

Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung

Dr.-Ing. Thilo Muthmann

TU Darmstadt

Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung

Einleitung

Die *Leistungsfähigkeit einer Eisenbahnstrecke* ist die Zugzahl, die in einem Bezugszeitraum (zum Beispiel einem Tag) mit einer vorgegebenen Betriebsqualität befördert werden kann. Damit ist die Streckenleistungsfähigkeit sowohl für Eisenbahninfrastruktur-, als auch für Eisenbahnverkehrsunternehmen von grundlegender Bedeutung. Für Eisenbahninfrastrukturunternehmen begrenzt die Streckenleistungsfähigkeit die Zahl der Fahrplantrassen, die sie an ihre Kunden, die Eisenbahnverkehrsunternehmen, verkaufen können und damit direkt die möglichen Erträge, die mit einer Strecke erzielbar sind. Für Eisenbahnverkehrsunternehmen gibt die Streckenleistungsfähigkeit an, welches Angebot sie auf einer Strecke für ihre Kunden, die Fahrgäste oder die Verloader von Gütern, bereitstellen können.

Wegen der Abhängigkeit der Streckenleistungsfähigkeit von einer vorzugebenden Betriebsqualität ist der Begriff der Leistungsfähigkeit zunächst nicht eindeutig und sollte deshalb weiter spezifiziert werden. So ist die *theoretische Leistungsfähigkeit* die Zugzahl, die auf einer Strecke bei voller Auslastung unter Vermeidung jedweder Zeitverluste und Störungen gefahren werden könnte. Diese theoretische Leistungsfähigkeit ist im praktischen Eisenbahnbetrieb nicht erreichbar, weil solche Zeitverluste und Störungen nie völlig vermeidbar sind und der Bahnbetrieb außerdem äußeren Einflüssen (z. B. dem Wetter) ausgesetzt ist, die zum Teil nicht kontrollierbar sind.

Im Gegensatz dazu ist die *optimale Streckenauslastung* die Zugzahl, bei der auf einer Strecke die gewünschte Betriebsqualität erreicht wird. Die Ermittlung dieser optimalen Streckenauslastung ist Ziel des im Folgenden vorgestellten Berechnungsverfahrens.

Methoden zur Leistungsuntersuchung von Eisenbahnstrecken

Zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Bahnanlagen und damit auch von Eisenbahnstrecken stehen grundsätzlich die in Tabelle 1 dargestellten Methoden (analytische, konstruktive, mathematische und experimentelle Methode) zur Verfügung.

Bei Anwendung der *analytischen Methode* wird für bestehende Strecken in unterschiedlichen Untersuchungszeiträumen mit jeweils verschiedenen Belastungen die erreichte Betriebsqualität erfasst. Wird dieses Verfahren ausreichend oft wiederholt, kann dadurch ein Überblick über das Leistungsverhalten der betrachteten Strecke gewonnen werden. Vorteilhaft ist, dass mit diesem Verfahren der wirkliche Betriebsablauf einschließlich entstehender Unregelmäßigkeiten abgebildet werden kann. Da sich diese Vorgehensweise jedoch nur für bereits bestehende Strecken eignet und außerdem mit äußerst hohem Aufwand verbunden ist, wird sie heute in der Regel nicht mehr angewendet.

Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung

Mit Hilfe der *Betriebssynthese* wird ein bestimmtes Betriebsgeschehen in Form von Plänen oder Tabellen konstruiert (daher auch „*konstruktive Methode*“). So kann nachgewiesen werden, ob eine bestimmte Leistung auf einer Strecke erbracht werden kann und welche Behinderungen dabei entstehen. Hierbei kann jeweils nur ein bestimmter theoretischer Betriebsablauf untersucht werden. Hauptsächliches Einsatzgebiet dieses Verfahrens ist die Fahrplankonstruktion.

Die beiden wesentlichen heute angewendeten Methoden zur Leistungsuntersuchung von Bahnstrecken sind jedoch experimentelle und mathematische Methoden. Bei Anwendung der *experimentellen Methoden* (d.h. Simulationen) wird der Betriebsablauf auf der zu untersuchenden Strecke mehrfach nachgeahmt, wodurch Aussagen über das Betriebsgeschehen (Behinderungen und Verspätungen) gewonnen werden können. Grundlage hierfür ist in aller Regel ein bestimmter Fahrplan, der durch eingespielte Verspätungen modifiziert sein kann. Bei den *mathematischen Methoden* werden die wesentlichen Vorgänge und äußeren Einwirkungen auf den Eisenbahnbetrieb mit zuvor definierten Verteilungsfunktionen erfasst.

Art der Methode	analytische Methode	konstruktive Methode	mathematische Methode	experimentelle Methode
andere Bezeichnungen	Betriebsanalyse	Betriebssynthese synthetische Methode physikalische Methode	summarische Methode stochastische Methode Wahrscheinlichkeitsrechnung [analytische Methode]	Betriebs-simulation
Art des untersuchten Betriebsablaufes	wirklicher Betriebsablauf	theoretischer Betriebsablauf	möglicher Betriebsablauf	Stichprobe aus dem möglichen Betriebsablauf
Untersuchungsverfahren	Beobachtung Zählung Durchleuchtung	Fahrplanstudie Betriebsplan deterministische Simulation	Verfahren der Bedienungs- und der Behinderungstheorie	stochastische Simulation

Tabelle 1: Überblick über die Methoden der Leistungsuntersuchung im Eisenbahnbetrieb [Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik der TU Darmstadt, Umdruck „Eisenbahnbetrieb“, Darmstadt, 2001]

Vorteile der Simulationsverfahren sind eine nahezu beliebige Abbildegengenauigkeit der zu simulierenden Strecken bzw. Netzelemente sowie der zugehörigen Fahrpläne. Somit können umfangreiche und detaillierte Ergebnisse für das simulierte Betriebsgeschehen gewonnen werden. Nachteilig ist jedoch, dass eine

Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung

Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Betriebsverhältnisse in der Regel nicht möglich ist. Darüber hinaus sind die Ergebnisdaten nicht immer einfach auswertbar und nicht immer von hoher Aussagekraft, weil Verfahren zur Bewertung der ermittelten Ergebnisse zur Zeit noch fehlen bzw. zur Zeit erst entwickelt werden. Weitere Probleme sind der für genaue Ergebnisse erforderliche hohe Eingabeaufwand und die (vor allem bei größeren Netzelementen) langen Rechenzeiten.

Den mathematischen Verfahren sind zwar bei der Abbildegenauigkeit gewisse Grenzen gesetzt, die Nachteile der Simulation können jedoch umgangen werden. Da außerdem schon verschiedene gute Simulationsprogramme auf dem Markt sind, ist am Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik der TU Darmstadt ein mathematischer Ansatz zur Leistungsfähigkeitsberechnung von Bahnstrecken entwickelt worden.

Einige bisherige Verfahren zur mathematischen Streckenleistungsfähigkeitsuntersuchung

Mathematische Verfahren zur Streckenleistungsfähigkeitsuntersuchung werden seit etwa Anfang/Mitte des letzten Jahrhunderts verwendet, wobei frühe Ansätze oft einfache Handrechenverfahren waren, die meist völlig vom jeweils untersuchten Fahrplan abhängig waren. So wurde zum Beispiel Anfang der fünfziger Jahre vorgeschlagen, zum technisch erforderlichen Mindestzeitabstand zwischen zwei Zugfahrten, der Mindestzugfolgezeit, eine feste Pufferzeit hinzuzuaddieren. Im Gegensatz dazu wurde Anfang der siebziger Jahre am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen ein Ansatz entwickelt, der im Eisenbahnbetrieb unplanmäßig entstehende Behinderungen wahrscheinlichkeitstheoretisch erfasst und mit einem zulässigen Wert vergleicht. Den grundsätzlichen Aufbau des auf diesem Ansatz aufbauenden EDV-Programms STRELE zeigt Bild 1.

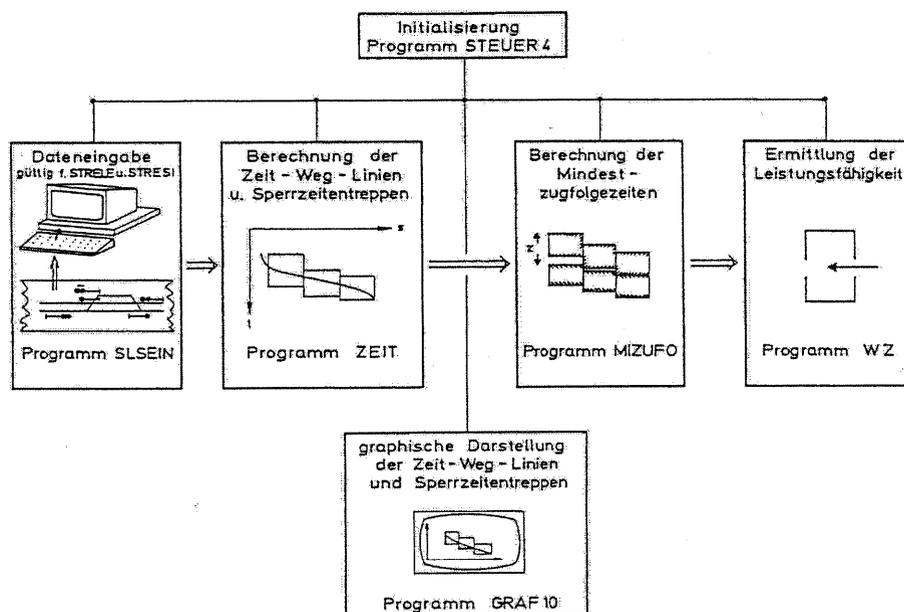


Bild 1: Struktur des Programms STRELE [Lehrstuhl für Verkehrswirtschaft, Eisenbahnbau und -betrieb der RWTH Aachen, „Umdruck Eisenbahnbetriebswissenschaft“, Aachen, 1998]

Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung

Das Programm besteht aus vier wichtigen Bestandteilen. Zunächst müssen Angaben zur vorhandenen Infrastruktur und zu den verkehrenden Zügen gemacht werden. Daran schließt sich eine Fahrzeitberechnung an, wobei zur Vereinfachung der Rechnungen wie bei allen mathematischen Ansätzen gleiche und ähnliche Züge zu so genannten Modellzuggruppen zusammengefasst werden. Im nächsten Schritt werden die so genannten Sperrzeitentreppen berechnet, die in einem Zeit-Weg-Diagramm die Aneinanderreihung der Zeiten darstellen, in denen die Blockabschnitte einer Strecke durch einen Zug belegt sind. Im dritten wichtigen Teilprogramm von STRELE werden die Mindestzugfolgezeiten berechnet, die sich für verschiedene Zugfolgefälle ergeben.

Als letzter Schritt wird die eigentliche Ermittlung der Leistungsfähigkeit durchgeführt. Ausgehend von den berechneten Mindestzugfolgezeiten und der Anzahl und der Reihung der auf der Strecke verkehrenden Züge werden mit Hilfe des zugrundeliegenden wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatzes die zu erwartenden außerplanmäßigen Behinderungen errechnet. Die Anzahl der auf der Strecke verkehrenden Züge wird solange vergrößert oder verkleinert, bis die errechneten Behinderungen mit dem zulässigen Wert übereinstimmen. Die so ermittelte Zugzahl ist die optimale Streckenauslastung laut STRELE. Definitionsgemäß entspricht die optimale Streckenauslastung einer befriedigenden Betriebsqualität.

Das Programm STRELE ist auch heute noch das anerkannte Standardverfahren zur mathematischen Streckenleistungsfähigkeitsuntersuchung. Weitere Vorteile von STRELE sind der geringe Aufwand für die Dateneingabe sowie die sehr geringen Rechenzeiten. Nachteilig ist aber, dass die optimale Streckenauslastung nur von wenigen Parametern abhängt. Zum Beispiel sind die zulässigen außerplanmäßigen Behinderungen nur vom Reisezuganteil auf der betrachteten Strecke abhängig, nicht aber von der Zugzahl oder der Streckenlänge. Damit können sich die außerplanmäßigen Behinderungen im Extremfall auf kurze Strecken und wenige Züge oder aber auf lange Strecken und viele Züge verteilen. Darüber hinaus werden nur außerplanmäßige, aber keine planmäßigen Behinderungen berücksichtigt. Planmäßige Behinderungen können beispielsweise auf eingleisigen Strecken entstehen, um Kreuzungen mit Gegenzügen abzuwarten, und können durchaus von längerer Dauer sein. Außerdem liefert STRELE besonders bei der Abbildung eingleisiger Strecken und bei bestimmten Betriebsverhältnissen, zum Beispiel artreinem Betrieb mit nur einer Zugart, nicht immer ausreichend genaue Ergebnisse.

Ein anderer, ebenfalls aus Aachen stammender Forschungsansatz versucht die Streckenleistungsfähigkeit in Analogie zur Schubkraft eines Raketenmotors zu bestimmen. Der Schub einer Rakete ergibt sich aus der in einer Zeiteinheit ausgestoßenen Masse an Gasen, multipliziert mit der Ausstoßgeschwindigkeit. Übertragen auf den Eisenbahnbetrieb wird zur Bestimmung der nicht mehr Schub- sondern Transportkraft genannten Größe das Produkt aus Zugzahl und Zugmassen, bezogen auf einen festgelegten Bezugszeitraum und multipliziert mit der Beförderungsgeschwindigkeit der Züge unter Einschluss aller Wartezeiten, verwendet. In Abhängigkeit der Zugzahl wächst die so bestimmte Transportkraft zunächst stark an; weil mit steigender Zugzahl aber die Wartezeiten überproportional wachsen, erreicht sie einen Maximalwert und fällt danach schnell ab. Die Zugzahl, bei der die maximale Transportkraft erreicht wird, ist nach diesem Verfahren die optimale Streckenauslastung. Ein großer Vorteil bei diesem Ansatz ist, dass er auf empirisch zu ermittelnde Faktoren vollständig verzichten kann.

Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung

Die Anwendung dieses Ansatzes, beispielsweise auf die Strecke von Stuttgart nach Ulm, zeigt jedoch, dass das Verfahren in der Regel deutlich zu große Ergebnisse liefert. Die maximale Transportkraft in der Fahrtrichtung Stuttgart – Ulm wird bei etwa 230 Zügen erreicht, das entspräche 9 bis 10 Zügen in jeder Stunde eines Tages. Solche Ergebnisse können jedoch auf einer von vielen unterschiedlichen Zugarten befahrene Strecke nicht erreicht werden. So war zum Beispiel vor der Eröffnung der Neubaustrecke Frankfurt – Köln die linke Rheinstrecke mit 6-7 Zügen je Stunde und Richtung belastet, und bereits bei diesen Zugzahlen war die Betriebsführung schwierig.

Für eine derartige Strecke wären optimale Streckenauslastungen zu erwarten, die bei etwa der Hälfte des ermittelten Wertes liegen. Andere mathematische Ansätze (z.B. ein von der TU Dresden entwickeltes Verfahren) benutzen daher einen der Transportkraft vergleichbaren Wert höchstens als obere Abgrenzung eines optimalen Leistungsbereichs einer Eisenbahnstrecke.

Einflussfaktoren auf die Streckenleistungsfähigkeit

Ziel der Forschungsarbeit am Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik war es, zunächst die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Streckenleistungsfähigkeit zu bestimmen und anschließend mit Hilfe dieser Faktoren einen neuen Ansatz zur Berechnung der optimalen Streckenauslastung zu entwickeln.

Von entscheidendem Einfluss auf die Leistungsfähigkeit ist das auf einer Strecke gefahrene *Betriebsprogramm* nach Art, Anzahl und Zeitpunkten der verkehrenden Züge. Außerdem müssen die *Laufweglängen* der einzelnen Züge bekannt sein, da möglicherweise einige Züge nur einen Teilabschnitt der Strecke befahren, zusätzlich die *Fahrzeiten* der Züge. Ein weiterer entscheidender Einflussfaktor sind die bereits mehrfach genannten *Mindestzugfolgezeiten* für die verschiedenen Zugfolgefälle. Aus dem Betriebsprogramm und den Mindestzugfolgezeiten ergibt sich als weitere Kenngröße der so genannte *Streckenbelegungsgrad*, der dem Verhältnis aus Anzahl der auf einer Strecke verkehrenden Züge und Zugzahl im Zustand der theoretischen Leistungsfähigkeit entspricht.

Aus den angesprochenen Einflussfaktoren können weitere Größen abgeleitet werden. Hierzu zählen zum einen die planmäßigen und außerplanmäßigen *Wartezeiten*, für deren Ermittlung bereits wahrscheinlichkeitstheoretische Ansätze vorliegen. Zum anderen fallen hierunter die *Beförderungsgeschwindigkeiten* der verschiedenen Züge, berechnet aus den Laufweglängen der Züge geteilt durch die Summe aus Fahr- und Wartezeiten, außerdem die *Variationskoeffizienten* (d. h. Standardabweichung bezogen auf den Mittelwert) verschiedener Einflussgrößen, nämlich des Streckenbelegungsgrades, der Beförderungsgeschwindigkeiten und der Mindestzugfolgezeiten. Diese Variationskoeffizienten geben Auskunft darüber, ob eine Strecke eher gleichmäßig durch Zugfahrten belastet ist oder starke Verkehrsspitzen aufweist (im Falle des Variationskoeffizienten des Belegungsgrades) oder ob eher gleichartige oder verschiedene Zugarten die Strecke befahren (dazu werden die Variationskoeffizienten der Beförderungsgeschwindigkeiten und der Mindestzugfolgezeiten verwendet).

Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung

Im Gegensatz zu Ansätzen wie z. B. der Transportkraft gehen die Zugmassen nicht in den neuen Ansatz ein, weil sie keinen direkten Einfluss auf die Streckenleistungsfähigkeit haben. Eine größere Zugmasse kann durch eine stärkere Bespannung ausgeglichen werden (im S-Bahn-Betrieb beispielsweise wird beim Einsatz einer oder mehrerer Triebwageneinheiten die Leistung proportional zur Zugmasse gesteigert), außerdem werden die Einflüsse der Zugmasse auf die Fahrdynamik durch die Mindestzugfolgezeiten und Beförderungsgeschwindigkeiten erfasst.

Anhand des folgenden Bildes 2 soll beispielhaft einer der Einflussfaktoren verdeutlicht werden, nämlich die zeitliche Verteilung der Zugfahrten auf einer Strecke. Auf der linken Seite des Bildes ist ein vereinfachter und schematischer Bildfahrplan einer Strecke dargestellt, auf der verschiedene Zugarten in vollständiger zeitlicher Entmischung verkehren. Dadurch ergeben sich geringe Mindestzugfolgezeiten und auch geringe Streuungen dieser Zeiten. Der rechte Teil des Bildes zeigt den Bildfahrplan derselben Strecke mit denselben Zugarten, jedoch unter häufigem Wechsel der Zugart. Dadurch ist die Strecke durch die gleichen Züge erheblich länger belegt. Durch die stärker schwankenden Mindestzugfolgezeiten kann z. B. im Verspätungsfall auch verstärkt die Notwendigkeit von Überholungen von langsamen durch schnelle Züge entstehen. Der Einfluss dieser Effekte auf die Streckenleistungsfähigkeit wurde bei Ansätzen wie denen der Transportkraft nur über veränderte Wahrscheinlichkeiten planmäßiger oder außerplanmäßiger Wartezeiten erfasst. Die sich ergebenden Wartezeiten haben jedoch dort erst bei sehr großen Zugzahlen einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis.

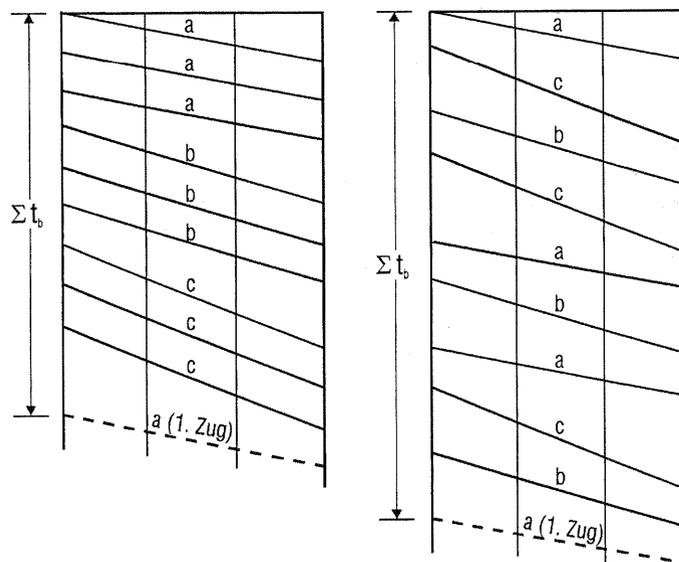


Bild 2: Einfluss der zeitlichen Verteilung der Zugfahrten auf die Streckenleistungsfähigkeit [Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik der TU Darmstadt, Umdruck „Eisenbahnbetrieb“, Darmstadt, 2001]

Von bedeutendem Einfluss auf die Mindestzugfolgezeiten und damit auch den Streckenbelegungsgrad ist bei gegebener Zugzahl neben der zeitlichen Verteilung der Zugfahrten auch die technische Ausstattung von Strecke und Fahrzeugen. Durch den Ersatz einer punktförmigen durch eine linienförmige Zugbeeinflussung

Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung

bzw. mechanischer Sicherungstechnik durch Relais- oder elektronische Stellwerkstechnik kann die Leistungsfähigkeit einer Strecke wegen der verringerten Mindestzugfolgezeiten in der Regel deutlich gesteigert werden. Diese Effekte sind ebenfalls in einem neuen Ansatz zur mathematischen Leistungsfähigkeitsermittlung von Strecken zu berücksichtigen.

Die Streckendurchsatzleistung als Messgröße der Leistungsfähigkeit

Unter Berücksichtigung der beschriebenen Einflussfaktoren wurde im Rahmen der Forschungsarbeit zur Beschreibung der Streckenleistungsfähigkeit eine neue Messgröße mit dem Namen *Streckendurchsatzleistung* (SDL) eingeführt. Die Streckendurchsatzleistung ist das Produkt aus dem Durchsatz einer Strecke (also Züge in einer Zeiteinheit) und deren Beförderungsgeschwindigkeit, welches jedoch durch die erläuterten Einflussgrößen wie den Streckenbelegungsgrad und die verschiedenen Variationskoeffizienten abgemindert werden muss. Daraus ergibt sich als Einheit für die Streckendurchsatzleistung Züge/h · km/h, wenn die im Eisenbahnwesen üblicherweise verwendeten Einheiten benutzt werden. Dadurch ergeben sich zugleich auch leicht vorstellbare Größenordnungen der Werte.

In Bild 3 ist der Berechnungsansatz der Streckendurchsatzleistung dargestellt. Im ersten Berechnungsschritt wird für jede Modellzuggruppe *i* das Produkt aus der Zugzahl n_i in dieser Modellzuggruppe und deren Beförderungsgeschwindigkeit errechnet. Diese ergibt sich aus der Laufweglänge s_i des Zuges geteilt durch dessen Fahrzeit tF_i und die Summe seiner Wartezeiten $\sum tW_i$. Verkehrt der Modellzug nicht über die gesamte untersuchte Strecke, muss dieses Produkt durch den anschließenden Faktor abgemindert werden, der das Verhältnis aus Laufweglänge s_i und Streckenlänge s angibt. Die Werte für die verschiedenen Modellzuggruppen werden aufsummiert und anschließend durch den Bezugszeitraum tU dividiert, um unterschiedliche Untersuchungen mit möglicherweise unterschiedlichen Untersuchungszeiträumen vergleichbar zu machen.

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

mit

n_i	Anzahl Züge in der Modellzugklasse <i>i</i>
tF_i	Fahrzeit des Modellzuges <i>i</i>
tW_i	Wartezeit des Modellzuges <i>i</i>
s_i	Laufweglänge des Modellzuges <i>i</i>
s	Länge der untersuchten Strecke
tU	Länge des Untersuchungszeitraums
ρ	Streckenbelegungsgrad
V_{tZ}	Variationskoeffizient der Mindestzugfolgezeiten
V_v	Variationskoeffizient der Beförderungsgeschwindigkeiten
V_ρ	Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades

Bild 3: Berechnungsformel der Streckendurchsatzleistung

Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung

Es ist leicht verständlich, dass eine Strecke dann eine große Leistungsfähigkeit besitzt, wenn die verkehrenden Züge auf der Strecke einen möglichst kleinen Belegungsgrad verursachen. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wird der bislang ermittelte Quotient mit dem Faktor $1 - \rho$, das heißt 1 minus den Streckenbelegungsgrad, multipliziert.

Der Einfluss des Streckenbelegungsgrades auf die Leistungsfähigkeit wird jedoch um so geringer, je gleichmäßiger die Strecke belastet wird. Diese Gleichmäßigkeit bezieht sich zum einen auf die zeitliche Verteilung der Zugfahrten, die durch den Variationskoeffizient des Streckenbelegungsgrades wiedergegeben wird, zum anderen auf die Unterschiede zwischen den verkehrenden Zugarten. Diese werden über die Variationskoeffizienten der Beförderungsgeschwindigkeiten und der Mindestzugfolgezeiten erfasst. Durch die Potenzierung des Faktors $1 - \rho$ mit der Summe der Variationskoeffizienten wird es möglich, auch diesen Effekt nachzubilden.

Der gewählte Funktionsverlauf der Streckendurchsatzleistung führt in Abhängigkeit der Zugzahl zunächst zu einem starken Anwachsen der Rechenwerte. Bei noch weiter steigenden Zugzahlen verlangsamt sich dieser Anstieg aufgrund des wachsenden Einflusses des Streckenbelegungsgrades und der Wartezeiten jedoch schnell, bis schließlich ein Maximalwert der Streckendurchsatzleistung erreicht wird. Die zu diesem Maximalwert gehörende Zugzahl ist nach dem vorgestellten Verfahren die Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung. Auch die Angabe der maximalen Streckendurchsatzleistung selbst ist für Leistungsfähigkeitsbetrachtungen, so z. B. für vergleichende Untersuchungen mehrerer Strecken, von Interesse.

Wie bei allen moderneren mathematischen Verfahren zur Streckenleistungsfähigkeitsuntersuchung ist es auch beim Ansatz der Streckendurchsatzleistung möglich, sowohl fahrplanabhängig als auch fahrplanunabhängig zu arbeiten. Das bedeutet, dass für die Berechnung entweder die Zugfolgefälle aus einem vorhandenen oder geplanten Fahrplan verwendet werden oder aber von einer zufälligen Verteilung der Zugfolgefälle ausgegangen wird.

Beispielhafte Anwendung des Ansatzes auf die Strecke Stuttgart - Ulm

Die Ergebnisse einer Leistungsfähigkeitsuntersuchung mit Hilfe des Ansatzes der Streckendurchsatzleistung sollen im Folgenden beispielhaft anhand der Strecke Stuttgart – Ulm dargestellt werden. Die Strecke von Stuttgart nach Ulm ist eine zweigleisige Strecke, die im Mischbetrieb sowohl von Reisezügen des Nah- und Fernverkehrs als auch von Güterzügen befahren wird. Die Lage der Strecke im Eisenbahnnetz zeigt Bild 4. Die Strecke ist 94 km lang und wurde zum Zeitpunkt der Untersuchung von 127 Zügen je Richtung und Tag befahren. Ein Tag wurde auch als Dauer des Bezugszeitraumes für die Untersuchung gewählt. Die auf der Strecke verkehrenden Züge wurden in insgesamt acht Modellzugklassen eingeteilt (je drei für Fern- und Nahverkehr, zwei für den Güterverkehr). Zur Darstellung der Ergebnisse wird die fahrplanunabhängige Untersuchung der Fahrtrichtung von Stuttgart nach Ulm herangezogen.

Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung

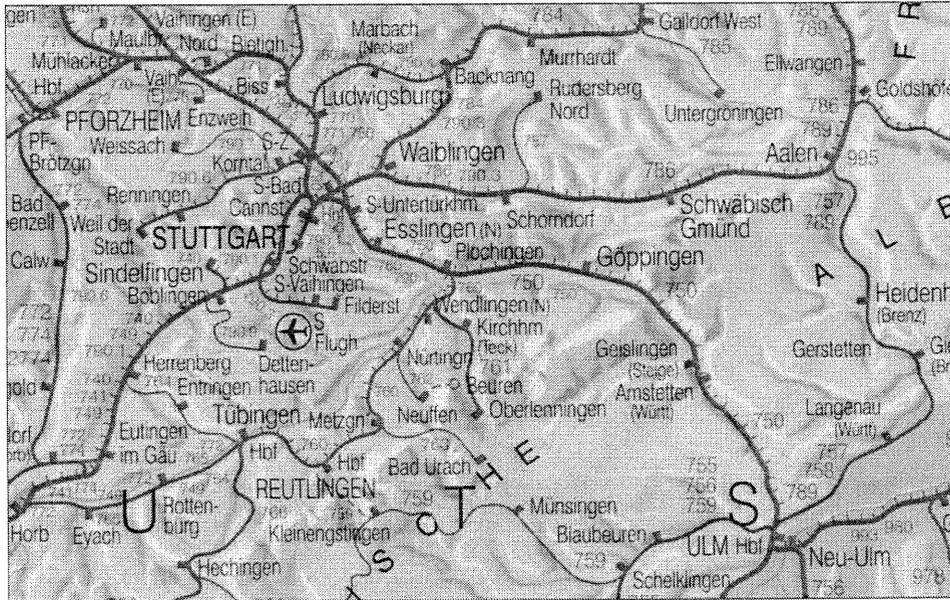


Bild 4: Lage der Strecke Stuttgart – Ulm im Eisenbahnnetz [DB Reise & Touristik AG, DB Regio AG, „Übersichtskarte für den Personenverkehr“, Frankfurt am Main, 2001]

Die mit dem Ansatz der Streckendurchsatzleistung errechnete Zugzahl bei optimaler Streckenauslastung beträgt 124 Züge pro Tag und liegt damit etwas unterhalb der zum Zeitpunkt der Untersuchung planmäßig vorgesehenen Zugzahl. Dieses Ergebnis deckt sich gut mit den Erfahrungen aus dem Eisenbahnbetrieb, wonach diese Strecke mit den derzeitigen Zugzahlen gut ausgelastet ist und nur noch wenig Reserven aufweist. Im Vergleich dazu führt eine Berechnung mit Hilfe des Programms STRELE zu einem deutlich niedrigeren Ergebnis von nur 103 Zügen, das den Schluss nahelegen würde, dass die Strecke bereits planmäßig äußerst stark überlastet würde.

Die maximale Streckendurchsatzleistung auf der Strecke Stuttgart – Ulm beim untersuchten Betriebsprogramm beträgt 174 Züge/h · km/h. In Verbindung mit übrigen Leistungsfähigkeitskennwerten wie z. B. dem zugehörigen Streckenbelegungsgrad (0,44), der mittleren Beförderungsgeschwindigkeit (79 km/h), den Wartezeiten im Bezugszeitraum (703 min) und den verschiedenen Variationskoeffizienten ($V_{tz} = 0,49$; $V_v = 0,24$; $V_p = 0,36$) können durch Angabe der Streckendurchsatzleistung verschiedene Streckenuntersuchungen miteinander verglichen werden und die Parameter ermittelt werden, die die Leistungsfähigkeit begrenzen.

Eine geringe Streckendurchsatzleistung kann verschiedene Ursachen haben, die – falls notwendig – gezielt behoben werden können. Eine mögliche Ursache kann zum Beispiel eine geringe Beförderungsgeschwindigkeit sein, die durch eine Streckenertüchtigung für höhere Geschwindigkeiten, kürzere Haltezeiten und Fahrzeitzuschläge oder ein allgemein gesteigertes Pünktlichkeitsniveau der Züge gesteigert werden könnte. Außerdem kann ein hoher Streckenbelegungsgrad die Leistungsfähigkeit begrenzen. Zur Verringerung des Streckenbelegungsgrades müsste entweder die Infrastruktur verbessert werden (zum Beispiel durch ein leistungsfähigeres Signalsystem, zusätzliche Überholungs- oder Streckengleise) oder die

Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung

Fahrplangestaltung so verändert werden, dass Zugfolgefälle mit geringeren Mindestzugfolgezeiten häufiger auftreten. Somit würde eine Entmischung unterschiedlicher Verkehre erreicht, was auch dazu beitragen würde, hohe Variationskoeffizienten der Mindestzugfolgezeiten oder der Beförderungsgeschwindigkeiten zu senken. Hohe Variationskoeffizienten des Streckenbelegungsgrades, die ebenfalls die Leistungsfähigkeit begrenzen können, können durch einen Abbau von Verkehrsspitzen (also durch eine gleichmäßigere Verteilung der Zugfahrten über den Tag) vermindert werden, wenn dies verkehrlich sinnvoll umsetzbar ist.

Das Verfahren der Streckendurchsatzleistung ermöglicht mit vergleichsweise geringem Aufwand eine Sensitivitätsuntersuchung der Ergebnisse. So wurde z. B. für die Strecke Stuttgart – Ulm ermittelt, welche Steigerung der Leistungsfähigkeit durch einen Abbau der Verkehrsspitzen, durch den Einsatz nur einer Zugart oder durch eine Kombination beider Maßnahmen erzielbar wäre. Hierbei ist durch eine gleichmäßige Streckenauslastung mit einer um etwa 12 % höheren optimalen Zugzahl zu rechnen, beim Einsatz nur einer der Modellzuggruppen mit einer Steigerung von etwa 77 %. Werden beide Maßnahmen kombiniert, könnte die optimale Zugzahl in etwa verdoppelt werden.

Weitere Streckenuntersuchungen

Bislang wurden im Rahmen der Forschungsarbeit am Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik insgesamt acht verschiedene Strecken (sowohl eingleisige, zweigleisige als auch dreigleisige Strecken) unter verschiedenen Betriebsbedingungen (zum Beispiel Mischbetrieb verschiedener Zugarten, artreiner Betrieb oder Hochgeschwindigkeitsverkehr) mit Hilfe des beschriebenen Ansatzes der Streckendurchsatzleistung untersucht. Hierbei ergeben sich bei der Untersuchung von ein- und dreigleisigen Strecken nur geringe Abweichungen gegenüber dem Verfahren für zweigleisige Strecken. So werden bei einer eingleisigen Strecke wegen der starken Abhängigkeiten der Zugfahrten in beiden Fahrtrichtungen beide Richtungen gemeinsam und nicht wie bei der zweigleisigen Strecke getrennt voneinander untersucht. Die Untersuchung einer dreigleisigen Strecke setzt sich ähnlich wie bei der Erstellung eines Fahrplanes für solche Strecken aus einer Untersuchung für eine zweigleisige und einer Untersuchung für eine eingleisige Strecke zusammen.

Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung

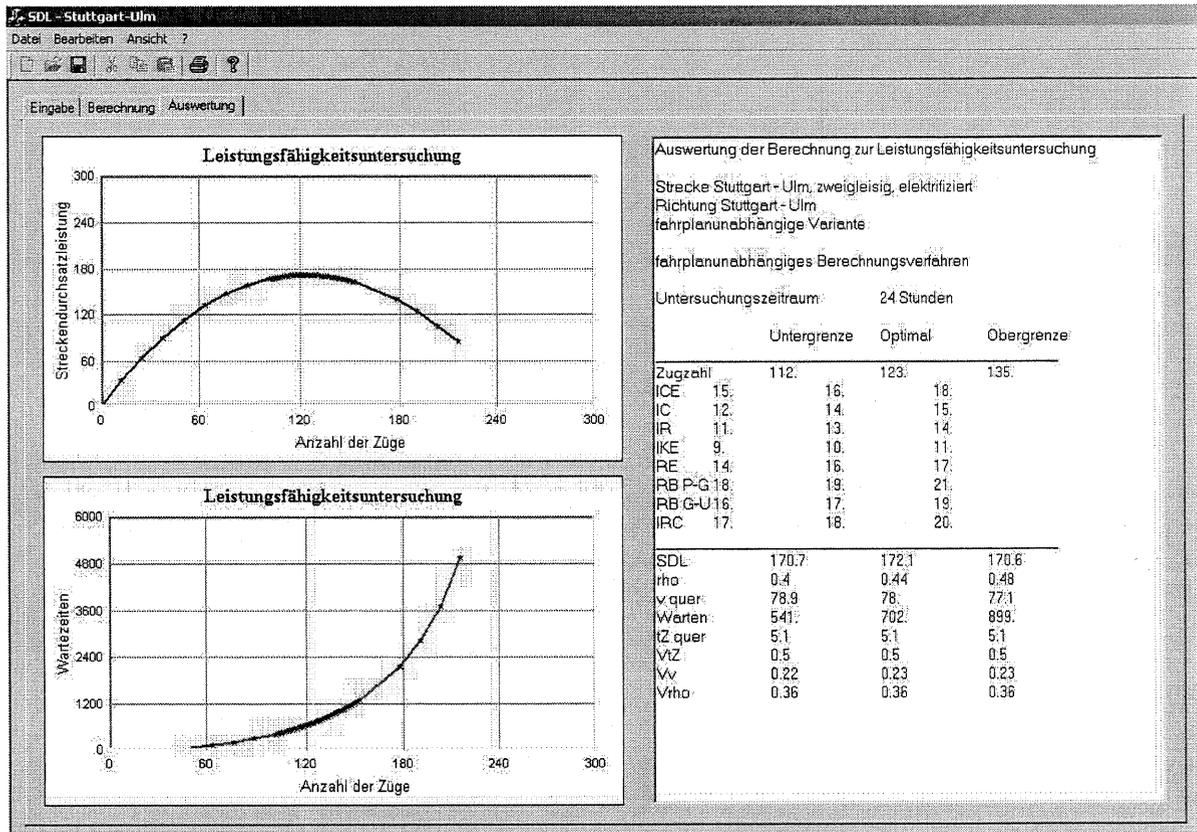


Bild 5: Auswertefenster des Programms SDL [Preis, „Programmtechnische Umsetzung des Ansatzes der Streckendurchsatzleistung zur mathematischen Leistungsfähigkeitsberechnung von Eisenbahnstrecken“, Darmstadt, 2004]

Hinweis:

Dieser Vortrag ist eine kurze Zusammenfassung einer gleichnamigen Dissertation, die bei Interesse im Internet unter http://www.tu-darmstadt.de/verkehr/bs/publik/schrift/SR_B4.pdf heruntergeladen werden kann.