Dr. Ingolf Gast und Dr. Kurt Schultze

Berücksichtigung von Fahrplanbindungen bei analytischen Verfahren zur Leistungsfähigkeitsberechnung

Bei den vorhandenen Verfahren zur Berechnung der Leistungsfähigkeit wird die Matrix der Zugfolgefälle entweder fahrplanabhängig durch Auszählen der Zugfolgefälle in einem bestimmten Fahrplan oder durch Berechnung der Erwartungswerte gewonnen. Mit der Einführung von Integralen Taktfahrplänen im Reisezugverkehr und deren Überlagerung durch individuelle Fahrplanlagen teilweise im Reisezugverkehr (Verstärkerzüge, Züge mit abweichenden Laufweg, Nachtzüge), aber vor allem im Güterverkehr treten häufig große Diskrepanzen zwischen den Erwartungswerten und den tatsächlichen Strukturen auf. Die hilfsweise fahrplanabhängige Berechnung ist ebenfalls unbefriedigend, weil hiermit nicht die Gesamtheit aller denkbaren Fahrpläne erfasst werden kann, sondern sie nur Aussagen für den einen unterstellten Fahrplan liefert. Das vorgestellte Verfahren ermöglicht eine Mischung der Vorgabe von fahrplanabhängigen Strukturen, die bei Integralen Fahrplänen üblicherweise über mehrere Fahrplanperioden bestehen bleiben, und Erwartungswerten über eine entsprechende Manipulation der Matrix der Zugfolgefälle. Zu den vorgestellten Rechenalgorithmen werden Beispiele gegeben.

1. Problemstellung

Die grundlegenden Merkmale der Verfahren zur analytischen Berechnung der Leistungsfähigkeit von Eisenbahnstrecken und Bahnhöfen sind in [1] beschrieben und sollen deshalb hier nicht wiederholt werden. In diese Verfahren geht die Anzahl der Zugfolgefälle Zug i $\wedge$ Zug j als ein Parameter ein. Für die Ermittlung dieser gewöhnlich in Matrixform dargestellten Zugfolgefälle sind derzeit nur die beiden folgenden Alternativen vorhanden:

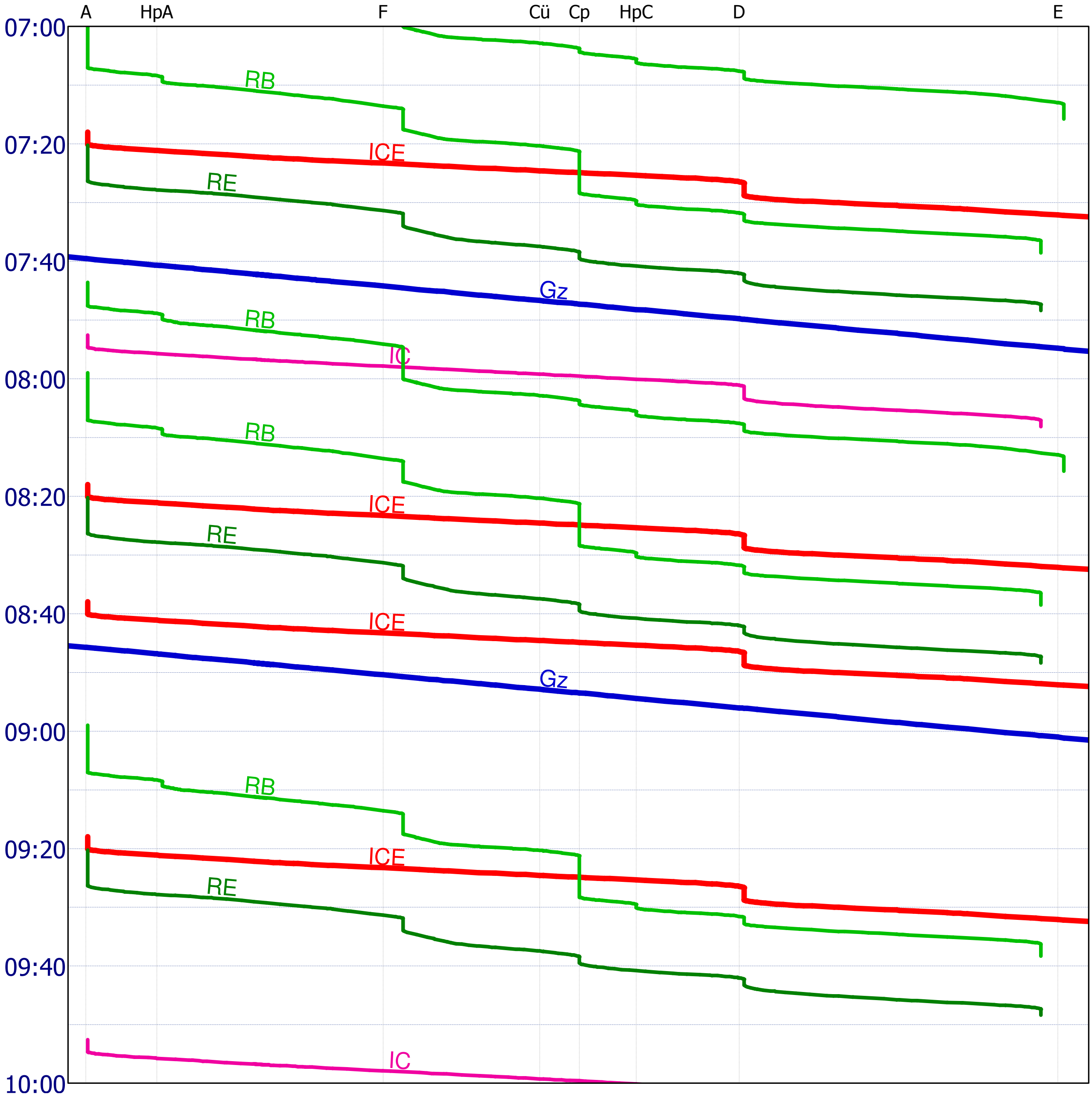
- ▹ Vorgabe der Anzahl Zugfolgefälle für alle Zugfolgefälle i $\wedge$ j in der Zugfolgematrix (fahrplanabhängiges Verfahren). Die Zahlen werden gewöhnlich entweder aus einem vorhandenen oder einem geplanten Fahrplan ausgezählt. Die Ergebnisse gelten dann nur für den zugrunde gelegten Fahrplan.
- ▹ Berechnung der Erwartungswerte der Anzahl Zugfolgefälle für alle Zugfolgefälle i $\wedge$ j auf wahrscheinlichkeitstheoretischer Basis (fahrplanunabhängiges Verfahren), wie durch POTTHOFF in [2] eingeführt. Die Ergebnisse der Leistungsfähigkeitsberechnung stellen dann den Mittelwert über alle denkbaren Fahrpläne dar und können deshalb gut mit normierten Qualitätsmaßstäben verglichen werden. Es lassen sich jedoch keine wiederkehrenden Fahrplanstrukturen abbilden.

Eine Verfeinerung des fahrplanunabhängigen Verfahrens wurde durch WAKOB in [3] vorgestellt. Dieses sogenannte Ganglinienverfahren erlaubt die Berücksichtigung der tageszeitlichen Verteilung für die einzelnen Modellzüge, indem die Erwartungswerte für die Anzahl der Zugfolgefälle für jede Stunde[1] getrennt ermittelt und dann über den Betriebszeitraum aufaddiert werden. Eine weitere Verfeinerung, bei dem der Übergang von einer Stunde zur nächsten schärfer gefasst ist, wird in [4] beschrieben. Sowohl das fahrplanabhängige als auch die beiden fahrplanunabhängigen Verfahren werden in der Praxis angewandt [5], [6].

Durch die zunehmende Einführung von Integralen Taktfahrplänen stoßen diese Verfahren jedoch an ihre Grenzen. Bei diesen Fahrplänen sind feste Zugfolgen zumindest über einen Teil des Untersuchungszeitraumes vorhanden. Sie wiederholen sich in regelmäßigen Zyklen von in der Regel 30, 60 oder 120 min. Neben diesen festen Zugfolgen sind in den Zwischenlagen jedoch individuelle Zugfolgen vorhanden, in erster Linie betrifft dies Güterzüge, aber auch Reisezüge (z.B. Fernverkehrszüge in Tagesrandlagen, die von ihrem Regellaufweg abweichen, Verstärkerzüge des Nahver-

[1] Das Ganglinienverfahren ist auch anwendbar, wenn die Tagesganglinie nur für Stundengruppen bekannt ist. Dies gilt auch für eine Kombination Ganglinienverfahren mit Matrixmanipulation.

kehrs im morgendlichen und abendlichen Berufsverkehr, Nachtzüge im Auslauf). Beispielhaft ist ein derartiger Fahrplan auszugsweise in der folgenden Abbildung dargestellt.



Beispiel für Integralen Taktfahrplan mit zusätzlichen Zügen in individuellen Zeitlagen (Auszug aus mit SLS PLUS erstelltem Fahrplan)

Bis jetzt wurde für derartige Fahrplanstrukturen das fahrplanabhängige Verfahren angewandt, wobei für die Züge mit individuellem Fahrplan Annahmen getroffen wurden. Ziel des hier vorgestellten Verfahrens soll es deshalb sein, die Mischung von fest vorgegebenen Zugfolgefällen mit auf wahrscheinlichkeitstheoretischer Basis ermittelten über eine Manipulation der Matrix der Zugfolgefälle zu ermöglichen.

2. Berechnungsansatz

2.1 Bezeichnungsweise

Im Folgenden werden nachstehende Bezeichnungen und Abkürzungen verwandt:

- ▹ Matrix der Zugfolgefälle mit $m \times m$ Feldern, d.h. es werden m Modellzüge betrachtet. Der Zeilenindex ist i (= Index des ersten Zuges), der Spaltenindex ist j (= Index des folgenden Zuges).
- ▹ Anzahl der Züge in den Modellzuggruppen, die durch einen Modellzug repräsentiert werden: n_i bzw. n_j.
- ▹ Anzahl der mit Wahrscheinlichkeitsrechnung ermittelten Zugfolgefälle im Matrixfeld ij (Erwartungswert): n_{ij}.
- ▹ Anzahl der fest vorgegebenen Zugfolgefälle in einem Matrixfeld ij:
  a) Nicht absolut fix: n_{Fij} (Fall 1 bzw. Fall 2, siehe Ziff. 2.2)
  b) Absolut fix n_{FFij} (Fall 3, siehe Ziff. 2.2).
- ▹ Anzahl der Zugfolgefälle nach der Manipulation im Matrixfeld ij: n_{Mij}.
- ▹ Summe aller Züge: $N = \sum_{i=1}^{m} n_i = \sum_{j=1}^{m} n_j$

Weitere Erläuterungen werden bei den jeweiligen Textpassagen gegeben.

2.2 Fallunterscheidung

Für die Berechnung der Felder in der Zugfolgematrix, für die keine Anzahl Zugfolgefälle n_{Fij} oder n_{FFij} fest vorgegeben werden, sind drei Fälle zu unterscheiden:

<u>Fall 1:</u>

Die vorgegebene Anzahl der Zugfolgefälle n_{Fij} im Matrixfeld ij entspricht der Anzahl der Züge n_i bzw. n_j. In diesem einfachen Fall sind alle übrigen Felder der Zeile i bzw. der Spalte j gleich 0. Ist die Anzahl der Züge n_i gleich der Anzahl der Züge n_j sind sowohl die übrigen Felder in der Zeile i als auch die übrigen Felder in der Spalte j gleich 0 (einfachster Fall). In diesem Fall ist es unerheblich, ob die Festlegung absolut fix ist oder nicht, da keine Entscheidung getroffen werden muss, wie mit den für dieses Feld nicht festgelegten Zugfolgefällen zu verfahren ist. Beispiele hierfür zeigt Tabelle 1.

Auswirkungen einer Festlegung auf den Komplementärzugfolgefall:
Wenn die Anzahl der Zugfolgefälle in einem Feld $i \wedge j$ mit n_{Fij} oder n_{FFij} festgelegt wird, so hat dies Auswirkungen auf den Komplementärzugfolgefall $j \wedge i$. Würden keine Auswirkungen im Fall 1 berücksichtigt und Folgen $j \wedge i$ zugelassen, so würde sich im aufgeführten Beispiel zwangsläufig eine Folge Zug 1 $\wedge$ Zug 2 $\wedge$ Zug 1 $\wedge$ Zug 2 ergeben. Will man derartige Folgen ausschließen, so ist für das Feld $j \wedge i$ $n_{FFji} = 0$ festzulegen. Beim erweiterten Ganglinienverfahren sind Besonderheiten zu berücksichtigen (s. Ziff 2.7).

Modellzug j → ↓ i		Zug 1	Zug 2	Zug 3	Zug 4
	Zug-zahl	16	16	12	24
Zug 1	16	0	**16**	0	0
Zug 2	16	n_{M21}	0	n_{M23}	n_{M24}
Zug 3	12	n_{M31}	0	n_{M33}	n_{M34}
Zug 4	24	n_{M41}	0	n_{M43}	n_{M44}

$n_{Fij} = n_i = n_j$ (einfachster Fall)

Modellzug j → ↓ i		Zug 1	Zug 2	Zug 3	Zug 4
	Zug-zahl	16	20	12	24
Zug 1	16	0	**16**	0	0
Zug 2	20	n_{M21}	n_{M22}	n_{M23}	n_{M24}
Zug 3	12	n_{M31}	n_{M32}	n_{M33}	n_{M34}
Zug 4	24	n_{M41}	n_{M42}	n_{M43}	n_{M44}

$n_{Fij} = n_i$

Tabelle 1: Beispiele für Zugfolgematrizen nach Fall 1

Fall 2:
Ist die vorgegebene Anzahl der Zugfolgefälle n_{Fij} im Matrixfeld ij sowohl kleiner n_i als auch n_j, so ist die Differenz auf die Zeile i bzw. die Spalte j mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung zu verteilen. In diesem Fall 2 wird das Feld ij mit der vorgegebenen Zugfolgezahl n_{Fij} in die Verteilung mit einbezogen. Es wird somit vorausgesetzt, dass zusätzlich zu vorgegebenen Zugfolgen, die sich z.B. aufgrund eines Integralen Taktfahrplanes ergeben, weitere hinzukommen können, die durch Züge in individuellen Zeitlagen hervorgerufen werden. In der Tabelle 2 ist hierfür ein Beispiel dargestellt.

Für Komplementärzugfolgefälle gelten die bei der Erläuterung von Fall 1 gemachten Ausführungen.

Modellzug j → ↓ i		Zug 1	Zug 2	Zug 3	Zug 4
	Zugzahl	18 [1]	20 [2]	12	24
Zug 1	18 [1]	n_{M11}	**16** + n_{w12}	n_{M13}	n_{M14}
Zug 2	20 [2]	n_{M21}	n_{M22}	n_{M23}	n_{M24}
Zug 3	12	n_{M31}	n_{M32}	n_{M33}	n_{M34}
Zug 4	24	n_{M41}	n_{M42}	n_{M43}	n_{M44}

[1] 16 Züge im Takt, 2 individuelle Zeitlagen
[2] 16 Züge im Takt, 4 Verstärkerzüge

Tabelle 2: Beispiel für Zugfolgematrix nach Fall 2

Alternativ wäre es auch möglich, die relevanten Modellzüge zu splitten in einen Anteil mit Festlegungen und einen Anteil ohne Festlegungen. Der Anteil mit Festlegungen entspräche dann dem Fall 1. Für das Beispiel in Tabelle 2 hieße das, Zug 1 zu splitten in einen Zug 1a mit 16 Fahrten und einen Zug 1b mit 2 Fahrten sowie den Zug 2 zu splitten in einen Zug 2a mit 16 Fahrten und einen Zug 2b mit 4 Fahrten.

Fall 3:
Wie in Fall 2 ist die Anzahl der vorgegebenen Zugfolgefälle n_{FFij} im Matrixfeld ij sowohl kleiner n_i als auch kleiner n_j. Im Fall 3 können jedoch zu der vorgegebenen Anzahl der Zugfolgefälle n_{FFij} keine weiteren aufgrund individueller Zeitlagen hinzukommen, d.h. die Anzahl ist absolut fix. Ein Beispiel für einen derartigen Fall liegt z.B. dann vor, wenn an eine Zugfahrt im Integralen Taktfahrplan immer eine zugehörige Rangierfahrt gebunden ist, diese Bindung aber nicht bei den Zügen in individueller Zeitlage existiert. Tabelle 3 zeigt ein Beispiel für eine entsprechende Matrix.

Für Komplementärzugfolgefälle gelten die bei der Erläuterung von Fall 1 gemachten Ausführungen.

Modellzug j → ↓ i		Zug 1	Zug 2	Zug 3	Zug 4
	Zugzahl	18 [1]	20 [2]	12	24
Zug 1	18 [1]	n_{M11}	**16**	n_{M13}	n_{M14}
Zug 2	20 [2]	n_{M21}	n_{M22}	n_{M23}	n_{M24}
Zug 3	12	n_{M31}	n_{M32}	n_{M33}	n_{M34}
Zug 4	24	n_{M41}	n_{M42}	n_{M43}	n_{M44}

[1] 16 Züge im Takt, 2 individuelle Zeitlage
[2] 16 Züge als Rangierfahrt an Zug 1 gebunden, 4 weitere gleichartige Rangierfahrten

Tabelle 3: Beispiel für Zugfolgematrix nach Fall 3

Eine Aufsplittung wäre auch hier möglich. Die Zugfolge 1b $\wedge$ 2b wäre hier festzulegen mit $n_{FF1b2b} = 0$.

Ein weiteres, häufig vorkommendes Beispiel ist der Ausschluss von bestimmten Zugfolgen, d.h in diesem Fall ist $n_{FFij} = 0$.

2.3 Rechengang für die Fälle 1 und 2

Da der Fall 1 als ein Sonderfall des Falles 2 angesehen werden kann, lässt sich für beide der gleiche Rechengang verwenden.

Die Summe der Zugfolgefälle ist immer gleich der Summe der Züge in allen Modellzuggruppen:

$$N = \sum_{i=1}^{m} n_i = \sum_{j=1}^{m} n_j = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} n_{ij} \qquad (1)$$

Die Summe der festgelegten Zugfolgefälle fällt für die Berechnung der Erwartungswerte für die Anzahl Zugfolgefälle in den verbleibenden Feldern heraus. Die verbleibende Summe der Zugfolgefälle N_v errechnet sich folglich aus:

$$N_v = N - \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} n_{Fij} \qquad (2)$$

mit n_{Fij} = festgelegte Anzahl der Zugfolgefälle im Matrixfeld ij

Der Erwartungswert für die Anzahl der Zugfolgefälle beträgt, wenn sowohl in Zeile i als auch in Spalte j kein Wert n_{Fij} festgelegt ist:

$$n_{Mij} = \frac{n_i \times n_j}{N_v} \qquad (3)$$

Enthält die betrachtete Zeile i oder die betrachtete Spalte j Matrixfelder mit festgelegten Werten n_{Fij} für die Anzahl der Zugfolgefälle, so sind die Werte n_i bzw. n_j um diese zu reduzieren. Die Formel lautet dann

$$n_{Mij} = \frac{\left(n_i - \sum_{j=1}^{m} n_{Fij}\right) \times \left(n_j - \sum_{i=1}^{m} n_{Fij}\right)}{N_v} \qquad (4)$$

mit n_{Fij}: vorgegebene Zugfolgefälle

Werden alle Werte n_{Fij} außer den festgelegten auf 0 gesetzt (siehe Ziff. 2.1), so ist diese Formel (4) für alle zu berechnenden Erwartungswerte gültig. Wie in der Fallunterscheidung dargelegt, ergeben sich in den Fällen, in denen $n_i > \sum_{j=1}^{m} n_{Fij}$ und $n_j > \sum_{i=1}^{m} n_{Fij}$ ist, zusätzliche Erwartungswerte n_{wij} zu den vorgegebenen Werte n_{Fij}.

2.4 Rechengang für den Fall 3

Für den Fall 3 konnte keine geschlossene Lösung gefunden werden. Mit Hilfe einer Iteration lässt sich jedoch eine hinreichend genaue Lösung ermitteln.

Zunächst werden für alle Matrixzeilen und -spalten, in denen sich ein Wert $n_{FFij} > 0$ befindet, die Erwartungswerte genauso wie für den Fall 2 berechnet. Diese Erwartungswerte werden mit n_{Mij0}^* bezeichnet. Für alle Felder mit festgelegter Anzahl der Zugfolgefälle n_{Fij} müssen dann die nach Fall 2 zusätzlich berechneten Erwartungswerte n_{wij} zeilen- bzw. spaltenweise auf die Matrixfelder verteilt werden, bei denen kein Wert n_{FFij} festgelegt ist. Dies geschieht mit Hilfe des im Folgenden beschriebenen Iterationsverfahrens. Die übrigen Felder der Matrix werden zunächst nicht betrachtet.

<u>Definitionen</u>

Mit der reduzierten Anzahl der Züge redn wird die Anzahl der Züge in der Modellzuggruppe, vermindert um die vorgegebenen Zugfolgefälle, bezeichnet:

$$redn_i = n_i - \sum_{j=1}^{m} n_{FFij} \qquad \text{mit } n_{FFij} = \text{festgelegte Zugfolgefälle in Feldern der Zeile i}$$

bzw.

$$redn_j = n_j - \sum_{i=1}^{m} n_{FFij} \qquad \text{mit } n_{FFij} = \text{festgelegte Zugfolgefälle in Feldern der Spalte j}$$

Mit der reduzierten Anzahl der Züge redN wird die Anzahl aller Züge (= Zugfolgefälle), vermindert um die Anzahl der vorgegebenen Zugfolgefälle, bezeichnet:

$$redN = N - \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} n_{FFij}$$

Die reduzierte Summe der Züge je Zeile $redN_i$ bzw. je Spalte $redN_j$ gibt an, auf wie viele Züge der Zeile i bzw. der Spalte j die vom Soll abweichende Anzahl der Folgefälle verteilt werden kann.

$$redN_i = redN - redn_j$$

bzw.

$$redN_j = redN - redn_i$$

Erwartungswerte in den Iterationsschritten:

zeilenweise Verteilung: n_{Zijx}^*

spaltenweise Verteilung: n_{Sijx}^*

mit x = Nr. des Iterationsschrittes

1. Iterationsschritt

Für jede Zeile i werden die zusätzlich berechneten Erwartungswerte n_{wij} aus dem Rechengang für den Fall 2 auf die Folgefälle in den Spalten j, für die kein n_{Fij} festgelegt ist, d.h. auf die Anzahl $redN_i$, folgendermaßen verteilt:

$n^*_{Zij1} = 0$ wenn ein Wert n_{FFij} festgelegt ist,

in allen übrigen Fällen

$$n^*_{Zij1} = \frac{\sum_{j=1}^{m} n_{wij}}{redN_i} \times redn_j \qquad (5)$$

mit n_{wij} = zusätzliche Erwartungswerte in Zeile i

Entsprechend wird die Verteilung für jede Spalte j auf die Anzahl $redN_j$ vorgenommen.

$n^*_{Sij1} = 0$ wenn ein Wert n_{FFij} festgelegt ist,

in allen übrigen Fällen

$$n^*_{Sij1} = \frac{\sum_{i=1}^{m} n_{wij}}{redN_j} \times redn_i \quad (6)$$

mit n_{wij} = zusätzliche Erwartungswerte in Spalte j

Für alle Matrixfelder ij, bei denen sowohl in Zeile i als auch in Spalte j Werte n_{FFij} vorkommen, wird somit sowohl ein Wert $n_{Zij1}{}^*$ als auch ein Wert $n_{Sij1}{}^*$ berechnet. Die Zeilensumme n_i ist folglich um die Summe $N^*_{Si1} = \sum_{j=1}^{m} n^*_{Sij1}$ zu groß und die Spaltensumme n_j um die Summe $N^*_{Zj1} = \sum_{i=1}^{m} n^*_{Zij1}$ zu groß. Die Werte sind im folgenden Iterationsschritt zu verteilen.

2. Iterationsschritt

Für Felder der Zeile i gilt:

$n^*_{Zij2} = 0$ wenn ein Wert n_{FFij} festgelegt ist,

in allen übrigen Fällen

$$n^*_{Zij2} = -\frac{N^*_{Si1}}{redN_i} \times redn_j \quad (7)$$

Für Felder der Spalte j gilt:

$n^*_{Sij2} = 0$ wenn ein Wert n_{FFij} festgelegt ist,

in allen übrigen Fällen

$$n^*_{Sij2} = -\frac{N^*_{Zj1}}{redN_j} \times redn_i \quad (8)$$

Für alle Matrixfelder ij, bei denen sowohl in Zeile i als auch in Spalte j Werte n_{FFij} vorkommen, tritt ein Effekt ähnlich wie nach dem Iterationsschritt 1 auf. In diesem Fall sind jedoch die Zeilensumme $N^*_{Si2} = \sum_{j=1}^{m} n^*_{Sij2}$ und die Spaltensumme $N^*_{Zj2} = \sum_{i=1}^{m} n^*_{Zij2}$ zu klein.

Weitere Iterationsschritte

Die weiteren Iterationsschritte erfolgen wechselweise analog zu Iterationsschritt 1 bzw. Iterationsschritt 2. Die Iteration kann abgebrochen werden, sobald alle $n_{Zijx}{}^*$ und $n_{Sijx}{}^*$ kleiner als ein festgelegter Grenzwert sind. Bei einem Grenzwert von 0,005 dürfte die Berechnung der Erwartungswerte hinreichend genau sein.

Die endgültigen Erwartungswerte der Zugfolgefälle für die Felder der Zugfolgematrix, die sich entweder in einer Zeile oder einer Spalte mit einem Wert n_{FFij} befinden (außer Feldern, für die n_{FFij} festgelegt ist), ergeben sich durch Summation der Einzelwerte:

$$n^*_{Mij} = n^*_{Mij0} + \sum_{x=1}^{z} n^*_{Zijx} + \sum_{x=1}^{z} n^*_{Sijx} \qquad (9)$$

mit $n_{Mij0}{}^*$ = Erwartungswerte nach Rechengang für Fall 2
und z = Anzahl der Iterationsschritte

Erwartungswerte für die übrigen Felder

$$n_{ij} = \frac{(n_i - \sum_{j=1}^{m} n^*_{Mij}) \times (n_j - \sum_{i=1}^{m} n^*_{Mij})}{N_v - \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} n^*_{Mij}} \qquad (10)$$

mit $n_{Mij}{}^*$ = Matrixfelder nach Gleichung 9

2.5 Gemischter Rechengang für die Fälle 2 und 3

Es sind Fahrplanstrukturen denkbar, bei denen die Anzahl der Zugfolgefälle feldweise nach Fall 2 (Fall 1 eingeschlossen) und feldweise nach Fall 3 festgelegt werden. Der Rechengang läuft dann prinzipiell wie nach dem oben beschriebenen für den Fall 3 ab. Bei den Feldern, bei denen Festlegungen entsprechend Fall 2 getroffen sind, gehen die Werte n_{wij} dann nicht in das Iterationsverfahren ein.

2.6 Kompatibilität mit dem Ganglinienverfahren nach WAKOB

Die beschriebenen Rechengänge sind sowohl für die Betrachtung des gesamten Betriebszeitraumes oder Teilen davon als auch für die stundenweise Betrachtung nach dem Ganglinienverfahren geeignet. Die Zugfolgefälle sind dann für den betrachteten Teil des Betriebszeitraumes festzulegen bzw. beim Ganglinienverfahren für jede Stunde gesondert.

Da bei der stundenweisen Betrachtung nach dem Ganglinienverfahren die Anzahl der Zugfolgefälle insgesamt sehr klein ist, werden die Unterschiede zwischen dem Rechengang nach Fall 2 und dem Rechengang nach Fall 3 sehr klein bzw. verschwinden ganz.

2.7 Rechengang für das erweiterte Ganglinienverfahren nach WAKOB/GAST

Bei diesem verfeinerten Verfahren ist zusätzlich zu der gesonderten Festlegung der Zugfolgefälle für jede Stunde zu unterscheiden, ob der festgelegte Zugfolgefall innerhalb der Stunde auftritt oder beim Übergang von einer Stunde zur nächsten. Der Übergang von einer Stunde zur nächsten kann selbstverständlich nur für genau einen Zugfolgefall festgelegt werden.

Aufgrund dieser vielfältigen Bindungen gibt es auch für die Fälle 1 und 2 keine geschlossenen Lösungen, jedoch kann mit Hilfe eines Iterationsverfahrens eine Lösung gefunden werden. Hierzu werden die Zugfolgefälle innerhalb der Stunde und im Übergang zur nächsten gesondert ermittelt. Dies gelingt, indem die Matrix der Zugfolgefälle für den Übergang zur nächsten Stunde um m Spalten nach rechts erweitert wird. Unter diesen zusätzlichen Spalten wird dann die Matrix für die folgende Stunde angeordnet, die wiederum um m Spalten nach rechts erweitert wird. Für alle folgenden Stunden wird entsprechend vorgegangen.

Bei der Anwendung des erweiterten Ganglinienverfahrens ist Bedingung, dass alternativ gilt:

$n_{FFij} = 0$ oder
$n_{Fij} = n_i = n_j$ oder
$n_{FFij} = n_i = n_j$

Liegt keine der Bedingungen vor, so ist die Zugfamilie i oder die Zugfamilie j aufzusplitten mit einem Anteil der Züge a, für den die zweite bzw. die dritte Bedingung gilt, und den Anteil b mit den restlichen Zügen. Ist die Festlegung vom Typ Fall 2 (n_{Fij}), so bleiben die Felder ia $\wedge$ jb, ib $\wedge$ ja und ib $\wedge$ jb frei und die Anzahl der Zugfolgefälle wird wie die übrigen freien Felder berechnet. Beim Typ Fall 3 (n_{FFij}) ist die Anzahl der Zugfolgefälle für diese Felder mit „0“ zu besetzen.

Rechenschritte:

In den Rechenschritten gelten folgende Vereinbarungen für die Indizierung:

- m Anzahl der Zugfamilien
- h betrachtete Stunde (Stunde, in der der erste Zug des Zugfolgefalls verkehrt)
- Ü betreffend den Übergang von Stunde h zur folgenden Stunde

Beispiel: $n_{ij,Ü,h}$ bezeichnet Zugfolgefälle im Übergang von Stunde h zu Stunde h+1
Hinweis: Für die letzte Stunde ist die folgende Stunde gleich der ersten Stunde des Untersuchungszeitraums.

1) Festlegung der Anzahl fixer Zugfolgefälle für die betroffenen Matrixfelder für die Zugfolgefälle innerhalb einer Stunde und ggfs. Festlegung des jeweils einen Zugfolgefalls für den Übergang von der Stunde h zur folgenden Stunde h+1. In die leere Matrix der Anzahl der Zugfolgefälle werden zunächst die Felder, die die Stunde h selbst betreffen, mit festgelegten Werten n_{FFij} belegt. Wenn der Zugfolgefall des Übergangs zur folgenden Stunde festgelegt werden soll, ist

in das entsprechende Feld bzw. Feld $n_{FFij,Ü,h}$ eine „1" einzutragen. Bei den übrigen Feldern, die den entsprechenden Übergang betreffen, gilt $n_{ij,Ü,h} = 0$.
Wenn keine Festlegung „1" erfolgt, kann in den Feldern des Übergangs für $n_{FFij,Ü,h}$ allenfalls „0" eingetragen werden.

Wenn gilt $n_{FFij,h} = n_{FFij,h+1} \neq 0$, so ist $n_{ij,Ü,h} = n_{FFij,Ü,h} = 0$

Festlegungen haben Auswirkungen auf andere Felder der Matrix. Für Felder in der betrachteten Matrix h gilt: Wenn $n_{FFij} \neq 0$ ist, gilt für die Berechnung des Komplementärfeldes $j \wedge i$, dass die Anzahl der zu berücksichtigenden Züge n_i bzw. n_j um „1" zu verringern ist. Ähnliches gilt, wenn innerhalb der Stunde mehrere Festlegungen ein Kette bilden, z.B $i \wedge j$ und $j \wedge k$ die Kette $i \wedge j \wedge k$ bilden: dann ist auch für den Zugfolgefall $k \wedge i$ ein Abzug von 1 vorzunehmen. Solche Abzüge werden in den folgenden Schritten formelmäßig als $a_{ij,h}$ berücksichtigt.

Zusammenfassend ergeben sich Abzüge in folgenden Fällen:

- Zugfolgefall mit sich selbst (i = j)
- Komplementärfall $i \wedge j$, wenn $n_{FFji} \neq 0$
- Komplementärfall einer Kette von Festlegungen

Des Weiteren sind folgende Zugfolgefälle ausgeschlossen:

- Wenn $n_{FFij,Ü,h-1} > 0$, ist Zug j der erste in der Stunde h und kann, falls noch weitere Züge innerhalb der Stunde h verkehren, nicht als Zug i einen Zugfolgefall im Übergang zur Stunde h+1 bilden. Es gilt dann der Abzug $a_{i,Ü,h} = 1$ für alle Felder der Zeile i = j im Übergang zu Stunde h+1.
- Entsprechendes gilt für den umgekehrten Fall: Falls $n_{FFij,Ü,h} > 0$, gilt für die Spalte j = i des Übergangs von der vorherigen Stunde h-1 der Abzug $a_{j,Ü,h-1} = 1$.

In allen übrigen Fällen sind $a_{ij,h}$, $a_{i,Ü,h}$ und $a_{j,Ü,h-1} = 0$.

2) Die Anzahl der zu berücksichtigenden Züge ist zu bestimmen. Für die Zellen der Matrix, die die betrachtete Stunde h betreffen, ist es die jeweilige Anzahl Züge gemäß der Ganglinie $n_{i,h}$ bzw. $n_{j,h}$.
Für die Zellen, die den Übergang zur folgenden Stunde h+1 betreffen, sind die jeweiligen Werte $n_{i,h}$ und $n_{j,h+1}$ einzusetzen.
Für die nächste Stunde wird dann h zu h+1 und h+1 zu h+2, usw.
Nach Abschluss der Arbeitsschritte 1 und 2 könnte die Matrix unter der Annahme von 5 Modellzügen folgendermaßen aussehen:

		Zug 1	Zug 2	Zug 3	Zug 4	Zug 5	Zug 1	Zug 2	Zug 3	Zug 4	Zug 5	Zug 1	Zug 2	Zug 3	Zug 4	Zug 5	Zug 1
		n_{1h}	n_{2h}	n_{3h}	n_{4h}	n_{5h}	$n_{1,h+1}$	$n_{2,h+1}$	$n_{3,h+1}$	$n_{4,h+1}$	$n_{5,h+1}$	$n_{1,h+2}$	$n_{2,h+2}$	$n_{3,h+2}$	$n_{4,h+2}$	$n_{5,h+2}$	$n_{1,h+3}$
Zug 1	n_{1h}	$n_{FF,h,11} = 0$					0										
Zug 2	n_{2h}		$n_{FF,h,22} = 0$					0									
Zug 3	n_{3h}			$n_{FF,h,33} = 0$					0								
Zug 4	n_{4h}				$n_{FF,h,44} = 0$					0							
Zug 5	n_{5h}																
Zug 1	n_{1h+1}						$n_{FF,h+1,11} = 0$	$n_{FF,h+1,12} = 0$	$n_{FF,h+1,13} = n_{1h+1}$			0	0	0	0	0	
Zug 2	n_{2h+1}						$n_{FF,h+1,21} = 0$	$n_{FF,h+1,22} = 0$				0	0	0	$n_{FFÜ,h+1,24} = 1$	0	
Zug 3	n_{3h+1}						x		$n_{FF,h+1,33} = 0$			0	0	0	0	0	
Zug 4	n_{4h+1}									$n_{FF,h+1,44} = 0$		0	0	0	0	0	
Zug 5	n_{5h+1}											0	0	0	0	0	
Zug 1	n_{1h+2}											$n_{FF,h+2,11} = 0$					0
Zug 2	n_{2h+2}												$n_{FF,h+2,22} = 0$				
Zug 3	n_{3h+2}													$n_{FF,h+2,33} = 0$			
Zug 4	n_{4h+2}														$n_{FF,h+2,44} = 0$		
Zug 5	n_{5h+2}																
Zug 1	n_{1h+3}																$n_{FF,h+3,11} = 0$

Rot: Felder mit Festlegungen $n_{FF,h+x,ij}$ oder $n_{FFÜ,h+x,ij} = 1$

Violett: Felder, bei denen sich aus Festlegungen 0 ergibt bzw. Felder (x), in denen n_i bzw. n_j um „1" zu reduzieren ist.

Tabelle 4 Aufbau der Matrix bei Anwendung des erweiterten Ganglinienverfahrens

3) Ermittlung der reduzierten Anzahl Züge je Zugfamilie
Die reduzierte Anzahl Züge gibt an, wie viele Züge einer Zugfamilie noch nicht durch Festlegungen innerhalb der Stunde oder im Übergang gebunden sind und somit noch in die Berechnung der Anzahl wahrscheinlicher Zugfolgefälle eingehen können. Für jede Stunde h ist je Zeile der folgende Wert zu berechnen, wobei die Stunde selbst und der Übergang zur nachfolgenden Stunde zu berücksichtigen sind.

$$redn_{i,h} = n_{i,h} - \left(\sum_{j=1}^{m} n_{FFij} + \sum_{j=1}^{m} n_{FFij,Ü,h} \right)$$

$$redn_{i,Ü,h} = \max(0;\ redn_{i,h} - a_{i,Ü,h})$$

Analog gilt für die Spalten in jeder Stunde h, dass die Stunde selbst und der Übergang von der vorhergehenden Stunde zu berücksichtigen ist.

$$redn_{j,h} = n_{j,h} - \left(\sum_{i=1}^{m} n_{FFij} + \sum_{i=1}^{m} n_{FFij,Ü,h-1} \right)$$

$$redn_{j,Ü,h-1} = \max(0;\ redn_{j,h} - a_{j,Ü,h-1})$$

Ermittlung der reduzierten Anzahl Züge je Zeile bzw. je Spalte
Für die Zellen, die die betrachtete Stunde h betreffen, ergeben sich die Werte zu:

$$redN_{i,h} = \sum_{j=1}^{m} redn^{*}_{j,h}$$

$$\text{mit} \quad redn^{*}_{j,h} = \begin{cases} 0, \text{ wenn } n_{FFij} = 0, \text{ sonst} \\ \max(0, redn_{j,h} - a_{ij,h}) \end{cases}$$

und

$$redN_{j,h} = \sum_{i=1}^{m} redn^{*}_{i,h}$$

$$\text{mit} \quad redn^{*}_{i,h} = \begin{cases} 0, \text{ wenn } n_{FFij} = 0, \text{ sonst} \\ \max(0, redn_{i,h} - a_{ij,h}) \end{cases}$$

Für die Zellen, die den Übergang zur folgenden Stunde h+1 betreffen, gilt

$redN_{i,Ü,h} = 0$, wenn im Übergang "1" festgesetzt ist, sonst:

$$redN_{i,Ü,h} = \sum_{j=1}^{m} redn^{*}_{j,Ü,h} \times redn_{i,Ü,h} \,/\, redn_{i,h}$$

$$\text{mit} \quad redn^{*}_{j,Ü,h} = \begin{cases} 0, \text{ wenn } n_{FFij,Ü,h} = 0 \\ redn_{j,Ü,h} \end{cases}$$

Für die Zellen, die den Übergang von der vorhergehenden Stunde h-1 betreffen, gilt

$redN_{j,Ü,h-1} = 0$, wenn im Übergang "1" festgesetzt ist, sonst:

$$redN_{j,Ü,h-1} = \sum_{i=1}^{m} redn^{*}_{i,Ü,h-1} \times redn_{j,Ü,h} \,/\, redn_{j,h+1}$$

$$\text{mit} \quad redn^{*}_{i,Ü,h-1} = \begin{cases} 0, \text{ wenn } n_{FFij,Ü,h-1} = 0 \\ redn_{i,Ü,h-1} \end{cases}$$

Außerdem sind für die Matrixfelder, die den Übergang betreffen, die Summen der reduzierten Anzahl Züge für jede Stunde zu bestimmen.

$$SredN_{i,Ü,h} = \sum_{j=1}^{m} redn_{j,Ü,h}$$

und

$$SredN_{j,Ü,h-1} = \sum_{i=1}^{m} redn_{i,Ü,h-1}$$

4) Iterationsschritt 0
Ermittlung der Anzahl Zugfolgefälle innerhalb einer Stunde h:

Die Basiswerte für die Matrixfelder der Stunde h, die keine Festlegungen $n_{FFij,h}$ enthalten, errechnen sich zu:

$$n_{ij,h,0}{}^{*} = \frac{redn_{i,h} \times \max(0; redn_{j,h} - a_{ij,h})}{redN_{i,h} + redN_{i,Ü,h} / SredN_{i,Ü,h}}$$

Ermittlung der Anzahl Zugfolgefälle im Übergang von der Stunde h zur Stunde h+1:
Die Basiswerte für die Matrixfelder für den Übergang zu der folgenden Stunde h+1, die keine Festlegungen $n_{FFij,Ü,h}$ enthalten, errechnen sich zu:

$$n_{ijÜ,h,0}{}^{*} = \frac{redn_{i,Ü,h} \times redn_{j,Ü,h} / SredN_{i,Ü,h}}{redN_{i,h} + redN_{i,Ü,h} / SredN_{i,Ü,h}}$$

Für alle Werte $n_{ij,h,0}{}^{*}$ bzw. $n_{ijÜ,h,0}{}^{*} = 0$ gilt, dass sie in die weitere Iteration nicht einbezogen werden. Abwechselnd werden in den folgenden Iterationsschritten x für die Spalten (ungerader Iterationsschritt) und die Zeilen (gerader Iterationsschritt) die Summen geprüft. Wenn die Abweichungen zu den zugehörigen Zugzahlen in allen Stunden klein genug sind, ist die Berechnung beendet. Anderenfalls werden die Spalten- bzw. Zeilenwerte angepasst.

5) Ungerader Iterationsschritt (x = 1, 3, 5, …)

   a) Es werden für alle Stunden die Spaltensummen gebildet für die jeweiligen Spalten j = 1 … m, die die betrachtete Stunde h und den Übergang von der vorhergehenden Stunde h-1 betreffen.

   $$N_{j,x-1} = \sum_{i=1}^{m} n_{ij,h,x-1}{}^{*} + \sum_{i=1}^{m} n_{ij,Ü,h-1,x-1}{}^{*}$$

   Hinweis: Für die erste Stunde ist die Stunde h-1 die letzte Stunde des Untersuchungszeitraumes

   b) Wenn für alle Spaltensummen gilt: $|N_{j,x-1} - n_j|$ ist kleiner als der festgelegte Abweichungs-Grenzwert, so ist die Iteration abgeschlossen, weiter mit Ziff. 7).

   c) Verteilung der Abweichungen in den Feldern mit Werten $n_{ij,u}{}^{*}$:

   Wenn $n_{ij,h,x-1}{}^{*} = 0 \quad \Rightarrow n_{ij,h,x}{}^{*} = 0$

   sonst $\quad \Rightarrow n_{ij,h,x}{}^{*} = n_{ij,h,x-1}{}^{*} + \frac{(n_{j,h} - N_{j,h,x-1}) \times \max(0, redn_{i,h} - a_{ij,h})}{redN_{j,h} + redN_{j,Ü,h-1} / SredN_{j,Ü,h-1}}$

   d) Verteilung der Abweichungen in den Feldern mit Werten $n_{ijÜ,h-1,u}{}^{*}$:

   Wenn $n_{ijÜ,h-1,x-1}{}^{*} = 0 \quad \Rightarrow n_{ijÜ,h-1,x}{}^{*} = 0$

   sonst $\quad \Rightarrow n_{ijÜ,h-1,x}{}^{*} = n_{ijÜ,h-1,x-1}{}^{*} + \frac{(n_{j,h} - N_{j,h,x-1}) \times redn_{i,Ü,h-1} / SredN_{j,Ü,h-1}}{redN_{j,h} + redN_{j,Ü,h-1} / SredN_{j,Ü,h-1}}$

6) Gerader Iterationsschritt (x = 2, 4, 6, …)

   a) Es werden für alle Stunden die Zeilensummen gebildet für die jeweiligen Zeilen i = 1 … m, die die betrachtete Stunde h und den Übergang zu der folgenden Stunde h+1 betreffen

   $$N_{i,x-1} = \sum_{j=1}^{m} n_{ij,h,x-1}{}^{*} + \sum_{j=1}^{m} n_{ijÜ,h,x-1}{}^{*}$$

   Hinweis: Für die letzte Stunde ist die folgende Stunde die erste Stunde. Entsprechend ist der Übergang nach der letzten Stunde definiert.

   b) Wenn für alle Zeilensummen gilt: $|N_{i,x-1} - n_i|$ ist kleiner als festgelegter Abweichungs-Grenzwert, so ist die Iteration abgeschlossen, weiter mit Ziff. 7).

c) Verteilung der Abweichungen bei in den Feldern mit Werten $n_{ij,g}{}^{*}$:

Wenn $n_{ij,h,x\text{-}1}{}^{*} = 0 \quad \Rightarrow n_{ij,h,x}{}^{*} = 0$

sonst $$\Rightarrow n_{ij,h,x}{}^{*} = n_{ij,h,x\text{-}1}{}^{*} + \frac{(n_{i,h} - N_{i,h,x\text{-}1}) \times \max(0, redn_{j,h} - a_{ij,h})}{redN_{i,h} + redN_{i,Ü,h} / SredN_{i,Ü,h}}$$

d) Verteilung der Abweichungen bei in den Feldern mit Werten $n_{ijÜ,h,g}{}^{*}$:

Wenn $n_{ijÜ,h,x\text{-}1}{}^{*} = 0 \quad \Rightarrow n_{ijÜ,h,x}{}^{*} = 0$

sonst $$\Rightarrow n_{ijÜ,h,x}{}^{*} = n_{ijÜ,h,x\text{-}1}{}^{*} + \frac{(n_{i,h} - N_{i,h,x\text{-}1}) \times redn_{j,Ü,h} / SredN_{i,Ü,h}}{redN_{i,h} + redN_{i,Ü,h} / SredN_{i,Ü,h}}$$

7) Die Anzahl der Zugfolgefälle innerhalb der Stunde steht für die einzelnen Matrixfelder nach Abschluss der Iteration fest:

$n_{ij} = n_{ij,x}{}^{*}$ für alle Felder ij

mit

x letzter Laufindex für die Iteration

8) Die Anzahl der Zugfolgefälle für den Betriebszeitraum errechnet sich dann zu:

$$n_{ij,ges} = \sum_{h=1}^{H} (n_{ij,h} + n_{ij,Ü,h})$$

3. Berechnungsbeispiel

Gegeben sei das in der Abbildung unter Ziff. 1 aufgeführte Betriebsprogramm für eine Hauptstrecke im Mischbetrieb.

lfd. Nr.	Modell-zug	Stundengruppen																								Σ
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	
1	ICE							1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1			18
2	IC								1		1		1		1		1		1		1		1			8
3	RE	1					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20
4	RB							2	2	1	1		1		1		2	2	2		1		1			16
5	Gz	2	3	5	4	3	2	1	1	1		1	1		1	1	1	1	2		1	3	3	5	4	46
	Σ	3	3	5	4	3	3	5	6	5	4	3	5	2	5	3	6	5	7	2	5	6	7	6	5	108

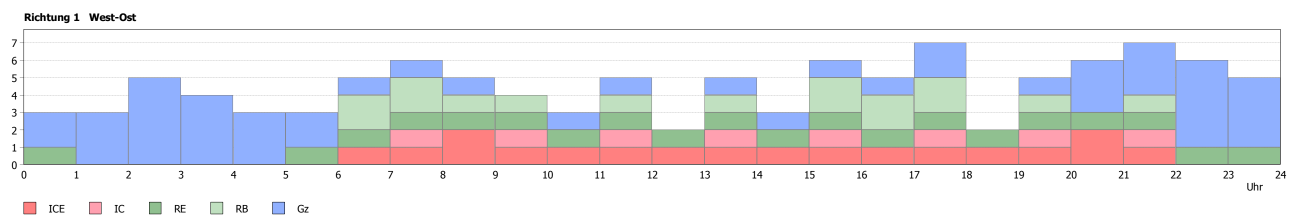


Tabelle 5: Betriebsprogramm (Tagesganglinie der Zugfahrten)

Im ersten Rechengang sind die Erwartungswerte für die Zugfolgefälle nach POTTHOFF als Vergleichsbasis ermittelt worden. Sie sind in
Tabelle 6 aufgeführt.

	lfd. Nr. j →	1	2	3	4	5
	Modellzug	ICE	IC	RE	RB	Gz
↓ lfd. Nr. i	Anzahl	18	8	20	16	46
1	18	3,00	1,33	3,33	2,67	7.67
2	8	1,33	0,59	1,48	1,19	3,41
3	20	3,33	1,48	3,70	2,96	8,52
4	16	2,67	1,19	2,96	2,37	6,81
5	46	7,67	3,41	8,52	6,82	19,59

Tabelle 6: Erwartungswerte der Zugfolgefälle nach POTTHOFF

Tabelle 7 zeigt die Erwartungswerte für Zugfolgefälle nach WAKOB/GAST (erweitertes Ganglinienverfahren). Auf eine Zusammenstellung der Matrizen für die einzelnen Stunden wird hier verzichtet, es sind nur die über den Tag addierten Werte aufgeführt.

	lfd. Nr. j →	1	2	3	4	5
	Modellzug	ICE	IC	RE	RB	Gz
↓ lfd. Nr. i	Anzahl	18	8	20	16	46
1	18	1,753	2,001	5,246	3,894	5,106
2	8	1,957	0	1,914	2,045	2,083
3	20	5,282	1,927	1,07	3,754	7,967
4	16	3,979	2,119	3,702	2,25	3,95
5	46	5,029	1,953	8,067	4,056	26,894
$\sum$	108	18	8	20	16	46

Tabelle 7: Erwartungswerte der Zugfolgefälle nach WAKOB/GAST (erweitertes Ganglinienverfahren)

Es ist ersichtlich, dass bei dem Rechenverfahren nach WAKOB/GAST die Erwartungswerte für die Anzahl der Zugfolgefälle Reisezug $\wedge$ Reisezug sowie Güterzug $\wedge$ Güterzug ansteigen, während die Anzahl der Zugfolgefälle Reisezug $\wedge$ Güterzug und umgekehrt kleiner wird. Dies entspricht der zugrunde gelegten Fahrplanstruktur mit der weitgehenden Entmischung der Verkehrszeiträume des Reise- und Güterverkehrs.

Für den Rechengang mit festgelegten Zugfolgefällen werden folgende Annahmen getroffen:

- ▹ 16 ICE-Züge fahren im Takt, die beiden übrigen sind Zusatzzüge, die im Vor- bzw. Auslauf auf die betrachtete Strecke übergehen, d.h. sie verkehren auf der betrachteten Strecke im individuellen Fahrplan, ICE-Züge folgen nicht aufeinander und nicht mit IC innerhalb der Stunde.
- ▹ Die RE-Züge fahren im Takt, d.h. sie folgen nicht aufeinander. 16 der 20 RE-Züge sind am Anfangsbahnhof Abbringer zu den 16 im Takt verkehrenden ICE und folgen diesen unmittelbar, siehe [1)] in folgender Tabelle.
- ▹ Die IC-Züge fahren im Takt, d.h. sie folgen nicht aufeinander und nicht mit ICE innerhalb der Stunde. Wenn in einer Stunde ein IC verkehrt und in der folgenden ein RB, liegt der IC direkt vor dem RB, d.h. die Übergangsfolge von einer Stunde zur nächsten ist festgelegt [2)].

- Wenn in einer Stunde ein RB verkehrt, liegt er direkt vor dem ICE, dies ist in 11 Stunden der Fall [3)]. Die übrigen 5 RB-Züge verkehren als Verstärker in individuellen Fahrplänen. RB-Züge folgen nicht aufeinander.

Damit ergeben sich folgende festgelegte Zugfolgefälle innerhalb der Stunde und im Übergang (RB aufgeteilt auf zwei Zugfamilien):

			innerhalb der Stunde						im Übergang zur Folgestunde					
			ICE	IC	RE	RB	RB	Gz	ICE	IC	RE	RB	RB	Gz
lfd. Nr.	Modellzug	Anz.	18	8	20	5	11	46	18	8	20	5	11	46
1	ICE	18	**0**	**0**	1[1)]				**0**					
2	IC	8	**0**	**0**						**0**			1[2)]	
3	RE	20			**0**						**0**			
4a	RB	5				**0**	**0**					**0**	**0**	
4b	RB	11	1[3)]			**0**	**0**					**0**	**0**	
5	Gz	46												
	Σ	108	11		16								2	

1) Stunden 7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22
2) Stunden 8,16
3) Stunden 7,8,9,10,12,14,16,17,18,20,22
Fett = absolut fix in jeder Stunde

Tabelle 8: Festgelegte Zugfolgefälle

Zum Vergleich mit der Rechnung nach POTTHOFF wird die Berechnung im ersten Schritt für den gesamten Betriebszeitraum durchgeführt. Die Erwartungswerte der Zugfolgefälle sind Tabelle 9 dargestellt, wobei die vorab gemäß Fall 2 genau festgelegten Zugfolgefälle grün und die als Mindestwerte gemäß Fall 3 festgesetzten Zugfolgefälle blau hinterlegt sind.

			ICE	IC	RE	RB	RB	Gz
lfd. Nr.	Modellzug	Anz.	18	8	20	5	11	46
1	ICE	18	0	0	16,152	0,158	0,284	1,406
2	IC	8	0	0	0,457	0,473	2,851	4,219
3	RE	20	1,985	2,289	0	1,349	2,428	11,97
4a	RB	5	0,562	0,642	0,373	0	0	3,423
4b	RB	11	11	0	0	0	0	0
5	Gz	46	4,453	5,089	3,018	3,021	5,438	24,982
	Σ	108	18	8	20	5	11	46

Tabelle 9: Festgelegte Zugfolgefälle und Erwartungswerte für die nicht festgelegten bei Betrachtung des gesamten Betriebszeitraumes

Es ist ersichtlich, dass die festgelegten Werte für Zugfolgefälle die anderen beachtlich beeinflussen. Die tageszeitliche Trennung von Reise- und Güterverkehr kommt hier jedoch noch nicht deutlich zum Ausdruck. Im Folgenden werden deshalb die Ergebnisse für einen Rechengang in Kombination mit dem Ganglinienverfahren nach WAKOB/GAST aufgezeigt (Zusammenfassung der Werte aus den Einzelmatrizen für die Stunden). Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 dargestellt.

			ICE	IC	RE	RB	RB	Gz
lfd. Nr.	Modellzug	Anz.	18	8	20	5	11	46
1	ICE	18	0	0,3	16	0	0,3	1,4
2	IC	8	1,086	0	0,035	0,214	3,981	2,703
3	RE	20	1,938	3,373	0	2,48	1,538	10,672
4a	RB	5	0,262	1,44	0	0	0	3,298
4b	RB	11	11	0	0	0	0	0
5	Gz	46	3,734	2,887	3,965	2,306	5,181	27,928
	$\sum$	108	18	8	20	5	11	46

Tabelle 10: Festgelegte Zugfolgefälle und Erwartungswerte für die nicht festgelegten in Kombination mit dem erweiterten Ganglinienverfahren

Bei dieser Berechnungsweise sind sowohl die Mischung der Modellzüge in den einzelnen Tagesstunden als auch die Randbedingungen des Integralen Taktfahrplanes sehr gut berücksichtigt. Diskrepanzen zu den allgemeinen Erfahrungen bezüglich Fahrplanstrukturen sind nicht ersichtlich. Die bei ausschließlich wahrscheinlichkeits-theoretischer Betrachtung im Zugfolgefall ICE $\wedge$ ICE aufgetretene Unplausibilität ist hier beseitigt.

4. Empfehlungen

Für die Berechnung der Leistungsfähigkeit von Strecken und Knoten mit Integralem Taktfahrplan ergibt die Berechnungsweise mit Vorgabe von Zugfolgefällen für die Züge, die feste Fahrplanbindungen haben, dem tatsächlichen Betriebsgeschehen nahe kommende Werte. Soweit die Tagesganglinien für alle Modellzüge bekannt sind, ist eine Kombination mit dem Ganglinienverfahren anzuraten. In allen anderen Fällen ist eine Aufteilung des Betriebszeitraumes in die Teilbetriebszeiträume

- Zeitraum mit Integralem Taktfahrplan
- übriger Zeitraum

vorzunehmen. Bei einer Rechnung über den Betriebszeitraum insgesamt können inplausible Ergebnisse auftreten.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Bei Anwendung analytischer Verfahren für die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Strecken und Knoten ermöglicht das vorgestellte Verfahren eine Berücksichtigung der Fahrplanbindungen in Integralen Taktfahrplänen oder andere strenge Fahrplanbindungen bei der Aufstellung der Matrix der Zugfolgefälle. Die hilfsweise Anwendung des fahrplanabhängigen Verfahrens für derartige Probleme kann damit entfallen.

Das tatsächliche Betriebsgeschehen wird hinreichend genau abgebildet, wenn das Verfahren entweder mit dem Ganglinienverfahren von WAKOB/GAST kombiniert wird oder Matrizen der Zugfolgefälle zunächst für die Betriebszeiträume mit und ohne Integralem Taktfahrplan aufgestellt und anschließend zusammengefasst werden.

Das Verfahren wurde in überarbeitete Versionen der Programmpakete LUKS® [6] und SLS PLUS [5] implementiert und kann den Anwendern zur Verfügung gestellt werden.

Literaturverzeichnis

[1] G. Hertel und D. Ludwig, „Kundenorientierte Leistungsuntersuchungen im Netz der Eisenbahn,“ *Bahn Report 97, Hestra-Verlag,* 1997.

[2] G. Potthoff, Verkehrsströmungslehre, Band 1, 3. Auflage, Berlin: Transpress, 1981.

[3] H. Wakob, Ableitung eines generellen Wartemodells zur Ermittlung der planmäßigen Wartezeiten im Eisenbahnbetrieb unter besonderer Berücksichtigung der Aspekte Leistungsfähigkeit und Anlagenbelastung, Aachen: Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 36, 1984.

[4] K. Schultze, „30 Jahre "STRELE" - Rückblick und aktuelle Weiterentwicklungen der analytischen Methode,“ *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR),* 5 2015.

[5] Schultze + Gast Ingenieure, „SLS PLUS,“ [Online]. Available: http://www.s-g-ingenieure.de/html/sls_plus.html.

[6] VIA Consulting & Development, „LUKS,“ [Online]. Available: http://www.via-con.de/development/luks.

Die Autoren:

Dr. Ing. Ingolf Gast

Teilhaber Schultze + Gast Ingenieure.
i.gast@s-g-ingenieure.de

Dr. Ing. Kurt Schultze
Teilhaber Schultze + Gast Ingenieure.
k.schultze@s-g-ingenieure.de