

Kapazitätsbestimmung eines Shuttle-Zuges mit Hilfe der Warteschlangentheorie

DR. FALKO BAUSE
DR.-ING. CHRISTIAN MÖLLER

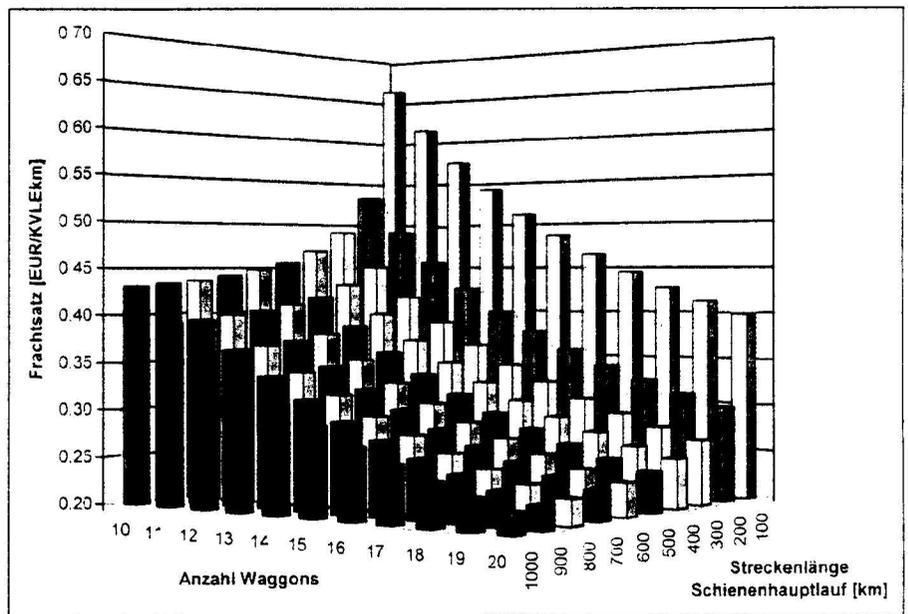
Um einen drohenden Verkehrsinfarkt auf deutschen Straßen zu entgehen, sind Güterverkehre verstärkt auf andere Verkehrsträger, insbesondere auf die Schiene, zu verlagern. Voraussetzung hierfür sind attraktive Transportzeiten und -kosten, wofür die verschiedenen Verkehrsträger optimal aufeinander abgestimmt werden müssen.

Eine Möglichkeit für eine effektive Zusammenarbeit zwischen den beiden Verkehrsträgern Straße und Schiene bieten Güterverkehrszentren (GVZ). Als Schnittstelle dient hierbei für den kombinierten Verkehr (KV) das KV-Terminal. Hinsichtlich der Transportzeiten stellt das GVZ erhöhte Anforderungen, da hier in erster Linie zeitkritische Sammelgüter umgeschlagen werden. So wird von Seiten der Spediteure im Nachtsprung eine Transportzeit von 10 Stunden zwischen Umschlagpunkten festgelegt [MEL96].

Eine solche Transportzeit ist unter Einbeziehung des kombinierten Verkehrs nur zu realisieren, wenn die Verbindung zweier KV-Terminals durch Shuttle-Züge mit KV-affinen Ladeeinheiten realisiert wird. Durch die direkte Verbindung zweier Terminals und durch die konstante Waggonanzahl entfallen zeit- und kostenaufwändige Rangiervorgänge. Allerdings besitzen Shuttle-Züge durch die feste Waggonanzahl ein hohes Auslastungsrisiko. Für einen wirtschaftlichen Betrieb muss somit ein ausreichendes Aufkommen vorhanden sein. Grundlage für eine erste Analyse stellt ein grobes Kostenmodell dar.

Das Transportkostenmodell

Für die Transportkosten mittels eines



1: Frachtkosten pro Ladeeinheit (KVLE) und gefahrener Kilometer im Schienenhauptlauf für Shuttle-Züge im kombinierten Verkehr.

Shuttle-Zuges sind folgende Kostenanteile zu berücksichtigen:

- Trassenkosten K_{Trasse}
- Traktionskosten K_{Trak}
- Kosten für Rollmaterial $K_{Rollmat}$

Die Trassen stellen den Fahrweg des Verkehrsmittels Zug dar. Die Kosten und Leistungsfähigkeit der verschiedenen Trassen im Netz der Deutschen Bahn sind sehr unterschiedlich. Die Traktionskosten entstehen durch die Nutzung einer Lok als Antrieb für den Shuttle-Zug. Allgemein ist die Traktion definiert als der Antrieb eines Zugverbandes. Die Traktionskosten sind je nach Traktionskonzept unterschiedlich. Sie beziehen sich auf die Einsatzzeit und gehen somit als €/h in die Kostenbetrachtung ein. In die Bestimmung der Traktionsdauer gehen neben der Fahrzeit von einem Terminal zum anderen Nebenzeiten t_{Neb1} und t_{Neb2} mit ein, wel-

che die Rangiervorgänge und einen Bremsentest enthalten. Zusätzlich zu diesen Zeiten sind für die Prozesskostenermittlung An- und Abfahrten der Lok zu berücksichtigen (t_{Lokan} , t_{Lokab}).

Die Kosten für das Rollmaterial beziffern den monetären Aufwand für die bereitgestellten Waggon im Zugverband. Dies ist der einzige Kostenanteil, der in Abhängigkeit zur Anzahl transportierter Einheiten steht. Folglich wird der Frachtsatz für die Ermittlung der Prozesskosten des Schienenhauptlaufs entscheidend von der Kapazität und der Auslastung des Zuges beeinflusst.

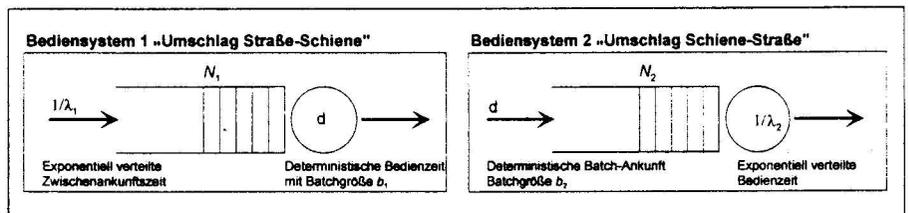
Mit den beschriebenen Kostenanteilen und den Zeitanteilen aus dem vorherigen Abschnitt berechnet sich der Frachtsatz für

$$f_{Sch} = \frac{s \cdot K_{Trasse} + (t_{Lokan} + t_{Neb1} + \frac{s}{V} + t_{Neb2} + t_{Lokab}) \cdot K_{Trak} + N_{Waggon} \cdot K_{Rollmat}}{2 \cdot N_{Waggon} \cdot A_{Zug} \cdot s} \quad (1)$$

1. Diese Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 559 „Modellierung großer Netze in der Logistik“ unterstützt.

Dr. K. Bause, Lehrstuhl Informatik IV, Universität Dortmund.

Dr.-Ing. Chr. Möller, A-VIP-O GmbH, Dortmund, vorheriger Mitarbeiter am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, Universität Dortmund



2: Warteschlangenmodelle zur Berechnung der notwendigen Zugkapazität in einem KV-Terminal.

den Schienenhauptlauf mit folgender Gleichung:

Der Auslastungsgrad des Shuttle-Zuges führt in Gl. (1) zu einer Verteilung der Kosten auf die tatsächlich transportierten Ladeeinheiten. Den Berechnungen liegen die in Tab. 1 aufgeführten Kennwerte zu Grunde. Die Trassenpreise sind dem aktuellen Trassenpreissystem der Deutschen Bahn (Stand Januar 2002) entnommen wobei eine Fernstrecke der Kategorie F4, auf der vorrangig überregionale schnelle Verkehre durchgeführt werden, sowie eine Standardtrasse, angenommen wurde. Zusätzlich ist ein Sonderfaktor für die Lade- maßüberschreitung zu berücksichtigen, da der kombinierte Verkehr in diese Kategorie eingeordnet wird.

Modell zur Bestimmung der Zugkapazität

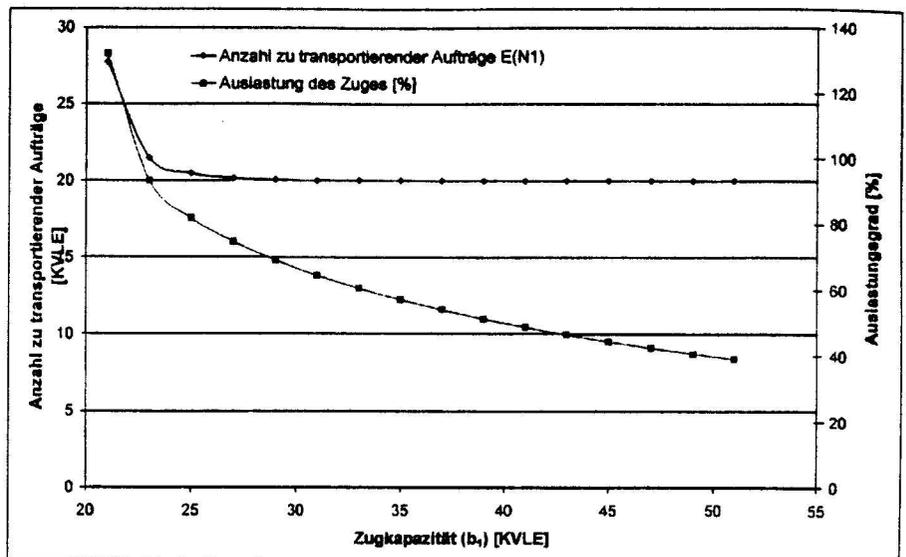
Die Ermittlung der notwendigen Zugkapazität eines Shuttle-Zuges wird über den durchschnittlichen Auslastungsgrad vorgenommen. Mit diesem können die Transportkosten ermittelt werden und so Aussagen über die Wirtschaftlichkeit getroffen werden. Wird davon ausgegangen, dass keine Ladeeinheiten das Terminal wieder verlassen und den straßenseitigen Direktverkehr nutzen, sind Aussagen bezüglich der Anzahl Ladeeinheiten zu treffen, die bei einer Vollaustattung des Zuges nicht am selben Tag transportiert werden können.

Für die Berechnungen ist das durchschnittliche Aufkommen an KV-affinen Ladeeinheiten für einen Zug zu ermitteln. Hierzu sind Informationen über Nachfrageströme aus dem GVZ bzw. der Region notwendig. Diese Daten werden im Rahmen einer Potenzialabschätzung in der Grobplanungsphase eines GVZ ermittelt. In dieser Phase der Planung ist zunächst von keiner Steuerung bzw. Begrenzung der Ströme auszugehen. Somit ist das Aufkommen stochastischen Einflüssen unterworfen.

Unter dieser Voraussetzungen kann zur Berechnung des durchschnittlichen Auslastungsgrades die Warteschlangentheorie angewendet werden. Bezüglich der theoretischen Grundlagen wird auf entsprechende Literatur verwiesen (vgl. [KLE75], [KOE76], [GNE83]).

Für den Aufbau von Warteschlangenmodellen zur Berechnung der benötigten Kennwerte sind die Ankunftsströme der straßenseitig und schienenseitig ankommenden Ladeeinheiten zu spezifizieren. Hiermit ergeben sich zwei entsprechende Sendungsströme, deren Anzahl Ladeeinheiten in einem gegebenen Verladezeitfenster umzuschlagen sind. Es wird zunächst angenommen, dass die ankommenden Fahrzeuge jeweils eine KV-Einheit transportieren. Mit Hilfe der Grundlagen der Warteschlangentheorie werden die Umschlagvorgänge für einen Zug durch zwei Bediensysteme modelliert.

Ein Bediensystem repräsentiert den Straße-Schiene-Umschlag. Hierbei stellt der Zug die Bedienstation für die ankommenden, zu entladenen Fahrzeuge dar. Für



3: Mittlere Anzahl auf Verladung wartender Ladeeinheiten und der daraus resultierende Auslastungsgrad des Zuges (= 1,66, d=12).

den Schiene-Straße-Umschlag wird ein zweites Bediensystem erstellt, in dem die ankommenden zu beladenden LKW die Bedienstation für den Zug darstellen. Mit dieser Modellierung wird der eigentliche Umschlagprozess abstrahiert. Es wird von einer ausreichenden Umschlagleistung ausgegangen.

Das erste Bediensystem ist dadurch charakterisiert, dass der Ankunftsstrom aus einzelnen Objekten, in diesem Fall LKW mit einer KVL/E, besteht und die Bedienung in einer Gruppenbedienung durch den Zug er-

Literatur beschrieben Bediensystemen ab. Für die Analyse der beiden Bediensysteme hinsichtlich der geforderten Kennwerte werden entsprechende Berechnungsvorschriften der *bulk arrival and service queues* herangezogen.

Mit den dort vorhandenen Grundlagen wird der Ankunftsstrom der im ersten Bediensystem zu entladenden Ladeeinheiten, durch die Ankunftsrate modelliert. Die Bedienzeit der Bedienstation „Zug“ für diesen Ankunftsstrom wird durch ein definiertes Verladezeitfenster (*d*) reprä-

Kostenart	Formelzeichen	Wert	Einheit
Trassenkosten	K_{Trasse}	3,825	€/km
Traktionskosten	K_{Trak}	180	€/h
Rollmaterial	$K_{Rollmat}$	20,5	€/WaggonTag
Anzahl LE pro Waggon	$N_{LEWaggon}$	2	
Auslastungsgrad des Zuges	A_{Zug}	0,75	
An-/Abfahrzeit der Lok	t_{Lokan}, t_{Lokab}	15	min

Tab. 1: Grundlagen der Beispielrechnung für den Schienentransport mittels Shuttle-Zug.

folgt. Die Anzahl Ladeeinheiten, die in einem Bediensystem bearbeitet werden können, entspricht der Kapazität des Zuges. In dem zweiten Bediensystem kommen Ladeeinheiten in einer Gruppe mit dem Umfang der Ladekapazität des Zuges an und werden einzeln durch die ankommenden, zu beladenden Fahrzeuge bedient.

Durch das Charakteristikum der Gruppenankünfte bzw. Gruppenbedienung grenzen sich die hier aufzustellenden Bediensysteme gegenüber den gängigen in der

sentiert. Mit der Annahme, dass Fahrzeuge nur innerhalb der Verladezeitfenster ankommen, bildet das Verladezeitfenster *d* auch die Zeitbasis für den Ankunftsstrom. Die Bedienmenge je Bedienzyklus ist (*b1*), die Kapazität des Zuges. Dieses Bediensystem mit einer batchorientierten Bedienung wird mittels eines M/Db1/1 Systems modelliert. Berechnungsvorschriften hinsichtlich der Warteschlangenlängen, sind Bailey (vgl. [BAI54]) zu entnehmen. Die Ankunftszeitverteilung der LKW ent-

Mit Zug	35	37	39	41	43	45	47	49	51
ankommende Anzahl LE b_2									
Anzahl zu puffernde LE $E[N_2]$	0,013	0,035	0,084	0,192	0,418	0,901	0,199	5,028	21,88

Tab. 2: Auswertung des Bediensystems für den Umschlag Schiene-Straße.

spricht hierbei einer Poisson-Verteilung mit dem Parameter. Die Bedienung von höchstens b_1 LKW erfolgt mit einer Bedienrate von $1/d$. Als Berechnungsvorschrift für die mittlere Anzahl Ladeeinheiten, die kurz vor Abfahrt des Zuges aufgeladen sind oder auf den Umschlag warten, ergibt sich:

$$E[N_1] = \frac{1 - b_1(1 - \rho)^2}{2(1 - \rho)} + \sum_{i=1}^{b_1} \frac{1}{1 - \gamma_i} \quad (2)$$

mit $\rho = \frac{\lambda_1 d}{b_1}$ und $\gamma_1, \dots, \gamma_{b_1}$ als Nullstellen der Gleichung $e^{b_1 \rho(z-1)} = z^{b_1}$

innerhalb von $|z|=1$ ([BAI54]).

Mit Hilfe des Erwartungswertes für die Anzahl auf Umschlag wartender Aufträge und der betrachteten Zugkapazität b_1 wird durch Berechnung der Differenz die Anzahl Ladeeinheiten bestimmt, die das Terminal nicht am selben Tag verlassen.

Das zweite Bediensystem, dem Schiene-Straße-Umschlag, besitzt der Shuttle-Zug die mit dem ersten Bediensystem übereinstimmende Ankunftsrate $1/d$. Die Anzahl der im Batch ankommenden Ladeeinheiten ist durch b_2 definiert. Die Bedienrate der Bedienstation, stellt die Ankunftsrate der zu beladenden Fahrzeuge dar.

Dieses zweite Bediensystem wird durch ein Warteschlangenmodell mit Batch-Ankünften und deterministischer Zwischenankunftszeit sowie exponentiell verteilter Bedienzeit modelliert. Eine entsprechende Berechnungsvorschrift für die mittlere Anzahl wartender Ladeeinheiten ist Chaudhry und Templeton zu entnehmen (vgl. [CHT83]). Das Bediensystem Schiene-Straße-Umschlag stellt hierbei ein $D^{b_2}/M/1$ Warteschlangenmodell dar. Die mittlere Anzahl noch wartender Aufträge kurz vor Ankunft eines Zuges ergibt sich zu:

$$E[N_2] = \sum_{i=1}^{b_2} \frac{\gamma_i}{1 - \gamma_i} \quad (3)$$

mit $\gamma_1, \dots, \gamma_{b_2}$ als Nullstellen der Gleichung $e^{\lambda_2 d(z-1)} = z^{b_2}$

innerhalb von $|z|=1$ ([CHT83]).

Die durchschnittliche Anzahl wartender Ladeeinheiten, stellt die Menge an KV-affinen Ladeeinheiten dar, die nicht am selben Tag abgeholt werden und somit zwischenlagert werden müssen.

Um eine Überlastung beider Warteschlangen zu vermeiden, muss die Auslastung kleiner als eins sein. Die Stationaritätsbedingungen lauten:

$$\frac{\lambda_1 d}{b_1} < 1 \quad (4)$$

$$\frac{b_2}{\lambda_2 d} \quad (5)$$

In einem Beispiel werden im folgenden die Batchgröße b_1 und b_2 variiert. Eine Variation der Verladezeit wird nicht berücksichtigt. Als Beispielrechnung wird, unter Berücksichtigung der Bedingungen (4) und (5), für die folgende Situation, eine Zugkapazität bestimmt. Ein Zug besitzt durch die Ankunftszeit 6.00 Uhr und die Abfahrtszeit 18.00 Uhr ein Verladezeitfenster von 12 Stunden ($d = 12$). Im Mittel werden in diesem Zeitfenster 20 anliefernde Fahrzeuge erwartet. Hieraus ergibt sich ein Ankunftsstrom von 1,66 Fahrzeugen pro Stunde ($\lambda_1 = 1,66$). Die Abholung schienenseitig angelieferter Ladeeinheiten erfolgt durch 52 Fahrzeuge, die in dem Verladezeitfenster von 12 Stunden ankommen ($\lambda_2 = 4,33$). Für diese Beispielkonstellation wird nun unter Variation der beiden Kapazitäten b_1 und b_2 die durchschnittliche Anzahl wartender (zu puffernder) Ladeeinheiten, sowohl in der Richtung Schiene-Straße als auch Straße-Schiene, ermittelt.

In Abb. 3 sind die Ergebnisse für den Straße-Schiene-Umschlag aufgeführt. Kann ein Zug durchschnittlich 21 LE aufnehmen, so müssen im Mittel 6,76 (= 27,76-21) Einheiten zurückgelassen werden. Abb. 3 zeigt weiterhin, dass bei einer Transportkapazität von 24 Einheiten die Anzahl zurückzulassender LE auf den Wert 0 sinkt. Dementsprechend sollten Planungen für die Zugdimensionierung von einer Zuglänge ausgehen, welche die Aufnahme von 24 LE zulässt. Hierdurch wird verhindert, dass Aufträge zurückgewiesen bzw. pro Tag eine große Anzahl von Ladeeinheiten zurückgelassen werden muss.

Für das zweite Bediensystem sind die Ergebnisse in Tab. 2 aufgeführt. Es wird deutlich, dass eine Batchgröße von 51 KVLE im Vergleich zu einer Batchgröße von 35 KVLE zu einem größeren Flächenbedarf für über Nacht zu lagernde Ladeeinheiten führt. Bei einer Batchgröße von 51 Einheiten beispielsweise bleiben durchschnittlich 22 KVLE über Nacht im KV-Terminal zurück. Dies zeigt, dass entweder eine strenge Kontrollstrategie angewendet werden muss oder zusätzliche Pufferflächen vorgesehen werden müssen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die oben beschriebenen Berechnungen beruhen auf analytischen Berechnungsvorschriften und bieten eine schnelle Methode

Ergebnisse zu erhalten. Unter zu Hilfe-nahme moderner Tools, wie beispielsweise MAPLE [MAPLE], lassen sich realitätsnahe Problemgrößen behandeln. Analytische Modelle bieten sich daher in der Grobdimensionierung logistischer Netze an, da interaktiv eine Vielzahl an Planungsvarianten bewertet werden können.

Hinsichtlich der Umschlagvorgänge stellt ein KV-Terminal jedoch einen sehr komplexen System dar. Die Umschlagdauer, d.h. die Beladedauer für einen Zug ist ein wesentliches Kriterium für die Transportdauer im kombinierten Verkehr. Eine steigende Anzahl je Zug zu transportierende Ladeeinheiten wirkt sich negativ auf die Transportdauer aus. Je mehr KVLE pro Zug umzuschlagen sind, desto größer wird die durchschnittliche Verweildauer einer KVLE im Terminal und somit die Totzeit in der Transportkette. Die Transportkosten je KVLE sinken jedoch mit steigender Gesamtanzahl. Für eine Optimierung der Umschlagvorgänge und somit Reduzierung der Verweildauer der einzelnen KVLE im Terminal sind die Prozesse im Terminal zu optimieren und mit der Fahrplangestaltung abzustimmen. Detaillierte Simulationsmodelle, welche neben den Abläufen im Terminal auch die straßen- und schienen-seitig vorgeschalteten Prozesse miterücksichtigen sind hier unterstützend einzusetzen. Entsprechende Modellansätze liegen bereits vor.

Der Artikel ist im Rahmen des von der DfG geförderten Sonderforschungsbereiches „Große Netze der Logistik“ (SFB 5559) an der Universität Dortmund im Rahmen einer Zusammenarbeit der beiden Autoren entstanden.

KENNZIFFER

354

Literaturhinweis:

- [BAI54] Bailey, N.T.J.: *On Queuing Process with Bulk Service*. J. Roy. Statist. Soc. Ser. B 16, 1954.
- [BAU99] Bause, F., Beilner, H.: *Intrinsic Problems in Simulation of Logistic Networks*. 11th European Simulation Symposium and Exhibition (ESS99), Simulation in Industry, Erlangen, October 26-28, 1999.
- [CHT83] Chaudhry, M.L., Templeton, J.G.C.: *A First Course in Bulk Queues*. John Wiley and Sons, 1983.
- [GNE83] Gnedenko, B.W., König, D.: *Handbuch der Bedienungstheorie Band I*. Akademie-Verlag, Berlin, 1983.
- [KLE75] Kleinrock, L.: *Queueing Systems. Volume 1: Theory*. John Wiley and Sons, 1975.
- [KOE76] König, D., Stoyan, D.: *Methoden der Bedienungstheorie*. Vieweg Verlag, Braunschweig 1976.
- [MAPLE] siehe <http://www.maplesoft.com>
- [MEL96] Melzer, K.-M.: *Regeln für die Abfahrtsplanung von Linienzügen im Güterverkehr*. Dissertation, Universität Dortmund, Fakultät Maschinenbau 1996.

ALTEC
Verladetechnik

ALTEC GmbH Rudolf-Diesel-Str. 7, 78224 Singen, Tel. 07731/8711-0
 Fax 07731/8711-11, Internet: <http://www.altec-singen.de>
 E-Mail: altec-singen@t-online.de

Prospekte anfordern