

Ein Beitrag zur ressourcenschonenden und anschlussoptimierenden Flexibilisierung des S-Bahn-Betriebes: Algorithmen und Simulationsergebnisse¹

S. Oettich und T. Albrecht

Technische Universität Dresden

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“

Lehrstuhl Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung

D-01062 Dresden

e-mail: <mailto:oettich@vina.vkw.tu-dresden.de>

URL: <http://vini25.vkw.tu-dresden.de/vina>, <http://www.intermobil-dresden.de>

Kurzfassung: Ein attraktiver und zugleich wirtschaftlicher Betrieb öffentlicher Verkehrssysteme verlangt die Verknüpfung von schnellen Beförderungssystemen (S- und U-Bahn) mit flächenerschließenden öffentlichen Verkehrsträgern. Die dadurch notwendigen Umsteigevorgänge und insbesondere das Versäumen von Anschlüssen sind allerdings wesentliche Hemmnisse für die Akzeptanz des gebrochenen Verkehrs.

In dieser Arbeit wird ein Verfahren vorgestellt, das die widersprüchlichen Anforderungen der Anschlussoptimierung und des energiesparenden Fahrens bestmöglich zu erfüllen vermag. Das Problem wird als Optimierungsaufgabe aufgefasst, die zwei Gütekriterien berücksichtigt: den Verbrauch von Traktionsenergie und die Summe der durch das Versäumen von Anschlüssen entstehenden zusätzlichen Wartezeiten.

Zur Lösung des Optimierungsproblems wird das Verfahren der dynamischen Programmierung nach BELLMANN eingesetzt, wobei das Auffinden der optimalen Steuerung für eine Stufe des Entscheidungsprozesses durch ein Verfahren der Polyoptimierung erfolgt.

Schlagworte: Fahrplanerstellung; Flexibilisierung; Anschlusssicherung; Maximumprinzip von PONTRYAGIN; Dynamische Programmierung nach BELLMANN

¹Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Forschungsergebnisse wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Vorhabens **intermobil Region Dresden** gewonnen (Förderkennzeichen 19 B 9907A 8).

1 Einleitung

Die Flexibilisierung und Automatisierung des Betriebes von Nahverkehrsbahnen wird als ein wichtiger Zugang zum Ausbau der Wettbewerbsvorteile von Stadtschnellbahnen gegenüber dem PKW angesehen [28].

Die Erfolgspotenziale dieser Strategie konnten bei Stadt- und U-Bahnen überzeugend durch Betriebserfahrungen mit den Bahnsystemen vom Typ VAL in Lille und Toulouse, dem System SkyTrain in Vancouver, der Maggaly-Linie der U-Bahn Lyon oder der Metro-Linie 14 „Meteor“ in Paris nachgewiesen werden [26, 31].

Das Forschungsvorhaben *intermobil Region Dresden* [30] soll die Tragfähigkeit dieses Zuganges erstmals unter den komplizierteren Bedingungen des S-Bahn-Betriebes und der nachträglichen Automatisierung einer bestehenden Strecke analysieren. Dabei wird eine Drei-Ebenen-Strategie verfolgt (siehe Abb. 1):

1. Nachfrageorientierte, also zeitliche, räumliche und ereignisorientierte Flexibilisierung des Beförderungsangebotes,
2. anschlussoptimierende und ressourcenschonende Flexibilisierung der einzelnen Zugfahrten entlang einer Nahverkehrsstrecke und
3. energieoptimale Fahrzeitregelung für Zugfahrten zwischen zwei Halten.

Die vorliegende Arbeit ist den beiden zuletzt genannten Aufgabenstellungen gewidmet, deren Realisierung auf zwei Wegen angestrebt wird: Als bordrechnergestütztes Fahrerassistenzsystem und als ATO-Komponente bei vollautomatischer Fahrzeugführung.

2 Energieoptimale Fahrzeitregelung für Zugfahrten zwischen zwei Halten

Zunächst soll auf die dritte Ebene der in Abb. 1 dargestellten Aufgabenhierarchie eingegangen werden, in der folgende Aufgabe zu lösen ist:

Ein Zug soll von einem Halt A so zu einem Halt B befördert werden, dass die vorgegebene Fahrzeit t_F eingehalten wird und bei Berücksichtigung von Beschränkungen für Geschwindigkeit x_2 sowie Beschleunigung bzw. Verzögerung \dot{x}_2 der Traktionsenergieverbrauch minimiert wird.



Abbildung 1: Ebenenmodell des Eisenbahnbetriebs

Dieses Problem ist bereits seit vielen Jahren Gegenstand wissenschaftlicher und experimenteller Untersuchungen [3–19, 22, 23, 27, 29, 32, 33]. Der hier verwendete Lösungszugang basiert auf Arbeiten von STROBEL und HORN [12–14, 29], die bereits in den späten 1970er Jahren ein Fahrerassistenzsystem für das energiesparende Fahren entwickelten und bei der Berliner S-Bahn zum Einsatz brachten (vgl. auch [15–17, 32]).

Angestrebt wird ein bordrechnergestütztes Regelungssystem, dass sich in das European Train Control System (ETCS) auf zwei Wegen integrieren lassen soll:

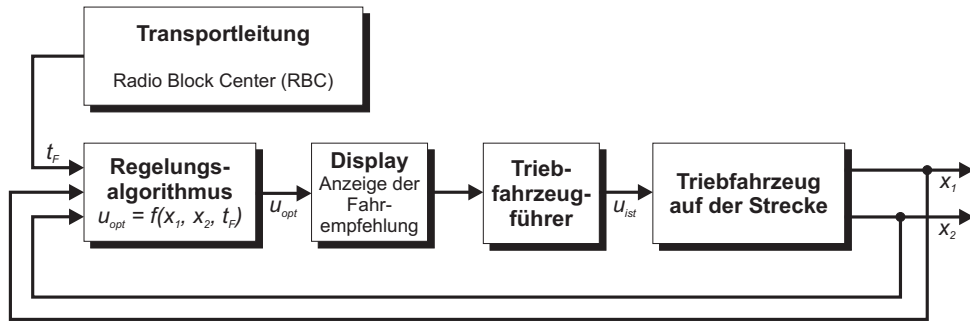
1. Als Fahrerassistenzsystem nach Bild 2(a), mit dem dem Fahrzeugführer Fahrempfehlungen so signalisiert werden, dass die o.g. Aufgabe gelöst wird.
2. Als Teil der ATO-Systems bei vollautomatischer Fahrzeugführung nach Abbildung 2(b).

Das zu lösende Optimalsteuerungsproblem lässt sich wie folgt formulieren:

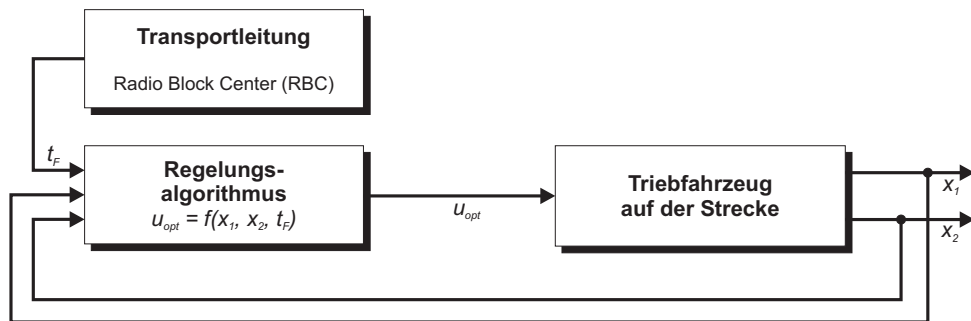
1. Zustandsvariablen sind der Weg x_1 und die Geschwindigkeit x_2 . Als Steuergröße $u(t)$ wird gemäß

$$u(t) = \frac{F(t)}{F_B} \quad (1)$$

die auf die maximale Bremskraft F_B bezogene Zugkraft verwendet.



(a) Fahrerassistenzsystem



(b) ATO-Komponente

Abbildung 2: Möglichkeiten zur Anwendung der energieoptimalen Fahrzeitenregelung

2. Die Zugfahrt von Halt A zum Halt B wird als Überführung des Systemzustandes vom Anfangszustand

$$\mathbf{x}(0) = \begin{pmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \end{pmatrix} \quad (2)$$

in den Endzustand

$$\mathbf{x}(t_F) = \begin{pmatrix} x_1(t_F) \\ x_2(t_F) \end{pmatrix} \quad (3)$$

definiert, wobei die Beschränkungen

$$1 \leq u(t) < \frac{F_T}{F_B} \quad (4)$$

für die Steuervariable und

$$0 \leq x_2(t) \leq v_{\max} \quad (5)$$

für die Zustandsvariable x_2 , d.h. die Geschwindigkeit, gelten.

3. Das Gütekriterium für die Optimierung beschreibt den Energieverbrauch der Zugfahrt; hierfür wird vereinfachend der mechanische Traktionsenergieaufwand verwendet:

$$Q_1 = f_0(\mathbf{x}, u) = \int_0^{t_F} F v dt = \frac{F_B}{m} \int_0^{t_F} \frac{1}{2} (u + |u|) x_2 dt \quad (6)$$

4. Gesucht wird das optimale Regelungsgesetz

$$u = u(x_1, x_2, T), \quad (7)$$

das es gestattet, die optimalen Werte der Steuervariablen u aus den gemessenen Zustandsvariablen x_1 (Weg) und x_2 (Geschwindigkeit) sowie der noch verfügbaren Fahrzeit $T = t_F - t$ zu bestimmen.

2.1 Der energieoptimale Regelungsalgorithmus nach Horn²

Für die Herleitung des optimalen Regelungsalgorithmus wurden von HORN [12] die Zustandsgleichungen

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{m} (u(t) F_B - F_W(x_2) - F_H) \end{aligned} \quad (8)$$

verwendet. Dabei steht m für die Masse des Zuges. $F_W(x_2) = A x_2^2 + B x_2 + C$ bezeichnet die Fahrwiderstandskraft des Zuges und F_H kennzeichnet die Hangabtriebskraft, die sich mit

$$F_H = i_m F_G \quad (9)$$

als Produkt aus mittlerer Streckenneigung i_m und Gewichtskraft F_G des Zuges darstellen lässt.

Die nichtlineare Fahrwiderstandskraft $F_W(x_2)$ wird linearisiert, wobei der Fehler im Bereich zwischen der durchschnittlichen Geschwindigkeit v_u und der Maximalgeschwindigkeit v_m des Zuges minimiert werden soll. In diesem Bereich findet der Auslaufvorgang des

²Die Herleitung des Regelungsgesetzes (vgl. [12, 14]) für die energieoptimale Fahrzeitregelung zwischen zwei Halten würde den Umfang dieses Beitrags sprengen, deshalb sollen hier nur die Grundidee und die für diesen Beitrag wesentlichen Ergebnisse erläutert werden.

Fahrspieler statt; hier ist die Fahrwiderstandskraft als einzige Kraft wirksam. Für den linearisierten Fahrwiderstand ergibt sich

$$F_W(x_2) = a x_2 + b \quad (10)$$

mit

$$a = A(v_u + v_m) + B, \quad (11)$$

$$b = -\frac{1}{3} A \left(v_m v_u + \frac{1}{2} (v_m + v_u)^2 \right) + C + i_m F_G \quad (12)$$

und

$$v_u = (x_1(t_F) - x_1(0))/t_F, \quad (13)$$

Mit dem linearisierten Fahrwiderstand erhält man aus (8) das vereinfachte Zustandsgleichungssystem für den Triebzug:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, u) = \begin{pmatrix} x_2 \\ u(t) - \frac{1}{m}(a x_2 + b) \end{pmatrix} \quad (14)$$

Das Maximumprinzip von PONTYAGIN besagt, dass der Energieverbrauch des Fahrspieler minimal ist, dessen HAMILTON-Funktion

$$H(\mathbf{x}, u, \mathbf{p}) = \mathbf{p}^T \mathbf{f}(\mathbf{x}, u) + f_0(\mathbf{x}, u) \quad (15)$$

ein Maximum annimmt, wobei der Vektor der Kozustände \mathbf{p} mit Hilfe des kanonischen Gleichungssystems

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{p}} \\ \dot{\mathbf{p}}(t) &= \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} \end{aligned} \quad (16)$$

bestimmt wird.

Für das linearisierte Zugmodell aus Gleichung (14) und das Gütekriterium (6) weist die HAMILTON-Funktion (15) ein Maximum auf, wenn die Steuergröße u die folgenden Werte annimmt:

$$u = \begin{cases} u_{\max}, & \text{falls } p_2 > \frac{x_2}{u_B} & \text{(Beschleunigungsphase)} \\ [0, u_{\max}], & \text{falls } p_2 = \frac{x_2}{u_B} & \text{(Beharrungsphase, 2. singuläre Lösung)} \\ 0, & \text{falls } 0 < p_2 < \frac{x_2}{u_B} & \text{(Auslaufphase)} \\ [-1, 0], & \text{falls } p_2 = 0 & \text{(1. singuläre Lösung)} \\ -1, & \text{falls } p_2 < 0 & \text{(Bremsphase)} \end{cases}$$

Eine Zugfahrt hat immer dann einen minimalen Energieverbrauch, wenn sie in den vier Phasen

1. Anfahren mit maximal möglicher Beschleunigung³,
2. Fahrt mit maximal zulässiger Geschwindigkeit,
3. Auslauf (Fahrt ohne Antrieb) und
4. Bremsen mit maximal möglicher Bremsverzögerung³

stattfindet. Bei hinreichend großer Fahrzeitreserve und kurzen Streckenlängen, was im Nahverkehr fast immer der Fall ist, kann die 2. Phase entfallen.

Die Umsetzung der oben genannten optimalen Lösung wird in Form einer Zuordnung zwischen den Zustandsvariablen x_1 und x_2 und der Steuergröße u gesucht. Eine weitere zu berücksichtigende Größe ist die Restfahrzeit

$$T = t_F - t \quad (17)$$

bis zur fahrplanmässigen Ankunftszeit t_F des Zuges im Ziel. Die Steuergröße wird in der Form

$$u = u(x_1, x_2, T) \quad (18)$$

bestimmt. Wie in Abbildung 3 veranschaulicht, kann jedem Punkt des Zustandsraumes eine Steuergröße u zugeordnet werden. Für einen Optimalregler lassen sich die Schaltflächen bestimmen, an denen eine Phase der Fahrt eine andere ablöst. Diese Schaltflächen sind von der Fahrzeitreserve T und der Geschwindigkeit x_2 abhängig.

Die wichtigsten Schaltflächen sind⁴:

K_0 Beginn des Bremsvorganges

$$K_0 : \quad x_1 = \frac{1}{a} \left(\frac{u_b + b}{a} \ln \left(1 + \frac{a x_2}{u_b + b} \right) - x_2 \right) \quad (19)$$

K_1 Umschalten in die Auslaufphase

$$K_1 : \quad x_1 = \frac{1}{a} \left(bT - \frac{u_b}{a} \ln \left(\frac{u_b + b - (a x_2 + b) e^{-aT}}{u_b} \right) - x_2 \right) \quad (20)$$

³unter Berücksichtigung der Grenzen nach Gleichung (4), die durch den Fahrkomfort gegeben sind

⁴Die ausführliche Herleitung der Gleichungen für die Schaltflächen ist in [12] nachzuschlagen.

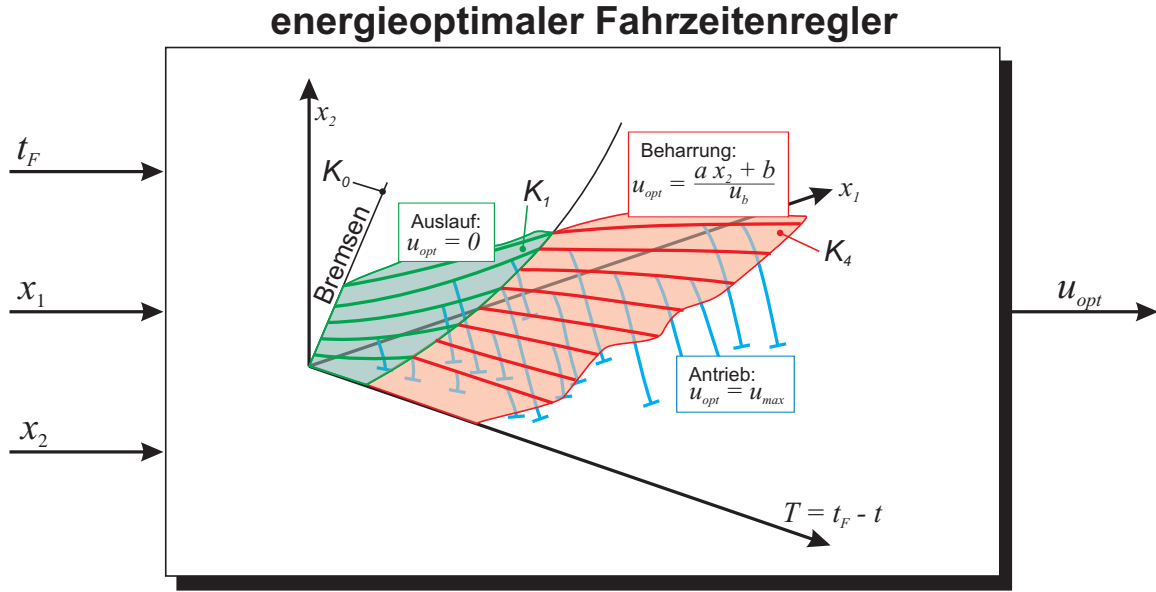


Abbildung 3: Zuordnung der Steuergröße u zu den Punkten (x_1, x_2, T) des Zustandsraumes, prinzipieller Verlauf der Schaltkurven (nach [12])

K_4 Umschalten in die Beharrungsfahrt mit konstanter Geschwindigkeit x_{2s}

$$K_4: \quad x_1 = \frac{1}{a} \left(\frac{u_b}{a} \ln \left(\frac{(a x_{2s} + u_b + b)^2 - u_b (u_b + b)}{(2a x_{2s} + b)(u_b + b)} \right) + \frac{b}{a} - \left(x_{2s} + \frac{b}{a} \right) \left(1 - \ln \left(\frac{(a x_{2s} + u_b + b)^2 - u_b (u_b + b)}{(a x_{2s} + b)(u_b + b)} \right) \right) \right) - x_{2s} T \quad (21)$$

gültig für

$$T > \begin{cases} 0, & \text{wenn } b > 0 \\ \frac{1}{a} \ln(2), & \text{wenn } b = 0 \\ \frac{1}{a} \left(\ln(2) + \ln \left(\frac{u_b + \sqrt{-b u_B}}{u_b + b} \right) \right), & \text{wenn } 0 > b \geq \frac{u_b}{2} \left(\sqrt{1 + 4 a v_m / u_b} - 1 \right) - a v_m \\ \frac{1}{a} \ln \left(1 + \frac{a v_m}{u_B + b} \left(1 + \frac{u_B}{a v_m + b} \right) \right), & \text{wenn } \frac{u_b}{2} \left(\sqrt{1 + 4 a v_m / u_b} - 1 \right) - a v_m > b \end{cases} \quad (22)$$

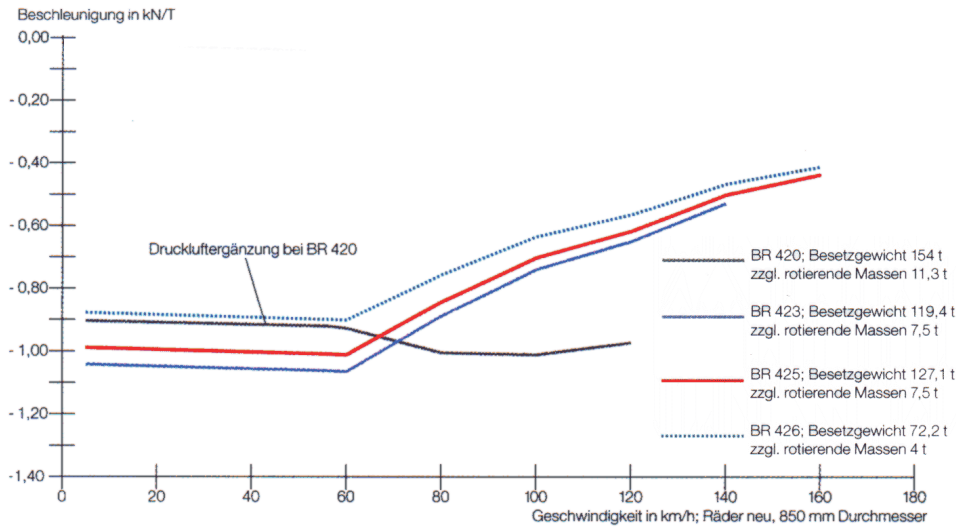


Abbildung 4: Bremskraftkennlinie der Triebzüge BR424, BR425 und BR426 (aus [20])

2.2 Die vorgeschlagene Erweiterung des energieoptimalen Fahrzeitenreglers nach Horn

Die Analyse und der Test des Reglers nach HORN für den Einsatz in einem automatischen Zugsteuerungssystem (ATO) nach Bild 2(b) haben gezeigt, dass einige der Vereinfachungen, die bei der Entwicklung für ein Fahrerassistenzsystem angenommen wurden, nicht mehr ohne weiteres verwendet werden können.

Insbesondere die Annahme einer konstanten Bremsverzögerung für die letzte Phase der Fahrt ist nicht mehr gültig: Mit modernen elektrischen Triebzügen wird heute praktisch nur noch elektrisch gebremst, indem die Antriebsmotoren im Generatorbetrieb genutzt werden. Dieses Bremsverfahren weist einen wesentlich geringeren Verschleiß als mechanisches Bremsen auf. Das führt aber zu einer Veränderung der Bremskraftkennlinie, die nun nicht mehr konstant über der Geschwindigkeit ist, sondern wie die Zugkraftkennlinie über der Nenngeschwindigkeit v_{nenn} des Motors mit zunehmender Geschwindigkeit hyperbelförmig an der Leistungsgrenze abfällt (siehe Abb. 4).

Der Regler von HORN hängt allerdings bei vollautomatischem Fahrbetrieb von einer sehr genauen Modellierung des Bremsvorganges ab, da die Berechnung der Schaltflächen K_1 und K_4 durch die Form der Bremstrajektorie bestimmt wird. Deshalb soll nachfolgend eine Modifikation der Schaltflächen vorgenommen werden, um sie besser an das Bremsverhalten eines modernen Elektrotriebzuges anpassen zu können.

Anhaltevorgang mit Ruckbegrenzung

Eine erste Modifikation der Schaltkurven erfolgt durch die Modellierung des Anhaltevorgangs mit einer Ruckbegrenzung. Nähert sich der Triebzug der Geschwindigkeit $x_2 = 0$ an, so darf die Verzögerung aus Gründen des Fahrkomforts nicht schlagartig abgeschaltet werden. Stattdessen muss ein Übergang vom Bremsen mit konstanter Verzögerung $a < 0$ in einen Bremsvorgang mit konstantem und begrenztem Ruck gemäß

$$|\ddot{x}_2(t)| = \left| \frac{d^2 x_2}{dt^2} \right| = |\psi| < J \quad (23)$$

erfolgen. Die Berechnung der Schaltkurven für das Bremsen und den Auslaufbeginn unter Einbeziehung der Ruckbegrenzung für den Anhaltevorgang liefert [2]

$$K_0 : \quad x_1(x_2) = \frac{1}{a} \left(x_{2r} - x_2 + \frac{u_b + b}{a} \ln \left(\frac{1}{C_1} \left(x_2 + \frac{u_b + b}{a} \right) \right) \right) + x_{1r} \quad (24)$$

und

$$K_1 : \quad x_1(x_2, T) = \frac{1}{a} \left(-x_2 - \frac{b}{a} + bT + \frac{u_b}{a} \ln \frac{a C_1 - (a x_2 + b) e^{-aT}}{u_b} \right) + \frac{1}{a} \left(C_1 e^{a u_b / J} - \frac{(u_b + b) u_b}{J} - \frac{u_b}{a} \right) + x_{1r}, \quad (25)$$

die im folgenden als Schaltkurven für „Bremsen mit maximaler Verzögerung“ (K_0) und „Auslauf vor Bremsen mit maximaler Verzögerung“ (K_1) bezeichnet werden. Die Variablen x_{1r} und x_{2r} geben den Weg und die Geschwindigkeit an, ab der die Bremsbeschleunigung am Ende des Bremsvorganges abgebaut werden muss, um die Ruckbegrenzung einzuhalten. Sie können genau wie die Konstanten C_i , $i = 1, \dots, 4$ vor einer Fahrt mit den in Tabelle 1 angegebenen Gleichungen bestimmt werden.

Bremsvorgang mit geschwindigkeitsabhängiger Verzögerung

Die Lösung der Bewegungsdifferentialgleichung des Triebzuges, die zur Bestimmung der Schaltkurven notwendig ist, wäre unter Annahme einer hyperbelförmig abfallenden Bremsbeschleunigung sehr aufwendig. Deshalb wird der Verlauf von u_b oberhalb der Nenngeschwindigkeit mit einer Geraden mit dem Anstieg u_{b1} angenähert. Dadurch wird zwar nicht mehr das volle Bremsvermögen des Triebzuges ausgenutzt, die Ungenauigkeit ist aber nicht so groß, dass dadurch unzulässig große Fahrzeitverluste entstehen würden.

Tabelle 1: Konstanten für die Berechnung der Schaltkurven des modifizierten Fahrzeitenreglers nach HORN

$$\begin{aligned}
 C_0 &= C - i_{m,\text{Ziel}} \\
 x_{2r} &= \frac{1}{B} \left(\left(C_0 + \frac{1}{B} \right) e^{B u_b / J} - \frac{b}{J} - \frac{1}{B} - C_0 \right) \\
 x_{1r} &= \frac{1}{B^2} \left(\frac{1}{B} + \left(\frac{1}{B} + C_0 \right) e^{B u_b / J} + \frac{u_B}{J} + C_0 \right) + \frac{1}{B} \left(\frac{u_b^2}{2 J^2} + \frac{C_0 u_b}{J} \right) \\
 C_1 &= \left(x_{2r} + \frac{u_b + b}{a} \right) e^{-a u_b} \\
 T_2 &= \frac{1}{a} \ln \frac{a v_{\text{nenn}} + b + u_b}{a C_1} \\
 C_2 &= \frac{a v_{\text{nenn}} + b + u_b}{a + u_{b1}} e^{-(a+u_{b1}) T_2} \\
 C_3 &= \frac{v_{\text{nenn}} u_{b1} - u_b - b}{a + u_{b1}} \\
 C_4 &= x_{1,K_1}(T_2) + \frac{C_2}{a + u_{b1}} e^{-(a+u_{b1}) T_2} + C_3 T_2
 \end{aligned}$$

Für den so angenäherten Verlauf der Bremsbeschleunigung lautet die neue Schaltkurve \tilde{K}_0 „Bremsen mit geschwindigkeitsabhängiger Verzögerung“:

$$\tilde{K}_0 : \quad x_1(x_2) = \frac{1}{a + u_{b1}} \left(x_2 - C_3 \left(1 - \ln \frac{x_2 - C_3}{C_2} \right) \right) + C_4 \quad (26)$$

Die Schaltkurve \tilde{K}_1 „Auslauf vor Bremsen mit geschwindigkeitsabhängiger Beschleunigung“ lässt sich nicht mehr explizit angeben. Es ist notwendig, den Zeitpunkt T_3 , an dem der Auslauf in das Bremsen mit geschwindigkeitsabhängiger Verzögerung übergeht, zu bestimmen. Aus den Zustandsgleichungen für den Auslauf- und den Bremsvorgang erhält man

$$x_2(T) = \left(C_2 e^{u_{b1} T_3} + \left(C_3 + \frac{b}{a} \right) e^{-a T_3} \right) e^{a T} - \frac{b}{a} \quad (27)$$

und

$$x_1(T) = \frac{1}{a} \left(C_2 e^{u_{b1} T_3} + \left(C_3 + \frac{b}{a} \right) e^{-a T_3} \right) \cdot (e^{a T_3} - e^{a T}) + \frac{b}{a} (T - T_3) - C_3 T_3 - \frac{C_2}{a + u_{b1}} e^{(a+u_{b1}) T_3} + C_4. \quad (28)$$

Der energieoptimale Fahrzeitregler ermittelt in jedem Abtastschritt aus Gleichung (27) die jeweilige Zeit T_3 . Mit Hilfe von (28) kann dann der Auslaufbeginn berechnet werden. Die Suche nach T_3 findet in dem Zeitbereich von

$$T_m = \frac{1}{a + u_{b1}} \ln \frac{v_m - C_1}{C_2}, \quad (29)$$

der Anhaltezeit aus der maximalen Geschwindigkeit v_m , bis zur Umschaltzeit in das Bremsen mit konstanter Bremsverzögerung

$$T_2 = \frac{1}{a} \ln \frac{a v_{\text{nenn}} + u_b + b}{a C_1} \quad (30)$$

statt.

In Abbildung 5 findet sich eine Darstellung der oben vorgestellten Schaltkurven für eine Fahrzeitreserve $T = 35$ s.

Die fahrplanmäßige Fahrzeit mit energieoptimaler Steuerung auf einem Abschnitt setzt sich aus der für den Abschnitt notwendigen minimalen Fahrzeit $t_{F,\min}$ und einer Fahrzeitreserve $t_{F,\text{Res}}$ zusammen.

$$t_F = t_{F,\min} + t_{F,\text{Res}} \quad (31)$$

Für die im nachfolgenden dritten Abschnitt dieser Arbeit beschriebenen Verfahren ist die Kenntnis des Zusammenhanges zwischen der Fahrzeit und dem Energieverbrauch notwendig. Dieser Zusammenhang lässt sich für eine gegebene Strecke durch Simulation ermitteln. In Abbildung 6 ist er für eine ebene Strecke von 2500 m Länge beispielhaft dargestellt.

2.3 Realisierungskonzept für eine energieoptimale Fahrzeitenregelung

Für den Einsatz des energieoptimalen Reglers bei der Berliner S-Bahn musste HORN die Schaltkurven offline auf einer Großrechenanlage ermitteln [25], da der damals verfügbare Bordrechner mit einem 8bit-Mikroprozessor als CPU nicht die notwendige Rechenleistung aufwies, um die umfangreichen Fließkommaoperationen online durchzuführen. HORN bestimmte durch Simulation die Geschwindigkeit, bei der die Fahrmotoren abgeschaltet

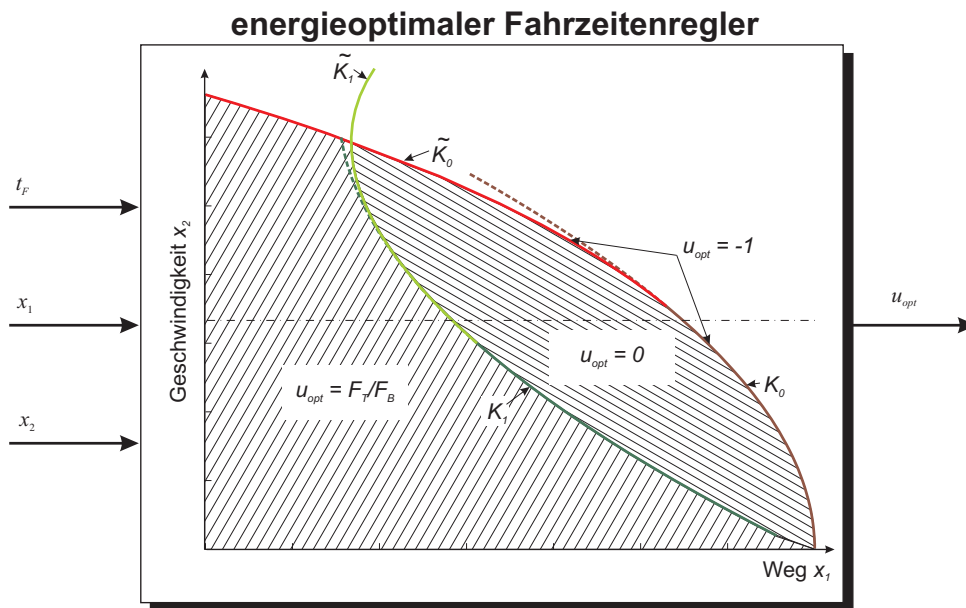


Abbildung 5: Schaltkurven für den Auslauf- und Bremseneinsatz (mit linear begrenzter Verzögerung oberhalb der Nenngeschwindigkeit) für eine Fahrzeitreserve $T = 35$ s

wurden und der Auslauf begann, in Abhängigkeit von der Fahrzeitreserve. Für den Einsatz als Fahrerassistenzsystem war das ausreichend, da der Zielbremsvorgang durch den Triebfahrzeugführer durchgeführt wurde.

In einem zeitdiskreten Optimalregler für eine ATO-Komponente müssen alle Schaltflächen implementiert werden, so dass in jedem Abtastschritt eine Überprüfung auf das Überschreiten einer Schaltkurve und damit den Wechsel der Steuerphase erfolgen kann. Im vollautomatischen Betrieb ist außerdem ein Zielbremsregler vorzusehen, der den Anhaltvorgang mit einer hinreichenden Zielgenauigkeit durchführt.

3 Anschlussoptimierende und ressourcenschonende Flexibilisierung von Zugfahrten entlang einer Nahverkehrsstrecke

3.1 Ermittlung eines energieoptimalen Fahrplanes für den Regelbetrieb

In der zweiten Ebene der Aufgabenhierarchie nach Abbildung 1 werden Verfahren benötigt, welche die Minimierung des Energieverbrauches bei der Fahrt eines Zuges ent-

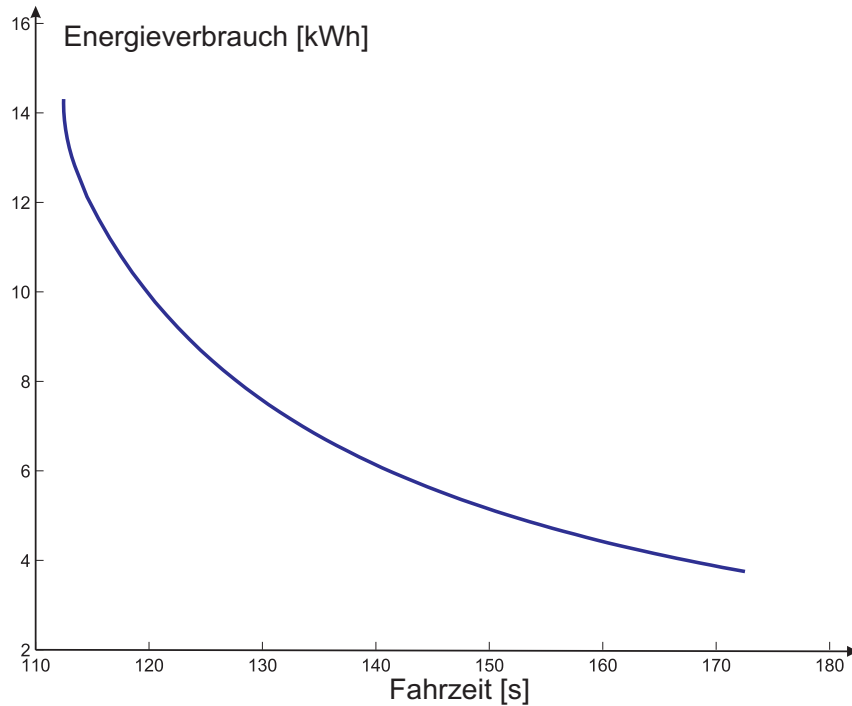


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Fahrzeit und Energieverbrauch auf einer Beispielsecke von 2500 m Länge

lang einer Linie mit $N + 1$ Halten gestatten. Dazu wird die Zugfahrt als mehrstufiger diskreter Entscheidungsprozess modelliert, der sich mit Hilfe der dynamischen Programmierung nach BELLMANN optimieren lässt. Dieser Lösungsansatz ist erstmals von HORN [14] vorgeschlagen und genutzt worden.

Die Optimierung der Fahrt zwischen zwei Halten bildet eine Stufe des entstehenden Entscheidungsprozesses. Als Zustandsvariable x_k wird die Ankunftszeit des Zuges am Halt k definiert. Dabei werden die als konstant angenommenen Haltezeiten im folgenden vernachlässigt. Die auf der Fahrt von x_k nach x_{k+1} zu verbrauchende Fahrzeitreserve wird als Stellgröße u_k interpretiert. Der Entscheidungsprozess lässt sich unter Kenntnis der für die Fahrt in Abschnitt k benötigten minimalen Fahrzeit $t_{\min,k}$ durch die sehr einfache Differenzgleichung

$$x_{k+1} = x_k + t_{\min,k} + u_k, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (32)$$

beschreiben. Die für die dynamische Programmierung notwendige Eingitterung des Entscheidungsraumes sollte in Abhängigkeit von der Genauigkeit der Fahrzeiteinhaltung des

benutzten Steuerungsalgorithmus für die Fahrt zwischen zwei Halten gewählt werden. Für die weiteren Rechnungen wird für u_k und x_k eine Schrittweite von 1 s angenommen.

Das Gütekriterium für die Optimierung

$$Q = \sum_{k=1}^N E_k(u_k) \rightarrow \min \quad (33)$$

beschreibt zunächst den gesamten Energieaufwand für die Fahrt, wobei $E_k(u_k)$ den Energieverbrauch für die Fahrt von Halt k nach Halt $k+1$ mit einer Fahrzeitreserve u_k darstellt.

Die Lösung des Optimierungsproblems soll, wie bereits erwähnt, mit Hilfe der dynamischen Programmierung nach BELLMAN erfolgen. Für die stufenweise Optimierung ergibt sich dabei die Rekursionsformel

$$Q_k(x_k) = E_k(u_k) + Q_{k+1}(x_{k+1}), \quad \text{mit } u_k \in U_k \text{ und } x_{k+1} = x_k + u_k. \quad (34)$$

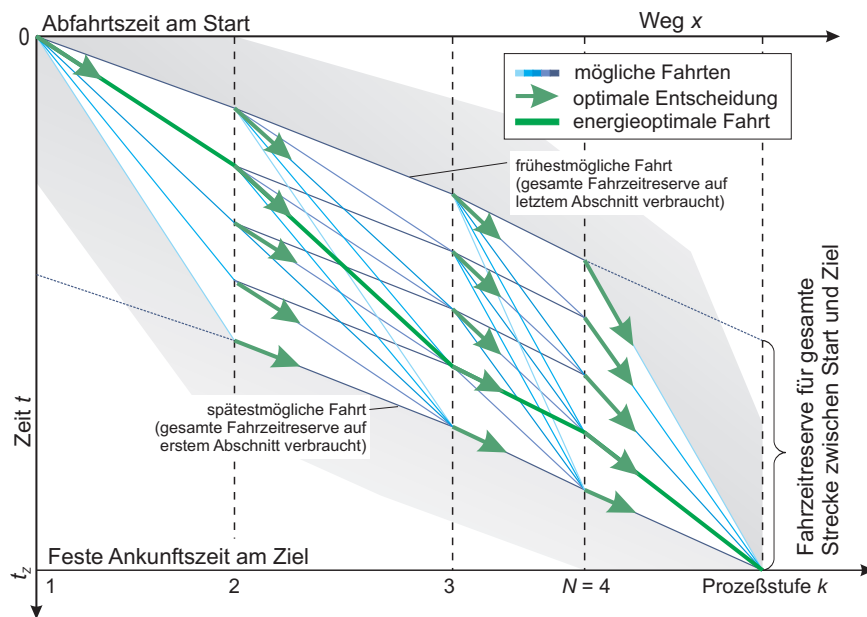


Abbildung 7: Entscheidungsraum der dynamischen Programmierung als Bildfahrplan (ohne Haltezeiten)

Der Entscheidungsraum wird, wie in Abbildung 7 dargestellt, durch die frühestmögliche Fahrt, bei der die gesamte Fahrzeitreserve t_{Res} erst im letzten Abschnitt verbraucht wird ($u_N = t_{Res}$), und die spätestmögliche Fahrt, bei der die Fahrzeitreserve bereits im ersten Abschnitt verbraucht wird ($u_1 = t_{Res}$), begrenzt.

3.2 Ein neuer Zugang zur Anschlussoptimierung bei Minimierung des Energieverbrauches

Das im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Verfahren liefert für die Zugfahrt entlang einer Nahverkehrsstrecke mit einer gegebenen Fahrzeitreserve einen Fahrplan mit minimalem Energieverbrauch. Dieser Fahrplan soll nun so modifiziert werden, dass während der Zugfahrt das knappe Versäumen von Anschlüssen vermieden werden kann. Die zugehörigen Verfahren sollen in das Anschlussoptimierungssystem einfließen, das im Rahmen des Vorhabens intermobil zu schaffen ist und durch Verknüpfung des bereits existierenden rechnergestützten Betriebsleitsystems (RBL) der Dresdner Verkehrsbetriebe AG, der noch zu schaffenden Low-Cost-RBL-Systeme der Regionalbusunternehmen und der Transportleitstelle der S-Bahn realisiert werden soll (vgl. Bild 8).

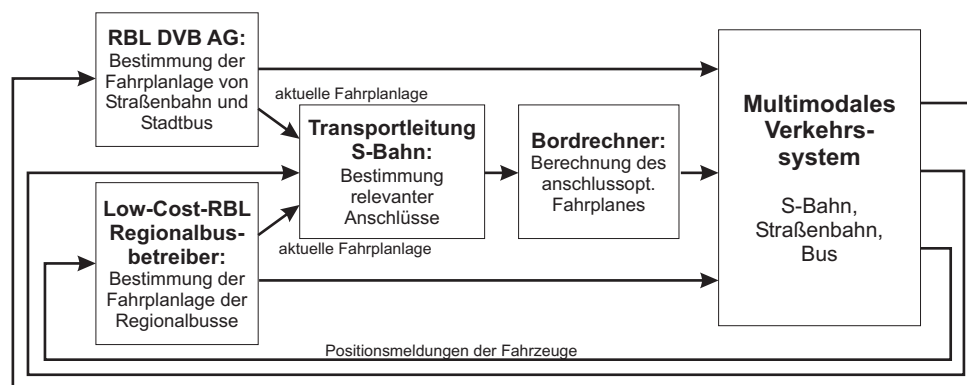


Abbildung 8: Regelkreis der Anschlussoptimierung

Für den Zweck der Anschlussoptimierung kann zwischen zwei verschiedene Arten von Anschlüssen unterschieden werden:

1. Für die Fahrgäste in einem Verkehrsmittel, das als S-Bahn-Zubringer gegenüber dem Fahrplan eine Verspätung aufweist, soll durch das Verfahren zur Anschlussoptimierung ermöglicht werden, dass der S-Bahn-Zug am Umsteigehalt so lange wartet, bis

die Fahrgäste aus dem Zubringer ihn erreicht haben. Die Abfahrt des S-Bahn-Zuges darf also erst erfolgen, wenn nach der Ankunft des Zubringers die Übergangszeit vergangen ist, die von den Umsteigern benötigt wird, um den S-Bahnsteig zu erreichen.

Der für diesen Fall gültige Fahrplan wird bestimmt, indem eine als „frühestmögliche Abfahrtszeit“ bezeichnete Randbedingung in die Berechnung einbezogen wird. Dadurch wird festgelegt, dass ein bestimmter Betrag der Fahrzeitreserve bereits am Umsteigehalt verbraucht sein muss.

2. Für den Fall, dass ein abbringendes Verkehrsmittel vor der im Fahrplan angegebenen Zeit verkehrt, kann eine zweite Art von Randbedingung definiert werden. Durch die Definition einer „spätestmöglichen Ankunftszeit“ wird erreicht, dass der Ankunftszeitpunkt des S-Bahn-Zuges an einem Umsteigehalt so verändert wird, dass für das abbringende Verkehrsmittel keine zusätzliche Wartezeit entsteht. Durch Vorgabe dieser Randbedingung kann unter anderem verhindert werden, dass die beim Einhalten einer frühestmöglichen Abfahrtszeit an einem anderen Halt entstehende Verspätung des S-Bahn-Zuges an ein anderes Verkehrsmittel weitergegeben wird.

In Abbildung 9 ist der durch die Randbedingungen der Anschlusssicherung eingeschränkte Entscheidungsraum für die dynamische Programmierung dargestellt.

Im Online-Betrieb muss die Berechnung des energieoptimalen Fahrplanes nach jedem Halt wiederholt werden. Dabei werden die vorhergesagten Anschlusszeitpunkte, also die Randbedingungen der Optimierung aktualisiert. Eine große Änderung der Vorhersage führt allerdings zu einem wesentlich höheren Energieverbrauch während der Fahrt. Ein weiterer Nachteil des oben beschriebenen Verfahrens ergibt sich aus der Tatsache, dass es nicht möglich ist, einmal verbrauchte Fahrzeitreserven wieder „aufzuholen“. Deshalb ist der beschriebene Algorithmus von einer genauen Vorhersage der Anschlusszeiten abhängig.

Weiterhin ist mit diesem Verfahren keine Priorisierung von Anschlüssen möglich. Werden mehrere Anschlüsse entlang der Linie durch die entsprechenden Randbedingungen vorgegeben, wird ein energieoptimaler Fahrplan gesucht, der alle Anschlüsse einhält.

3.3 Erweiterung des Verfahrens durch die wahrscheinlichkeitstheoretische Betrachtung des Umsteigevorganges

Im folgenden soll eine Erweiterung des Verfahrens beschrieben werden, welche die oben genannten Nachteile nicht mehr aufweist. Die Grundlage des neuen Verfahrens soll eine exaktere Modellierung des Umsteigevorganges sein.

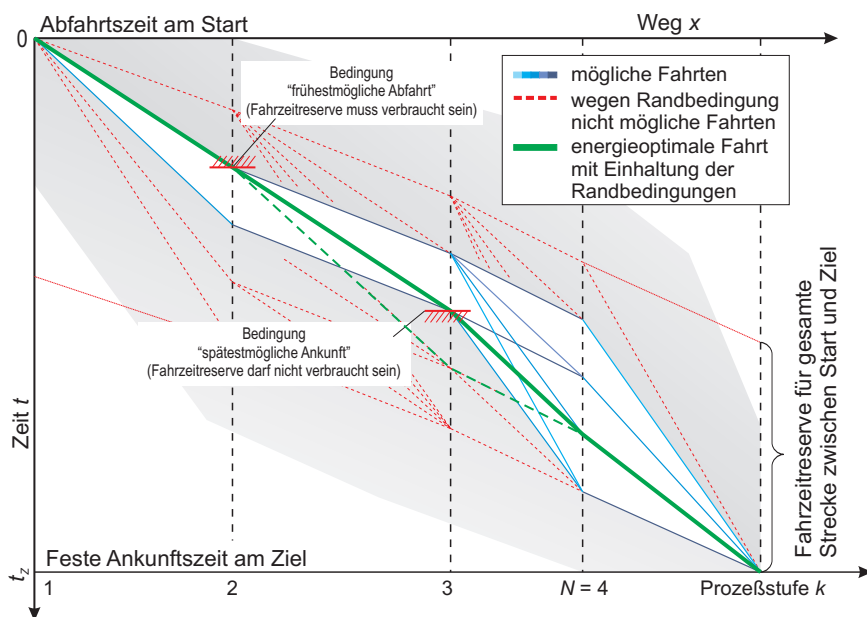


Abbildung 9: Einschränkung des Lösungsraumes der dynamischen Programmierung durch Anschlussbedingungen

In der Literatur wird bei der Beschreibung von Umsteigevorgängen meist eine von den baulichen Gegebenheiten der Umsteigehaltestelle abhängige, konstante Übergangszeit angenommen. Man geht davon aus, dass alle umsteigenden Fahrgäste nach Ablauf der Übergangszeit ihr Anschlussverkehrsmittel erreicht haben. Für die Erstellung eines konventionellen Fahrplanes ist diese Betrachtung ausreichend.

Zur Erstellung eines energieoptimalen Fahrplanes für die flexible S-Bahn ist diese Vorgehensweise allerdings zu ungenau. Deshalb soll der Umsteigevorgang wahrscheinlichkeitstheoretisch beschrieben werden.

Für Flughäfen hat MÜHLHAUSEN den Übergang von Passagieren von einem Eisenbahnzubringer zur Abflughalle und umgekehrt untersucht [21]. Die Ankunftszeit für den Übergang der Passagiere gehorcht in diesem Fall einer Gamma-Verteilung

$$f_{\Gamma}(t) = \frac{1}{B\Gamma(A)} t^{A-1} e^{-t/B}, \quad (35)$$

wobei $f_{\Gamma}(t)$ die Wahrscheinlichkeitsdichte der Ankunftszeit in Abhängigkeit von der Umsteigezeit ist. Die Parameter A und B der Gamma-Verteilung müssen für jeden

Haltepunkt und jede Umsteigebeziehung (mit unterschiedlichem Weg) durch Messung bestimmt werden.

Der Übergang von einem Verkehrsmittel zum anderen erfordert außerdem eine Mindestzeit t_{\min} , die aus physischen Gründen kein Fahrgast unterschreiten kann. Unter Kenntnis der

- Ankunfts- bzw. Abfahrtszeit des S-Bahn-Zuges $t_{\text{ank,S}}$ bzw. $t_{\text{abf,S}}$,
- der Ankunftszeit des Zubringers $t_{\text{ank,Zub}}$ und
- der Abfahrtszeit des Abbringers $t_{\text{abf,Abb}}$

lässt sich die Wahrscheinlichkeit für den Fahrgast, einen Anschluss zu erreichen, für einen Zubringer zur S-Bahn mit

$$P(E_{\text{Zub,S}}) = F_{\Gamma}(t_{\text{abf,S}} - t_{\text{ank,Zub}} - t_{\min}) \quad (36)$$

und für einen Abbringer mit

$$P(E_{\text{Abb,S}}) = F_{\Gamma}(t_{\text{abf,Abb}} - t_{\text{ank,S}} - t_{\min}) \quad (37)$$

bestimmen.

Unter Verwendung dieser Wahrscheinlichkeiten $P(E_{\text{Zub,S}})$ und $P(E_{\text{Abb,S}})$ lässt sich ein Gütekriterium formulieren, das zum Beispiel in der Form

$$Q_{\text{Anschluss}} = \sum_{\forall k} (P_k(E_{\text{Abb,S}}) + P_k(E_{\text{Zub,S}})) \rightarrow \max \quad (38)$$

die Summe der Wahrscheinlichkeiten des Erreichens eines Anschlusses entlang der gesamten Linie maximiert. Dieses Kriterium bewertet alle Anschlussvorgänge während der gesamten Fahrt gleich.

Für den Fahrgast ist aber im Allgemeinen nicht die Wahrscheinlichkeit interessant, mit der er einen Anschluss erreicht, vielmehr sollte die zusätzliche Wartezeit, die beim Versäumen eines Anschlusses entsteht, in die Berechnung mit einfließen. Dazu muss z.B. mit Hilfe von Verkehrsnachfragemodellen die Anzahl der Umsteiger U für die betrachtete Anschlussbeziehung ermittelt werden. Außerdem fließt in die Bewertung die Taktzeit t_{Takt} des Verkehrsmittels ein, in das die Fahrgäste umsteigen wollen (siehe Abb. 10). Die Bewertung für eine bestimmte Umsteigebeziehung ergibt sich also zu

$$Q_2 = t_{\text{Takt}} U (1 - P(E_{\text{Zub/Abb,S}})). \quad (39)$$

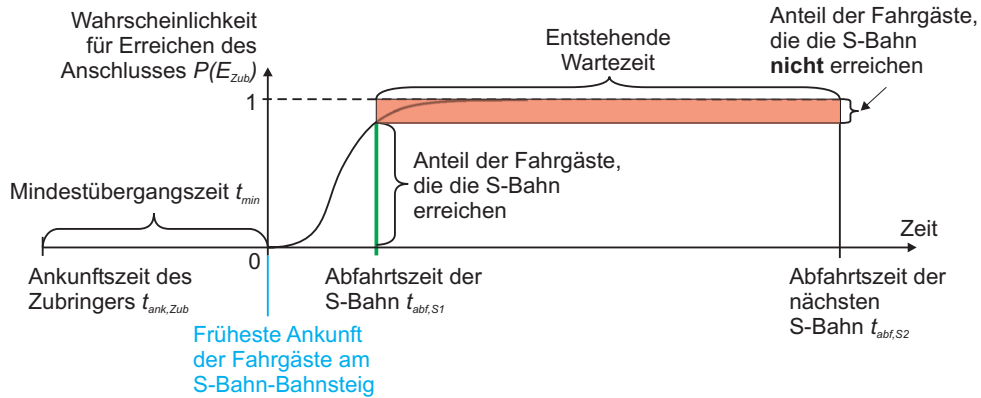


Abbildung 10: Zusätzliche Wartezeit als Ergebnis eines versäumten Anschlusses

3.4 Verknüpfung der Minimierung von Wartezeit und Energieverbrauch: Der vorgeschlagene mehrkriterielle Optimierungsansatz

Für das Problem der ressourcenschonenden und anschlussoptimierenden Flexibilisierung des S-Bahn-Betriebes wurden bisher die zwei Gütekriterien (6) und (39) herangezogen. Diese beiden Kriterien werden sich im Allgemeinen widersprechen – ein Fahrplan mit minimaler zusätzlicher Wartezeit wird einen hohen Energieverbrauch aufweisen und umgekehrt.

Die Suche nach einem Optimum für die Kombination beider Kriterien führt also auf ein Problem der Polyoptimierung [24]. Als optimale Lösung für dieses Problem wird jener Punkt aus dem diskreten Entscheidungsraum verwendet, der den kleinsten euklidischen Abstand

$$|Q| = \sum_{i=1}^2 \lambda_i (Q_i - Q_i^0)^2, \quad \lambda_i \geq 0 \quad (40)$$

zum Idealpunkt Q^0 aufweist. Dieser Idealpunkt Q^0 wird gewonnen, indem für jedes Gütekriterium das eigennützigste Minimum als Element gewählt wird:

$$Q_i^0 = Q_{i,\min} \quad (41)$$

In Abbildung 11 ist die optimale Entscheidung für eine Prozessstufe dargestellt.

Während einer Zugfahrt erfolgt die Minimierung von Energieverbrauch und Wartezeit nach jedem Halt. Dadurch lässt sich eine aktualisierte Vorhersage der Ankunftszeit in die Berechnung einbeziehen.

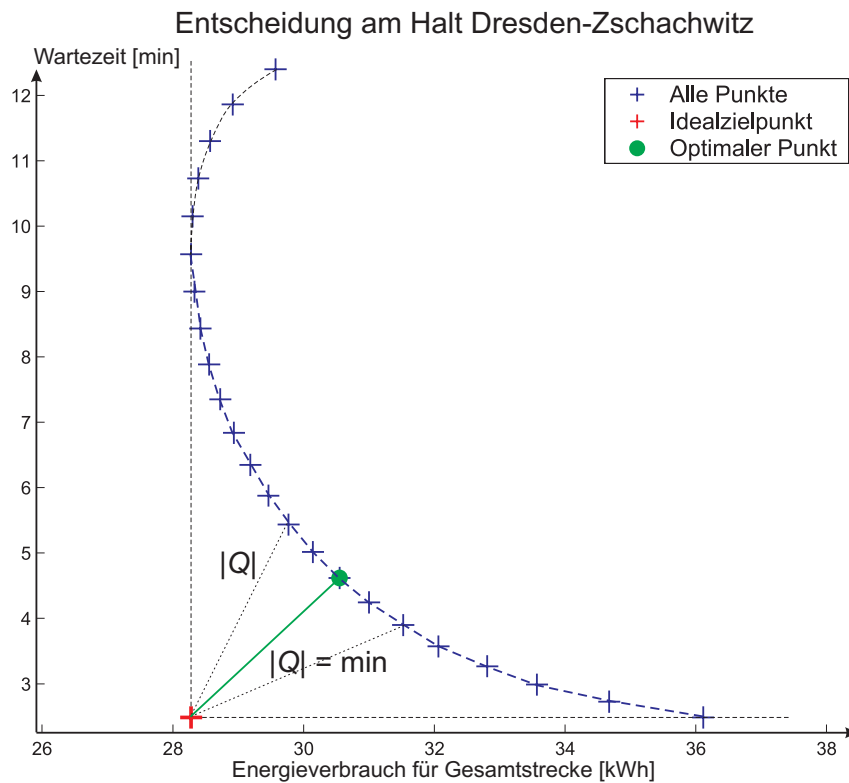


Abbildung 11: Beispiel für die Entscheidungsfindung bei mehrkriterieller Optimierung

Simulationsergebnisse

In Abbildung 12 ist der Verlauf einer Zugfahrt (in Form der verbrauchten Fahrzeitreserve) mit einem in Bezug auf den Energieverbrauch und die Wartezeit optimierten Fahrplan auf der S-Bahn-Strecke zwischen Dresden Hbf und Pirna dargestellt. In Dresden-Dobritz und in Heidenau wurden jeweils Anschlussbedingungen definiert. Im folgenden soll dieses Beispiel kurz erläutert werden.

Die Fahrt auf der 19 km langen Strecke mit 10 S-Bahn-Halten möge planmäßig um 16:00:00 Uhr beginnen.

Die kürzeste Reisezeit auf dieser Strecke wurde aus der Berechnung des fahrdynamischen Modells bestimmt und beträgt⁵ 1123 s oder 18:43 min. Für die Berechnung eines optimier-

⁵Unter der Annahme, dass der laufende Streckenausbau abgeschlossen wurde und mit 30 s Haltezeit an den Unterwegshalten, ausgenommen den Bahnhof Heidenau mit einer Haltezeit von 60 s.

ten Fahrplans wird eine Fahrzeitreserve von 90 s eingeplant, die Ankunftszeit in Pirna ist also auf 16:20:13 Uhr festgelegt.

Für die simulierte S-Bahn-Fahrt wird an zwei Halten eine Verknüpfung mit anderen Verkehrsmitteln vorgesehen:

1. In Dresden-Dobritz zu einer Straßenbahn der Pilotlinie 2, die Fahrgäste von der S-Bahn in das Wohngebiet Dresden-Prohlis befördert und
2. in Heidenau zu einem Stadtbus der Linie 73, der Fahrgäste aus den nördlich der S-Bahn gelegenen Wohngebieten, wie z.B. Meußlitz und Großschachwitz, zur S-Bahn bringt.

Die Berechnung der Fahrplanlage der beiden Fahrzeuge wird vom RBL-System der Dresdner Verkehrsbetriebe aller 15 s vorgenommen. Aus diesen Daten lassen sich die vorhergesagten Ankunfts- bzw. Abfahrtszeiten von Straßenbahn und Bus an den Umsteigehalten bestimmen. Für die Simulation wird aus diesen Daten die früheste Ankunftszeit bzw. späteste Abgangszeit der Fahrgäste an den S-Bahnsteigen ermitteln. Die verwendeten Ankunfts- und Abgangszeiten an jedem Halt sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Die Parameter der Gamma-Verteilung wurden mit $A = 3$ und $B = 7$ so gewählt, dass 60 s nach Ablauf der Mindestübergangszeit etwa 99 % der Fahrgäste den Übergang zu ihrem neuen Verkehrsmittel absolviert haben.

Tabelle 2: Aktualisierung der frühesten Ankunfts- und spätesten Abgangszeiten der Fahrgäste für eine simulierte S-Bahn-Fahrt

Aktualisierung der Vorhersage am Halt	früheste Ankunftszeit der Fahrgäste	späteste Abgangszeit
	der Linie 73 am S-Bahnsteig in Heidenau	der Linie 2 vom S-Bahnsteig in Dresden-Dobritz
	$t_{\text{Ank,S}}$	$t_{\text{Abf,S}}$
Dresden Hbf	16:12:30	16:07:10
Dresden-Strehlen	16:12:30	16:06:50
Dresden-Reick	16:13:30	16:06:45
Dresden-Dobritz	16:13:20	16:06:45
Dresden-Niedersedlitz	16:13:40	
Dresden-Zschachwitz	16:13:40	
Heidenau	16:13:40	

In diesem Beispiel soll angenommen werden, dass die nächste Umsteigemöglichkeit in Dresden-Dobritz nach 10 min Wartezeit gegeben ist. In Heidenau möge die Wartezeit auf die nächste S-Bahn-Fahrt beim Versäumen des Anschlusses 30 min betragen.

Bei der Fahrt gemäß des in Tabelle 3 angegebenen energieoptimalen Fahrplanes liegt in Dresden-Dobritz die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Fahrgäste den Anschluss erreichen, bei lediglich 24 %, in Heidenau beträgt sie 21 %.

Durch die Anschlussoptimierung lässt sich dieses Ergebnis um den Preis eines Energie-mehrverbrauches von 12 % im Vergleich zum energieoptimalen Fahrplan deutlich verbessern. Durch die Verschiebung der Ankunfts- und Abfahrtszeiten an den Unterwegshalten gelingt es, die Wahrscheinlichkeit für das Erreichen des Anschlusses in Dresden-Dobritz auf 74 %, in Heidenau sogar auf 87 % zu erhöhen.

Tabelle 3: Energieoptimaler Fahrplan und Fahrplan aus mehrkriterieller Optimierung

Halt	Fahrplan		
		energieoptimal	mit minimaler Wartezeit
Dresden Hbf	ab	16:00:00	16:00:00
Dresden-	an	16:02:01	16:01:58
Strehlen	ab	16:02:31	16:02:28
Dresden-	an	16:04:35	16:04:25
Reick	ab	16:05:05	16:04:55
Dresden-	an	16:06:32	16:06:18
Dobritz	ab	16:07:02	16:06:48
Dresden-	an	16:08:48	16:08:47
Niedersedlitz	ab	16:09:18	16:09:17
Dresden-	an	16:10:54	16:11:12
Zschachwitz	ab	16:11:24	16:11:42
Heidenau	an	16:12:51	16:13:15
	ab	16:13:51	16:14:15
Heidenau-	an	16:15:26	16:15:43
Süd	ab	16:15:56	16:16:13
Heidenau-	an	16:17:40	16:17:49
Großsedlitz	ab	16:18:10	16:18:19
Pirna	an	16:20:13	16:20:13

späteste Abgangszeit der Fahrgäste der Linie 2 vom S-Bahnsteig: 16:06:45

früheste Ankunftszeit der Fahrgäste der Linie 73 am S-Bahnsteig: 16:13:40

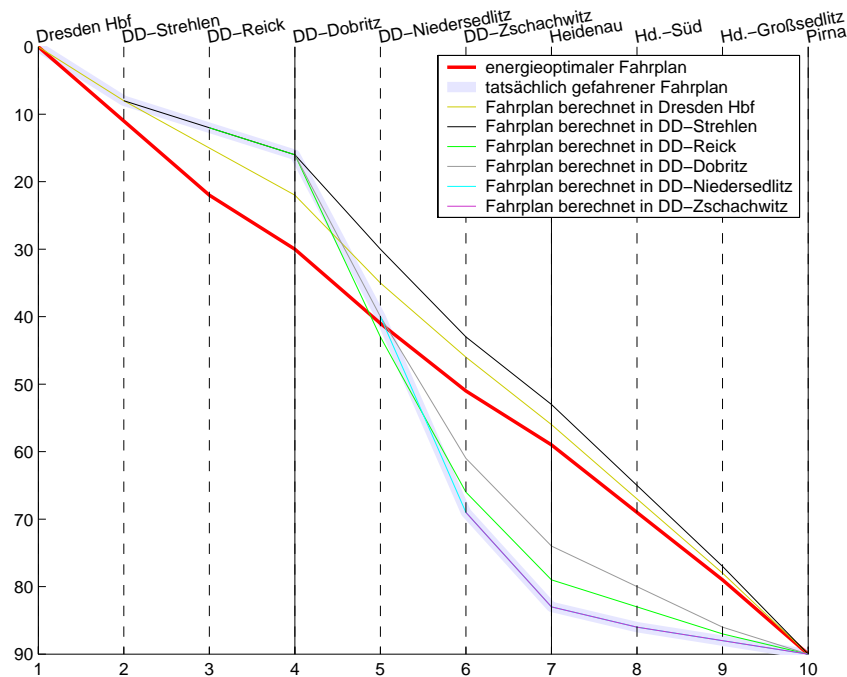


Abbildung 12: Darstellung der verbrauchten Fahrzeitreserve für eine Zugfahrt von Dresden Hbf nach Pirna mit Anschlussbedingungen

Eine weitere Verbesserung bei der Bewertung der Anschlüsse lässt sich erreichen, wenn die Wartezeit mit der Anzahl der erwarteten Umsteiger gewichtet wird, die z.B. aus genauen Nachfrageberechnungen bekannt ist. Nimmt man z.B. an, dass in Dresden-Dobritz 10 und in Heidenau fünf Fahrgäste umsteigen wollen, so würden durch das beschriebene Verfahren rund 76 % der Gesamtwartezeit (etwa 149 min) eingespart.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag ist aufbauend auf den Arbeiten von HORN [12, 14] ein neues Verfahren zur ressourcenschonenden und anschlussoptimierenden Flexibilisierung des S-Bahn-Betriebes vorgestellt worden. Es verfolgt das Ziel, die Qualität der intermodalen Verknüpfung des S-Bahn-Systems zu verbessern und dabei die Betriebskosten durch bestmögliche Energieeinsparung zu senken. Bei herkömmlicher Fahrzeugführung sind die hier sichtbar gemachten Potenziale der Anschlussoptimierung nicht erschließbar, da die Leistungsgrenzen des Fahrzeugführers bezüglich der präzisen Fahrzeiteinhaltung überschritten werden.

Die Überprüfung der Wirksamkeit des Optimierungsverfahrens wird deshalb zunächst an einem Fahrplan-Simulator erfolgen. Hier sollen unter Nutzung von historischen oder aktuellen Fahrplanlagedaten der zu- und abgehenden Verkehrsmittel (Bus, Straßenbahn) der DVB AG Vergleiche zwischen Zugfahrten mit automatischer energie- und anschlussoptimierender Fahrzeitenregelung, mit bordrechnergestütztem Fahrerassistenzsystem und mit manueller Fahrzeugführung durchgeführt werden. Damit soll die Entwicklung des Fahrerassistenzsystems vorangetrieben werden, um die entwickelten Verfahren zur Anschlussoptimierung unabhängig von der Automatisierung des Zugbetriebes auf konventionellen S-Bahn-Strecken zum Einsatz bringen zu können.

Literatur

- [1] ALBRECHT, T.: *Untersuchung von Algorithmen zur energieoptimalen Flexibilisierung des S-Bahn-Betriebs*. Studienarbeit, Technische Universität Dresden, Lehrstuhl Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, Dez. 2000.
- [2] ALBRECHT, T.: *Simulationserprobung eines Verfahrens zur anschlussichernden und ressourcenschonenden Flexibilisierung des S-Bahn-Betriebs*. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Lehrstuhl Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, 2001.
- [3] BAIER, T. und I. MILROY: *Metromiser: a system for conserving traction energy and regulating punctuality in urban rail services*. In: SCHNIEDER, E. und U. BECKER (Hrsg.): *Control in Transportation Systems 2000*, IFAC Proceedings Volumes. Elsevier Science, 2000. Proceedings of the 9th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, Braunschweig, Germany, 13-15 June 2000.
- [4] CHANG, C. und S. SIM: *Optimising train movements through coast control using genetic algorithms*. IEE Proc.-Electr. Power Appl., 144(1):65–73, Jan. 1997.
- [5] CHANG, C. S., Y. H. PHOA, W. WANG und B. S. THIA: *Economy/regularity fuzzy-logic control of DC railway systems using event-driven approach*. IEE Proceedings Electric Power Applications, 143(1):9–17, 1996.
- [6] CHANG, C. S., D. Y. XU und H. B. QUEK: *Pareto-optimal set based multiobjective tuning of fuzzy automatic train operation for mass transit system*. IEE Proceedings Electric Power Applications, 146(5):577–583, 1999.
- [7] FERNÁNDEZ, A., F. DE CUADRA und A. GARCÍA: *SIRO: an Optimal Regulation System in an Integrated Control Centre for Metro Lines*. In: ALLAN, J., C. BREBBIA, R. HILL, G. SCIUTTO und S. SONE (Hrsg.): *Computers in Railways V*, Bd. 2: Railway Technology and Environment, S. 299–308, Madrid, 1995. Instituto de Investigación Tecnológica, Madrid and DIMETRONIC S.A., Computational Mechanics Publications.

- [8] FERNÁNDEZ, A., F. DE CUADRA und A. GARCIA: *Results of the implementation of an optimal control system in an integrated control centre for metro lines*. In: MELLITT, B., R. J. HILL, J. ALLAN, G. SCIUTTO und C. BREBBIA (Hrsg.): *Computers in Railways VI*, Ashurst, Southampton, 1998. Computational Mechanics Publications/WIT Press.
- [9] GOHLISCH, G.: *Erarbeitung eines effizienten Verfahrens der Ermittlung energieoptimaler Zugsteuerungen als Beitrag zur Senkung des Traktionsenergiebedarfs in spurgebundenen Verkehrssystemen*. Dissertation, Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“, Dresden, November 1991.
- [10] GORDON, S. und D. LEHRER: *Coordinated Train Control and Energy Management Control Strategies*. In: *Proceedings of the 1998 ASME/IEEE Joint Railroad Conference, April 15 – 16, 1998*, S. 165–176. Piscataway, NJ, 1998.
- [11] HANG, S.-H., Y.-S. BYEN, J.-H. BAEK, T.-K. AN, S.-G. LEE und H.-J. PARK: *An Optimal Automatic Train Operation (ATO) Control Using Genetic Algorithms (GA)*. In: *Multimedia Technology for Asia-Pacific Information Infrastructure: Proceedings; The 1999 IEEE Region 10 Conference/ [Tencon '99]*, S. 360–362. Piscataway, NJ, 1999.
- [12] HORN, P.: *Beitrag zur Lösung des Syntheseproblems der energieoptimalen Steuerung einer Zugfahrt*. Dissertation, Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“, Dresden, April 1973.
- [13] HORN, P.: *Ergebnisse der Erprobung von energieoptimalen Fahrweisen und einem Verfahren zur energiesparenden Zuglaufmodifikation*. Schienenfahrzeuge, 20(11):388–390, 1976.
- [14] HORN, P.: *Theoretische Grundlagen der energieoptimalen Zugsteuerung und Zuglaufmodifikation unter Berücksichtigung der Spezifik der Dieseltraktion*. In: STROBEL, H. (Hrsg.): *Prozessautomatisierung im Verkehrswesen*, Bd. 27 d. Reihe ZFIV - Report, S. 160–181. Zentrales Forschungsinstitut des Verkehrswesens der DDR, Berlin, 1984.
- [15] HORN, P. und A. WINKLER: *Beitrag zur experimentellen Erprobung von Algorithmen für eine energieoptimale Zugsteuerung*. In: *V. Verkehrswissenschaftliche Tage*, Hochschule für Verkehrswesen, Žilina, 1976.
- [16] HORN, P. und A. WINKLER: *Bordmikrorechner – Entwicklungsstand und Einsatzbereiche*. In: *4. Energiekolloquium der Sektion Fahrzeugtechnik*, Dresden, Apr. 1983. Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“.
- [17] HORN, P. und R. ZINKE: *Energy-optimal train control of long distance traffic*. In: MARIA-LIGETI, J. (Hrsg.): *Proceedings of the 2nd Mini Conference on Vehicle System Dynamics*. Techn. Univ. of Budapest, Faculty of Transport Engineering, Nov. 1990.
- [18] HOWLETT, P. G. und P. J. PUDNEY: *Energy-Efficient Train Control*. Advances in Industrial Control. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1995.

- [19] KRAUS, G. D. und B. R. ROCKENFELT: *Einsparung von Traktionsenergie durch energie-sparende Fahrweisen bei S-Bahnen*. Elektrische Bahnen, 82(6):172–178, 1984.
- [20] LANG, A. und B. HARTMANN: *Neue elektrische Triebzugfamilie Baureihen 424–426 für die Deutsche Bahn AG*. ZEV+DET Glas. Annalen, 122(9/10):394–406, 1998.
- [21] MÜHLHAUSEN, T.: *Ein Beitrag zur makroskopischen Simulation von Passagierströmen zwischen kooperierenden Flughäfen unter Nutzung des SYSTEM DYNAMICS Zuganges nach FORRESTER*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 1999.
- [22] MURATA, S., T. NAGATA, A. KAWABATA, K. TASHIRO und T. TAKAOKA: *A minimum-energy running profile generation method*. In: ALLAN, J., C. BREBBIA, R. HILL, G. SCIUTTO und S. SONE (Hrsg.): *Computers in Railways V*, Bd. 2: Railway Technology and Environment, Ashurst, Southampton, 1996. Computational Mechanics Publications.
- [23] MUTARA, S. und C. J. GOODMAN: *Optimally regulation disturbed metro traffic with passenger inconvenience in mind*. In: MELLITT, B., R. J. HILL, J. ALLAN, G. SCIUTTO und C. BREBBIA (Hrsg.): *Computers in Railways VI*, Ashurst, Southampton, 1998. Computational Mechanics Publications/WIT Press.
- [24] PESCHEL, M.: *Ingenieurtechnische Entscheidungen, Modellbildung und Steuerung mit Hilfe der Polyoptimierung*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1980.
- [25] RATH, W., A. RÖHL, S. GROSSE und V. DEMUTH: *FORTRAN-Programmsystem zur Simulation und Optimierung von Zugfahrten*. In: STROBEL, H. (Hrsg.): *Prozeßautomatisierung im Verkehrswesen*, Bd. 27 d. Reihe ZFIV - Report, S. 219–234. Zentrales Forschungsinstitut des Verkehrswesens der DDR, Berlin, 1984.
- [26] SCHÜTTE, J.: *Die Vorteile der flexiblen und automatischen Betriebsführung von Stadtschnellbahnen – Theoretischer Hintergrund und praktische Erfahrungen in Frankreich*. In: *17. Verkehrswissenschaftliche Tage: „Integrierte Mobilitätsforschung – Herausforderungen Für Die Zusammenarbeit“*, S. 1–22, Dresden, Sep. 1998. Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“.
- [27] SKÝVA, L. und P. CENEK: *Energy-optimal control in transportation systems*. In: *Proceedings of the 4th IFAC/IFIP/IFORS Conference on Control in Transportation Systems*, Baden-Baden, Apr. 1983.
- [28] STROBEL, H.: *Die verkehrlichen und wirtschaftlichen Innovationspotentiale automatisierter Nahverkehrsbahnen*. In: FÖRDERKREIS DES VERBANDES DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN und VERBAND DER BAHNINDUSTRIE IN DEUTSCHLAND (Hrsg.): *Jahrbuch des Bahnwesens*, S. 106–119. Hestra-Verlag, 2000.
- [29] STROBEL, H., M. KOSEMUND und P. HORN: *Über die Ermittlung und praxisnahe Erprobung von Regelungsstrategien für eine rechnergestützte Optimierung des Zugbetriebes*.

- In: *Viertes Internationales Symposium „Kybernetik im Eisenbahnwesen“*. Association of American Railroads and Internationaler Eisenbahnverband and Internationale Eisenbahn-Kongress-Vereinigung, 1974.
- [30] STROBEL, H. und K. RINGAT: *Integriertes Nachfrage- und Angebotsmanagement: Der ganzheitliche Strategieansatz des Vorhabens intermobil Region Dresden*. In: *18. Verkehrswissenschaftliche Tage*. Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, September 2001.
- [31] UEBEL, H.: *Die automatischen Stadtschnellbahnen vom Type Docklands Light Rail Transit in London und SkyTrain in Vancouver: Eine Übersicht über Gestaltungsgrundsätze und Betriebserfahrungen*. In: *17. Verkehrswissenschaftliche Tage: „Integrierte Mobilitätsforschung – Herausforderungen Für Die Zusammenarbeit“*, Dresden, Sep. 1998. Alcatel SEL AG Stuttgart, Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“.
- [32] WINKLER, A. und G. OTTO: *Erste Erfahrungen zu Bordmikrorechnern für einen energieoptimalen Zugbetrieb bei der S-Bahn Berlin*. *Die Eisenbahntechnik*, 29(12):490–494, 1981.
- [33] ZINKE, R.: *Beitrag zur energetischen Optimierung von Zugfahrten mittels Bordrechner*. Dissertation, Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“, Dresden, Mai 1991.