen	Richtung Gelnhausen - Hanau
Untersuchungszeitraum [h]	24	24	24	24
Zugzahl an der Untergrenze des optimalen Leistungsbereichs	152	149	163	159
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	171	167	174	175
Zugzahl an der Obergrenze des optimalen Leistungsbereichs	187	180	183	186
Streckendurchsatzleistung bei optimaler Streckenauslastung [Züge/h * km/h]	243	236	266	258
Streckenbelegungsgrad bei optimaler Streckenauslastung	0,38	0,39	0,36	0,36
mittlere Beförderungsgeschwindigkeit bei optimaler Streckenauslastung [km/h]	77	80	84	85
Wartezeit im Bezugszeitraum bei optimaler Streckenauslastung [min]	538	553	290	344
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,25	0,33	0,25	0,33
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	0,42	0,46	0,58	0,64
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,35	0,39	0,32	0,36
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	158	155	167	168

Tabelle 28: Leistungskennwerte der Ferngleise der Strecke Hanau – Gelnhausen, Variante RE auf Ferngleisen

	fahrplanunabhängige Variante	fahrplanabhängige Variante	Variante mit Betriebsruhe
Untersuchungszeitraum [h]	24	24	21
Zugzahl an der Untergrenze des optimalen Leistungsbereichs	109	102	110
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	120	114	120
Zugzahl an der Obergrenze des optimalen Leistungsbereichs	130	121	129
Streckendurchsatzleistung bei optimaler Streckenauslastung [Züge/h * km/h]	145	135	161
Streckenbelegungsgrad bei optimaler Streckenauslastung	0,45	0,50	0,52
mittlere Beförderungsgeschwindigkeit bei optimaler Streckenauslastung [km/h]	46	40	43
Wartezeit im Bezugszeitraum bei optimaler Streckenauslastung [min]	380	713	500
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,45	0,45	0,30
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	0,29	0,21	0,29
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,02	0,01	0,01
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	133	119	116

Tabelle 29: Leistungskennwerte des dritten Gleises der Strecke Hanau – Gelnhausen, Variante RE auf Ferngleisen

Durch die Verlagerung der Regionalexpresslinie wird der in der ursprünglichen Variante artreine Betrieb auf dem dritten Streckengleis nur wenig beeinträchtigt, da die Regionalexpress-Züge gegenüber den Regionalbahnen einen ähnlichen Fahrtverlauf aufweisen. Eine Verlagerung weiterer Zugarten wird nicht vorgenommen, da bereits durch diese Maßnahme annähernd eine Verdoppelung der Zugzahl auf dem dritten Streckengleis erreicht wird. Darüber hinaus würde die Überleitung von Zügen

des Personenfernverkehrs auf das dritte Streckengleis zu starken Geschwindigkeitseinbrüchen für diese Züge führen. Für den Güterverkehr müssten im Falle der Überleitung auf das dritte Streckengleis zusätzliche Kreuzungshalte eingeplant werden.

Durch die Züge der Regionalexpresslinie wird das dritte Streckengleis zwar erheblich stärker ausgelastet, trotzdem ist eine Steigerung der Zugzahlen auf diesem Gleis nach dem Verfahren der Streckendurchsatzleistung noch immer möglich. Die Zahl der erforderlich werdenden Kreuzungen steigt zwar deutlich an, sie können jedoch ohne ein Ausweichen auf die Ferngleise im zentral gelegenen Bahnhof Langenselbold vorgenommen werden. Trotz des nicht mehr artreinen Betriebs wird das Maximum der Streckendurchsatzleistung, das aufgrund der deutlich höheren Beförderungsgeschwindigkeit oberhalb des Wertes der zuvor untersuchten Betriebsvariante liegt, bei nur geringfügig kleineren Zugzahlen erreicht. Lediglich bei der fahrplanabhängigen Variante ist ein stärkerer Abfall der Leistungsfähigkeit zu beobachten, da die mittlere Mindestzugfolgezeit dieser Variante größer ist. Die nach STRELE berechneten Zugzahlen sind hier jedoch deutlich größer als die nach dem neuen Verfahren berechneten und unterscheiden sich praktisch nicht von denen der vorher betrachteten Variante. Aufgrund der veränderten Betriebssituation sind sie auf dem dritten Gleis nur unter Inkaufnahme größerer Wartezeiten (z.B. in Zusammenhang mit notwendig werdenden Kreuzungshalten) abzuwickeln.

Bei der Betrachtung der Gesamtstrecke einschließlich der zweigleisigen Streckenabschnitte am Streckenbeginn und –ende fällt auf, dass deren Leistungsfähigkeit durch die veränderte Betriebsabwicklung kaum ansteigt. Zwar werden Zugzahlen im Zustand der optimalen Streckenauslastung erreicht, die deutlich über denen der vorherigen Betriebsvariante liegen; hierbei ist jedoch zu beachten, dass nun auch der Regionalexpress auf jedem der von ihm befahrenen Streckenabschnitte der Ferngleise als eigener Zug betrachtet wird und daher doppelt in die Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung einfließt. Somit ist fast kein Zuwachs an Leistungsfähigkeit vorhanden, so dass sich die zweigleisigen Streckenabschnitte als Engpass herausstellen.

	fahrplanunabhängige Variante		fahrplanabhängige Variante	
	Richtung Hanau - Gelnhausen	Richtung Gelnhausen - Hanau	Richtung Hanau - Gelnhausen	Richtung Gelnhausen - Hanau
Untersuchungszeitraum [h]	24	24	24	24
Zugzahl an der Untergrenze des optimalen Leistungsbereichs	179	176	186	205
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	200	199	196	224
Zugzahl an der Obergrenze des optimalen Leistungsbereichs	219	219	206	241
Streckendurchsatzleistung bei optimaler Streckenauslastung [Züge/h * km/h]	200	196	232	229
Streckenbelegungsgrad bei optimaler Streckenauslastung	0,38	0,37	0,29	0,33
mittlere Beförderungsgeschwindigkeit bei optimaler Streckenauslastung [km/h]	77	80	85	85
Wartezeit im Bezugszeitraum bei optimaler Streckenauslastung [min]	552	573	266	375
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,28	0,33	0,28	0,33
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	0,52	0,59	0,82	0,95
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,39	0,42	0,34	0,38
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	182	185	217	221

Tabelle 30: Leistungskennwerte der Ferngleise der Strecke Hanau – Gelnhausen, Variante RE auf drittem Gleis

	fahrplanunabhängige Variante	fahrplanabhängige Variante	Variante mit Betriebsruhe
Untersuchungszeitraum [h]	24	24	21
Zugzahl an der Untergrenze des optimalen Leistungsbereichs	104	84	94
Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung	116	94	104
Zugzahl an der Obergrenze des optimalen Leistungsbereichs	127	100	112
Streckendurchsatzleistung bei optimaler Streckenauslastung [Züge/h * km/h]	174	160	191
Streckenbelegungsgrad bei optimaler Streckenauslastung	0,38	0,40	0,42
mittlere Beförderungsgeschwindigkeit bei optimaler Streckenauslastung [km/h]	64	65	65
Wartezeit im Bezugszeitraum bei optimaler Streckenauslastung [min]	352	190	320
Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades	0,47	0,47	0,30
Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten	0,38	0,31	0,38
Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten	0,36	0,32	0,38
zum Vergleich: optimale Zugzahl nach STRELE	135	122	118

Tabelle 31: Leistungskennwerte des dritten Gleises der Strecke Hanau – Gelnhausen, Variante RE auf drittem Gleis

5.3 Berechnung der Leistungsfähigkeit von vier- und mehrgleisigen Strecken

Wird eine Eisenbahnstrecke viergleisig ausgebaut, so ist dies in der Regel mit einer klaren Trennung der Verkehre auf je zwei Gleisen der Strecke verbunden (z.B. zwei

Gleise für Güter- und zwei für Personenverkehr oder zwei Gleise für schnelle und zwei Gleise für langsamere Verkehre). Ähnlich wie auch schon bei dreigleisigen Strecken werden getrennte Bildfahrpläne erstellt, in diesem Fall für je zwei Streckengleise. Eine Leistungsfähigkeitsberechnung für eine viergleisige Strecke kann auf zwei Leistungsfähigkeitsuntersuchungen von zweigleisigen Strecken zurückgeführt werden, wobei jedoch auch hier wie bei dreigleisigen Strecken überprüft werden kann, ob durch eine Verlagerung von Zügen zwischen den einzelnen Streckengleisen eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Gesamtstrecke erreichbar ist. Ein entsprechendes Vorgehen bietet sich auch für den in der Praxis seltenen Fall einer mehr als viergleisig ausgebauten Strecke an.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Ansatz zur Berechnung von optimalen Streckenauslastungen ein- und mehrgleisiger Strecken auf der Basis der Streckendurchsatzleistung entwickelt und angewendet worden. Diese neu eingeführte Größe ergibt sich aus den Zugzahlen im jeweiligen Untersuchungszeitraum, deren Beförderungsgeschwindigkeiten, dem Streckenbelegungsgrad sowie weiteren statistischen Kenngrößen.

Der entwickelte Ansatz hat in den durchgeführten Streckenuntersuchungen seine Eignung zur Bestimmung optimaler Streckenauslastungen bewiesen. Unter verschiedenen Betriebsbedingungen konnten realistische Rechenwerte gewonnen werden. In vielen Fällen, insbesondere auf eingleisigen Strecken, sind genauere Ergebnisse als die des bisher meist verwendeten Programms STRELE zu erreichen, da weitere Einflussfaktoren, wie die Wartezeit im Fahrplan oder die Verteilung der Zugfahrten über den Tag, berücksichtigt werden. Auch bei der Berechnung zweigleisiger Strecken werden, beispielsweise im Falle des artreinen Betriebs, genauere Ergebnisse erzielt. Vorhandene bzw. nicht vorhandene Unterschiede der einzelnen Modellzüge, z.B. in Bezug auf unterschiedliche Mindestzugfolgezeiten und Beförderungsgeschwindigkeiten, können erfasst werden. Auch die Effekte einer zeitlichen Entmischung von unterschiedlichen Verkehrsarten (z.B. Personen- und Güterverkehr) auf die optimale Streckenauslastung können dargestellt werden, was anhand von Vergleichsuntersuchungen für zwei der betrachteten Strecken gezeigt wurde.

Neben den genaueren Ergebnissen stellen auch die geringen Anforderungen an die Eingangsdaten einen Vorteil des Verfahrens dar. Zumindest beim fahrplanunabhängigen Vorgehen sind lediglich die Matrix der Mindestzugfolgezeiten, die Fahrzeiten und Laufwege der Modellzüge sowie eine Tagesganglinie der Zugfahrten erforderlich. Für das fahrplanabhängige Verfahren muss zusätzlich ein geplanter oder bereits in der Realität gefahrener Fahrplan vorhanden sein.

Vom Bearbeiter einer Streckenuntersuchung müssen für die einzelnen Modellzüge keine Rangziffern vergeben werden, die z.B. Einfluss auf zulässige Wartezeiten dieser Modellzuggruppe haben könnten. Es muss lediglich festgelegt werden, ob eine Modellzuggruppe gegenüber einer zweiten vor-, nach- oder gleichrangig ist.

Dadurch entfällt die Möglichkeit zur Beeinflussung der Ergebnisse durch den Bearbeiter. Eine geringe Leistungsfähigkeit kann beim gewählten Verfahren nicht durch die Vergabe geringwertigerer Rangziffern „künstlich“ auf Kosten der Betriebsqualität erhöht werden.

Über eine bloße Zugzahl im Zustand der optimalen Streckenauslastung hinaus ermöglicht das Verfahren durch die Berücksichtigung der verschiedenen Einflussparameter, für die Leistungsfähigkeit einer Strecke begrenzende Faktoren wie z.B. hohe Mindestzugfolgezeiten, starke Streuungen der Mindestzugfolgezeiten oder der Streckenbelegung zu ermitteln. Geeignete Maßnahmen zu ihrer Beseitigung können durch die Untersuchung verschiedener Varianten auf ihren Erfolg hin überprüft werden. Auch ein Vergleich zwischen den ermittelten Streckendurchsatzleistungen verschiedener Strecken ist möglich, im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen neben den optimalen Zugzahlen auch anhand aller übrigen Leistungskennwerte und Einflussparameter. Hierbei sind die meist unterschiedlichen Randbedingungen der betrachteten Strecken, z.B. in Bezug auf mögliche Geschwindigkeiten oder zu fahrende Betriebsprogramme, zu beachten. Diese werden jedoch anhand der verschiedenen Ausprägungen der Leistungskennwerte und Einflussparameter offensichtlich.

Insgesamt ist mit dem vorliegenden Ansatz der Streckendurchsatzleistung ein Verfahren gefunden, das es ermöglicht, die zur Erstellung eines Zugangebotes erforderliche Kenntnis der Leistungsfähigkeit einer Eisenbahnstrecke auf einfache Weise und mit hinreichender Genauigkeit zu erlangen.

7 Literaturverzeichnis

ACKERMANN, T. / HEIMERL, G. / JOCHIM, H. / SCHWANHÄUßER, W.

Fahrgastbefragung zur Bewertung der Pünktlichkeit im Schienenpersonenfernverkehr der DB AG (unveröffentlicht)
Stuttgart 1996

DB REISE & TOURISTIK AG, DB REGIO AG
Übersichtskarte für den Personenverkehr
Frankfurt am Main 2001

DV 405

Richtlinien für die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Strecken
Deutsche Bundesbahn, Frankfurt am Main 1974

DILLI, G.

„Ihre Majestät, die Toleranz“

in: Eisenbahntechnische Rundschau, 1 (1952) 1, S. 21-28, 1 (1952) 2, S. 60-68

DILLI, G.

Der wandernde Engpass und sein Gefolge

in: Eisenbahntechnische Rundschau, 3 (1954) 1, S. 1-11, 3 (1954) 2, S. 63-79

FICKERT, R.

Bestimmung der Leistungsfähigkeit langer zweigleisiger Eisenbahnstrecken

in: Eisenbahntechnische Rundschau, 7 (1958) 2, S. 51-58

GOTTSCHALK, P.

Die betriebliche Leistungsfähigkeit der Hohenzollernbrücke in Köln

Archiv für Eisenbahntechnik, Folge 1, Köln 1952

GRÜN, M. / HERTEL, G.

Kenngrößen zur Bewertung von Leistung und Zuverlässigkeit mehrwertiger Systeme

in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“
Dresden, Sonderheft 33, Dresden 1987

HAHN, K.E. / HILLIG, F.

Wechselbetrieb auf dreigleisiger Eisenbahnstrecke

in: Eisenbahntechnische Rundschau, 3 (1954) 3, S. 89-98

HERTEL, G.

Die maximale Verkehrsleistung und die minimale Fahrplanempfindlichkeit auf Eisenbahnstrecken

in: Eisenbahntechnische Rundschau, 41 (1992) 10, S. 665-671

HILLER, W.

Beitrag zur Ermittlung der größten Streckenbelegung

in: Deutsche Eisenbahntechnik, 16 (1968) 8, S. 391 f.

KAMINSKY, R.

Pufferzeiten in Netzen des spurgebundenen Verkehrs in Abhängigkeit von Zugfolge und Infrastruktur

Dissertation am Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Universität Hannover, Hannover 2001

KIRSCHFINK, H. / SCHUMACHER, A.

Fuzzy Logic in der Verkehrstechnik

in: Heureka Tagungsband der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 1993

MUTHMANN, T.

Analyse der Beförderungsgeschwindigkeit im Hinblick auf eine Formulierung eines physikalischen Maßstabs der Leistungsfähigkeit

Diplomarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswirtschaft, Eisenbahnbau und -betrieb der RWTH Aachen (unveröffentlicht), Aachen 1999

NEBELUNG, H.

Wirtschaftliche Zuggeschwindigkeiten in Engpassabschnitten von Eisenbahnstrecken
Archiv für Eisenbahntechnik, Folge 15, Köln 1961

OETTING, A.

Kann die „Transportkraft“ ein aussagefähiger Maßstab für Ertrag, Auslastung und Betriebsqualität sein?

in: Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 57, Aachen 2000

PARADISSOPOULOS, I. / FOTINI, H.

Optimale Betriebsform für den Mischverkehr auf teilweise zweigleisigen Eisenbahnstrecken

in: Schienen der Welt, 22 (1991) 1, S. 10-17

POTTHOFF, G.

Verkehrsströmungslehre, Band 1

transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin 1968

REICHARDT, R. / SCHRÖDER, F.

Ein neues LZB-Betriebsverfahren für die Neubaustrecken der DB

in: Die Bundesbahn, 65 (1989) 9, S. 789-796

SCHWANHÄÜBER, W.

Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn

Dissertation am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen, Aachen 1974

SCHWANHÄÜBER, W.

Eisenbahnbetriebswissenschaft

Umdruck des Lehrstuhls für Verkehrswirtschaft, Eisenbahnbau und -betrieb der RWTH Aachen, Aachen 1998

SCHWEERS, H. / WALL, H.
Eisenbahnatlas Deutschland
Verlag Schweers + Wall, Aachen 2000

WAKOB, H.
Ableitung eines generellen Wartemodells zur Ermittlung der planmäßigen Wartezeiten im Eisenbahnbetrieb unter Berücksichtigung der Aspekte Leistungsfähigkeit und Anlagenbelastung
Dissertation am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen, Aachen 1985

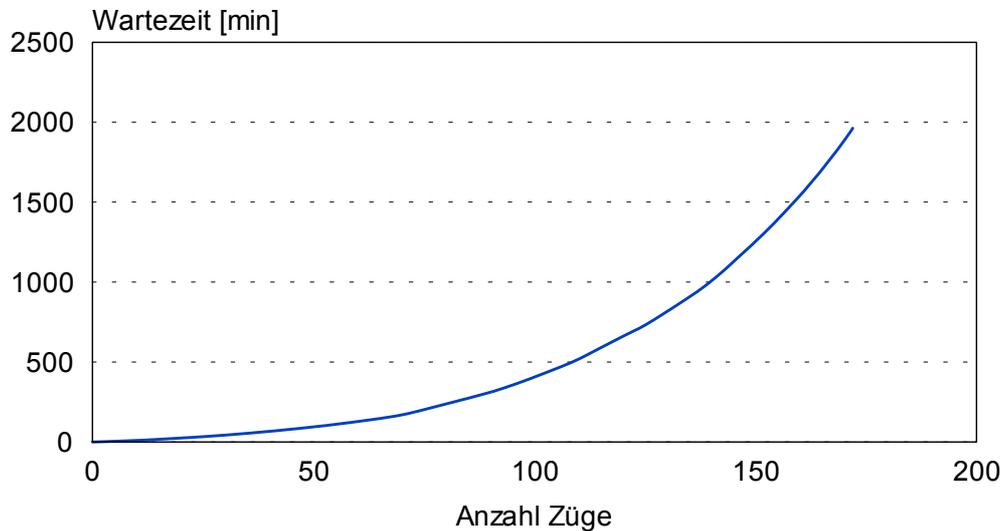
ZWERNEMANN, W.
Verfahren zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit zweigleisiger Strecken durch Berechnung der Mindestzugfolgezeiten
in: Die Bundesbahn, 35 (1961) 15, S. 650-661

8 Anhang

Zur Nachvollziehbarkeit der im Textteil angegebenen Ergebnisse der Streckenuntersuchungen wird für jede untersuchte Strecke der Verlauf der Wartezeiten und der Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl als Diagramm dargestellt, bei zweigleisigen Strecken nach den beiden Fahrrichtungen getrennt. Für jede Strecke sind zunächst die Diagramme für die fahrplanunabhängige, danach für die fahrplanabhängige und im Anschluss für eventuell weitere untersuchte Varianten abgebildet. Die Reihenfolge der betrachteten Strecken entspricht dabei jener im Textteil.

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Stuttgart-Ulm

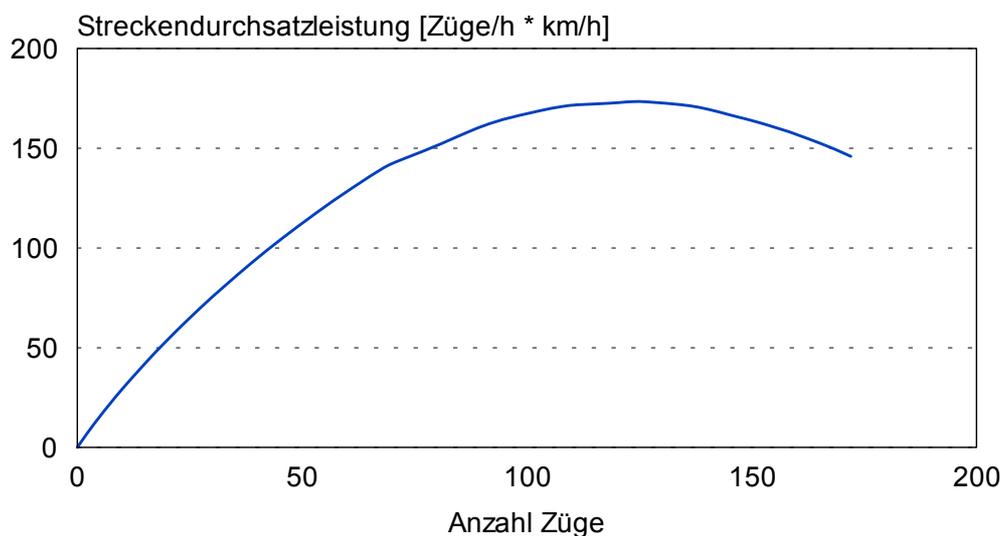


fahrplanunabhängige Variante

Bild 20: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Stuttgart – Ulm, fahrplanunabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Richtung Stuttgart-Ulm

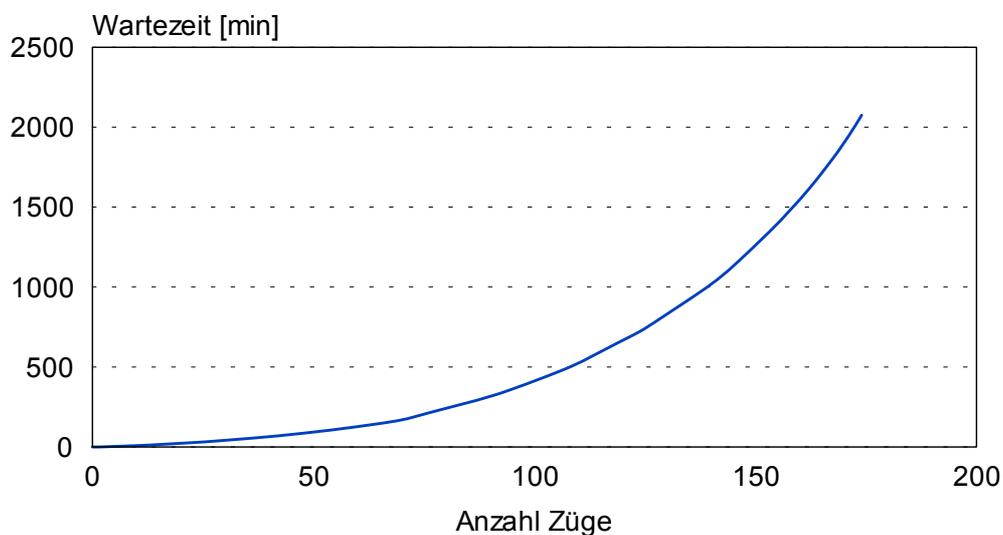


fahrplanunabhängige Variante

Bild 21: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Stuttgart – Ulm, fahrplanunabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Ulm-Stuttgart

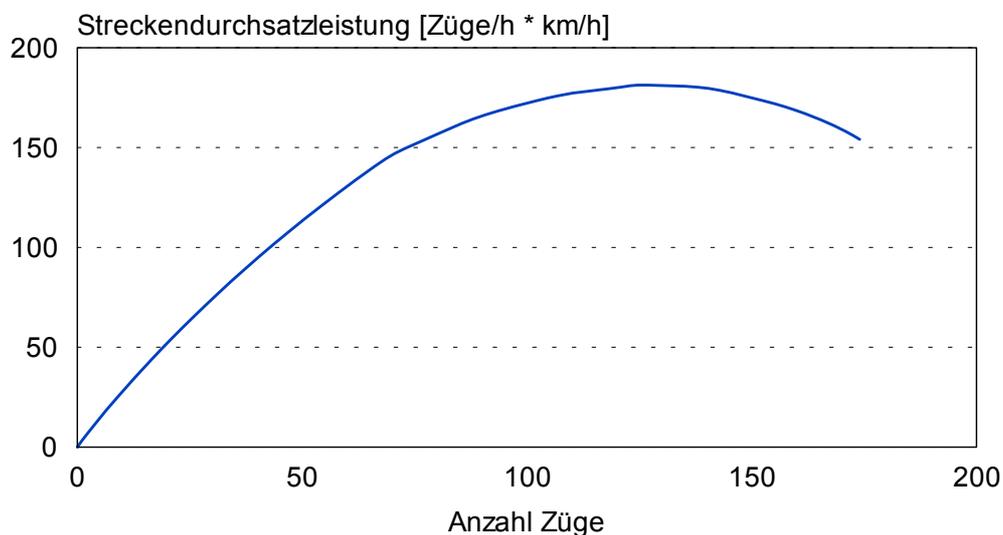


fahrplanunabhängige Variante

Bild 22: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Ulm – Stuttgart, fahrplanunabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Richtung Ulm-Stuttgart

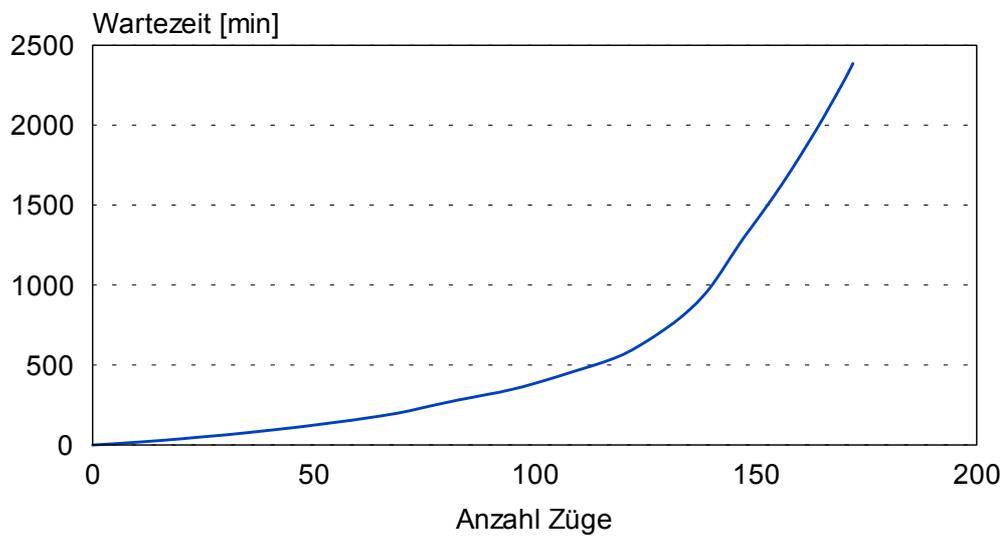


fahrplanunabhängige Variante

Bild 23: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Ulm – Stuttgart, fahrplanunabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Stuttgart-Ulm

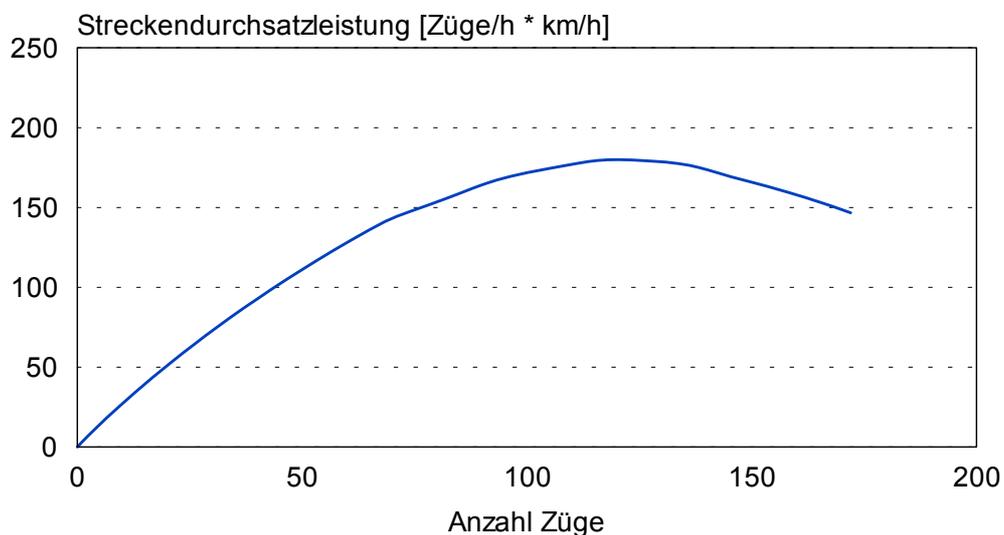


fahrplanabhängige Variante

Bild 24: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Stuttgart – Ulm, fahrplanabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Richtung Stuttgart-Ulm

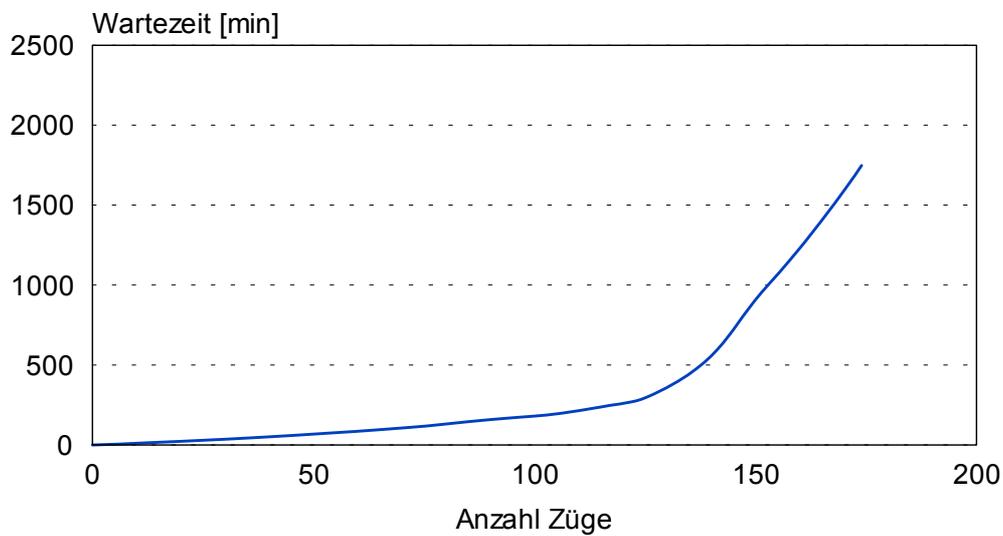


fahrplanabhängige Variante

Bild 25: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Stuttgart – Ulm, fahrplanabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Ulm-Stuttgart

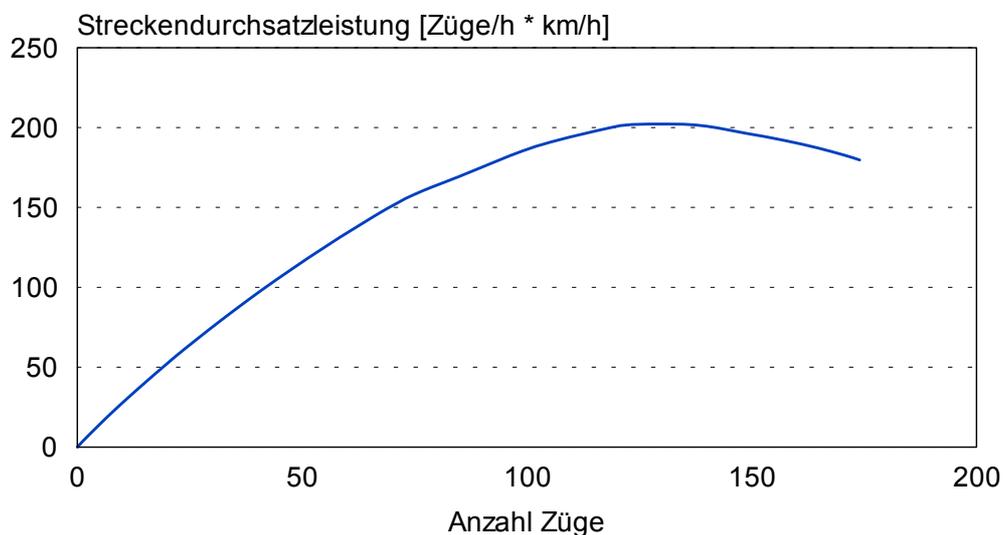


fahrplanabhängige Variante

Bild 26: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Ulm – Stuttgart, fahrplanabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Richtung Ulm-Stuttgart

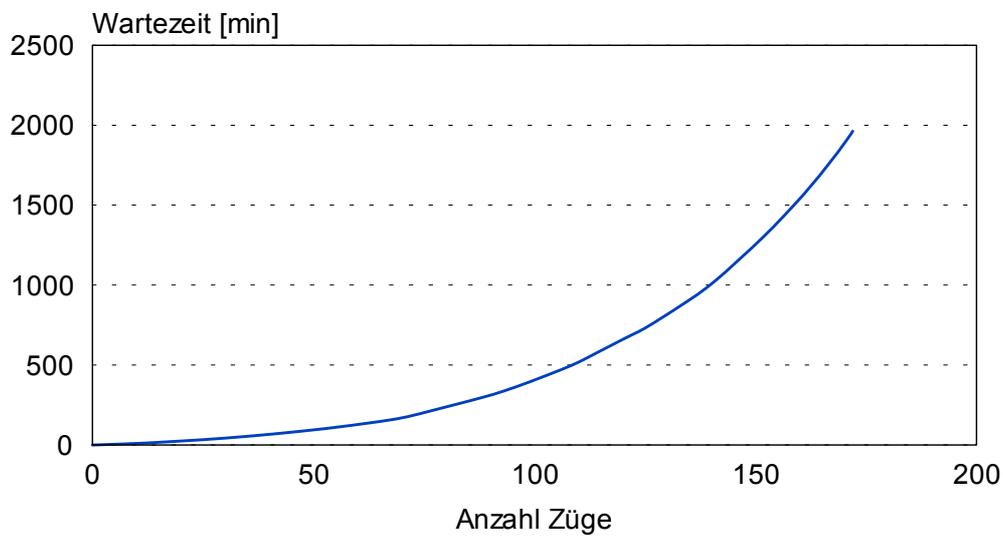


fahrplanabhängige Variante

Bild 27: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Ulm – Stuttgart, fahrplanabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Stuttgart-Ulm

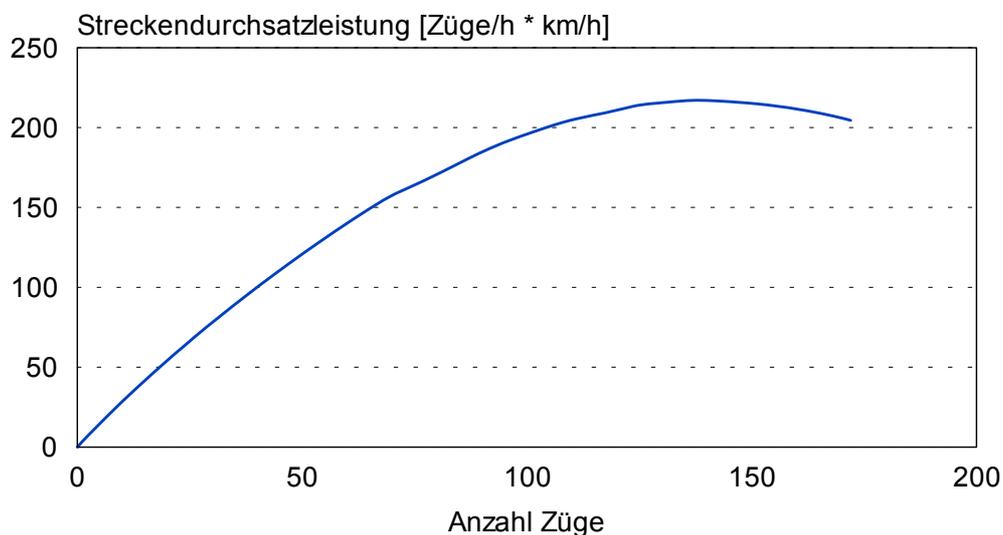


gleichmäßige Streckenauslastung, fahrplanunabhängig

Bild 28: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Stuttgart – Ulm, gleichmäßige Streckenauslastung, fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Stuttgart-Ulm

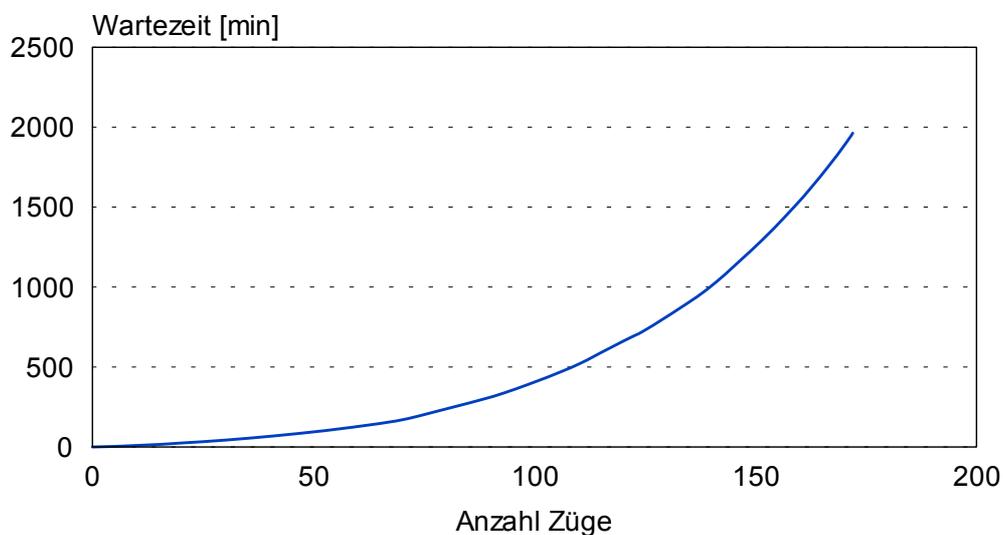


gleichmäßige Streckenauslastung, fahrplanunabhängig

Bild 29: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Stuttgart – Ulm, gleichmäßige Streckenauslastung, fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Ulm-Stuttgart

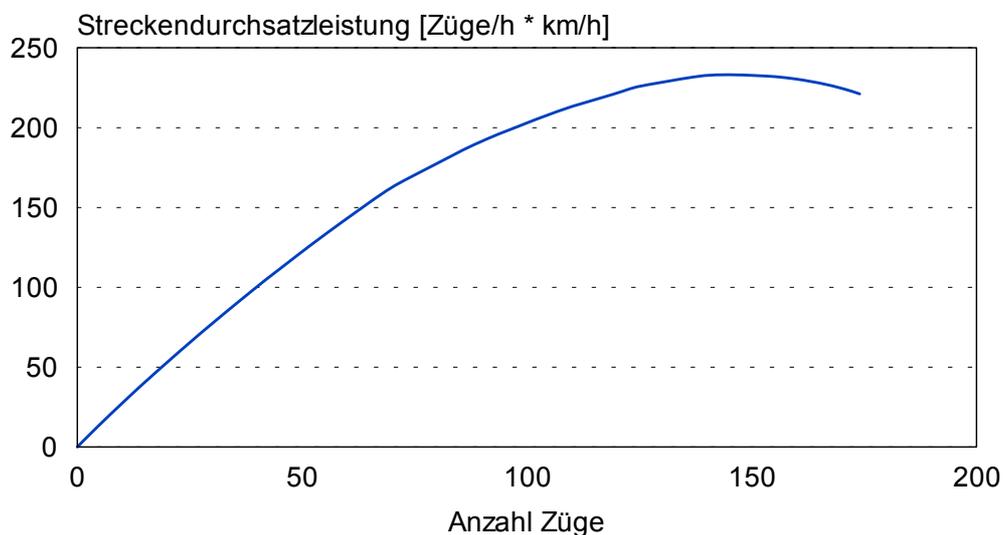


gleichmäßige Streckenauslastung, fahrplanunabhängig

Bild 30: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Ulm – Stuttgart, gleichmäßige Streckenauslastung, fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Ulm-Stuttgart

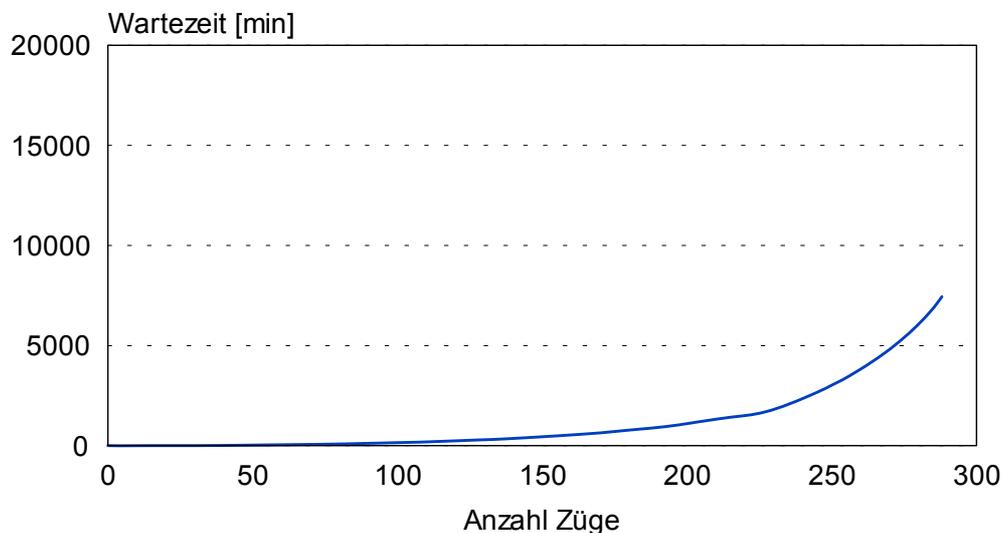


gleichmäßige Streckenauslastung, fahrplanunabhängig

Bild 31: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Ulm – Stuttgart, gleichmäßige Streckenauslastung, fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Stuttgart-Ulm

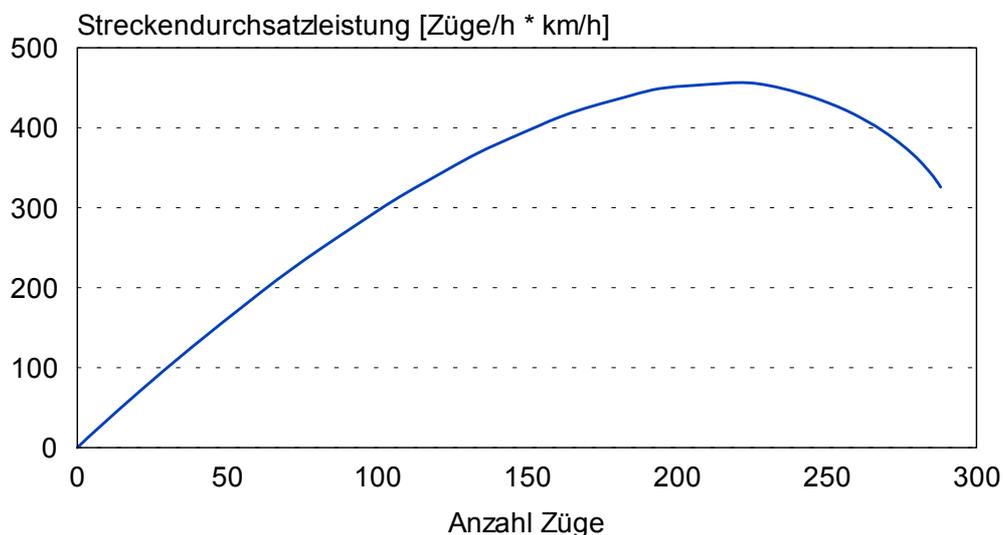


angepegelte Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten,
fahrplanunabhängig

Bild 32: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Stuttgart – Ulm, angepegelte Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten, fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Stuttgart-Ulm

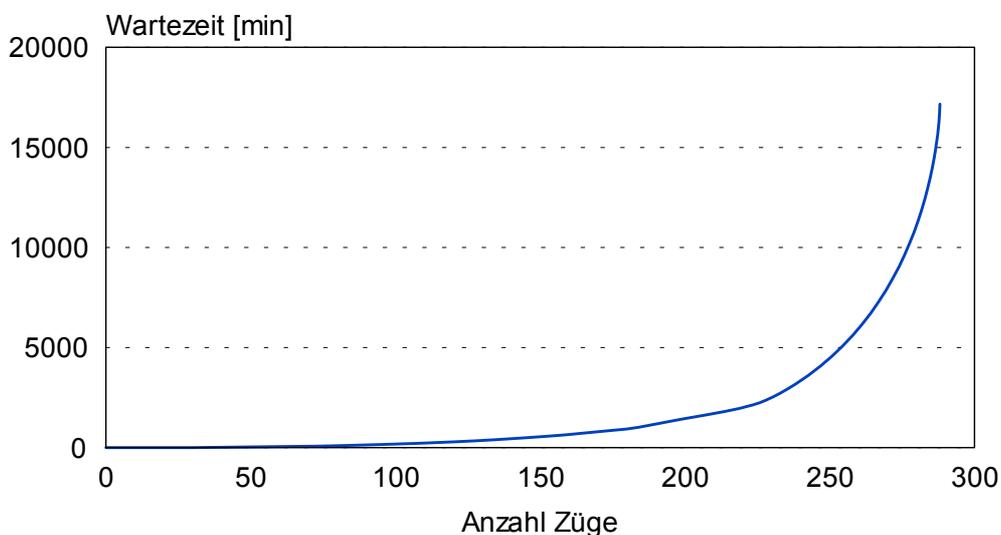


angepegelte Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten,
fahrplanunabhängig

Bild 33: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Stuttgart – Ulm, angepegelte Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten, fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Ulm-Stuttgart

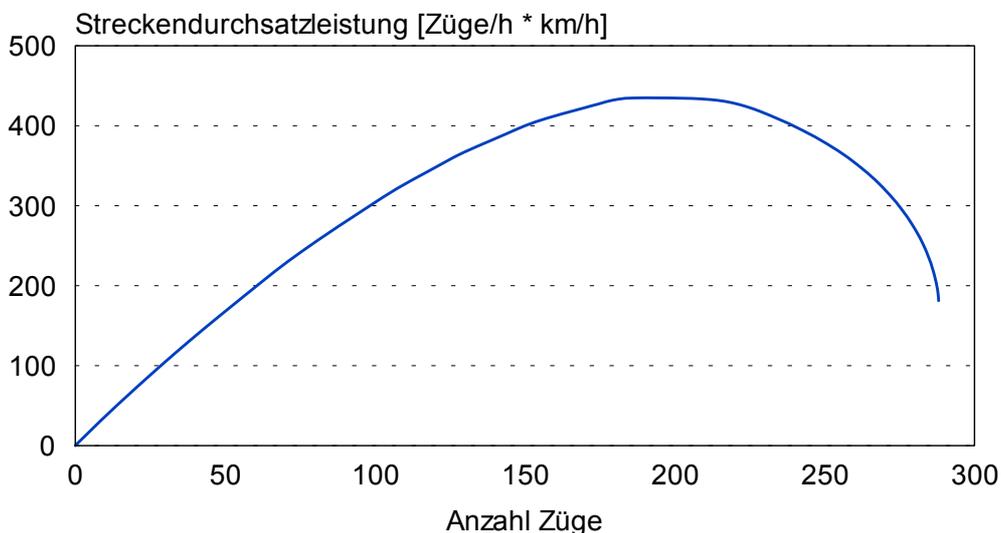


angepegelte Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten,
fahrplanunabhängig

Bild 34: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Ulm – Stuttgart, angepegelte Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten, fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Ulm-Stuttgart

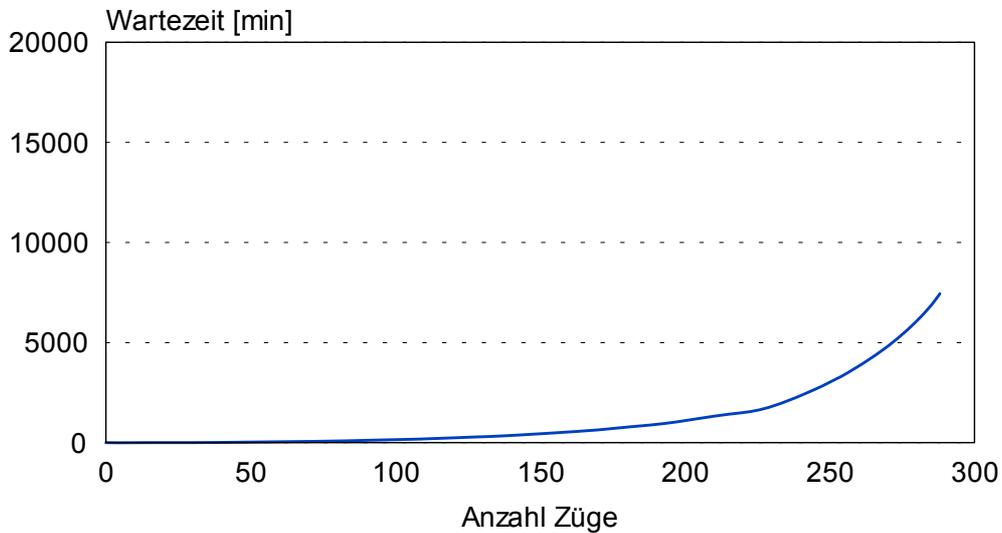


angepegelte Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten,
fahrplanunabhängig

Bild 35: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Ulm – Stuttgart, angepegelte Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten, fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Stuttgart-Ulm

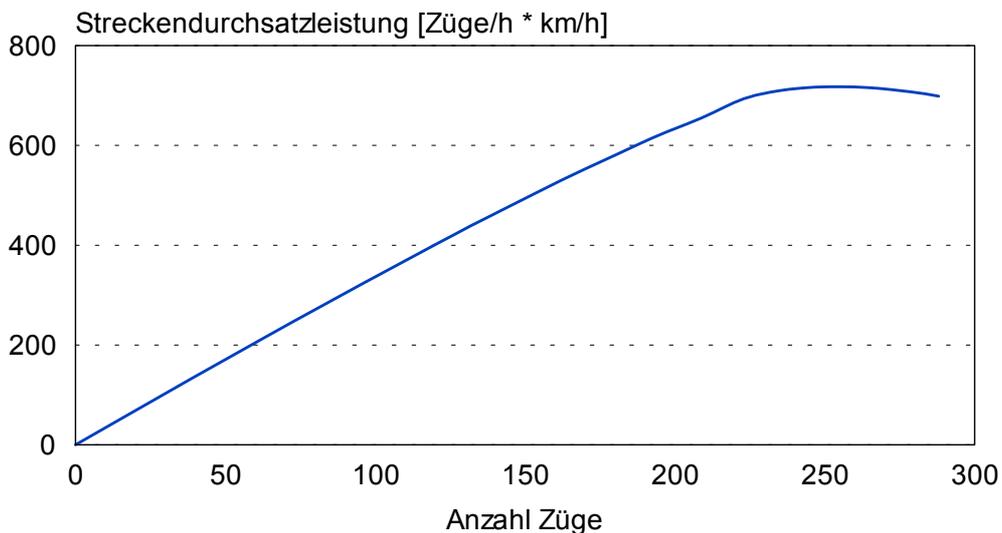


gleichmäßige Streckenauslastung sowie angegliche Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten, fahrplanunabhängig

Bild 36: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Stuttgart – Ulm, gleichmäßige Streckenauslastung sowie angegliche Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten, fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Stuttgart-Ulm

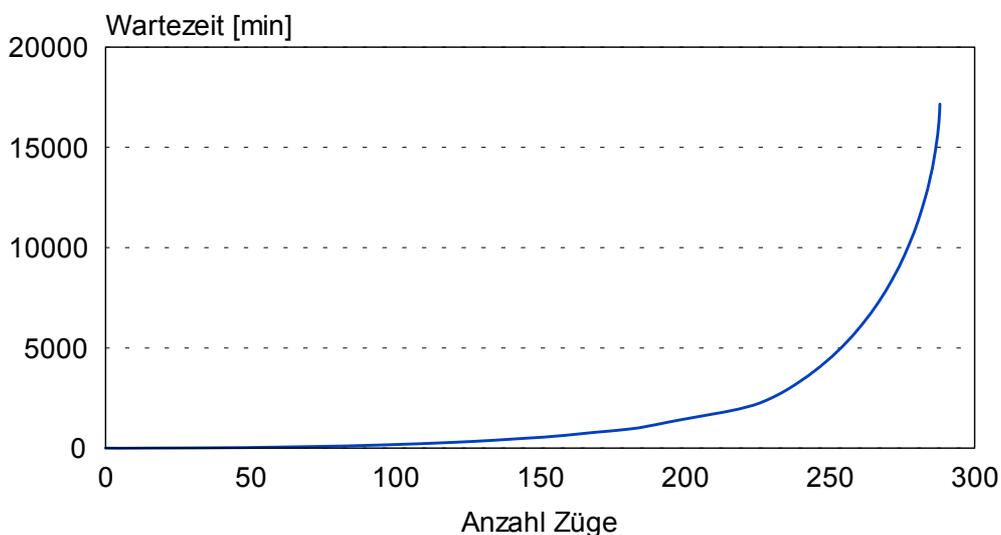


gleichmäßige Streckenauslastung sowie angegliche Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten, fahrplanunabhängig

Bild 37: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Stuttgart – Ulm, gleichmäßige Streckenauslastung sowie angegliche Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten, fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Ulm-Stuttgart

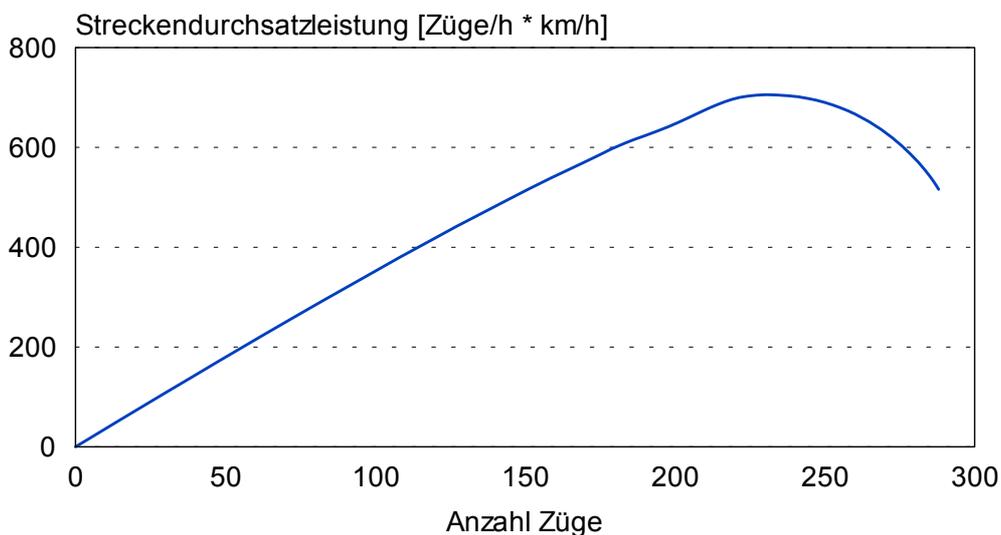


gleichmäßige Streckenauslastung sowie angegliche Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten, fahrplanunabhängig

Bild 38: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Ulm – Stuttgart, gleichmäßige Streckenauslastung sowie angegliche Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten, fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Ulm-Stuttgart

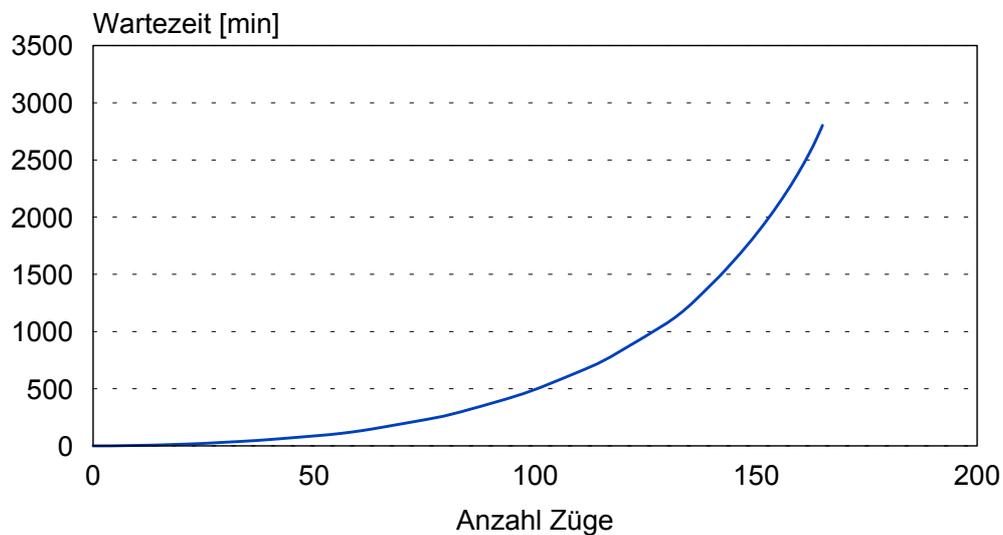


gleichmäßige Streckenauslastung sowie angegliche Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten, fahrplanunabhängig

Bild 39: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Ulm – Stuttgart, gleichmäßige Streckenauslastung sowie angegliche Beförderungsgeschwindigkeiten und Mindestzugfolgezeiten, fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Stuttgart-Ulm

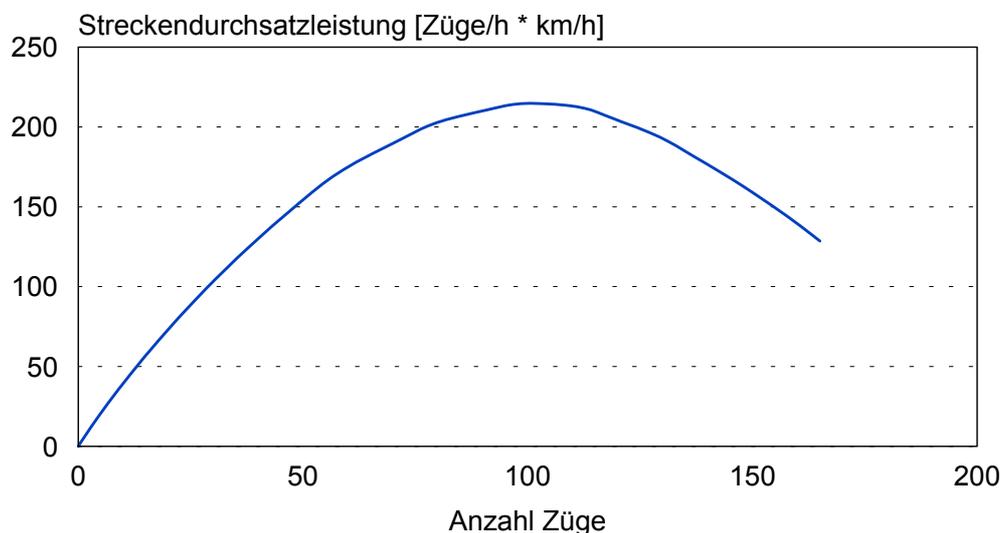


entmischte Verkehre (Teiluntersuchung Reiseverkehr, Untersuchungszeitraum 17 h), fahrplanunabhängig

Bild 40: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Stuttgart – Ulm, entmischte Verkehre (Teiluntersuchung Reiseverkehr, Untersuchungszeitraum 17 h), fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Stuttgart-Ulm

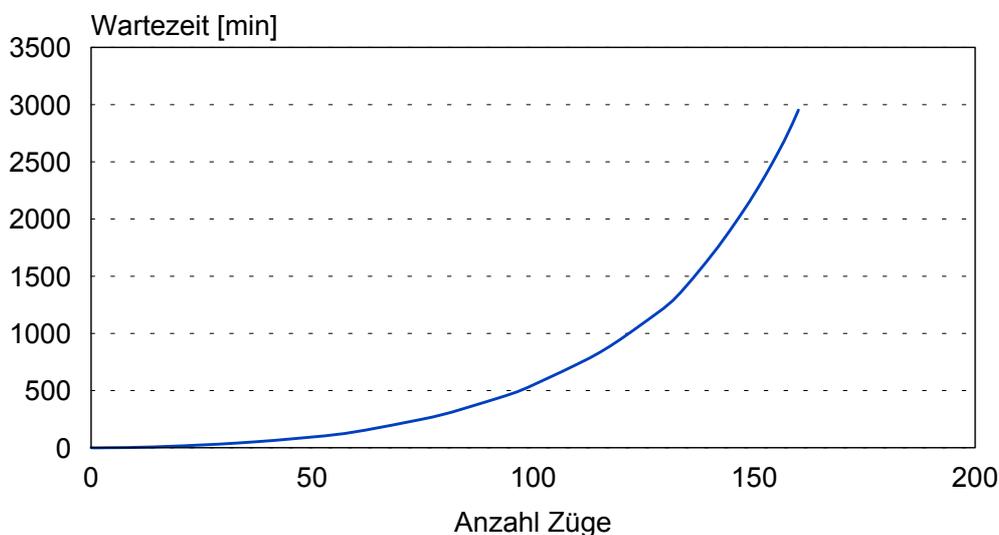


entmischte Verkehre (Teiluntersuchung Reiseverkehr, Untersuchungszeitraum 17 h), fahrplanunabhängig

Bild 41: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Stuttgart – Ulm, entmischte Verkehre (Teiluntersuchung Reiseverkehr, Untersuchungszeitraum 17 h), fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Ulm-Stuttgart

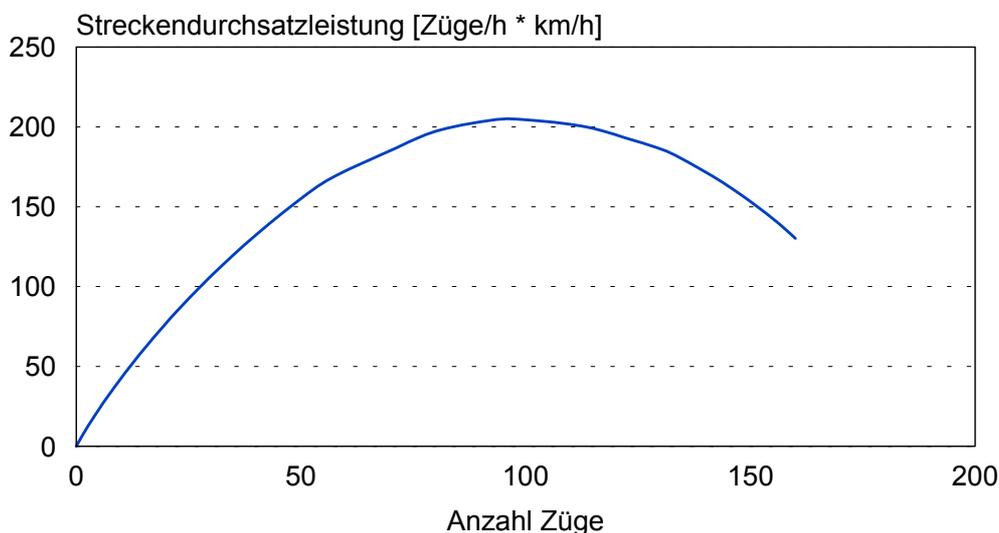


entmischte Verkehre (Teiluntersuchung Reiseverkehr, Untersuchungszeitraum 17 h), fahrplanunabhängig

Bild 42: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Ulm – Stuttgart, entmischte Verkehre (Teiluntersuchung Reiseverkehr, Untersuchungszeitraum 17 h), fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Ulm-Stuttgart

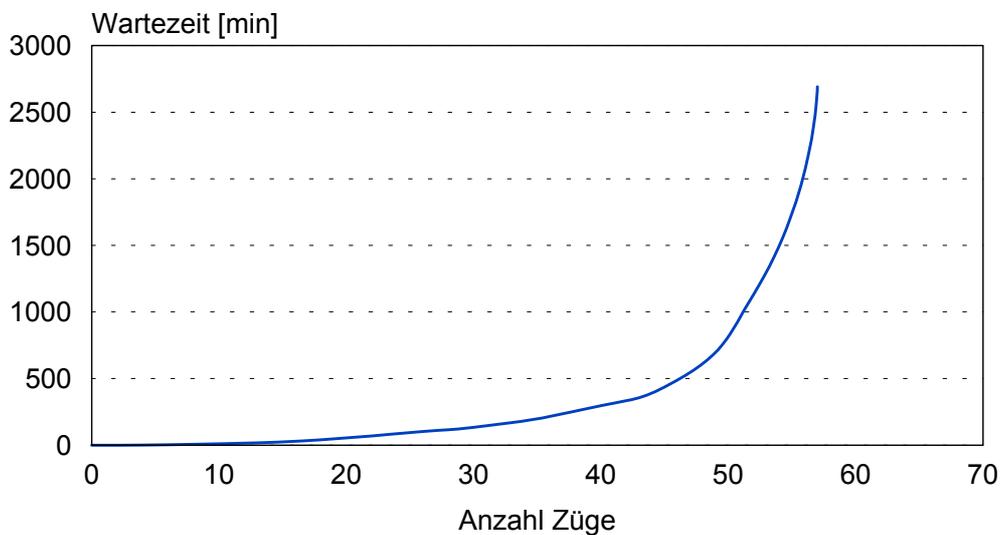


entmischte Verkehre (Teiluntersuchung Reiseverkehr, Untersuchungszeitraum 17 h), fahrplanunabhängig

Bild 43: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Ulm – Stuttgart, entmischte Verkehre (Teiluntersuchung Reiseverkehr, Untersuchungszeitraum 17 h), fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Stuttgart-Ulm

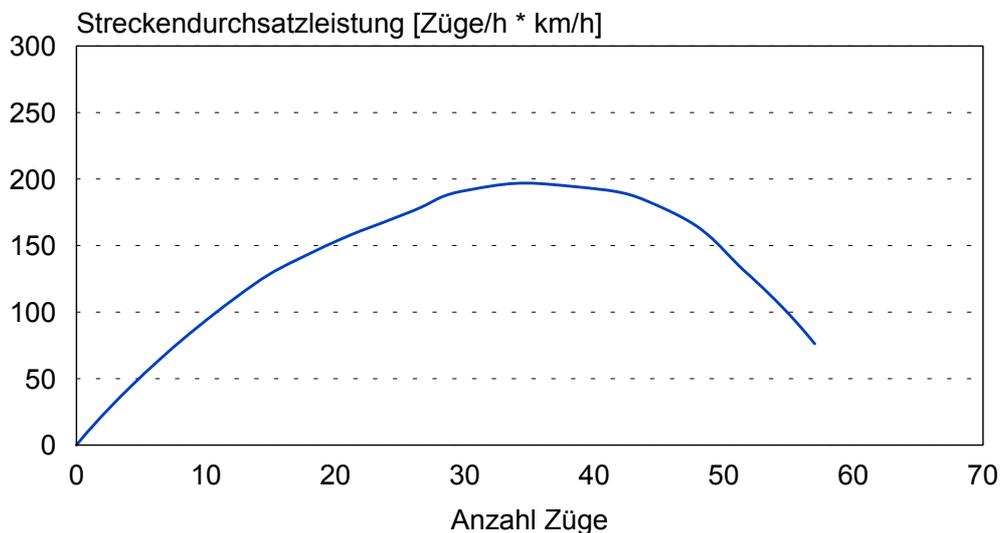


entmischte Verkehre (Teiluntersuchung Güterverkehr, Untersuchungszeitraum 7 h), fahrplanunabhängig

Bild 44: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Stuttgart – Ulm, entmischte Verkehre (Teiluntersuchung Güterverkehr, Untersuchungszeitraum 7 h), fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Stuttgart-Ulm

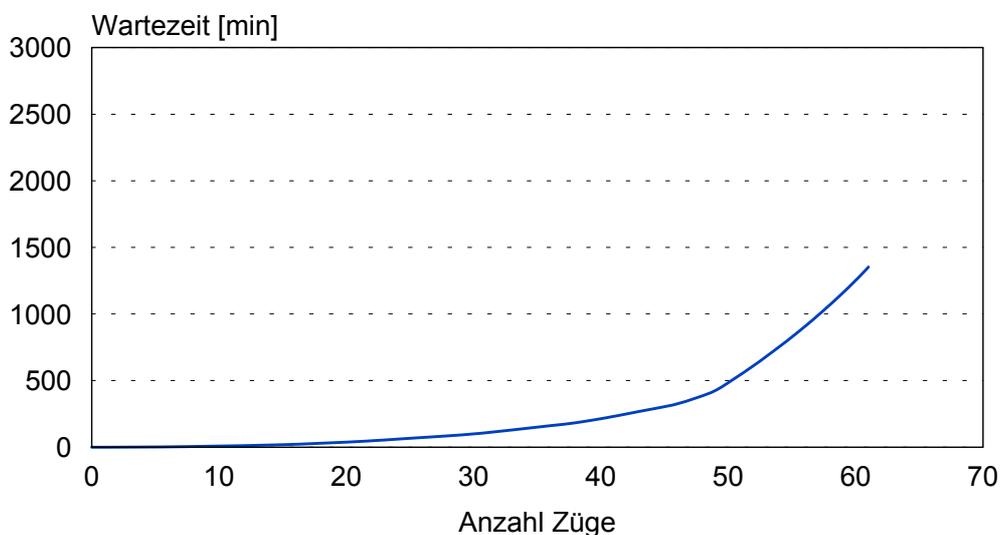


entmischte Verkehre (Teiluntersuchung Güterverkehr, Untersuchungszeitraum 7 h), fahrplanunabhängig

Bild 45: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Stuttgart – Ulm, entmischte Verkehre (Teiluntersuchung Güterverkehr, Untersuchungszeitraum 7 h), fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Ulm-Stuttgart

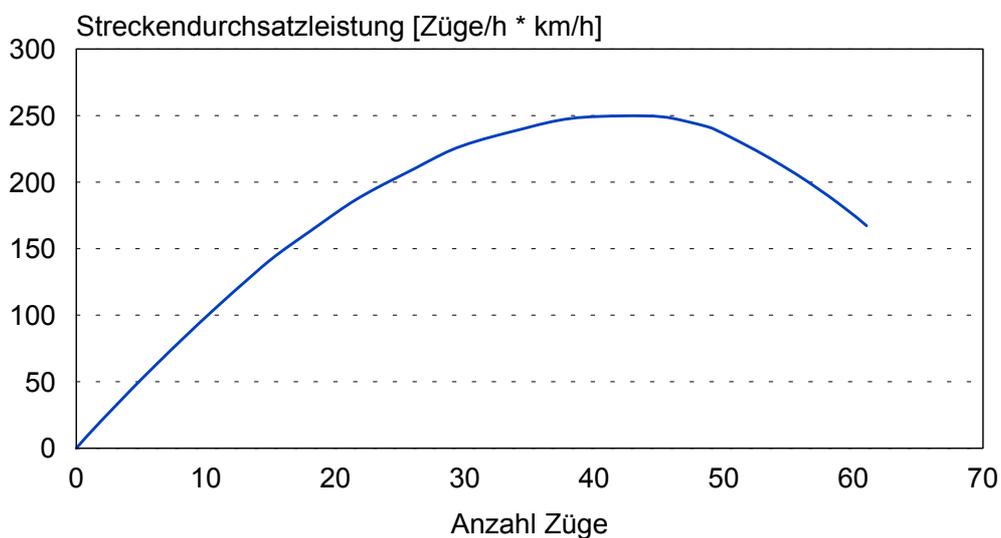


entmischte Verkehre (Teiluntersuchung Güterverkehr, Untersuchungszeitraum 7 h), fahrplanunabhängig

Bild 46: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Ulm - Stuttgart, entmischte Verkehre (Teiluntersuchung Güterverkehr, Untersuchungszeitraum 7 h), fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Ulm-Stuttgart

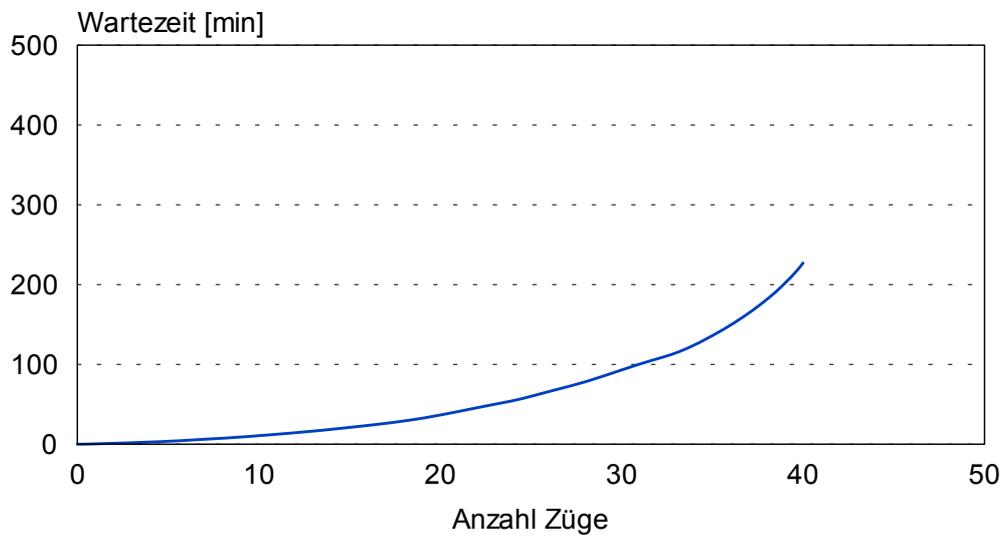


entmischte Verkehre (Teiluntersuchung Güterverkehr, Untersuchungszeitraum 7 h), fahrplanunabhängig

Bild 47: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Ulm - Stuttgart, entmischte Verkehre (Teiluntersuchung Güterverkehr, Untersuchungszeitraum 7 h), fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Heidelberg-Bruchsal

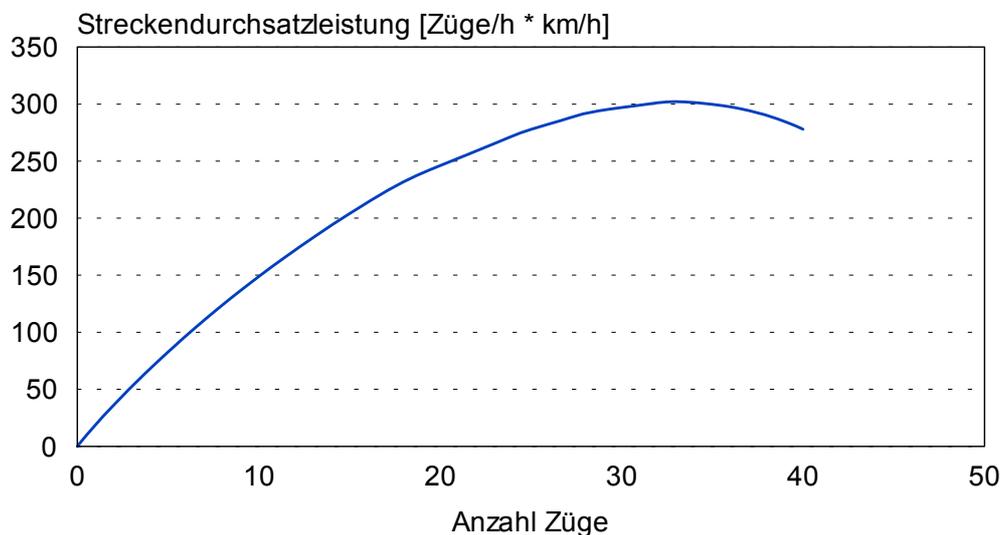


fahrplanunabhängige Variante, Untersuchungszeitraum 5 h

Bild 48: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Heidelberg – Bruchsal, fahrplanunabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Richtung Heidelberg-Bruchsal

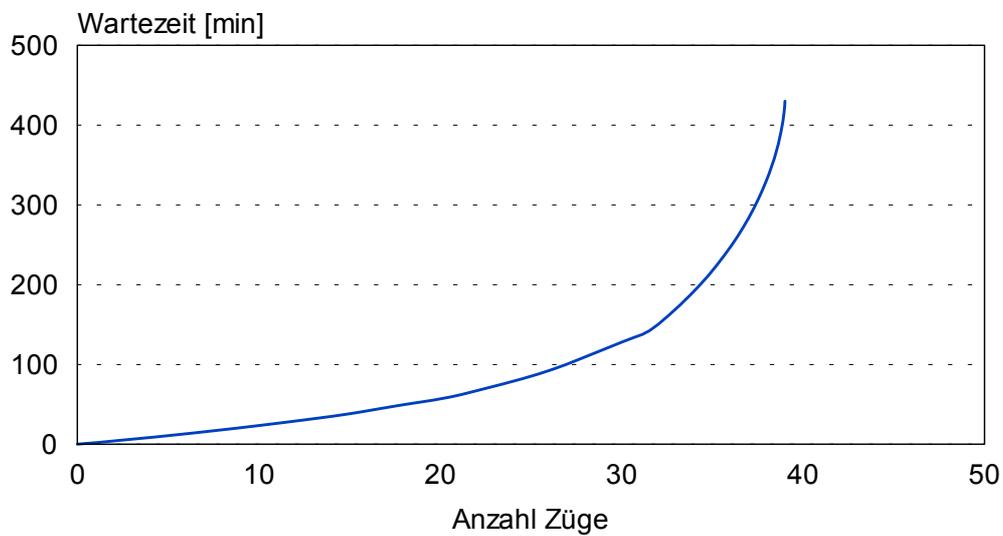


fahrplanunabhängige Variante, Untersuchungszeitraum 5 h

Bild 49: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Heidelberg – Bruchsal, fahrplanunabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Bruchsal-Heidelberg

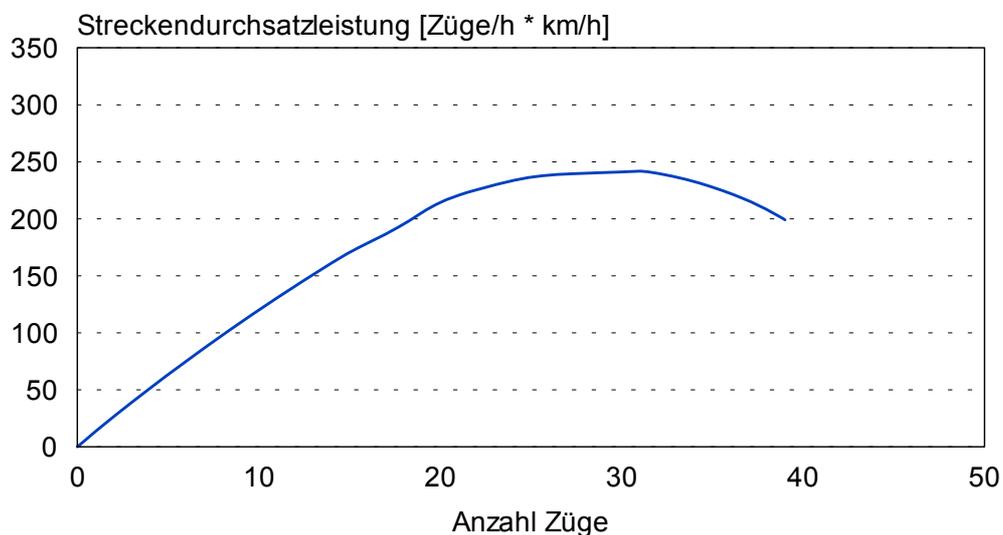


fahrplanunabhängige Variante, Untersuchungszeitraum 5 h

Bild 50: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Bruchsal – Heidelberg, fahrplanunabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Richtung Bruchsal-Heidelberg

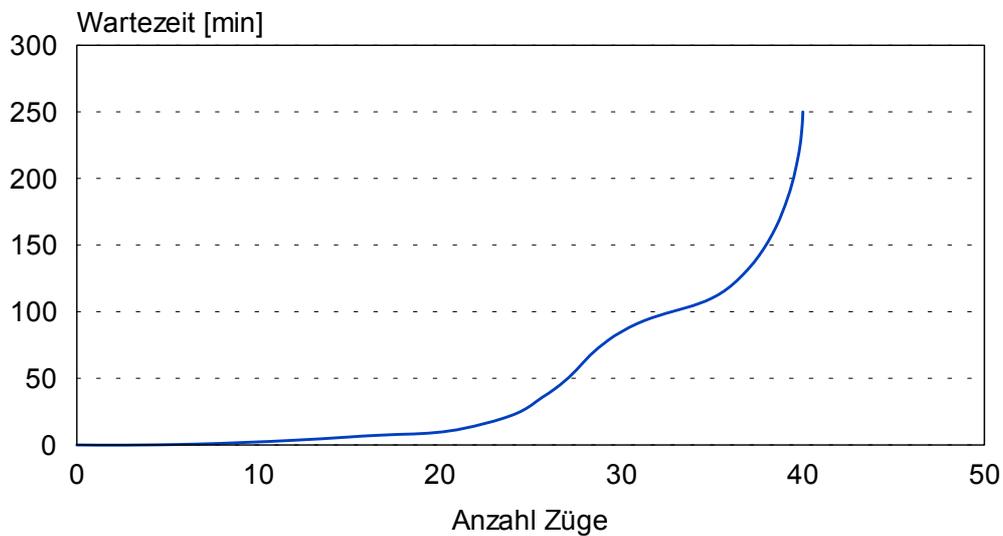


fahrplanunabhängige Variante, Untersuchungszeitraum 5 h

Bild 51: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Bruchsal – Heidelberg, fahrplanunabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Heidelberg-Bruchsal

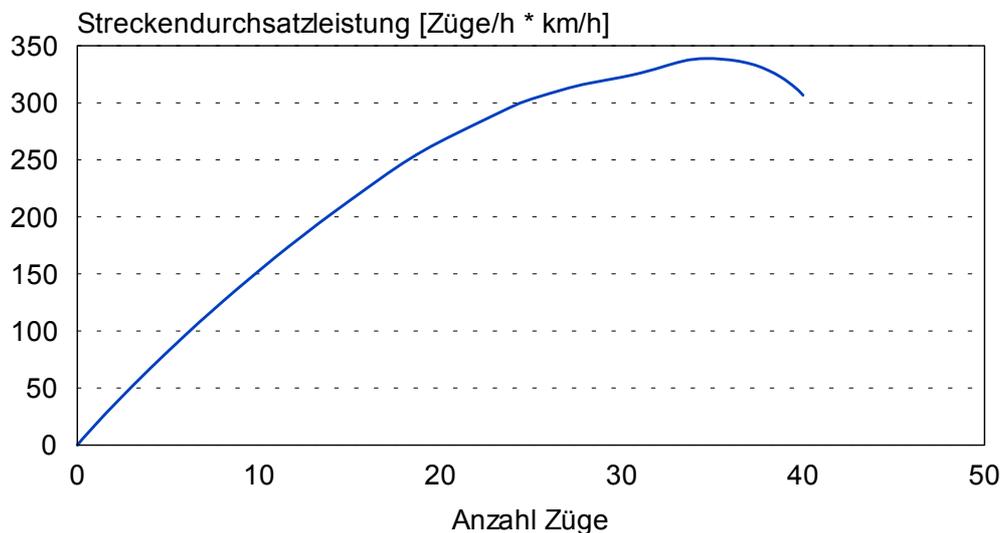


fahrplan abhängige Variante, Untersuchungszeitraum 5 h

Bild 52: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Heidelberg – Bruchsal, fahrplan-abhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Richtung Heidelberg-Bruchsal

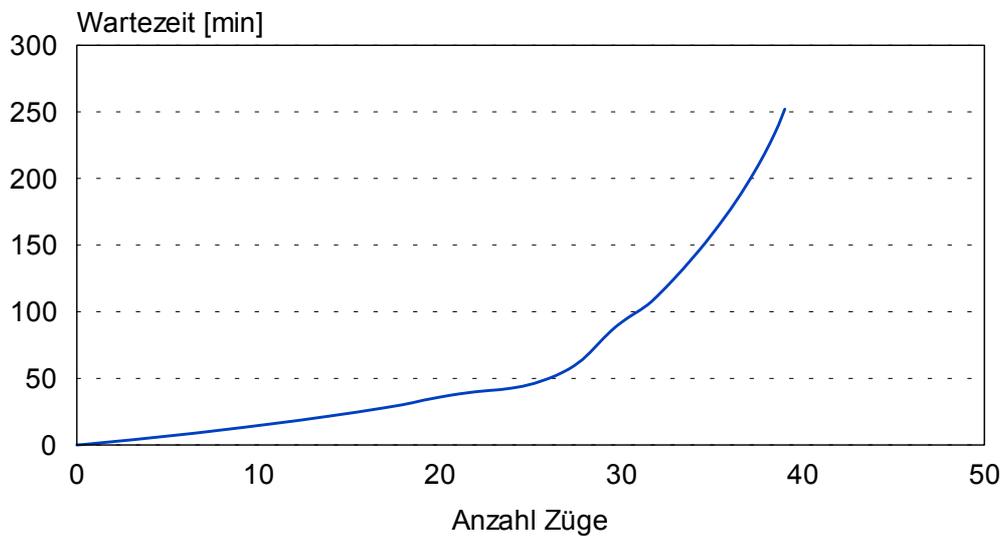


fahrplanabhängige Variante, Untersuchungszeitraum 5 h

Bild 53: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Heidelberg – Bruchsal, fahrplanabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Bruchsal-Heidelberg

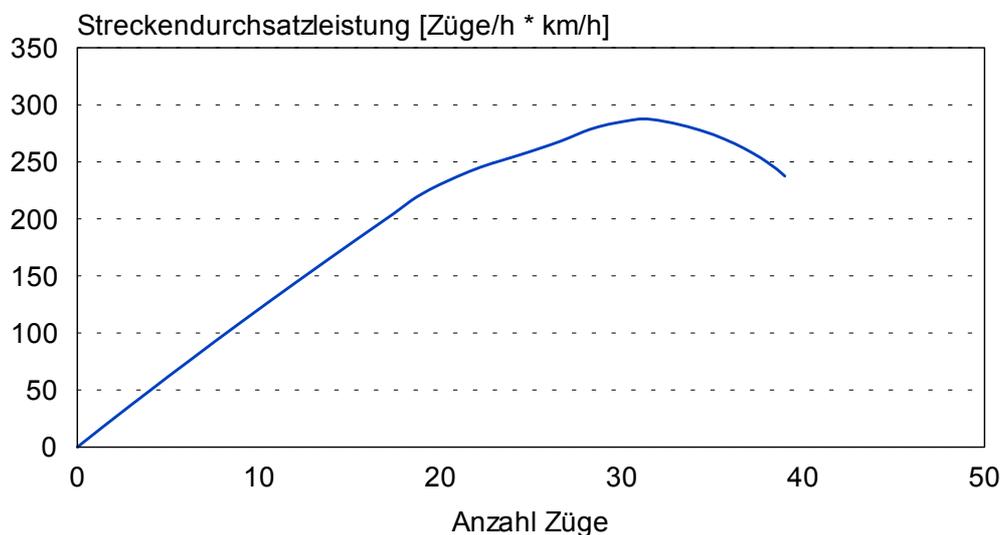


fahrplanabhängige Variante, Untersuchungszeitraum 5 h

Bild 54: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Bruchsal – Heidelberg, fahrplanabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Richtung Bruchsal-Heidelberg

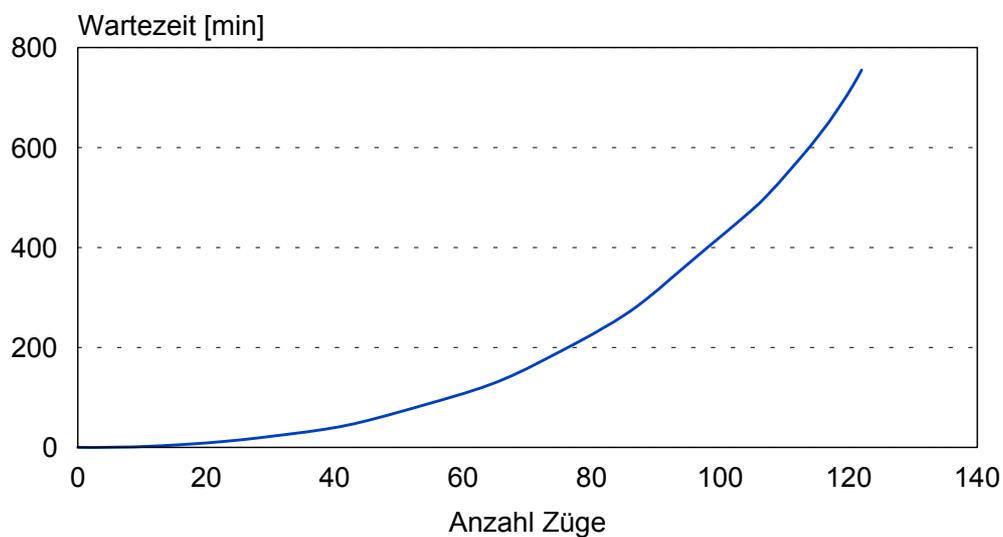


fahrplanabhängige Variante, Untersuchungszeitraum 5 h

Bild 55: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Bruchsal – Heidelberg, fahrplanabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Jühnde-Mottgers

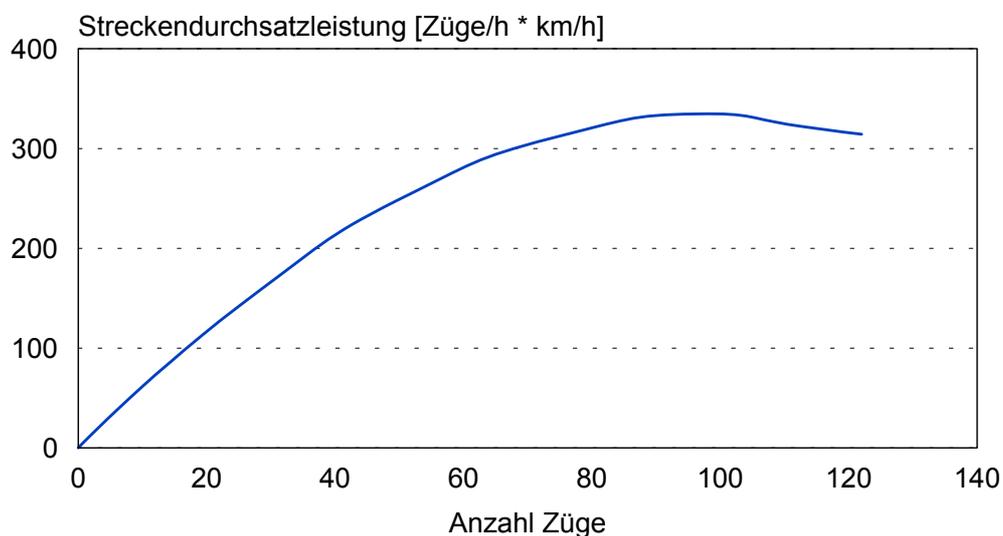


fahrplanunabhängige Variante, Personenverkehr, Untersuchungszeitraum 17 h

Bild 56: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Jühnde – Mottgers, fahrplanunabhängige Variante, Personenverkehr (tagsüber)

Streckendurchsatzleistung

Richtung Jühnde-Mottgers

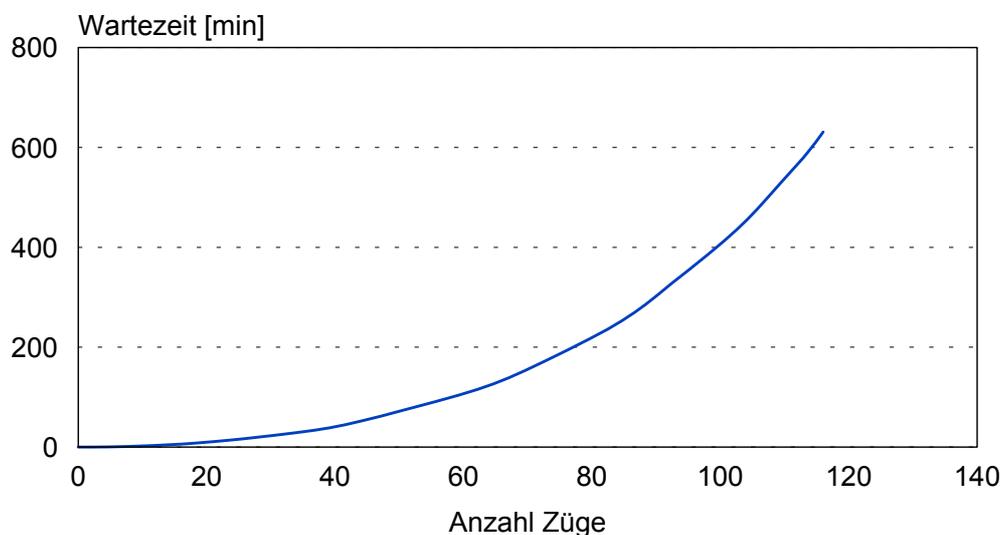


fahrplanunabhängige Variante, Personenverkehr, Untersuchungszeitraum 17 h

Bild 57: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Jühnde – Mottgers, fahrplanunabhängige Variante, Personenverkehr (tagsüber)

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Mottgers-Jühnde

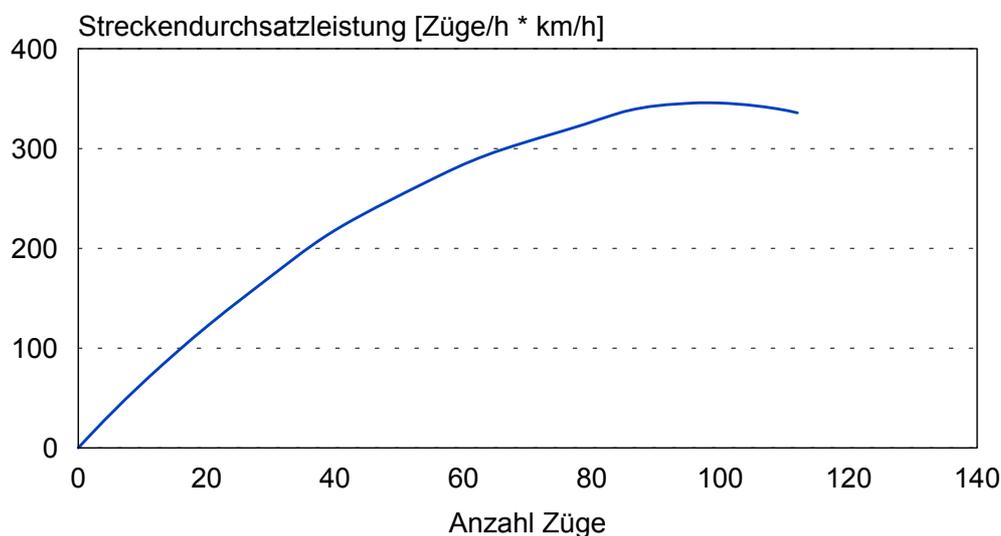


fahrplanunabhängige Variante, Personenverkehr, Untersuchungszeitraum 17 h

Bild 58: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Mottgers – Jühnde, fahrplanunabhängige Variante, Personenverkehr (tagsüber)

Streckendurchsatzleistung

Richtung Mottgers-Jühnde



fahrplanunabhängige Variante, Personenverkehr, Untersuchungszeitraum 17 h

Bild 59: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Mottgers – Jühnde, fahrplanunabhängige Variante, Personenverkehr (tagsüber)

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Jühnde-Mottgers

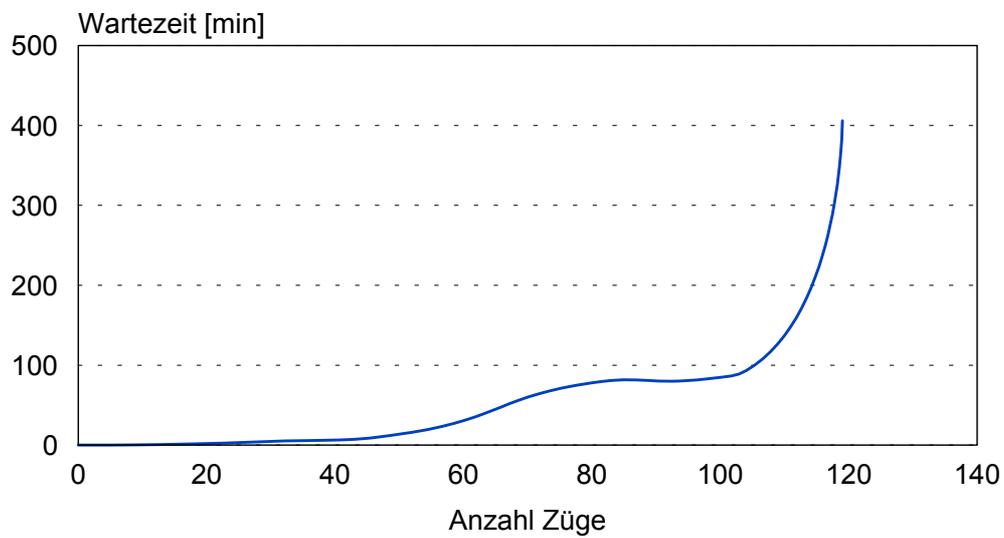


Bild 60: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Jühnde – Mottgers, fahrplanabhängige Variante, Personenverkehr (tagsüber)

Streckendurchsatzleistung

Richtung Jühnde-Mottgers

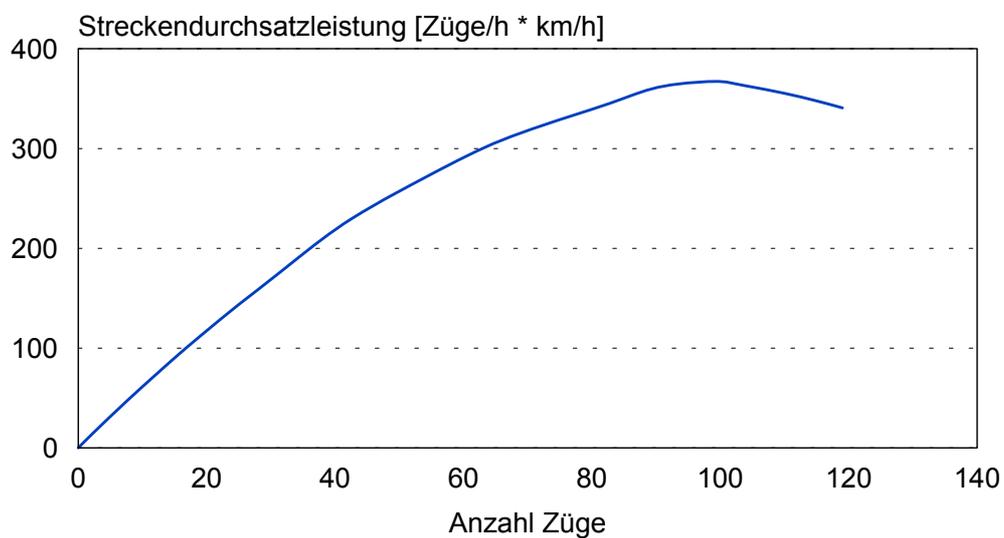


Bild 61: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Jühnde – Mottgers, fahrplanabhängige Variante, Personenverkehr (tagsüber)

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Mottgers-Jühnde

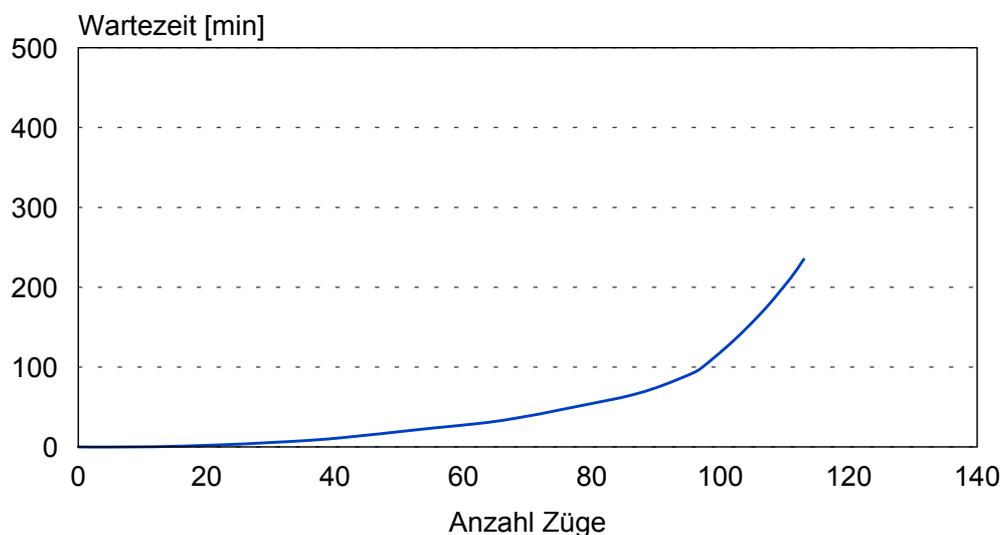


Bild 62: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Mottgers – Jühnde, fahrplanabhängige Variante, Personenverkehr (tagsüber)

Streckendurchsatzleistung

Richtung Mottgers-Jühnde

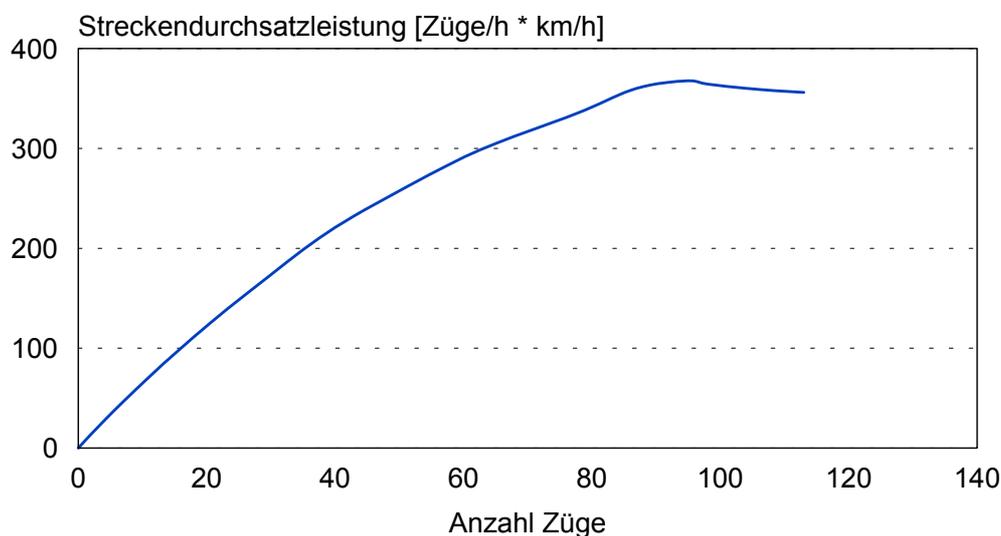


Bild 63: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Mottgers – Jühnde, fahrplanabhängige Variante, Personenverkehr (tagsüber)

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Jühnde-Mottgers

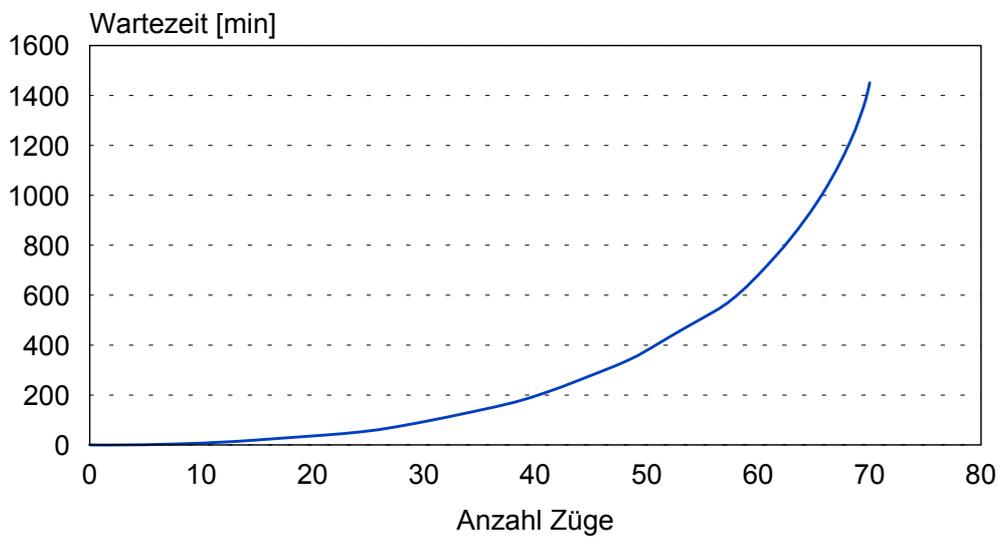


Bild 64: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Jühnde – Mottgers, fahrplanunabhängige Variante, Güterverkehr (nachts)

Streckendurchsatzleistung

Richtung Jühnde-Mottgers

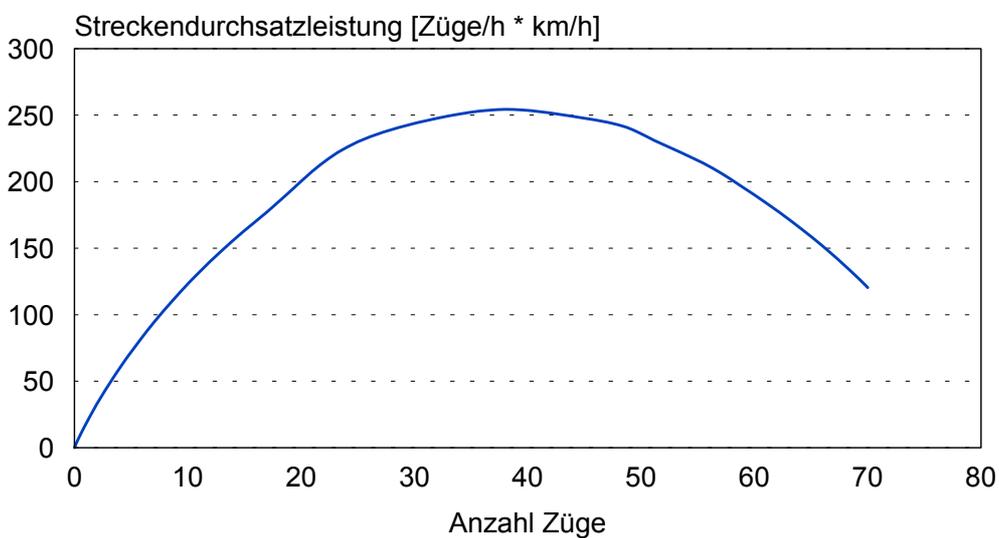


Bild 65: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Jühnde – Mottgers, fahrplanunabhängige Variante, Güterverkehr (nachts)

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Mottgers-Jühnde

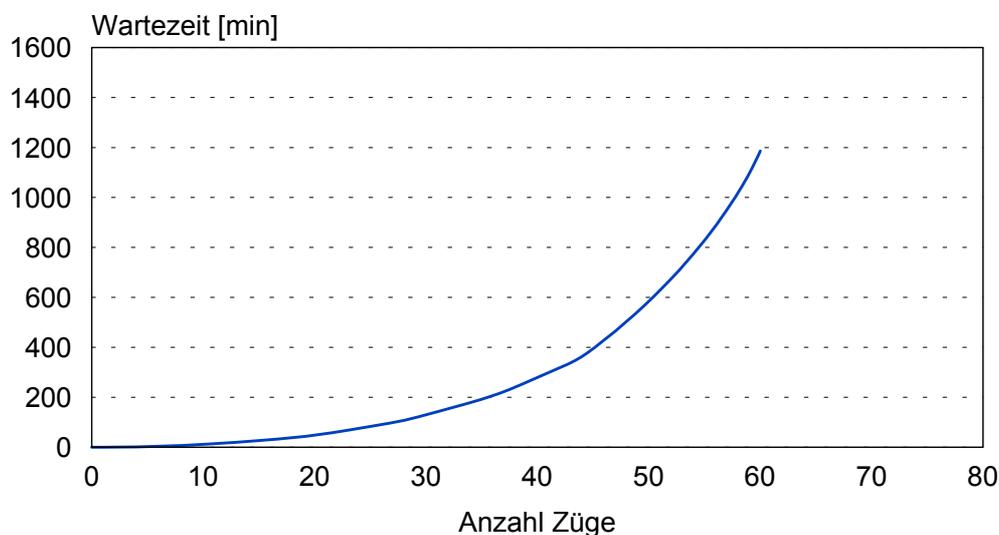


Bild 66: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Mottgers – Jühnde, fahrplanunabhängige Variante, Güterverkehr (nachts)

Streckendurchsatzleistung

Richtung Mottgers-Jühnde

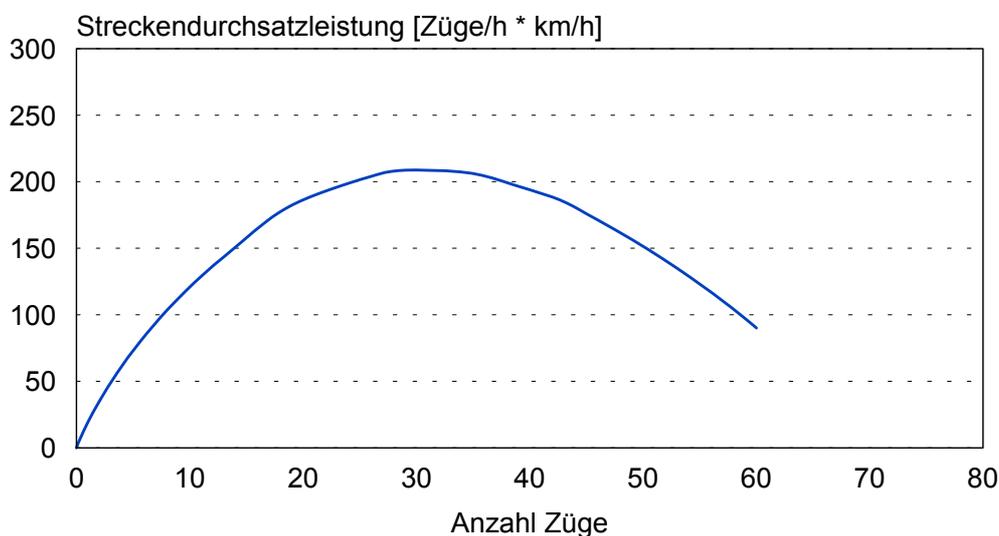
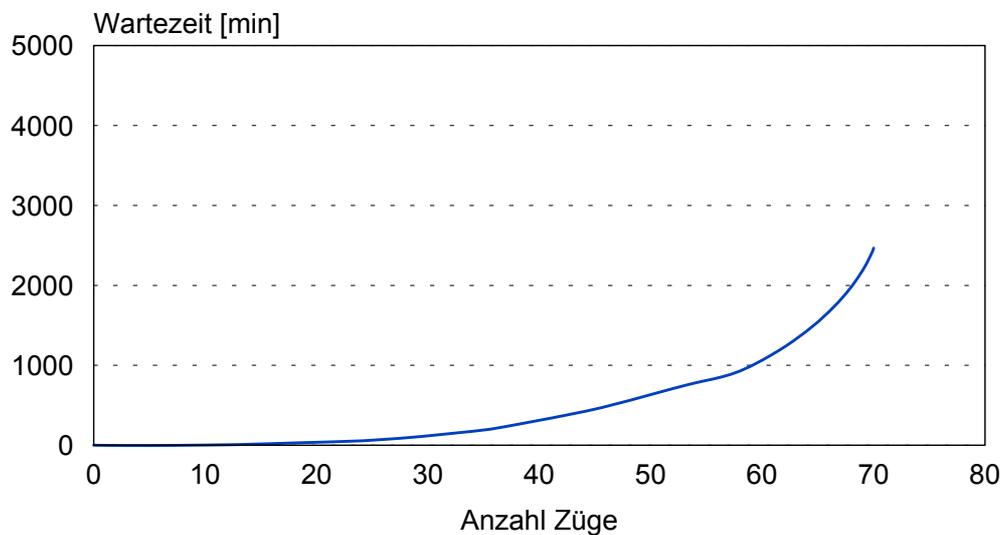


Bild 67: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Mottgers – Jühnde, fahrplanunabhängige Variante, Güterverkehr (nachts)

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Jühnde-Mottgers

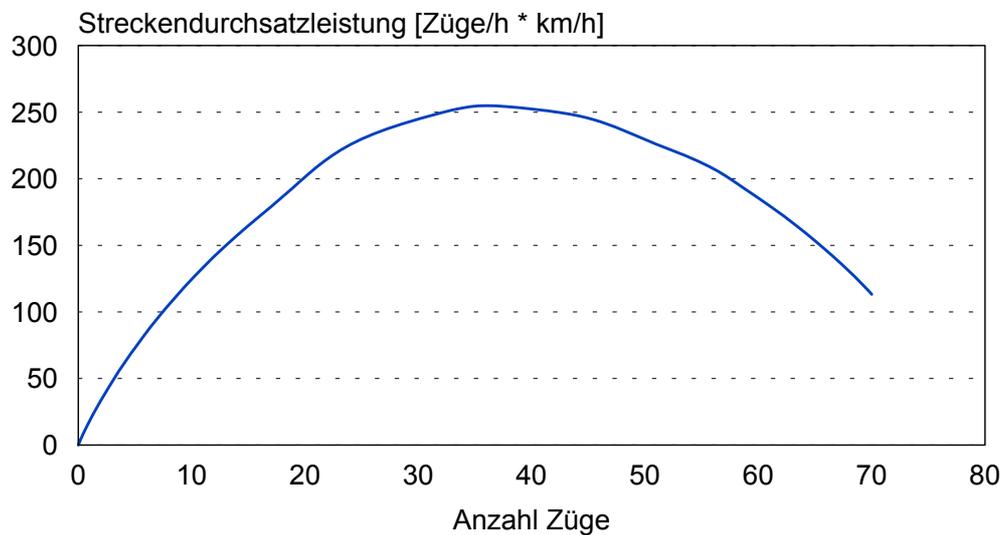


fahrplanabhängige Variante, Güterverkehr, Untersuchungszeitraum 7 h

Bild 68: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Jühnde – Mottgers, fahrplanabhängige Variante, Güterverkehr (nachts)

Streckendurchsatzleistung

Richtung Jühnde-Mottgers

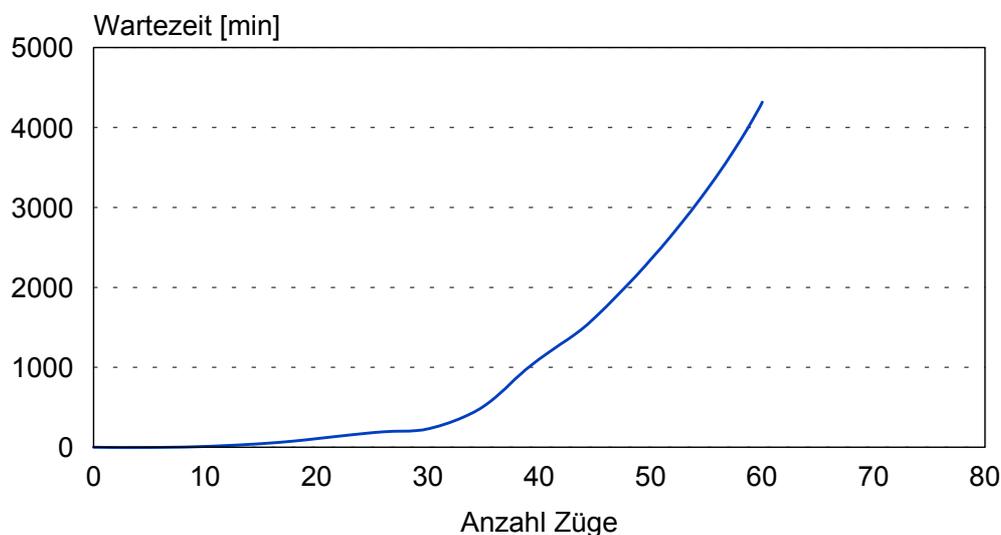


fahrplanabhängige Variante, Güterverkehr, Untersuchungszeitraum 7 h

Bild 69: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Jühnde – Mottgers, fahrplanabhängige Variante, Güterverkehr (nachts)

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Mottgers-Jühnde

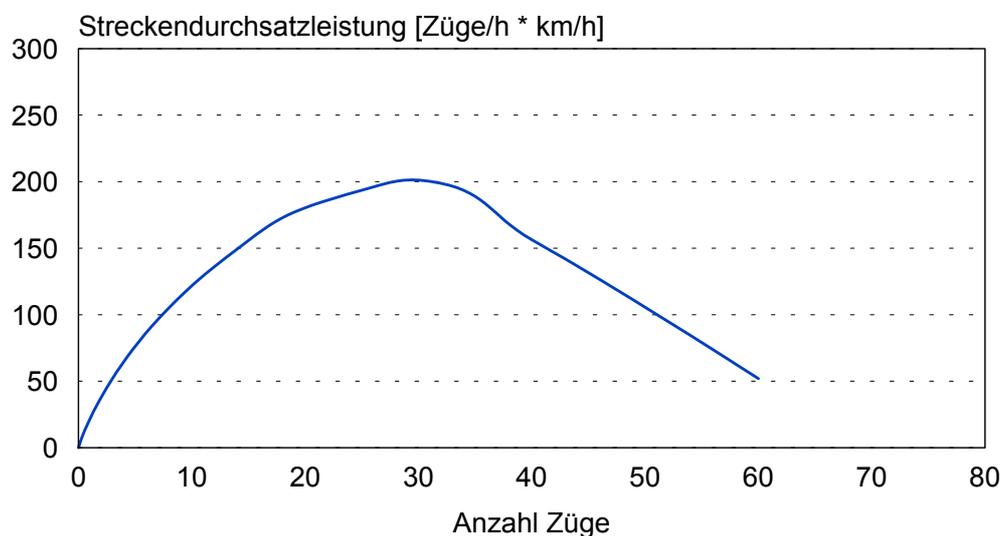


fahrplanabhängige Variante, Güterverkehr, Untersuchungszeitraum 7 h

Bild 70: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Mottgers – Jühnde, fahrplanabhängige Variante, Güterverkehr (nachts)

Streckendurchsatzleistung

Richtung Mottgers-Jühnde

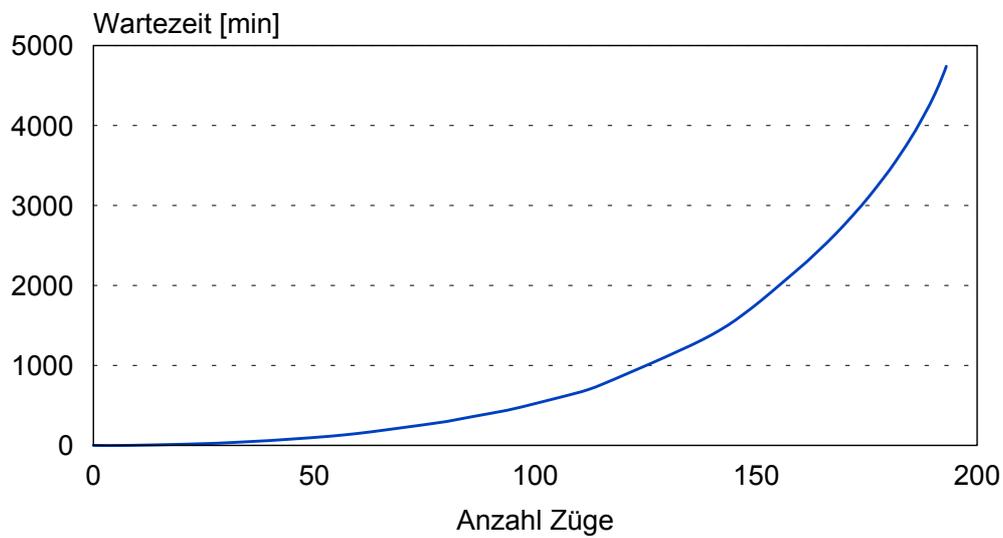


fahrplanabhängige Variante, Güterverkehr, Untersuchungszeitraum 7 h

Bild 71: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Mottgers – Jühnde, fahrplanabhängige Variante, Güterverkehr (nachts)

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Jühnde-Mottgers

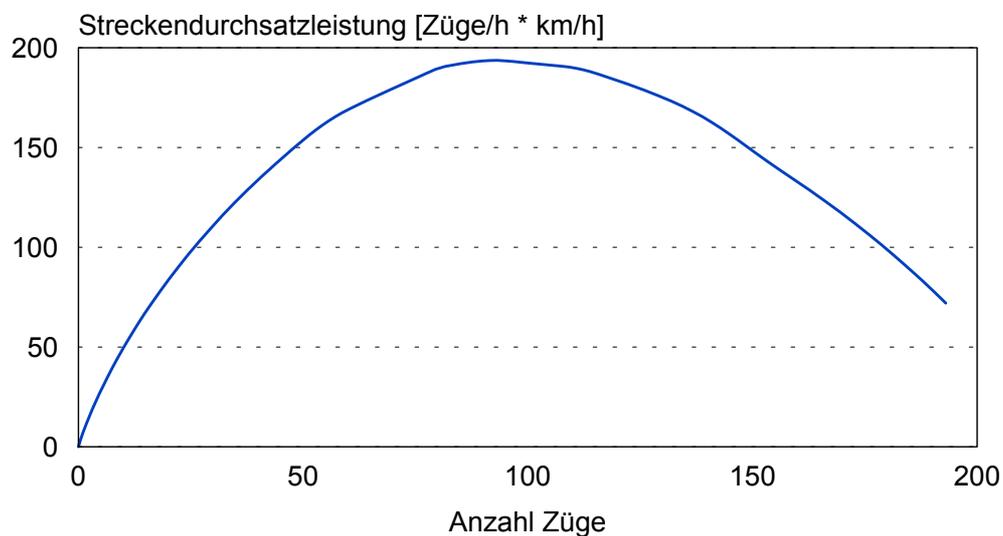


Mischung von Reise- und Güterverkehr, fahrplanunabhängig

Bild 72: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Jühnde – Mottgers, Mischung von Reise- und Güterverkehr, fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Jühnde-Mottgers

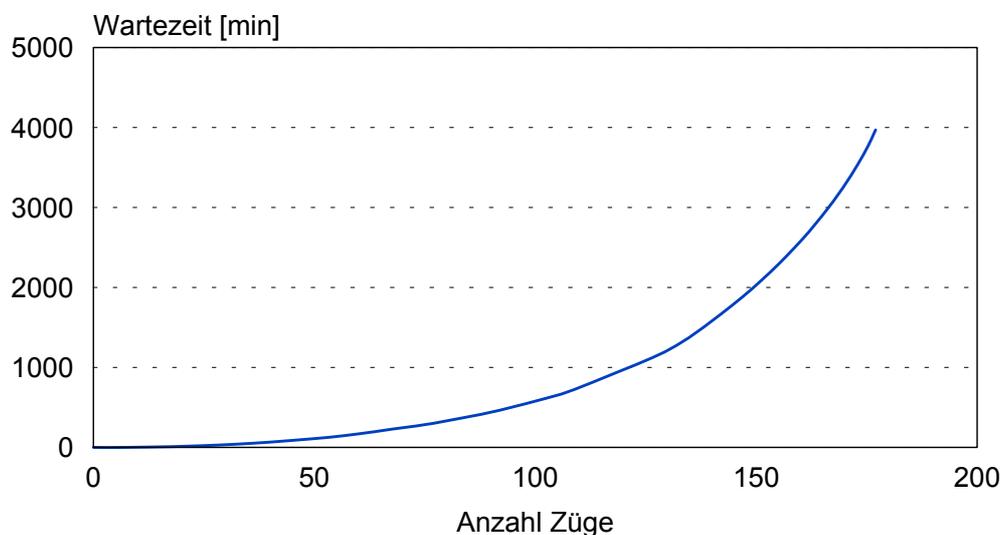


Mischung von Reise- und Güterverkehr, fahrplanunabhängig

Bild 73: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Jühnde – Mottgers, Mischung von Reise- und Güterverkehr, fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Mottgers-Jühnde

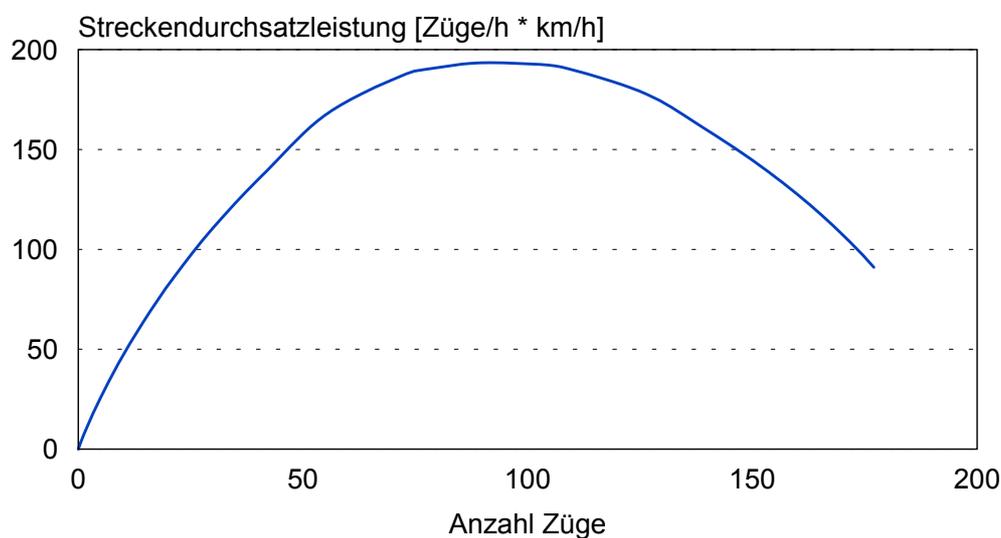


Mischung von Reise- und Güterverkehr, fahrplanunabhängig

Bild 74: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Mottgers – Jühnde, Mischung von Reise- und Güterverkehr, fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Mottgers-Jühnde

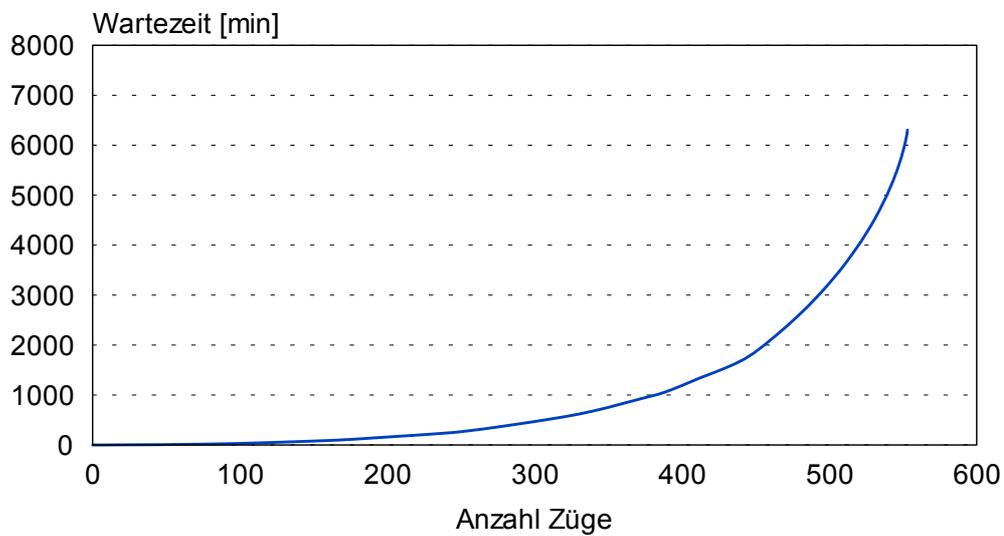


Mischung von Reise- und Güterverkehr, fahrplanunabhängig

Bild 75: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Mottgers – Jühnde, Mischung von Reise- und Güterverkehr, fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Frankfurt Süd

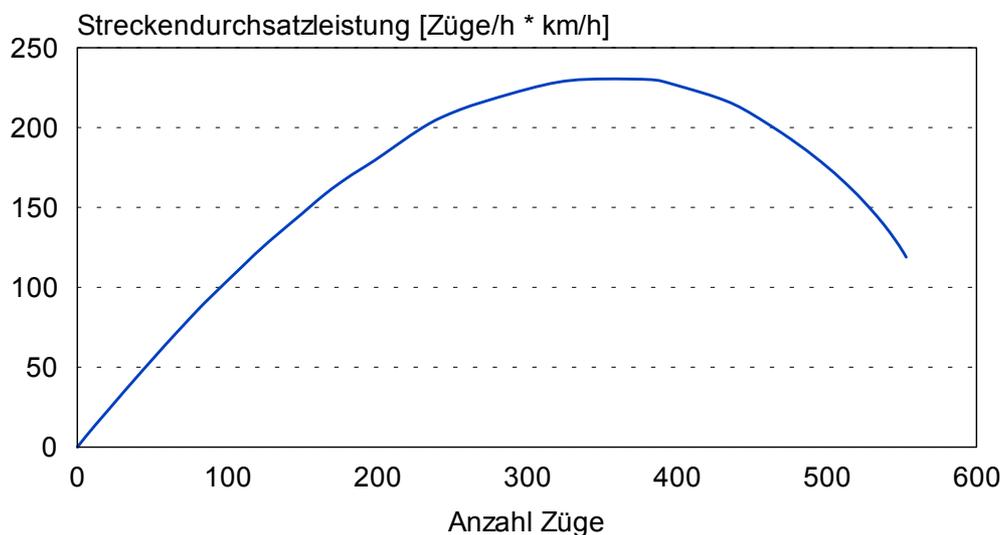


fahrplanunabhängige Variante

Bild 76: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Frankfurt Hbf – Frankfurt Süd, fahrplanunabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Richtung Frankfurt Süd

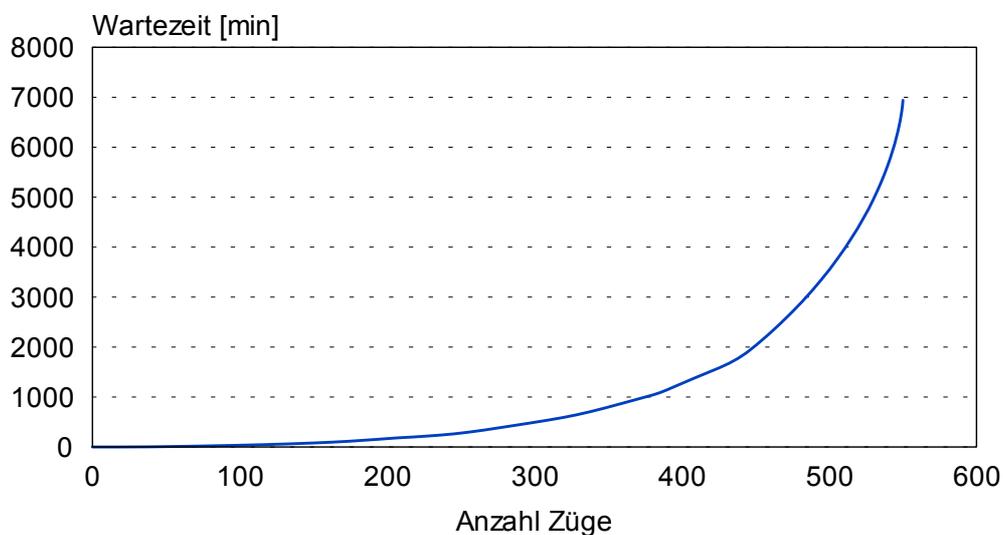


fahrplanunabhängige Variante

Bild 77: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Frankfurt Hbf – Frankfurt Süd, fahrplanunabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Frankfurt Hauptbahnhof

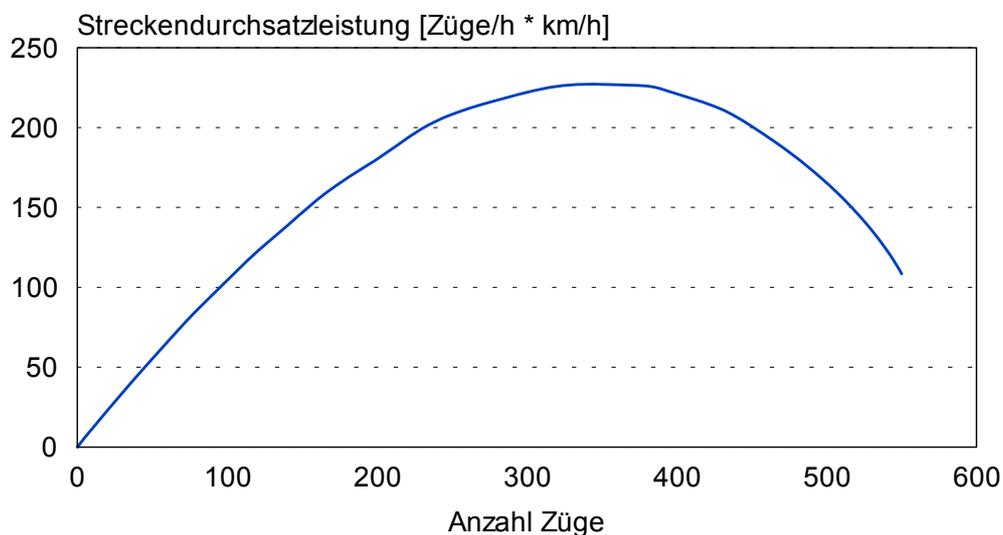


fahrplanunabhängige Variante

Bild 78: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Frankfurt Süd – Frankfurt Hbf, fahrplanunabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Richtung Frankfurt Hauptbahnhof

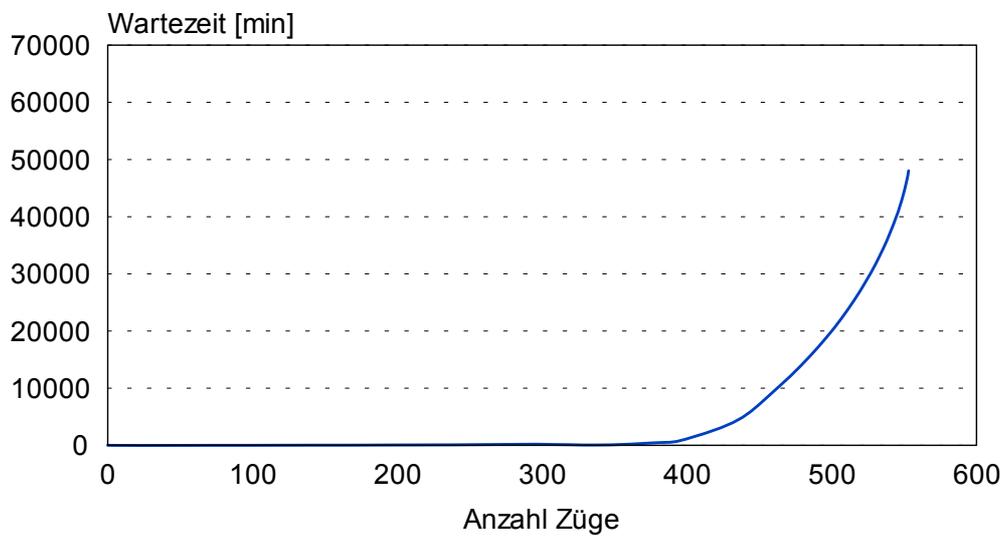


fahrplanunabhängige Variante

Bild 79: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Frankfurt Süd – Frankfurt Hbf, fahrplanunabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Frankfurt Süd

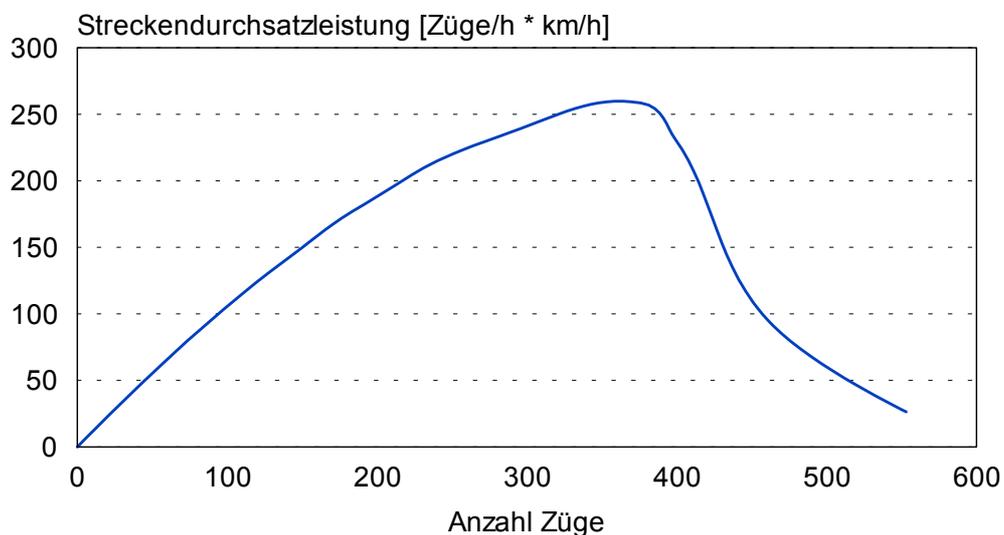


fahrplanabhängige Variante

Bild 80: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Frankfurt Hbf – Frankfurt Süd, fahrplanabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Richtung Frankfurt Süd

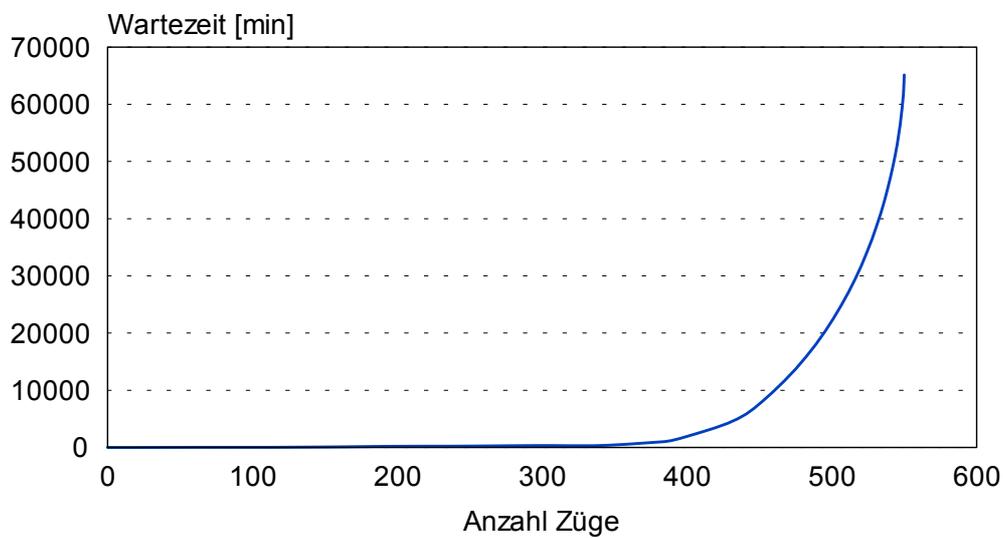


fahrplanabhängige Variante

Bild 81: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Frankfurt Hbf – Frankfurt Süd, fahrplanabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Frankfurt Hauptbahnhof

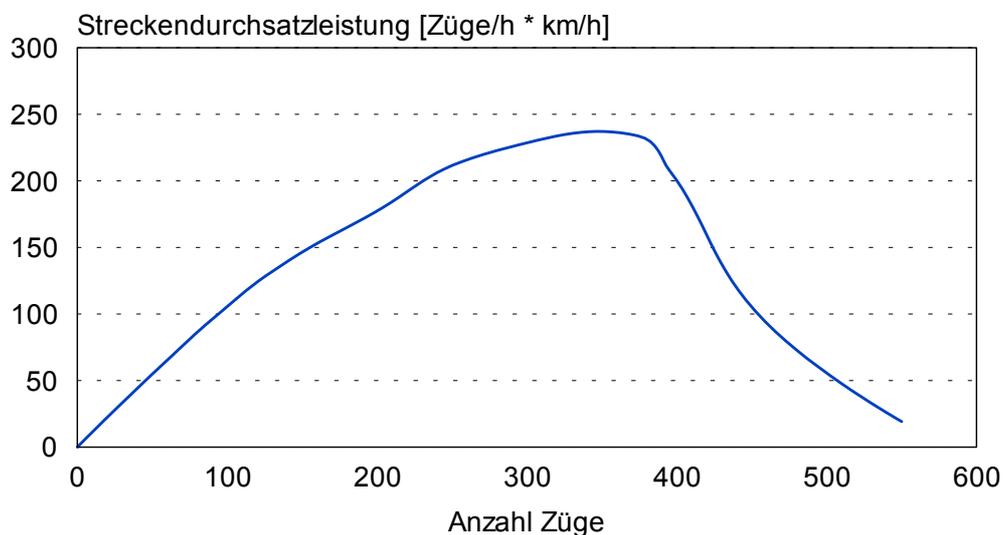


fahrplanabhängige Variante

Bild 82: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Frankfurt Süd – Frankfurt Hbf, fahrplanabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Richtung Frankfurt Hauptbahnhof

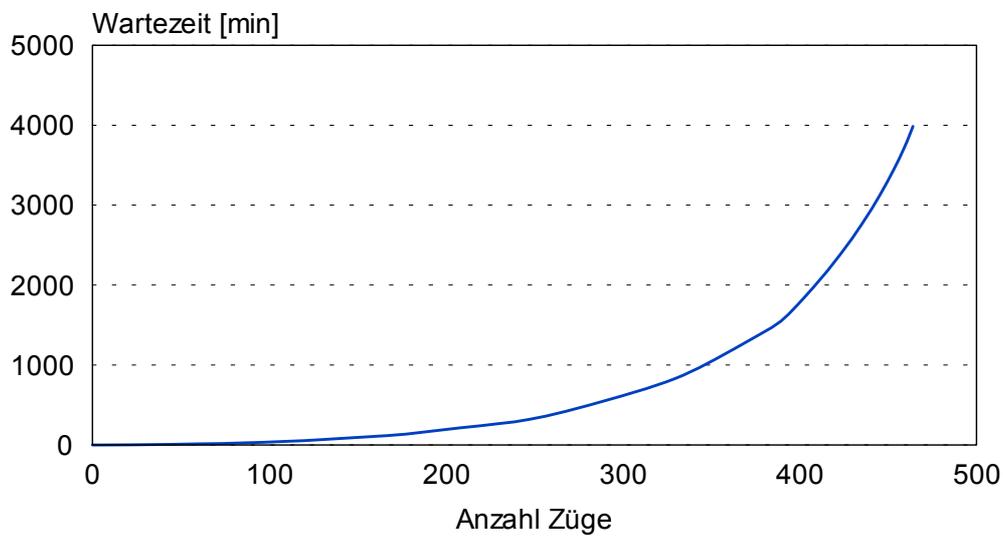


fahrplanabhängige Variante

Bild 83: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Frankfurt Süd – Frankfurt Hbf, fahrplanabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Frankfurt Süd

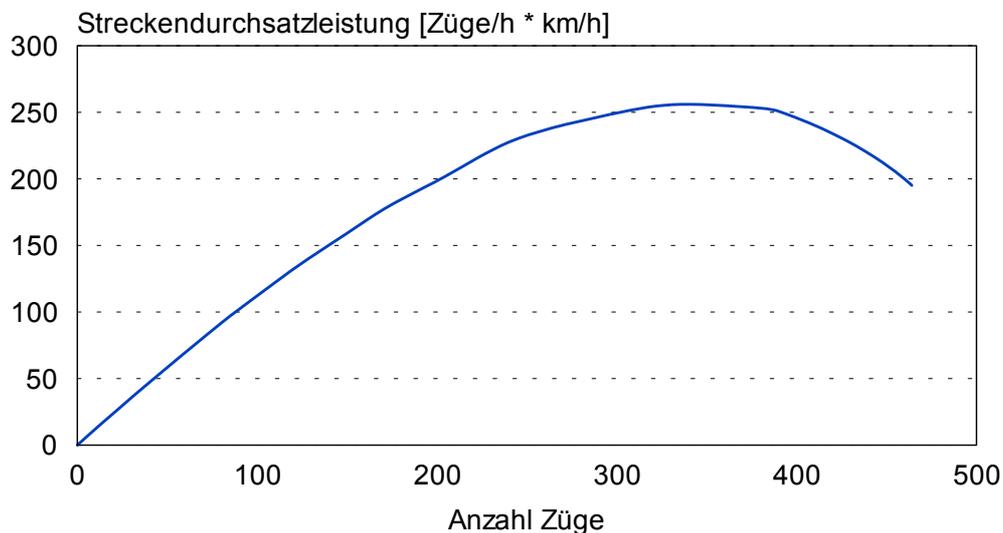


fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Bild 84: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Frankfurt Hbf – Frankfurt Süd, fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Streckendurchsatzleistung

Richtung Frankfurt Süd

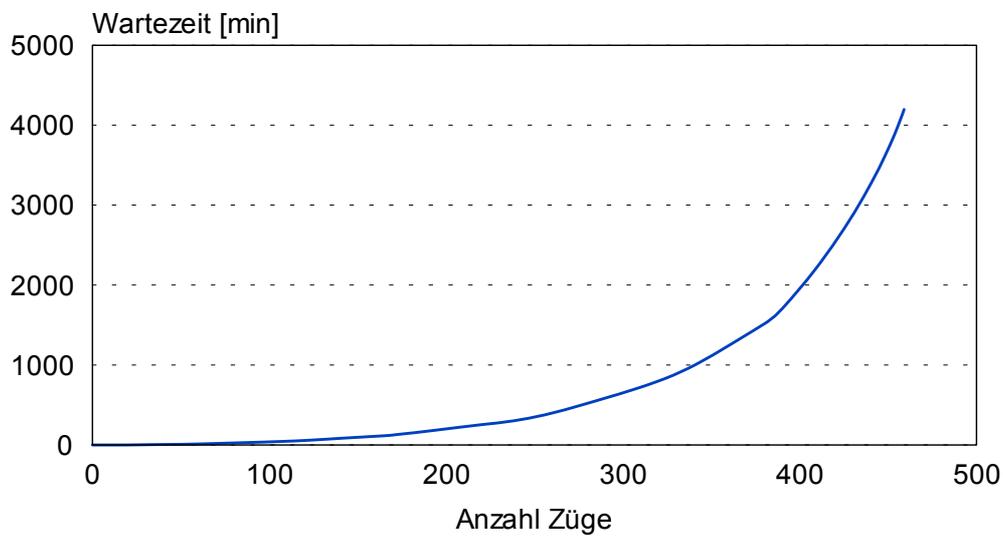


fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Bild 85: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Frankfurt Hbf – Frankfurt Süd, fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Frankfurt Hauptbahnhof

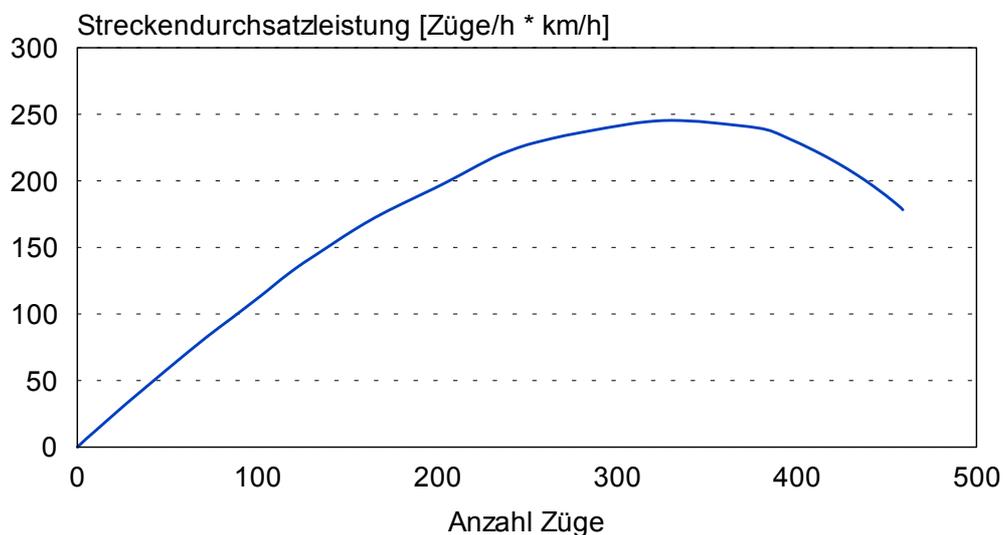


fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Bild 86: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Frankfurt Süd – Frankfurt Hbf, fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Streckendurchsatzleistung

Richtung Frankfurt Hauptbahnhof

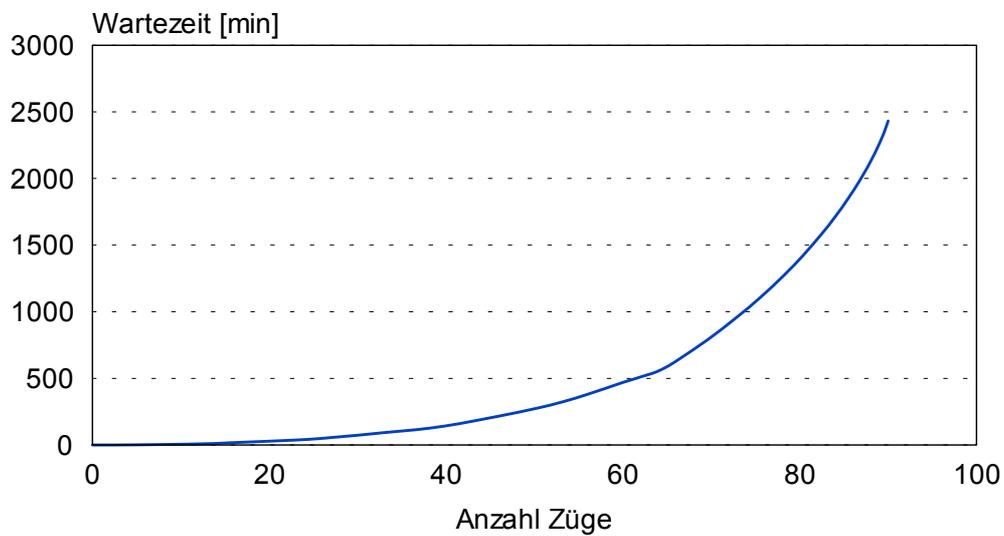


fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Bild 87: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Frankfurt Süd – Frankfurt Hbf, fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Freiberg-Holzhausen und Gegenrichtung

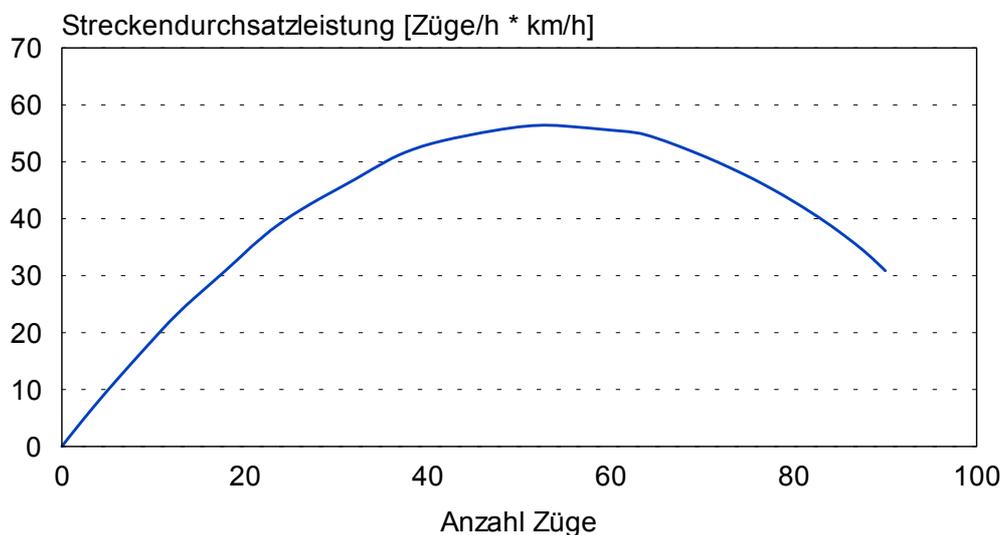


Variante ohne Güterverkehr, fahrplanunabhängig

Bild 88: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Freiberg – Holzhausen und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante, ohne Güterverkehr

Streckendurchsatzleistung

Freiberg-Holzhausen und Gegenrichtung

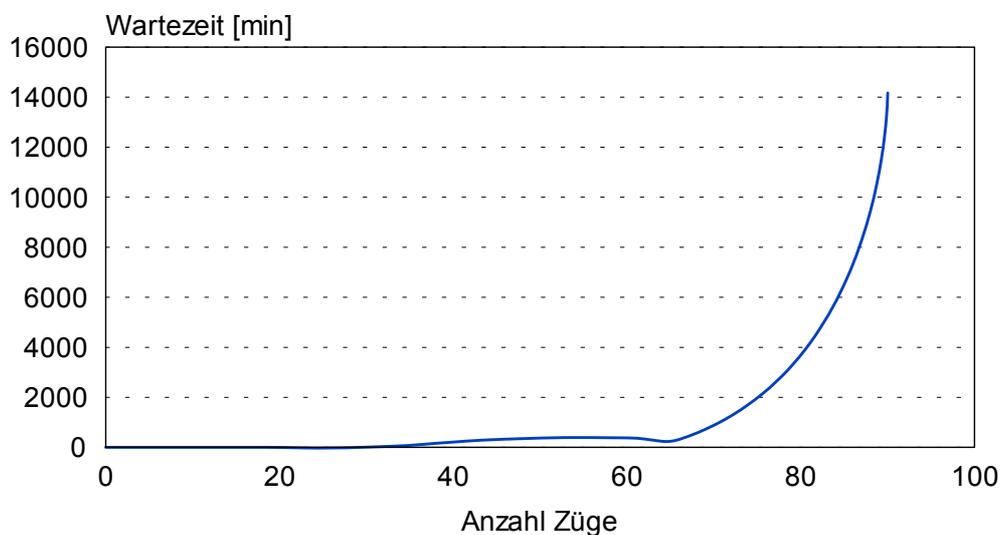


Variante ohne Güterverkehr, fahrplanunabhängig

Bild 89: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Freiberg – Holzhausen und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante, ohne Güterverkehr

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Freiberg-Holzhausen und Gegenrichtung

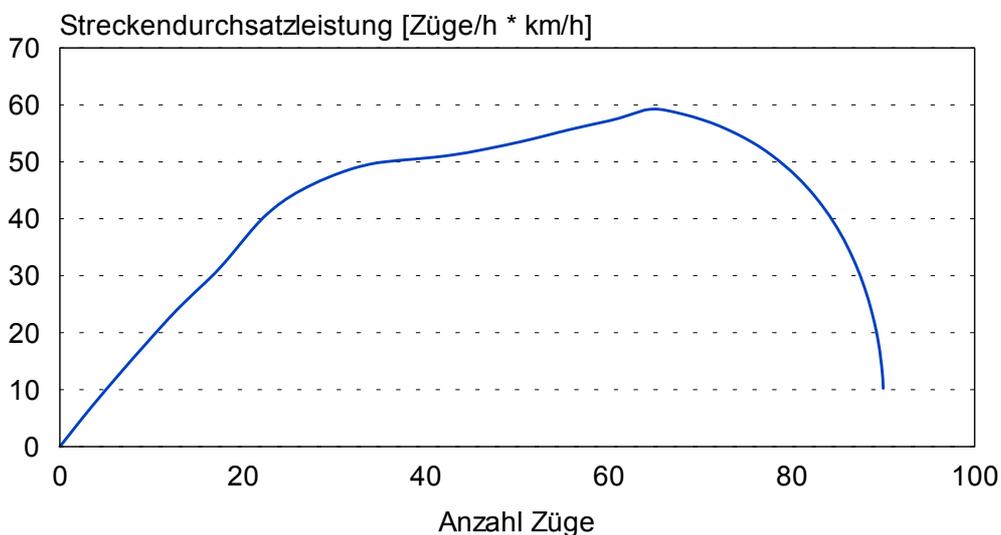


Variante ohne Güterverkehr, fahrplanabhängig

Bild 90: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Freiberg – Holzhausen und Gegenrichtung, fahrplanabhängige Variante, ohne Güterverkehr

Streckendurchsatzleistung

Freiberg-Holzhausen und Gegenrichtung

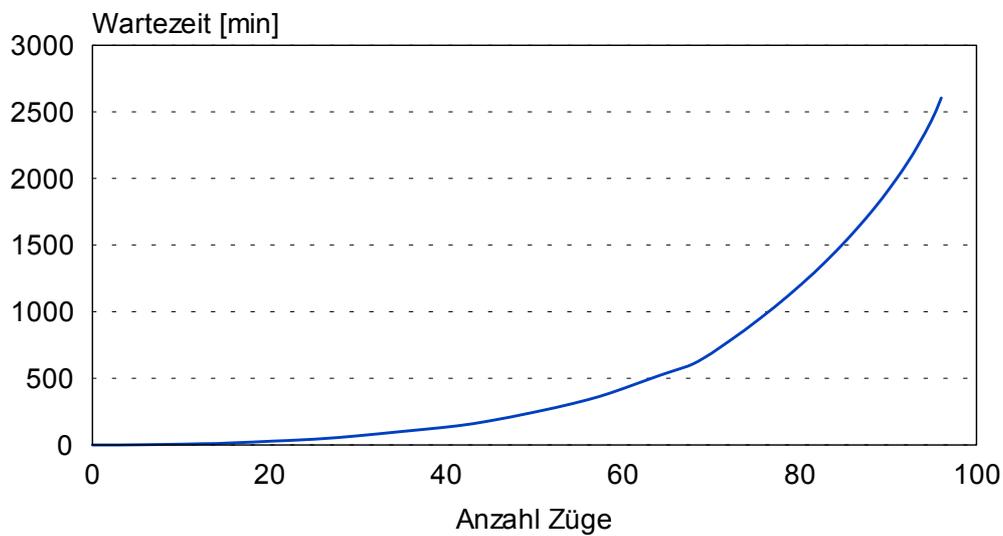


Variante ohne Güterverkehr, fahrplanabhängig

Bild 91: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Freiberg – Holzhausen und Gegenrichtung, fahrplanabhängige Variante, ohne Güterverkehr

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Freiberg-Holzhausen und Gegenrichtung

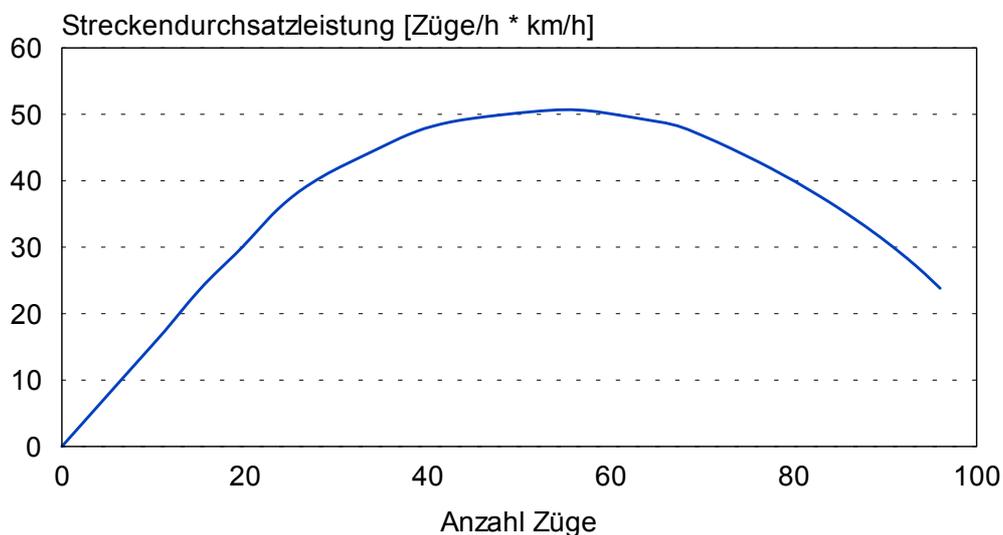


Variante mit Güterverkehr, fahrplanunabhängig

Bild 92: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Freiberg – Holzhausen und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante, mit Güterverkehr

Streckendurchsatzleistung

Freiberg-Holzhausen und Gegenrichtung

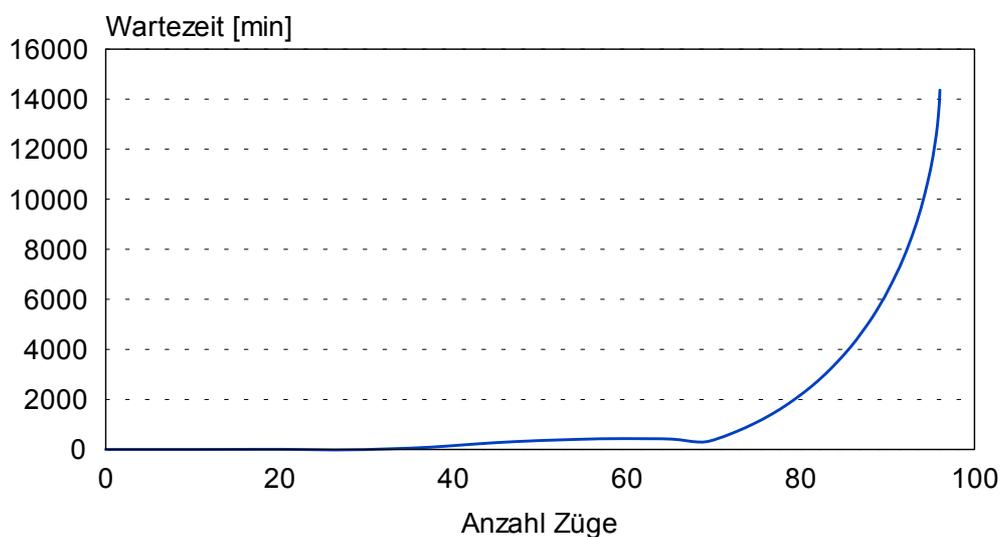


Variante mit Güterverkehr, fahrplanunabhängig

Bild 93: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Freiberg – Holzhausen und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante, mit Güterverkehr

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Freiberg-Holzhausen und Gegenrichtung

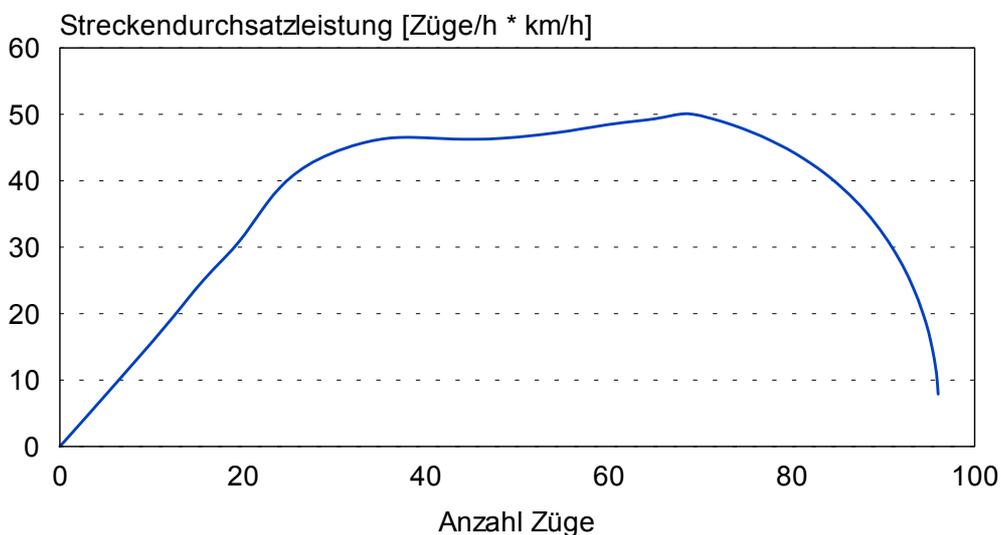


Variante mit Güterverkehr, fahrplanabhängig

Bild 94: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Freiburg – Holzhausen und Gegenrichtung, fahrplanabhängige Variante, mit Güterverkehr

Streckendurchsatzleistung

Freiberg-Holzhausen und Gegenrichtung

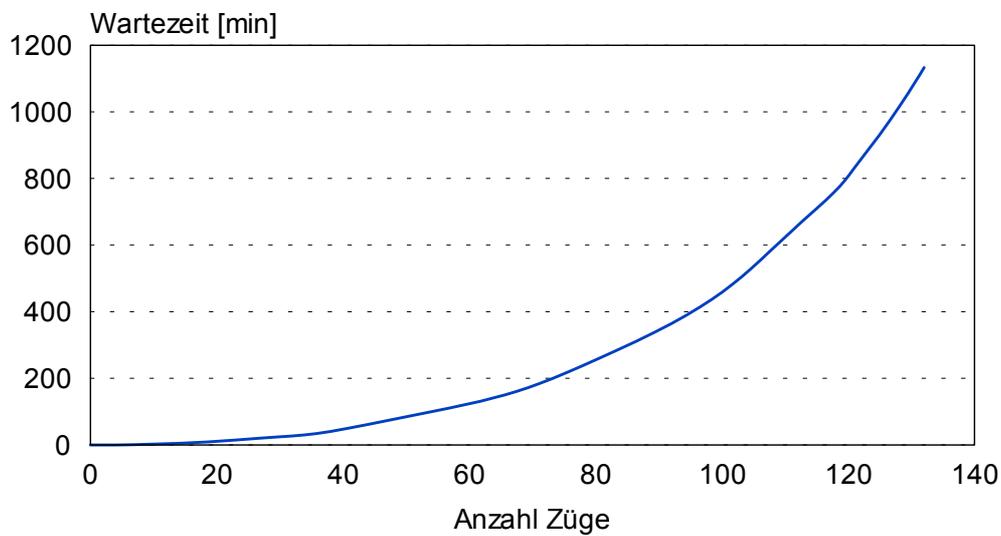


Variante mit Güterverkehr, fahrplan abhängig

Bild 95: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Freiburg – Holzhausen und Gegenrichtung, fahrplanabhängige Variante, mit Güterverkehr

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Erbach - Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung

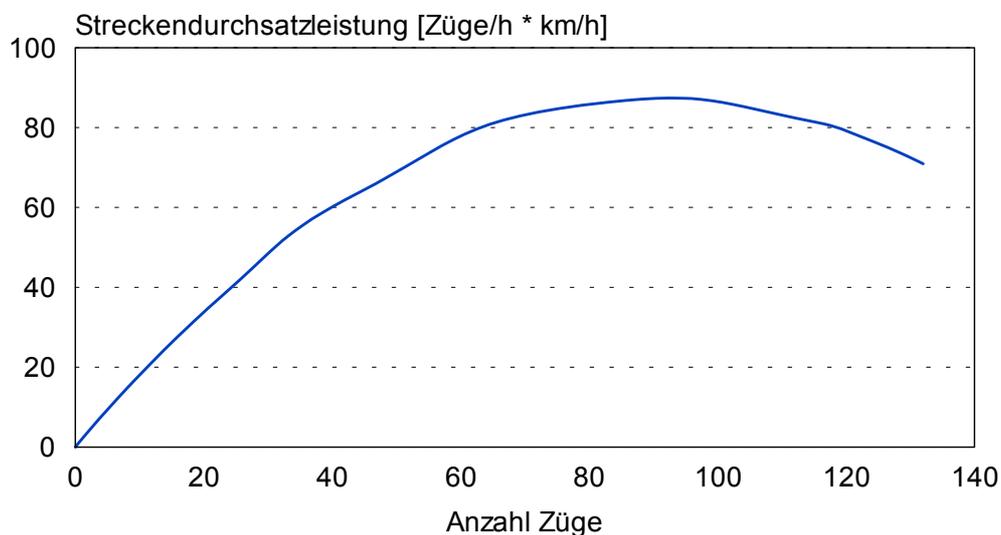


fahrplanunabhängige Variante

Bild 96: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Erbach – Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Erbach - Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung

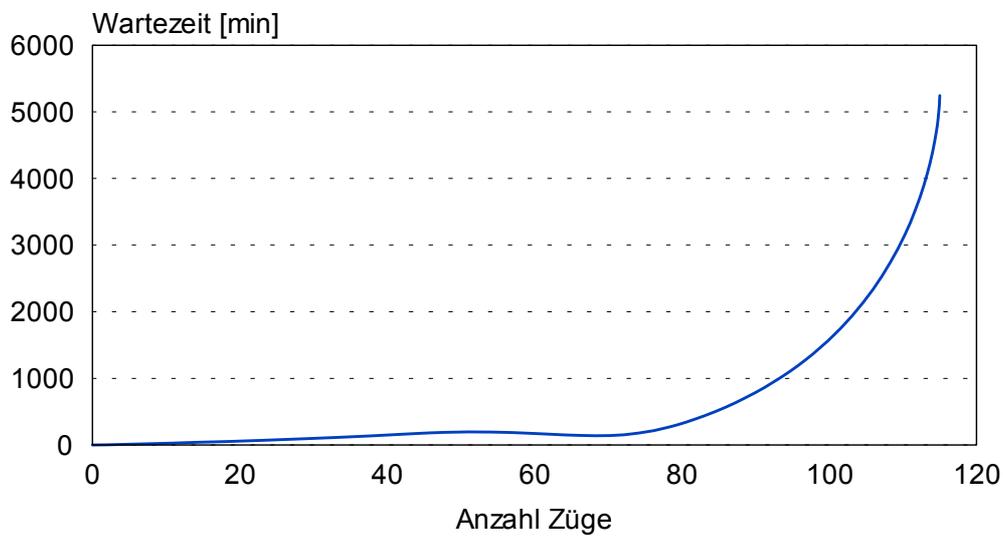


fahrplanunabhängige Variante

Bild 97: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Erbach – Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Erbach - Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung

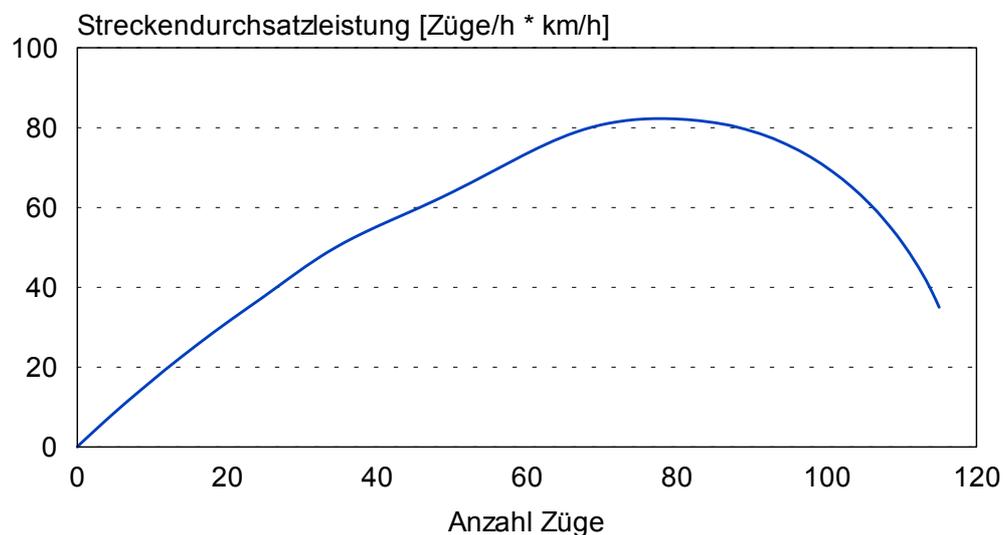


fahrplanabhängige Variante

Bild 98: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Erbach – Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung, fahrplanabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Erbach - Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung

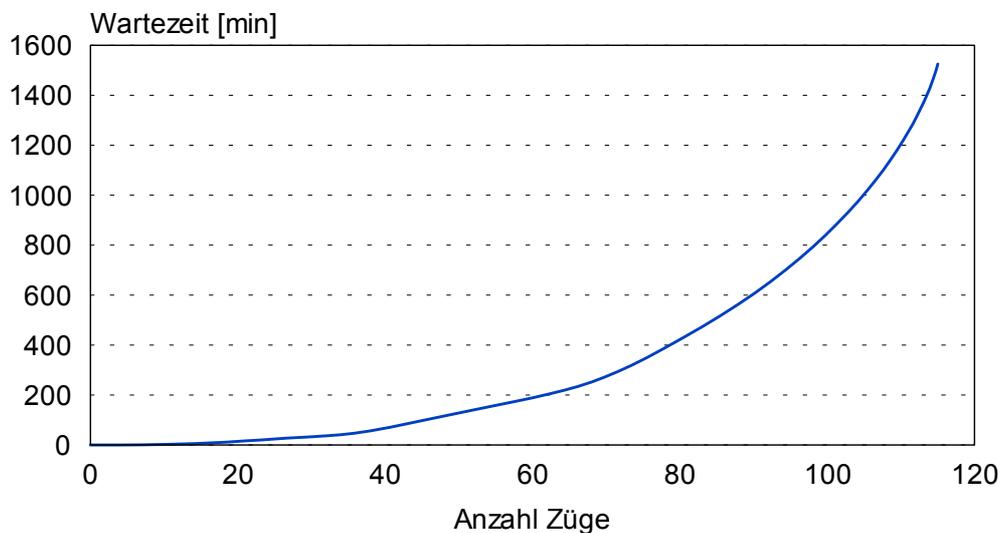


fahrplanabhängige Variante

Bild 99: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Erbach – Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung, fahrplanabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Erbach - Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung

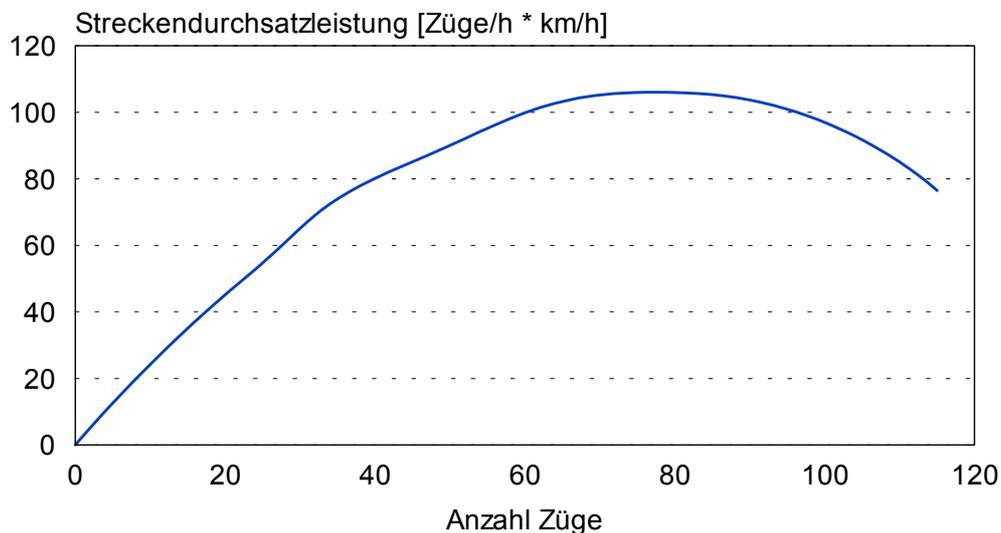


fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Bild 100: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Erbach – Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Streckendurchsatzleistung

Erbach - Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung

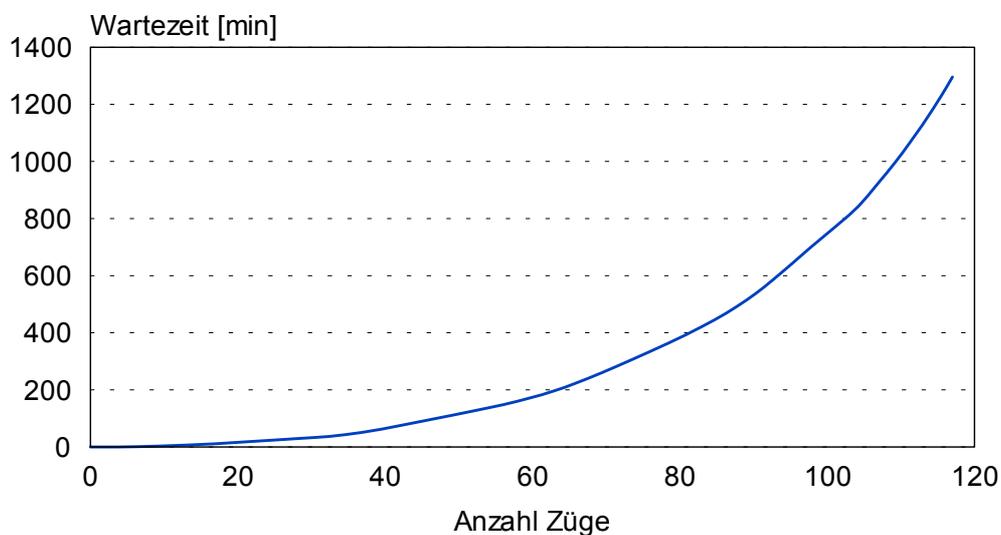


fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Bild 101: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Erbach – Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Darmstadt - Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung

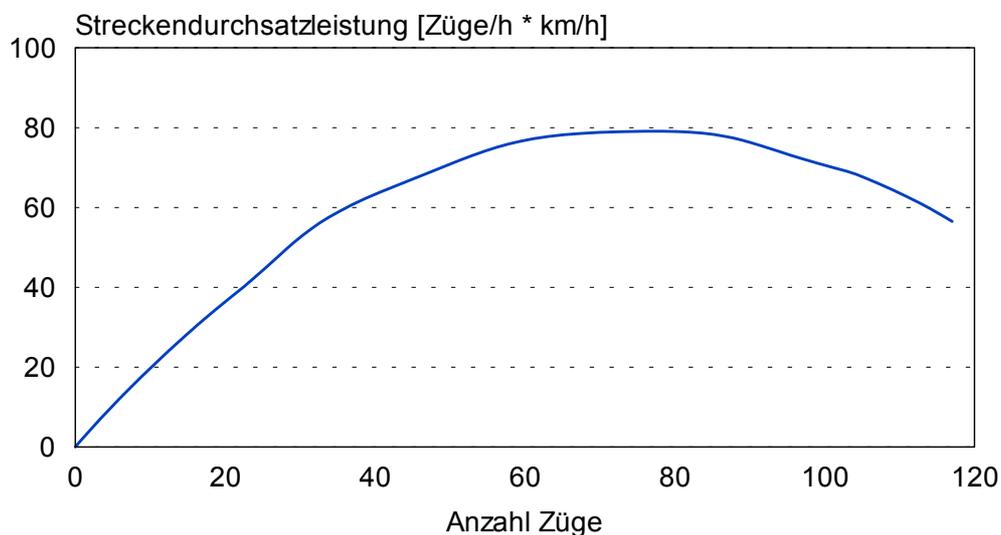


fahrplanunabhängige Variante

Bild 102: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Darmstadt – Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Darmstadt - Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung

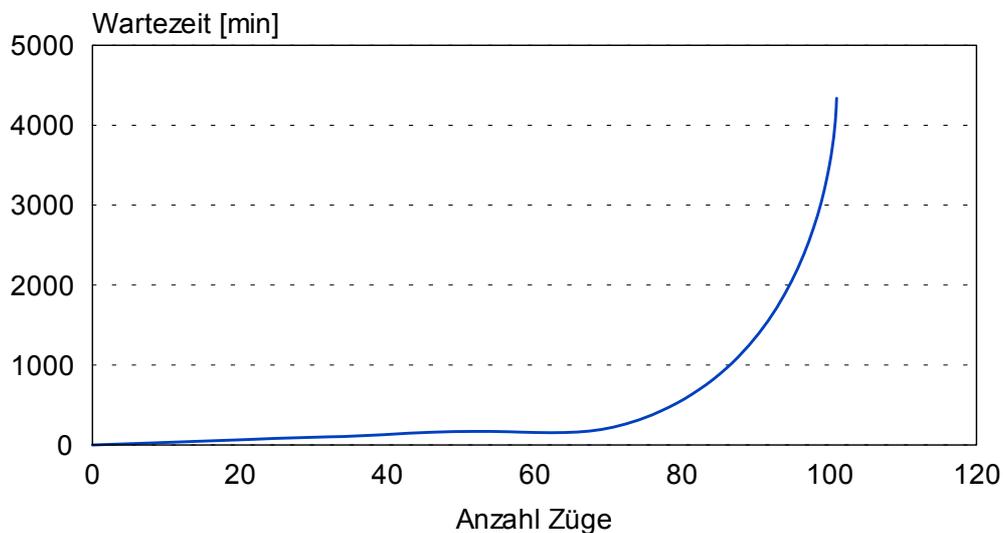


fahrplanunabhängige Variante

Bild 103: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Darmstadt – Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Darmstadt - Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung

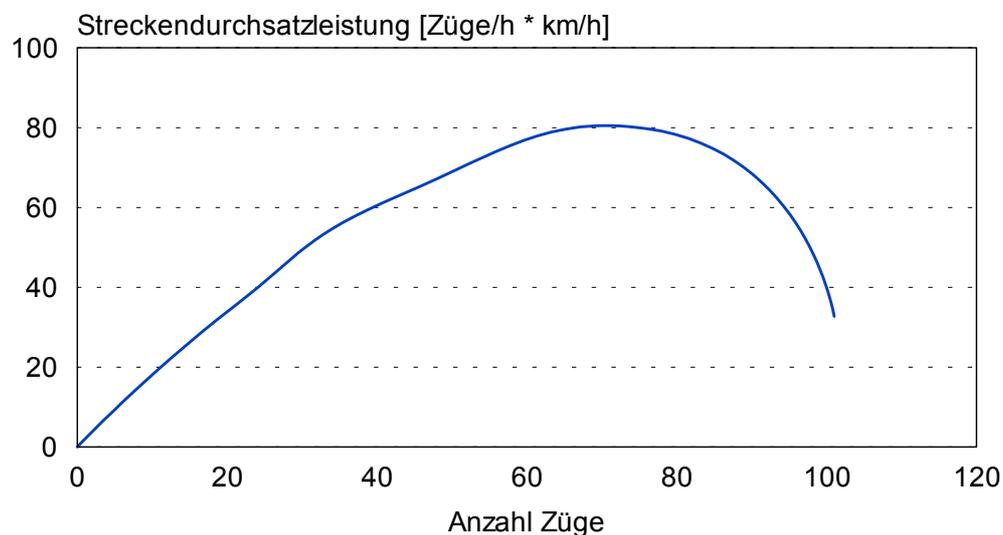


fahrplanabhängige Variante

Bild 104: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Darmstadt – Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung, fahrplanabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Darmstadt - Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung

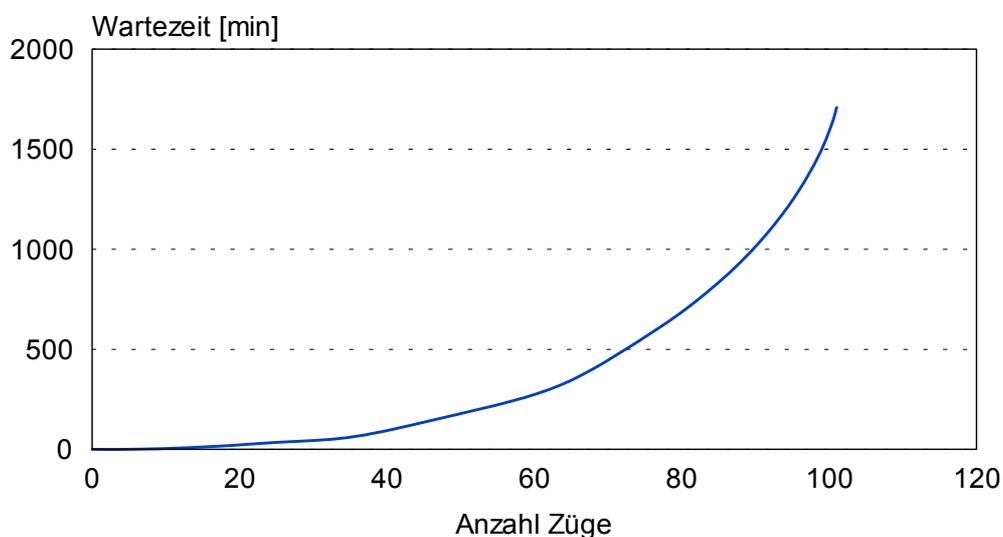


fahrplanabhängige Variante

Bild 105: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Darmstadt – Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung, fahrplanabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Darmstadt - Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung

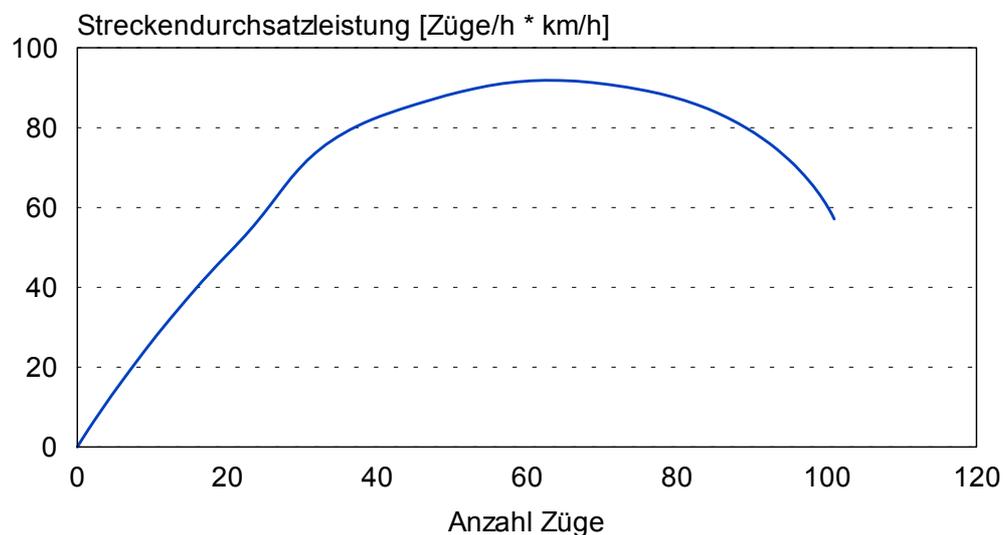


fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Bild 106: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Darmstadt – Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Streckendurchsatzleistung

Darmstadt - Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung

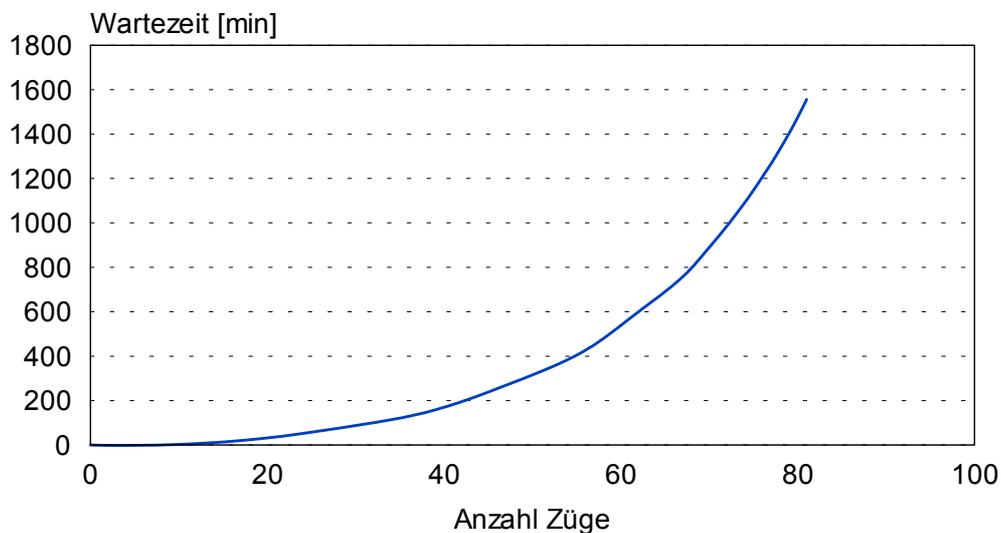


fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Bild 107: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Darmstadt – Wiebelsbach-Heubach und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Wiebelsbach-Heubach - Hanau und Gegenrichtung

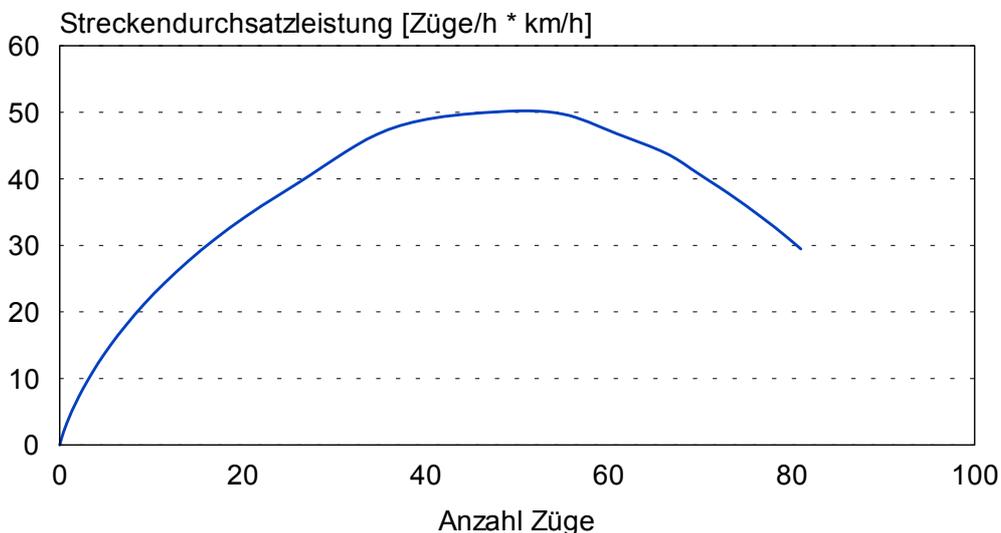


fahrplanunabhängige Variante

Bild 108: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Wiebelsbach-Heubach – Hanau und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Wiebelsbach-Heubach - Hanau und Gegenrichtung

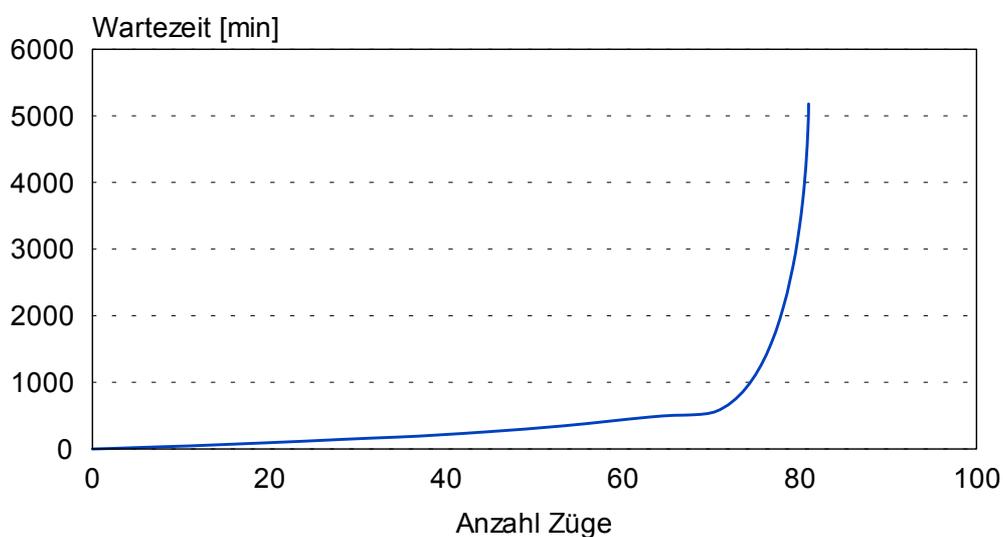


fahrplanunabhängige Variante

Bild 109: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Wiebelsbach-Heubach – Hanau und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Wiebelsbach-Heubach - Hanau und Gegenrichtung

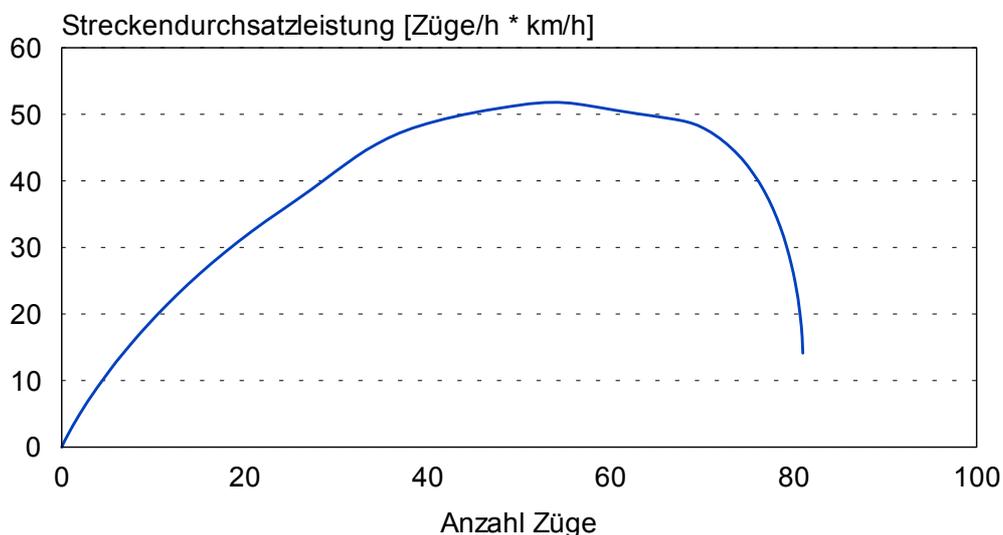


fahrplanabhängige Variante

Bild 110: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Wiebelsbach-Heubach – Hanau und Gegenrichtung, fahrplanabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Wiebelsbach-Heubach - Hanau und Gegenrichtung

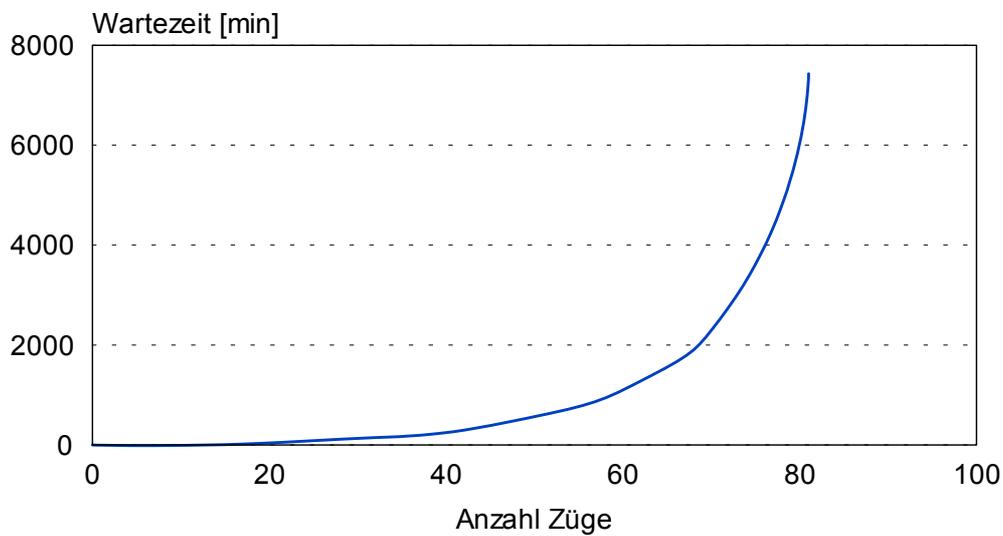


fahrplanabhängige Variante

Bild 111: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Wiebelsbach-Heubach – Hanau und Gegenrichtung, fahrplanabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Wiebelsbach-Heubach - Hanau und Gegenrichtung

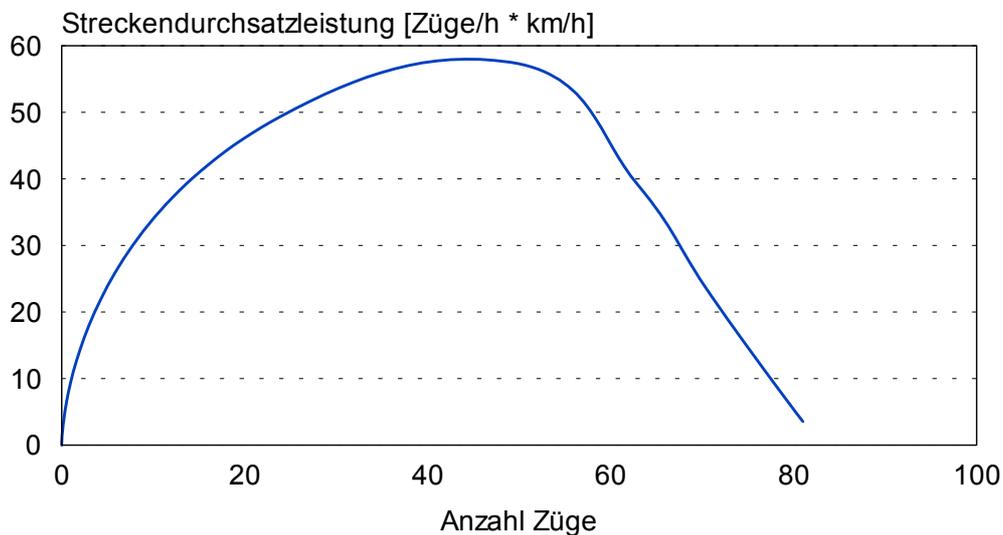


fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Bild 112: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Wiebelsbach-Heubach – Hanau und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Streckendurchsatzleistung

Wiebelsbach-Heubach - Hanau und Gegenrichtung

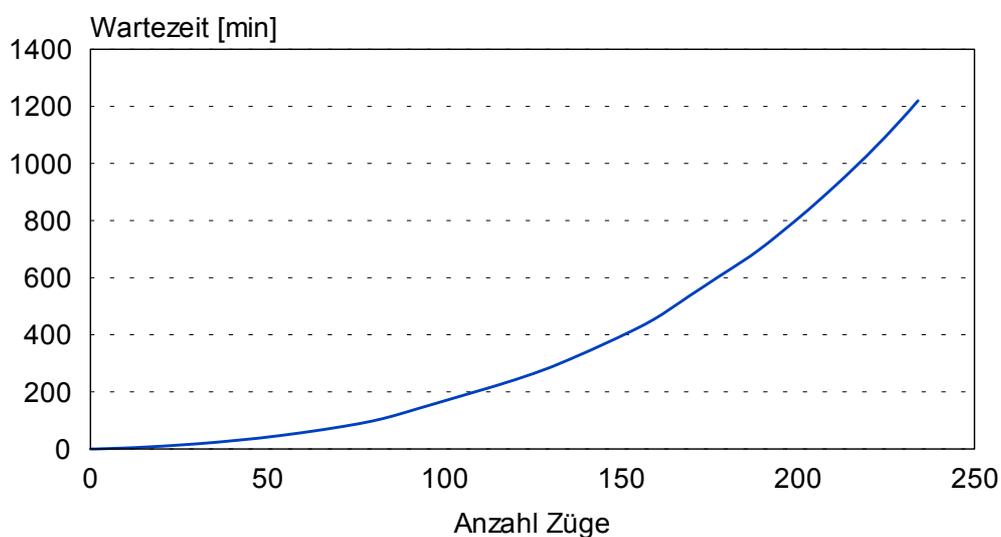


fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Bild 113: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Wiebelsbach-Heubach – Hanau und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante, mit Betriebsruhe

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Sorsum-Groß Gleidigen und Gegenrichtung

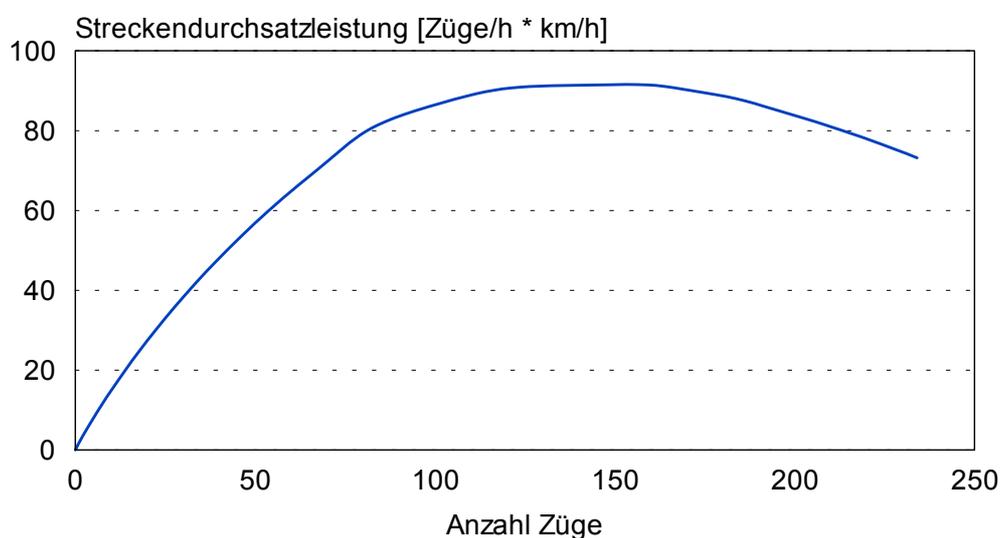


fahrplanunabhängige Variante

Bild 114: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Sorsum – Groß Gleidigen und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Sorsum-Groß Gleidigen und Gegenrichtung

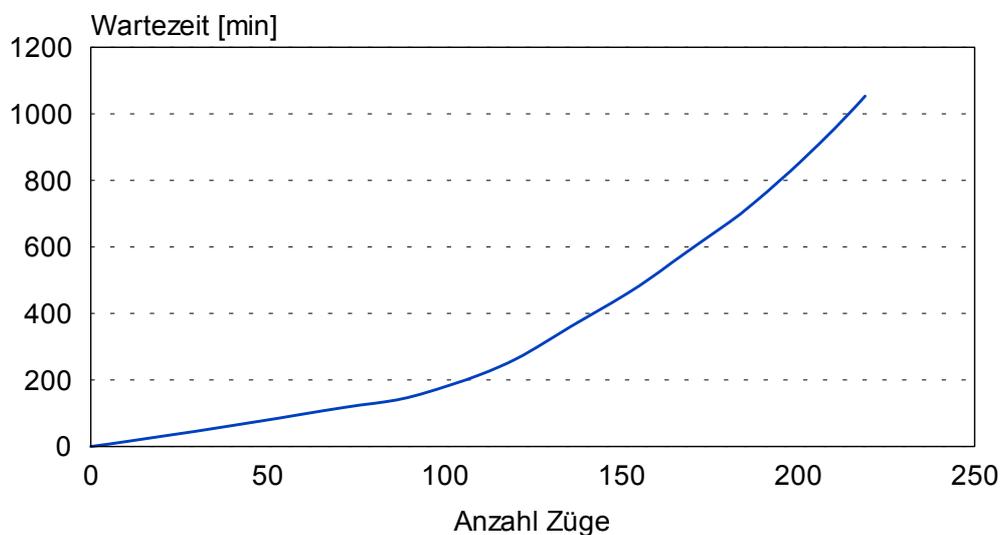


fahrplanunabhängige Variante

Bild 115: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Sorsum – Groß Gleidigen und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Sorsum-Groß Gleidigen und Gegenrichtung

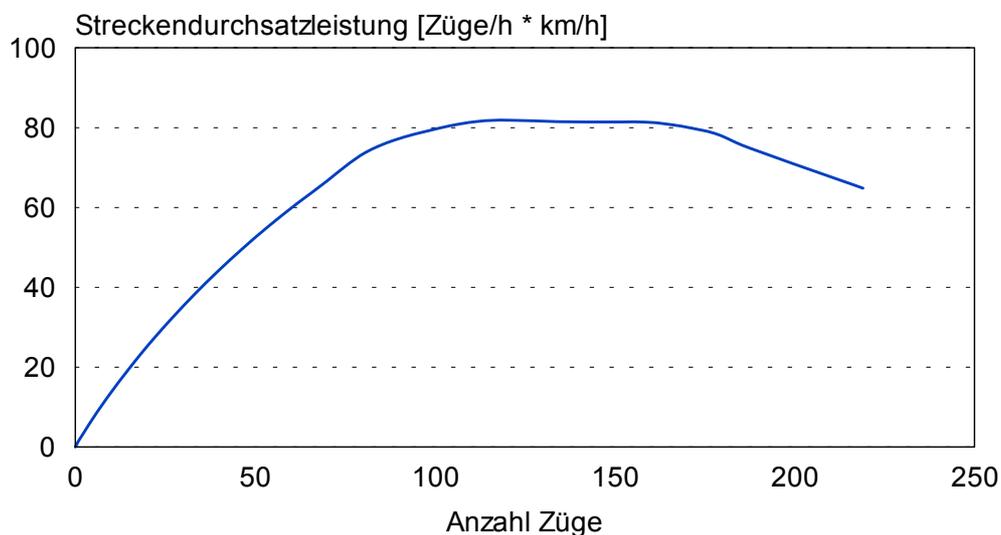


fahrplanabhängige Variante

Bild 116: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Sorsum – Groß Gleidigen und Gegenrichtung, fahrplanabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Sorsum-Groß Gleidigen und Gegenrichtung

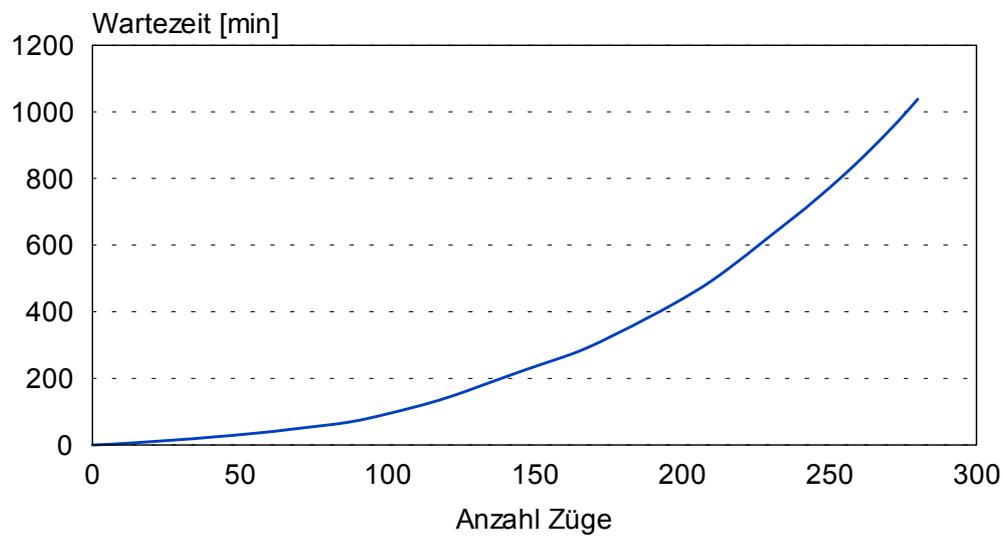


fahrplanabhängige Variante

Bild 117: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Sorsum – Groß Gleidigen und Gegenrichtung, fahrplanabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Groß Gleidigen-Fallersleben und Gegenrichtung

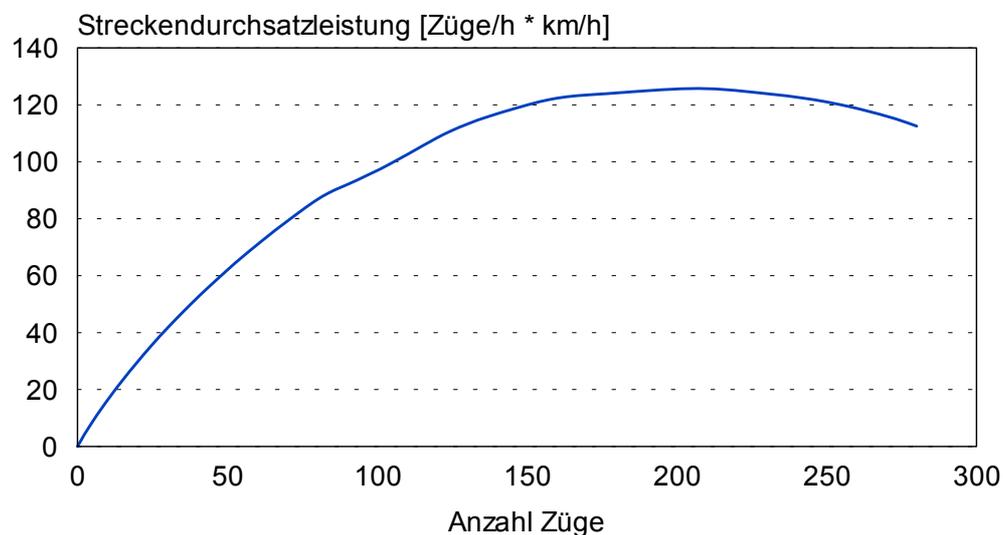


fahrplanunabhängige Variante

Bild 118: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Groß Gleidigen – Fallersleben und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Groß Gleidigen-Fallersleben und Gegenrichtung

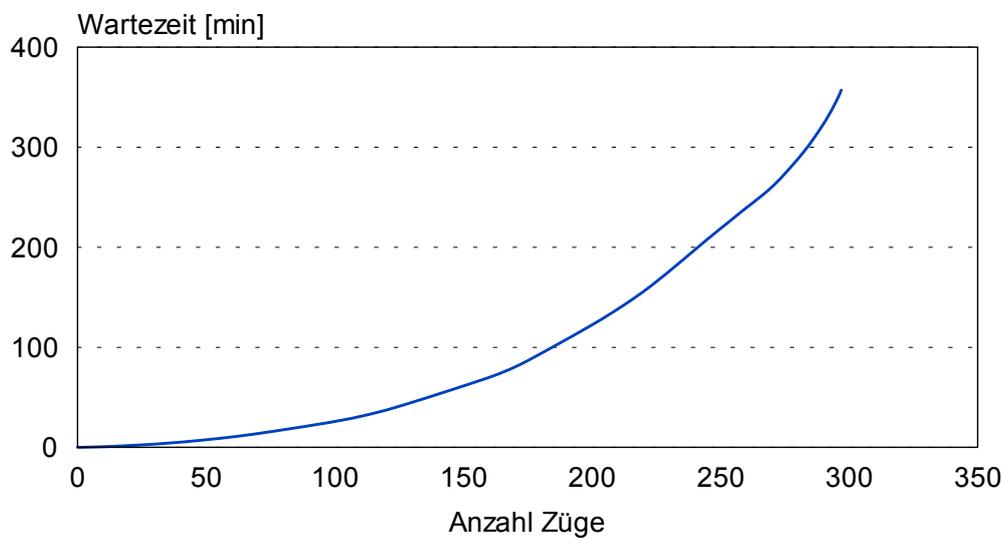


fahrplanunabhängige Variante

Bild 119: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Groß Gleidigen – Fallersleben und Gegenrichtung, fahrplanunabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Groß Gleidigen-Fallersleben und Gegenrichtung

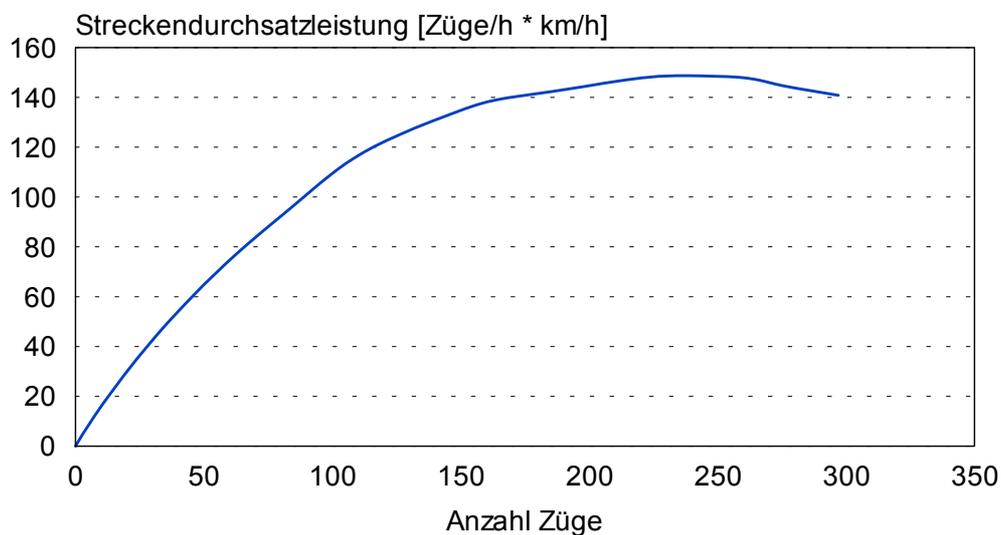


fahrplanabhängige Variante

Bild 120: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Groß Gleidigen – Fallersleben und Gegenrichtung, fahrplanabhängige Variante

Streckendurchsatzleistung

Groß Gleidigen-Fallersleben und Gegenrichtung

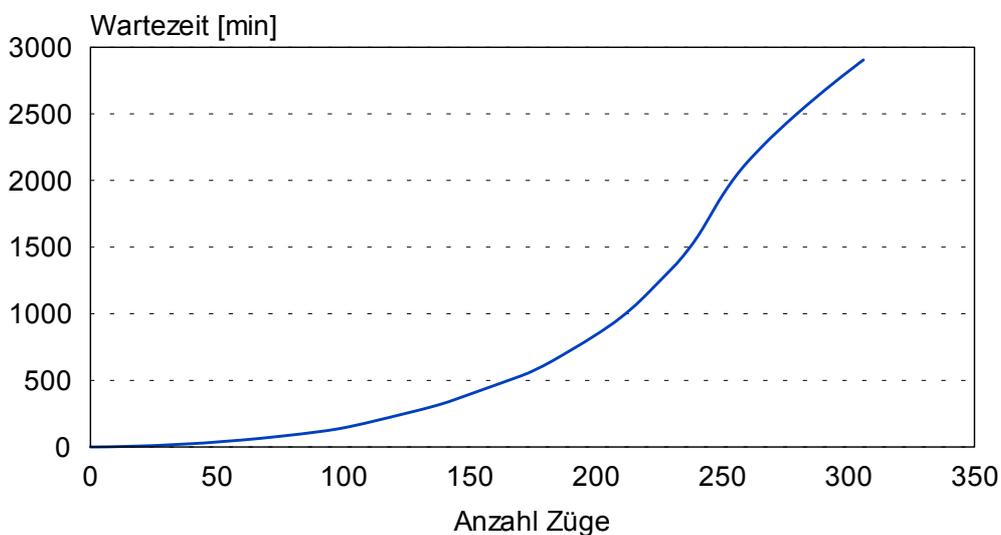


fahrplanabhängige Variante

Bild 121: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Groß Gleidigen – Fallersleben und Gegenrichtung, fahrplanabhängige Variante

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Hanau-Gelnhausen

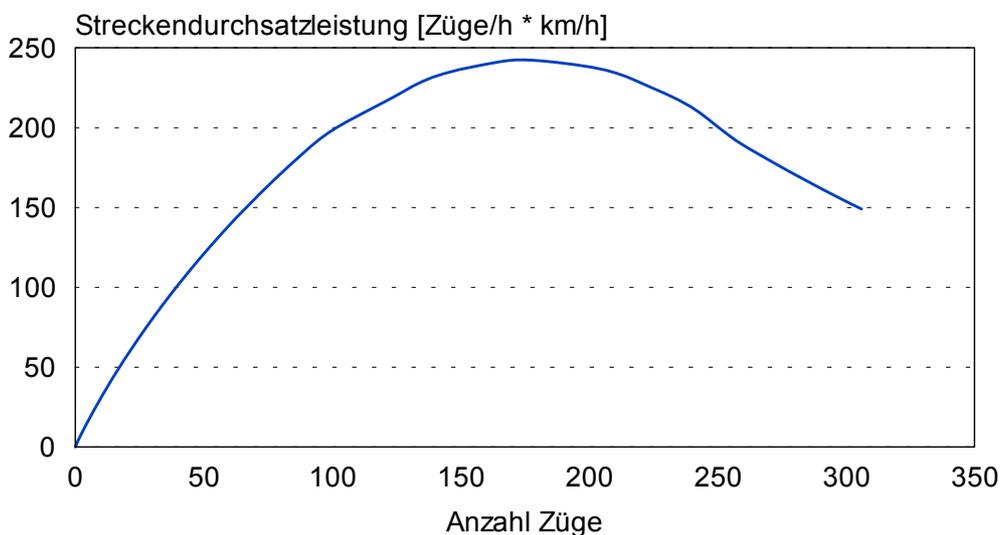


Variante RE auf Ferngleisen, fahrplanunabhängig

Bild 122: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Hanau – Gelnhausen, Variante RE auf Ferngleisen, fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Hanau-Gelnhausen

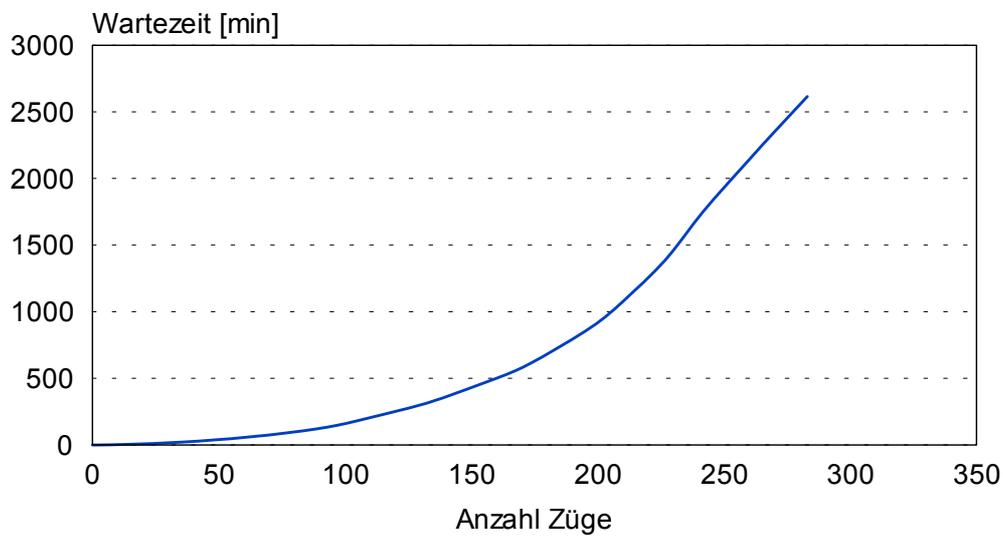


Variante RE auf Ferngleisen, fahrplanunabhängig

Bild 123: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Hanau – Gelnhausen, Variante RE auf Ferngleisen, fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Gelnhausen-Hanau

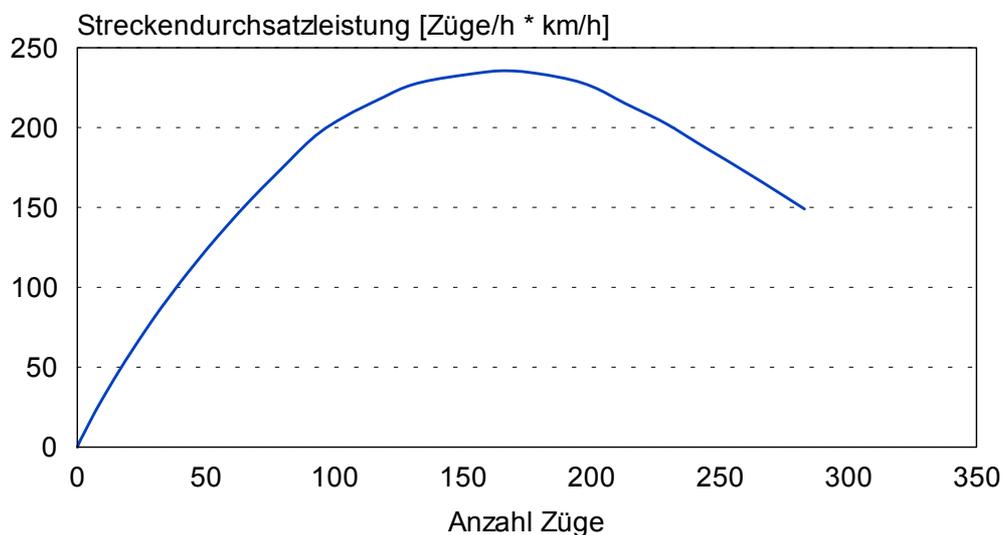


Variante RE auf Ferngleisen, fahrplanunabhängig

Bild 124: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Gelnhausen – Hanau, Variante RE auf Ferngleisen, fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Gelnhausen-Hanau

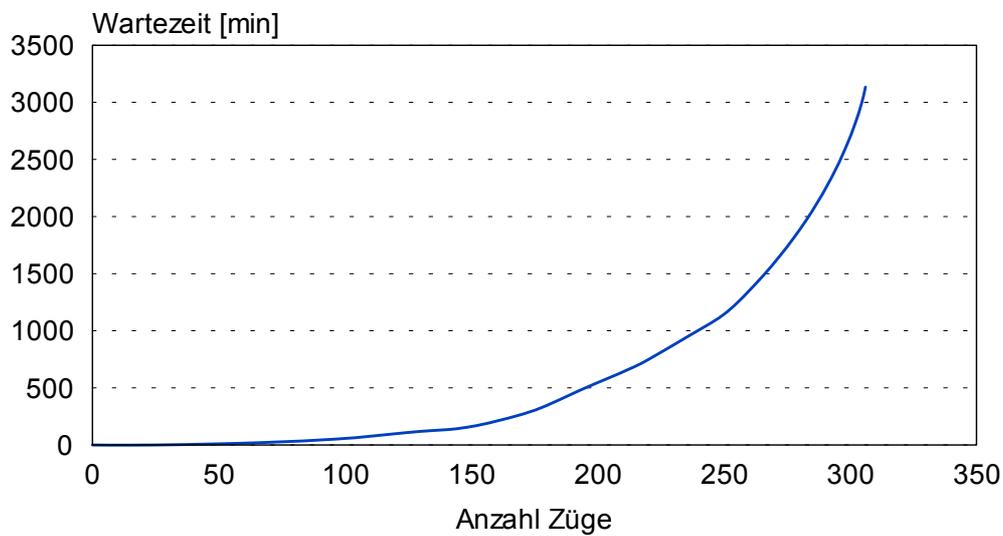


Variante RE auf Ferngleisen, fahrplanunabhängig

Bild 125: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Gelnhausen – Hanau, Variante RE auf Ferngleisen, fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Hanau-Gelnhausen

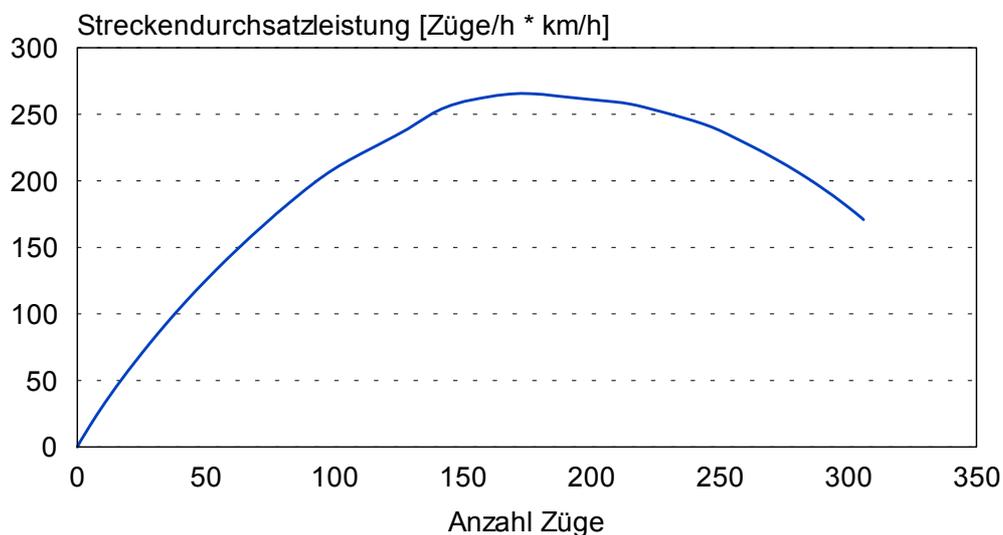


Variante RE auf Ferngleisen, fahrplan abhängig

Bild 126: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Hanau – Gelnhausen, Variante RE auf Ferngleisen, fahrplanabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Hanau-Gelnhausen

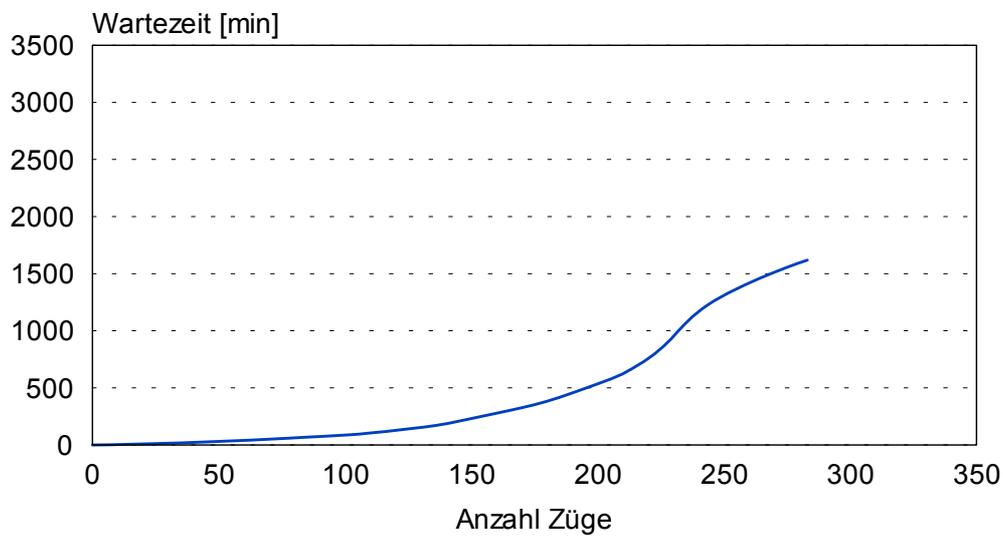


Variante RE auf Ferngleisen, fahrplanabhängig

Bild 127: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Hanau – Gelnhausen, Variante RE auf Ferngleisen, fahrplanabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Gelnhausen-Hanau

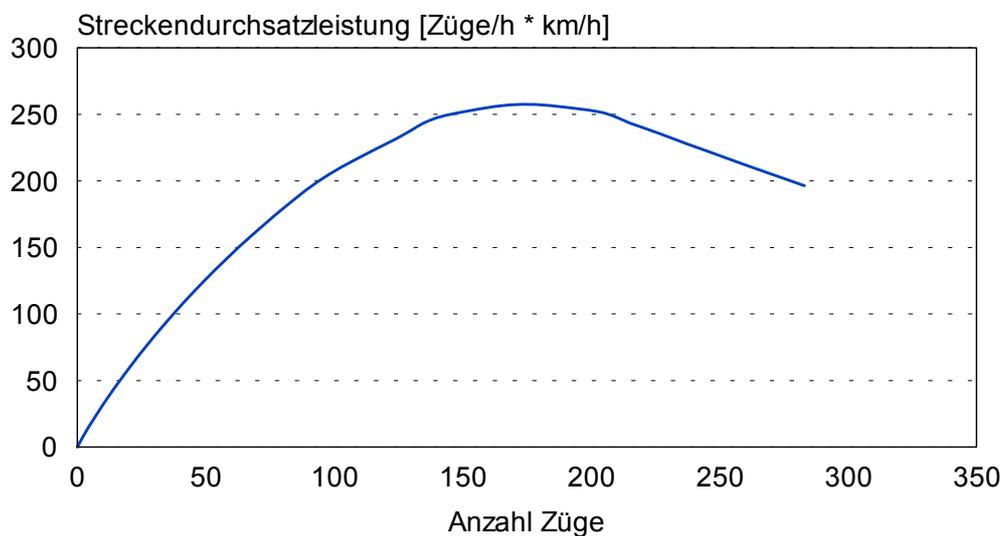


Variante RE auf Ferngleisen, fahrplanabhängig

Bild 128: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Gelnhausen – Hanau, Variante RE auf Ferngleisen, fahrplanabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Gelnhausen-Hanau

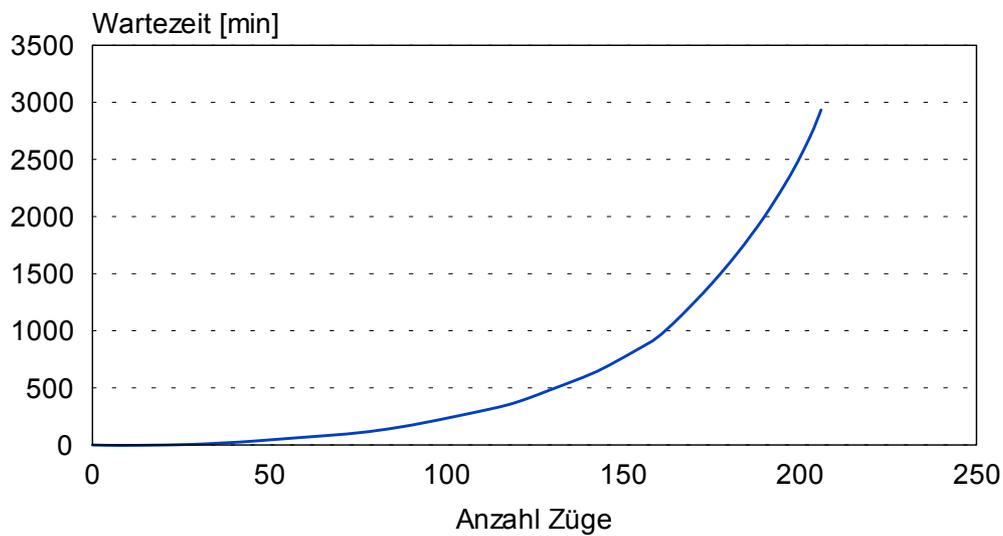


Variante RE auf Ferngleisen, fahrplanabhängig

Bild 129: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Gelnhausen – Hanau, Variante RE auf Ferngleisen, fahrplanabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Hanau-Gelnhausen und Gegenrichtung, 3. Gleis

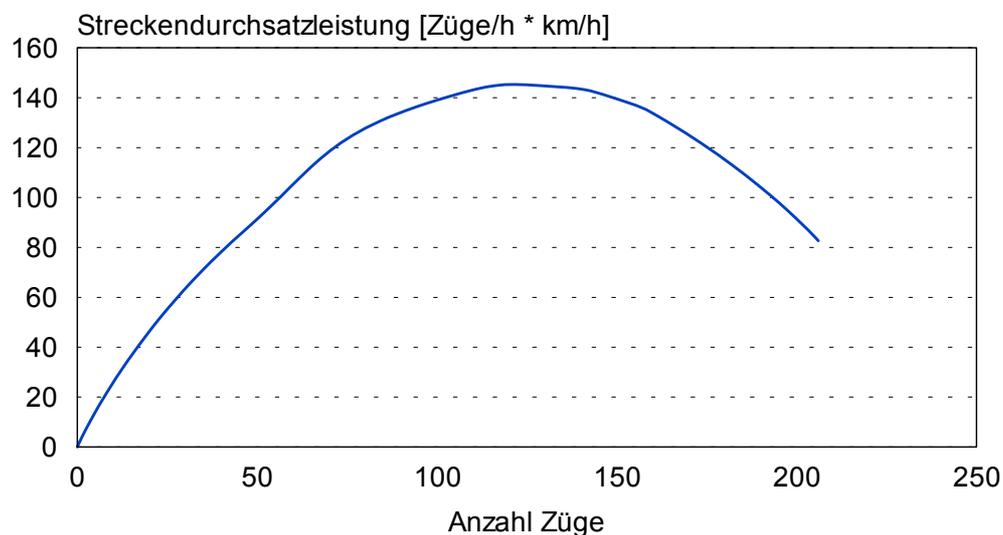


Variante ohne RE, fahrplanunabhängig

Bild 130: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Hanau – Gelnhausen und Gegenrichtung (3. Gleis), Variante ohne RE, fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Hanau-Gelnhausen und Gegenrichtung, 3. Gleis

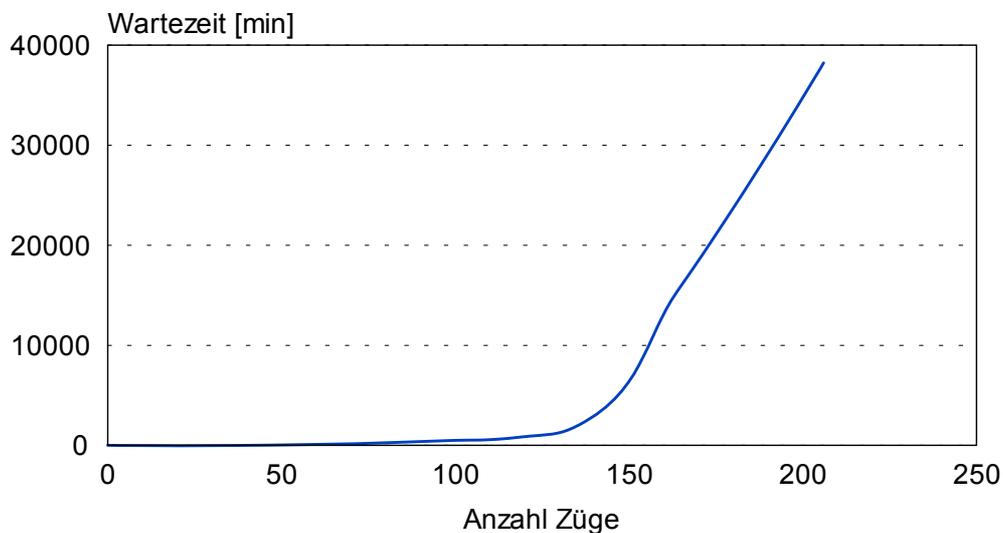


Variante ohne RE, fahrplanunabhängig

Bild 131: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Hanau – Gelnhausen und Gegenrichtung (3. Gleis), Variante ohne RE, fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Hanau-Gelnhausen und Gegenrichtung, 3. Gleis

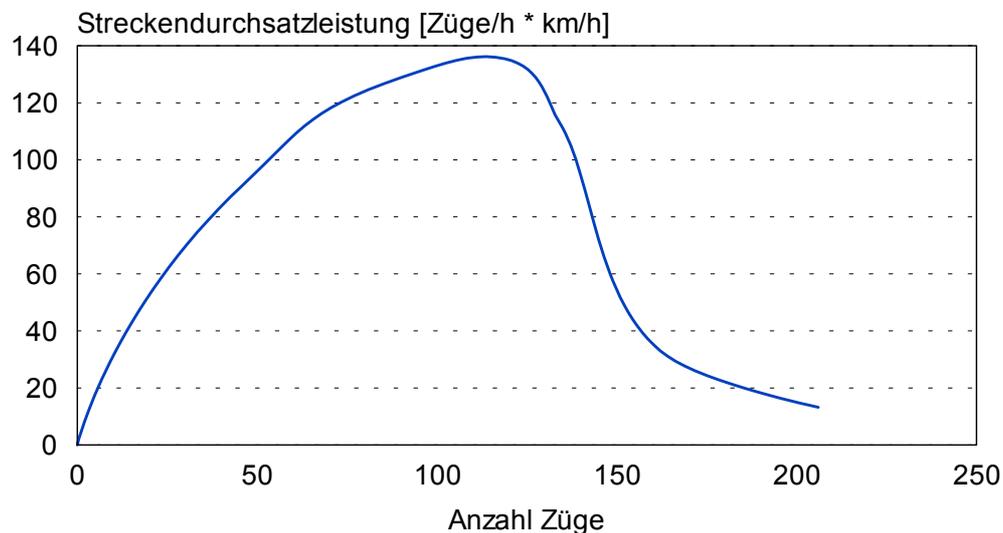


Variante ohne RE, fahrplanabhängig

Bild 132: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Hanau – Gelnhausen und Gegenrichtung (3. Gleis), Variante ohne RE, fahrplanabhängig

Streckendurchsatzleistung

Hanau-Gelnhausen und Gegenrichtung, 3. Gleis

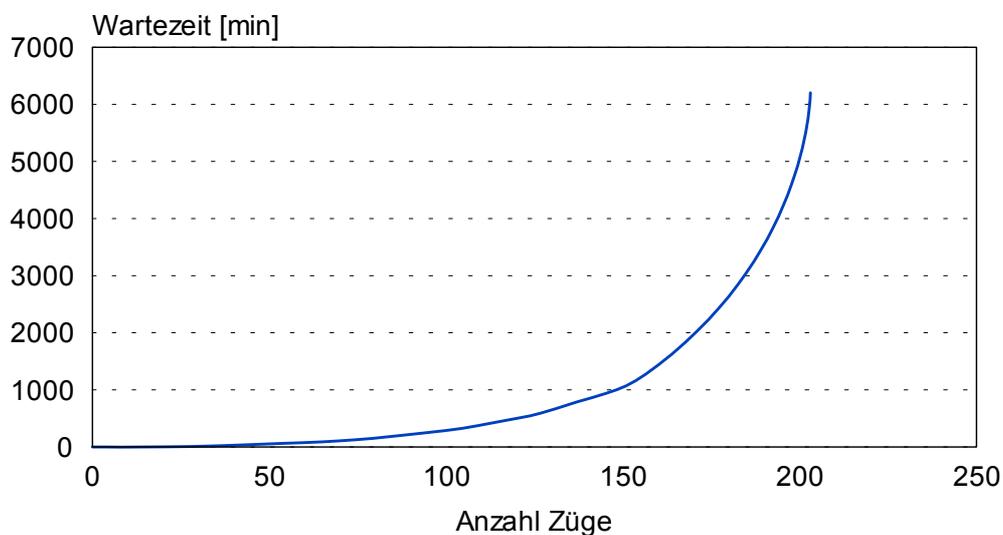


Variante ohne RE, fahrplanabhängig

Bild 133: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Hanau – Gelnhausen und Gegenrichtung (3. Gleis), Variante ohne RE, fahrplanabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Hanau-Gelnhausen und Gegenrichtung, 3. Gleis

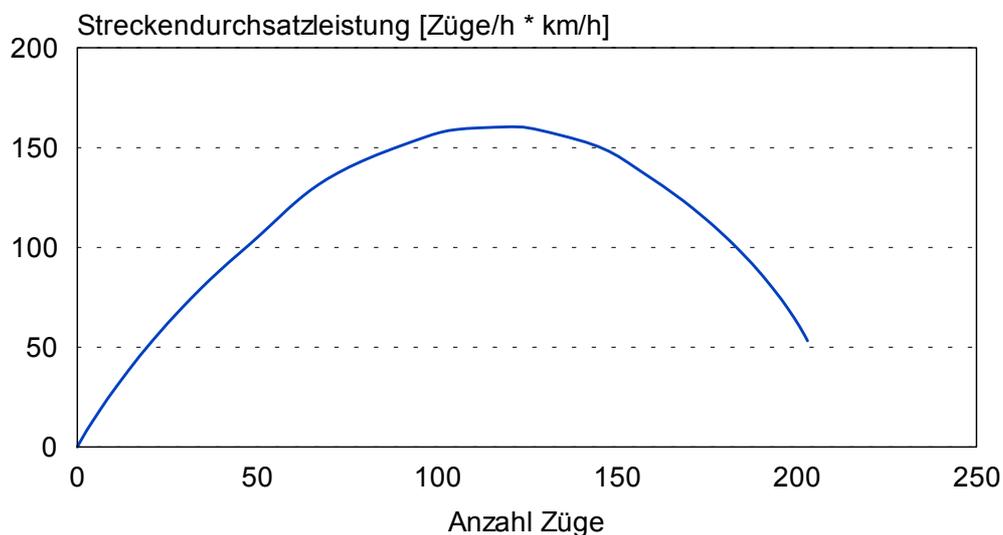


Variante ohne RE, fahrplanunabhängig, mit Betriebsruhe

Bild 134: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Hanau – Gelnhausen und Gegenrichtung (3. Gleis), Variante ohne RE, fahrplanunabhängig, mit Betriebsruhe

Streckendurchsatzleistung

Hanau-Gelnhausen und Gegenrichtung, 3. Gleis

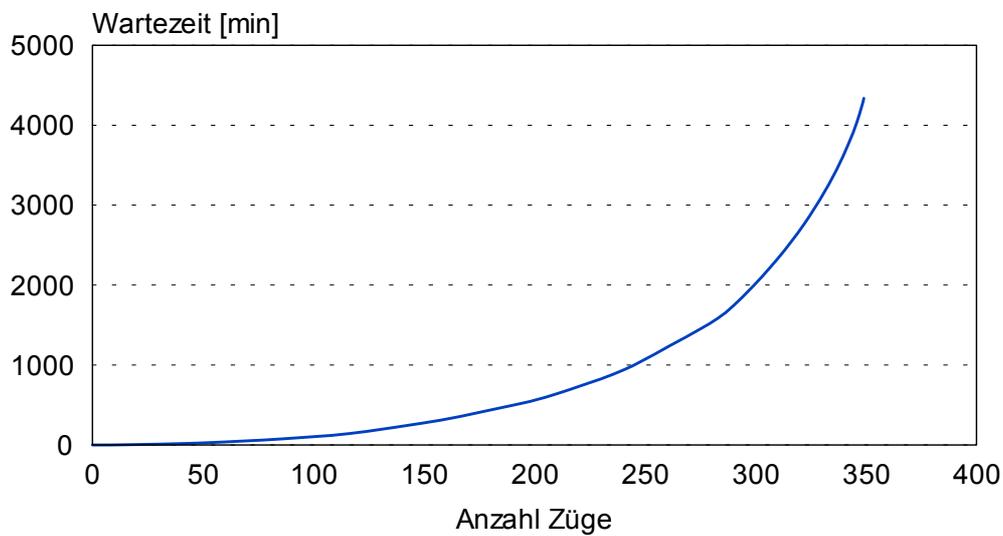


Variante ohne RE, fahrplanunabhängig, mit Betriebsruhe

Bild 135: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Hanau – Gelnhausen und Gegenrichtung (3. Gleis), Variante ohne RE, fahrplanunabhängig, mit Betriebsruhe

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Hanau-Gelnhausen

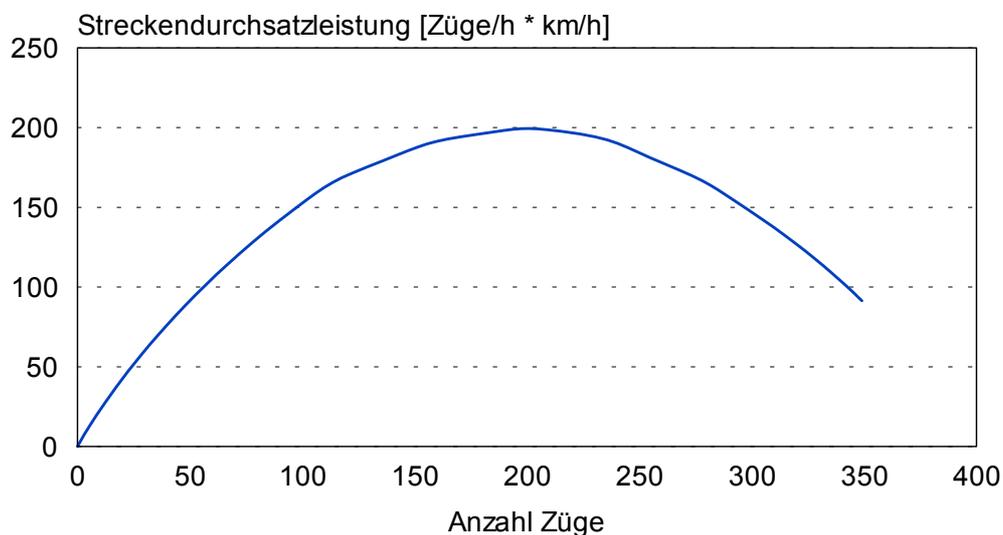


Variante RE auf drittem Gleis, fahrplanunabhängig

Bild 136: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Hanau – Gelnhausen, Variante RE auf drittem Gleis, fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Hanau-Gelnhausen

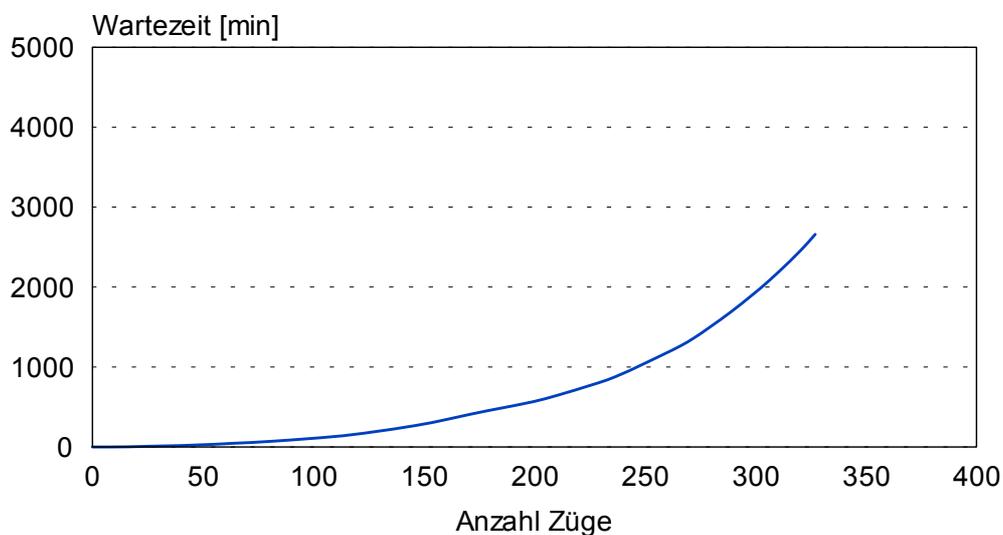


Variante RE auf drittem Gleis, fahrplanunabhängig

Bild 137: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Hanau – Gelnhausen, Variante RE auf drittem Gleis, fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Gelnhausen-Hanau

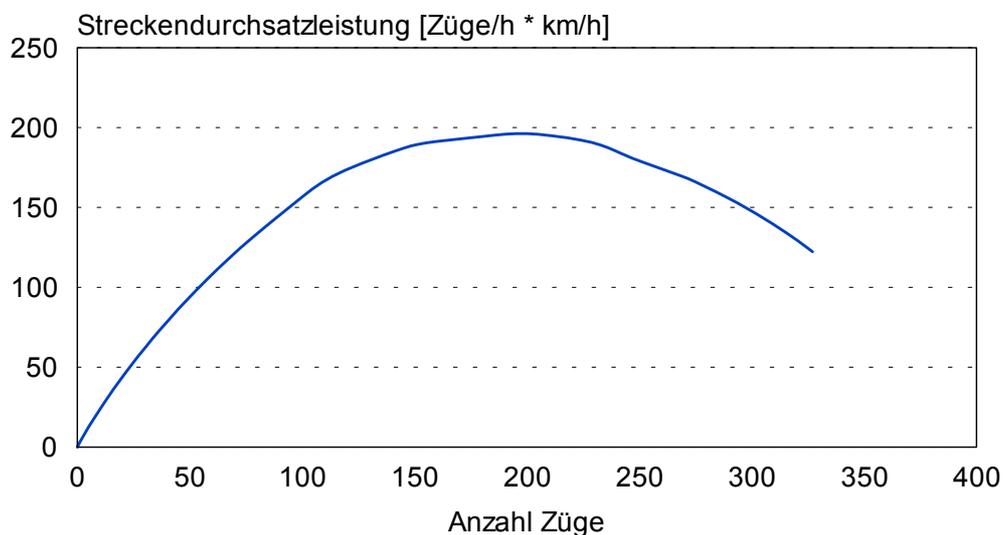


Variante RE auf drittem Gleis, fahrplanunabhängig

Bild 138: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Gelnhausen – Hanau, Variante RE auf drittem Gleis, fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Gelnhausen-Hanau

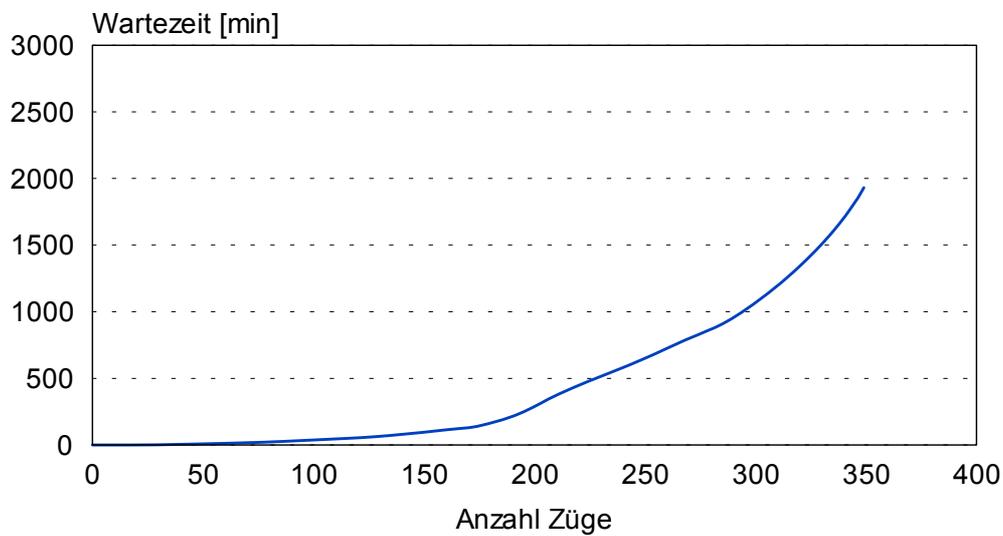


Variante RE auf drittem Gleis, fahrplanunabhängig

Bild 139: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Gelnhausen – Hanau, Variante RE auf drittem Gleis, fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Hanau-Gelnhausen

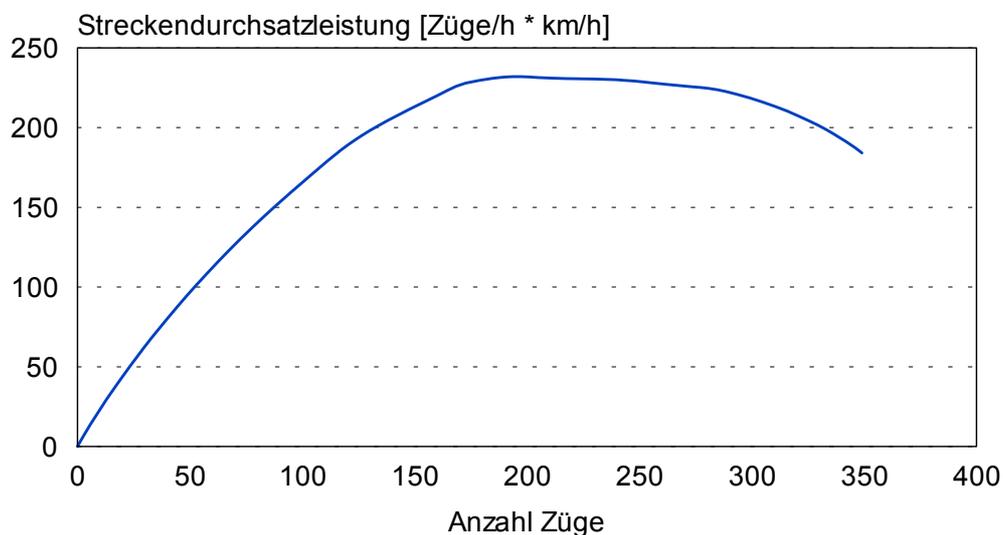


Variante RE auf drittem Gleis, fahrplan abhängig

Bild 140: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Hanau – Gelnhausen, Variante RE auf drittem Gleis, fahrplanabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Hanau-Gelnhausen

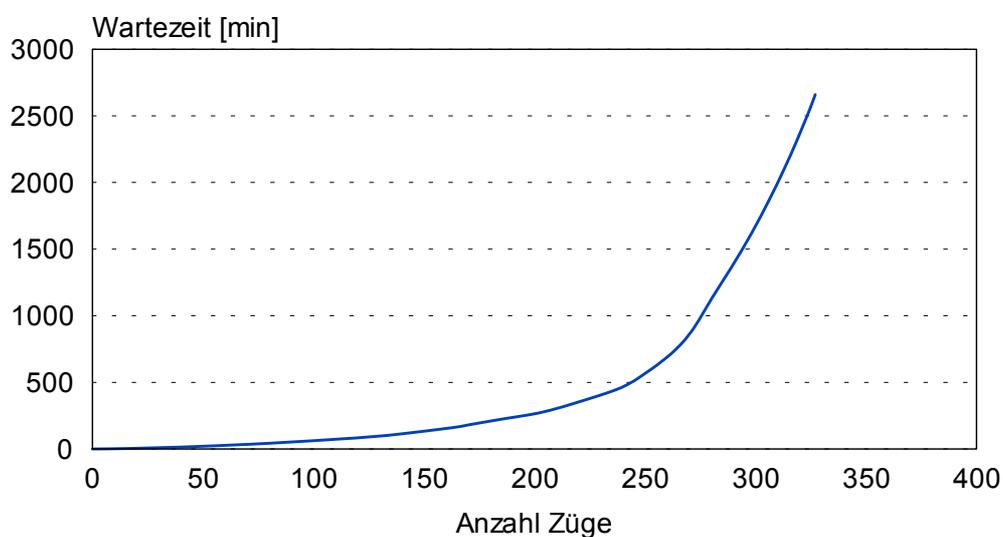


Variante RE auf drittem Gleis, fahrplanabhängig

Bild 141: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Hanau – Gelnhausen, Variante RE auf drittem Gleis, fahrplanabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Richtung Gelnhausen-Hanau

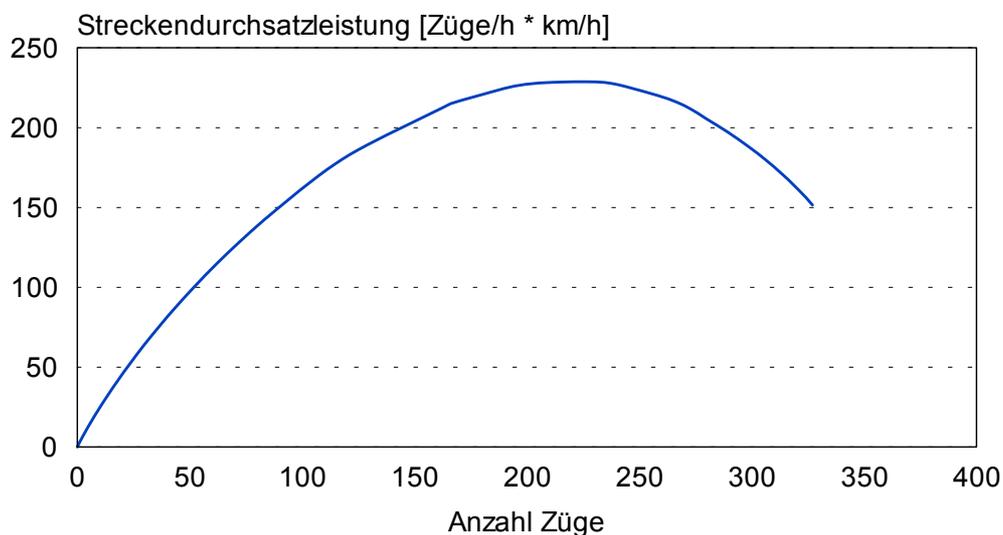


Variante RE auf drittem Gleis, fahrplanabhängig

Bild 142: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Gelnhausen – Hanau, Variante RE auf drittem Gleis, fahrplanabhängig

Streckendurchsatzleistung

Richtung Gelnhausen-Hanau

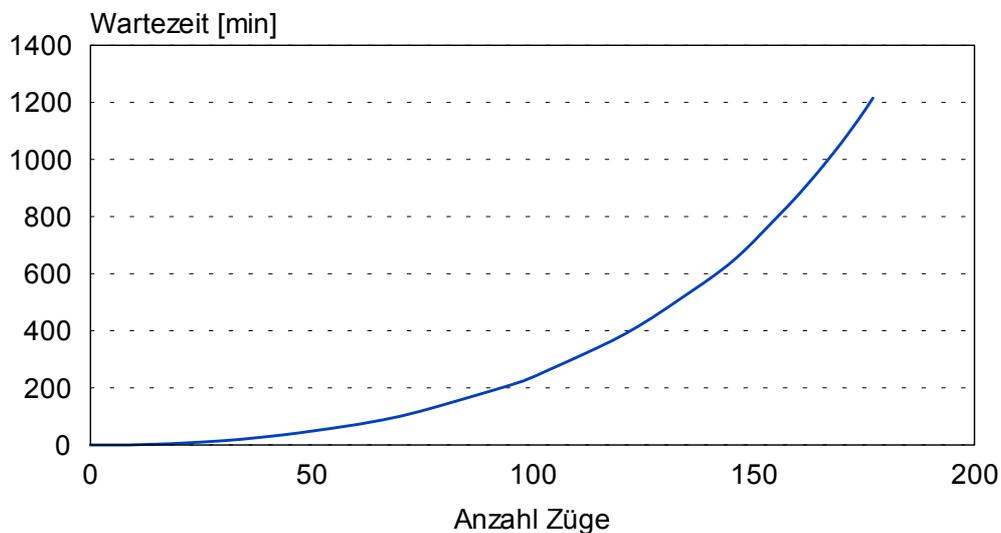


Variante RE auf drittem Gleis, fahrplanabhängig

Bild 143: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Richtung Gelnhausen – Hanau, Variante RE auf drittem Gleis, fahrplanabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Hanau-Gelnhausen und Gegenrichtung, 3. Gleis

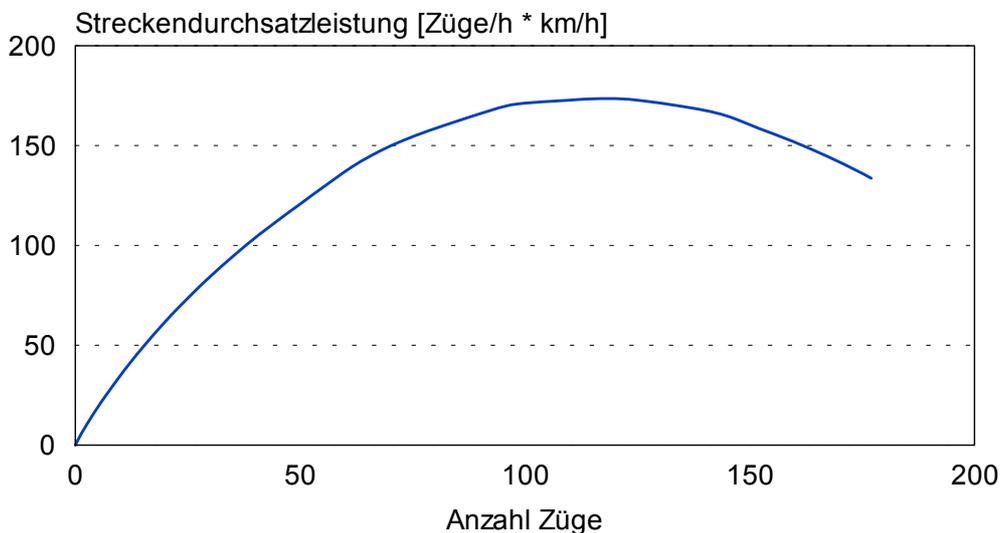


Variante mit RE, fahrplanunabhängig

Bild 144: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Hanau – Gelnhausen und Gegenrichtung (3. Gleis), Variante mit RE, fahrplanunabhängig

Streckendurchsatzleistung

Hanau-Gelnhausen und Gegenrichtung, 3. Gleis

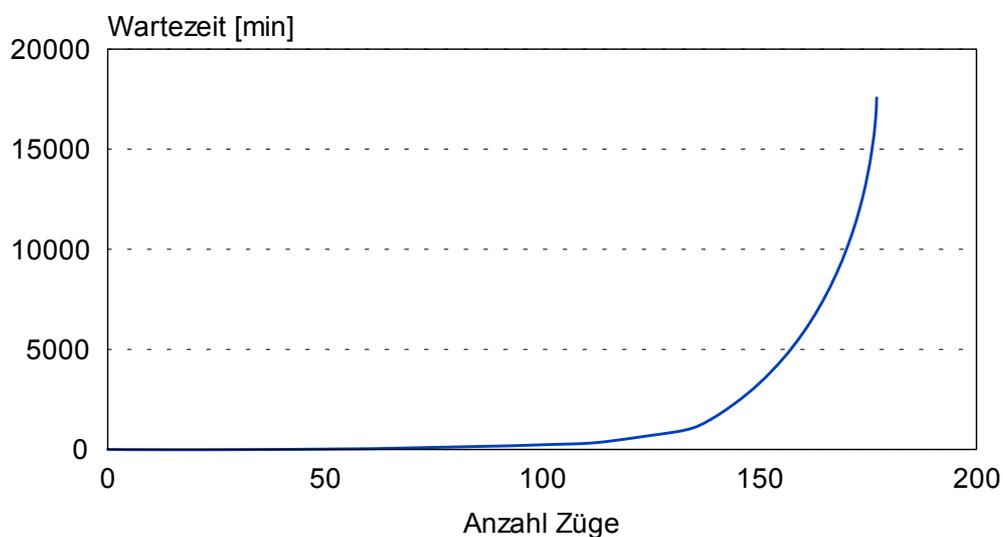


Variante mit RE, fahrplanunabhängig

Bild 145: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Hanau – Gelnhausen und Gegenrichtung (3. Gleis), Variante mit RE, fahrplanunabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Hanau-Gelnhausen und Gegenrichtung, 3. Gleis

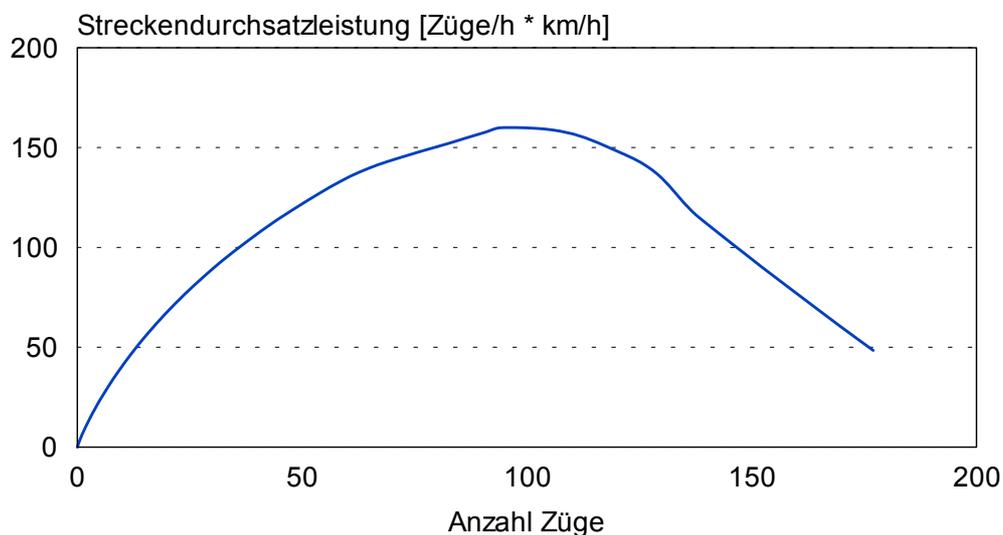


Variante mit RE, fahrplanabhängig

Bild 146: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Hanau – Gelnhausen und Gegenrichtung (3. Gleis), Variante mit RE, fahrplanabhängig

Streckendurchsatzleistung

Hanau-Gelnhausen und Gegenrichtung, 3. Gleis

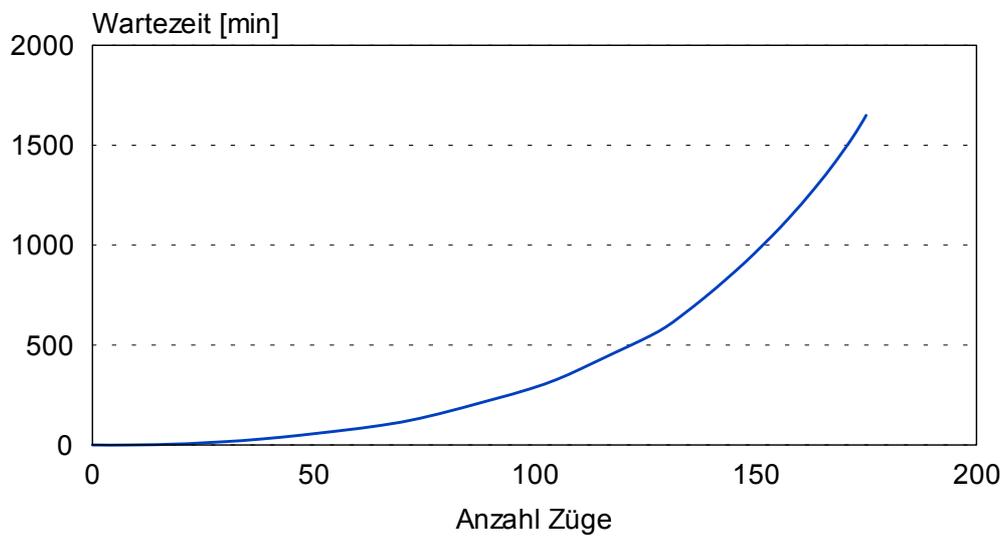


Variante mit RE, fahrplanabhängig

Bild 147: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Hanau – Gelnhausen und Gegenrichtung (3. Gleis), Variante mit RE, fahrplanabhängig

Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl

Hanau-Gelnhausen und Gegenrichtung, 3. Gleis

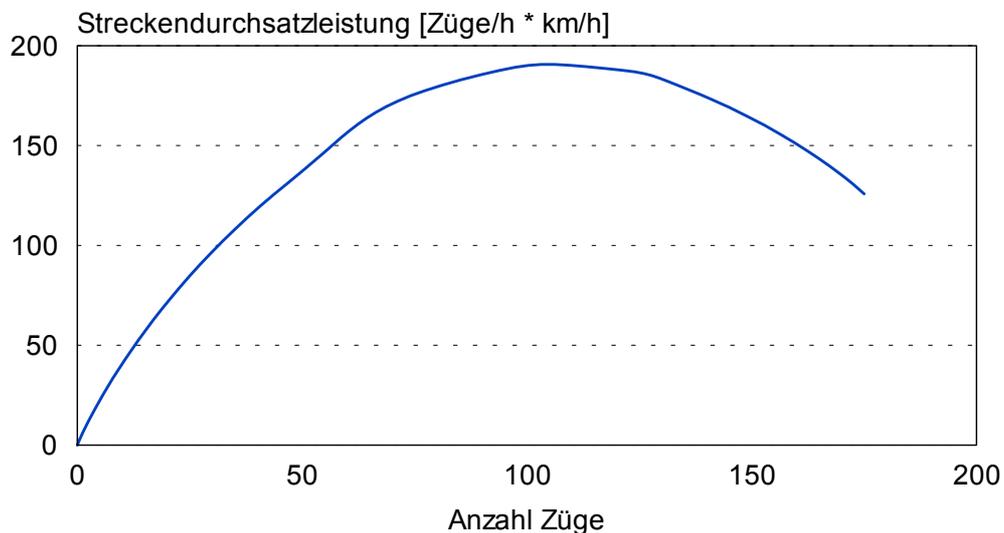


Variante mit RE, fahrplanunabhängig, mit Betriebsruhe

Bild 148: Wartezeit in Abhängigkeit der Zugzahl, Hanau – Gelnhausen und Gegenrichtung (3. Gleis), Variante mit RE, fahrplanunabhängig, mit Betriebsruhe

Streckendurchsatzleistung

Hanau-Gelnhausen und Gegenrichtung, 3. Gleis



Variante mit RE, fahrplanunabhängig, mit Betriebsruhe

Bild 149: Streckendurchsatzleistung in Abhängigkeit der Zugzahl, Hanau – Gelnhausen und Gegenrichtung (3. Gleis), Variante mit RE, fahrplanunabhängig, mit Betriebsruhe

Lebenslauf

Persönliche Daten

geboren am 1. 4. 1976 in Frankfurt am Main

Schulbesuch

1982 bis 1986 Grundschule in Kelkheim/Taunus.

1986 bis 1995 Gymnasium in Königstein/Taunus, Abschluss Allgemeine Hochschulreife.

Berufsausbildung

1995 bis 2000 Diplomstudiengang Bauingenieurwesen an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen, ab 1997 als Stipendiat der Studienstiftung des deutschen Volkes.
Studienrichtung im vertieften Hauptstudium: Verkehrswesen und Raumplanung.

März 2000 Abschluss der Diplomhauptprüfung.

Berufstätigkeit

ab April 2000 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik der Technischen Universität Darmstadt.

2004 Promotion zum Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.).

Auszeichnungen

2001 Springorum-Denkmünze der RWTH Aachen.

2001 F.C. Trapp-Preis der Fakultät für Bauingenieurwesen der RWTH Aachen.

In der Schriftenreihe des Instituts für Verkehr an der Technischen Universität Darmstadt sind bisher folgende Hefte erschienen:

Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik (ISSN 1613-8317):

- V1 G. Faust
Entwurf und Bau von stark überhöhten Fahrbahnen
1999
- V2 C. Korda
Quantifizierung von Kriterien für die Bewertung der Verkehrssicherheit mit Hilfe digitalisierter Videobeobachtungen
1999
- V3 State of the Art of Research, Development and Application of Intelligent Transport Systems (ITS) in Urban Areas
Proceedings of the Japanese-German Symposium, April 27, 2001
- V4 Verkehrssystem auf dem Weg zur freien Marktwirtschaft
Vorträge im Rahmen des Kolloquiums im Verkehrswesen am 11.06.2001
- V5 V. Blees, M. Boltze, G. Specht
Chancen und Probleme der Anwendung von Qualitätsmanagement in Verkehrsplanungsprozessen
2002
- V6 C. Lotz
Ermittlung von Detektorenstandorten für den Straßenverkehr innerorts
2002
- V7 N. Desiderio
Requirements of Users and Operators on the Design and Operation of Intermodal Interchanges
2002
- V8 S. Hollborn
Intelligent Transport Systems (ITS) in Japan
2002
- V9 M. Boltze, G. Specht, D. Friedrich, A. Figur
Grundlagen für die Beeinflussung des individuellen Verkehrsmittelwahlverhaltens durch Direktmarketing
2002
- V10 M. Boltze, A. Reußwig
First Review of Available Data: Modal Split in Different Countries
2000
- V11 P. Schäfer
Bürgerinformation, ein wichtiges Element der Bürgerbeteiligung
2003
- V12 M. Boltze
Fachgebietsbericht - September 1997 bis Dezember 2002
2003
- V13 R. Stephan
Einsatzbereiche von Knotenpunkten mit der Regelungsart "rechts vor links"
2003

V14 V. Blees
Qualitätsmanagement in Verkehrsplanungsprozessen
2004

Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik (ISSN 1614-9300):

- B1 F. Lademann
Bemessung von Begegnungsabschnitten auf eingleisigen S-Bahn-Strecken
2001
- B2 J. Becker, E. Schramm
Barrierefreier Schienenpersonennahverkehr
Beschreibung und Bewertung der Anforderungen mobilitätseingeschränkter Menschen
2003
- B3 C. Axthelm
Umweltbahnhof Rheinland-Pfalz
2004
- B4 T. Muthmann
Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung
2004

Fachgebiet Straßenwesen mit Versuchsanstalt (ISSN 1614-9319):

- U. Stöckert
Ein Beitrag zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund im Asphaltstraßenbau
2002
- H-F. Ruwenstroth
Auswirkungen von wiederverwendeten Fräsasphalten mit polymermodifiziertem Bitumen und stabilisierenden Zusätzen auf Asphalteeigenschaften
2003