

# Fahrplantrassen managen und Fahrplanerstellung simulieren

O. Brünger<sup>a,1</sup> und T. Gröger<sup>b,2</sup>

<sup>a</sup> DB Systems GmbH, IVS 4  
Weilburger Straße 28, 60326 Frankfurt am Main, Deutschland

<sup>b</sup> DB Systems GmbH, IVS 4  
Weilburger Straße 28, 60326 Frankfurt am Main, Deutschland

**Kurzfassung:** Im System „Datenverarbeitung im Trassenmanagement“ werden Infrastruktur- und Fahrplandatenhaltung, Fahrplan-Feinkonstruktion und Generierung der betrieblich relevanten Fahrplanunterlagen integriert und dadurch Eisenbahninfrastrukturunternehmen wie DB Netz umfassend unterstützt. Neben der vollständigen Einführung auch für die Sonderzugkonstruktion werden für die nächsten Jahre weitere Effizienz- und Qualitätssteigerungen des Trassenmanagements im Zusammenhang mit Infrastrukturdaten und den zeitlichen Veränderungen des Netzes angestrebt. Hierbei werden zunehmend auch Automatismen die interaktive Fahrplankonstruktion ergänzen.

Ausgehend von einer Simulation der Fahrplanerstellung, die auf den Konzepten des rechnergestützten Trassenmanagements aufbaut, können entsprechende Automatismen für das Trassenmanagement abgeleitet und darüber hinaus vor- und nachgelagerte Planungsprozesse unterstützt werden. Die Konzeption und Einsatzbereiche der entsprechenden Simulationsanwendung BABS<sup>1</sup> wird im zweiten Teil dieses Vortrages vorgestellt.

**Schlagworte:** Fahrplan; Trassenmanagement; Fahrplanerstellung; Konstruktion; Simulation

---

<sup>1</sup>E-mail: [olaf.bruenger@bahn.de](mailto:olaf.bruenger@bahn.de), URL: [www.bahn.de/dbsystems](http://www.bahn.de/dbsystems)

<sup>2</sup>E-mail: [thomas.groeger@bahn.de](mailto:thomas.groeger@bahn.de), URL: [www.bahn.de/dbsystems](http://www.bahn.de/dbsystems)

# 1 Einleitung

Im Trassenmanagement obliegt es den Eisenbahninfrastrukturunternehmen, aus den Trassenanmeldungen der Verkehrsunternehmen einen konfliktfreien Fahrplan zu erstellen, der eine hohe Qualität des späteren Betriebs vorbereitet. Neben der eigentlichen Konstruktion gehört dazu auch die Erstellung der für den Betrieb erforderlichen Fahrplanunterlagen in gedruckter oder elektronischer Form.

Im Auftrag und in Zusammenarbeit mit DB Netz hat DB Systems hierfür das System „Datenverarbeitung im Trassenmanagement (DaViT)“ entwickelt, welches in diesem Jahr mit der Einführung seines Kerns „Rechnerunterstütztes Trassenmanagement – Konstruktion (RUT-K)“ vervollständigt wurde. Es integriert die Bearbeitung und Vorhaltung der Infrastrukturdaten, die Gemeinsame Fahrplan-Datenhaltung (GFD), die Konstruktion und die Verarbeitung der Infrastruktur- und Fahrplandaten zu den Fahrplanunterlagen und zur Weitergabe an angeschlossene Systeme. Im ersten Teil des Vortrags wird über die Bestandteile von DaViT sowie über einige in der Zukunft noch zu lösende Aufgaben berichtet.

Dabei wird klar, dass sowohl für Fahrplanstudien im Vorfeld der eigentlichen Konstruktion als auch für die Behandlung unterjähriger Änderungen der Infrastruktur und des Fahrplans mittelfristig die rein interaktive Vorgehensweise ergänzt werden muss durch Automatismen.

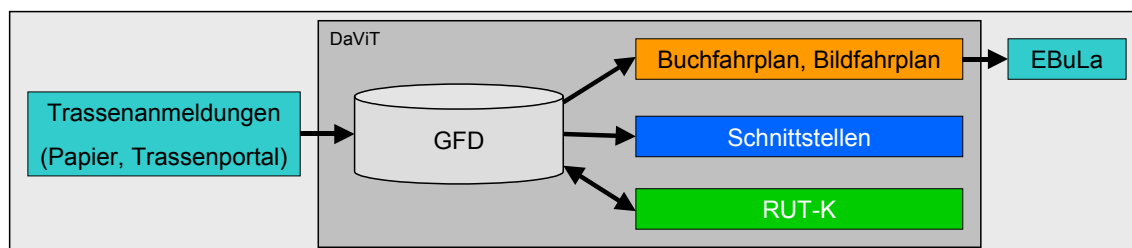
Im zweiten Teil des Vortrages wird hierzu eine im Rahmen einer Dissertation [5] konzipierte Simulation der Fahrplanerstellung vorgestellt, die auf Konzepten des rechnergestützten Trassenmanagements mit FAKTUS wie exakt berechneten Sperrzeitentrepfen und expliziter Konfliktlösung aufbaut und diese durch automatisches Einlegen der Zugfahrten und automatisches Lösen der Konflikte logisch erweitert und ergänzt. Auf dieser Basis können sowohl klassische Fragestellungen bei der Bemessung von Eisenbahninfrastruktur, der Validierung alternativer Fahrplan- und Betriebskonzepte als auch Automatismen für das Trassenmanagement wie die Generierung von Konfliktlösungsvorschlägen und das konfliktfreie Einlegen einzelner Trassen realisiert werden.

## 2 Datenverarbeitung im Trassenmanagement

### 2.1 DaViT im Überblick

Die Entwicklung des Systems DaViT wurde bereits 1994 begonnen, als klar wurde, dass die zum Teil vorhandenen Insellösungen nicht mehr effizient genug zusammenarbeiten, dass die Informationstechnik funktional weit mehr ermöglicht – und dass dies eine über die Grenzen von Bearbeitern und Niederlassungen hinaus zusammengeführte Datenbasis für Infrastruktur

und Fahrplandaten erfordert. Diese wird durch die GFD gebildet, die einerseits den Ordnungsrahmen des Netzes sowie Stammdaten wie Triebfahrzeugdaten definiert, andererseits im Teil Zugdaten den Fahrplan aller auf dem Netz verkehrenden Züge vorhält, und zwar strukturiert nach den Bestellangaben aus den Trassenanmeldungen und dem Fahrplan, der nach Bestätigung des Trassenangebots – ggf. nach weiteren Modifikationen – wirksam wird.



**Abbildung 1:** DaViT im Überblick

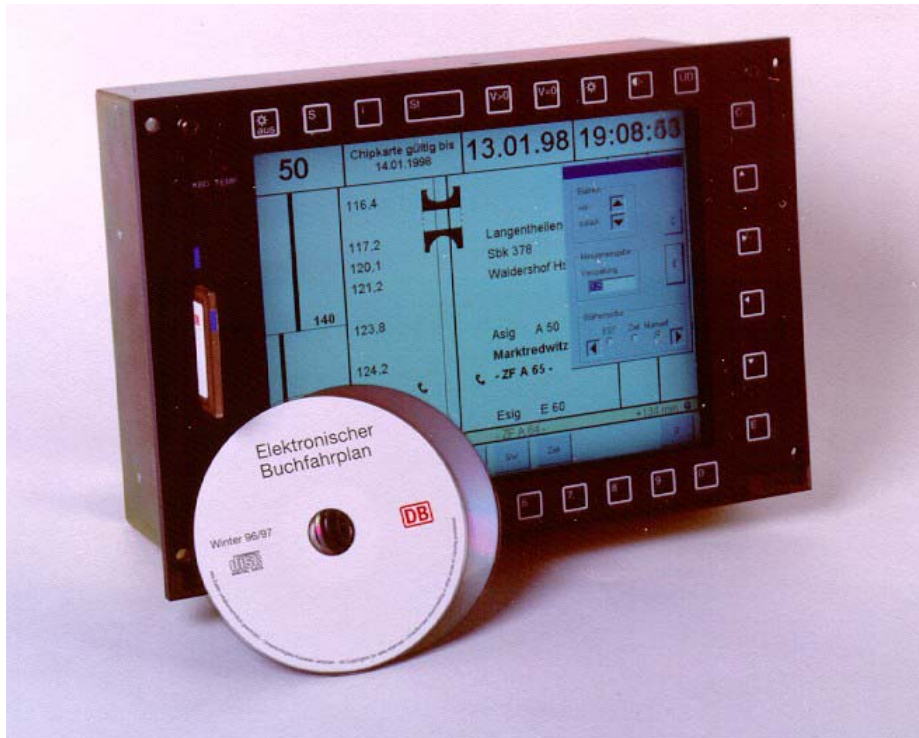
Aus den Infrastruktur- und Fahrplandaten werden die betrieblich relevanten Fahrplanunterlagen, vor allem Bildfahrplan und Buchfahrplan, erzeugt. Während die Bildfahrplanerstellung abgesehen von Detailarbeiten am Layout auf verhältnismäßig unkomplizierte und bereits in Vorgängersystemen erprobte Weise erfolgt, ist dem Buchfahrplan etwas mehr Aufmerksamkeit zu widmen.

In diesem Zusammenhang ist in Erinnerung zu rufen, dass in Deutschland – anders als bei anderen Bahnen – die Informationen über die zulässigen Geschwindigkeiten erstens nicht lückenlos durch Signale angezeigt werden und zweitens von der technischen Ausrüstung des Zuges z.B. mit Bremsen und Neigetechnik abhängen.

Dem Triebfahrzeugführer werden die für ihn relevanten Angaben der befahrenen Strecken und die Fahrplanangaben wie Abfahrts- oder Durchfahrtszeiten über den Buchfahrplan übermittelt.

Zum Fahrplan 2003 wurde die elektronische Form des Buchfahrplans, die Anzeige auf dem EBuLa-Bordgerät (Abbildung 2, [4]), als Regelverfahren eingeführt. Dies wird zu einer kostensparenden Ablösung der gedruckten Unterlagen führen; damit verbunden ist die allgemeine Rückkehr von der teilweise üblichen Trennung in Geschwindigkeits- und Fahrzeitenheft zur geschlossenen Buchfahrplan-Darstellung.

Diese wird durch das System DaViT automatisch aus den Infrastruktur- und Fahrplandaten generiert. In der GFD-Infrastruktur werden dazu die erforderlichen Infrastrukturdaten wie zulässige Geschwindigkeiten (ggf. unterschieden nach den verschiedenen Zugkonfigurationen), maßgebende Neigungen, Zugfunk-Angaben usw. vorgehalten. Zu den Fahrplan-Angaben werden vorschriftengemäß die für den jeweiligen Zug relevanten Infrastrukturdaten hinzugefügt und optisch zur üblichen Buchfahrplan-Struktur mit mehreren Spalten, Hervorhebungen, Kopfangaben usw. ergänzt.



**Abbildung 2:** EBU-La-Bordgerät

Dieses Vorgehen bedeutet eine beträchtliche Verbesserung gegenüber dem früheren manuellen Buchfahrplansetzen: Zuvor wurden die Buchfahrplanunterlagen Zug für Zug redaktionell erstellt; Änderungen der Infrastruktur mussten in allen Buchfahrplänen nachvollzogen werden. Durch die automatische Erzeugung mit DaViT müssen Änderungen der Infrastruktur nur in den Infrastrukturdaten, nicht in den Unterlagen jedes einzelnen Zuges, eingepflegt werden.

DaViT besitzt Datenschnittstellen zur Annahme von Trassenbestellungen, die bei DB Netz über das Trassenportal eingehen, sowie zur Weitergabe von Infrastruktur- und Fahrplandaten an angeschlossene Systeme bei DB Netz selbst (z.B. die Betriebszentralen, die über die Normierte Schnittstelle NSS mit Fahrplandaten versorgt werden) und bei den Eisenbahnverkehrsunternehmen.

Für das Gestalten des Fahrplans, den Kern des Trassenmanagements, steht den Konstrukteuren RUT-K zur Verfügung, welches auf der detaillierten Infrastrukturabbildung des DaViT-Spurplans aufbaut; Näheres hierzu im folgenden Kapitel.

Technisch handelt es sich bei DaViT um ein Client-Server-System mit nahezu 1.000 Windows-Clients, Oracle-Datenbanken und einer weitgehend in VisualWorks-Smalltalk realisierten Anwendungslogik.

## **2.2 Spurplan und Konstruktion**

Funktionaler Schwerpunkt des Systems ist das interaktive Werkzeug zur Fahrplan-Feinkonstruktion, RUT-K. Aufbauend auf den fachlichen Inhalten des Einplatzsystems FAKTUS [2] dient es zur Konstruktion des Fahrplans ausgehend von den Trassenbestellungen der Verkehrsunternehmen. Es enthält die Berechnung der Fahrzeiten und vor allem die unmittelbare Berechnung und Anzeige von Konflikten zwischen Zügen (siehe Abbildung 3). Dies ermöglicht dem Konstrukteur das genaue Einplanen von Zugfolge, Überholungen und Fahrzeitzuschlägen sowie die Wahl der günstigsten Fahrwege und Gleise. In RUT-K stehen allen Konstrukteuren gleichzeitig Infrastruktur- und Konstruktionsdaten der gesamten Niederlassung zur Verfügung, sie wählen sich den für ihre aktuelle Aufgabe benötigten Netzausschnitt zur Anzeige aus, entwickeln jedoch stets den Gesamt-Datenbestand fort. Für verschiedene Jahresfahrpläne, für netzweite Infrastrukturänderungen und für Fahrplanstudien können Versionen des Datenbestands gebildet werden. Um Konfliktlösungsgespräche mit ihren Kunden führen zu können, verwenden die Trassenmanager „RUT-K-mobil“, bei dem der Datenbestand der Datenbank mit dem eines ohne Netzanschluss betreibbaren Laptops abgeglichen wird.

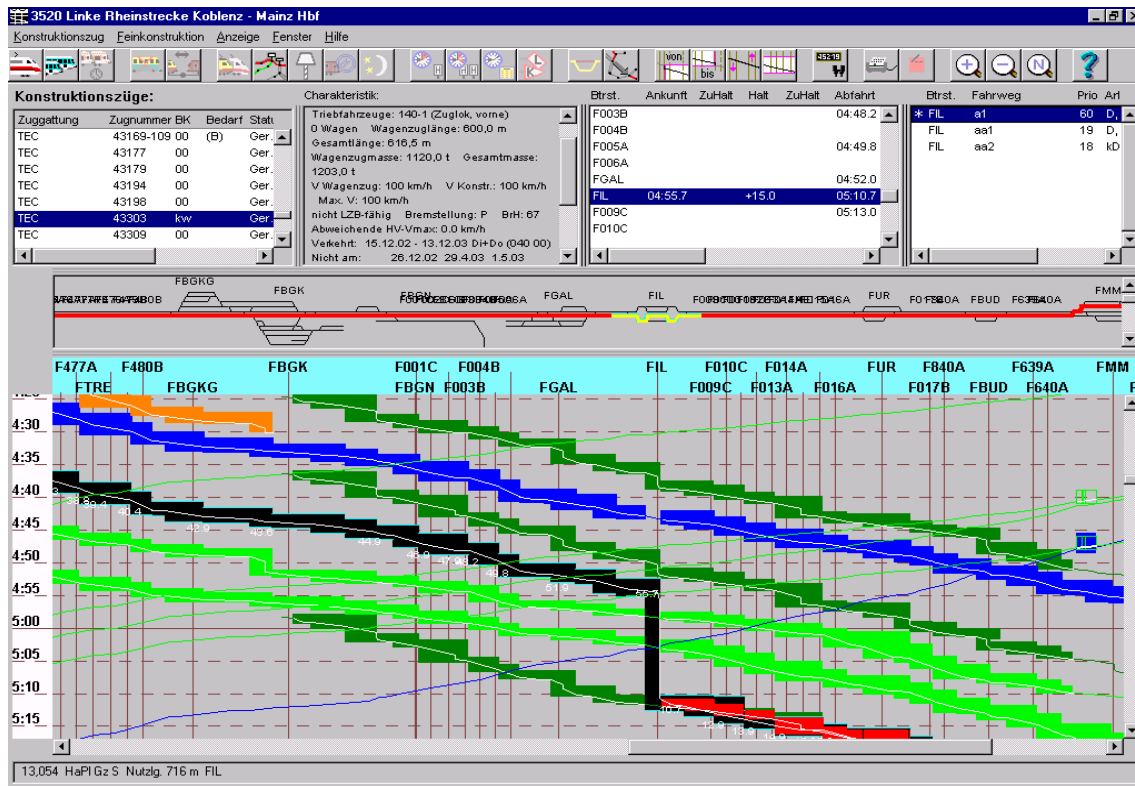


Abbildung 3: Konstruktionsfenster von RUT-K

Größte Herausforderung bei der Entwicklung dieses Programms [3] waren die hohen DV-technischen Anforderungen wegen der detaillierten grafischen Darstellung und Bearbeitung eines Datenbestands, auf den gleichzeitig etwa 50 Bearbeiter je Niederlassung zugreifen und ihn mit schnellen Antwortzeiten bearbeiten wollen. Die Benutzeroberfläche wurde durch enge Einbindung der Anwender bei DB Netz für die Aufgaben des Trassenmanagements einschließlich aller zu berücksichtigenden Sonderfälle optimiert.

Neben den Trassenbestellungen braucht RUT-K eine detaillierte, gleisgenaue Abbildung der Infrastrukturdaten mit den vielen Informationen, die für die Konflikterkennung und für die Fahrzeitrechnung benötigt werden. Auch hier wurde die von FAKTUS bekannte Spurplan-Modellierung und auch die dafür aufgenommenen Daten in ein mehrplatzfähiges Datenbanksystem übertragen und dort (in wegen der aufwendigen Datenerhebung sehr mühevoller Arbeit) bis Anfang 2003 vervollständigt. Seither hat die Deutsche Bahn erstmals eine Datenbank mit den betrieblich relevanten Angaben aller planmäßig von Zugfahrten befahrenen Gleise! Auch diese Anwendung ist ein Client-Server-System, die Spurplan-Daten werden zentral und stets über das Gesamtnetz konsistent vorgehalten und gepflegt.

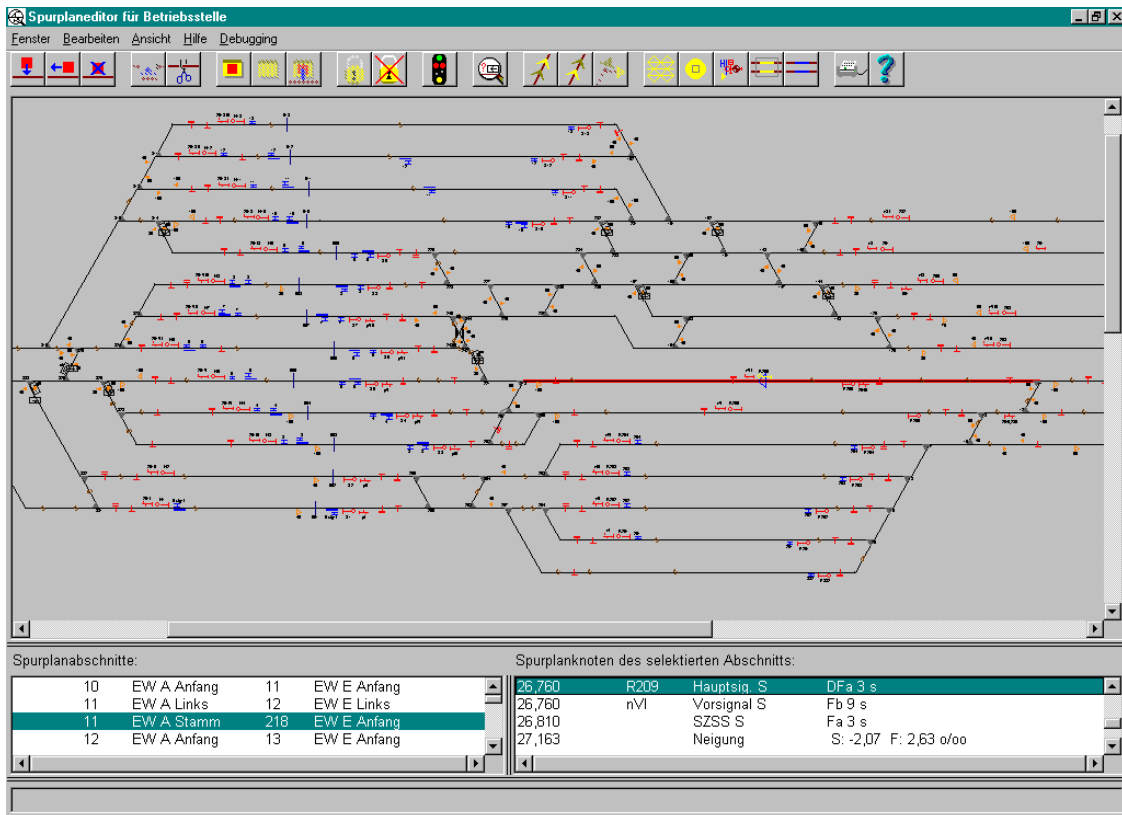


Abbildung 4: DaViT-Spurplan-Editor

Zur Verwendung dieser Daten auch in anderen Systemen außerhalb von DaViT (z.B. in den Betriebszentralen) wird derzeit eine XML-basierte Schnittstelle (XML-ISS) entwickelt.

### 2.3 Aufgaben für die Zukunft

Wie jedes DV-System wird auch DaViT in Zukunft den sich verändernden Herausforderungen und Rahmenbedingungen angepasst werden. Im Vordergrund wird dabei die Nutzbarmachung für andere Anwenderkreise stehen, vor allem für die Konstruktion von Sonderzügen, für die Baubetriebsplanung und für fahrplan- und betriebstechnologische Untersuchungen. Der steigenden Bedeutung des Vertriebs wird durch ein engeres Zusammenwirken von Trassenportal, GFD-Zugdaten und RUT-K Rechnung getragen werden.

Den hohen Anforderungen an die Korrektheit der Daten und Algorithmen, die durch die Generierung von (Buch-)Fahrplanunterlagen aus Infrastrukturdaten und Fahrplandaten gestellt werden müssen, wird derzeit noch mit einem zeit- und personalaufwendigen Qualitätssicherungsprozess begegnet, der künftig vereinfacht werden muss und wird.

Ein weiteres Problem ist die unterschiedliche Sichtweise von Fahrplanunterlagen und Konstruktion auf die Infrastruktur. Zwar basieren die Daten für beide Anwendungsbereiche hinsichtlich ihres Ordnungsrahmens auf einem gemeinsamen Datenbestand. Bei der weiteren Detaillierung jedoch werden derzeit noch die vollständigen Informationen für die Konstruktion getrennt von den teilweise abstrahierenden für die Fahrplanunterlagen erfasst, da die Abstraktions- oder Ableitungsregeln hierfür fachlich sehr aufwendig zu beschreiben sind und die o.g. Qualitätssicherung noch weiter verkomplizieren würden. Dennoch wird mittelfristig eine Zusammenführung unvermeidlich sein, um die Datenpflegeaufwände zu verringern.

Als größtes und schwierigstes Problem sind die unterjährigen Infrastrukturänderungen einzustufen. Hierzu werden in den nächsten Jahren noch schwierige Konzeptions- und Entwicklungsarbeiten zu leisten sein, deren Lösungsschritte außer den DV-Systemen auch die Geschäftsprozesse erheblich verändern werden.

Die Konstruktion des Jahresfahrplans muss auf einer idealisierten Infrastruktur-Datengrundlage stattfinden, da die Veränderungen des Netzes über die Zeit weder im Detail exakt vorhergesagt werden können noch zu einer zu häufigen Veränderung des Fahrplans während des Jahres führen dürfen – welcher Fahrgast möchte schon täglich nach möglichen Änderungen schauen müssen. Dennoch muss eine Lösung dafür gefunden werden, schon bei der Konstruktion wenigstens größere Umbauarbeiten oder Neuinbetriebnahmen abbilden und behandeln zu können, auch wenn diese regional zu unterschiedlichen Zeitpunkten stattfinden – und zwar ohne dass für jede Änderung potenziell der gesamte Fahrplan überarbeitet werden muss: lokale Änderungen sollten in der Regel auch nur lokale Auswirkungen haben. Ein erster Lösungsansatz wird sein, Verfügbarkeitseinschränkungen der Infrastruktur definieren zu können, auf die der Konstrukteur wie auf Belegungskonflikte zwischen Zügen im Fahrplan in eigener Verantwortung reagieren kann. Spätere Lösungsschritte werden Möglichkeiten eröffnen müssen, direkt in den Infrastrukturdaten die lokalen Veränderungen und die sich mit der Zeit verfeinernden Kenntnisse darüber abzubilden, denn Betriebsvorbereitung und Disposition benötigen ja tagesaktuelle Informationen. Dies wird nach mehreren Jahren der Forschung und Entwicklung zu einer größeren Kontinuität in den Datenhaltungen, Anwendungen und Prozessen zwischen Planung und Betrieb führen. Durch ein interaktives Verfahren, welches dem Konstrukteur die für die Jahresplanung erforderlichen individuellen Gestaltungsmöglichkeiten bietet, ist dies allein nicht mehr zu bewältigen – es wird ergänzt werden müssen durch Automatismen, angefangen von Konfliktlösungsvorschlägen und einfachen Anpassungen an Veränderungen des Netzes, ferner Automatismen zur Suche nach freien Trassen für Sonderzüge.

Wie einst RUT-K oder sein Nukleus FAKTUS aus den Verfahren des Kapazitätsmanagements für die Fahrplankonstruktion und das Trassenmanagement profitiert hat, werden auch für die weiteren Schritte Ergebnisse der Eisenbahnbetriebswissenschaft übertragen werden – im Falle der Automatismen konkret aus der Fahrplansimulation, über die im Folgenden berichtet wird.

### **3 Simulation der Fahrplanerstellung**

Ausgehend von einer Betrachtung der algorithmischen Komplexität und der existierenden Verfahren zur automatischen Fahrplanerstellung wird in diesem Kapitel zunächst die Grundkonzeption für das neue sperrzeitenbasierte Simulationsverfahren BABSİ vorgestellt. Anschließend werden die verwendete Simulationsstrategie und die automatische Konfliktlösung im Detail erläutert. Darauf aufbauend werden die Konzeption der Implementierung von BABSİ auf der Basis von FAKTUS und die auf der Basis der Simulation der Fahrplanerstellung und der automatischen Konfliktlösung realisierten Simulationsmodi erläutert. Abschließend werden die Einsatzgebiete des neuen Simulationsverfahrens dargestellt und die Ergebnisse zusammengefasst.

#### **3.1 Automatische Fahrplanerstellung**

##### **3.1.1 Grundlagen der automatischen Fahrplanerstellung**

Neben den Methoden zur rechnerunterstützten Fahrplankonstruktion existiert eine Reihe von Ansätzen, die Fahrplanerstellung vollständig zu automatisieren. Im Gegensatz zu vereinfachten Fahrplänen im Rahmen strategischer Planungen werden Jahresfahrpläne bislang nicht automatisch für komplexere Netze erstellt. Wesentliche Gründe sind hierbei die oft unterschätzte Komplexität der Aufgabenstellung und das Vertrauen der Bahnen in die Erfahrung und Kreativität der Fahrplanbearbeiter.

Grundsätzlich gehört die automatische Fahrplanerstellung zu der als NP-Probleme bezeichneten Klasse von algorithmischen Problemen, die zwar prinzipiell entscheidbar, aber so schwierig sind, dass sie in ihrer vollen Allgemeinheit für alle praktischen Zwecke nicht auf einem Computer gelöst werden können.

Aufgrund der praktischen Relevanz der Aufgabenstellung und einem allgemein empfundenen Handlungsbedarf existieren ungeachtet der algorithmischen Komplexität eine ganze Reihe unterschiedlicher Ansätze zur automatischen Fahrplanerstellung, die sich grob in zwei Kategorien einteilen lassen.

Zum einen existiert eine ganze Reihe von „mathematischen Verfahren“, die in einem ersten Schritt den zu erstellenden Fahrplan und die zu beachtenden Rahmenbedingungen in eine mathematische Notation überführen. Das so formulierte abstrakte Problem wird dann mit Hilfe bekannter mathematischer Standard-Verfahren gelöst. Zum anderen existieren „eisenbahnbetriebswissenschaftliche Verfahren“, die die Vorgehensweise der rechnergestützten Fahrplankonstruktion nachbilden und auf der Grundlage von Sperrzeitentreppen konfliktfreie Fahrpläne erzeugen.

Nur wenige der existierenden Verfahren zur automatischen Fahrplanerstellung werden in der Praxis eingesetzt. Dies liegt zum Teil daran, dass in den meisten Konzepten nur Spezialfälle

betrachtet werden, die in dieser Form in der Praxis selten auftreten oder auch ohne größeren Aufwand manuell gelöst werden können. Verfahren, die dagegen größere Netze betrachten und auch die Fahrwegwahl berücksichtigen, greifen zur Erzielung eines akzeptablen Laufzeitverhaltens auf einfache Heuristiken aus der manuellen Fahrplanbearbeitung zurück.

### **3.1.2 Verfahren zur automatischen Fahrplanerstellung**

Werden Verfahren zur automatischen Fahrplanerstellung heute in der Praxis eingesetzt, geschieht dies nicht im Bereich des Trassenmanagements, sondern für besondere Aufgaben im Rahmen von vorgelagerten Planungsstufen. Im Folgenden werden die Verfahren DONS und STRESI/NSIM kurz vorgestellt.

#### **DONS**

Das niederländische Verfahren DONS wird zur Entscheidungsunterstützung im Rahmen der strategischen Infrastrukturplanung für das niederländische Eisenbahnnetz eingesetzt. Bei dieser soll eine Eisenbahninfrastruktur entworfen werden, die die zukünftig zu erwartenden Verkehrsmengen möglichst effizient bewältigen kann. Da sowohl die manuelle als auch die rechnergestützte Erstellung von Fahrplänen sehr zeitintensiv ist und im Rahmen strategischer Planungen dennoch viele Varianten und Szenarien betrachtet werden sollten, wurde mit DONS ein Verfahren zur automatischen Konstruktion entsprechender Fahrpläne entwickelt. Dieses ermittelt mit Hilfe eines mathematischen Ansatzes einen netzweiten Basistaktfahrplan. Obwohl Fahrpläne konfliktfrei sein müssen und in den Niederlanden viele Konflikte aufgrund unzureichender Kapazität in den Bahnhöfen entstehen, kann die Umsetzbarkeit des netzweiten Basistaktfahrplans in den einzelnen Bahnhöfen aus Komplexitätsgründen erst in einem nachgelagerten Schritt separat überprüft werden. Aufgrund der strategischen Fragestellung wird auf die weitere Erarbeitung eines konkreten Fahrplans verzichtet.

#### **STRESI und NSIM**

Aufgrund der zentralen Rolle des Fahrplans im Eisenbahnwesen und der Bedeutung der planmäßigen Wartezeiten bei der Bemessung von Bahnanlagen existieren mit STRESI und NSIM zwei sperrzeitenbasierte Simulationsverfahren, die neben der Betriebsabwicklung auch die Erstellung von Fahrplänen betrachten [5-8, 6-9]. Im Gegensatz zu den eher mathematisch orientierten Verfahren beruhen beide Verfahren auf der Verwendung von Sperrzeitentrepfen. Genau wie die entsprechenden Verfahren zur rechnergestützten Fahrplanbearbeitung erstellen diese unter Beachtung der exakten Belegungszeiten der einzelnen Infrastrukturelemente konfliktfreie Fahrpläne. Die vorhandenen Kapazitäten von Bahnhöfen und Strecken können so von diesen – auch als asynchron bezeichneten - Simulationsverfahren gemeinsam berücksichtigt werden.

Die beiden Verfahren unterscheiden sich im wesentlichen in der zugrundeliegenden Infrastrukturmodellierung. Während STRESI nur für zweigleisige Strecken konzipiert ist und

zudem Standardbahnhöfe verwendet, können in NSIM frei definierte Netzteile betrachtet werden. Allerdings ist nur STRESI frei am Markt verfügbar.

Durch die Verwendung der Sperrzeitentreppen werden die einzelnen Belegungen der Infrastrukturelemente in beiden Verfahren exakt berücksichtigt, ohne die durch die Zugfahrt gegebene Belegungsreihenfolge aufzugeben. Die Erstellung eines konfliktfreien Fahrplans wird so zu einem zweidimensionalen – unter Berücksichtigung alternativer Laufwege sogar zu einem dreidimensionalen – geometrischen Problem.

Zur Lösung werden in den Verfahren STRESI und NSIM zunächst unter Berücksichtigung alternativer Laufwege alle möglichen Sperrzeitentreppen der einzelnen Züge vorberechnet. In der eigentlichen Fahrplanerstellung werden die einzelnen Zugfahrten dann entsprechend einer vorgegebenen Rangordnung sukzessive in den Fahrplan eingelegt und die durch Sperrzeitenüberschneidung erkannten Konflikte direkt gelöst.

Bei der Konfliktlösung stehen grundsätzlich die gleichen Möglichkeiten wie bei der rechnerunterstützten Fahrplankonstruktion zur Verfügung. Dies sind im Wesentlichen die Wahl anderer Laufwege, die Verlängerung von Haltzeiten, die komplette Verschiebung von Zugfahrten oder die Einführung zusätzlicher Betriebshalte. Zur Ermittlung möglicher Konfliktlösungen wird in beiden Verfahren eine feste Reihenfolge verwendet, die mit der ersten erfolgreichen abbricht. Als erstes werden die alternativen Laufwege getestet, dann versucht mit Hilfe der Halte den Konflikt zu lösen, bevor die gesamte Zugtrasse schließlich komplett in die nächste freie Lücke verschoben wird.

Analog zu DONS werden STRESI und NSIM für strategische Fragestellungen bei der Bemessung von Eisenbahnbetriebsanlagen und der Entwicklung neuer Fahrplan- und Betriebskonzepte eingesetzt. Die Erstellung eines konfliktfreien Fahrplans dient zur Bestimmung der planmäßigen Wartezeiten und als Vorgabe für eine folgende Simulation der Betriebsabwicklung. Aufgrund der Infrastrukturmodellierung und insbesondere der starren Vorgehensweise bei der Konfliktlösung ist ein direkter Einsatz zur Fahrplankonstruktion im Rahmen des Trassenmanagements bislang nicht erfolgt.

## **3.2 Grundkonzeption des neuen Simulationsverfahrens BABS**

### **3.2.1 Verwendung des sperrzeitenbasierten Ansatzes**

Wie im Kapitel 3.1.1 erläutert wurde, ist es aufgrund der algorithmischen Komplexität der automatischen Fahrplanerstellung und der allgemein anerkannten Gültigkeit der Hypothese P ungleich NP unmöglich, ein effizientes, mathematisches Lösungsverfahren zu finden. Die existierenden Verfahren verwenden daher Heuristiken und beschränken sich zudem auf Aufgabenstellungen, die vom Trassenmanagement eines größeren Infrastrukturbetreibers weit entfernt sind. So werden keine Sperrzeiten betrachtet, obwohl der Begriff der Fahrplantrasse

nur im Sinne einer Sperrzeitentreppe sinnvoll interpretiert werden kann [11]. Die Erweiterung der mathematischen Ansätze zur automatischen Fahrplanerstellung um Sperrzeiten würde allerdings die Komplexität der Aufgabenstellung weiter steigern, insbesondere wegen der Notwendigkeit einer abstrakten, mathematischen Formulierung der strukturellen Eigenschaften der Sperrzeitentreppe.

Bei Verwendung des sperrzeitenbasierten Ansatzes sind die Sperrzeitentreppen dagegen der zentrale Grundbaustein der Modellierung. Unter Beachtung der Kapazität der einzelnen Infrastrukturelemente werden konfliktfreie Fahrpläne erzeugt, indem konkrete Zugtrassen betrachtet und auftretende Konflikte explizit gelöst werden. Durch diese Vorgehensweise sinkt zudem die Anzahl der zu betrachtenden Zuglagen im Gegensatz zu den mathematischen Verfahren signifikant. Dies ermöglicht ein akzeptables Laufzeitverhalten für reale Aufgabenstellungen unter Beachtung alternativer Laufwege und großer Netzteile.

Das neue Simulationsverfahren soll daher auf dem sperrzeitenbasierten Ansatz beruhen und diesen, um die Grenzen der bisherigen asynchronen Simulationsverfahren zu verlassen, geeignet erweitern. Im Rahmen der Simulation der Betriebsabwicklung wird auf die Algorithmen zur Trassenvergabe zurückgegriffen und so analog zur Betriebszentrale eine übergeordnete Disposition realitätsnah nachgebildet.

### **3.2.2 Spurplan-Graph und FAKTUS als Basis**

Analog zur rechnergestützten Trassenvergabe der DB Netz AG mit FAKTUS bzw. RUT-0 stehen bei dem neuen Simulationsverfahren die Sperrzeitentreppen im Mittelpunkt des Prozesses zur Erzeugung eines konfliktfreien Fahrplans. Obwohl die Vergabe der Fahrplantrassen bei einem Simulationssystem und bei einem rechnergestützten Verfahren auf unterschiedliche Art und Weise realisiert wird, ist es sinnvoll, die bewährte konzeptionelle Basis des Systems FAKTUS für das neue Simulationsverfahren zu nutzen.

Die Verwendung des redundanzfreien, auf Zwischenweichenabschnitten beruhenden und bei der DB Netz AG zur Aufnahme des gesamten von Zugfahrten planmäßig befahrenen Netzes verwendeten Spurplan-Graphen führt zu einer mikroskopischen Simulationsanwendung, der direkt eine große Menge existierender Infrastrukturdaten zur Verfügung stehen. Der Spurplan-Graph wurde im Zusammenhang mit FAKTUS entwickelt und stellt auf effiziente Weise alle zur Ermittlung von Sperrzeiten relevanten Infrastruktur-Informationen zur Verfügung.

Die exakte Modellierung der Fahrdynamik, die aufgrund der Sicherungstechnik resultierenden Belegungen der Züge und die ggf. entstehenden Konflikte sind nicht nur bei dem rechnergestützten Trassenmanagement, sondern auch bei dem neuen Simulationsverfahren von zentraler Bedeutung. Es ist daher sinnvoll, bewährte Konzepte und Module auch in dem neuen DV-System zu verwenden. Für den Einsatz in einem Simulationssystem, das im Gegensatz zu FAKTUS und anderen interaktiven Systemen für das rechnergestützte

Trassenmanagement mit einer automatischen Konfliktlösung arbeitet, sind allerdings Anpassungen und Erweiterungen erforderlich.

### **3.2.3 Simulationsparameter**

Bei der Verwendung eines Simulationsalgorithmus müssen auch solche Parameter explizit festgelegt werden, die bei der rechnergestützten Trassenvergabe oder Disposition implizit vom Bearbeiter berücksichtigt werden, aber dennoch einen wesentlichen Einfluss auf die Gestalt und Qualität eines Fahrplans haben. Hierbei handelt es sich insbesondere um die Prioritäten der Zugfahrten und die Pufferzeiten.

#### **Prioritäten der Zugfahrten**

Mit Hilfe von Prioritäten kann die grundsätzliche Reihenfolge beim Einlegen der Zugfahrten in das Bildfahrplan-Blatt geregelt werden. Zu Zeiten der Deutschen Bundesbahn hatte jede Zugklasse einen expliziten Rang. Die Züge wurden entsprechend dieser Ränge eingelegt und Konflikte zwischen zwei Zügen aufgrund der Rangordnung gelöst. Hierdurch konnte eine hohe Auslastung der Infrastruktur erreicht werden.

Seit der Bahnreform ist das Trassenmanagement die zentrale Schnittstelle zwischen den einzelnen Eisenbahnverkehrsunternehmen und dem Infrastrukturbetreiber geworden. Aufgrund der unterschiedlichen Interessen kommt es zu Konflikten zwischen den Kundenwünschen und den Zielen des Infrastrukturbetreibers. Daher wurden in den verschiedenen Trassenpreissystemen Anreize für diejenigen Züge geschaffen, die bei der Fahrplankonstruktion durch planmäßige Wartezeiten benachteiligt werden, um so weiterhin eine hohe Auslastung der Infrastruktur erreichen zu können. So gibt es im jüngsten Trassenpreissystem 2001 verschiedene Produktarten, aus denen das Eisenbahnverkehrsunternehmen bei einer Trassenbestellung wählen kann. In Abhängigkeit von der Produktart kommt den Trassen eine unterschiedliche Priorität zu, die sich über einen zugehörigen Produktfaktor direkt auf den Trassenpreis auswirkt. Bei den vorherigen Systemen wurde versucht, mit der Planungsqualität bzw. der Fahrplanflexibilität vergleichbare Anreize zu schaffen.

Da die bestmögliche Auslastung der Eisenbahninfrastruktur aufgrund ihres hohen Fixkostenanteils betriebswirtschaftlich erforderlich ist, gibt es neben den Produktfaktoren weitere gesetzlich geregelte Konstruktionsprioritäten, durch die regelmäßige Verkehrsleistungen, vertraglich gebundene Trassen und fristgerechte Anmeldungen bevorzugt werden [1].

Auch wenn die klassischen Zugränge heute nicht mehr existieren, muss ein Simulationsverfahren weiterhin Prioritäten der einzelnen Züge bei der Simulation der Trassenvergabe und der Betriebsabwicklung berücksichtigen können. Theoretisch kann auch allen Zügen die

gleiche Priorität gegeben werden, allerdings sollte dann nicht erwartet werden, dass ein marktgerechter Fahrplan entsteht.

## **Pufferzeiten**

Die Qualität der Betriebsdurchführung ist maßgeblich von der Größe der im zugrunde liegenden Fahrplan vorhandenen Pufferzeiten abhängig. Als Pufferzeit bezeichnet man den minimalen zeitlichen Abstand zwischen den Sperrzeitentritten zweier Zugfahrten, da dieser die Zeit angibt, um die sich der erste Zug verspäten kann ohne den zweiten zu behindern. Die Festlegung der Pufferzeiten innerhalb der Fahrplankonstruktion hat weitreichende Auswirkungen, da durch sie die Stabilität des Fahrplans in der Betriebsabwicklung auf Kosten der zur Verfügung stehenden Kapazität der Eisenbahnanlage erhöht werden kann. Bei falsch bemessenen Pufferzeiten, die keinen Beitrag zur Reduzierung der Verspätungsübertragung liefern, ist der Kapazitätsaspekt besonders problematisch.

Die Größe der im Fahrplan erforderlichen Pufferzeiten hängt stark von den im Betrieb zu erwartenden Verspätungen und der geforderten Betriebsqualität ab. Je genauer ein Fahrplan im Betrieb eingehalten wird, um so weniger Pufferzeiten sind erforderlich, wodurch wiederum mehr Fahrplantrassen realisiert werden können. So kann bei artreinen S-Bahn-Systemen schon mit geringen Pufferzeiten ein stabiler Betrieb realisiert werden, während dies in klassischen Mischverkehrsnetzen aufgrund des höheren Verspätungsrisikos nicht möglich ist.

Ohne eine genaue Betrachtung des zu erwartenden Betriebsablaufes können Pufferzeiten nicht korrekt bemessen werden. Wenn sich die Jahresfahrpläne und damit die resultierenden Zugfolgefälle nur geringfügig voneinander unterscheiden, ist es durchaus üblich, bei der Konstruktion eines neuen Fahrplans die Pufferzeitbemessung auf Erfahrungen über den Betriebsablauf der zurückliegenden Fahrplanperioden basieren zu lassen. Damit dennoch ein gewisses Niveau nicht unterschritten wird, können Mindestpufferzeiten verwendet werden.

Für den neuen Simulationsalgorithmus ist in erster Linie wesentlich, dass zugfolge-spezifische Pufferzeiten zwischen den Sperrzeiten berücksichtigt werden können. Das exakte Verfahren zur Bemessung ist an dieser Stelle zweitrangig.

## **3.3 Simulationsstrategie und Konfliktlösung in BABS I**

### **3.3.1 Globale Simulationsstrategie**

Im Gegensatz zu den bestehenden asynchronen Simulationsverfahren werden die Konflikte bei dem neuen Simulationsverfahren BABS I nicht mit Hilfe vorberechneter Sperrzeitentritten gelöst. Stattdessen wird das durch die Infrastrukturmodellierung mit dem Spurplan-Graphen und der Fahrzeit- und Belegungsrechnung von FAKTUS geschaffene

Potential voll ausgenutzt werden, indem jedem Zug während der Simulation alle vorhandenen Fahrmöglichkeiten zur Verfügung gestellt werden. Bei der alternativen Vorberechnung müssen die Sperrzeitentreppen aller in der Simulation verwendbaren Laufwege dagegen vor der Simulation explizit berechnet und abgespeichert werden, weshalb aus Aufwandsgründen eine Beschränkung auf ausgewählte Fahrwege vorgenommen werden muss. Zusätzlich entfällt der Zwang, die Züge zu Modellzügen zusammenzufassen, um die Anzahl der vorberechneten Sperrzeitentreppen weiter reduzieren zu können, wie dies in STRESI, NSIM der Fall ist. Eine genaue Betrachtung aller möglichen Fahrwege und der exakten Zugparameter entspricht zudem dem Ansatz des exakten Trassenmanagementsystems FAKTUS, wodurch eine Kompatibilität beider Verfahren bezüglich der Zugfahrten erreicht wird, die für die angestrebten Synergieeffekte unbedingte Voraussetzung ist.

Das neue Simulationsverfahren beruht auf dem sperrzeitenbasierten Ansatz und soll Prioritäten beim Einlegen der einzelnen Zugfahrten berücksichtigen. Daher werden vor der eigentlichen Simulation alle Zugfahrten entsprechend ihrer Prioritäten sortiert und dann alle Zugtrassen einer Prioritätsstufe vollständig in den Bildfahrplan eingelegt. Erst danach werden die aufgetretenen Konflikte sukzessive gelöst.

Durch das gebündelte Einlegen entfällt direkt das bei der Betrachtung von Netzstrukturen auftretende Problem, die Zugfahrten mit gleicher Priorität in eine sinnvolle Reihenfolge bringen zu müssen. Das bedeutet, es müssen weder Sortierquerschnitte wie in NSIM definiert noch die für Netze problematischen Start- bzw. Einbruchzeitpunkte der Züge verwendet werden.

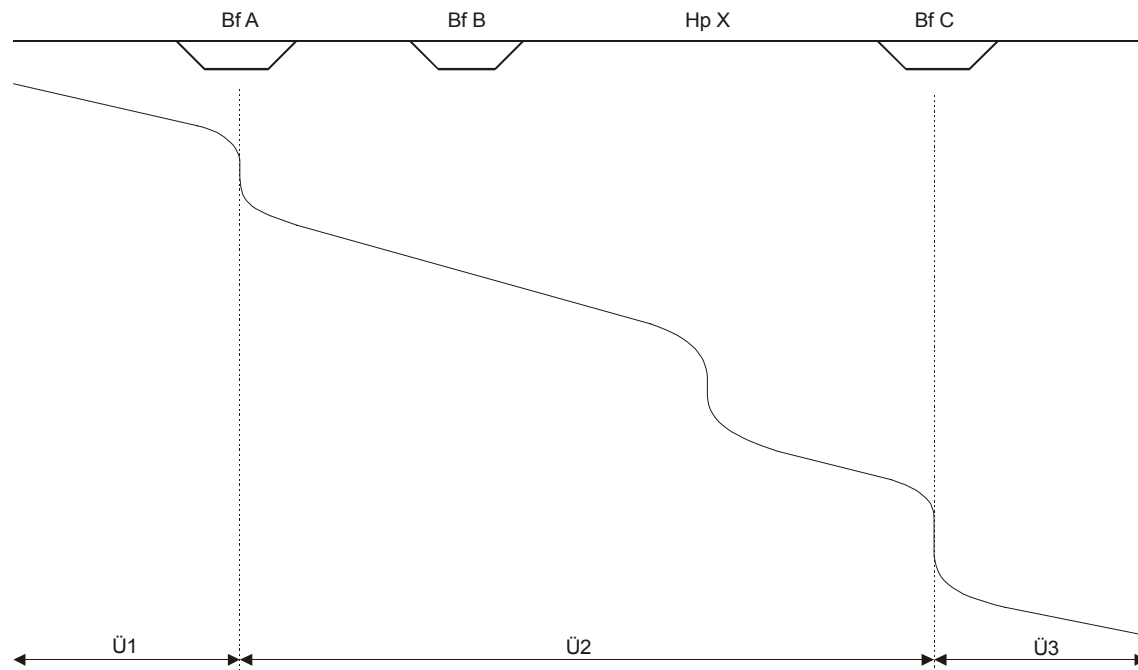
Zudem kann durch das komplette Einlegen eine verbesserte Variante des in NSIM verwendeten abschnittswisen Einlegens zur realistischen Betrachtung eingleisiger Strecken realisiert werden. Ursprünglich legten alle asynchronen Verfahren die Zugfahrten entsprechend einer Reihung nacheinander über ihren gesamten Laufweg in das „Bearbeitungsblatt“ ein. Da dieses Vorgehen nicht abschnittsweise arbeitet, führt es bei eingleisigen Strecken schnell zu Belegungen durch abwechselnde Fahrten, die vorzeitig weitere Zugfahrten unmöglich machen. Derselbe negative Effekt tritt natürlich auch bei iterativ durchgeführten, automatischen Trassensuchen auf, wie sie beispielsweise für SIMU++ vorgeschlagen werden [3-6].

Durch das komplette Einlegen und das sukzessive Lösen der Konflikte werden die Zugfahrten bei dem neuen Verfahren nicht grundsätzlich abschnittsweise betrachtet. Stattdessen werden die Abschnitte erst bei der Lösung eines Konfliktes berücksichtigt, da dieses zur realistischen Behandlung eingleisiger Strecken vollkommen ausreichend ist und zu einem effizienteren Vorgehen führt.

Ist es im Rahmen einer Konfliktlösung erforderlich, dass ein Zug eine planmäßige Wartezeit erhält, soll diese möglichst im rückliegenden Bahnhof abgewartet werden. Ein Abbleiben der Wartezeit auf der Strecke erhöht die erforderliche Belegungszeit und senkt die im Weiteren zur Verfügung stehende Trassenkapazität der Strecke. Im neuen Verfahren werden

aufgrund der zentralen Rolle der Haltzeitverlängerungen die aus den analytischen Verfahren bekannten Überholungsabschnitte zur Unterteilung der Zugfahrten in Abschnitte verwendet.

Ein Überholungsabschnitt startet und endet an einem Überholungsbahnhof oder dem Rand des betrachteten Netzes. Unter einem Überholungsbahnhof versteht man eine Position, an der ein Zug hält und dabei überholt (oder gekreuzt) werden kann. Überholungsabschnitte sind abhängig von den Halten des Zuges und weiteren Zugparametern, wie seiner Länge und Traktionsart.



**Abbildung 5: Überholungsabschnitte eines Zuges**

In Abbildung. 5 ist eine Zugfahrt zusammen mit ihren Überholungsabschnitten dargestellt. Der erste Überholungsabschnitt beginnt am Anfang des betrachteten Netzes und verläuft bis zum ersten Halt des Zuges im Bahnhof A. Der anschließende endet erst in dem nächsten Bahnhof, in dem der Zug hält und dabei auch überholt werden kann. Der Halt des Zuges an dem Haltepunkt X ist also nicht maßgebend. Der letzte Überholungsabschnitt endet wiederum mit dem Netzende.

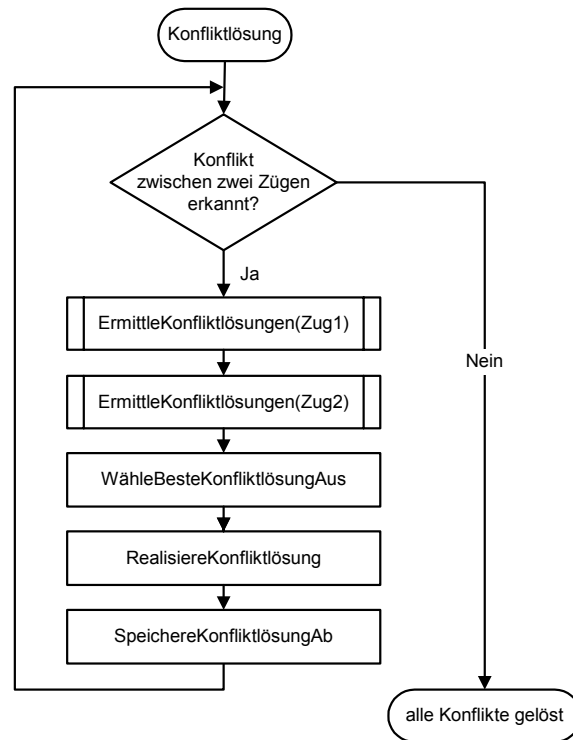
Die vorhandenen Konflikte werden bei dem neuen Verfahren so gelöst, dass die betrachteten Züge in ihrem aktuellen Überholungsabschnitt keinen weiteren Konflikt haben. Ein späterer Konflikt führt daher im Allgemeinen zu einer Verlängerung in einer folgenden Warteposition. Da die Konflikte in ihrer zeitlichen Reihenfolge unter Betrachtung der Überholungsabschnitte gelöst werden, entstehen keine Fahrpläne mit zu geringer Kapazitätsauslastung.

Durch das abschnittsweise Vorgehen bei der Konfliktlösung ist es analog zu NSIM allerdings möglich, dass Konfliktlösungen realisiert werden, die zu einem späteren Simulationszeitpunkt zurückgenommen werden müssen, da sie für den weiteren Verlauf des Zuges nicht sinnvoll sind. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn ein alternativer Fahrweg in einer Betriebsstelle am Ende eines Überholabschnitts gewählt wird, der eine Verlängerung des bestehenden Halts aufgrund eines späteren Konflikts nicht zulässt. In diesem Fall wird bei der späteren Konfliktlösung der betrachtete Überholungsabschnitt nach vorne vergrößert, um so eine gute Konfliktlösung für den gesamten Bereich zu erreichen. Durch die Vergrößerung des betrachteten Abschnittes kann es insbesondere auch nicht zu dauerhaften Blockierungen im Simulationsablauf kommen.

Allerdings kann es sich nach einigen erfolgreichen Konfliktlösungen zu Beginn des Zuglaufes herausstellen, dass ein Zug aufgrund fehlender Kapazität eines später zu durchlaufenden Netzteils nicht weiter betrachtet werden kann und daher gelöscht werden muss. In diesem Fall können Trassen anderer Züge noch Veränderungen gegenüber ihrer Bestellung enthalten, die auf Konfliktlösungen mit dem jetzt gelöschten Zug beruhen und daher zurückgenommen werden müssen. Hierzu ist eine Dokumentation der Veränderungen an den bestellten Trassen erforderlich.

### **3.3.2 Lösung eines einzelnen Belegungskonfliktes**

Nach der Vorstellung der globalen Strategie zur Simulation kann nun die Lösung eines einzelnen Konfliktes beschrieben werden. Der Anwender soll in dem neuen Verfahren nicht alle möglichen Laufwege des Zuges explizit definieren müssen. Stattdessen werden diese von dem neuen Verfahren unter Berücksichtigung der zugehörigen Trassenbestellung selbständig ermittelt. Erst die moderne Rechnertechnik erlaubt diese Vorgehensweise, da sie die Berechnung der aktuellen Sperrzeiten innerhalb der Simulation voraussetzt. Die Berechnung der Fahr- und Belegungszeiten in FAKTUS bietet zudem gute Voraussetzungen für die notwendigen Erweiterungen.



**Abbildung 6: Phasen einer Konfliktlösung**

Die starre Vorgehensweise der bestehenden asynchronen Simulationsverfahren führt zu schlechten Ergebnissen bei der automatischen Konfliktlösung. Wie in Abbildung 6 dargestellt werden bei dem neuen Verfahren für jeden Konflikt unterschiedliche Alternativen zur Konfliktlösung berechnet, mit Hilfe einer lokalen Zielfunktion bewertet und die beste Lösung wird realisiert. So ist es möglich, den Konflikt optimal zu lösen, ohne eine starre Reihenfolge oder eine explizite Steuerung durch den Anwender einzusetzen. Bei der Ermittlung von Lösungsalternativen werden die bislang getrennt betrachteten Konfliktlösungsansätze „Änderung des Laufweges“ und „Änderung der Haltzeiten“ miteinander verknüpft. Dieser Ansatz wird der Tatsache gerecht, dass jede Zugfahrt auf einem Laufweg beruht und Haltzeiten nie unabhängig von diesem definiert werden können.

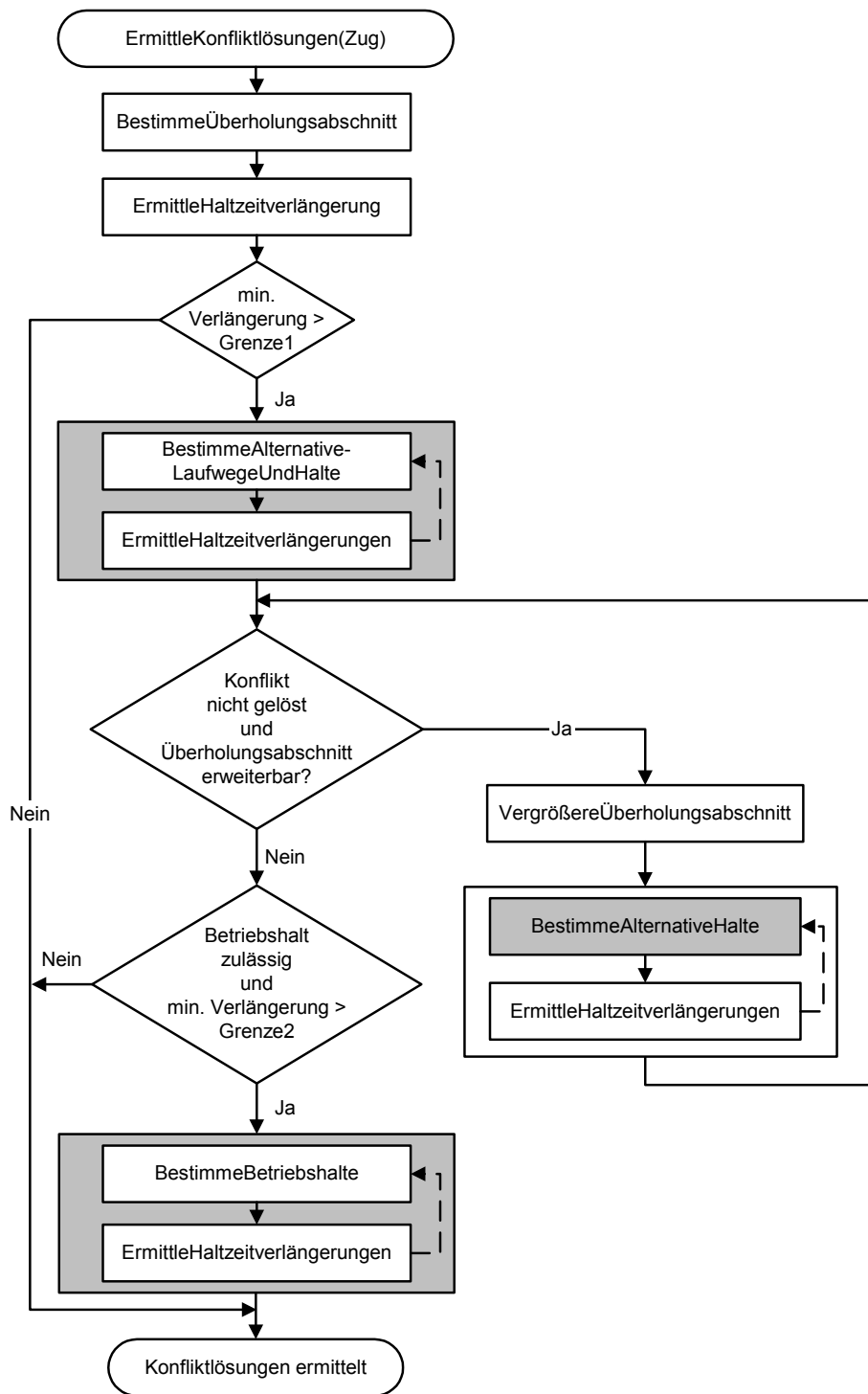


Abbildung 7: Ermittlung der Konfliktlösungen für einen Zug

Entsprechend dem in Abbildung 7 dargestellten Ermittlung der Konfliktlösung werden zur Konfliktlösung für die bisherigen Laufwege der beiden Züge und mögliche alternative Laufwege die notwendigen Veränderungen an den Haltzeiten berechnet, die erforderlich sind, um alle Konflikte des betrachteten Zuges im aktuellen Überholungsabschnitt zu lösen. Die betrachteten Konfliktlösungen beziehen sich jeweils nur auf einen Zug.

Ist der Konflikt mit den bisherigen Ansätzen noch nicht lösbar, können Fahrzeiten geändert und Betriebshalte eingelegt werden. Erst wenn es gar keine Möglichkeit gibt, einen Konflikt sinnvoll zu lösen, muss entschieden werden, welche der beteiligten Zugfahrten nicht weiter betrachtet werden soll. Die zugehörige Sperrzeitentreppe ist dann aus dem Bearbeitungsblatt zu entfernen. In diesem Fall kann das bestellte Zugprogramm nicht entsprechend der Vorgaben realisiert werden und es sind Veränderungen an diesen erforderlich.

Die Konfliktlösung durch Änderung der Fahrzeiten eines Zuges ist aus eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Sicht problematisch, da die bei der Fahrplanerstellung auftretenden planmäßigen Wartezeiten in die Bahnhöfe und nicht auf die Strecke gelegt werden sollen. Nur so kann ein qualitativ hochwertiger Fahrplan unter Berücksichtigung der gewünschten Prioritäten und Geschwindigkeiten (so genannter Zugmix) entstehen. Anderenfalls würde wegen der gestiegenen Fahr- und Mindestzugfolgezeiten die Kapazität der Strecken bezogen auf den bestellten Zugmix künstlich gesenkt werden. Aufgrund der an die langsameren Züge angepassten Geschwindigkeitsprofile könnten so mehr langsamere Züge auf der Strecke fahren und der Durchsatz der Strecke steigt. Daher wird diese Methode zur Konfliktlösung beim rechnergestützten Trassenmanagement in der Praxis insbesondere in Bereichen mit mangelnder Kapazität verwendet. Genau genommen werden hierdurch aber die bestellten Geschwindigkeitsprofile der Zugfahrten nicht korrekt berücksichtigt und die Möglichkeit, weitere schnelle Zugfahrten einlegen zu können, verringert sich. Erst durch ein neues Wunschprogramm mit entsprechend verändertem Zugmix kann korrekterweise ein hochwertiger Fahrplan mit geänderten Geschwindigkeitsprofilen erzeugt werden. In einer klassischen Simulation der Fahrplanerstellung, die insbesondere der Ermittlung von Kapazitätsengpässen dient, werden daher Änderungen der Fahrzeiten zur Konfliktlösung nicht verwendet. Im Rahmen eines automatischen Trassenmanagements sollte diese Art der Konfliktlösung aber zumindest als Option vorhanden sein.

Abschließend müssen für die einzelnen Alternativen zur Lösung eines Konfliktes die aufgrund der veränderten Fahrzeiten und der erforderlichen Haltzeitveränderungen resultierenden Zusatzverspätungen ermittelt werden, damit diese als Parameter bei der Bestimmung einer optimalen Konfliktlösung verwendet werden können.

### **3.3.4 Bewertung der ermittelten Konfliktlösungen**

Nach der Ermittlung möglicher Alternativen zur Konfliktlösung muss nun diejenige ausgewählt werden, die tatsächlich verwendet werden soll. Hierzu sind alle berechneten Konfliktlösungen mit Hilfe von Kriterien zu bewerten, die dann in einer Zielfunktion zur

Bestimmung des Optimums verwendet werden. Allerdings konnte trotz jahrzehntelanger Suche bislang keine grundsätzlich gültige, globale Zielfunktion für die automatische Fahrplanerstellung gefunden werden.

Da das neu entwickelte Verfahren auf der Ebene von Sperrzeitentuppen arbeitet und die Zielfunktion dem Vergleich konkreter Alternativen zur Konfliktlösung dient, liegt hier eine grundlegend andere Situation vor, die große Analogien mit dem rechnergestützten Trassenmanagement besitzt. Daher sollen Kriterien aus diesem Bereich auch bei dem neuen Verfahren verwendet werden und gewichtet in die Zielfunktion eingehen.

Es existieren eine Reihe sinnvoller Kriterien:

- Die Beförderungszeitverlängerung beschreibt die sinkende Attraktivität der Zugfahrt für den Kunden. Sie wird in vielen Verfahren verwendet.
- Die Hierarchieziffern der verwendeten Betriebsstellenfahrwege ermöglichen eine Berücksichtigung der Erschwernis für das Einlegen weiterer Züge, da seitenfalsche Überholungsgleise und Betriebsstellenfahrwege der Gegenrichtung, die schnell zu Problemen bei weiteren Zügen führen können, besonders kleine Hierarchieziffern haben.
- Führt eine Konfliktlösung direkt zu einem Konflikt in dem nächsten Überholungsabschnitt, dann sollte sie schlechter beurteilt werden, auch wenn sie den aktuellen Konflikt gut löst. Auf diesem Weg kann die Suche nach einem lokalen Optimum leicht auf die Betrachtung benachbarter Konfliktfälle erweitert werden.
- Mit Hilfe von Erfahrungen oder den Ergebnissen eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Verfahren zur Kapazitätsberechnung, wie z. B. ANKE, können einige Betriebsstellenfahrwege oder Infrastrukturelemente als besonders belastet gekennzeichnet werden, die bei der Fahrplanerstellung speziell behandelt werden sollten.
- Die Kosten einer Konfliktlösung aufgrund der verwendeten Trasse oder der verbrauchten Energie können ermittelt werden, wenn eine entsprechende Datengrundlage vorhanden ist.

Je nach Einsatzzweck können in BABS I Zielfunktionen zusammengesetzt werden, die dann entsprechende Auswirkungen auf die Ergebnisse haben. Für eine klassische Simulation der Betriebsabwicklung ist beispielsweise die Verwendung der ersten beiden Kriterien sinnvoll.

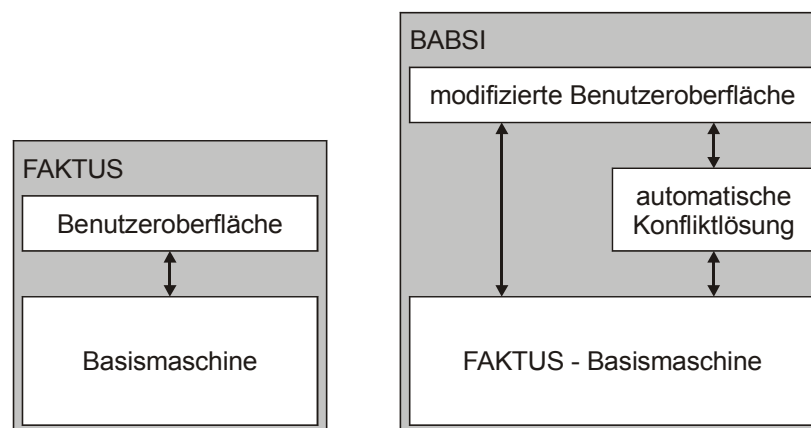
### **3.4 Systemarchitektur und Simulationsmodi von BABS I**

#### **3.4.1 Systemarchitektur**

Das Simulationsverfahren BABS I verwendet die konzeptionelle Basis des Verfahrens FAKTUS zur rechnergestützten Trassenvergabe und erweitert diese entsprechend der

zusätzlichen Anforderungen. Bei der Implementierung von BABSI wurden nicht nur die Konzepte von FAKTUS berücksichtigt, sondern darüber hinaus auch die bewährten Softwaremodule zur Infrastrukturmodellierung, Fahrzeit- und Belegungsrechnung wieder verwendet. Hierdurch kann eine über die Grundkonzepte hinausgehende Kompatibilität beider Verfahren erreicht werden, die einen direkten wechselseitigen Austausch von Daten und Algorithmen ermöglicht und so die zu erwartenden Synergieeffekte weiter steigert. Durch die Wiederverwendung bewährter Komponenten ist zudem eine wesentlich einfachere Validierung des neuen Simulationsverfahrens möglich.

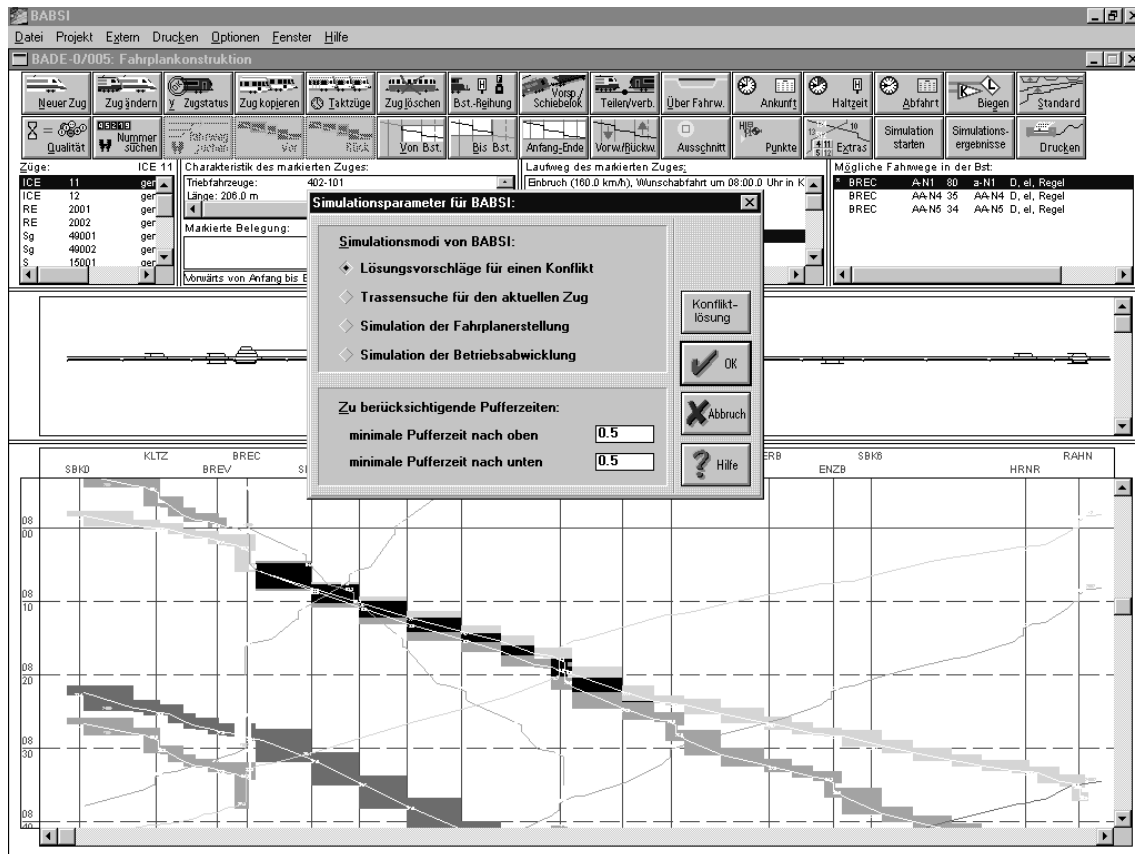
Aus softwaretechnischer Sicht ist allerdings eine exakte Trennung der wiederverwendeten Basiskomponenten von den neuen Simulationsalgorithmen zweckmäßig, um sowohl Änderungen der Basiskomponenten als auch spätere Erweiterungen zu erleichtern. Wie in Abbildung 8 dargestellt, besteht BABSI neben dem Teilsystem zur Realisierung der Benutzeroberfläche aus zwei weiteren, weitgehend unabhängigen Teilsystemen. Das eine enthält die wiederverwendeten Module von FAKTUS in der so genannten FAKTUS-Basismaschine und das andere die neu entwickelten Algorithmen zur automatischen Konfliktlösung. Die FAKTUS-Basismaschine hat keine Kenntnis von einer automatischen Konfliktlösung und die automatische Konfliktlösung verwendet die Standard-Routinen der Fahrplanbearbeitung von FAKTUS. Die schmale Kopplung der Teilsysteme ermöglicht eine relativ einfache Anpassung an neue Versionen von FAKTUS und eine einfache Portierung der Simulationsroutinen auf andere Basismaschinen zur Fahrplankonstruktion, wenn diese analog zu FAKTUS auf der Grundlage von Sperrzeiten arbeiten.



**Abbildung 8: Systemarchitekturen von FAKTUS und BABSI**

Wie in Abbildung 9 zu sehen ist, wurde in BABSI das zentrale Konstruktionsfenster von FAKTUS um zusätzliche Schaltflächen erweitert, mit denen die neuen Simulationsalgorithmen gestartet und die Simulationsergebnisse abgerufen werden können. Hierdurch kann der Bearbeiter in seiner gewohnten Arbeitsumgebung auf die neuen Funktionalitäten zur Unterstützung der manuellen Konfliktlösung, wie die Generierung von Lösungsvorschlägen und die Suche nach freien Sonderzugtrassen, zurückgreifen. Darüber hinaus konnten im Rahmen der notwendigen Validierung des neuen Simulationskonzeptes

von BABSİ berechnete Konfliktlösungen und die sich ergebenden Zugtrassen direkt auf ihre Plausibilität überprüft werden.



**Abbildung 9: Simulationsverfahren BABSİ**

Nach dem Starten der Simulation öffnet sich ein neues Dialogfenster zur Eingabe der Simulationsparameter. Hier können zunächst der gewünschte Simulationsmodus und die zu berücksichtigenden Mindestpufferzeiten vom Bearbeiter festgelegt werden.

### 3.4.2 Simulationsmodi von BABSİ

Auf der Basis der im letzten Abschnitt erläuterten automatischen Konfliktlösung können unterschiedliche Aufgabenstellungen realisiert werden. Das Simulationssystem BABSİ enthält vier eigenständige Simulationsmodi für die zentralen Anwendungsfälle. Hierbei handelt es sich um die Ermittlung von Konfliktlösungsvorschlägen und um die Suche nach freien Trassen für einzelne Züge im Rahmen des rechnergestützten Trassenmanagements. Darüber hinaus existieren weitere Modi zur Simulation der Fahrplannerstellung und zur

Simulation der Betriebsabwicklung, die insbesondere der Ermittlung von Kennwerten im Rahmen eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Untersuchungen dienen.

### **Lösungsvorschläge für einen Konflikt**

Ausgehend von einem konkreten, von FAKTUS erkannten Konflikt berechnet BABSİ mit den vorgestellten Methoden unter Beachtung der Prioritäten der Züge mögliche Konfliktlösungen und stellt diese dem Bearbeiter im Detail vor. Dieser kann dann einen Vorschlag akzeptieren und der Konflikt wird entsprechend gelöst.

Mit diesem Modus kann der Anwender, die in BABSİ implementierte Strategie zur Konfliktlösung schrittweise nachvollziehen. Im Rahmen des rechnergestützten Trassenmanagements kann dieser Modus zur Erzeugung von Lösungsvorschlägen für konkrete Konflikte verwendet werden. Durch die automatische Bestimmung alternativer Lösungen sinkt der manuelle Eingabeaufwand für den Bearbeiter erheblich und die Effizienz der manuellen Fahrplankonstruktion kann so gesteigert werden.

### **Trassensuche für einen Zug**

Für einen bestimmten Zug wird in diesem Modus ausgehend von seiner Wunschlage die nächste freie Trasse gesucht. Die vorhandenen Belegungen anderer Züge werden dabei ebenso wie die geforderte Pufferzeit berücksichtigt.

Da eine bislang nicht verwendete Trasse für den Zug gesucht werden soll, wird er von BABSİ mit der geringsten Priorität eingelegt. Die dabei entstehenden Konflikte müssen sukzessive, allein durch Veränderungen an der neuen Trasse gelöst werden. Für die einzelnen Konflikte werden automatisch Lösungen berechnet, mit Hilfe der vorgegebenen Kriterien bewertet und schließlich die am besten bewertete realisiert.

Dieser Modus ist insbesondere zur Vergabe von im Fahrplan ungenutzter Trassenkapazität an einen Sonderzug oder eine andere kurzfristig einzulegende Fahrt geeignet und stellt einen weiteren Schritt zur Automatisierung des rechnergestützten Trassenmanagements dar.

### **Simulation der Fahrplanerstellung**

Die Simulation der Fahrplanerstellung simuliert den Prozess der Trassenvergabe unter Berücksichtigung der Prioritäten der Züge und der vorgegebenen Pufferzeiten.

Ausgehend von den Trassenbestellungen werden die einzelnen Zugfahrten entsprechend ihrer Priorität eingelegt. Sind alle Züge mit gleicher Priorität eingelegt, werden die entstandenen Konflikte in ihrer zeitlichen Reihenfolge gelöst. So entsteht ein konfliktfreier Fahrplan von

hoher Qualität, auf dessen Grundlage ein störungsfreier Betrieb der Züge abgewickelt werden kann. Die bei der Konfliktlösung entstandenen planmäßigen Wartezeiten werden protokolliert und können im Rahmen eisenbahn-betriebswissenschaftlicher Untersuchungen weiter verwendet werden.

Dieser Modus kann auch im Rahmen des Trassenmanagements beispielsweise zur Ermittlung von Fahrplanvarianten verwendet werden. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Erweiterungen des Konzeptes um rückwärts konstruierte Trassen und um die Berücksichtigung von Verknüpfungen zwischen Zugfahrten aus Kompatibilitätsgründen mit den existierenden eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Verfahren bislang in BABSİ noch nicht realisiert wurden. Da eine vollständig automatisierte Fahrplanerstellung erst am Ende einer schrittweisen Automatisierung des rechnergestützten Trassenmanagements steht, sollten diese Erweiterungen unter Berücksichtigung der Ergebnisse der ersten Schritte und der genau zu definierenden Anforderungen des Trassenmanagements realisiert werden.

### **Simulation der Betriebsabwicklung**

Mit einer Simulation der Betriebsabwicklung kann die Stabilität eines bestehenden Fahrplans im Betriebsablauf überprüft werden. Hierzu wird die automatische Konfliktlösung von BABSİ zur Erzeugung von Dispositionsfahrplänen verwendet.

Zur Nachbildung realer betrieblicher Rahmenbedingungen werden zufällige Verspätungen in einen existierenden Fahrplan eingespielt und die resultierenden Konflikte unter Beachtung der Prioritäten der einzelnen Zugfahrten gelöst. Pufferzeiten müssen bei der Betrachtung der Betriebsabwicklung nicht berücksichtigt werden. Diese bei der Fahrplanerstellung eingebauten Reservezeiten können jetzt zum Verspätungsabbau genutzt werden.

Die Beurteilung der Stabilität des ursprünglichen Fahrplans kann anhand der aus den Konfliktlösungen resultierenden außerplanmäßigen Wartezeiten erfolgen. Allerdings sind zur statistischen Absicherung der Ergebnisse mehrere Simulationsläufe mit jeweils zufällig erzeugten Verspätungen erforderlich.

Natürlich kann die Simulation der Betriebsabwicklung im Rahmen des Trassenmanagements zum Nachweis der Stabilität eines von einem Bearbeiter mit FAKTUS erzeugten Fahrplans verwendet werden. Da die Konstruktionsrichtung bei der Erstellung von Dispositionsfahrplänen durch den Zeitablauf vorgegeben ist, spielen rückwärts konstruierte Trassen hierbei keine Rolle. Ebenso müssen Anschlüsse nur in Konstruktionsrichtung betrachtet werden. Allein die Entscheidung, welcher Zug wie lange warten soll, ist als zusätzlicher Datensatz analog zu den Wartezeitregelungen der Betriebsdisposition vorzugeben.

### 3.5 Einsatzgebiete für die Simulation der Fahrplanerstellung

Die unterschiedlichen auf der Simulation der Fahrplanerstellung basierenden Simulationsmodi von BABSİ können sowohl im Rahmen des Trassenmanagements als auch bei eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchungen eingesetzt werden. Die einzelnen Anwendungsfälle unterscheiden sich insbesondere im zeitlichen Abstand zwischen dem Zeitpunkt der Simulation und dem simulierten Sachverhalt. Je geringer der zeitliche Abstand ist, um so genauer sind die Kenntnisse über die vorhandene Infrastruktur und das konkrete Betriebsprogramm.

Bei strategischen Planungen werden Infrastrukturprojekte wie Neubaustrecken oder Umbauten von größeren Eisenbahnknoten untersucht, die erst 5 bis 20 Jahre später realisiert werden. Hier liegt die Infrastruktur und das zu berücksichtigende Betriebsprogramm erst sehr vage vor. Die Simulation der Fahrplanerstellung ist in diesen Fällen von wesentlicher Bedeutung, damit Betriebssimulationen auf der Grundlage unterschiedlicher Fahrpläne durchgeführt werden können. Nur so sind abgesicherte Aussagen über die zu erwartende Betriebsqualität möglich. Die heutige Praxis der manuellen Erstellung eines oder maximal zweier konkreter Fahrpläne auf der Grundlage der vagen Betriebsprogramme kann so abgelöst und die Aussagequalität erhöht werden.

Operative Planungen betrachten dagegen Projekte mit einem zeitlichen Horizont von 6 bis 24 Monaten. Hierbei liegt die Infrastruktur schon im Wesentlichen fest, das Betriebsprogramm existiert dagegen erst in Varianten und ist zumeist Gegenstand der Untersuchungen. Beispiele hierfür sind die Einführung eines integralen Taktfahrplans, die Einrichtung von Direktzügen im Personenfernverkehr oder die langfristige Baustellenplanung. Bei der Erstellung konkreter Fahrpläne im Rahmen des Trassenmanagements können insbesondere die Simulation der Fahrplanerstellung und die Unterstützung der manuellen Fahrplankonstruktion durch Konfliktlösungsvorschläge verwendet werden. Die Beurteilung der Stabilität dieser Fahrpläne ist ebenfalls durch eine Simulation der Betriebsabwicklung möglich.

Auch wenn die vorhandene Infrastruktur und der Jahresfahrplan relativ fest sind, können kurzfristig eintretende Situationen Entscheidungen erforderlich machen, die mit Hilfe des Simulationsverfahrens BABSİ unterstützt werden können. Beispiele für solche taktischen Planungen sind kurzfristig einzulegende Sonderzüge oder Gleissperrungen aufgrund von Störungen. Gerade für das Bearbeiten einzelner Sonderzüge ist die automatische Trassensuche von BABSİ konzipiert worden. Aber auch die Erstellung vollständig neuer Fahrpläne ist mit den anderen Simulationsmodi in kurzer Zeit möglich. Hierbei existiert ein fließender Übergang zur Disposition der Züge im Betriebsablauf, die direkten Zugriff auf die verkehrenden Züge hat und mit realen Störungen arbeitet. Mit diesem Thema beschäftigt sich das Forschungsvorhaben ASDIS, das am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen bearbeitet wird [4-7].

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Im ersten Teil des Vortrags wurde dargestellt, über welchen Grad an technischer Unterstützung das Trassenmanagement mittlerweile verfügt, dessen Kernprozess Fahrplankonstruktion noch vor wenigen Jahren mit Bleistift und Lineal erfolgt ist. Hervorzuheben sind hier die das gesamte Netz umfassende konsistente Datenhaltung von detaillierter Infrastruktur und Fahrplan, die automatische Generierung der betrieblich relevanten Unterlagen wie Bildfahrplan oder Buchfahrplan sowie die interaktive Fahrplan-Feinkonstruktion mit integrierter Fahrzeitrechnung und Konflikterkennung.

Wir haben auch gesehen, dass auf der Basis der erreichten Ergebnisse weitere Schritte erforderlich sind, um den künftigen Herausforderungen an eine effizient arbeitende und qualitativ hochwertige Eisenbahn zu begegnen. So wird es erforderlich sein, die Sichtweisen der Veröffentlichung und der Konstruktion auf die Infrastrukturdaten zusammen zu führen und die Qualitätsprüfung der Fahrplanunterlagen zu optimieren. Vor allem aber müssen die unterjährigen Änderungen des Netzes und auch des Fahrplans umfassender und durchgängiger behandelt werden können. Unter anderem sind hierzu Innovationen im Bereich von Datenhaltung und Algorithmik erforderlich. Der interaktive Ansatz der Fahrplankonstruktion wird dabei zunehmend durch Automatismen auf Basis der Simulation ergänzt werden müssen.

Im zweiten Teil des Vortrages wird ein neues asynchrones Verfahren zur Simulation der Fahrplannerstellung und der Betriebsabwicklung von Schienenbahnen beschrieben. Die neu entwickelte Simulationsstrategie und die Verwendung geeigneter Basiskomponenten aus dem Bereich des rechnergestützten Trassenmanagements führen zu einem Simulationsverfahren, das in verschiedenen Planungsphasen unter Berücksichtigung der Zugprioritäten eingesetzt werden kann und dem direkt flächendeckende Infrastruktur- und Fahrplandaten zur Verfügung stehen.

In den klassischen Fragestellungen der Eisenbahnbetriebswissenschaft – Bemessung von Eisenbahninfrastruktur und Validierung neuer Fahrplan- und Betriebskonzepte – erzielt das neue asynchrone Simulationsverfahren aufgrund der verfeinerten Konfliktlösung insbesondere in eingleisigen Abschnitten und in komplexen Netzstrukturen bessere Ergebnisse. Hierzu tragen vor allem die selbst bestimmten Laufwegalternativen, die abschnittsweise Konfliktlösung auf der Basis von Überholungsabschnitten und die adaptive Berechnung unterschiedlicher Konfliktlösungsalternativen mit Auswahl anhand einer Zielfunktion bei.

Im Rahmen der Konzeption dieser neuen Simulationsstrategie zeigt sich insbesondere, dass die mathematische Modellierung aufgrund der kombinatorischen Vielfalt der möglichen Reihenfolgen der Züge und der jedem Zug zur Verfügung stehenden Fahrwege eine Betrachtung vereinfachter Modellstrukturen erfordert, die von den Fragestellungen des Trassenmanagements zum Teil weit entfernt sind. So ist die Kombination von sperrzeitenbasierten Verfahren und mathematischen Ansätzen bislang auf die Suche nach

freien Einzeltrassen in bestehenden Fahrplänen begrenzt. Allerdings kann durch die sukzessive Suche nach Einzeltrassen kein neuer Fahrplan erzeugt werden, der die vorhandene Infrastrukturkapazität insbesondere auf eingleisigen Abschnitten sinnvoll auslastet. Eine generelle Verwendung von Sperrzeiten in den bestehenden mathematischen Ansätzen zur automatischen Fahrplanerstellung würde zu einer weiteren Steigerung der Komplexität führen und somit den praktischen Einsatzbereich nochmals reduzieren.

Dagegen ergibt sich durch die Verwendung des sperrzeitenbasierten Ansatzes und die explizite Betrachtung der Konflikte eine konzeptionelle Nähe zum rechnergestützten Trassenmanagement, die aufgrund der verbesserten Konfliktlösungsstrategie neue Anwendungen in diesem Bereich erlaubt. So kann durch die Erzeugung von Konfliktlösungsvorschlägen, die Suche nach freien Einzeltrassen in bestehenden Fahrplänen und das kapazitätsschonende Einlegen mehrerer Zugtrassen eine direkte Effizienzsteigerung im rechnergestützten Trassenmanagement erreicht werden. Mit Hilfe der Simulation der Betriebsabwicklung kann schließlich die im Betriebsablauf zu erwartende Stabilität beliebiger Fahrpläne überprüft und so eine frühzeitige Qualitätssicherung der zugehörigen Planungen realisiert werden.

## Literatur

- [1] Bundesgesetzblatt, 1997, Verordnung über die diskriminierungsfreie Benutzung der Eisenbahninfrastruktur und über die Grundsätze zur Erhebung von Entgelt für die Benutzung der Eisenbahninfrastruktur (Eisenbahninfrastruktur-Benutzungsverordnung – EIBV) vom 17.12.97, BGBl. I, S. 3153 – 3155
- [2] Brünger, O., 1995, Konzeption einer Rechnerunterstützung für die Feinkonstruktion von Eisenbahnfahrplänen (Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 51)
- [3] Brünger, O., 2000, Fahrplanfeinkonstruktion mit Rechnerunterstützung – Grundlagen, Meilensteine und Visionen (Edition ETR: Informationstechnologie bei den Bahnen, Hestra-Verlag Darmstadt, S. 148 – 154)
- [4] Friedrich, W., Weiß, W., Elektronischer Buchfahrplan – Das Verfahren zur „Führerraumanzeige des Fahrplans“ bei der DB AG, (Deine Bahn 9/2002, S. 548 – 553)
- [5] Gröger, Th., 2002, Simulation der Fahrplanerstellung auf der Basis eines hierarchischen Trassenmanagements und Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung (Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 60)
- [6] Hauptmann, D., 2000, Automatische und diskriminierungsfreie Ermittlung von Fahrplantrassen in beliebig großen Netzen spurgeführter Verkehrssysteme (Dissertation, Wissenschaftliche Arbeit Nr. 54 des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb)

der Universität Hannover, Wissenschaftliche Arbeiten für den Schienenverkehr, Hestra-Verlag Darmstadt)

- [7] Jacobs, J., 2003, Rechnergestützte Konfliktermittlung und Entscheidungs-unterstützung bei der Disposition des Zuglaufs (Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 61)
- [8] Schultze, K., 1985, Modell für die asynchrone Simulation des Betriebes in Teilen des Eisenbahnnetzes (Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 38)
- [9] Schwanhäüßer, W.; Gast, I.; Schultze, K.; Wakob, H.; Brünger, O.; Mehta, S., 2000, Programmfamilie SLS – STRESI, STRELE, ALFA – PC-Programme zur Leistungsfähigkeitsberechnung und Simulation, Benutzerhandbuch, Version 4.91, Aachen
- [10] Schwanhäüßer, W. (Hrsg.), 2000, 3. Eisenbahnbetriebswissenschaftliches Kolloquium, Veröffentlichung des Verkehrswissenschaftlichen Institutes, Heft 57
- [11] Wendler, E., 1999, Analytische Berechnung der planmäßigen Wartezeiten bei asynchroner Fahrplankonstruktion (Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 55)