

# Werkzeuggestützte Entwicklung eines Integralen Taktfahrplans mit OptiPlan

Wolfgang Hesse und Michael Guckert (Universität Marburg), Johannes Schneider und Andreas Schulz (Bayerische Eisenbahn-Gesellschaft, München)

**Zusammenfassung: (s. separates Blatt am Ende)**

## 1 Einleitung

Die Attraktivität eines Netzes von regelmäßig verkehrenden Verkehrsmitteln hängt nicht nur von der Schnelligkeit und Dichte der Bedienung einzelner Strecken, sondern auch ganz wesentlich von der Qualität seiner Umsteigeverbindungen ab. In Regionen mit ausreichendem Verkehrsaufkommen werden für den Reisezugverkehr seit Jahren erfolgreich Taktfahrpläne eingesetzt. Von einem *Integralen Taktfahrplan (ITF)* spricht man, wenn die Ankunfts- und Abfahrtszeiten an den Knotenbahnhöfen so aufeinander abgestimmt sind, daß die Reisenden auch bei notwendigem Zugwechsel (Umsteigen) ohne übermäßige Zeitverluste ihr Ziel erreichen. Ein *optimaler Integraler Taktfahrplan*, bei dem diese Zeitverluste in der Summe gleich Null sind, ist nur unter bestimmten (durch die Infrastruktur und andere Faktoren gegebene) Randbedingungen möglich. In der Praxis sind diese Bedingungen fast nie gegeben. Damit wird die Erstellung von Integralen Taktfahrplänen zum Optimierungsproblem, für das sich der Einsatz von Computer-gestützten Werkzeugen anbietet.

Die Verknüpfung verschiedener, im Integralen Taktfahrplan vernetzter Linien findet in *Systemknoten(-bahnhöfen)* statt. Die entscheidende Festlegung des Planers, welche Bahnhöfe jeweils Systemknoten werden, erfolgte bislang intuitiv - mit erheblichen Unsicherheiten, ob hierbei das verkehrliche und wirtschaftliche Optimum gefunden wird. Hier setzt nun das neue Werkzeug *OptiPlan* an mit der Zielrichtung, die Systemknoten mit einem mathematischen Optimierungsverfahren festzulegen. Es dient daher nicht dem Ersatz, sondern der Ergänzung der bestehenden Werkzeuge für die technischen und verkehrlichen Planungen (vgl. [Guckert 1997]).

### 1.1 Das Werkzeug *OptiPlan*

*OptiPlan* wurde an der Universität Marburg mit dem Ziel einer verbesserten Planungsunterstützung für ITF entwickelt. Mit seiner Hilfe lassen sich Taktfahrpläne (ggf. nach bestimmten Vorgaben) automatisch erstellen, verändern und bewerten. Die Gesamt-Umsteigequalität eines Fahrplans wird als Zielgröße definiert, die sämtliche Quelle-/Ziel-Beziehungen des Netzes berücksichtigt und die Summe aller *Verlustzeiten* (= Halte-, Umsteige-, und Umwegzeiten)

minimiert. Dabei können auch normierte Erhebungsdaten über Quelle/Ziel-Fahrgastpotentiale als Gewichte von Reisendenströmen berücksichtigt werden.

Die genannte Zielgröße bestimmt die Anwendung verschiedener Operationen zur Plananpassung und -verbesserung. Das Werkzeug ist aber auch auf eine interaktive Arbeitsweise hin ausgelegt, d.h. einzelne Operationen können vom Benutzer (d.h. dem Planer) nach Bedarf ausgewählt werden. Dabei sind manuelle Einstellungen und Korrekturen einzelner Zeitangaben möglich, deren Auswirkungen automatisch über das Netz propagiert werden.

Das Werkzeug beruht – ebenso wie andere vergleichbare Werkzeuge – auf einer Graphen-Repräsentation des Verkehrsnetzes und Algorithmen zur Ermittlung kürzester Wege. Seine besondere Stärke liegt in der Ausnutzung des Algorithmus von Yen (vgl. [Yen 1971]), der  $k$ -kürzeste Wege berücksichtigt und damit ein problemloses Umschalten zwischen verschiedenen Wege-Alternativen ermöglicht. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war es, die objektorientierte Modellierungstechnik auf diskrete Optimierungsprobleme der genannten Art anzuwenden und Vorteile dieser Technik für die gegebene Aufgabenstellung auszunutzen.

## **1.2. Das Modell und seine Kenngrößen**

Die Qualität eines Taktfahrplans mit vorgegebener Taktlänge wird durch die Qualität der Verbindungen des Systems und der dabei auftretenden Verlustzeiten bestimmt. Die Güte einer einzelnen Verbindung ergibt sich aus der Abweichung der gesamten Reisedauer von der theoretisch kürzesten Fahrzeit zwischen Start und Ziel. Diese untere Schranke wird durch die Länge eines kürzesten Weges gegeben. Die Anzahl der betroffenen Reisenden kann dabei zur Gewichtung der einzelnen Verbindungen herangezogen werden.

Für einen Taktfahrplan - definiert durch einen ungerichteten Graphen (Streckennetz) aus Knoten (Bahnhöfen) und Kanten (Streckenabschnitten) sowie einer Menge von ausgezeichneten Wegen (Linien) und einer Taktlänge  $T$  - werden dazu in einer *Verkehrsmatrix* Gewichte für alle Knotenpaare  $(a, b)$  vorgegeben; eine mögliche Interpretation für diese Gewichte ist die Anzahl der Reisenden (Potentiale) von Quellbahnhof  $a$  zu Zielbahnhof  $b$ . Für jedes Paar von Bahnhöfen kann nun das Produkt aus dem zugehörigen Eintrag der Verkehrsmatrix und der genannten Abweichung berechnet werden. Die Summierung über alle Bahnhofspaare liefert eine Kenngröße zur Beschreibung der Güte des Taktfahrplans. Der Wert dieser Summe hängt unmittelbar von der Wahl der Abfahrtszeiten der Linien in den Bahnhöfen ab, da die jeweils kürzeste Verbindung durch die Fahrzeiten und evtl. auftretende Verlustzeiten bestimmt wird.

Daraus ergibt sich die folgende

*Definition:* Sei  $T$  eine vorgegebene Taktlänge und  $TF = (V, E, L, f)$  ein Taktfahrplan über  $T$  mit einer Menge  $V$  von Bahnhöfen, einer Menge  $E$  von Strecken, einer Menge  $L$  von Linien  $L$  und einer Funktion  $f: E \rightarrow \mathbb{Z}$ , die die Fahrzeiten für die Strecken (etwa gegeben in Minuten) festlegt.

Sei  $W = \{w_{v,v'} : v, v' \text{ aus } V\}$  eine durch die Bahnhöfe von  $TF$  indizierte, quadratische Matrix mit ganzzahligen Einträgen. Seien weiter  $d_{v,v'}$  die Länge einer kürzesten Verbindung von  $v$  nach  $v'$  und  $f_{v,v'}$  die Länge der theoretisch kürzest möglichen Verbindung von  $v$  nach  $v'$ . Diese ergibt sich aus den reinen Fahr- und Mindest-Haltezeiten ohne Berücksichtigung von Verlustzeiten. Dann liefert

$$W_T = \sum_{(v,v') \in V \times V} w_{v,v'} (d_{v,v'} - f_{v,v'})$$

die *gewichtete Gesamtverlustzeit* im Taktfahrplan  $TF$ .

Für  $f$  kann auch die Länge des kürzesten Weges als normierende Größe gewählt werden.

Das Modell basiert nicht auf a priori ermittelten Umsteige-Anforderungen für bestimmte Linien, sondern ermittelt diese aus den Gewichten der Verkehrsmatrix und der in Abhängigkeit von den Abfahrtszeiten gewählten Routen. Dazu wird das Streckennetz mit seiner Linienstruktur in einen Graphen transformiert, der die Halte- und Umsteigereignisse mit ihren Ausdehnungen enthält. In diesem sogenannten *Taktzeitengraphen* stehen alle relevanten Größen für die Berechnungen zur Verfügung. Die Gewichte der Matrix können auf die Strecken sowie die Halte- und Umsteigereignisse übertragen werden. Durch eine Auswertung dieser Informationen können weitere Kenngrößen für den Fahrplan ermittelt werden wie Anzahl der Umsteiger/Direktfahrer, mittlere Wartezeit, maximale Wartezeit etc.

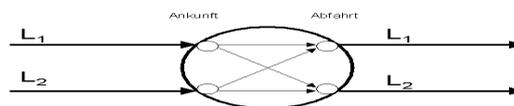


Abb. 1: Ausschnitt aus einem Taktzeitengraphen

Für die interaktive Arbeit mit dem System müssen alle Änderungen am Fahrplan schnell umgesetzt werden und in ihrer Wirkung auf den Fahrplan transparent gemacht werden. Vom

Werkzeug *OptiPlan* werden dazu für jedes Bahnhofspaar (Quelle-Ziel-Beziehung) alle in Frage kommenden Verbindungen gespeichert. Sortiert man die Menge aller Verbindungen eines Quelle-Ziel-Paares  $(v, v')$  aufsteigend nach den Verbindungslängen, so erhält man die kürzeste Verbindung zwischen  $v$  und  $v'$  als Minimum der genannten Sortierung. Eine Änderung an den Abfahrtszeiten einer Linie in einem Bahnhof kann zu einer neuen Sortierung der beschriebenen Menge führen - die Menge selbst ist aber für jede Realisierung gleich. Dies erspart die Neuberechnung der kürzesten Wege und zeigt sofort die Konsequenzen einer Änderung für die übrigen Anschlüsse. Die Neuberechnung von  $W_T$  kann unmittelbar erfolgen.

Da die Verbindungen Wege im Streckennetz darstellen, ermöglicht das sukzessive Bestimmen aller Wege zwischen zwei Bahnhöfen die Ermittlung aller Verbindungen. Zur Berechnung der Wegalternativen wird der Algorithmus von Yen auf das Streckennetz angewendet [Yen 1971]. Dabei wird die Anzahl der zu berücksichtigenden Umwege begrenzt: nur solche Wege werden berücksichtigt, die der besten Verbindung zugrunde liegen können. Dies wird durch eine Abschätzung der ungünstigsten, auf dem kürzesten Weg verlaufenden Verbindung erreicht. Alle Umwege, die diese Länge überschreiten, kommen als Träger der besten Verbindung nicht in Frage. Alle Wege, deren Länge unter dieser Schranke liegt, werden als potentielle Route der kürzesten Verbindung in Betracht gezogen.

Zur automatischen Optimierung der Abfahrtszeiten auf einem gegebenen Taktzeitengraphen werden verschiedene Heuristiken eingesetzt. Diese nutzen neben der Strukturinformation des Graphen die Gewichtsverteilung der Verkehrsmatrix.

### **1.3. Software-technische Realisierung**

Das beschriebene Modell wurde in ein Programm umgesetzt, mit dessen Hilfe Taktfahrpläne neu erstellt, bewertet und modifiziert werden können. Sowohl das Streckennetz und die Linienführung als auch die Gewichte der Reisendenströme können frei definiert werden. Abfahrtszeiten und Fahrzeiten lassen sich interaktiv modifizieren. Neben dieser Möglichkeit, manuelle Veränderungen am Fahrplan vorzunehmen, wurden verschiedene Heuristiken zur automatischen Verbesserung der Anschlüsse in der Software bereits umgesetzt.

Die Systemarchitektur erlaubt eine leichte Anpassung und Erweiterung der verwendeten Ansätze und folgt dem Paradigma der Objektorientierung. Damit wird die Integration weiterer Heuristiken und Bewertungen möglich. Die Realisierung erfolgte ursprünglich in *CLOS* (*Common Lisp Object System*), einer objektorientierten Erweiterung der bekannten

Programmiersprache *Lisp*. Dabei wurde das Programmsystem *Allegro CL 3.0* unter *Windows-NT* eingesetzt.

Inzwischen wurde das Systems in der Programmiersprache *Java* re-implementiert und ein neuer effizienter Algorithmus [MPS 97] für die Berechnung der Wegalternativen verwendet. Damit wird der Einsatz auf weiteren Systemplattformen sowie die Bearbeitung größerer Verkehrsnetze möglich.

## **2. Die Anwendung: Studie zur Neuordnung des Bayern-Takts**

### **2.1. Ziele und Randbedingungen**

Anlaß der Untersuchung war eine im Zuge der schrittweisen Einführung des Bayern-Takts geplante stufenweise Neuordnung des Fahrplans in dem Planungsgebiet, das im Westen, Norden und Osten durch die bayerischen Landesgrenzen, im Süden etwa durch die Linie Würzburg - Nürnberg - Regensburg begrenzt ist. Diese Neuordnung wird aufgrund von Planungen und zu erwartenden Veränderungen bei der Infrastruktur und beim Rollmaterial notwendig:

- Einrichtung einer neuen Verbindungskurve bei Schlömen, die Direktfahrten in der Relation Bayreuth - Hof ohne Fahrtrichtungswechsel in Neuenmarkt-Wirsberg ermöglicht und damit Bayreuth in eine neue Fernverkehrslinie Nürnberg - Dresden einbezieht;
- Einsatz neuer Neigezug-Garnituren auf den Strecken Nürnberg – Bayreuth – Hof – Dresden (VT 605), Regensburg – Hof und Würzburg – Lichtenfels - Hof/Bayreuth mit erheblich verkürzten Fahrzeiten;
- Verkürzung der Fahrzeiten zwischen Würzburg und Nürnberg aufgrund von Streckenausbauten (ABS Iphofen – Nürnberg);
- Inbetriebnahme der geplanten Neubaustrecke Nürnberg - Ingolstadt (voraussichtlich 2003)

Die Studie bezieht sie sich auf den schnellen Regionalverkehr (RE) und seine Einbettung in den Fernverkehr, d.h. die Produkte IC/ICE und IR. Der Regionalbahn- (RB) Verkehr soll in einem zweiten Planungsschritt mit dem dafür weiterzuentwickelnden OptiPlan-Werkzeug geschehen.

Als oberstes Leitziel für die Studie galt die Schaffung eines *kundenorientierten Angebots* nach dem Prinzip des Integralen Taktfahrplans. Dabei soll die Gesamt-Umsteigequalität Priorität vor der Optimierung einzelner Punkt-zu-Punkt-Verbindungen erhalten und die Stärke von Fahrgastströmen bei der Priorisierung von Verbindungen berücksichtigt werden.

Beim überregionalen Fernverkehr wurden Planungsdaten und Vorgaben berücksichtigt, soweit sie zum Zeitpunkt der Planerstellung verfügbar waren. Dazu gehören Vorgaben aus der Fernverkehrsplanung und aus den Fahrplänen benachbarter Regionen bzw. Länder sowie Kantenzeiten aufgrund der zu erwartenden Rahmenbedingungen bei Infrastruktur und Fahrzeugeinsatz. Es wurden aber auch Planungsvarianten betrachtet, die mögliche Modifikationen der Fernverkehrs- und Infrastruktur-Vorgaben zugrunde legen.

## **2.2. Infrastruktur-Bedingungen, Strecken- und Liniennetz**

Das Gerüst für das Liniennetz bilden sieben Fernverkehrslinien, die das Untersuchungsgebiet derzeit berühren oder durchqueren. Dazu kommen 14 Regional-Expresslinien, die vom Planungsteam gemeinsam definiert und numeriert wurden (vgl. das Liniennetz in Abb. 4).

Für die Aufstellung eines ITF wurden die folgenden Bedingungen als ideal angesehen:

- Die wichtigsten Umsteigebahnhöfe sind als Vollknoten ausgelegt, die Hauptknotenzeiten sind dort 00 oder 30.
- Die Kantenzeiten zwischen den wichtigen Umsteigebahnhöfen betragen  $n * T/2 - D$  Minuten (mit  $n = 1, 2, \dots$ ;  $T = 60$  oder  $120$  und  $D \sim 3-10$  Minuten), also z.B. 27, 56 oder 85 Minuten.
- Auf möglichst vielen Strecken wird im Stundentakt gefahren; Zweistundentakte bilden den Ausnahmefall. Auf besonders stark befahrenen Strecken wird ein 1/2-Stundentakt angeboten.

Als Kandidaten für mögliche Teil- bzw. Vollknotenbildungen kamen die 13 Knotenbahnhöfe Bamberg (BA), Bayreuth (BY), Hersbruck (HBR), Hof (HO), Kirchenlaibach (KLB), Lichtenfels (LIF), Marktredwitz (MAK), Nürnberg (N), Regensburg (R), Schwandorf (SD), Schweinfurt (SW), Weiden (WD) und Würzburg (WÜ) in Frage.

Aufgrund der besonderen Infrastrukturbedingungen (mit Fahrzeiten Würzburg - Schweinfurt und Regensburg - Schwandorf je knapp 30 Minuten, Schweinfurt - Lichtenfels und Nürnberg - Schwandorf je knapp 60 Minuten, Nürnberg - Lichtenfels knapp 90 Minuten mit RE und Lichtenfels – Bayreuth - Schwandorf knapp 120 Minuten) ergab sich die Möglichkeit einer Koppelung der drei Knoten Schweinfurt, Lichtenfels und Schwandorf, an die sich - leicht verzerrt - Marktredwitz als Knoten anschließen läßt. Alle drei Knoten lassen sich unter der Voraussetzung als Vollknoten zur Knotenzeit 00 realisieren, daß Regensburg und (teilweise) Nürnberg als Teilknoten mit der Knotenzeit 30 wie im gegenwärtigen Fahrplan beibehalten werden (vgl. die folgenden Varianten A1, A1', B1 und C1).

Alternativ dazu lassen sich als Vollknoten mit Knotenzeit 00 ausgelegte Bahnhöfe Regensburg und Nürnberg mit Bamberg als Vollknoten kombinieren. In diesem Fall werden Schweinfurt, Lichtenfels und Schwandorf zu Halbknoten. (vgl. Varianten A3, B3 und C3).

In Hof läßt sich unter den gegenwärtigen Infrastrukturbedingungen kein Vollknoten realisieren, eine Teilknotenbildung mit der wichtigen Korrespondenz zwischen den Linien 25 und 27 läßt sich jedoch immer erreichen.

### 2.3. Fahrplanvarianten

Im einzelnen ergeben sich drei Hauptvarianten (vgl. Abb. 2) durch die Behandlung des Fernverkehrs auf der Magistrale Würzburg – Nürnberg - München:

- (A) gebündelt
- (B) zeitlich gleichmäßig verteilt im 1/2-Stunden-Takt
- (C) netzorientiert mit geänderter Linienführung und Einbeziehung von Augsburg und Ansbach in den Fernverkehr

Dazu lassen sich jeweils zwei bis drei Untervarianten durch die Festlegung von Knotenzeiten des Fernverkehrs an den Randpunkten Würzburg, Nürnberg und Regensburg bilden:

- (1) Hauptknotenzeit 30
- (2) Mischform: Knotenzeit teils 30, teils 00
- (3) Haupt-Knotenzeit 00

| Knotenzeit WÜ/N/R   | (1) 30  | (2) 30/00 | (3) 00 |
|---------------------|---------|-----------|--------|
| (A) gebündelt       | A1, A1' |           | A3     |
| (B) ½-Std-Takt      | B1*     | B2        | B3*    |
| (C) netz-orientiert | C1      |           | C3     |

\*: Die Angaben der Knotenzeiten beziehen sich auf die hier priorisierten IC-Linien 1 und 8.

Abb. 2: Übersicht über die Fahrplanvarianten

### 2.5 Diskussion der Varianten

Die Bündelung der IC-Linien auf der Magistrale Würzburg-Nürnberg (vgl. die *A-Varianten*) hat den Vorteil, daß in den Hauptknoten anschließende Regionalzüge zur einheitlichen Knotenzeit ankommen bzw. abfahren können und damit sternförmige Umsteigemöglichkeiten geschaffen

werden. Dies wurde in den Untervarianten so weit wie möglich realisiert. Lediglich RE 35 nach bzw. aus Schwandorf wird in keiner der Varianten in Nürnberg zur Knotenzeit angebunden, da der Knotenbildung in Schwandorf höhere Priorität als den Anschlüssen in Nürnberg zugemessen wurde.

Insgesamt führt eine Bündelung zu Überkapazitäten, wie z.B. in Untervariante A1 durch die zeitlich gebündelten Linien IC 1, 4 und 8 sowie teilweise überdehnte Knoten mit Umsteigezeiten von 15 Minuten oder länger. In Untervariante A1' wird IC 8 um genau eine Stunde verschoben, was zu einer besseren Kapazitätsverteilung und einer zusätzlichen Korrespondenz zwischen IC 1 und IC 8 in Nürnberg führt. In Untervariante A3 sind sämtliche Fahrzeiten um eine halbe Stunde verschoben. Dies hat - wegen der Unsymmetrie der 30-er Knoten beim Zweistundenbetrieb - erhebliche Auswirkungen auf das gesamte Planungsgebiet sowie die überregionale Fernverkehrsplanung.

Ein Halbstundentakt auf der Magistrale (vgl. die *B-Varianten*) führt zu einer gleichmäßigeren Kapazitätsauslastung auf dieser Strecke, verschlechtert aber insgesamt die Umsteigequalität. In den Umsteigezentren Würzburg und Nürnberg entstehen jeweils Haupt- und Nebenknoten zu den Taktzeit 30 bzw. 00. Anschließend stündlich verkehrende Regionalverkehrszüge können nur noch an eine der beiden Taktzeiten angebunden werden – daraus resultieren jeweils 30-minütige Wartezeiten für etwa die Hälfte der Umsteiger und damit eine deutlich schlechtere Bewertung dieser Varianten (vgl. unten). Ähnliches gilt für die Anschlüsse der IC-Linien untereinander.

Die *Variante C* lehnt sich an die Hauptvariante A an, lenkt aber die durch die Bündelung entstehenden Überkapazitäten um zugunsten einer besseren Einbindung des Knotens Augsburg und der angrenzenden Region in den Fernverkehr. Statt IC 1 und IC 4 gebündelt von Würzburg über Nürnberg nach München zu führen, wird alternierend jeweils einer der beiden Züge über Ansbach direkt nach Augsburg und München geführt (vgl. Abb. 3).

Abb. 3: Knoten und Linien des ITF für Nordost-Bayern (Variante C)

Zwei neue IC-Halte in Ansbach und Donauwörth können alternierend im Zweistundentakt bedient werden. Die stündliche Bedienung von Würzburg-München über Nürnberg ist im Wechsel durch den direkt verkehrenden IC 4 und die Umsteigeverbindung zwischen IC 1 und IC 8 (wie bei der Untervariante A1') gewährleistet. Untervarianten ergeben sich durch verschiedene Vorgaben der Knotenzeiten in den Hauptknoten Würzburg, Nürnberg und Regensburg.

### **3. Bewertung der Varianten und Empfehlungen**

### 3.1 Ermittlung der Kennzahlen

Nach der Erstellung der Varianten wurden mit Hilfe des Werkzeugs OptiPlan die zugehörigen Kennzahlen berechnet. In der folgenden Tabelle (Abb. 4) werden die Gewichte und die Kennzahlen für die einzelnen Fahrplanvarianten angegeben. Die Kennzahlen stehen für Summen von Verlustzeiten im gesamten betrachteten Netz. Ihre Absolutbeträge sind für die folgende Bewertung unerheblich, vielmehr kommt es auf den relativen Vergleich der Varianten untereinander an.

Die Kennzahlen wurden dabei *ohne Gewichtungsfaktor* (Spalte a), mit einer *Gewichtung*, die sich auf den reinen *Bahnverkehr* bezieht (Spalte b) und mit einer Gewichtung, die den *gesamten Personenverkehr* beschreibt (Spalte c), ermittelt. Die Gewichte bauen auf den Intraplan-Erhebungsdaten zur regionalen Struktur des Personenverkehrs von 1991 auf. Dazu wurde das untersuchte Gebiet in Zellen eingeteilt und der Verkehrsfluß zwischen diesen Zellen aus der Matrix extrahiert. Für den Verkehr zwischen dem Planungsgebiet und dem Rest der Bundesrepublik wurden die Bereiche außerhalb Nordost-Bayerns in Sektoren unterteilt und dann über sogenannte Außenbezüge mit Knoten des untersuchten Gebietes verbunden.

| Variante | Ungewichtet (a) | B-gewichtet (b) | PV-gewichtet (c) |
|----------|-----------------|-----------------|------------------|
| A1       | 13872           | 18798           | 20310            |
| A1'      | 13014           | 18714           | 20532            |
| A3       | 16642           | 22786           | 23764            |
| B1       | 15658           | 24528           | 27718            |
| B2       | 20752           | 24412           | 36494            |
| B3       | 18884           | 26614           | 31136            |
| C1       | 12996           | 19284           | 20386            |
| C3       | 17142           | 23544           | 23994            |

Abb 4: Kennzahlen der Varianten

Die Bewertung hat im wesentlichen die intuitive Einschätzung der Varianten (vgl. die obige Diskussion) bestätigt, bringt jedoch im Detail und im Vergleich der Größenordnungen wichtige Erkenntnisse. So zeigen die Zahlen deutlich die Vorteile der mit "1" gekennzeichneten Varianten

– d.h. des Festhaltens an den bisherigen Haupt-Knotenzeiten an der Magistrale. Dafür sprechen auch Kostengesichtspunkte, da bei den alternativen Varianten zusätzliche Kurse angeboten werden müßten, um wenigstens eine annähernd gute Umsteigequalität herzustellen. Dazu kommt, daß diese Alternativen z.T. erhebliche Auswirkungen auf das deutsche und internationale Fernverkehrsnetz zur Folge hätten..

Bei der Bewertung der B-Varianten ist allerdings anzumerken, daß die Kennzahlen den Vorteil des Halbstundentakts auf der Hauptmagistrale nicht wiedergeben. Dazu hätte es einer geänderten Bewertung mit Berücksichtigung der Wartezeiten von zufällig am Ausgangsbahnhof eintreffenden Fahrgästen bedurft. Außerdem müßten in eine endgültige Bewertung noch die hier nicht betrachteten Regionalbahnlinien einbezogen werden, die zusätzliche Anschlüsse herstellen könnten.

Bei den C-Varianten führte der Abbau von Knoten-Überdehnungen zu einer teilweise geringfügig besseren Bewertung gegenüber den A-Varianten. Der wichtigste Vorteil dieser Variante, nämlich die Nutzung überschüssiger Kapazitäten für die Bedienung einer zusätzlichen Relation Würzburg - München über Ansbach und Augsburg ohne zusätzliche Kosten, geht in diese Bewertung allerdings noch gar nicht ein und würde erst bei einer entsprechend erweiterten Bewertung sichtbar werden.

### **3.2 Empfehlung zur Variantenwahl**

Sowohl aufgrund der Kennzahlen als auch der qualitativen Einschätzung stellt sich die Variante C1 als die günstigste dar und wird deshalb für die künftige Fahrplangestaltung als erste Wahl empfohlen (vgl. Abb. 5).

Abb. 5: Empfohlene Fahrplanvariante: Netzgrafik

Zusammenfassend weist sie folgende Vorteile gegenüber den anderen Varianten auf:

- Sie bedient die Hauptknoten und -relationen gleichmäßig, schafft eine größtmögliche Zahl von sternförmigen Vollknoten und vermeidet durch Verzicht auf Bündelungen Knoten-Überdehnungen und mögliche betriebsbedingte Staugefahren.
- Sie bietet optimale Anschlußverbindungen in den Vollknoten Schweinfurt, Lichtenfels, Schwandorf und relativ gute Anschlußverbindungen in Marktredwitz sowie in den Halbknoten Regensburg und Bamberg. Weitere Halbknoten mit bevorzugten Umsteigeverbindungen bestehen in Hof, Bayreuth, Weiden und Hersbruck .

- Sie schafft zusätzliche Kapazitäten auf der Relation Würzburg - Ansbach - Augsburg - München ohne zusätzliche Kosten. Mittelfristig bietet sie weitere Beschleunigungsmöglichkeiten bei relativ geringem Kosteneinsatz mit punktuellen Streckenbegradigungen und/oder Einsatz von Neigetechnik bis hin zu einer regelmäßigen Bedienung der Relation Frankfurt - München auf kürzestem Wege über Ansbach mit einer Gesamtfahrzeit unter drei Stunden. Zusammen mit der bestehenden ICE-Verbindung über Stuttgart ergäbe sich daraus ein Angebot Frankfurt-München im Halbstundentakt.
- Sie fügt sich in die bisherige Fernverkehrsplanung ein und macht kaum Veränderungen im Umfeld des Untersuchungsgebiets notwendig. Die einzige nennenswerte Auswirkung betrifft die einstündige Verlegung der IC-Linie 8. Diese könnte jedoch im nördlichen Anschlußbereich vorteilhaft genutzt werden, wenn man IC 8 über Halle/S. statt wie bisher über Leipzig führen und in Naumburg oder Weißenfels mit IC 9 korrespondieren ließe. Dies würde u.a. zu einem erheblichem Fahrzeitgewinn in der Relation Bayern - Berlin führen.
- Hauptargument für diese Alternative ist die Erhaltung der seit Inbetriebnahme des IC-Verkehrs bestehenden direkten stündlichen Fernverkehrsverbindungen von Augsburg nach Norddeutschland (vgl. [Hesse 2000]). Dabei werden wertvolle Kapazitäten auf der Strecke Würzburg - Ansbach - Augsburg - München für den Fernverkehr genutzt. Bei Einsatz von Neigetechnik und wenigen gezielten Streckenausbauten könnte annähernd die gleiche Fahrzeit wie über Nürnberg erreicht werden. Damit ergeben sich keine neuen Knotenbindungen in München.  
  
Bei zusätzlichen Zwischenhalten in Ansbach und/oder Donauwörth könnte sogar die dort verkehrende IR-Linie 21 eingespart werden.

### **3.3 Fazit und Ausblick**

Die Erfahrungen mit dem erstmaligen professionellen Einsatz des Werkzeugs OptiPlan waren durchwegs positiv. Aus diesem Einsatz im konkreten Planungsprojekt ergaben sich jedoch weitergehende Wünsche und Anforderungen, die z.T. Gegenstand gegenwärtiger Ausbaurbeiten sind. Dazu gehören: .

- Stärkere Berücksichtigung von Fahrplanbindungen, die z.B. aus eingleisigen Streckenführungen oder Strecken-Zusammenführungen vor Knotenbahnhöfen resultieren.

- Verbesserte graphische Darstellungsmöglichkeiten und deren Kopplung mit dem Planungswerkzeug. Hierbei wäre auch eine Kopplung mit bestehenden, graphisch gut ausgestatteten Werkzeugen denkbar.
- Mehrstufige Planung für größere Verkehrsräume. Da aufgrund der algorithmischen Komplexität die Knotenzahl für ein Planungsgebiet begrenzt bleiben muß, ist der Ausbau von OptiPlan zu einem hierarchischen Planungswerkzeug vorgesehen, das die Planung auf mehreren Fahrplan-Ebenen und deren anschließende Integration zuläßt. Mit einem derartig ausgebauten Werkzeug lassen sich Planungsräume beliebiger Größe bewältigen.

Neben der Planungs-Unterstützung liefert das vorgestellte Analyseverfahren auch wertvolle Hinweise auf grundsätzliche, meist infrastruktur-bedingte Engpässe und Defizite, die einer optimalen Fahrplangestaltung entgegenstehen. So wurden im Rahmen der hier vorgestellten Studie Empfehlungen zum *Ausbau der regionalen Infrastruktur* abgeleitet. Sie betreffen z.B. notwendige Ausbaumaßnahmen im Bereich Nürnberg – Bayreuth – Hof, wo das zusätzliche Zugangebot Engpässe und Verspätungsgefahren erwarten läßt.

Weiter lassen sich mit Hilfe von *OptiPlan* Planungs-Szenarien für Netze mit Ausbau- oder Neubaustrecken in einfacher Weise simulieren. Damit kann der Einfluß solcher Maßnahmen auf die Umsteigequalität berechnet und die Auswirkungen auf die künftige Nachfrage besser eingeschätzt werden. OptiPlan ist damit als Entscheidungshilfe für künftige Infrastrukturplanungen in öffentlichen Verkehrsnetzen bestens geeignet.

### **Literatur:**

[Domschke 1989] Domschke, H.: Schedule Synchronization for Public Transit Networks, OR-Spektrum 11:17-24 Springer-Verlag 1989

[Guckert 1997] M. Guckert: Anschlußoptimierung in öffentlichen Verkehrsnetzen – Graphentheoretische Grundlagen, objektorientierte Modellierung und Implementierung. Dissertation, Univ. Marburg 1997

[Hesse, Guckert 1998] W. Hesse, M. Guckert: NO-BY 2000: Studie zum Integralen Taktfahrplan für Nordost-Bayern. Bayerische Eisenbahn-Gesellschaft München 1998

[Hesse 1995] W. Hesse: "Hochgeschwindigkeit oder intelligente Fahrplangestaltung? Wie kommt die Deutsche Bahn besser voran?". *Homo Oeconomicus* Bd. XII (3/4), ACCEDO Verlagsgesellschaft, München 1995

- [Hesse 2000] W. Hesse: Konzept für ein System von Bahn-Netzknotten in Süddeutschland.  
Eisenbahn-Revue International, Heft 5/2000, S. 236-239, Minirex-Verlag, Luzern  
2000
- [Intraplan 1995] Regionale Struktur des Personenverkehrs in der BRD im Jahre 1991. Intraplan  
München 1995
- [Klemt, Stemme 1988] Klemt, W.; Stemme, W. : Schedule Synchronization for public transit  
networks. In: Dauna et. al.: Computer Aided Transit Scheduling, Lecture Notes in  
Economics and Mathematical Systems 308 pp.327-335, Springer Berlin 1988
- [Martins et al. 1997] Martins, E., Pascoal, M., Dos Santos, J.: A new algorithm for ranking  
loopless paths. Universidade Coimbra, Portugal 1997
- [Weigand 1981] Weigand, W.: Graphentheoretische Verfahren zur Fahrplangestaltung in  
Transportnetzen unter Berücksichtigung von Pufferzeiten mittels interaktiver  
Rechentechnik. Schriftenreihe Institut für Verkehr, Eisenbahnwesen und Verkehrs-  
sicherung, Heft 24 Technische Universität Braunschweig 1981
- [Yen 1971] Yen, J.: Finding the k-shortest loopless path in a network. Management Sci 17, pp  
712-716 (1971)

## **Zusammenfassung**

Die Erstellung und Bewertung Integraler Taktfahrpläne lässt sich mit Hilfe intelligenter Software-Werkzeuge sehr effektiv und nutzbringend unterstützen. Das an der Universität Marburg im Rahmen einer Dissertation entwickelte System *OptiPlan* erlaubt eine effiziente Fahrplanerstellung für Verkehrsnetze kleiner und mittlerer Größenordnung. Zur Bewertung verschiedener Fahrplanvarianten werden Kenngrößen für die Umsteigequalität definiert und berechnet.

Das System wurde erfolgreich für eine Fahrplanstudie für den Bereich Nordost-Bayern eingesetzt, die von der Bayerischen Eisenbahngesellschaft (BEG) in München in Auftrag gegeben wurde. Im Wechselspiel von manuellen und werkzeuggestützten Planungsschritten wurden mit *OptiPlan* Fahrplanvarianten entwickelt und anhand von Qualitäts-Kenngrößen bewertet. Damit wurde eine Empfehlung für einen Integralen Taktfahrplan erarbeitet, die eine Analyse der Infrastruktur und Ansatzpunkte zu dort notwendigen Verbesserungen beinhaltet. In diesem Artikel berichten Auftragnehmer und Auftraggeber gemeinsam vom praktischen Einsatz des Werkzeugs und den dabei erarbeiteten Ergebnissen.

