

6 Programmentwicklung und -ablauf

6.1 Allgemeines

Auswahl der Programmiersprache

Für den hier vorliegenden speziellen Anwendungszweck der Simulation wurde eine Programmiersprache benötigt, die folgende Anforderungen erfüllt:

- Die Programmiersprache muß eine gute Strukturierbarkeit bieten, um komplexe Quelltexte sinnvoll gliedern zu können und dadurch überschaubar zu halten.
- Es muß eine objektorientierte Programmierung möglich sein, um Programmteile mehrfach verwenden zu können und dadurch den Programmieraufwand zu verringern.
- Das Programm muß leistungsfähige und flexible Datenverwaltungsroutinen enthalten, um große Datenmengen und unterschiedlichste Datenformate zu beherrschen.
- Für die schnelle und komfortable Erstellung von Ausgabereports sollte das Programmpaket ein leistungsfähiges Tool enthalten.
- Das Programm muß über eine bildschirmorientierte Erstellung der Eingabemasken bzw. -formulare verfügen.

Alle diese Anforderungen werden vom Programmsystem DELPHI der Firma BORLAND bzw. INPRISE optimal erfüllt. Es besteht im wesentlichen aus einem PASCAL-Compiler, der um Zugriffsmöglichkeiten auf verschiedene Datenbanken wie z.B. SQL, dBase oder PARADOX erweitert wurde. Da dBase zum Zeitpunkt der Systementscheidung das weitverbreitetste Datenbanksystem war und innerhalb von DELPHI die komfortabelste Bedienung bot, wurde dieses System gewählt.

Das Programmsystem DELPHI verwendet zwei Dateitypen: Im Formular werden die Objekte abgelegt, in der Unit die Syntax. Die Objekte werden von DELPHI zur Verfügung gestellt und haben als wichtigste Aufgabe die Darstellung der Formulare auf dem Bildschirm und den Datenzugriff. Die Syntax entspricht im wesentlichen der von PASCAL, ergänzt mit Befehlen etwa zur Objekt- und Datenverwaltung. Jedem Formular ist genau eine Unit zugeordnet, während Units, falls sie keine Objekte besitzen, auch kein Formular benötigen. Die Programmierung innerhalb der Units erfolgt ausschließlich in Unterprogrammen, sogenannten procedures, die auch von anderen Units genutzt werden können.

Auswahl des Simulationsverfahrens

Da das Simulationsprogramm speziell für die Bemessung von Begegnungsabschnitten auf eingleisigen S-Bahn-Strecken erstellt werden sollte, wurde insbesondere auf die schnelle Variation von Eingabedaten sowie eine hohe Rechengeschwindigkeit Wert gelegt. Gleichzeitig waren maximale Ansprüche an die Genauigkeit zu erfüllen und die Ergebnisse der Auswertung der RZü-Daten sollten möglichst vollständig und exakt berücksichtigt werden.

Übliche Simulationsprogramme stellen die Gleistopologie (insbesondere Weichen), Signale und Gleisschaltmittel (z.B. Schienenstöße oder Signalzugschlußstellen) mit Hilfe eines Kanten/Knoten-Modells exakt dar. Der Vorteil

ist, daß auch komplizierte Weichenstraßen und große Streckennetze eingegeben werden können. Bei S-Bahnen oder anderen Nahverkehrsbahnen sind solche Bedingungen jedoch nur selten anzutreffen, so daß im vorliegenden Simulationsprogramm kein Kanten/Knoten-Modell, sondern eine streckenbezogene Beschreibung der Infrastruktur gewählt wurde. Nachteile anderer Programme, wie beispielsweise der hohe Eingabeaufwand bei einer Verlängerung eines Begegnungsabschnittes, wurden damit vermieden.

Da mit dem zu entwickelnden Simulationsprogramm sehr viele Varianten durchgespielt werden sollten, war die Reduzierung des Änderungsaufwandes ein wichtiger Gesichtspunkt. Daher wurden die für die Gleisbelegung und Gleisfreimeldung maßgebenden Daten und damit auch die Weichentopologie auf die Signalstandorte bezogen. Damit kann die Verlängerung oder Verkürzung eines Begegnungsabschnittes in der Regel durch die Änderung lediglich zweier Werte für die Signalstandorte bewerkstelligt werden.

Aufgrund der vielen durchzuspielenden Varianten war außerdem eine hohe Rechengeschwindigkeit erforderlich. Dies wurde erreicht, indem jeweils eine Fahrt von einer Betriebsstelle zur nächsten im allgemeinen durch nur einen Rechenschritt nachgebildet wurde. Die reinen Fahrzeiten werden vor der Simulation berechnet und danach nur noch stochastisch variiert. Alle Fahrzeitverlängerungen, die infolge von Behinderungen auftreten können, werden vorausgerechnet und in einer Datei abgelegt. Auf diese wird während der Simulation zurückgegriffen, wenn ein Zug eine Behinderung erfährt. Dieses Verfahren gewährleistet eine hohe Rechengeschwindigkeit und erfüllt außerdem die Forderung nach einer hohen Genauigkeit, indem Fahrzeitverlängerungen, die im Behinderungsfall auftreten, exakt berücksichtigt werden. Andere Programme hingegen berechnen die Fahrzeit im Behinderungsfalle mit Hilfe von Näherungsformeln.

Bei der Anwendung üblicher Simulationsverfahren werden im allgemeinen nur die Haltezeitüberschreitungen stochastisch variiert und zum Verspätungsabbau wird lediglich der Fahrzeitzuschlag genutzt. Dagegen werden im vorliegenden Programm alle aus den RZü-Daten gewonnenen Ergebnisse verwendet. Sowohl die Haltezeit als auch die Fahrzeit, die Wendezeit und die Abfahrtsverspätung an der Wendebetriebsstelle werden stochastisch variiert und damit auch zum Verspätungsabbau genutzt.

Vorschlag für eine Verzeichnisstruktur

Grundsätzlich können die Programmdateien beliebig auf der Festplatte abgespeichert werden, solange die Verzeichnisse in der Konfigurationsdatei korrekt eingegeben sind. Trotzdem empfiehlt sich eine sinnvolle Struktur, um eine gewisse Übersicht zu gewährleisten.

Ein Vorschlag für eine sinnvolle Verzeichnisstruktur ist nachstehender Graphik zu entnehmen. Im Verzeichnis der eigentlichen Programmdateien befinden sich neben der ausführbaren (exe-) Datei noch weitere Bild (*.bmp)- und Text (*.txt)-Dateien, die für die korrekte Funktion des Programms unentbehrlich sind. Für die Ausgabe der Daten in Listen bzw. Reports ist ein separates Programmpaket namens REPORTSMITH zuständig. Sowohl für das Programm selbst als auch für die Reports, die zur Ausgabe noch mit Daten gefüllt werden müssen, ist ein separates Verzeichnis vorgesehen.

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Dateien müssen Datendateien in separaten Verzeichnissen gespeichert werden. Zur Erstellung neuer Projekte oder Varianten sind leere Daten- bzw. Indexdateien (*.dbf bzw. *.mdx) erforderlich, die bei Bedarf in das entsprechende Projektverzeichnis kopiert und dort gefüllt werden. Diese erhalten ein gemeinsames Verzeichnis mit der Projektdatei, die alle Projekte verwaltet.

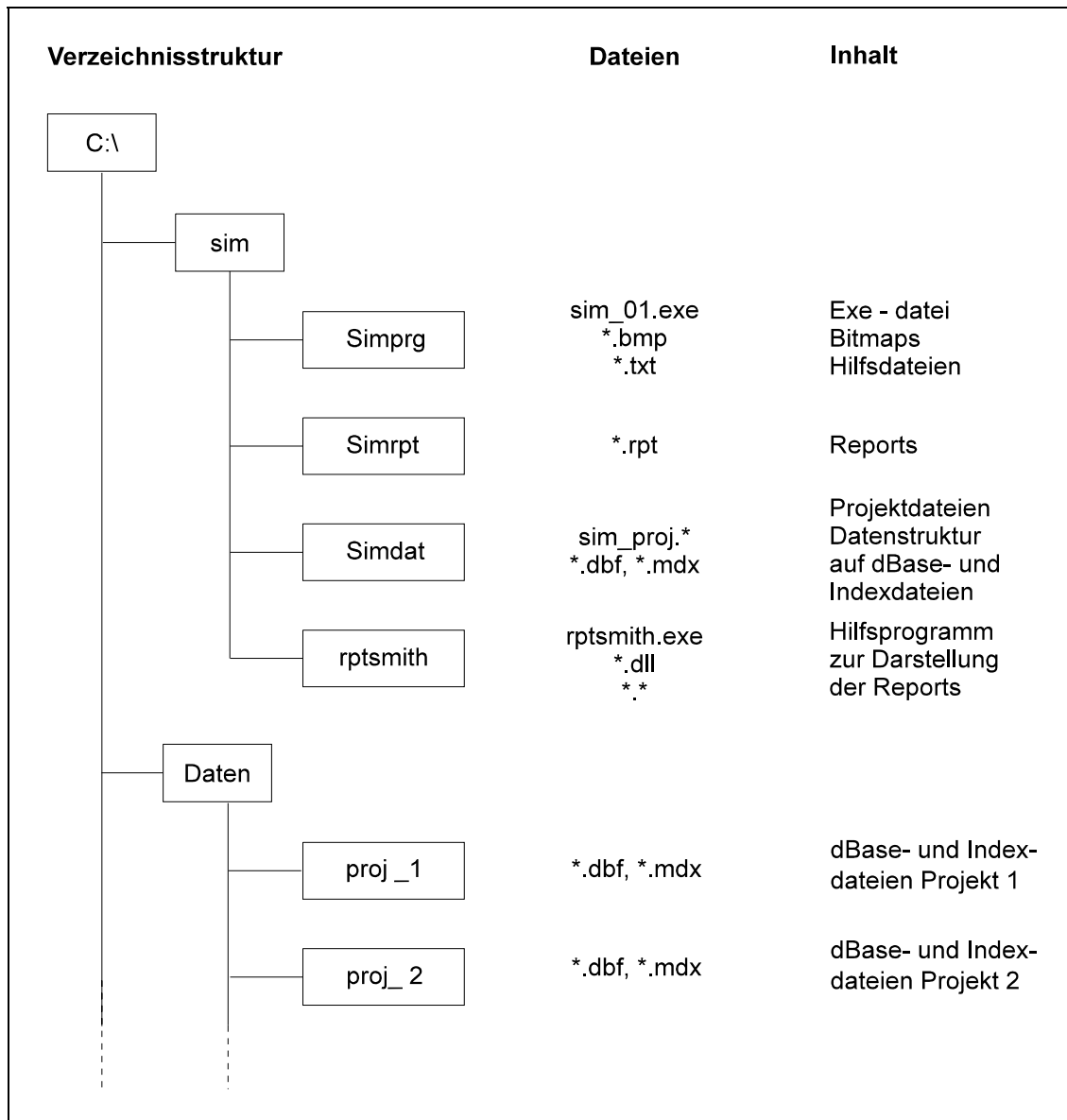


Abb. 6.1: Vorschlag für eine Verzeichnisstruktur

6.2 Dateistruktur

6.2.1 Allgemeines

Im Rahmen des Simulationsprogrammes werden die Daten in einer dBase-kompatiblen Datenbank gespeichert und verwaltet. Grundsätzlich sind 4 Dateitypen zu unterscheiden:

Projektdatei

In der Projektdatei sind die Projektbezeichnungen, die Projektverzeichnisse sowie weitere projektbezogene Kenndaten abgelegt.

Eingabedateien

Darin sind Streckenmerkmale wie Neigungen, zulässige Geschwindigkeiten oder Lage der Betriebsstellen sowie Triebfahrzeug- und Umlaufdaten gespeichert.

Arbeitsdateien

Arbeitsdateien sind Dateien, die erst kurz vor Durchführung der Simulation erstellt bzw. aktualisiert werden. Während der Simulation erfolgt ein ständiger Datenaustausch zwischen Programm und Arbeitsdateien.

Ergebnisdateien

In den Ergebnisdateien werden die Ergebnisse der Fahrzeitrechnung und der Simulation, insbesondere Ist-Ankunfts- und -Abfahrtszeiten abgelegt. Die Dateien können nach Beendigung der Simulation graphisch und statistisch ausgewertet werden.

Die Dateien im einzelnen:

6.2.2 Projektdatei

In der Projektdatei sind zunächst alle Daten abgelegt, die für die Verwaltung der Projektdateien erforderlich sind. Dies sind insbesondere das Projektverzeichnis und die Projektbezeichnung. Letztere erscheint auf allen Ausdrucken und ist als Information für den Benutzer ständig auf dem Bildschirm präsent. Weiterhin wird automatisch das letzte Änderungsdatum abgespeichert. Dies ist zum einen wichtig, um die Aktualität der Daten zu überprüfen und wird zum anderen genutzt, um immer das letztbearbeitete Projekt beim Starten des Programms automatisch zu laden.

Neben den Daten zur Projektverwaltung sind in der Projektdatei auch Dateien gespeichert, die für den Programmablauf wichtig sind und dann auch für alle Simulationsläufe gelten. Dazu gehören die Art der Zugsicherung, die Abfertigungszeit, die Signalsichtzeit, die Mindestvorrückstrecke und die Rollzeiten. Als Zugsicherungsart kann entweder die Indusi I 60 oder die PZB 90 gewählt werden. Die Abfertigungszeit ist die Zeit, die zwischen Zeigersprung und Zugabfahrt liegt und die der Triebfahrzeugführer benötigt, um die Abfahrt anzukündigen, die Türen zu schließen und das ordnungsgemäße Schließen zu überprüfen. Die Zeit, die zwischen der Signalfreigabe und der Reaktion des Triebfahrzeugführers vergeht, ist die Signalsichtzeit. Diese gilt sowohl bei

fahrendem als auch bei haltendem Zug. Steht der Zug am Bahnsteig, so ist der Zug anschließend noch abzufertigen und die Abfertigungszeit kommt noch hinzu.

Als Mindestvorrückstrecke ist die Entfernung zu verstehen, die zwischen Halteplatz und Signal liegen muß, damit der Zug trotz Halt zeigendem Signal abfährt. Als theoretische Untergrenze ist die Zuglänge plus der Entfernung vom Halteplatz zum Bahnsteig anzusetzen, damit der am Signal haltende Zug mit keiner Tür mehr am Bahnsteig steht. Die theoretische Obergrenze ist der Vorsignalabstand (dazu siehe auch Kap. 3.3). Praktische Eingabewerte sollten zwischen 500 und 1000 m liegen.

Die Rollzeit ist eine Variable, die die Fahrweise des Triebfahrzeugführers beschreibt. Sie definiert die Zeit, die der Zug nach einer Geschwindigkeitsänderung mit konstanter Geschwindigkeit fährt, bevor die Bremsung eingeleitet wird. Die Bremsung im Regelbetrieb kann vielerlei Ursachen haben, insbesondere Geschwindigkeitsbeschränkungen, Halt am Bahnsteig oder ein Halt zeigendes Signal. Diese lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Entweder Vorgaben, die ständig wirken und daher für den Triebfahrzeugführer vorhersehbar sind, oder außerplanmäßige Halt-Ankündigungen, deren Ende für den Triebfahrzeugführer nicht absehbar ist. Im letzteren Fall wird er die Rollgeschwindigkeit sicherlich etwas niedriger und damit die Rollzeit etwas länger wählen als beim regelmäßigen Fahrtverlauf. Diese Tatsache kann im Simulationsprogramm mit zwei verschiedenen Rollzeiten nachgebildet werden.

6.2.3 Eingabedateien

Zur Speicherung der Infrastrukturdaten gibt es zwei Alternativen: Entweder werden alle wichtigen Daten wie Betriebsstellen, Neigungs- und Geschwindigkeitswechsel in eine Datei geschrieben und mit Kennbuchstaben unterschieden oder aber sie werden in getrennten Dateien abgelegt.

Um Eingabedaten einfach und schnell abändern zu können, wurde für das vorliegende Programmsystem die zweite Möglichkeit gewählt. Die Infrastrukturdaten wurden in einer Betriebsstellen-, einer Neigungs- und einer Geschwindigkeitswechseldatei getrennt gespeichert. Die einzelnen Werte sind durch die Streckenbezeichnung, die Kilometrierungsrichtung und die Kilometrierung untereinander zugeordnet.

Betriebsstellendatei

In der Betriebsstellendatei beschreibt ein Datensatz immer einen Streckenabschnitt von einer Betriebsstelle zur nächsten. Diese beiden Betriebsstellen werden im folgenden als Start- und Zielbetriebsstelle oder mit den Ziffern 1 und 2 bezeichnet. Beide Betriebsstellen erhalten eine aus maximal 5 Buchstaben bestehende Kurzbezeichnung, an der die Betriebsstelle während der Simulation eindeutig zu erkennen ist und die sich nicht wiederholen darf. Diese Vorgehensweise ist auch bei der DB AG üblich, in deren Bereich jedem Bahnhof eine solche Kurzbezeichnung zugeordnet ist. Die Benennung folgt einer bestimmten Syntax. Der erste Buchstabe drückt die großräumige Lage aus, etwa "F" für Frankfurt. Die weiteren Buchstaben werden im allgemeinen aus den Bahnhofsnamen gewonnen. So wird beispielsweise Ffm Tief als "FFT", Darmstadt als

"FD" und Darmstadt-Arheilgen als "FDA" bezeichnet. Es lag nahe, diese Bezeichnungen auch für die Simulation zu verwenden.

Zusätzlich zur Bezeichnung kann der Start-Betriebsstelle noch der volle Name zugeordnet werden. Dieser dient aber nur der besseren Orientierung für den Benutzer und hat für den Programmablauf keine Bedeutung. Neben der Kurzbezeichnung selbst ist auch die Angabe der Gleisnummer von Bedeutung. Ist diese 0, so besitzt der Bahnhof so viele Gleise, daß diese wechselweise benutzt werden können und nie alle belegt sind. Während der Simulation wird dann der Belegungszustand nicht überprüft. Besitzt die Start-Betriebsstelle ein Gleis und die Ziel-Betriebsstelle zwei Gleise und wird diese Fahrtrelation im Regel- oder Ausnahmefall von Zügen befahren, so ist für jede dieser Fahrtmöglichkeiten ein separater Datensatz erforderlich. Jeder Datensatz der Betriebsstellendatei kann bis zu drei Kilometrierungswerte aufweisen: Die Kilometrierung der Betriebsstelle 1, der Betriebsstelle 2 und -falls vorhanden- des Signals, welches sich zwischen den beiden Betriebsstellen befindet. Die Kilometrierung der Betriebsstelle 2 wiederholt sich im allgemeinen im nächsten Datensatz als Kilometrierung der Betriebsstelle 1, was zusätzlichen Eingabeaufwand bedeutet. Dies ist aber nicht zu umgehen, da jeder Datensatz einen Streckenabschnitt beschreibt und immer einen definierten Anfangs- und Endpunkt benötigt. Folgen zwei Streckenabschnitte aufeinander, die unterschiedlichen Strecken angehören und damit auch andere Kilometrierungen aufweisen, so sind die Kilometrierungswerte ohnehin nicht gleich. Dies gilt ebenfalls für Kilometrierungssprünge innerhalb einer Strecke.

Geschwindigkeitswechseldatei

In der Geschwindigkeitswechseldatei werden die Kilometrierungen und Geschwindigkeitswerte aller Geschwindigkeitswechsel abgelegt und damit die örtlich zulässige Geschwindigkeit vorgegeben. Die Zuordnung zur Betriebsstellendatei wird durch die Streckenbezeichnung, die Kilometrierungsrichtung und die Kilometrierung selbst hergestellt. Ein Datensatz enthält je einen Kilometrierungs- und einen Geschwindigkeitswert und gilt immer in Fahrtrichtung, so daß für jede Fahrtrichtung eine getrennte Geschwindigkeitsvorgabe notwendig ist. Dies hat den Vorteil, daß die Eingabe für den Benutzer leichter nachvollziehbar ist, da sie im Prinzip der Sichtweise des Triebfahrzeugführers entspricht und jeder Geschwindigkeitswechsel durch eine Geschwindigkeitstafel darstellbar wäre.

Bei Fahrten, die nicht in das durchgehende Hauptgleis, sondern in andere Hauptgleise führen, ist meistens nur eine reduzierte Geschwindigkeit zulässig. Um diese Fahrten ohne Neudefinition einer Strecke eingeben zu können, besteht die Möglichkeit, zusätzlich zur Streckenbezeichnung auch Abschnittsbezeichnungen festzulegen. Die entsprechenden Fahrwege werden über die Betriebsstellendatei definiert, deren Abschnittsbezeichnungen mit denen der Geschwindigkeitswechseldatei korrespondieren müssen.

Im allgemeinen sind Geschwindigkeitswechsel ausschließlich streckenbezogen. In Einzelfällen können für bestimmte Züge jedoch besondere Regeln gelten, z.B. für NeiTech-Züge, die schneller fahren dürfen als herkömmliche Züge, oder für Züge mit fehlenden Brems Hundertstel, die langsamer fahren müssen. Daher muß es möglich sein, auch zwischen der Geschwindigkeitsdatei und der Triebfahrzeugdatei eine Beziehung herzustellen. Dies geschieht

über ein weiteres Feld, das in beiden Dateien eingefügt wird und je nach Geschwindigkeitsprofil einen anderen Kennbuchstaben enthält; R für reduziert, N für normal und P für die Neigetechnik.

Neigungswechseldatei

Die Neigungswechseldatei ist der Geschwindigkeitswechseldatei sehr ähnlich, die Beziehung zur Betriebsstellendatei wird ebenso über die Streckenbezeichnung, die Kilometrierungsrichtung und die Kilometrierung selbst hergestellt. Im Gegensatz zu den Geschwindigkeitswechseln beziehen sich die Neigungswechsel jedoch immer auf die Kilometrierungsrichtung. Dies bietet den Vorteil eines geringeren Eingabeaufwandes, da die Neigungen für beide Fahrrichtungen im allgemeinen gleich sind und auch beiden Richtungen gleichzeitig zugeordnet werden können. Ein weiterer Unterschied zur Geschwindigkeitswechseldatei ist der Verzicht auf eine weitere Streckenunterteilung in Abschnitte. Die Ausrundungen der Neigungswechsel werden vernachlässigt, da dies zusätzlichen Eingabeaufwand bedeuten würde, aber für die Simulationsergebnisse keinen wesentlichen Genauigkeitserfolg bringen würde.

Triebfahrzeug- und Beschleunigungsdatei

In der Triebfahrzeugdatei sind alle wichtigen Daten der Triebfahrzeuge und Züge abgelegt, wobei jeder Datensatz einem Zugtyp entspricht. Dies bedeutet, daß hier nicht nur die Triebfahrzeugdaten, sondern die Daten des gesamten Zuges abgespeichert sind. Die Zuglänge wird auf ganze Meter gerundet abgelegt, während die Bremsverzögerung in m/s^2 eingegeben wird. Die Zugart beschreibt das Bremsverhalten des Zuges und ist nur von Bedeutung, falls die Zugbeeinflussung mit PZB 90 erfolgt. Weichen die Rollzeiten des Triebfahrzeuges von den in der Projektdatei eingetragenen Werten ab, können diese separat eingegeben werden. Für die Fahrzeitberechnung sind noch die Werte für den Massenfaktor und die maximale Beschleunigung von Bedeutung. Da die Beschleunigung in der Ebene jedoch bereits den Massenfaktor enthält, hat dieser nur auf den durch die Neigung verursachten Anteil der Beschleunigung einen Einfluß. Die maximale Beschleunigung begrenzt die tatsächliche Beschleunigung unabhängig von der Neigung auf realistische Werte. Andernfalls könnten bei Fahrzeugen mit starkem Beschleunigungsvermögen, die Strecken mit starkem Gefälle befahren, überhöhte Beschleunigungen von bis zu 2 m/s^2 auftreten. Ein sinnvoller Eingabewert liegt bei $1,2$ bis $1,5 \text{ m/s}^2$.

Wie bereits beschrieben, können in der Geschwindigkeitsdatei verschiedene Geschwindigkeitsprofile eingegeben werden. Das korrespondierende Feld befindet sich in der Triebfahrzeugdatei und weist die Eingabemöglichkeiten N, P und R für „Normal“, „Neigetechnik“ und „Reduziert“ auf.

Um Schäden am Zug mit Auswirkungen auf die Fahr- oder Haltezeit nachzubilden, sind jeweils zwei Datenfelder vorgesehen, in die die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens und dessen Größe eingegeben werden müssen. Für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens sind Werte zwischen 0 und 9,99 % eingebbar. Die Größe der Haltezeitverlängerung kann zwischen 0 und 9,9 Minuten variiert werden, die Fahrzeitverlängerung zwischen 0 und 99 %.

Da die Beschleunigung von der Geschwindigkeit abhängig ist, werden diese als Wertepaar eingegeben. Daher treten pro Zugtyp mehrere Beschleuni-

gungswerte auf, infolgedessen müssen diese (maximal 25 Wertepaare) in einer separaten Datei abgelegt und über die Triebfahrzeugbezeichnung mit der Triebfahrzeugdatei verbunden werden.

Liniendatei

In den bisher beschriebenen Dateien wurden lediglich technische und infrastrukturelle Daten erfaßt. In der Liniendatei sind nun die betrieblichen Daten zu ergänzen. Als erstes muß die Linienbezeichnung selbst definiert werden. Diese besteht aus dem Produkt (z.B. S für S-Bahn oder RE für Regionalexpress), der Liniennummer und der Fahrtrichtung des Zuges. Letztere kann nicht auf die Kilometrierungsrichtung bezogen werden, da im allgemeinen jede Linie mehrere Strecken befährt, auf denen die Kilometrierungsrichtungen unterschiedlich sind. Daher wird die Fahrtrichtung anhand der Himmelsrichtungen Norden und Süden festgelegt. Neben der Linienbezeichnung muß noch das Triebfahrzeug eingegeben werden. Als nächstes sind die Laufwege der Züge zu definieren. Dies geschieht über die Angabe der einzelnen Betriebsstellen und der dazugehörigen Gleisnummern. Um die Bedienung zu erleichtern, können die Daten in der Betriebsstellendatei ausgewählt und in die Liniendatei übernommen werden.

Welche Daten sonst noch einzugeben sind, hängt von der Nutzung des Programms ab. Wird es nur als Fahrzeitrechenprogramm eingesetzt, so sind lediglich noch Angaben über die Zuschläge und die planmäßigen Haltezeiten erforderlich. Ist auf einem Teilstück die Fahrzeit bereits bekannt, so kann diese ebenfalls eingegeben werden.

Wird das Programm jedoch zur Betriebssimulation genutzt, werden noch Angaben über die Verteilungsfunktionen der Fahr- und Haltezeiten benötigt. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, sind für die Fahr- und Haltezeiten jeweils zwei Ordinatenwerte und ein Formparameter vorgegeben und in der Projektdatei abgelegt. Die Abszissenwerte sowie ein weiterer Formparameter müssen nun in die Liniendatei eingegeben und abgespeichert werden, wobei der Parameter aus dem Mittelwert berechnet werden kann.

Umlaufdatei

Eine Dateneingabe in die Umlaufdatei ist nur erforderlich, wenn das Programm auch tatsächlich zur Simulation genutzt wird. Bei einer Verwendung als Fahrzeitrechenprogramm sind die Werte der Umlaufdatei nicht relevant. In der Umlaufdatei sind die Daten gespeichert, die für die Umlaufgestaltung der Züge maßgebend sind. Vor der Dateneingabe ins Formular ist das Produkt und die Linie des Zuges zu wählen. Als nächstes sind die Zugnummern einzugeben. Ein Datensatz der Umlaufdatei beschreibt immer eine Zugwende, die durch die Zugnummer des einfahrenden und des abfahrenden Zuges definiert wird. Des Weiteren muß die Betriebsstelle und das Gleis, in dem der Zug wendet, vorgegeben werden. Theoretisch könnten automatisch die Endpunkte der jeweiligen Linie als Wendestellen verwendet werden. Um jedoch einzelnen Umläufen eine Zwischenwende zu ermöglichen und in den Endbahnhöfen in unterschiedlichen Gleisen wenden zu können - etwa für eine überschlagene Wende - besteht diese Wahlmöglichkeit. Für den abfahrenden Zug muß weiterhin die Fahrtrichtung vorgegeben werden. Neben den Richtungen "Norden" und "Süden" kann als Fahrtziel auch die Abstellanlage gewählt werden. Der Daten-

satz erhält dann automatisch die Zugnummer "0". Kommt ein Zug aus der Abstellanlage und beginnt seinen Umlauf, so wird dies ebenfalls durch die Zugnummer "0" gekennzeichnet.

Um zu Beginn der Simulation den Fahrplan des Zuges erstellen zu können, ist außerdem noch die Angabe der Abfahrtszeiten an den Wendebahnhöfen erforderlich.

Ebenso wie die Verteilung der Halte- bzw. Fahrzeiten in der Liniendatei werden auch die Verteilungen der Wendezeiten sowie der Abfahrtsverspätung mittels zwei Abszissenwerten, zwei Ordinatenwerten und zwei Formparametern beschrieben. Die Ordinatenwerte und ein Formparameter gelten jeweils für alle Wendezeiten sowie Abfahrtsverspätungen und sind in der Projektdatei abgelegt. Der zweite Formparameter kann auch aus dem Mittelwert berechnet werden.

Die planmäßige Mindestwendezeit ist nur einzugeben, damit das Programm bei der Überprüfung der Umlaufgestaltung zu geringe Wendezeiten entdeckt. Die Fahrtdauer der aus der Abstellanlage kommenden Züge und die Räumzeit bei in die Abstellanlage fahrenden Zügen sind direkt in zwei separate Datenfelder einzugeben. Da diese Vorgänge relativ selten vorkommen, genügt es, diese Zeiten näherungsweise zu berechnen oder abzuschätzen.

Ist an einer Betriebsstelle ein vollständiger Datensatz für eine Wende eingegeben, können daraus weitere Zugwenden an dieser Betriebsstelle generiert werden. Dazu ist die Angabe der Taktzeit, der Anzahl der zu generierenden Züge und der Zählweise der Zugnummern erforderlich. Für die Taktzeit sind die gebräuchlichen Werte zwischen 2,5 und 120 Minuten bereits vorgegeben und brauchen vom Benutzer nur gewählt zu werden. Die Anzahl der zu generierenden Züge wird über eine Laufleiste eingestellt, wobei der Benutzer mit der Angabe der Abfahrtszeit des letzten Zuges unterstützt wird. Die Zugnummern werden im allgemeinen im Zweierabstand (z.B. 5403, 5405 etc.) verteilt. Es können jedoch auch andere Abstände gewählt werden.

6.2.4 Arbeitsdateien

Während der Simulationsläufe werden Zwischenwerte in Arbeitsdateien gespeichert und wieder abgerufen. Die Daten werden extern über dBase-Dateien verwaltet.

Behinderungs-Übertragungsdatei

Diese Datei nimmt innerhalb der Arbeitsdateien eine Sonderstellung ein: Als einzige wird sie nicht automatisch am Anfang einer jeden Simulation, sondern nur auf Veranlassung des Benutzers erstellt. Dies ist sinnvoll, da die Werte der Behinderungs-Übertragungsdatei nur von den Infrastruktur- und Triebfahrzeugdaten beeinflusst werden. Ändert der Benutzer ausschließlich Umlaufdaten, die Haltezeit- oder Fahrzeitverteilung, so ist keine Neuberechnung der Behinderungs-Übertragungsdatei erforderlich.

In der Behinderungs-Übertragungsdatei sind die Triebfahrzeuggruppe sowie für Start- und Zielbetriebsstelle die Kurzbezeichnung, die Gleisnummer und die jeweilige Geschwindigkeit gespeichert. Die Behinderungszeit, die Fahrzeit- und Räumzeitverlängerung sind als ganze Sekunden abgelegt.

Fahrplandatei

In der Fahrplandatei werden die wichtigsten Daten der Linien- und Umlaufdatei zusammengefaßt und so aufbereitet, daß jeder Datensatz eine Fahrt von einer Betriebsstelle zur nächsten beschreibt. Jedem Fahrzeug wird in der Reihenfolge seines Einsatzes eine Umlaufnummer zugewiesen. Von der ersten Fahrt aus der Abstellanlage bis zur letzten Fahrt in die Abstellanlage erhält jeder Umlauf eine durchlaufende Numerierung. Aufgrund der Umlauf- und Fahrtnummer sind somit alle Zugfahrten eindeutig zu identifizieren. Um die Zugfahrten zuordnen zu können, wird jede noch zusätzlich mit den Informationen über Produkt, Linie, Richtung, Triebfahrzeug und Zugnummer versehen. Die Auswertung kann dann auch getrennt für jedes dieser Merkmale durchgeführt werden. Weitere Datenfelder sind die Start- und Zielbetriebsstelle sowie die dazugehörigen Gleise. Für die Zielbetriebsstelle ist zusätzlich noch ein Feld vorhanden, in das ein alternatives Zielgleis eingetragen sein kann.

Aus der vom Benutzer eingegebenen Abfahrtszeit am Wendebahnhof und den planmäßigen Haltezeiten sowie den vom Programm berechneten Fahrzeiten werden die Sollwerte für die Ankünfte und Abfahrten an jeder Betriebsstelle ermittelt und in die Fahrplandatei eingetragen. Da die Sollwerte im Zehntel-Minuten-Raster abgespeichert werden und die Information über die Größe des Zuschlags fehlt, kann die reine Fahrzeit darüber nicht rückgerechnet werden und erfordert somit ein separates Datenfeld. Weitere über die Fahrzeitrechnung ermittelte Datenfelder sind die Räumzeit und die Fahrzeit zwischen dem 500 Hz-Magnet und der Betriebsstelle. Letztere ist nur von Belang, wenn die Beeinflussung am Magnet einen Einfluß auf die Fahrzeit im nächsten Abschnitt hat. Weitere Datenfelder beschreiben, ob für den betrachteten Abschnitt ein Behinderungs-Übertragungs-Diagramm existiert und ob beim Zielgleis die Gefahr des Zufahrens besteht. Die Zufallszahlen für die Berechnung der Fahr- und Haltezeiten können alternativ auch bereits vor der Simulation ermittelt und in zwei Datenfeldern gespeichert werden. Dies kann sinnvoll sein, da so die einzelnen Fahrten unabhängig von Ihrer Reihenfolge immer die gleichen Zufallszahlen zugewiesen bekommen. Insgesamt 6 Datenfelder sind erforderlich, um während der Simulation Zugschäden zu berücksichtigen. Diese wirken über einen gesamten Zuglauf mit jeweils konstanter Größe (siehe dazu separate Erläuterung im Kapitel 5.5). Sowohl die Wahrscheinlichkeit des Auftretens als auch der Wert selbst müssen für Fahr- und Haltezeit getrennt gespeichert werden. Diese Daten werden aus der Triebfahrzeugdatei übernommen und vor jedem Simulationslauf aktualisiert, indem das Auftreten selbst mittels einer Booleschen Variablen markiert wird. Die weiteren Datenfelder, wie z.B. die Werte für die Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Fahr- und Haltezeiten, werden weitgehend aus der Liniendatei übernommen.

Anfragedatei

In der Anfragedatei sind alle Zugfahrten in der Reihenfolge ihrer Anfragezeit gespeichert. Die Datei ist entsprechend indiziert, so daß das Programm die Sortierung ständig automatisch durchführt. Die Zugfahrten selbst sind durch die Angabe des Umlaufs und der Fahrtnummer eindeutig identifizierbar. Neben der Anfragezeit wird noch die Überfahrzeit über den 500 Hz-Magneten gespeichert, die jedoch nur bei einem Zugsicherungssystem mit restriktiver Brems-

kurve von Belang ist. Für Betriebsstellen, an denen der Zug nicht hält, ist außerdem noch die Angabe der dortigen Geschwindigkeit erforderlich.

Belegungsdatei

Die Belegungsdatei bietet dem Programm einen ständigen Überblick über den Belegungszustand der Blockabschnitte. Diese sind durch den Betriebsstellennamen und die Gleisnummer eindeutig gekennzeichnet. Ob der Blockabschnitt belegt ist oder nicht, ist am Inhalt der restlichen Felder zu erkennen. Ist der Blockabschnitt frei, so ist der Zeitpunkt der Freimeldung in einem Datenfeld vermerkt. Im Falle eines belegten Blockabschnittes ist dieses Feld leer und zusätzlich ist die Umlauf- und Fahrtnummer des belegten Zuges in separaten Datenfeldern gespeichert.

6.2.5 Ergebnisdateien

Entsprechend des vom Benutzer gewählten Anwendungsbereiches des Programms - entweder Fahrzeitrechnung oder Simulation - werden die Ergebnisse in separaten Dateien, der Fahrzeit- oder der Ergebnisdatei abgespeichert.

Fahrzeitdatei

In der Fahrzeitdatei werden alle relevanten Daten der Zugfahrten getrennt nach Produkt, Linie, Richtung und Triebfahrzeug abgelegt. Ziel jeder Fahrzeitrechnung ist es, den Wegfortschritt, den Zeitfortschritt und die Geschwindigkeit in Bezug zueinander zu setzen. Für den Wegfortschritt sind zwei Datenfelder vorgesehen: zum einen die Kilometrierung der befahrenen Strecke, zum anderen die Kilometrierung über den gesamten Zuglauf, beginnend bei 0.

Auch der Zeitfortschritt wird in zweierlei Weise dargestellt: Die Fahrzeit zwischen den einzelnen Betriebsstellen wird in Minuten abgelegt, während die Gesamtfahrzeit im Format hh:mm:ss ausgedrückt wird. Die gefahrene Geschwindigkeit wird mit einer Genauigkeit von 2 Nachkommastellen in km/h abgespeichert. Neben diesen, als Ergebnisse einer Fahrzeitrechnung wesentlichen Daten gibt es weitere Felder, die eine Kontrolle der Berechnung sowie die graphische Darstellung in Form eines Weg-Geschwindigkeits-Diagramms ermöglichen. Dies sind die örtlich zulässige Geschwindigkeit, die vom Programm ermittelte Zielgeschwindigkeit sowie die vom Zugsicherungssystem vorgegebene Geschwindigkeit. Weiterhin sind die Neigung, die tatsächliche sowie die in der Ebene theoretisch zur Verfügung stehende Beschleunigung abgespeichert. Zwei weitere Felder sind vorgesehen, um den Standort von Signalen, Halteplätzen und Zugschlußstellen zu kennzeichnen und die Betriebsstellen zu benennen.

Ergebnisdatei

Diese Datei enthält die Ergebnisse eines vollständigen Simulationslaufs. Zur eindeutigen Kennzeichnung der Fahrten ist jeder Datensatz mit Informationen über Tag, Umlauf und Fahrt versehen. Um die Daten selektiv auswerten zu können, ist weiterhin das Produkt, die Linie, die Richtung und das Triebfahrzeug abgespeichert. Als Zusatzinformation ist noch die Zugnummer vorhanden. Die örtliche Zuordnung wird durch die Angabe der Start- und Zielbetriebsstelle sowie der entsprechenden Soll- und Ist-Gleisnummer gewährleistet. Sowohl die Abfahrts- als die Ankunftszeiten sind mit ihren Soll- und Ist-Werten

im Format hh:mm:ss vorhanden. Da die Sollwerte auf 1/10-Minuten gerundet sind und Informationen über den Fahrzeitzuschlag fehlen, ist eine Rückrechnung der reinen Fahrzeit aus diesen Daten nicht möglich. Die reine Fahrzeit muß daher ebenfalls separat abgespeichert werden.

Alle noch folgenden Werte könnten theoretisch aus den bisher beschriebenen abgeleitet werden. Um jedoch bei der statistischen Auswertung und graphischen Darstellung Rechenzeit zu sparen, werden einige Werte bereits während der Simulation berechnet und abgespeichert. Dazu gehören die Ankunfts- und Abfahrtsverspätung, die tatsächliche Fahrzeit, die Fahrzeitdifferenz, die tatsächliche Haltezeit sowie die Haltezeitdifferenz.

6.3 Programmstruktur

6.3.1 Allgemeines

Das Entwickeln von Anwendungen in DELPHI beinhaltet die Arbeit mit Formularen, die Formulierung des Quelltextes von Units sowie die Erstellung von dBase-Dateien.

Formulare

Formulare sind die Grundlage aller DELPHI- Anwendungen. Auf ihnen werden wie auf einer Zeichenfläche Komponenten plaziert und ausgerichtet, um die einzelnen Teile der Benutzerschnittstellen zu entwerfen. Für jede Anwendung muß das Hauptformular gestaltet und weitere Formulare für andere Teile der Benutzerschnittstelle hinzugefügt und entsprechend angepaßt werden. Die Anpassung von Formularen besteht darin, zusätzliche Komponenten einzufügen und die sogenannten Eigenschaften (der diversen Komponenten) festzulegen. Die Komponenten können unterteilt werden in visuelle Komponenten, Dialogkomponenten, Komponenten zum Datenzugriff und -steuerung sowie Systemverwaltungskomponenten.

Units

Units bilden die Grundlage der modularen Programmierung. Mit Units werden Bibliotheken gebildet und große Programme in logisch bezogene Module unterteilt. Units sind im allgemeinen mit Formularen verbunden, können aber auch selbständig in das Programm eingebunden sein.

dBase-Dateien

In den dBase-Dateien werden die eigentlichen Daten gespeichert. Die Erstellung der Dateien kann entweder in DELPHI programmiert oder über eine separate Oberfläche organisiert werden.

6.3.2 Gliederung der Formulare und Units

Zur besseren Übersicht sind die Formulare und Units in logisch gegliederte Gruppen eingeteilt, die weitgehend der Gliederung der Formulare im Hauptmenü entspricht:

- Menü,
- Datei,
- Eingabe,
- Auswahl,
- Graphik und
- Rechnung.

Die Zuordnungen und Bezeichnungen der einzelnen Formulare und Units sind der Graphik auf der nächsten Seite zu entnehmen.

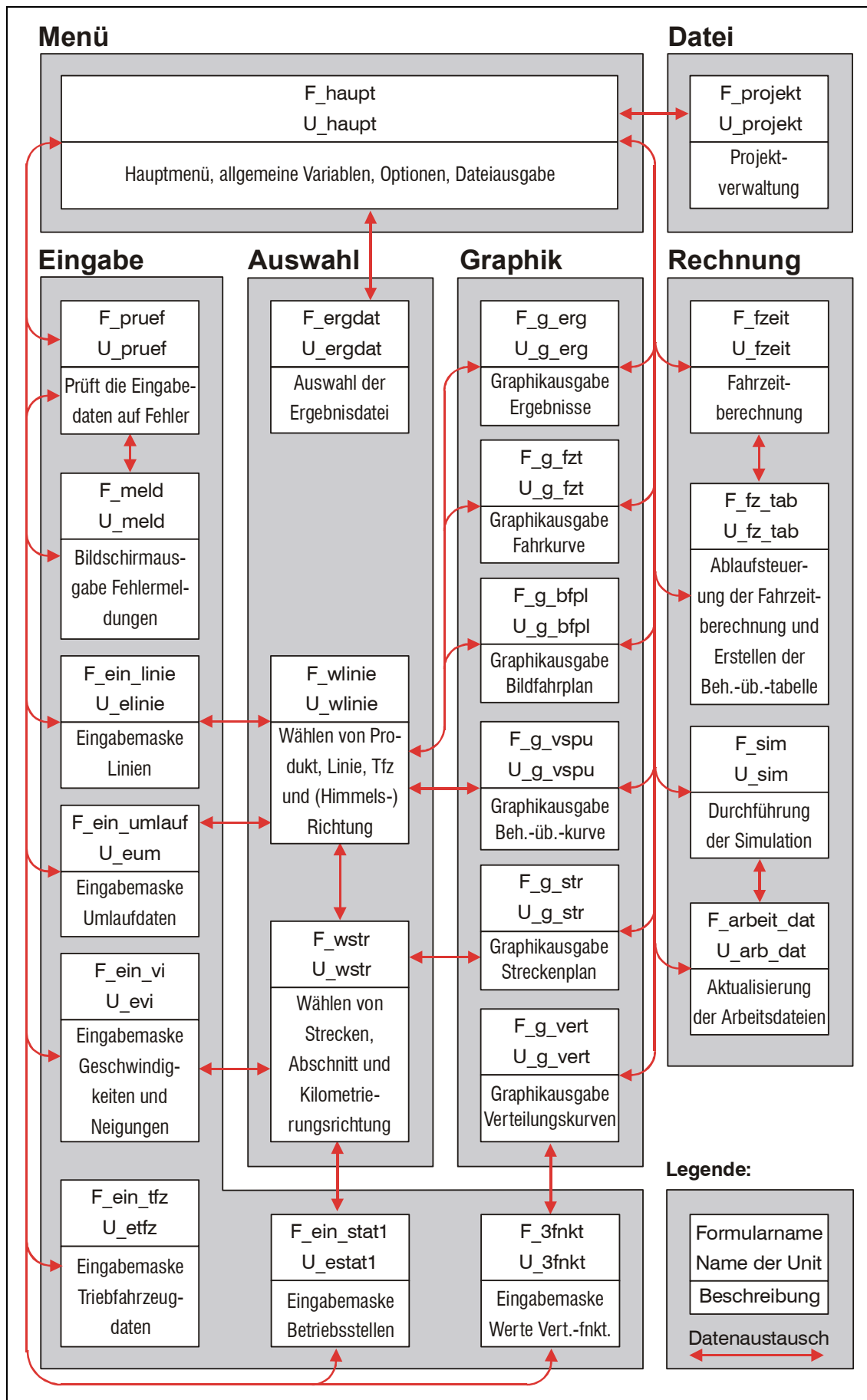


Abb. 6.2: Gliederung der Formulare und Units

6.4 Fahrzeitrechnung

Die Fahrzeitrechnung ist ein wesentlicher Bestandteil des Simulationsprogramms. Mit ihr wird nicht nur die unbehinderte Fahrzeit berechnet und der Fahrplan erstellt, sondern auch die Fahrzeit im Behinderungsfall ermittelt und in die Behinderungs-Übertragungsdatei eingetragen.

Eine Zugfahrt besteht im allgemeinen aus den Bestandteilen

- Beschleunigen,
- Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit,
- Verzögern und
- Bremsen.

Beschleunigen

Für anfahrende Züge ist die Beschleunigung nicht konstant, sie muß vielmehr aus der Differenz zwischen Zugkraft und Bewegungswiderständen ermittelt werden. Die Zugkraft eines Triebfahrzeuges ist von seiner Geschwindigkeit abhängig, während sich die Bewegungswiderstände aus Fahrzeug- und Streckenmerkmalen sowie der Geschwindigkeit ableiten lassen.

Im Rahmen der Fahrzeitrechnung muß nun der Zusammenhang zwischen Wegfortschritt, Fahrzeitverbrauch und aktueller Geschwindigkeit hergestellt werden. Diese Berechnungen sind immer Integrationen, wobei als Integrationsbasis wahlweise der Weg, die Zeit oder die Geschwindigkeit gewählt werden kann. Da im allgemeinen jeweils die bis zu einem Wegpunkt verbrauchte Fahrzeit sowie die dort erreichte Geschwindigkeit gesucht sind, wird sinnvollerweise mit Wegschritten gearbeitet. Hierbei ist lediglich darauf zu achten, daß die zulässige Geschwindigkeit beim Beschleunigen nicht über- und die Zielgeschwindigkeit beim Bremsen nicht unterschritten werden. Beim Beschleunigen wird vor jedem Wegschritt abgefragt, ob danach die Zielgeschwindigkeit überschritten ist. Falls ja, wird die aktuelle Geschwindigkeit gleich der zulässigen bzw. der Zielgeschwindigkeit gesetzt.

Für die Berechnung des Zeitverbrauchs eines Wegschrittes muß die mittlere Beschleunigung bekannt sein. Diese kann erst ermittelt werden, wenn die Geschwindigkeit am Ende des Wegschrittes berechnet wurde. Zur exakten Berechnung wäre dann eine Iteration erforderlich. Im Rahmen der Fahrzeitrechnung wurde jedoch ein etwas vereinfachter Weg gewählt. Da die Funktion der Beschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit weitgehend stetig verläuft, wird die Beschleunigungsdifferenz des vorherigen Wegschrittes auch für den aktuellen Wegschritt angesetzt. Die erste Beschleunigungsdifferenz wird mit 0 angenommen.

Die dadurch verursachte Fahrzeitabweichung liegt bei einer durchschnittlichen Fahrt zwischen zwei Wendebahnhöfen unter einer Sekunde und damit deutlich unter dem Fehler, der sich durch die üblichen vereinfachenden Annahmen bei der Zugkraft und den Fahrwiderständen ergibt.

Herkömmliche Fahrzeitrechenprogramme erfordern die Eingabe der Zugkraft und der Masse des Fahrzeuges, um dann über die Grundgleichung der Mechanik die Beschleunigung zu ermitteln. Im Gegensatz dazu benötigt dieses Programm unmittelbar die Beschleunigungswerte in der Ebene bei gerader

Strecke. Dies hat den Vorteil, daß die Zugkraft nicht unbedingt bekannt sein muß, sondern die Werte z.B. auch aus Messungen ermittelt werden können. Außerdem sind Verwechslungen, z.B. zwischen der Zugkraft am Haken und der Zugkraft am Treibradumfang, ausgeschlossen. Die Daten sind in einer Beschleunigungsdatei abgelegt. Diese speichert die Beschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit getrennt für jede Zuggruppe. Maximal sind 25 Eingabewerte zulässig, zwischen denen im Zuge der Berechnung linear interpoliert wird.

Um die tatsächliche Beschleunigung zu ermitteln, müssen noch die Streckenwiderstände berücksichtigt werden, von denen die Streckenneigung der wichtigste ist.

Um die Menge der einzugebenden Werte gering zu halten, ist zunächst nur die Streckenneigung in Promille einzugeben. Da dies getrennt für jede Fahrtrichtung möglich ist, wäre der Bogenwiderstand in Promille umzurechnen und zu der Streckenneigung zu addieren. Dies wird jedoch nur in Sonderfällen erforderlich sein, da bei Nahverkehrs- und Regionalbahnen (für die dieses Programm gedacht ist) oft nur kurze Triebwagen mit Drehgestellen oder radial einstellbaren Einzelachsfahrwerken verkehren, deren Bogenwiderstand klein ist. Außerdem weisen die Bahnsteigbereiche, wo abgefahren wird, meist keine engen Bögen auf.

Nahverkehrsbahnen weisen häufig starke Streckenneigungen auf, bei der S-Bahn bis zu 40 ‰, bei Bahnen nach BO Strab bis zu 70 ‰, in Ausnahmefällen noch darüber. Beim Anfahren in einem solchen Gefälle würde sich unrealistisch hohe Beschleunigungen ergeben. Moderne Stadtbahnen können bereits in der Ebene mit etwa 1,3 m/s² beschleunigen, womit sich in einem Gefälle von 70 ‰ ein Wert von etwa 2 m/s² ergäbe. Im Rahmen der Fahrzeitrechnung besteht die Möglichkeit, diese Anfangsbeschleunigung auf komfortable Werte zu begrenzen.

Die einzelnen Formeln zur Berechnung der mittleren Beschleunigung, des Fahrzeitverbrauchs und der Geschwindigkeit lauten:

- mittlere Beschleunigung eines Wegschrittes:

$$a_m = a + \frac{a - a_x}{2} - l \cdot g \cdot \beta \cdot 12,96$$

a _m	mittlere Beschleunigung [km/h ²]
a	Beschleunigung am Anfang des Wegschrittes [km/h ²]
a _x	Beschleunigung am Anfang des vorigen Wegschrittes [km/h ²]
l	Neigung [‰]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²] (g=9,81 m/s ²)
β	Massenfaktor [-]

- Fahrzeitverbrauch während dieses Wegschrittes:

$$t = \frac{3600}{a_m} \cdot \left(-v_a + \sqrt{v_a^2 + 2 \cdot a_m \cdot \frac{s}{1000}} \right)$$

t	Fahrzeitverbrauch während des Wegschrittes [s]
a_m	mittlere Beschleunigung [km/h ²]
v_a	Geschwindigkeit am Anfang des Wegschrittes [km/h]
s	Länge des Wegschrittes [m]

- Geschwindigkeit am Ende des Wegschrittes:

$$v_e = v_a + a_m \cdot \frac{t}{3600}$$

v_e	Geschwindigkeit am Ende des Wegschrittes [km/h]
v_a	Geschwindigkeit am Anfang des Wegschrittes [km/h]
a_m	mittlere Beschleunigung [km/h ²]
t	Fahrzeitverbrauch während des Wegschrittes [s]

Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit

Auf Wegschritten mit konstanter Geschwindigkeit ist die Berechnung der Fahrzeit problemlos möglich. Es ist jedoch darauf zu achten, daß die vorhandene Zugkraft mindestens gleich der Fahrwiderstände ist, da der Zug ansonsten verzögert. Außerdem muß die Zielgeschwindigkeit festgelegt werden, da diese nicht immer der örtlich zulässigen Geschwindigkeit entspricht (siehe dazu auch Kapitel 6.6.2).

Der Fahrzeitverbrauch bei konstanter Geschwindigkeit berechnet sich zu:

$$t = \frac{s \cdot 3,6}{v}$$

t	Fahrzeitverbrauch während des Wegschrittes [s]
s	Länge des Wegschrittes [m]
v	Geschwindigkeit [km/h]

Verzögern

Übersteigen die Fahrwiderstände die Zugkraft des Zuges, so verzögert er. Fährt ein Zug mit konstanter Geschwindigkeit, so muß an den Änderungspunkten der Fahrwiderstände (insbesondere Neigungswechsel) die maximal zur Verfügung stehende Beschleunigung berechnet werden.

Die Berechnung erfolgt mit den gleichen Formeln wie sie für das Beschleunigen gelten.

Bremsen

Im Gegensatz zum Beschleunigen ist die Bremsverzögerung von der Geschwindigkeit weitgehend unabhängig. Dies resultiert daraus, daß die im Regelbetrieb tatsächlich aufgebrachte Verzögerung im allgemeinen deutlich kleiner als die maximal zur Verfügung stehende Verzögerung ist. Der Triebfahrzeugführer oder eine eventuell vorhandene Bremssteuerung wird die Verzögerung dann so regeln, daß sie über den gesamten Geschwindigkeitsbereich konstant bleibt. Auch das Fahrzeitrechnerprogramm arbeitet daher mit einer konstanten Verzögerung.

Sowohl der Bremsesatzpunkt als auch der Bremszielpunkt werden in Meter-Genauigkeit berechnet. Aus diesem Grund kann die erforderliche Geschwindigkeit am Bremszielpunkt bei Vorgabe einer Verzögerung nicht exakt eingehalten werden. Daher wird an jedem Wegschritt über die Geschwindigkeit und die Entfernung des Zuges vom Bremszielpunkt exakt die notwendige Verzögerung berechnet, die geringfügig von der vorgegebenen Verzögerung abweichen kann. Damit ist aber gewährleistet, daß der Zug genau am Bremszielpunkt die erforderliche Geschwindigkeit einhält.

6.5 Vorbereitung der Simulation

Wie bereits beschrieben, wurde als Simulationsschritt die Fahrt von einer Betriebsstelle zur nächsten, im folgenden als Zugfahrt bezeichnet, gewählt.

Bevor die Simulation durchgeführt werden kann, müssen die Strecken- und Fahrzeugdaten in die entsprechenden Dateien eingegeben worden sein. Daraus wird zunächst die Behinderungsübertragungsdatei aktualisiert sowie die Liniendatei mit Fahr- und Räumzeiten ergänzt. Vor jedem Simulationslauf werden weitere Dateien erstellt: Aus der Liniendatei, in die die Strecken- und Fahrzeugdaten eingeflossen sind, und der Umlaufdatei, die als wichtigste Information die Abfahrtszeiten der einzelnen Züge an den Wendebahnhöfen beinhaltet, wird ein Fahrplan erzeugt. Dieser enthält alle Zugfahrten nach Umläufen und Abfahrtszeit geordnet. Jede Zeile entspricht einer Zugfahrt und weist alle Informationen auf, die zur Durchführung der unbehinderten Zugfahrt erforderlich sind, insbe-

sondere die Start- und Zielbetriebsstelle mit Gleisangaben, die Sollabfahrts- und Ankunftszeiten sowie die Fahr- und Räumzeiten. Weiterhin wird die Belegungsdatei aktualisiert, aus der sich während der Simulation die Belegung der einzelnen Gleis- bzw. Blockabschnitte sowie deren Dauer ergibt. Außerdem muß die Anfragedatei mit der ersten Zugfahrt eines jeden Umlaufs gefüllt werden. Diese ist nach der planmäßigen Ab-

fahrtszeit indiziert, so daß daraus die planmäßige chronologische Reihenfolge der Zugfahrten abzulesen ist. Abschließend wird noch eine Kopie der Fahrplandatei erzeugt, um einige Felder wie Ist-Abfahrts- und Ankunftszeit ergänzt und unter der Bezeichnung Ergebnisdatei abgespeichert. Diese wird dann im Zuge der Simulation mit Ergebniswerten gefüllt und nach deren Beendigung ausgewertet.

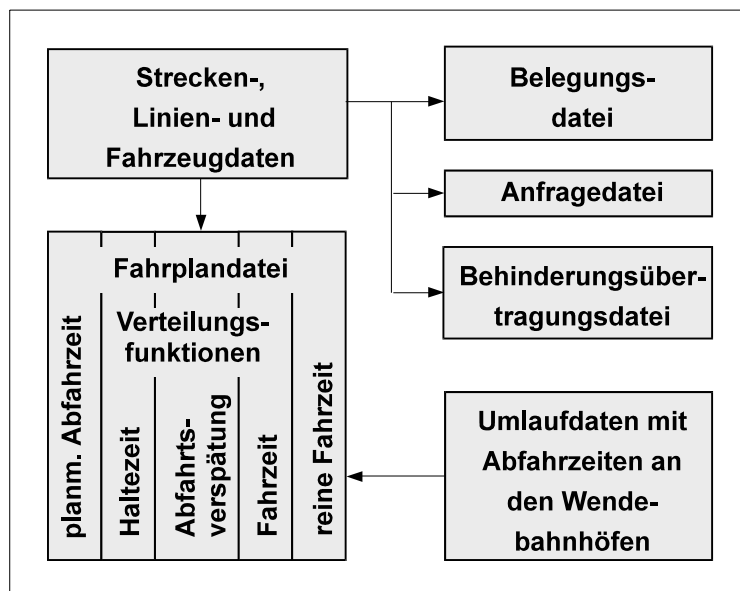


Abb. 6.3: Ablaufschema der Vorbereitung der Simulation

6.5.1 Aktualisieren der Behinderungs-Übertragungsdatei

Allgemeines

Die Grundidee des vorliegenden Simulationsprogramms ist es, als Simulationsschritt die Fahrt von einem Blockabschnitt zum nächsten bzw. von einer Station zur nächsten zu wählen. Dies bietet den Vorteil einer hohen Rechengeschwindigkeit, erfordert jedoch die Vorausberechnung der Fahrzeiten. Diese werden zunächst für die behinderungsfreie Fahrt ermittelt und in der Liniendatei gespeichert. Im Zuge der Simulation wird dann auf diese Werte zurückgegriffen. Durch verspätete Fahrtstellungen der Signale können Behinderungen auftreten, die zu einer Verlängerung der Fahr- und Räumzeiten führen. Diese Zeiten verlängern sich nicht proportional zu den Behinderungen, sondern sind von vielen weiteren Faktoren abhängig; insbesondere von der Fahrdynamik der Züge, der Fahrweise der Triebfahrzeugführer, dem Zugsicherungssystem und der Streckentopologie. Zwischen diesen Faktoren, der Größe der Behinderung und der Verlängerung der Fahr- und Räumzeiten muß nun eine Beziehung hergestellt und so gespeichert werden, daß während der Simulation darauf zurückgegriffen werden kann. Die Speicherung dieser Werte erfolgt sinnvollerweise in einer separaten Datei, der Behinderungs-Übertragungsdatei. Deren Werte müssen immer auf die Fahrt zwischen zwei Stationen bzw. zwei Haltepunkten bezogen werden, da dies der Simulationsschritt ist. In Unterscheidung zur Behinderungs-Übertragungsdatei wird diese Wertemenge im folgenden Text als Behinderungs-Übertragungsdiagramm bezeichnet, da sie sehr anschaulich in Form eines Diagramms dargestellt werden kann. Auch die Fahrdynamik der Züge besitzt einen großen Einfluß auf die Ergebnisse, so daß der Zugtyp ebenfalls als Kriterium für die Zuordnung der Werte herangezogen wird. Die Fahrweise der Triebfahrzeugführer und die Ausrüstung der Züge mit einem bestimmten Zugsicherungssystem kann für jeden Zugtyp separat bestimmt werden. Die Nutzung dieser Datei erfolgt nur, wenn tatsächlich eine Behinderung auftritt, ansonsten wird auf die in der Liniendatei gespeicherten Fahrzeiten zurückgegriffen.

Bei der Berechnung der Fahrzeiten und der Erstellung der Behinderungs-Übertragungsdatei sind folgende Fälle zu unterscheiden:

- **Zwischen zwei Haltepunkten befindet sich kein Hauptsignal.**
Dies ist der einfachste Fall, da hierbei keine Behinderung auftreten kann und somit auch keine Werteermittlung für die Behinderungs-Übertragungsdatei erforderlich ist. Während der Simulation wird lediglich auf die vorausberechnete Fahrzeit in der Liniendatei zurückgegriffen und diese stochastisch variiert.
- **Zwischen zwei Halteplätzen befindet sich genau ein Hauptsignal, der Zug wartet dessen Fahrtstellung am Bahnsteig ab.**
Auch hierbei ist keine Werteermittlung für die Behinderungs-Übertragungsdatei erforderlich, da jede Behinderung eine gleichgroße Fahrzeit- und Räumzeitverlängerung verursacht. Während der Simulation wird dies vom Programm erkannt und die Zeiten werden entsprechend zugewiesen. Eine Ausnahme ergibt sich, wenn der haltende Zug unter die restriktive Überwachung eines Zugsicherungssystems fallen kann. Dann muß er eine vorgegebene Fahrkurve einhalten und erfährt so eine zusätzliche Behinderung. Die Auswirkung dieser Behinderung ist, wenn sie erst einmal aufgetreten ist,

unabhängig vom Zeitpunkt der Fahrtstellung des Signals. Infolgedessen muß für die Behinderungs-Übertragungsdatei auch nur je ein Wert für die Räumzeit- und Fahrzeitverlängerung berechnet werden. Im Zuge der Simulation wird dann anhand der Zeitdifferenz zwischen Magnetüberfahrt und Signalfahrtstellung entschieden, ob der Zug unter die restriktive Überwachung fällt. Ist dies der Fall, werden zu den planmäßigen Fahrzeiten die Werte aus der Behinderungs-Übertragungsdatei addiert.

- **Zwischen zwei Halteplätzen befindet sich genau ein Hauptsignal, der Zug fährt auch bei haltzeigendem Signal am Bahnsteig ab.**

In diesem Fall ist die vollständige Erstellung eines Behinderungs-Übertragungsdiagramms erforderlich.

- **Zwischen zwei Hauptsignalen befindet sich kein Halteplatz.**

Falls sich zwischen zwei Hauptsignalen kein Halteplatz befindet, sind zusätzliche Randbedingungen zu beachten. In den bisher beschriebenen Fällen werden die Fahrzeit und die Behinderungs-Übertragungsdiagramme für die Fahrt von einem Halteplatz zum nächsten ermittelt. Dies hat den Vorteil, daß damit ein fester Bezugspunkt mit der Geschwindigkeit 0 existiert. Gibt es keinen Halteplatz, so muß eine zusätzliche Betriebsstelle angeordnet werden, an der aber die Geschwindigkeit je nach Größe der Behinderung zwischen 0 und der örtlich zulässigen Geschwindigkeit variiert. Die Fahrzeit zwischen der zusätzlichen und der darauf folgenden Betriebsstelle ist jedoch von dieser Geschwindigkeit abhängig, so daß die Information über deren Größe bei der Simulation von einem Fahrzeitrechnungsabschnitt zum nächsten mit übergeben werden muß. Daher ist bei der Erstellung des Behinderungs-Übertragungsdiagramms zwischen der vorhergehenden und der zusätzlichen Betriebsstelle für jede Behinderungszeit die Zuweisung und Speicherung der Geschwindigkeit an der zusätzlichen Betriebsstelle erforderlich. Dies ist problemlos möglich, da die aktuelle Geschwindigkeit während der Fahrzeitrechnung ohnehin ständig bekannt ist. Für die Fahrt von der zusätzlichen zur nächsten Betriebsstelle wäre theoretisch für jede mögliche Geschwindigkeit ein Behinderungs-Übertragungsdiagramm erforderlich. Da diese Datenmengen einen enormen Speicherplatzbedarf und lange Rechenzeiten zur Folge hätten, werden die Diagramme in 60 km/h - Schritten erstellt. Der oberste Geschwindigkeitswert wird auf die Geschwindigkeit gesetzt, die der Zug ohne Behinderung an der entsprechenden Stelle fahren würde. Die Schrittweite von 60 km/h wurde aus 2 Gründen gewählt: Zum einen weist das Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramm der Baureihe 420 genau an dieser Stelle einen Knick auf, zum anderen sind damit bei einer Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs von 120 km/h nur maximal drei Diagramme erforderlich (z.B. für 0, 60 u. 86,5 km/h). Während der Simulation wird dann zwischen diesen Werten linear interpoliert.

Aktualisierung der Behinderungs-Übertragungsdatei

Die Behinderungs-Übertragungsdatei wird aktualisiert, indem für jede vorkommende Behinderungszeit die Fahrzeit- und die Räumzeitverlängerung sowie die Geschwindigkeit an Betriebsstelle 2 berechnet werden. Als Schrittweite der Behinderungszeit und als Einheit der Ergebnisse wurde eine Sekunde gewählt, da sich damit eine ausreichende Genauigkeit ergibt und Ganzzahlen weniger Speicherplatz und Rechenzeit benötigen.

Zunächst wird diejenige Behinderungszeit ermittelt, bei der zum ersten Mal eine Fahrzeitverlängerung auftritt. Unter schrittweiser Vergrößerung der Behinderungszeit werden danach so viele Fälle durchgerechnet, bis der Zug am Hauptsignal zum Stehen kommt und jede weitere Behinderung eine gleichgroße Fahrzeit- bzw. Räumzeitverlängerung zur Folge hat. Um Speicherplatz zu sparen und um die Simulationszeit zu verkürzen, wird nicht jeder Wert gespeichert. Die Auswahl wird während der Erstellung der Behinderungs-Übertragungsdatei durch eine Entscheidungsroutine getroffen. Diese muß gewährleisten, daß zum einen genügend Werte berücksichtigt werden, zwischen denen in der späteren Simulation linear interpoliert werden kann und daß zum anderen nicht unnötig viele Werte gespeichert werden, damit sich der Speicherplatz- und Rechenzeitbedarf in Grenzen hält. Die Entscheidungsroutine muß auch berücksichtigen, daß die Differenzen zwischen den einzelnen Ergebniswerten sehr unterschiedlich sein können. Von konstanten Werten über geringfügige, aber stetigen Änderungen bis hin zu großen, einzeln auftretenden Wertedifferenzen kann alles vorkommen. Sind die Ergebnisse über einen gewissen Bereich konstant, so muß nur der erste und der letzte Wert aufgenommen werden. Ändern sich die Wertedifferenzen stetig, so muß je nach Grad der Änderung ein großer oder kleiner Abstand der aufzunehmenden Werte gewählt werden. Bei einer großen, einzeln auftretenden Wertedifferenz hingegen muß der letzte Wert davor und der erste Wert danach aufgenommen werden. Letzteres setzt voraus, daß immer ein Wert während der Berechnung des nächsten gespeichert bleibt. Diese Forderungen können nur mit einem zweistufigen Verfahren gewährleistet werden, das im folgenden und anhand untenstehender Graphik erläutert wird.

Nach jedem abgespeicherten Wert werden in Richtung der letzten Wertedifferenzen (also tangential zur Kurve) eine obere und untere Grenzlinie definiert, nach deren Überschreiten der aktuelle Wert in die Datei aufgenommen wird.

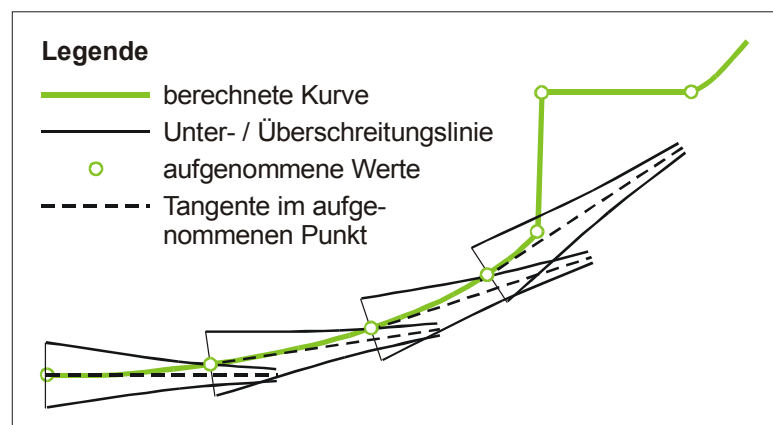


Abb. 6.4: Entscheidungskriterien für die Speicherung eines Datensatzes in der Behinderungs-Übertragungsdatei

Um auch kleine Gradientenänderungen der Kurve zu registrieren, sind die

Grenzlinien trichterförmig ausgebildet. Bei einer parallelen Anordnung zur Tangente bestünde die Gefahr, daß kleine Knicke erst einige Berechnungsschritte später und damit an der falschen Stelle bemerkt würden. Zusätzlich dazu wird außerdem noch die Höhe der absoluten Werteänderung überprüft. Übersteigt diese einen bestimmten Wert, wird sowohl der letzte Punkt davor als auch der erste Punkt danach gespeichert.

6.5.2 Graphische Darstellung der Behinderungs-Übertragungsdiagramme

Allgemeines

Die graphische Darstellung der Behinderungs-Übertragungsdiagramme bietet zwei Vorteile: Zum einen können die berechneten Werte auf Plausibilität geprüft werden, zum anderen sind die Auswirkungen verschiedener Vorgabewerte, z.B. der Rollzeit oder des Indusi-Typs (I 60 oder PZB 90) unmittelbar abzulesen. Auf der Abszisse des Diagramms ist die Behinderungszeit aufgetragen, auf der Ordinate sind die zusätzliche Räumzeit, die Fahrzeitverlängerung und die Geschwindigkeit an der zweiten Betriebsstelle abzulesen. In untenstehender Abbildung ist ein Behinderungs-Übertragungsdiagramm beispielhaft dargestellt. Alle folgenden Graphiken sind aus Fahrzeitrechnungen zwischen Buchschlag-Sprendlingen und Neu-Isenburg gewonnen. Dieser Streckenabschnitt wurde gewählt, da die Züge hier ihre Höchstgeschwindigkeit erreichen und die Auswirkungen unterschiedlicher Rollzeiten und Indusi-Systeme dargestellt werden können. Zur besseren Übersicht sind nur die Fahrzeitverlängerungen, nicht jedoch die Räumzeitverlängerungen und die Geschwindigkeiten an Betriebsstelle 2 dargestellt. Für die Räumzeitverlängerungen gilt sinngemäß das gleiche wie für die Fahrzeitverlängerungen; die Geschwindigkeiten an Betriebsstelle 2 sind lediglich für den Ablauf des Simulationsprogramms wichtig und das auch nur, wenn dort nicht gehalten wird.

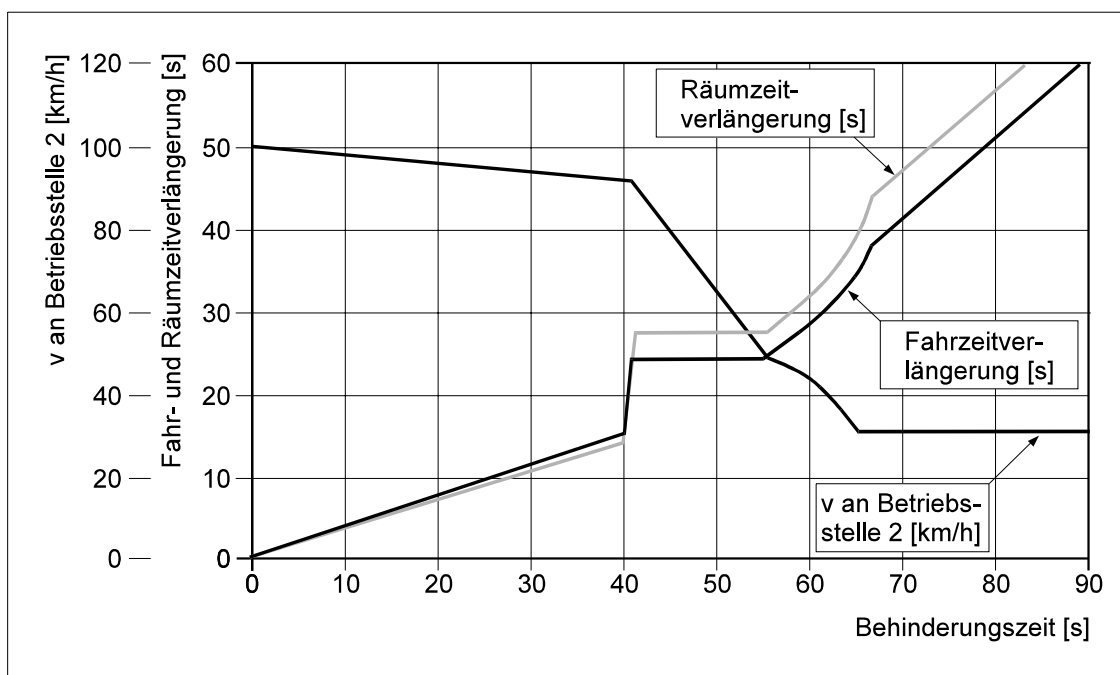


Abb. 6.5: Beispielhafte Darstellung eines Behinderungs-Übertragungsdiagramms.

Behinderungs-Übertragungs-Diagramm ohne Einfluß der Rollzeit

Die einfachste Form des Behinderungs-Übertragungsdiagramms entsteht, wenn die Rollzeit klein und die Entfernung zwischen dem Signal und den Betriebsstellen groß ist. Das Diagramm besteht dann aus drei Bereichen:

- Im ersten Bereich wechselt das Signal so rechtzeitig in Fahrtstellung, daß für den Zug keine Behinderung entsteht.
- Im zweiten Bereich muß der Zug aufgrund des Halt zeigenden Signals abbremsen, bekommt aber noch während der Bremsphase freie Fahrt und beschleunigt dann wieder auf die zulässige Geschwindigkeit. Die Form der Kurve in diesem Bereich läßt erkennen, daß es eine definierte Behinderungszeit gibt, bei der die Auswirkungen auf die Fahr- und Räumzeitverlängerungen minimal werden (siehe dazu auch KRÖH [36]). Dieser Umstand läßt sich dadurch erklären, daß die Beschleunigungszeit linear zur Bremszeit zunimmt, die Fahrzeit mit konstanter Geschwindigkeit jedoch quadratisch.
- Im dritten Bereich einer Geraden im 45°-Winkel ist der Zug am Halt zeigenden Signal zum Stehen gekommen. Jede zusätzliche Behinderungszeit überträgt sich damit unmittelbar auf die Fahrzeitverlängerung und die zusätzliche Räumzeit; die Geschwindigkeit an Betriebsstelle 2 ändert sich nicht mehr.

Das nachstehende Diagramm verdeutlicht den Sachverhalt.

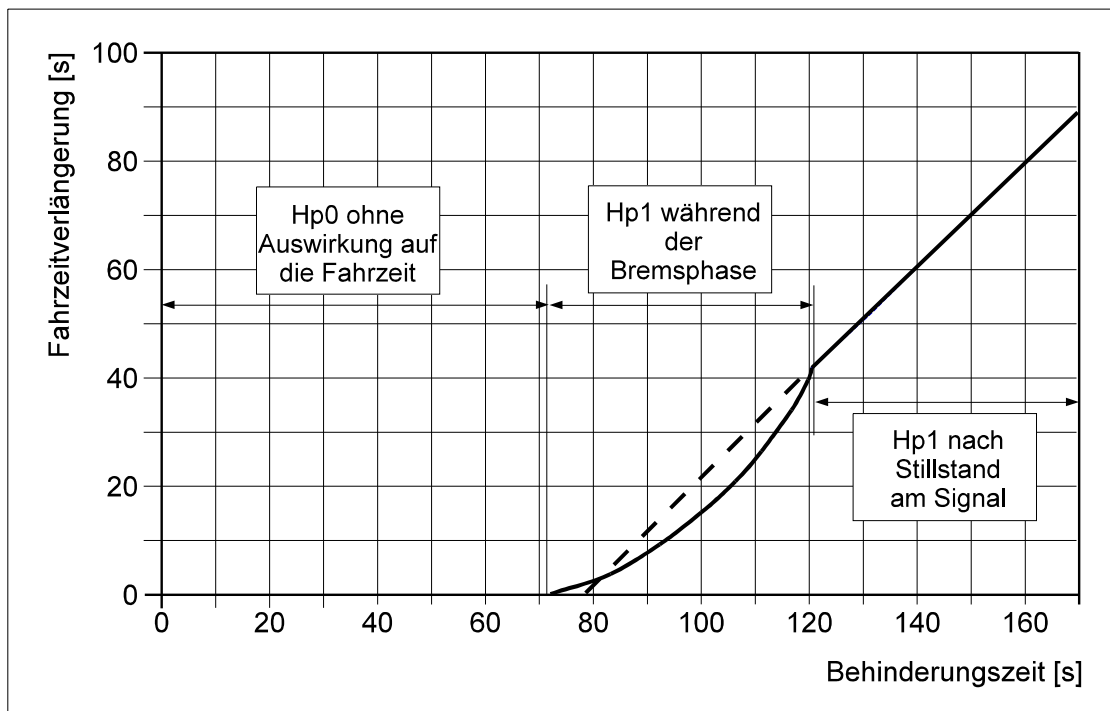


Abb. 6.6: Behinderungs-Übertragungsdiagramm mit drei Bereichen

Behinderungs-Übertragungs-Diagramm mit Einfluß der Rollzeit

Ein anderes Bild ergibt sich, wenn die Rollzeit größer und die Entfernung zwischen dem Signal und den Betriebsstellen bzw. Geschwindigkeitswechselpunkten kleiner wird. Mit größer werdender Rollzeit setzt sich immer mehr eine vorausschauende Fahrweise durch, so daß der Triebfahrzeugführer nicht mehr bis zur zulässigen Höchstgeschwindigkeit beschleunigt. Das Programm bietet dem Anwender die Möglichkeit, neben der Rollzeit für alle Bremszielpunkte die Rollzeit für die Fahrt auf ein Halt zeigendes Signal separat einzugeben. Damit kann der Umstand nachgebildet werden, daß die Triebfahrzeugführer beim Zurollen auf ein Halt zeigendes Signal ihre Geschwindigkeit eher klein wählen, damit der Zug bei Fahrtfreigabe möglichst noch nicht zum Stehen gekommen ist.

Damit ergeben sich zwei neue Linienformen. Solange das Signal Halt zeigt, fährt der Zug mit einer definierten Rollgeschwindigkeit darauf zu. Diese Geschwindigkeit liegt bei obengenannten Voraussetzungen unter der Geschwindigkeit, die der Zug bei Fahrt zeigendem Signal fahren würde. Springt das Signal währenddessen auf Fahrt, gibt es für den Triebfahrzeugführer mehrere Möglichkeiten:

In Abhängigkeit der Entfernung zwischen Zug und nächstem Bremszielpunkt beschleunigt er entweder bis zur Höchstgeschwindigkeit oder bis zu einer darunter liegenden Zielgeschwindigkeit. Ist die Zielgeschwindigkeit gleich der aktuellen Geschwindigkeit, behält der Zug diese bei und beschleunigt nicht.

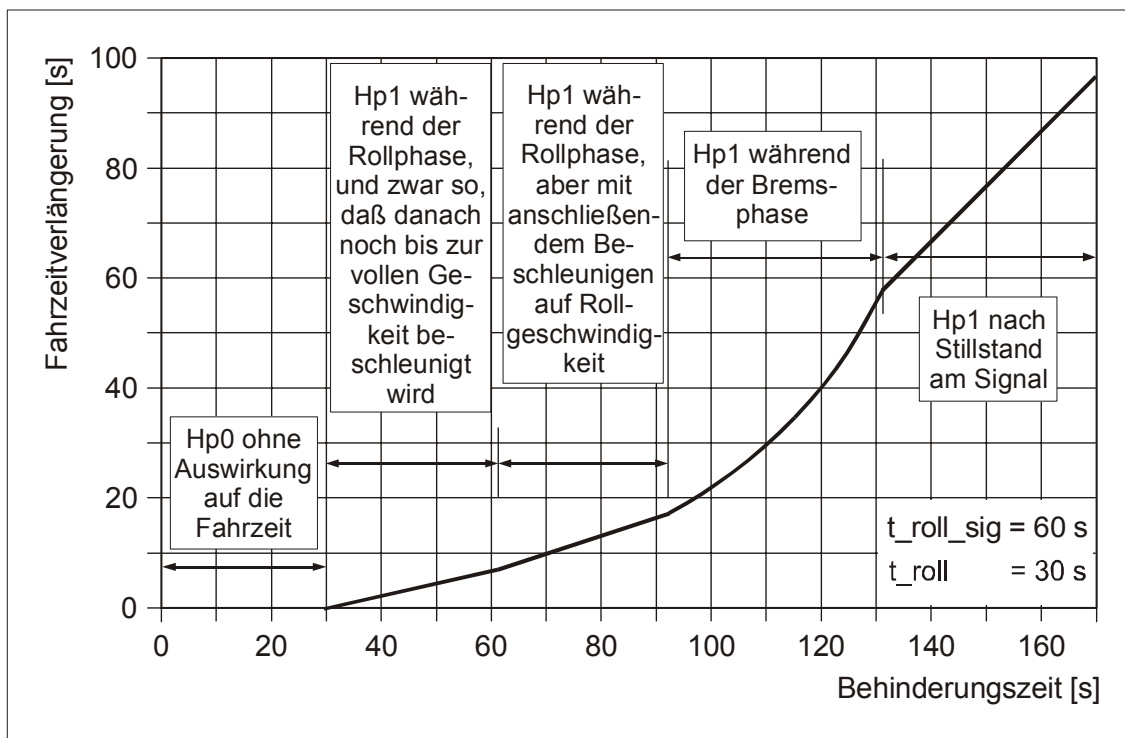


Abb. 6.7: Behinderungs-Übertragungsdiagramm mit fünf Bereichen

Bei geringen Behinderungen wird der Zug im allgemeinen noch auf die Höchstgeschwindigkeit beschleunigen. Dieser Bereich stellt sich im Diagramm als Gerade dar, die auf der Abszisse beginnt und nach rechts oben steigt. Wird

die Behinderungszeit größer, so wird nur bis zur Zielgeschwindigkeit beschleunigt. Im Diagramm ist auch dieser Bereich eine Gerade. Liegt die Zielgeschwindigkeit zwischen der aktuellen Geschwindigkeit und der Höchstgeschwindigkeit, steigt die Gerade (siehe vorstehendes Diagramm). Falls die Zielgeschwindigkeit der aktuellen Geschwindigkeit entspricht, beschleunigt der Zug nicht. Er behält also bei Fahrt zeigendem Signal die Geschwindigkeit bei, die er auch bei Halt zeigendem Signal fahren würde. Damit existiert ein Bereich, in dem die Fahr- und Räumzeitverlängerung sowie die Geschwindigkeit der Betriebsstelle 2 unabhängig von der Behinderungszeit sind. Wie aus nachstehendem Diagramm zu ersehen ist, ist dieser Bereich eine horizontale Gerade.

Die folgende Kurve und die Gerade im 45°-Winkel entsprechen dem bereits Beschriebenen.

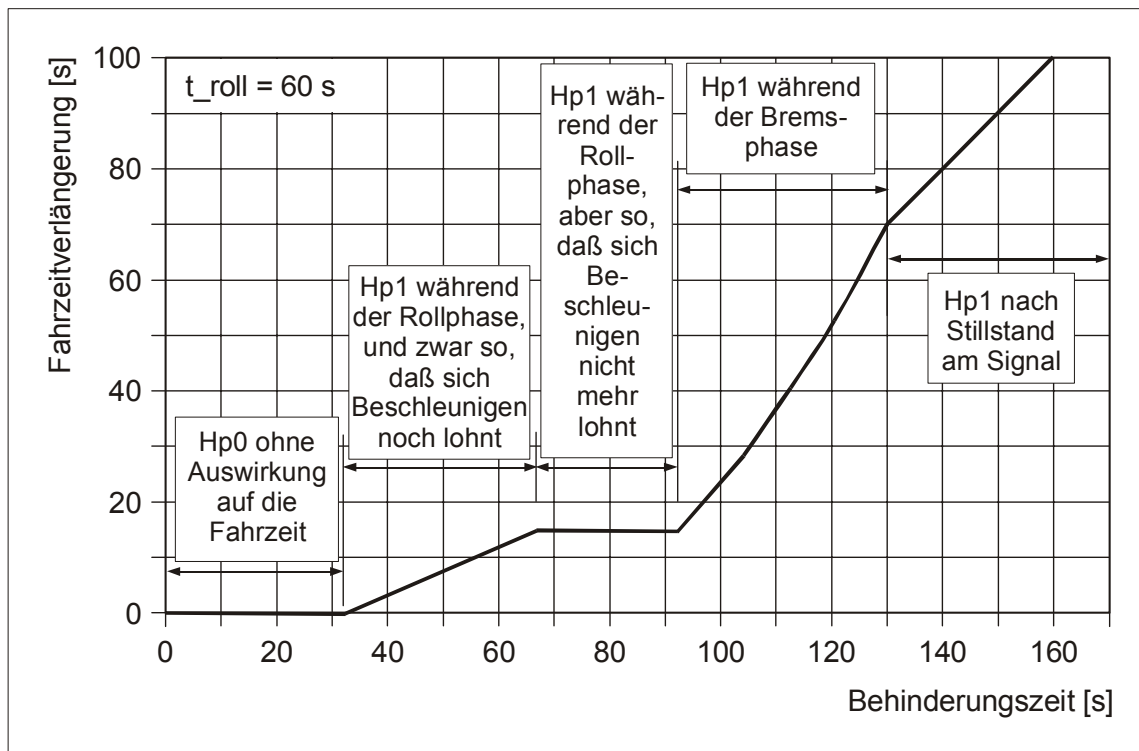


Abb. 6.8: Behinderungs-Übertragungsdiagramm mit fünf Bereichen und horizontaler Linie im dritten Bereich

Auswirkungen unterschiedlicher Rollzeiten

Nach dieser Darstellung der grundsätzlichen Linienformen sollen nun noch die Auswirkungen unterschiedlicher Rollzeiten gezeigt werden.

Im nachstehenden Diagramm wird die Rollzeit bei einer Fahrt auf das Halt zeigende Signal zwischen 0 und 90 Sekunden variiert, während die Rollzeit bei den restlichen Bremszielpunkten konstant mit 30 Sekunden angesetzt wird. Es fällt zunächst einmal auf, daß die 45°-Linien aller Varianten übereinstimmen. Dies ist eine Folge der gleichbleibenden Fahrzeit zwischen dem Signal und Betriebsstelle 2. Durch die Variation der Rollzeiten ergeben sich zwischen

Betriebstelle 1 und dem Signal zwar unterschiedliche Fahrzeiten. Diese spielen aber keine Rolle mehr, wenn der Zug erst einmal am Signal steht.

Bemerkenswert ist außerdem, daß sich bei kleinen Rollzeiten (im Diagramm bis etwa 30 Sekunden) nur kleine Unterschiede in der Auswirkung auf die Rollzeitverlängerung ergeben. Erst bei noch größeren Werten steigt die zusätzliche Fahrzeitverlängerung bis auf ca. 20 Sekunden an.

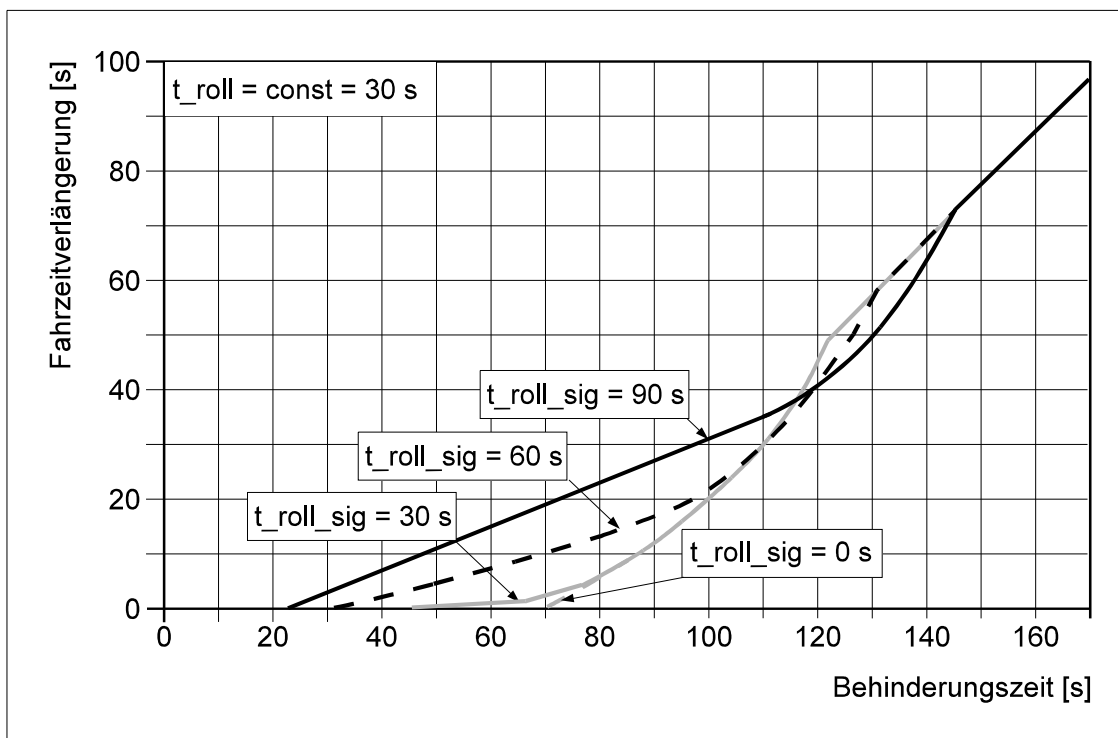


Abb. 6.9: Behinderungs-Übertragungsdiagramm mit $t_{roll} = \text{const.}$ und $t_{roll_sig} = 0..90$ Sekunden

Nur bei größeren Behinderungszeiten (im Beispiel zwischen ca. 120 und ca. 145 Sekunden) wirken sich lange Rollzeiten reduzierend auf die Fahrzeitverlängerung aus. Der Grund dafür ist die „optimale Geschwindigkeit“, die gerade gefahren wird, wenn das Signal auf Fahrt springt (siehe dazu auch KRÖH in[36]).

Wird für alle Bremszielpunkte einschließlich des Signals eine einheitliche Rollzeit vorgegeben und diese von 0 bis 90 Sekunden variiert, so ergibt sich wiederum ein anderes Bild. Der größte Unterschied zum vorigen Diagramm ist, daß die 45°-Linien bei großen Behinderungszeiten nicht mehr deckungsgleich sind. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Fahrzeiten zwischen den Betriebsstellen und dem Signal. Weiterhin fällt auf, daß der vorletzte Bereich (Fahrt frei im Bremsweg) bei großen Rollzeiten eine zweigeteilte Form aufweist. Der Grund dafür ist die geringe Zielgeschwindigkeit, die sich bei großen Rollzeiten zwischen Signal und Betriebsstelle 2 ergibt. Befindet sich der Zug im Bremsweg und bekommt er freie Fahrt, solange er schneller fährt als die Zielgeschwindigkeit, so behält er die aktuelle Geschwindigkeit bei. Liegt seine aktuelle Geschwindigkeit bereits unter der Zielgeschwindigkeit, wenn das Signal auf Fahrt springt, so beschleunigt er nur bis auf die Zielgeschwindigkeit.

Wie erwartet, ergeben sich die geringsten Auswirkungen der Behinderung auf die Fahrzeit bei kleinen Rollzeiten. Lediglich sehr große Rollzeiten ergeben in einem kleinen Bereich (im nachstehenden Diagramm zwischen 110 und 125 Sekunden) geringere Auswirkungen auf die Fahrzeitverlängerung als die anderen Rollzeiten. Ansonsten verursachen große Rollzeiten (im Beispiel 90 Sekunden) eine zusätzliche Fahrzeitverlängerung gegenüber kleineren Rollzeiten (0 Sekunden) von ca. 25 Sekunden.

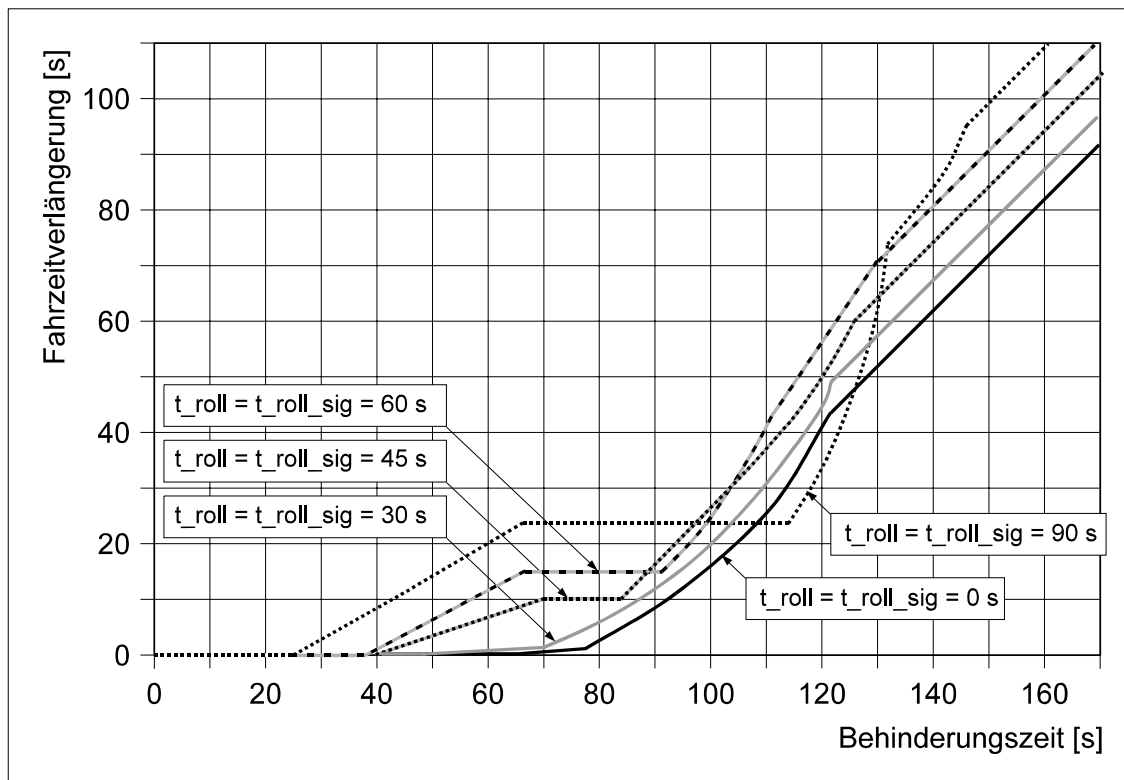


Abb. 6.10: Behinderungs-Übertragungsdiagramm mit $t_{roll}=t_{roll_sig}=0..90$ Sekunden

Auswirkungen des Zugsicherungssystems PZB 90

Weitere Linienformen kommen hinzu, wenn der Zug mit dem Zugsicherungssystem PZB 90 ausgerüstet ist. Durch das Überfahren der 1000 Hz- bzw. 500 Hz-Magnete wird eine Bremskurve vorgegeben, die der Zug auch nach Fahrtstellung des Signals abfahren muß. Dies bedeutet, daß in gewissen Bereichen die Fahrzeitverlängerung unabhängig von der Behinderungszeit ist. Diese Bereiche sind in nachstehendem Diagramm als horizontale Linien zu erkennen. Die vertikale Linie markiert den Zeitpunkt, an dem der Zug über den wirksamen Magneten fährt und unter die PZB 90-Überwachung fällt. Dabei erstreckt sich der Auswirkungsbereich des 1000 Hz-Magneten zwar über etwa 20 Sekunden, die Fahrzeitverlängerung ist aber mit ca. 5 Sekunden relativ konstant.

Die Gründe dafür sind die geringe Differenz zwischen der Überwachungsgeschwindigkeit von 90 km/h und der Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h bzw. einer noch niedrigeren Fahrgeschwindigkeit. Ergibt sich nach der Fahrtstellung des Signals eine Zielgeschwindigkeit von weniger als 90 km/h, so hat der wirksame 1000 Hz-Magnet keine Auswirkungen auf die Fahrzeit.

Da die Überfahrt des Zuges über den wirksamen 500 Hz-Magneten bedeutet, daß zunächst eine Bremskurve abgefahren werden muß, anstatt bei „Fahrt“ sogleich zu beschleunigen, sind die zusätzlichen Fahrzeitverlängerungen hier größer als beim 1000 Hz-Magneten. Sie beträgt 25 Sekunden, wenn der Zug den wirksamen Magneten gerade überfahren hat und geht dann stetig auf 0 zurück.

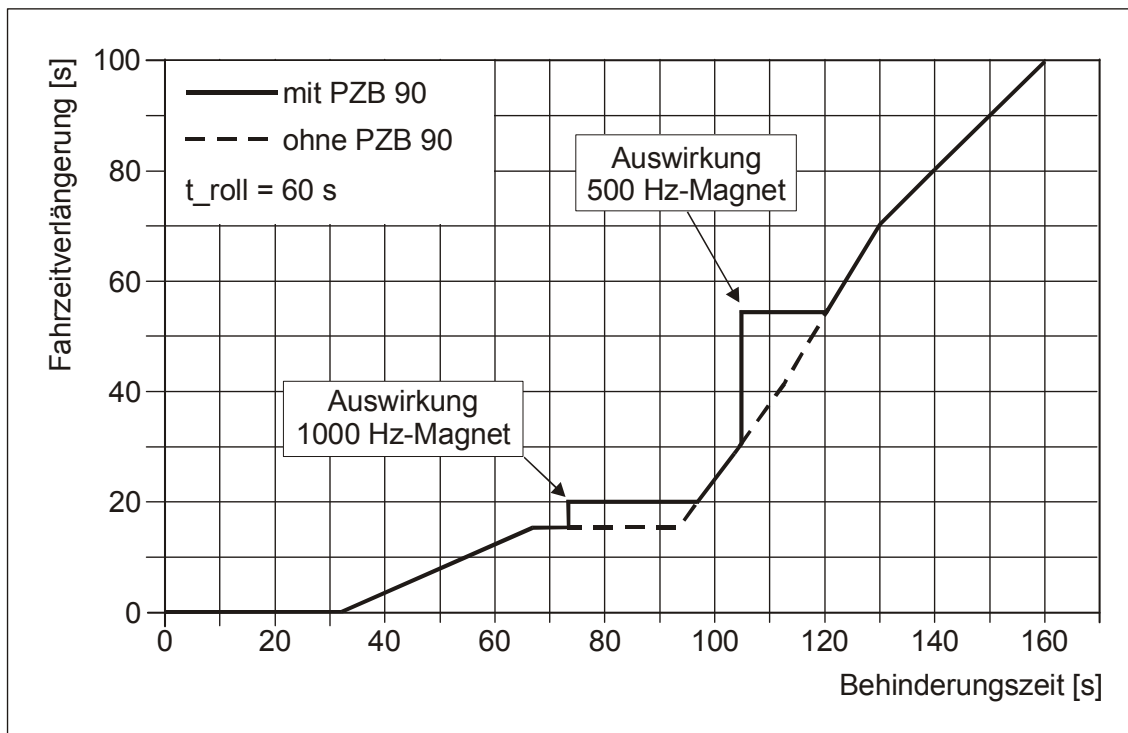


Abb. 6.11: Auswirkungen der Indusi PZB 90 auf das Behinderungs-Übertragungsdigramm

Überfährt ein mit PZB 90 ausgerüsteter Zug einen Magneten und unterschreitet anschließend für eine definierte Zeitspanne eine bestimmte Umschaltgeschwindigkeit, so unterliegt er danach einer sogenannten „restriktiven“ Überwachung.

Die dann von der Zugsicherung zugelassenen Geschwindigkeiten liegen deutlich unter denen einer nicht restriktiven Überwachung und verursachen damit weitere Fahrzeitverlängerungen. Die Kriterien für die Auslösung einer restriktiven Überwachung sind so bemessen, daß diese im allgemeinen nur nach einem Halt eintreten kann. Daher sind die Halteplätze und die Magnete möglichst so anzuordnen, daß keine restriktive Überwachung ausgelöst wird oder die Auswirkungen auf die Fahrzeit klein bleiben. Ist dies nicht möglich, so tritt bei einer restriktiven Überwachung unabhängig vom Zeitpunkt der Signalfahrtstellung eine Behinderung auf. Im Behinderungs-Übertragungsdigramm beginnt die Kurve dann nicht an der Abszisse, sondern an der Ordinate und weist eine horizontale Lage auf. Dies ist in der folgenden Graphik gut zu erkennen.

Die weitere Form der Kurve hängt davon ab, ob der Zug die Fahrtstellung des Signals am Bahnsteig abwartet oder bis zum Signal vorfährt und dort wartet.

Die Entscheidung für eine der beiden Möglichkeiten wird mit Vorgabe der Mindestvorrückstrecke getroffen. Ist deren Wert größer als der Abstand zwischen Halteplatz und Signal, so wartet der Zug, andernfalls fährt er bis zum Signal vor. Im ersteren Fall besteht die Kurve der Fahrzeitverlängerung lediglich aus der horizontalen Geraden.

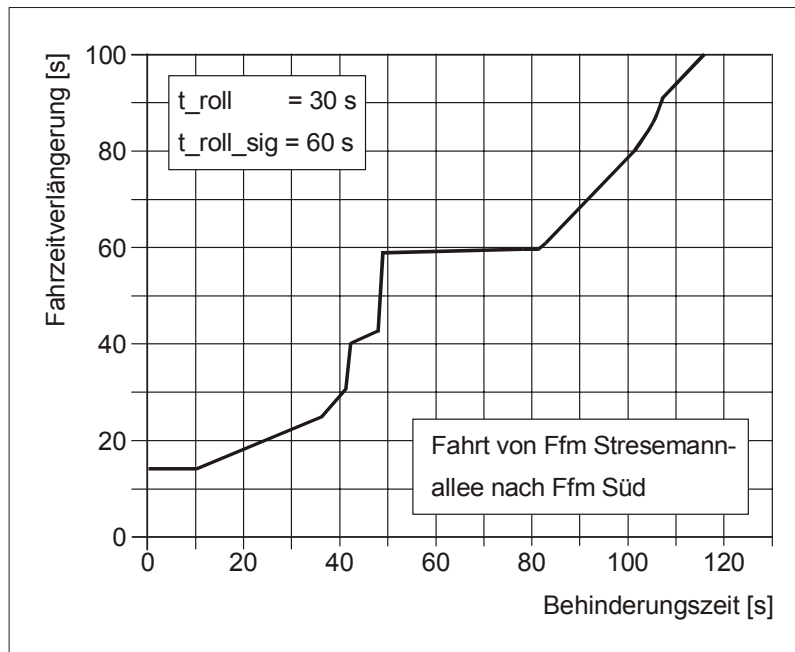


Abb. 6.12: Fahrzeitverlängerungskurve für den Streckenabschnitt von Ffm Stresemannallee nach Ffm Süd

Dies bedeutet, daß nach dem Überfahren des wirksamen 500 Hz-

oder 1000 Hz-Magneten unabhängig vom Zeitpunkt der Fahrtstellung des Signals eine konstante Fahrzeitverlängerung auftritt. Fährt der Zug trotz Halt zeigendem Signal bis dorthin vor, so schließen sich an die horizontale Gerade die bereits beschriebenen Bereiche an (siehe obenstehende Graphik).

Nachfolgende Graphik bietet einen Überblick über die bisher beschriebenen Diagrammformen in Abhängigkeit des Sicherungssystems und der Anordnung von Halteplätzen und Signalen.

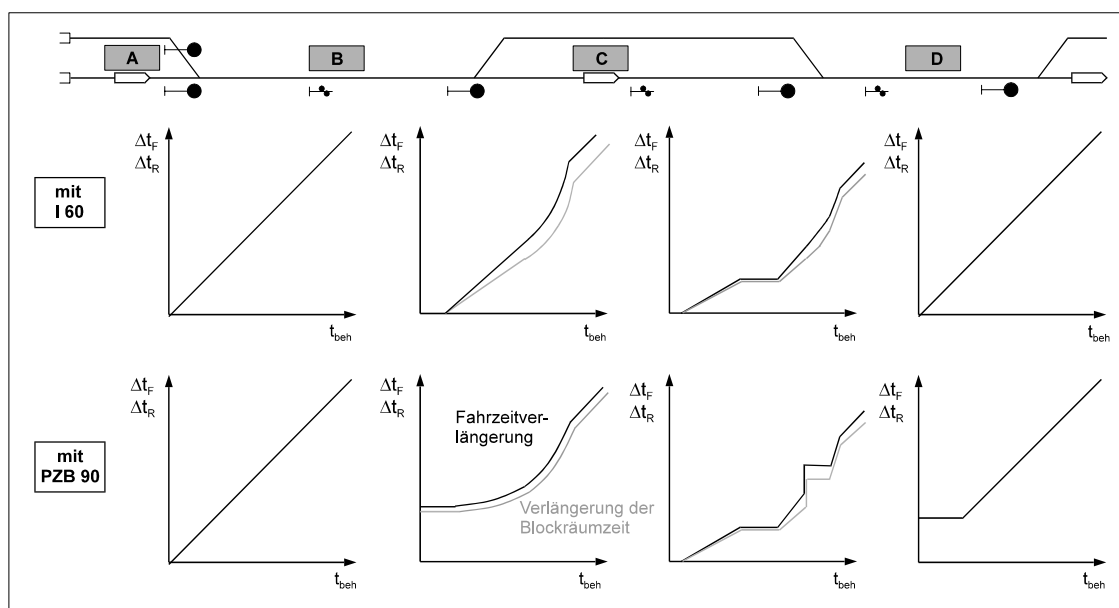


Abb. 6.13: Darstellung der Behinderungs-Übertragungsdiagramme mit und ohne PZB 90

6.6 Durchführung der Simulation

6.6.1 Allgemeines

Sind alle Dateien erstellt, kann die Simulation durchgeführt werden. Der erste Zug in der Anfragedatei wird gewählt, und es wird anhand der Belegungsdatei überprüft, ob dessen Zielgleis frei ist. Falls nicht, wird der nächste Zug in der Anfragedatei gewählt, andernfalls kann die Zugfahrt durchgeführt werden. Falls der Zug an der aktuellen Betriebsstelle beginnt oder gewendet hat, wird die Abfahrtsverspätung stochastisch ermittelt. Eine Fahrt beginnt, indem aus der Fahrplandatei die reine Fahrzeit entnommen wird. Ebenfalls in der Fahrplandatei enthalten ist die Fahrzeitverteilung, mit deren Hilfe die reine Fahrzeit dann stochastisch variiert wird. Im nächsten Schritt wird festgestellt, ob die Zugfahrt behindert wurde oder nicht. Falls ja, muß aus der Behinderungsübertragungsdatei die zusätzliche Fahrzeit ermittelt und zu der reinen Fahrzeit addiert werden. Damit ist die Ankunftszeit an der zweiten Betriebsstelle bekannt und aus der in der Fahrplandatei enthaltenen Haltezeitverteilung kann die verkehrlich notwendige Haltezeit ermittelt werden. Aus dieser und der Ankunftszeit wird anschließend die Wunsch-Abfahrtszeit ermittelt. Diese darf nicht vor der planmäßigen Abfahrtszeit zuzüglich eines Zeitzuschlages für die Abfertigung liegen. Gegebenenfalls wird die Wunsch-Abfahrtszeit gleich der planmäßigen Abfahrtszeit zuzüglich des Zuschlages gesetzt. Die Wunsch-Abfahrtszeit wird

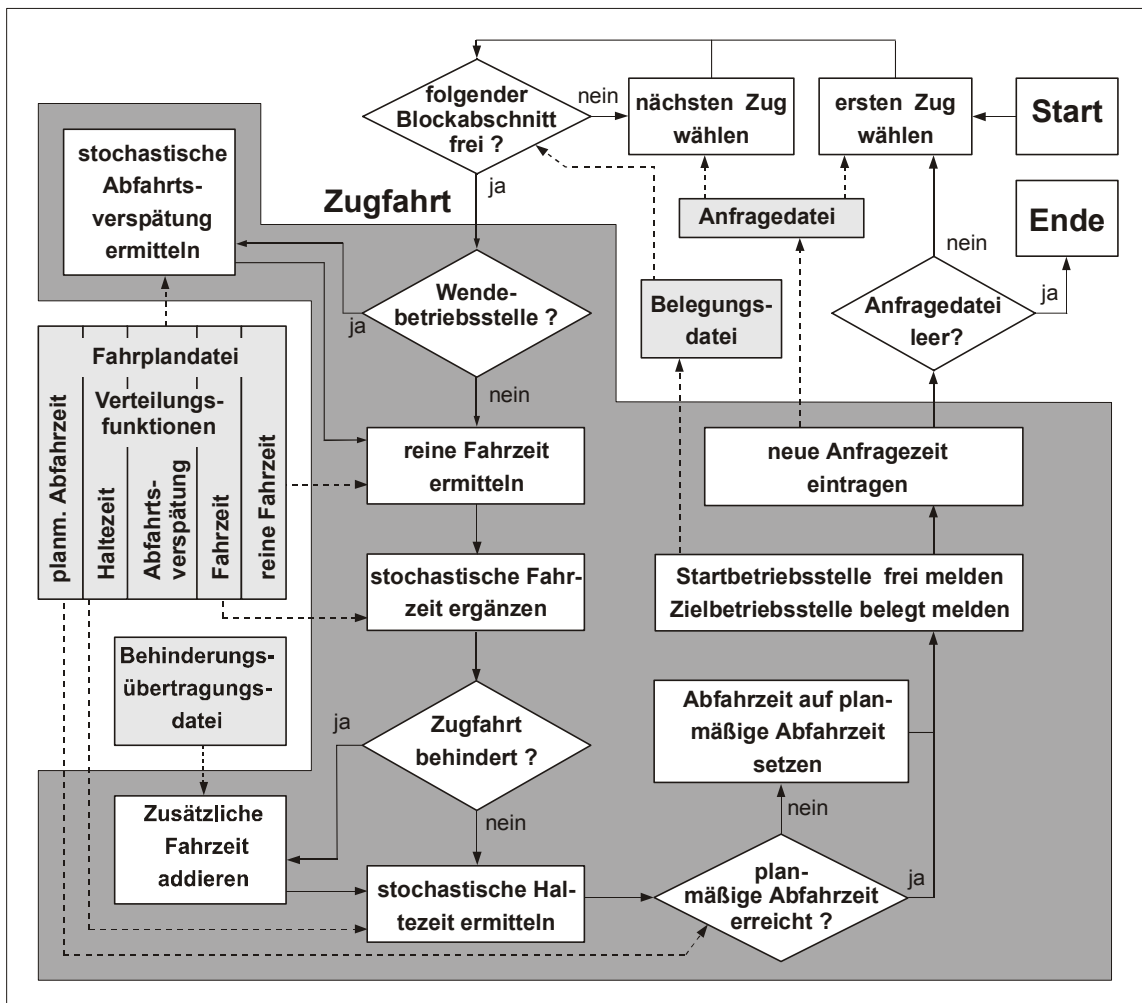


Abb. 6.14: Ablaufdiagramm eines Simulationslaufs

zusammen mit anderen Kenndaten der Zugfahrt in die Anfragedatei eingetragen. Außerdem wird die Zielbetriebsstelle in der Belegungsdatei als belegt und die Startbetriebsstelle als frei markiert. Die Zugfahrt wird dabei immer bis zur letzten Betriebsstelle im nächsten Blockabschnitt durchgeführt. Damit ist die aktuelle Zugfahrt beendet und die nächste kann stattfinden. Ist der Umlauf beendet und der Zug weist als Zielbetriebsstelle die Abstellanlage auf, so erfolgt keine Eintragung in die Anfragedatei. Befinden sich darin keine Anfragen mehr, ist der vollständige Simulationslauf beendet.

6.6.2 Ermittlung der Zielgeschwindigkeit

Für die Wahl einer Fahrgeschwindigkeit ist nicht nur die örtlich zulässige Geschwindigkeit sowie die Bremskurve maßgebend, sondern auch der Energieverbrauch, der Fahrstil des Triebfahrzeugführers und die Verspätung des Zuges. Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob nur die Fahrzeit berechnet wird, oder ob im Rahmen der Simulation eine bestmögliche Anpassung an die Realität angestrebt wird.

Für die Fahrzeitrechnung gelten exakte Vorschriften und Regelungen. Für die Ermittlung der Fahrgeschwindigkeit ist dabei insbesondere die "30-Sekunden-Regel" zu beachten. Diese besagt, daß bei unterschiedlichen zulässigen Geschwindigkeiten zwischen dem Wechsel von einer Beschleunigung zu einer Abbremsung bzw. beim Abbremsen über mehrere Geschwindigkeitsstufen jeweils ein Abschnitt von mindestens 30 Sekunden Fahrt in der Beharrung eingehalten werden kann (siehe DS 412, SBV [13]). Diese Regelung gilt jedoch nicht für reine S-Bahn-Strecken. Aufgrund der exakten Vorgaben ist die Implementierung in das Programm problemlos möglich. Durch eine vereinfachte vorausschauende Fahrzeitrechnung ist sichergestellt, daß die Züge ihre Beharrungsgeschwindigkeit 30 Sekunden lang einhalten.

Im Gegensatz zur Fahrzeitrechnung existieren für die Simulation keine diesbezüglichen Vorschriften. Auch aus der Literatur sind keine Hinweise zu entnehmen. Daher wurden zunächst Annahmen getroffen, die später bei der Auswertung der RZü-Daten überprüft wurden. Bei der Simulation sind drei Fälle zu unterscheiden:

- **planmäßige Fahrt ohne Behinderung**
Es ist davon auszugehen, daß bei einer pünktlichen Fahrt der Triebfahrzeugführer unter Ausschöpfung der verfügbaren Fahrzeitzuschläge die Höchstgeschwindigkeit nicht voll ausnutzt und damit Energie spart.
- **verspätete Zugfahrt**
Der Triebfahrzeugführer wird bemüht sein, die Verspätung aufzuholen. Daher wird er die zulässige Geschwindigkeit ausfahren und sein Beschleunigungs- und Bremsvermögen vollständig ausnutzen.
- **Fahrt auf ein Halt zeigendes Signal**
Bei der Fahrt auf ein Halt zeigendes Signal ist zu beobachten, daß die Triebfahrzeugführer ihre Fahrgeschwindigkeit relativ niedrig wählen. Dies geschieht vermutlich, um vor dem Signal möglichst nicht zum Halten zu kommen und im Falle der Fahrtstellung des Signals aus dem Fahren heraus beschleunigen zu können. Dies ist eine energiesparende Fahrweise.

Um zu erfassen, ob verspätete Zugfahrten tatsächlich höhere Geschwindigkeiten sowie stärkere Beschleunigungen und Verzögerungen aufweisen als pünktliche Zugfahrten, wurden in Kapitel 5.2 die RZü-Daten daraufhin ausgewertet. Es zeigte sich, daß diese Annahme nicht zutrifft. Demzufolge wird im Simulationsprogramm nicht zwischen pünktlichen und verspäteten Zügen unterschieden.

Die Geschwindigkeit vor Halt zeigenden Signalen konnte aus den RZü-Daten nicht ermittelt werden, da der Zeitpunkt der Fahrtstellung des Signals nicht erfaßt wird. Für die Fahrzeitrechnung im Rahmen der Simulation mußte daher eine anderer Weg gefunden werden, um die Zielgeschwindigkeit zu ermitteln. Dafür gibt es vielfältige Ansätze, von denen zwei in die engere Wahl gezogen wurden:

- Vorgabe einer Zeitspanne, während der jeder Zug seine Zielgeschwindigkeit einhalten muß, bevor er wieder bremst. Dies entspricht der Vorgehensweise bei der 30-Sekunden-Regel.
- Vorgabe des Anteils des Beschleunigungsweges am Gesamtweg.

Um die resultierenden Zielgeschwindigkeiten bei vorgegebenen Zielentfernungen zu ermitteln, wurden diese berechnet und graphisch aufgetragen. Die Zielentfernung ist der Abstand zwischen dem Startpunkt mit $v=0$ km/h und dem Halt zeigenden Signal. Die Rollzeit wurde mit 20, 30 und 40 Sekunden, die anteilige Länge des Beschleunigungsweges am Gesamtweg mit 20, 25 und 30 % angesetzt.

Die Graphik zeigt, daß die Vorgabe einer Rollzeit bei geringen Zielentfernungen kleinere Zielgeschwindigkeiten, bei großen Zielentfernungen hingegen größere Zielgeschwindigkeiten als bei der Vorgabe der Bremsweglänge ergibt. Bei einer Zielentfernung von etwa 1800 m schneiden sich die jeweiligen Kurven.

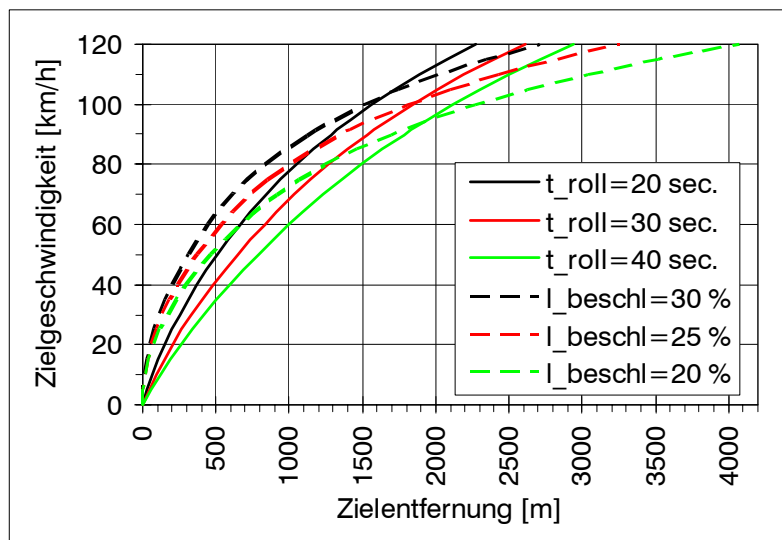


Abb. 6.15: Zielgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zielentfernung

Der Vergleich verschiedener Vorgabewerte zeigt, daß die Abhängigkeit von den Vorgabewerten mit zunehmender Zielentfernung zunächst stark zunimmt und ab etwa 1000 m gleich bleibt. Bei einer Zielentfernung von 500 m beträgt die Zielgeschwindigkeitsdifferenz (bei 10 Sekunden bzw. 5 % Unterschied der Vorgabewerte) etwa 6 km/h. Ab einer Zielentfernung von etwa 1000 m bleibt die Zielgeschwindigkeitsdifferenz mit 8 km/h in etwa konstant.

Am sinnvollsten erwies sich die Vorgabe einer konstanten Rollzeit t_{roll} . Dies hat den Vorteil, daß der Algorithmus durch die Implementierung der 30-Sekunden-Regel bereits vorhanden ist.

6.6.3 Vermeidung des Zufahrens eingleisiger Strecken

In nahezu jedem Eisenbahnsystem können Zustände auftreten, in dem in einem abgegrenzten Bereich kein Zug mehr ein freies Zielgleis vorfindet, so daß dort der Betrieb zum Erliegen kommt. PACHL nennt diesen Zustand Deadlock und definiert ihn folgendermaßen: [49]

Ein Deadlock ist der Zustand eines Bedienungssystems, bei dem n Forderungen je einen Bedienungskanal belegen, wobei jede dieser n Forderungen auf die Freigabe eines anderen Bedienungskanals wartet, der zum Betrachtungszeitpunkt von einer anderen dieser n Forderungen belegt wird, so daß keine weitere Änderung des Belegungszustandes mehr möglich ist.

Die Vermeidung derartiger betriebsbedingter Totalblockaden ist ein Thema, das hier nicht in allen Aspekten vollständig abgehandelt werden kann. Daher beschränken sich die folgenden Ausführungen auf grundsätzliche Fragen und auf die für den Simulationsablauf wesentlichen Punkte.

Die Gefahr des Streckenzufahrens ist insbesondere von drei Faktoren abhängig:

- Sie ist um so größer, je stochastischer, d.h. zufallsabhängiger der Betriebsablauf ist. Beispiele für einen stark stochastischen Betriebsablauf sind z.B. Industriebahnen ohne festen Fahrplan oder eingleisige Nebenstrecken mit hohem Güterverkehrsanteil. Das Gegenteil trifft z.B. auf reine S-Bahnstrecken zu, die im Taktfahrplan mit hoher Pünktlichkeit betrieben werden.
- Weiterhin nimmt die Deadlock-Gefahr mit der Komplexität der Gleistopologie zu. Die Komplexität der Gleistopologie ist dann besonders groß, wenn die Anzahl der eingleisigen Abschnitte und der Abzweigungen groß ist. Auch dafür sind Industriebahnen ein gutes Beispiel, während das andere Extrem z.B. von Straßenbahnen oder U-Bahnen im reinen Zweirichtungsverkehr repräsentiert wird.
- Das letzte Kriterium ist das Vorhandensein eines Streckenblocks mit Richtungsverschluß.

Das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Simulationsprogramm beschreibt die Streckenführung linienförmig und ist somit nicht für extrem komplexe Gleistopologien gedacht. Außerdem muß ein fester Fahrplan vorgegeben werden. Da die Fahr- und Haltezeiten der Züge jedoch im Zuge des Simulationsablaufs mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen variiert werden, ist eine stochastische Komponente vorhanden. Dabei sind zwei Arten von Totalblockaden zu unterscheiden: Zum einen im realen Betrieb auftretende, zum anderen solche, die zwar im Programmablauf vorkommen können, in der Realität jedoch durch geeignete Regelungen vermieden werden.

Zu einer im realen Betrieb denkbaren Totalbehinderung kommt es, wenn auf einen zweigleisigen Begegnungsabschnitt mehr Züge zufahren, als dort einander ausweichen können (siehe folgende Graphik).

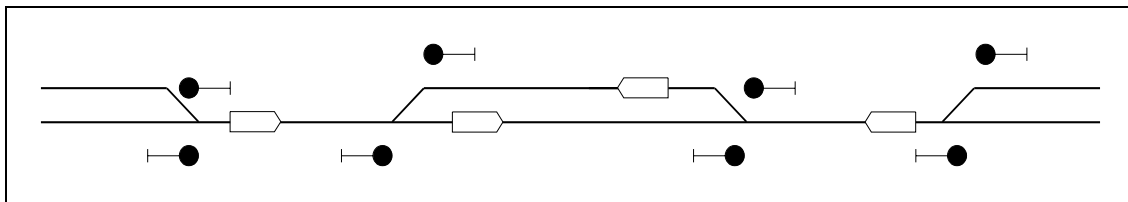


Abb. 6.16: Deadlock auf einer eingleisigen Strecke mit Begegnungsabschnitten

Während des Programmablaufs können weitere, in der Realität nicht vorkommende, Deadlocks auftreten, beispielsweise in einem eingleisigen Abschnitt mit mehreren Blockabschnitten (siehe Graphik 6.17). Im realen Betrieb wird in diesem Beispiel

der Deadlock durch das Prinzip der Erlaubnisgabe vermieden. Während der Simulation ist dieser Fall jedoch denkbar, wenn das Programm nicht entsprechend gestaltet ist.

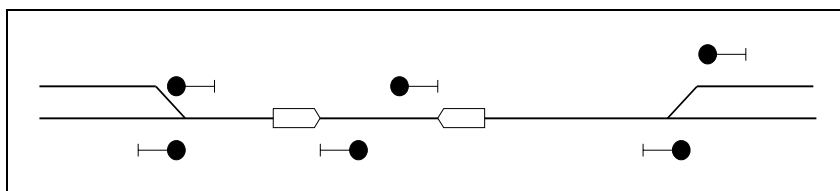


Abb. 6.17: Deadlock in einem eingleisigen Streckenabschnitt

Wenn ein Deadlock aufträte, würde das Programm eine Endlosschleife durchlaufen, ohne daß ein formaler Programmierfehler vorläge. Daher muß ein Deadlock sicher verhindert werden.

Grundsätzlich existieren nach PACHL drei verschiedene Möglichkeiten der Anti-Deadlock-Strategie:

– **Deadlock-Verhinderung**

Dabei umgehen zusätzliche Bedingungen die Deadlock-Fähigkeit eines Systems. So könnte einem Zug die Einfahrt in ein System erst dann erlaubt werden, wenn der gesamte Fahrweg bis zum Verlassen des Systems frei ist. Von Nachteil sind die hohen Belegungszeiten.

– **Deadlock-Vermeidung**

Der Betriebsablauf wird so überwacht, daß Deadlock-gefährdete Situationen vorausschauend erkannt und der Betriebsablauf dann so gesteuert wird, daß kein Deadlock auftritt. Dies kann durch organisatorische Maßnahmen geschehen, durch algorithmische Verfahren oder durch eine regelbasierte Deadlock-Vermeidung, wie von PACHL vorgeschlagen.

– **Deadlock-Erkennung und -Beseitigung**

Hierbei wird der Deadlock nach Auftreten beseitigt, ein Verfahren, das im Eisenbahnbetrieb nicht angewendet werden sollte.

Die durch PACHL vorgeschlagene regelbasierte Deadlock-Vermeidung war ungeeignet, da sie speziell für Zuglenksysteme erstellt wurde, in der Realität aber immer noch Fahrdienstleiter die Reihenfolgeregelung übernehmen. Außerdem war durch die linienförmige Beschreibung der Gleistopologie die Implementierung des Verfahrens nicht erforderlich, da einfachere Möglichkeiten einer Anti-Deadlock-Strategie zur Verfügung standen.

Die Anti-Deadlock-Strategie des Programms besteht darin, zunächst einmal instabile Rechnerzustände oder Endlosschleifen auszuschließen. Dies geschieht, indem jeder eingleisige Abschnitt einer Strecke als Deadlockgefährdetes System betrachtet wird. Die Einfahrt wird erst dann erlaubt, wenn der gesamte Fahrweg bis in den nächsten zwei- oder n-gleisigen Abschnitt hinein frei ist. Damit wird ein Deadlock sicher verhindert.

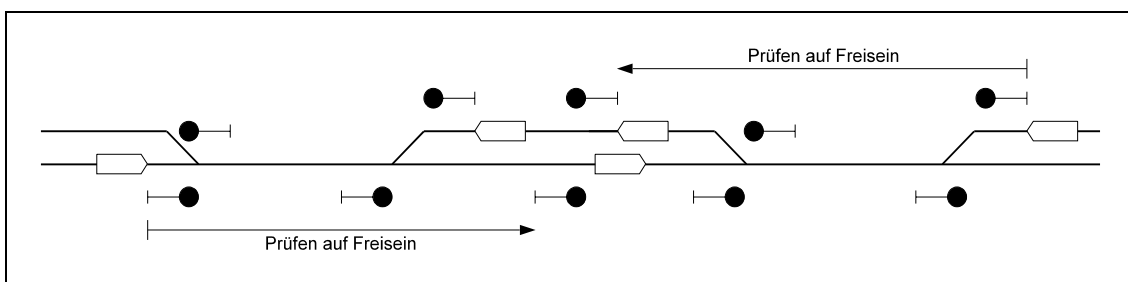


Abb. 6.18: Anti-Deadlock-Strategie des Programms

Würde der Zug erst dann im eingleisigen Abschnitt einfahren dürfen, wenn das erste nicht-Deadlockgefährdete Gleis geräumt wäre, würden sich sehr lange und unrealistische Belegungszeiten ergeben. Ein Vorteil des gewählten Verfahrens ist es jedoch, daß Zugfahrten nicht unbedingt in ihrer echten zeitlichen Reihenfolge stattfinden müssen. Daher wird, wenn ein Zug in den eingleisigen Abschnitt einfahren darf, die Räumzeit jedes einzelnen Blockabschnitts als maßgebend angesetzt. Auf der Simulationsebene wird somit ein Betrieb nachgebildet, bei dem der Fahrdienstleiter durch sorgfältige Disposition einen Deadlock vermeidet.

In nebenstehender Graphik ist der Ablauf der Deadlock-Überprüfung innerhalb des Programms dargestellt.

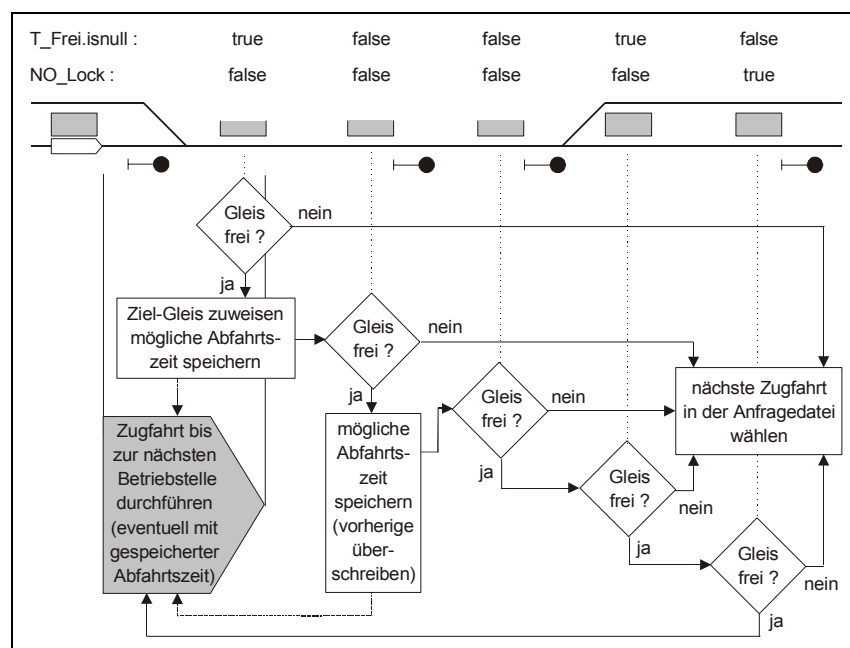


Abb. 6.19: Ablauf der Deadlock-Überprüfung innerhalb des Programms

6.6.4 Berücksichtigung der Indusi PZB 90

Allgemeines

Die Eigenschaften der Indusi PZB 90 wurden im Rahmen des Simulationsprogramms möglichst exakt nachgebildet. In einigen Punkten waren jedoch Anpassungen bzw. Änderungen erforderlich. So wurden die einzuhaltenden Geschwindigkeiten mit einem Sicherheitsabschlag von 5 km/h versehen, d.h. die Geschwindigkeitswerte im Programm liegen unter den realen Werten, da auch die Lokführer die Geschwindigkeiten nicht ganz ausfahren, um eine Zwangsbremung sicher zu vermeiden. Weiterhin wurde die Bedingung für das Umschalten auf die restriktive Überwachungskurve vereinfacht. Während in der Realität der Zug eine Geschwindigkeit von 10 km/h für mehr als 15 Sekunden unterschreiten muß, wurde im Rahmen des Programms ein Halt des Zuges als Umschaltbedingung gewählt. Diese Vereinfachung ist zulässig, da bei üblichen Beschleunigungs- und Verzögerungswerten nur haltende Züge die Geschwindigkeit von 10 km/h um mehr als 15 Sekunden unterschreiten.

Auswirkung des 1000 Hz-Magneten

Nach dem Überfahren des wirksamen 1000 Hz-Magneten am Vorsignal muß der Zug nach 20 Sekunden eine definierte Prüfgeschwindigkeit unterschreiten. Diese beträgt in Schalterstellung O 95 km/h, im Programm wird die maßgebende Geschwindigkeit (incl. 5 km/h Sicherheitsabschlag) mit 90 km/h angesetzt. Da das System der Zugsicherung ansonsten mit Entfernungen und nicht mit Zeiten arbeitet und auch die Fahrzeitrechnung mit seinen Bremszielpunkten darauf abgestimmt ist, muß der Zeitwert in eine Länge umgerechnet werden. Dazu muß der km-Wert des Bremszielpunktes der Zugsicherung ermittelt werden. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden: Entweder ist die aktuelle Fahrgeschwindigkeit größer oder gleich der Überwachungsgeschwindigkeit oder aber kleiner als diese. Im ersten Fall wird davon ausgegangen, daß der Zug seine Fahrgeschwindigkeit zunächst beibehält und erst zum Bremszielpunkt hin bremst. Im zweiten Fall wird vorausgesetzt, daß er bis zur Überwachungsgeschwindigkeit oder einer eventuell geringeren örtlich zulässigen Geschwindigkeit beschleunigt und diese dann beibehält. Diese Vorgehensweise ist zwar vereinfacht, weil Geschwindigkeitswechselfunkte zwischen Vorsignal und dem Bremszielpunkt nicht berücksichtigt werden, die Abweichungen betragen jedoch im ungünstigsten Fall nur wenige Sekunden. Im

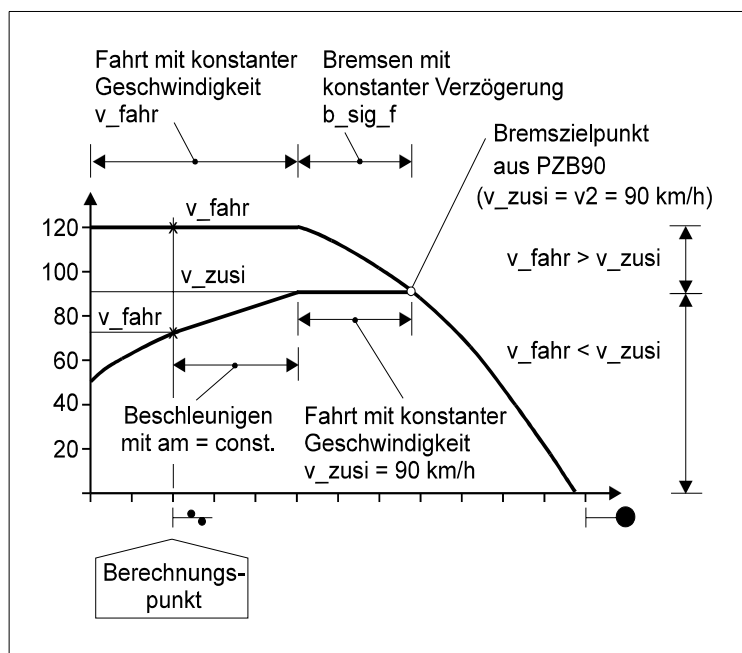


Abb. 6.20: Berechnung des Bremszielpunktes bei Überfahren des 1000 Hz-Magneten

allgemeinen werden überhaupt keine Abweichungen auftreten, wenn z.B. die Zielgeschwindigkeit unter der Überwachungsgeschwindigkeit liegt oder der nächste Geschwindigkeitswechsellpunkt ohnehin eine geringere Geschwindigkeit als die Überwachungsgeschwindigkeit vorgibt.

Auswirkung des 500 Hz-Magneten

Bei der Fahrt über den wirksamen 500 Hz-Magneten ergeben sich zunächst keine Auswirkungen auf die Zugfahrt, da sich der Zug ohnehin in der Bremsphase befindet und am Halt zeigenden Signal zum Stehen kommen muß. Lediglich eine Variable wird auf „true“ gesetzt, um die Beeinflussung zu kennzeichnen. Dies wird wichtig, wenn der Zug nach Überfahrt des Magneten Fahrt frei bekommt. Dann unterliegt er in Abhängigkeit eines Haltes zwischen Vorsignal und Hauptsignal verschiedenen Restriktionen. Hat der Zug gehalten, so muß er eine Maximalgeschwindigkeit von 20 km/h einhalten, hat er nicht gehalten, beträgt diese 40 km/h.

Auswirkung der Signalfreigabe

Zeigt das Signal Halt, so bremst der Zug mit der vom Nutzer eingegebenen Bremsverzögerung ab. Erfolgt jedoch eine Signalfreigabe, so müssen über bestimmte Entfernungen vorgegebene Geschwindigkeiten eingehalten werden. Die Berechnung dieser Werte wird zum Zeitpunkt der Signalfreigabe in Unterprogrammen durchgeführt.

6.7 Programmbedienung

6.7.1 Anforderungen an Rechnerprogramme sowie deren Benutzerschnittstellen

Rechnerprogramme sowie deren Benutzerschnittstellen müssen eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen:

- Übersichtlichkeit und Begreifbarkeit.
- Abfangen grober Eingabefehler.
- Vermeidung unbekannter Fehlermeldungen.
- Vermeidung von Systemabstürzen.

Der erste Punkt wird im wesentlichen durch die Gestaltung der Oberfläche gewährleistet. DELPHI bietet dafür hervorragende Voraussetzungen, da es als Windows-Programm die gleichen Elemente zur Verfügung stellt, die dem Anwender aus anderen Standardprogrammen bereits bekannt sind.

Diese Vielfalt an graphischen Elementen birgt jedoch die Gefahr in sich, zu viele Elemente unstrukturiert einzusetzen und damit eine unübersichtliche Oberfläche zu erzeugen. Daher wurde versucht, möglichst wenig unterschiedliche Elemente zu benutzen und diese logisch zu gliedern. Für jede Gruppe von Formularen erfolgte eine einheitliche und übersichtliche Anordnung der verschiedenen Bereiche des Formulars.

Eine weitere Anforderung an Benutzerschnittstellen ist das Abfangen grober Eingabefehler. Dabei sind zwei Fehlerarten zu unterscheiden: Entweder Fehler, die von der Größenordnung her nicht stimmen (z.B. eine Maximalgeschwindigkeit von 1200 km/h), oder aber Fehler, die sich erst aus der Zuordnung zu anderen Datensätzen oder anderen Dateien ergeben (z.B. eine fehlende Geschwindigkeitsdefinition). Die erste Fehlerart wird unmittelbar bei der Eingabe überprüft, indem dem Anwender untere und obere Grenzen für die Eingabewerte vorgegeben werden. Wenn nur wenige Eingabewerte möglich sind, werden diese dem Anwender vorgegeben, so daß er sie anklicken oder mit einer Laufleiste wählen kann. Zuordnungsfehler hingegen können erst überprüft werden, wenn die Dateneingabe für die jeweilige Datei abgeschlossen ist, im allgemeinen also beim Verlassen und Schließen des Formulars. Um die Zuordnung zwischen den Dateien zu überprüfen, muß die Eingabe in alle betroffenen Dateien beendet sein. Da dies vom Programm nicht erkannt werden kann, muß der Benutzer diese Überprüfung selbst veranlassen.

Durch Fehleingaben des Benutzers können Exceptions (Fehler im Programmablauf) ausgelöst und als Fehlermeldung ausgegeben werden. Da diese Meldungen allgemein gehalten und wenig aussagekräftig sind, helfen sie dem Benutzer nicht weiter und sollten daher vermieden werden. Alle Programmabschnitte, in denen Exceptions auftreten könnten, sind daher mit Routinen zum Abfangen der Meldungen versehen. Gleichzeitig wird eine Fehlermeldung erzeugt, die den Benutzer auf den Fehler hinweist und ihm dessen Korrektur ermöglicht. Eine weitere wichtige Anforderung an Rechnerprogramme ist die Vermeidung von Systemabstürzen, worunter auch Endlosschleifen zählen. Diese entstehen im allgemeinen aus unüblichen Eingaben bzw. Aktionen des Benutzers in Kombination mit Programmierfehlern. Obwohl das Programm sorgfältig erstellt und ausgiebig getestet wurde und Systemabstürze daher

extrem selten auftreten, sind sie nie völlig zu vermeiden. Die ständige automatische Speicherung aller Daten hilft, die Folgen gering zu halten.

6.7.2 Struktur der Programmoberfläche

Nach dem Aufrufen des Programms erscheint als erstes das Hauptmenü, von wo aus alle Formulare direkt aufzurufen sind. Um dem Benutzer eine übersichtliche Programmoberfläche zu bieten, sind die Formulare in verschiedene Gruppen eingeteilt und über eine Menüleiste mit herabklappbaren Fenstern zu erreichen:

- Dateiverwaltung,
- Eingabeformulare,
- Ausgabereports,
- graphische Darstellung,
- Rechnung und
- Optionen.

Eine Gesamtübersicht über die einzelnen Untermenüs bietet nachfolgende Graphik; die Erläuterungen dazu finden sich im Anhang.

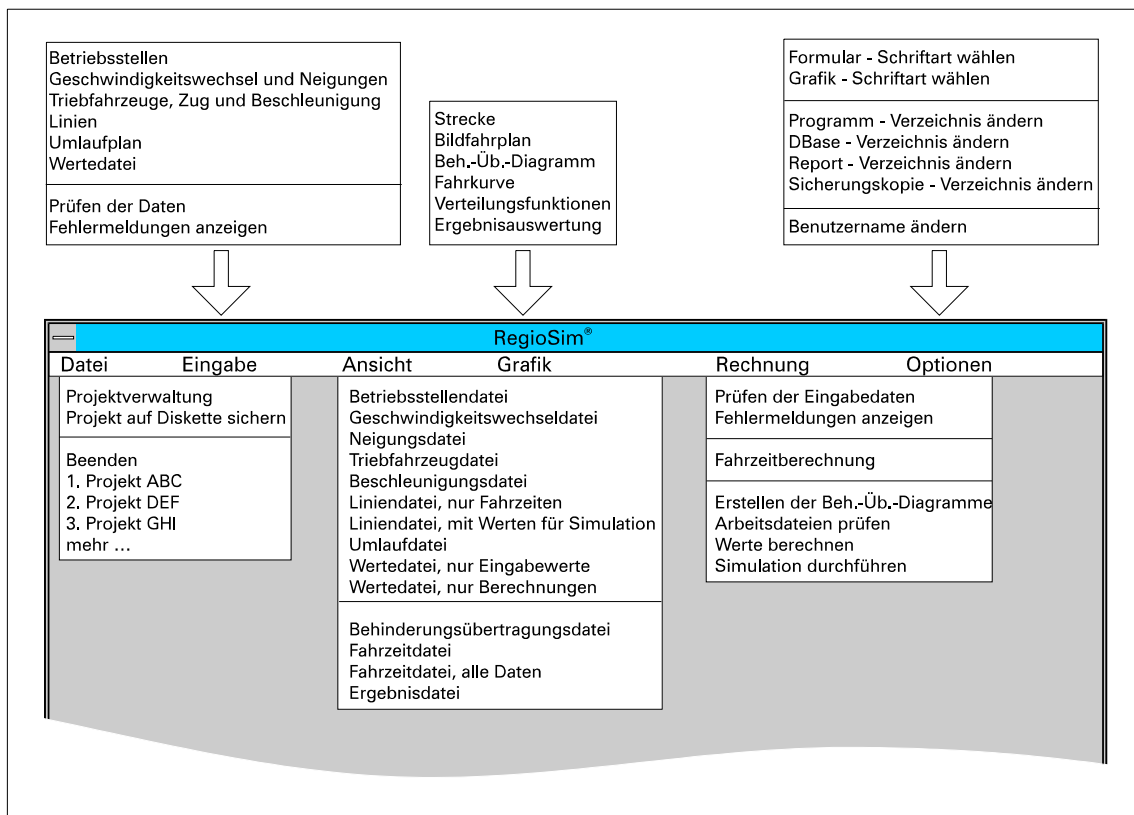


Abb. 6.21: Hauptmenü Simulationsprogramm