

Kapazitätsermittlung für Teilnetze unter Variation von Routing und Infrastrukturszenarien

In einem mehrstufigen Verfahren lassen sich realisierbare Trassen für Teilnetze unter Nutzung linearer Optimierer und Berücksichtigung verschiedener Routings ermitteln. Dadurch kann abgeschätzt werden, welche Kombinationen von infrastrukturellen oder betrieblichen Maßnahmen erforderlich sind, um ein bestimmtes Verkehrsaufkommen im Netzkontext abzuwickeln – insbesondere, wenn sich Trassen unterschiedlicher Relationen überlagern.



1. Einleitung

In hochausgelasteten Bahnnetzen, insbesondere auf Mischverkehrsstrecken, kommt es häufig zu Trassenkonflikten innerhalb oder zwischen den Verkehrsarten. Wird eine Mehrung des Angebots im Schienenpersonenverkehr angestrebt, kann es sein, dass selbst die heutigen Güterverkehrszahlen kaum oder nicht mehr realisierbar sind. Mit wachsendem Aufkommen im Güterverkehr konkurrieren dessen Trassen auch miteinander, insofern verschiedene Quelle-Ziel-Relationen abschnittsweise den gleichen Laufweg aufweisen. In allen Fällen werden betriebliche Maßnahmen oder Ausbauten der Infrastruktur notwendig, welche zu erarbeiten sind. Liegen Prognosezugzahlen für die einzelnen Relationen vor, kann eine Kapazitätsbetrachtung in Abhängigkeit dieser Mengengerüste erfolgen. Diese Kapazitätsbetrachtung erfolgt jedoch nicht als bedientheoretische Leistungsfähigkeitsuntersuchung, sondern als fahrplanabhängige Betrachtung. (Eine spätere Bewertung der resultierenden Neu-/ Ausbaumaßnahmen per „Analytik“ zur Absicherung einer ausreichenden Nennleistung ist davon unberührt. Diese bietet sich allein schon an, um die Erkenntnisse auch fahrplanunabhängig abzusichern.) Für diesen Zweck wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem sich verfügbare Kapazität als mögliche Zugzahl je Relation in einem mehrstufigen Verfahren unter Nutzung linearer Optimierung ermitteln lässt. Die ei-

gentliche Fahrplankonstruktion wird dabei von der Kapazitätsberechnung entkoppelt. Dadurch kann eine Aussage dazu getroffen werden, welche Kombination von Infrastrukturmaßnahmen zielführend ist, um ein bestimmtes Verkehrsaufkommen abwickeln zu können. Insbesondere ist möglich, sowohl unterschiedliches Routing als auch die Überlagerung von Relationen auf einem Teilnetz zu modellieren. Erste Praxiserfahrungen unter Anwendung dieses Verfahrens werden in diesem Artikel dargestellt. Bewährt es sich in weiteren Studien, so ist eine wiederkehrende Anwendung und die Integration von Fahrplankonstruktion und Kapazitätsberechnung denkbar.

Ein ähnlicher Ansatz wird mit „OpSysTra“ (Optimierte Verknüpfung von Systemtrassen) im Rahmen der industrialisierten Fahrplanung und fahrplanbasierten Infrastrukturentwicklung verfolgt [1]. Das Verfahren arbeitet mit einer simultanen Belegung und zielt auf ein globales Optimum des gesamten Fahrplans. Wie im hier vorgestellten Ansatz wird mit standardisierten Systemtrassen gearbeitet. Wesentlicher Unterschied ist jedoch, dass die Optimierung anhand einer maximalen Trassenqualität als Verhältnis der tatsächlichen Fahr- und Wartezeit zur minimalen Beförderungszeit erfolgt, wohingegen sich der hier vorgestellte Ansatz stärker auf die realisierbare Anzahl von Trassen fokussiert und als Zielfunktion eine entsprechende Maximierung dieser vorsieht. Ferner wird bei OpSysTra eine neue Belegungsalterna-



Daniel Meurer M. Sc.

Ingenieur bei quattron management consulting GmbH/VIA Consulting & Development GmbH
d.meurer@via-con.de



Madeleine van Hövell M. Sc.

Ingenieurin bei quattron management consulting GmbH/VIA Consulting & Development GmbH
m.vanhoevell@via-con.de



Dr.-Ing. Thorsten Bükler

Geschäftsführer bei quattron management consulting GmbH/VIA Consulting & Development GmbH
th.bueker@via-con.de

tive nur dann in das Modell aufgenommen, wenn sie zur Verbesserung der Zielfunktion beitragen kann, wohingegen hier ausschließlich mit vordefinierten Rohtrassen gearbeitet wird. Das ist in der Formulierung des Algorithmus einfacher, jedoch ist das Routing der Belegungsalternativen von diesen Rohtrassen abhängig.

Im Rahmen des DFG-Projekts ATRANS steht die Entwicklung von Algorithmen für einen optimierten und anforderungsge-

rechten Fahrplan mit effizienter Infrastrukturnutzung im Vordergrund [2, 3]. Auch dort erfolgt die Systematisierung des Netzes durch vorkonstruierte Systemtrassen des Güterverkehrs, die mit dem Personenverkehr verschnitten werden und ggf. andere Laufwege nutzen können. Ebenfalls handelt es sich um ein mehrstufiges Verfahren, allerdings sind Konfliktlösungsalgorithmen in den Optimierungsprozess der Belegung integriert, wohingegen der hier vorgestellte Ansatz keine automatisierte Interaktion zwischen Fahrplankonstruktion und Belegungsoptimierung zulässt. Die Belegungsoptimierung beinhaltet hierbei die Belegung mit einer vorkonstruierten Zugfahrt, ohne dass es zu Konflikten zwischen zwei Zugfahrten kommt.

2. Der mehrstufige Ansatz

Das hier vorgestellte Verfahren eignet sich komplementär zu einer analytischen (warteschlangenbasierten) Leistungsfähigkeitsbetrachtung. Im Gegensatz zur Analytik handelt es sich hier um eine fahrplanabhängige Betrachtung, d.h. die ermittelte Trassenzahl kann nach erfolgter Optimierung in ein reales Fahrplangefüge eingepasst werden. Zugleich gewährt das Verfahren mehr Freiheitsgrade im Routing der Verkehre über das betrachtete Netz.

In diesem Artikel wird ausschließlich der Güterverkehr variiert; grundsätzlich ist das Verfahren aber auch auf den Personenverkehr übertragbar. Bevor der Optimierungsprozess vorgestellt wird, erfolgt

zunächst eine Abgrenzung der genutzten Begrifflichkeiten anhand von Bild 1.

Ein Szenario entspricht einer spezifischen Infrastruktur mit oder ohne Neubzw. Ausbaumaßnahmen. Szenarien müssen sich jedoch nicht zwangsläufig in der Infrastruktur unterscheiden, auch betriebliche Aspekte können variieren. Relationen fassen (Roh-)Trassen mit gleicher Quelle und gleichem Ziel, aber unter Umständen verschiedenen Laufwegen (oder auch unterschiedlicher Fahrdynamik) zwischen diesen beiden Punkten zusammen. Eine Relation kann somit eine oder mehrere Trassen umfassen. In Bild 1 kann es Trassen von Quelle 1 zum Ziel über Knoten A und Knoten B geben. Ferner wird ersichtlich, dass Trassen von Quelle 1 mit Trassen von Quelle 2 um Kapazität konkurrieren. Szenario 1 unterscheidet sich in einer neuen Fahrmöglichkeit zwischen Quelle 2 und Ziel, welche die Konkurrenzsituation aus Szenario 0 entspannen kann.

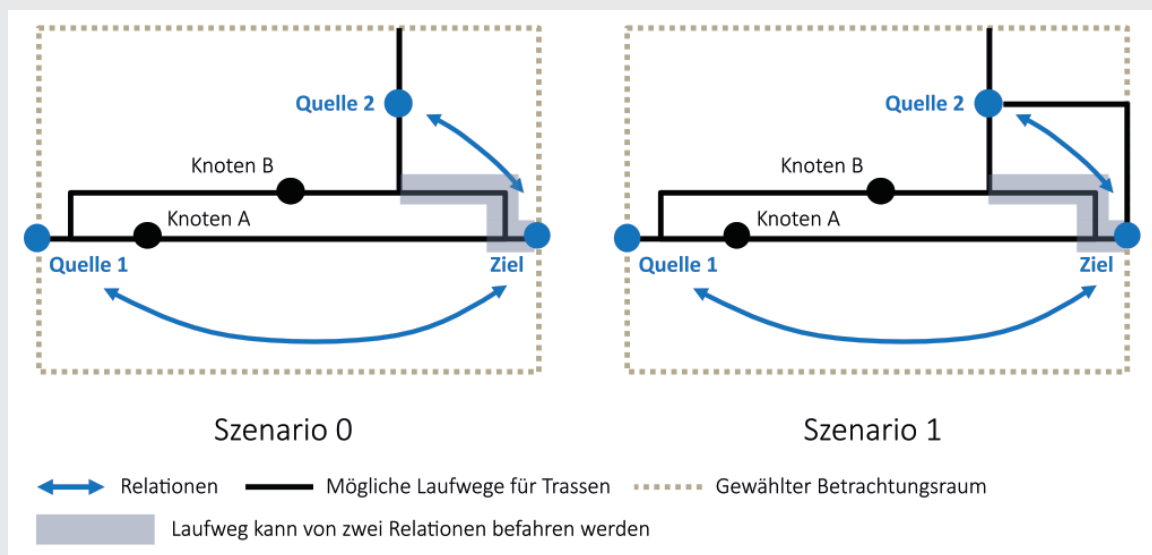
Bild 2 zeigt den grundsätzlichen Ablauf des Optimierungsprozesses. Allgemein lässt er sich in die drei Teilprozesse „Vorüberlegungen“, „Fahrplankonstruktion“ und „Optimierer“ gliedern, welche in den nachfolgenden Unterkapiteln detaillierter erläutert werden.

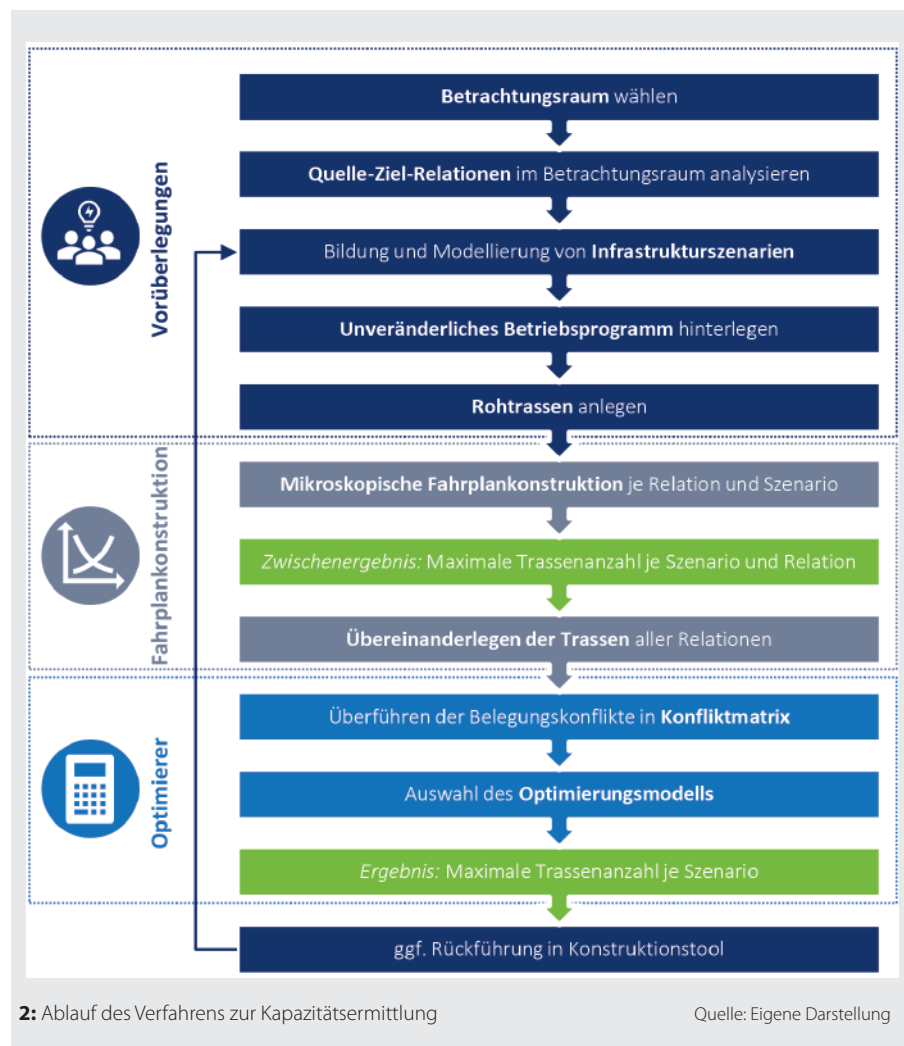
2.1. Vorüberlegungen zur Definition von Szenarien und Relationen

Anhand der vorhandenen Quelle-Ziel-Verkehre im Betrachtungsraum werden sinnvolle Relationen für den Schienengü-

terverkehr gebildet. An dieser Stelle ist Ingenieursverstand und Ortskenntnis gefragt. Orientieren kann man sich an überregionalen Verkehren, die den Betrachtungsraum durchqueren, etwa von und zu Seehäfen, großen Rangierbahnhöfen oder Industrieanlagen. Wichtig sind hier vor allem die Ein- und Ausbruchpunkte dieser Verkehre. Der Betrachtungsraum sollte so gewählt werden, dass er mehrere dieser Relationen umfasst. Ggf. kann es sinnvoll sein, an oder kurz vor größeren Knoten zu schneiden, um ein abgegrenztes Teilnetz zu erhalten, das möglichst wenig Zugfahrten enthält, die nur auf einem kurzen Abschnitt in den Betrachtungsraum einbrechen. Eine Regel zur Wahl der Größe des Betrachtungsraums gibt es nicht, auch hier ist Fingerspitzengefühl gefragt.

Ein weiterer Schritt ist die Bildung verschiedener (Infrastruktur-)Szenarien. Wenn es keine Vorgaben zu möglichen Infrastrukturanpassungen gibt, ist auch hier notwendig, sich Gedanken über kapazitätssteigernde Aus- oder Neubauten zu machen und diese in Szenarien zu bündeln. Geschieht dies von vornherein sorgfältig, führt das zu plausibleren Ergebnissen und zur Vermeidung von Iterationen in Fahrplankonstruktion und Optimierung. Die beschriebenen Schritte sind für jedes Szenario durchzuführen, um am Ende einen Vergleich zwischen verschiedenen Szenarien zu ermöglichen und eine zielführende Kombination von infrastrukturellen oder betrieblichen Maßnahmen über den gesamten Betrachtungsraum zu finden.





Die nachfolgenden Teilschritte sind für jede Relation separat durchzuführen. Die entstehenden konfliktfreien Fahrpläne für jede Relation werden am Ende übereinandergelegt, sodass eine Liste von Belegungskonflikten resultiert, welche in eine

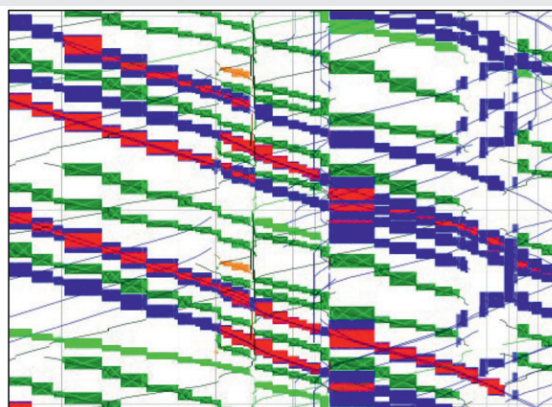
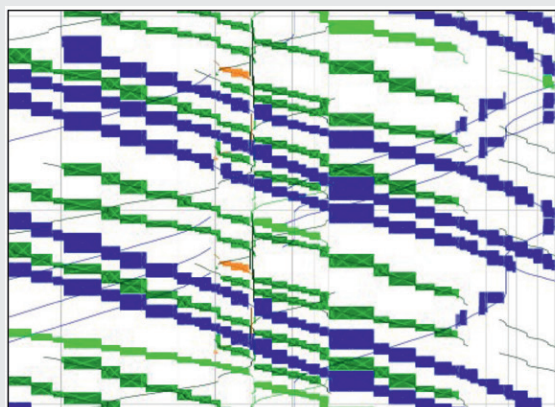
Konfliktmatrix für den Optimierer (vgl. Kap. 2.3) überführt wird.

Ausgangspunkt ist eine modellierte Infrastruktur in einer mikroskopischen Fahrplankonstruktionssoftware (wie beispielsweise LUKS). Nachdem das Be-

triebsprogramm für den Personenverkehr hinterlegt worden ist, können in einem nächsten Schritt Rohtrassen für jede Relation angelegt werden, die möglichen Fahrlagen entsprechen. Die Menge dieser Rohtrassen sollte derart angelegt werden, dass verschiedene Routingmöglichkeiten, etwa über Neu- und Ausbaustrecken, abgedeckt werden. Konfliktfreiheit ist für diese Rohtrassen nicht erforderlich. Auch Durchfahrtszeiten und Laufwege innerhalb einer Betriebsstelle können zunächst beliebig gewählt werden; eine Konkretisierung erfolgt erst im nächsten Schritt der Fahrplankonstruktion. Falls sich die Rohtrassen einer Relation in Hin- und Rückrichtung nicht beeinflussen (abhängig von der tatsächlichen Infrastruktur), werden diese bei der anschließenden Fahrplankonstruktion gemeinsam betrachtet.

2.2. Erzeugen konfliktfreier Trassen je Relation im Fahrplankonstruktionstool

Nachdem für jede Relation diese Rohtrassen angelegt worden sind, erfolgt nun die mikroskopische Fahrplankonstruktion mithilfe des Tools OptDis. OptDis ermöglicht eine automatische Fahrplankonstruktion unter Lösung aller Belegungskonflikte und Erfüllung von Takt- und Umlaufbedingungen, basierend auf dem Prinzip der gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung. Die Konfliktlösung erfolgt durch Biegen, Verschieben, Laufwegänderung innerhalb einer Betriebsstelle oder Trassenabweisung. Das Verfahren arbeitet deklarativ, d.h. mit entsprechenden Lösungsalgorithmen wie Gurobi [4]. Ausgehend von den konfliktbehafteten Rohtrassen erzeugt OptDis für jede Relation getrennt einen Fahrplan mit der Maximalzahl möglicher



3: Sperrzeitentreppen nach dem ersten Optimierungsschritt für eine Relation (links) und konfliktbehafteter Fahrplan nach Übereinanderlegen der Trassen aller Relationen (rechts)

Quelle:
Eigene Darstellung

konfliktfreier Trassen. (Alternativ ist es auch möglich, eine manuelle Fahrplankonstruktion durchzuführen oder einen Ansatz wie OptDis mit dieser zu kombinieren.)

Nach diesem ersten Optimierungsschritt liegt ein konfliktfreier Fahrplan unter Berücksichtigung einer Relation vor; die Trassen in blau sind in Bild 3 links dargestellt. Rechts in Bild 3 sind Konflikte in rot ersichtlich, nachdem die (blauen) Trassen aller Relationen übereinandergelegt worden sind.

2.3. Ermittlung der maximalen Trassenanzahl mittels linearer Optimierung

An dieser Stelle erfolgt der Übergang in das nachgelagerte lineare Optimierungsverfahren. Die Liste von Belegungskonflikten wird in eine Konfliktmatrix überführt, die angibt, welche Trasse mit welcher anderen Trasse Konflikte aufweist. Über Zielfunktionen und Nebenbedingungen ist es möglich, bei der Ermittlung der maximalen Trassenanzahl die Wunschtrassenanzahl je Relation zu berücksichtigen. Diese Wunschtrassenanzahl resultiert beispielsweise aus Prognoserechnungen. Zusätzlich kann eine maximal zulässige Konfliktdauer vorgegeben werden. Dadurch ist der resultierende Fahrplan nicht vollständig konfliktfrei, es wird aber berücksichtigt, dass sich kleinere Konflikte nachgelagert über minimale Anpassungen noch lösen lassen. In diesem Optimierungsschritt erfolgt die Konfliktlösung grundsätzlich ausschließlich simultan durch Trassenabweisung. Die berechnete Trassenanzahl lässt sich in das Fahrplankonstruktionstool rücküberführen, in dem aus einem nahezu konfliktfreien Fahrplan ein konfliktfreier Fahrplan mit einer Trassenanzahl möglichst nah an einer Wunschtrassenanzahl ohne gegenseitige Trassenausschlüsse erzeugt werden kann.

Modellkomponenten

Zur Unterscheidung einzelner Relationen erhält jede Relation eine eigene Kennzahl. Diese werden mit dem Index $k \in K$ gekennzeichnet, wobei K die Menge aller Relationen beschreibt. Relationen können unterschiedlich viele Trassen enthalten. Jede Trasse i ist ein Element der Menge aller Trassen I . Um zu beschreiben, welche Trassen pro Relation gewählt wurden, wird der Index $i_k \in I_k$ definiert. I_k beschreibt hierbei die Menge aller Trassen pro Relation k . Die bereits zuvor erwähnte Konfliktmatrix wird im Optimierungsmodell als Parameter Konflikt_{ij} definiert, wobei $i, j \in I$. Die Größe der

Tabelle 1: Übersicht über alle Modellvarianten

Modellvariante	Maximierung Trassenzahl	Maximierung Relationszahl	Vorgabe einer Mindestzahl an Relationen	Priorisierung einzelner Relationen	Höhere Trassenzahl auf einzelnen Relationen
1	X		X		
2	X		X	X	
3	X		X	X	X
4	X	X			
5	X	X		X	
6	X			X	X

Konfliktmatrix wird durch die Gesamtmenge an Trassen I bestimmt.

Während der optionale Parameter MinTrassen_k die minimale Anzahl an Trassen pro Relation k spezifiziert, kann durch den optionalen Parameter MaxTrassen_k die maximal gewünschte Anzahl Trassen pro Relation k festgelegt werden.

Insgesamt gibt es sechs verschiedene Modellvarianten. In allen Modellvarianten wird die Trassenzahl maximiert. Die Anforderungen an die Relationsanzahlen werden bei den Varianten 1–3 in den Nebenbedingungen berücksichtigt. Die letzten drei Modellvarianten berücksichtigen die Relationsanzahlen mit in der Zielfunktion. Darüber hinaus unterscheiden sich die Varianten lediglich in der Gewichtung der einzelnen Relationen. Tab. 1 gibt einen Überblick über die sechs Modellvarianten.

Je nach Aufgabenstellung und Anforderungen an die Trassenauswahl, etwa ob möglichst viele Relationen bedient werden sollen oder nur eine minimale Anzahl an Relationen vorgegeben ist, ist eine der sechs Modellvarianten auszuwählen. Falls ein Minimalwert anzugeben ist, kommt der Parameter MinRel als minimale Anzahl an Relationen in einer Nebenbedingung zum Einsatz. Falls neben der Anzahl Trassen auch die Anzahl an Relationen maximiert werden soll, ist den Relationen eine Wichtigkeit zuzuschreiben. Diese ermöglicht es, in der Zielfunktion zwischen der Wichtigkeit von Trassen und Relationen zu unterscheiden. Hierfür ist RelWert als Relationswichtigkeit definiert.

Eventuell ist eine Relation bedeutender als eine andere. Um zwischen der Wichtigkeit mehrerer Relationen unterscheiden zu können, wird der Parameter Gew_k als Gewicht pro Relation k definiert. Außerdem kann mittels des Parameters MinGew die minimale Gewichtssumme über alle Relationen festgelegt werden.

Das Modell enthält ausschließlich binäre Entscheidungsvariablen. Zum einen gibt es eine Trassenvariable x_i und zum anderen eine Relationsvariable y_k . Die Variable x_i nimmt den Wert 1 an, falls Trasse i gewählt wird; y_k ist 1 für den Fall, dass mindestens eine Trasse aus Relation k gewählt wird. Aus der nachstehenden Beschreibung der Modellvarianten wird deutlich, dass das gewählte Vorgehen entgegen dem geläufigen „Trial-and-Error“ der händischen Fahrplankonstruktion zu einer wesentlichen Objektivierung führt.

Modellvariante 1: Vorgabe einer Mindestzahl zu realisierender Relationen

Die erste Modellvariante wird zunächst mathematisch formuliert und anschließend erläutert.

$$\text{MAX} \sum_{i \in I} x_i$$

unter Bedingung

$$x_i = x_j \quad \forall i, j \in I \quad (1)$$

$$\text{Konflikt}_{ij} \cdot x_i + x_j - 1 \leq 0 \quad \forall i, j \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i_k \in I_k} x_{i_k} \geq \text{MinTrassen}_k \quad \forall k = K \quad (3)$$

$$\sum_{i_k \in I_k} x_{i_k} \leq \text{MaxTrassen}_k \quad \forall k = K \quad (4)$$

$$y_k \leq \sum_{i_k \in I_k} x_{i_k} \quad \forall k = K \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} y_k \geq \text{MinRel} \quad (6)$$

$$x_i, y_k \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (7)$$

In der Zielfunktion wird die Trassenzahl maximiert, wobei die Nebenbedingungen (1) bis (7) eingehalten werden müssen. In Bedingung (1) wird festgelegt, dass die Variable x_i der Variable x_j entspricht für alle $i = j$. Diese Bedingung ist die Voraussetzung für Bedingung (2). Diese sorgt dafür, dass nicht zwei Trassen gewählt werden können, die

sich gegenseitig ausschließen. Für den Fall, dass die Konfliktmatrix angibt, dass Trasse i und j sich ausschließen (d. h. $\text{Konflikt}_{ij} = 1$), kann nur eine von beiden Trassen gewählt werden (d. h. entweder x_i oder x_j hat auf jeden Fall den Wert null).

Bedingung (3) setzt die minimale und Bedingung (4) die maximale Anzahl an Trassen pro Relation fest. In Bedingung (5) wird y_k spezifiziert. y_k darf nur 1 sein, wenn minimal eine Trasse von Relation k gewählt wurde. Bedingung (6) setzt die minimale Anzahl an Relationen fest und Bedingung (7) definiert x_i und y_k als binäre Variablen, die nur die Werte 0 und 1 annehmen können.

Modellvariante 1 stellt die Basisvariante dar, die sich eignet, wenn feststeht, wie viele Relationen insgesamt – also im Regelfall alle – bedient werden sollen. Diese Variante wurde beispielsweise für die in Kapitel 3 beschriebene Kapazitätsermittlung für das Schienennetz am Niederrhein genutzt.

Modellvariante 2: Priorisierung einzelner Relationen

Modellvariante 2 unterscheidet sich von Modellvariante 1 nur durch eine zusätzliche Bedingung. Diese gewichtet die einzelnen Relationen und setzt ein Mindestgewicht für die Summe aller Relationen voraus.

$$\text{MAX} \sum_{i \in I} x_i$$

unter Bedingung (1) – (7)

$$\sum_{k \in K} \text{Gew}_k \cdot y_k \geq \text{MinGew.} \quad (8)$$

Diese Modellvariante kommt zur Anwendung, wenn einzelne Relationen wichtiger sind als andere und entsprechend eher bedient werden sollen. Für den Fall, dass nicht alle Relationen genutzt werden können, ist es so möglich, Hauptrelationen (z. B. für Pendlerverkehr) zu priorisieren.

Modellvariante 3: Priorisierung einzelner Relationen mit höherer Trassenzahl

Auch Modellvariante 3 unterscheidet sich nur durch eine zusätzliche Bedingung von Modellvariante 1. Ähnlich wie in Modellvariante 2 werden die einzelnen Relationen hier gewichtet. Allerdings werden Relationen mehrfach gezählt, falls mehrere Trassen dieser Relation gewählt wurden. In Modellvariante 2 hingegen wird eine Relation nur einfach gezählt; unabhängig davon, wie viele Trassen dieser Relation gewählt wurden.

$$\text{MAX} \sum_{i \in I} x_i$$

unter Bedingung (1) – (7)

$$\sum_{k \in K} \text{Gew}_k \cdot \sum_{i \in I_k} x_i \geq \text{MinGew.} \quad (9)$$

Wenn einzelne Relationen nicht nur eher bedient werden sollen als andere, sondern auch mit einer höheren Trassenzahl, dann sollte Modellvariante 3 genutzt werden.

Modellvariante 4: Bedienung möglichst vieler Relationen

Die Modellvarianten 4 bis 6 berücksichtigen alle nur die Nebenbedingungen (1) bis (5) und (7). Statt eine minimale Anzahl an Relationen vorzugeben, wird neben der Trassenzahl auch die Anzahl an Relationen in der Zielfunktion maximiert. RelWert beschreibt hierbei die allgemeine Wichtigkeit einer Relation im Verhältnis zu einer Trasse.

$$\text{MAX} \sum_{i \in I} x_i + \text{RelWert} \cdot \sum_{k \in K} y_k$$

unter Bedingung (1) – (5); (7).

Für den Fall, dass möglichst viele Relationen bedient werden sollen, ohne eine Mindestanzahl vorzuschreiben, ist es empfehlenswert, Modellvariante 4 zu nutzen. Diese Modellvariante kann auch als Grundlage dienen, um einen plausiblen Mindestwert zu erhalten.

Modellvariante 5: Bedienung möglichst vieler Relationen mit Priorisierung

Modellvariante 5 unterscheidet sich von Modellvariante 4 nur darin, dass jeder einzelnen Relation eine eigene Gewichtung zugeschrieben wird.

$$\text{MAX} \sum_{i \in I} x_i + \text{RelWert} \cdot \sum_{k \in K} \text{Gew}_k \cdot y_k$$

unter Bedingung (1) – (5); (7).

Sollen nicht nur möglichst viele Relationen bedient werden, sondern auch noch einige Relationen vor anderen Relationen priorisiert werden, so ist Modellvariante 5 anzuwenden.

Modellvariante 6: Bedienung möglichst vieler Relationen mit Priorisierung höherer Trassenzahlen

Modellvariante 6 maximiert ebenfalls die Trassenzahl und gewichtete Relationszahl. Allerdings werden hier, ähnlich wie in Modellvariante 3, Relationen mehrfach gewichtet, wenn mehrere Trassen dieser Relation gewählt werden.

$$\text{MAX} \sum_{i \in I} x_i + \text{RelWert} \cdot \sum_{k \in K} \text{Gew}_k \cdot \left(\sum_{i \in I_k} x_i \right)$$

unter Bedingung (1) – (5); (7).

Je mehr einzelne Relationen priorisiert werden sollen, desto eher ist Modellvariante 6 zu empfehlen. Hier werden mehr Trassen auf höher priorisierten Relationen bedient, was allerdings dazu führen kann, dass weniger Relationen insgesamt befahren werden. Für den Fall, dass Hauptrelationen bevorzugt werden müssen, stellt diese Modellvariante eine gute Ermittlung der zu nutzenden Trassen dar.

3. Beispielhafte Kapazitätsermittlung für das Schienennetz am Niederrhein

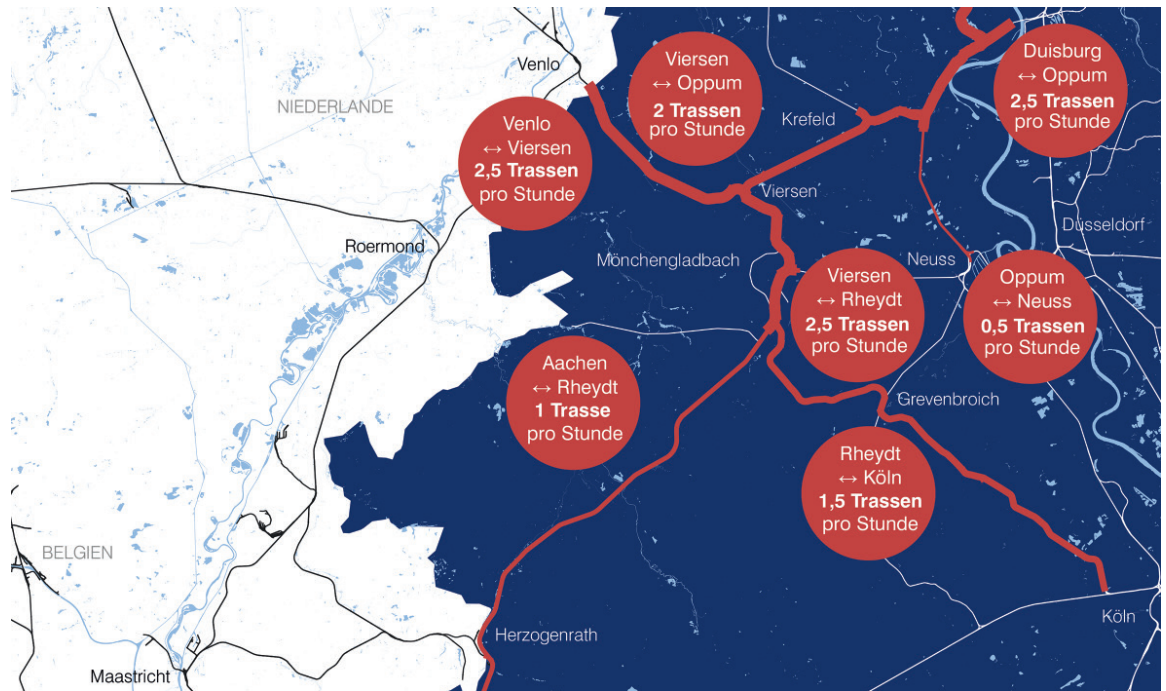
Das mehrstufige Verfahren wurde für das Schienennetz am Niederrhein zwischen Aachen, Mönchengladbach, Venlo, Krefeld und Neuss angewendet. Dort sind bereits die heutigen Güterverkehrszahlen mit der geplanten Ausweitung des Angebots im Personenverkehr kaum oder nicht mehr realisierbar. Die in dieser Gemengelage aufgesetzte Studie [5] hatte zum Ziel, die tatsächlich zu erwartende Nachfrage zu quantifizieren, infrastrukturelle Engpässe zu identifizieren und Maßnahmen zu deren Auflösung zu skizzieren. Auf Basis der ermittelten Engpässe wurden zunächst Einzelmaßnahmen in mehreren Infrastrukturszenarien gebündelt. Die geplanten Angebotsverbesserungen im Personenverkehr wurden als unveränderlich unterstellt, sodass für jedes der Szenarien geprüft wurde, ob die aus den Prognosezugzahlen hervorgehenden Kapazitäten im Güterverkehr bereitgestellt werden können. Bild 4 zeigt die fehlenden Kapazitäten an Güterverkehrstrassen im Betrachtungsraum für den Nullfall, die als Differenz zwischen Prognosezugzahlen und den berechneten Trassenanzahlen abgeleitet wurden.

Ein Szenario, welches die Viersener Kurve, eine Neubautrecke „Rheydter Dreieck“ mit Ausbau der Güterumgehung Mönchengladbach sowie kleinere Ausbauten zwischen Krefeld und Rheinhausen kombiniert, kann die erforderlichen Kapazitäten bereitstellen und stiftet Nutzen für den Güter- und Personenverkehr sowie ein resilientes Netz.

4. Fazit und Ausblick

Der vorgestellte mehrstufige Ansatz, bestehend aus einer Fahrplankonstruktion je Relation (z. B. unter Anwendung von OptDis) und gesamthaften Optimierung der Trassenbelegung unter Berücksichtigung aller Relationen, bietet eine Reihe von Vorteilen. Es lassen sich sowohl unterschied-

4: Fehlende Trassenkapazitäten im Güterverkehr im Nullfall [5]



liche Routings je Relation als auch eine Überlagerung verschiedener Relationen auf einem Teilnetz modellieren. So wird etwa eine großräumige Betrachtung von Systemtrassen, also für Güterverkehr reservierte Zeitslots im Fahrplangefüge, die von Güterzugfahrten genutzt werden können, möglich. Eine abschnittsweise Betrachtung von Systemtrassen ist ungenauer, da die Synchronisation zwischen Netzbereichen nicht korrekt abgebildet werden kann. So kann oft nicht davon ausgegangen werden, dass Trassen am Rand eines Untersuchungsraums nahtlos in den nächsten Untersuchungsraum einbrechen können. Eine Abbildung eines ausreichend großen Untersuchungsraumes dagegen ist momentan mit mikroskopischen Tools nicht effizient leistbar. Langfristig ist eine Integration jedoch denkbar, um die Vorteile eines mikroskopischen Konstruktionstools mit Optimierungsverfahren zu verknüpfen. Auch eine Erweiterung des Verfahrens hinsichtlich Berücksichtigung des Beförderungszeitquotienten als Qualitätsmaß wäre möglich. Ein weiterer Vorteil liegt in der jetzt möglichen Verschneidung von Kapazitäten und Prognosezugzahlen. Durch diesen mehrstufigen Ansatz und die Trennung verschiedener Rechenschritte wird zudem die Transparenz der Ergebnisse gesteigert; die kleinschrittige Vorgehensweise unterstützt eine plausible Erklärung und Deutung. Bei der Bildung von Szenarien und

der Gewichtung der Relationen ist aber dennoch weiterhin Ingenieursverstand gefragt. Eine Einschränkung ergibt sich dadurch, dass auf der Optimierungsebene ausschließlich mit vorkonstruierten Trassen gearbeitet wird, d. h. Änderungen des Fahrwegs einzelner Trassen sind nicht möglich. Lediglich in der Vorbereitung bei Anlegen der Rohtrassen und der relationsspezifischen Vorkonstruktion werden potenzielle Fahrwegänderungen berücksichtigt.

Das Verfahren bietet sich dennoch besonders an, wenn auf einem Netzbereich

viele wechselseitige Trassenausschlüsse z. B. auf Güterverkehrsrelationen vorliegen. Außerdem ist es hilfreich, wenn eine überschlägige und großräumige, aber dennoch fahrplanbasierte Prüfung von Infrastrukturvarianten durchzuführen ist oder verfügbare Kapazitäten mit (Prognose-) Zugzahlen abgeglichen werden sollen. Die Auswirkungen von Ausbaumaßnahmen auf Kapazitäten in Form von realisierbaren Trassenanzahlen können mit dem vorgestellten Verfahren relativ einfach ermittelt werden.

Literatur

- [1] Nachtigall, K.; Noll, O.; Pöhle, D.: Ein innovatives Belegungsverfahren für den zukünftigen industrialisierten Fahrplanprozess. In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (2014) 12
- [2] Weiß, R.; Nachtigall, K.; Martin, U.; Oetting, A.: Bewertung einer effizienten marktgeeigneten Trassenbelegung im spurgeführten Verkehr. In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (2018) 1+2
- [3] Streitzig, C.; Oetting, A.; Martin, U.; Nachtigall, K.: Anforderungsgerechte Algorithmen zur effizienten marktgeeigneten Trassenbelegung. In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (2016) 7+8
- [4] Weymann, F.; Nießen, N.: Unterstützung der Fahrplanfeinkonstruktion mit Optimierungsverfahren. In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (2015) 3
- [5] IHK Mittlerer Niederrhein (Hrsg.): Bedarfs- und Potenzialanalyse für das Schienennetz Kaldenkirchen-Viersen-Mönchengladbach-Rheydt-Krefeld-Neuss.

Summary

Capacity determination for subnetworks under variation of routing and infrastructural scenarios

In a multistage procedure, feasible paths on subnetworks can be determined by using linear optimizers and taking different routings into account. With this, it is possible to estimate on a timetable basis which combination of infrastructural or operational measures are required to manage a special traffic volume in the network context – particularly for highly utilized networks in which tracks of different relation overlap and compete with each other for capacity.