

INHALT UND ERGEBNISSE ZUM MODELL »VERTEILERSGANZZUGBILDUNG«

J. PUHLMANN

Institut für Eisenbahnwesen, Sektion Technologie des Eisenbahntransports

W. WÖHNER

Hochschule für Verkehrswesen »Friedrich List« Dresden Sektion Mathematik,
Rechentechnik und Naturwissenschaften

Eingegangen am 15 April 1986

Abstrakt

Das mathematische Modell und die Zielfunktion der Verteilervariante, deren Aufwand für des Befördern der Güterströme in Ganzzügen von den Versandrichtpunkten zu den Empfangsrichtpunkten und ihr Behandeln in Unterwegsrichtpunkten ein Minimum ist. Das Ergebnis eines rechnergestützten Verfahrens für dieses Optimierungsproblem als Selbstkostensenkungen in der Betriebsführung der Deutschen Reichsbahn.

1. Problemstellung

Gegeben sei ein Eisenbahnnetz als gerichteter und bewerteter Graph mit n Richtpunkten X_i als Knoten und p Güterzugverbindungen $Y_{1,m}$ als Kanten, den Mindestübergangszeiten b_i als Knotenbewertungen und den Entfernungen $a_{1,m}$ zwischen den benachbarten Knoten X_1 und X_m als Kantenbewertungen. In diesem Netz sind Güterströme einer Gutart in Ganzzügen von einem ausgewählten Versandbahnhof zu bekannten Empfangsbahnhöfen zu verteilen. Nach einer Vorverdichtung der Güterströme auf das Niveau der Richtpunkte sind vom Versandrichtpunkt X_i zum Empfangsrichtpunkt X_k $s_{i,k}$ Tonnen der Gutart zu transportieren.

Gesucht ist eine Verteilervariante, deren Aufwand für das Befördern der Güterströme in Ganzzügen von den Versandrichtpunkten zu den Empfangsrichtpunkten und ihr Behandeln in Unterwegsrichtpunkten ein Minimum ist. Diese optimale Verteilervariante ist durch eine Verteilergraphen mit den n Richtpunkten X_i als Knoten und den Zugbildungen $Z_{p,r}$ als Kanten und durch eine Vorschrift, nach der die Ströme den Kanten zugeordnet werden, beschrieben.

2. Mathematisches Modell

Das formulierte Problem läßt sich nach [1] durch ein nichtlineares 0–1-Optimierungsmodell der folgenden Gestalt mathematisch beschreiben:
Zielfunktion (Aufwand einer Verteilervariante):

$$\begin{aligned} y(U, V) &= \sum_p \sum_r \sum_i \sum_k u_{ikpr} s_{ik} (b_p + \sum_{i,m} v_{prlm} a_{1m}) = \\ &= \sum_p \sum_r \sum_i \sum_k u_{ikpr} s_{ik} t_{pr}(U_{pr}, V_{pr}) \rightarrow \text{Minimum} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Nebenbedingungen

1. 0—1-Bedingungen

$$u_{ikpr} \in \{0,1\} \quad \text{für alle } i, k, p, r \quad (2.2)$$

$$v_{prlm} \in \{0,1\} \quad \text{für alle } p, r, l, m \quad (2.3)$$

2. Transportbedingungen

$$\sum_r (u_{ikpr} - u_{ikrp}) = \begin{cases} 1 \\ -1 \\ 0 \end{cases} \text{ für alle } i, k, \begin{cases} p = i \\ p = k \\ \text{sonst} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\sum_m (v_{prlm} - v_{prml}) = \begin{cases} 1 \\ -1 \\ 0 \end{cases} \text{ für alle } p, r, \begin{cases} l = p \\ l = r \\ \text{sonst} \end{cases} \quad (2.5)$$

3. Effektivitätsbedingungen

$$\sum_i \sum_k u_{ikpr} s_{ik} \geq h_{pr} \quad \text{für alle } p, r \quad (2.6)$$

Dabei sind

- u_{ikpr} eine binäre Variable, die angibt, ob der Güterstrom von X_i nach X_k in Zügen der Zugbildung Z_{pr} befördert wird ($u_{ikpr} = 1$) oder nicht ($u_{ikpr} = 0$).
- $U_{pr} = (u_{ikpr})$ die quadratische Verstärkungsmatrix der Ordnung n für die quadratische Verstärkungsmatrix der Ordnung n für die Zugbildung Z_{pr} .

Die Indizes i und k 1-Elemente dieser Matrix sind die Indizes der Versandrichtpunkte X_{pr} und der Empfangsrichtpunkte X_e der Güterströme, die in Zügen der Zugbildung Z_{pr} befördert werden.

- $U = (U_{pr})$ die Verstärkungsblockmatrix für den Verteilergraphen.
- V_{prlm} eine binäre Variable, die angibt, ob die Züge von X_p nach X_r auf der Güterzugverbindung $Y_{1,m}$ fahren ($v_{prlm} = 1$) oder nicht ($v_{prlm} = 0$).
- $V_{pr} = (v_{prlm})$ die quadratische Matrix der Ordnung n für den Leitungsweg von X_p nach X_r .
- $V = (V_{pr})$
- h_{pr} die Mindestbelastung der Zugbildung Z_{pr} .

Ist (U°, V°) die Lösung der formulierten Optimierungsaufgabe, so werden durch $U^\circ = (U_{pr}^\circ)$ die gesuchte optimale Verteilervariante und durch $V^\circ = (V_{pr}^\circ)$ die optimalen Leitungswege zwischen allen Richtpunkten des Netzes angegeben.

Der Verteilergraph besteht aus den Richtpunkten X_i und den Zugbildungen Z_{pr} , für die $U_{pr}^\circ \neq 0$ gilt. Die 1-Elemente der Verstärkungsmatrix U_{pr}° geben an, welche Güterströme in Zügen der Zugbildung Z_{pr} befördert werden.

Nach [2] läßt sich dieses mathematische Modell in die n^2 linearen Teilmodelle

$$T1_{pr} : d_{pr}(V_{pr}) = \sum_1 \sum_m v_{prlm} a_{1m} \rightarrow \text{Minimum}$$

mit den Nebenbedingungen (2.3) und (2.5) und das lineare Teilmodell

$$T2 : y(U, V^0) \rightarrow \text{Minimum}$$

mit den Nebenbedingungen (2.2), (2.4) und (2.6) zerlegen.

Die Lösungen V_{pr}^0 der Teilmodelle $T1_{pr}$ sind nur von Netzdaten nicht aber von den zu verteilenden Güterströmen abhängig. Sie brauchen deshalb nur neu berechnet zu werden, wenn sich die Struktur oder die Kantenbewertungen des Eisenbahnnetzes ändern.

3. Lösungsverfahren

Zur Lösung der Teilmodelle $T1_{pr}$ sind in der Literatur exakte Lösungsverfahren beschrieben. Im Projekt ZBP-V wurde das in [3] veröffentlichte Verfahren von Moore verwendet. Das Verfahren ist in FORTRAN OS/ES für Netze mit maximal 450 Knoten und 2500 Kanten programmiert und erfordert eine Hauptspeicherkapazität von 110 KByte und eine Rechenzeit von maximal 3 Minuten.

Zur Lösung des Teilmodells $T2$ ist das folgende Iterationsverfahren abgeleitet worden:

- (1) Zulässige Anfangslösung
Das Verfahren geht von allen möglichen Zugbildungen über dem optimalen Weg und ihren maximalen Belegungen aus.
- (2) Effektivitätskontrolle
Es werden alle Zugbildungen Z_{pr} gestrichen, die die Effektivitätsbedingungen (2.6) nicht erfüllen.
- (3) Abbruchbedingung
Das iterative Vorgehen wird abgebrochen, wenn alle Zugbildungen die Effektivitätsbedingungen (2.6) erfüllen.
- (4) Optimale Verteilung der Güterströme auf die Zugbildungen. Die zu verteilenden Güterströme werden durch Lösen des Modelles $T2E : y(U, V^0) \rightarrow \text{Minimum}$ mit den Nebenbedingungen (2.2) und (2.4) optimal den Zugbildungen zugeordnet. Anschließend wird mit (2) fortgefahren.

Das Verfahren ist in FORTRAN OS/ES für Netze mit maximal 450 Knoten programmiert und erfordert eine Hauptspeicherkapazität von 180 KByte und eine Rechenzeit von maximal 3 Minuten. Als Ergebnis werden in Form von Drucklisten ausgewiesen

- alle Zugbildungen mit Zugbildungs- und Zugauflöserichtpunkt, ihre Belegungen und die ihnen zugeordneten Güterströme einschließlich Empfangsrichtpunkt und
- eine Laufwegliste zum Vergleich der neuen Laufwege mit denen der Regeltechnologie.

4. Ergebnisse

Im Rahmen der Projektentwicklung wurde die Verteilerganzzugbildung für die Istabfuhr ausgewählter Kohle- und Getreidesorten ermittelt. Bei den insgesamt 37 verschiedenen Rechenvarianten konnten durchweg neue Verteilerzugverbindungen nachgewiesen und vorgeschlagen werden, bei denen Umstellungen eingespart werden können.

Die Ergebnislisten dienen den betriebsleitenden Stellen der Deutschen Reichsbahn als wichtige Grundlage zur technologischen Umsetzung der Optimierungsergebnisse.

Da im Verfahren wichtige Randbedingungen (wie Triebfahrzeugkupplung, Streckenbelegung) nicht berücksichtigt werden, ist nur eine Teilrealisierung möglich.

Im Rahmen der Transportoptimierung zur Reduzierung des Transportaufwandes der Volkswirtschaft ist das Verfahren zur Berechnung von Verteilerzügen ein notwendiges Hilfsmittel, um die neuen Versender-Empfänger-Beziehungen in der Betriebstechnologie der Eisenbahn wirksam werden zu lassen.

Aus diesem Grunde ist vorgesehen, das Projekt in den nächsten Jahren kontinuierlich zu nutzen.

Folgende Anwendungsfälle sind geplant:

- Abfuhr von Kohle (Rohkohle, Brikett) mit aktualisierten Gutströmen
- Abfuhr von Nahrungsmitteln (Getreide, Futtermittel)
- Abfuhr von Baustoffen (Sand, Kies, Zement)
- Abfuhr von Erzeugnissen der chemischen Industrie (Düngemittel, flüssige Brenn- und Treibstoffe).

Neben erheblichen Selbstkostensenkungen in der Betriebsführung der Deutschen Reichsbahn ist durch die Einsparung von Umstellungen eine Entlastung wichtiger Rangierbahnhöfe zu erwarten.

Zusammenfassung

Ausgehend von der Zielstellung der Verteilerganzzugbildung werden ein mathematisches Modell zur optimalen Planung von Verteilerganzzügen in Netzen, die tragenden Lösungsgedanken eines rechnergestützten Verfahrens für dieses Optimierungsproblem und die wesentlichsten Ergebnisse bisher durchgeführter Rechnungen beschrieben.

Literatur

1. WÖHNER, W.: Güterzugbildungsplanung als kombinatorische Optimierungsaufgabe, WZHFV 20 4, 831—840 (1973).
2. WÖHNER, W.: Beiträge zur nichtlinearen Optimierung in Netzen am Beispiel der Güterzugbildungsplanung, Dissertation B, HfV 1976.
3. MOORE, M.: The Shortest Path Through Maze. The Annals of the Computation Laboratory of Harvard University Cambridge, Massachusetts XXX, 1957.

Dipl.-Ing. Jürgen PUELMANN Institut für Eisenbahnwesen; Zentrales Forschungsinstitut des Verkehrswesens der DDR
Hochschuldozent Dr. sc. techn. Winfried WÖHNER DDR-8010 Dresden
Friedrich-List-Platz 1.