Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 92 (1974)

Heft: 27: Jubiläumsausgabe 100 Jahre "Die Eisenbahn" - "Schweizerische Bauzeitung"

Artikel: Simulation des Strassenbahnbetriebes

Autor: Besch, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-72415

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Da der Algorithmus der Richtungsgleisbremsensteuerung keinen zusätzlichen Freiheitsgrad enthält, läuft die praktische Berechnung auf eine punktweise, iterative Bestimmung der Leitkurven hinaus. Da für Abläufe bis zu z. B. 250 m Länge mindestens sechs bis sieben Stützstellen für eine eindeutige Festlegung der Leitkurven notwendig sind, ferner zur Berechnung jeder Stützstelle drei bis vier Iterationsschritte sowohl für Abläufe aus Grenz-Gutläufern wie aus Grenz-Schlechtläufern erforderlich sind, leuchtet sicherlich ein, dass ohne Hilfe eines Computer-Programms zur Ermittlung der Zeit-Wege-Linien kaum mehr auszukommen ist.

Es sei abschliessend erwähnt, dass der Steuerung sowohl der Hauptablaufanlage wie der Nebenablaufanlage des Rangierbahnhofs Zürich-Limmattal das Verfahren des optimalen Einfädelns im Richtungsgleis zugrunde gelegt wurde.

7. Schluss

Die durchgeführten Untersuchungen und die erhaltenen Ergebnisse lassen deutlich erkennen, dass das «kybernetische System» des automatischen Ablaufbetriebs ausserordentlich kompliziert ist. Es verhält sich keineswegs derart einfach, dass es mit anscheinend logischen, einfachen Überlegungen und pauschalen Überschlagsrechnungen zu durchschauen wäre, wie ähnliches von vielen anderen Steuerungsvorgängen im Bereich des Eisenbahnwesens gilt.

Es ist deshalb grundsätzlich falsch, von Anfang an die Durchführung von Betriebsversuchen anzustreben, ohne das Verhalten des Steuerungssystems mit Hilfe sorgfältiger mathematischer Modelle unter Zuhilfenahme der Möglichkeiten der Computer-Rechentechnik gründlich zu erproben. Mag auch der Aufwand für die Entwicklung mathematischer Simulationsmodelle und der zugehörigen Computer-Programme gross und vor allem zeitraubend erschienen, er steht in gar keinem Verhältnis zu den Verlusten, die aus ungeeigneten Steueralgorithmen für die die Geschwindigkeit der Abläufe beeinflussenden Einrichtungen sowie aus unzulänglichen Konfigurationen dieser Einrichtungen entstehen. Bedauerlicherweise wird aber angesichts der tatsächlich erheblichen konstruktiven Schwierigkeiten mit den die Geschwindigkeit der Abläufe in Ablaufanlagen beeinflussenden Elementen auf theoretisch saubere Steueralgorithmen vielfach geringer Wert gelegt, indem jene derart zentral das Blickfeld beherrschen, dass man glaubt, hier mit primitiven Mitteln durchzukommen. Und selbst dann, wenn die grundsätzliche Berechtigung eines theoretisch sauberen Steuerungsalgorithmus anerkannt ist, besteht doch die Tendenz, diesen «für die Praxis» weitgehend zu vereinfachen.

Adresse des Verfassers: Dr.-Ing. *H. König*, Bauabteilung, GD SBB, Mittelstrasse 43, 3000 Bern.

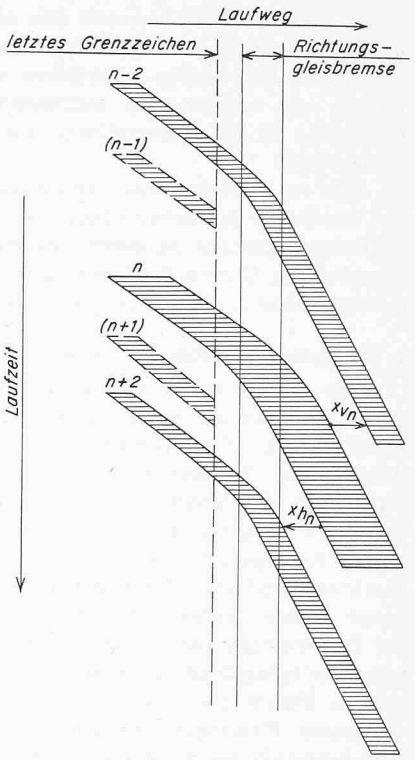

Bild 1. Prinzip des «optimalen Einfädelns» im Richtungsgleis

Bedingung dafür:

$$x_{v_n} \overset{!}{=} x_{h_n}$$

n–2; n+2	Bezugsablauf (z. B. Grenz-Schlechtläufer)
n	zu steuernder Ablauf
x_v	Pufferdistanz nach vorn
x_h	Pufferdistanz nach hinten

Literatur

[1] *H. König* und *W. Buser:* Ablaufberg-Simulation «Rangiertechnik», Heft 25 (1965), S. 21.

[2] *W. Müller:* Eisenbahnanlagen und Fahrdynamik. Bd. 1, S. 205, Berlin 1950, Springer.

[3] *O. Amman* und *F. Raab:* Collineare Rechentafeln für die Bestimmung von Zeit- und Geschwindigkeitsweglinien ablaufender Eisenbahnfahrzeuge. «Verkehrstechn. Woche» *25* (1931), S. 344.

[4] *W. Mittmann:* Isochroner Ablauf von Einzelwagen in Rangieranlagen. «Archiv für Eisenbahntechnik», Heft 26 (1971).

[5] *H. König:* Die Laufeigenschaftsmessungen der Schweiz. Bundesbahnen an Einzel- und Gruppenabläufen im RB Chiasso, 1. Teil: Einzelabläufe. «Monatsschrift der Internationalen Eisenbahnkongress-Vereinigung» *46* (1969), Juni-Heft.

Simulation des Strassenbahnbetriebes

Von **M. Besch**, Zürich

DK 656.027:656.04:625.6

1. Einleitung

Das zunehmende Verkehrsaufkommen, die wachsenden Verkehrsprobleme unserer Städte und die damit sprunghaft wachsenden Sorgen der Nahverkehrsbetriebe (Wettbewerbsstellung zum Privatverkehr) zwingen Planer und Ingenieure, neue Verfahren zu finden, um *komplexe Planungsprobleme* rationeller zu lösen. Im Verkehrswesen hat man es meist mit grossen, stark verflochtenen und von Zufälligkeiten beeinflussten dynamischen Systemen zu tun.

Die neuesten Erkenntnisse der Computertechnologie und der mathematischen Methoden des Operation Research haben in jüngster Zeit neue Möglichkeiten der Planungstechnik eröffnet. Insbesondere hat sich die *Simulationstechnik* durch gesetzt.

Die Studienabteilung der Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich hat in Zusammenarbeit mit der Firma Häusermann & Co., Zürich, Unternehmungsberatung und Betriebsorganisation, sowie der ASI, Applied Studies International, Zürich, begonnen, ein Simulationsmodell zu erarbeiten, das nach seiner Fertigstellung erlaubt, alle Situationen und Möglichkeiten des modernen Strassenbahnbetriebes zu simulieren. Mit diesem Modell sollen vor allem Ausbauvarianten quantitativ miteinander verglichen werden können. Damit ist man

in der Lage, für jede Variante eine einwandfreie, *quantitativ fundierte Analyse* durchzuführen, wie sie eigentlich jeder wichtigen Entscheidung vorangehen sollte. Damit wird ein kosten- und zeitsparendes Instrument geschaffen, das beispielsweise für die Begutachtung von Varianten angewendet werden kann.

Der vorliegende Aufsatz beschreibt die durchwegs positiven Ergebnisse der ersten Etappe eines anspruchsvollen Modellierungsversuches. Bei diesem Projekt handelt es sich um eine *Pionierarbeit:* Unseres Wissens sind in Europa keine Verkehrsmodelle dieser Art und Grössenordnung entwickelt worden.

2. Simulation – warum und womit?

Die qualitative Bewertung des öffentlichen Schienenverkehrs stützt sich auf Merkmale wie Regelmässigkeit, Reisegeschwindigkeit, Transportkapazität u. a. Da der dynamische Ablauf des Schienenverkehrs von zufälligen Einflüssen (Störungen, Haltezeiten, Fahrweise usf.) abhängt, sind a priori sämtliche Qualitätsangaben über den Verkehr stochastische Aussagen, d. h. die eintreffenden Werte der einzelnen Merkmale sind vom Zufall abhängige Variable und besitzen somit je eine Wahrscheinlichkeitsverteilung. Vor allem bei der Projektierung von Verkehrsknotenpunkten, der Ausarbeitung von Fahrplänen, der Festlegung von Betriebsregeln usw. geht es darum, die kausalen Abhängigkeiten zwischen den wählbaren Planungsparametern und den unbeeinflussbaren Gegebenheiten des Stadtverkehrs einerseits sowie den Qualitätsmerkmalen des Verkehrssystems andererseits quantitativ zu erfassen. Durch Variation der wählbaren Variabeln sollen Verbesserungen des Systems ermöglicht werden, um zu annähernd optimalen Werten zu gelangen.

Es liegt somit ein komplexes Optimierungsproblem vor. Der erfahrene Verkehrsplaner hat nun eine bewährte Palette von Planungstechniken zur Verfügung, die ausschliesslich für die Lösung von Einzelproblemen entwickelt wurden. Wollte er aber etwa die Auswirkungen von lokalen Verbesserungen auf ein ganzes, eng verknüpftes Netz von Knotenpunkten und Linien quantitativ untersuchen und dabei die täglich vorkommenden Unregelmässigkeiten berücksichtigen, so ergäbe dies für ihn einen *nicht zu bewältigenden Arbeitsaufwand.* Eine wirksame Analysenmethode zur Beantwortung solcher Fragen ist heute die Simulationstechnik. Damit ist auch die zweite Frage nach dem «Womit?» beantwortet. Die einzig rationelle Methode ist nämlich die Simulation auf dem Computer.

Es war das Ziel, den Strassenbahnbetrieb auf einem bestehenden oder projektierten Liniensystem während frei wählbarem Zeitraum mit unterschiedlichen Annahmen zu simulieren. Unser Simulationsmodell dient vor allem dazu, den grossen Arbeitsaufwand des Durchrechnens einer grossen Fülle von möglichen Verkehrsabläufen in eng verknüpften Schienenverkehrsnetzen einem Grosscomputer zu übertragen.

3. Das Programm

Das ComputerProgramm stellt das Ergebnis der gesamten Arbeiten dar. Es basiert auf der Programmiersprache SIMULA. In Bild 1 ist systematisch der Aufbau des gesamten Programmes (Programmstruktur) dargestellt.

Für die Programmierung musste jede Einzelheit des Strassenbahnbetriebes analysiert werden. Grundsätzlich könnten dabei 2 Gruppen von Problemkreisen unterschieden werden – statische und dynamische.

Abgesehen von programmtechnischen Schwierigkeiten waren die statischen Probleme verhältnismässig leicht zu erfassen. Es handelte sich dabei lediglich um das Fahrzeug (Länge), die Gleissituation und die Vorfahrtsregelung (Betriebsregeln). Schwieriger wurde es bei der zweiten Gruppe, denn man musste diese Werte für die Eingabe zuerst statistisch ermitteln. Es wurden daher Messreihen für die Fahrplanabweichungen, die Haltestellenaufenthalte und die Störungen durch den Privatverkehr systematisch durchgeführt. Der Zeitaufwand lag bei mehreren Wochen. Für die Fahrweise (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verzögerung), die ja auch statistischen Schwankungen unterworfen ist, wird vorläufig nur mit einem Mittelwert gearbeitet. Jedoch zeigte sich durch Vergleiche der Computerresultate mit Fahrzeitmessungen, dass man richtige Annahmen getroffen hatte. Die markanten Daten über die Verkehrsregelungsanlagen konnten durch wenige Beobachtungen erhalten werden. Nur die Witterung wurde nicht besonders berücksichtigt.

Das in der ersten Etappe entwickelte Programmsystem erlaubt die Simulation des Tramverkehrs in jedem beliebigen bestehenden oder projektierten Teilnetz der Stadt. Die Programme sind so allgemein abgefasst, dass vermutlich das

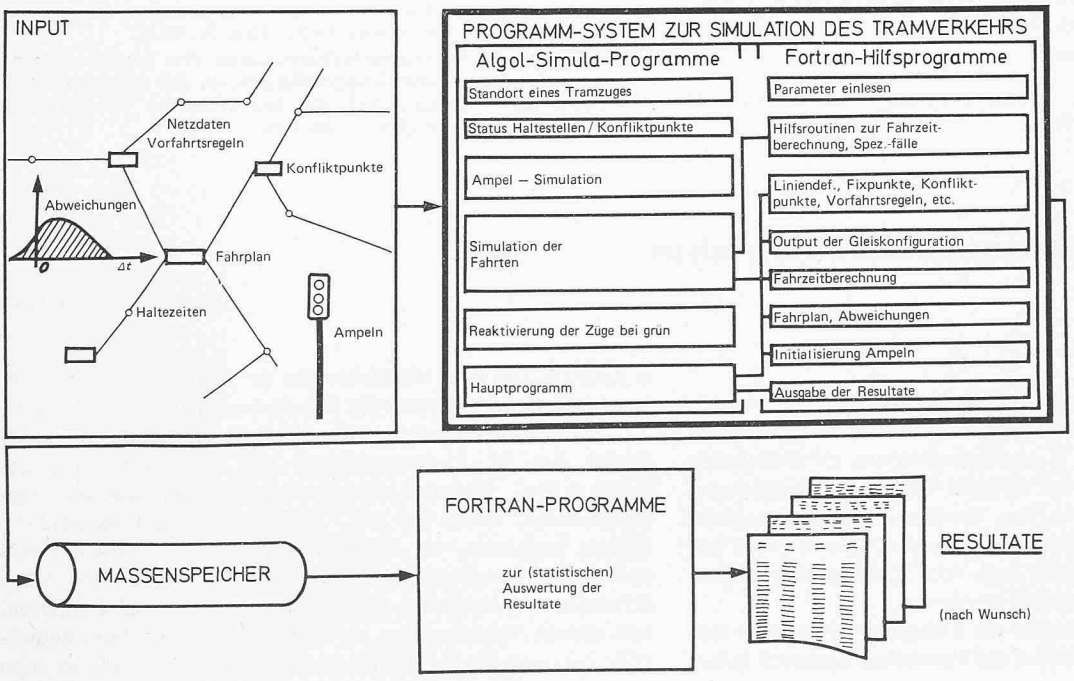

Bild 1. Programmstruktur des Programms zur Simulation des Tramverkehrs

ganze Schienennetz der Stadt Zürich in einem Durchgang simuliert werden kann.

Die im vorliegenden Programm berücksichtigten *Hauptgesichtspunkte* sind folgende:

- Die Gleisgeometrie, einfache und doppelte Haltestellen
- Vortrittsregeln in allen Konfliktpunkten, zulässige Geschwindigkeiten, Fahrzeitberechnungen
- Vorkommende Ampelsysteme und ihre Funktionsweise (vorläufig nur starr geregelte)
- Aufenthaltszeiten bei den Haltestellen und ihre statischen Verteilungen (schwankende Grössen je nachRichtung, Tageszeiten usw., Verteilung gemäss Messungen)
- Die Fahrpläne und die statistischen Abweichungen von den theoretischen Fahrzeiten beim Eintritt in das simulierte Teilnetz.

Noch nicht direkt ins Modell aufgenommen sind die Behinderungen durch den Privatverkehr (Linksabbieger, stehende Autoschlangen usw.). Wie man heute jedoch abschätzen kann, ist es ohne weiteres möglich, auch diese Einflüsse mitzusimulieren.

4. Ergebnisse

Die durchgespielten Beispiele haben folgende *Hauptergebnisse* gebracht:

- Es ist prinzipiell möglich, den Tramverkehr realistisch auf dem Computer zu simulieren
- Die berechneten Fahrzeiten stimmen gut mit den wirklichen überein
- Die dem Verkehr auferlegten Randbedingungen, wie Eigenbehinderungen, Ampeln, Vortrittsrechte usw., werden korrekt wiedergegeben
- Die grosse Fülle von Ergebnissen einer Simulation kann praktisch beliebig differenziert oder in statistisch verdichteter Form ausgedruckt werden.

Das dargestellte Beispiel (Bild 2) bezieht sich auf den Simulationsausschnitt um den Stauffacher. Es stellt die statistische Auswertung der Fahrten von 24 simulierten Kursen der Linie 2 in Richtung Farbhof dar. Selbstverständlich stellen die nachfolgenden Werte nur einen kleinen Ausschnitt der Daten dar, die bei einer einzigen Simulation zu erhalten sind.

LINIE 21 STATISTISCHE AUSWERTUNG

	VON	BIS	ANZAHL WERTE	MITTELWERT	TOTAL	STREUUNG	MIN.	MAX.
EFF.FAHRZEIT								
	17	18	24	95.3	2287.0	22.6	69.0	139.0
	18	11	24	97.6	2343.0	17.7	73.0	144.0
	11	12	24	83.2	1998.0	7.4	74.0	96.0
	17	12	24	276.2	6628.0	32.0	225.0	358.0
VERLUSTZEIT								
	17	18	24	26.3	631.0	22.6	.0	70.0
	18	11	24	24.6	591.0	17.7	.0	71.0
	11	12	24	9.2	222.0	7.4	.0	22.0
	17	12	24	60.2	1444.0	32.0	9.0	142.0
STOPPZEIT								
	17	18	24	14.7	354.0	18.1	.0	54.0
	18	11	24	19.1	459.0	14.2	.0	51.0
	11	12	24	9.2	220.0	7.4	.0	22.0
	17	12	24	43.0	1033.0	24.6	.0	106.0
GESCHW.AEND.								
	17	18	24	11.5	277.0	6.7	.0	16.0
	18	11	24	5.5	132.0	8.4	-1.0	26.0
	11	12	24	.1	2.0	.3	.0	1.0
	17	12	24	17.1	411.0	11.7	1.0	42.0
HALTEZEIT								
	17	18	24	28.2	678.0	6.8	11.0	34.0
	18	11	24	28.7	688.0	5.4	19.0	34.0
	11	12	24	11.7	280.0	4.0	8.0	20.0
	17	12	24	68.6	1646.0	9.1	43.0	81.0
REISEZEIT								
	17	12	24	333.1	7994.0	33.5	283.0	414.0

Bild 2. Statistische Auswertung der Fahrten von 24 simulierten Kursen der Linie 2 im Gebiet um den Stauffacher, Fahrtrichtung Farbhof. In der ersten Kolonne sind die Namen der verschiedenen Zeiten ausgedruckt:

- Fahrzeit (Zeit, die zur Fahrt zwischen 2 definierten Punkten benötigt wird, inkl. Verlustzeiten, ohne Haltezeiten)
- Verlustzeit (infolge Störungen, z. B. Verkehrsampeln, Eigenbehinderungen, setzt sich zusammen aus Stoppzeit und Geschwindigkeitsveränderungszeit)
- Stoppzeit (Zeit des Stillstandes infolge Störungen)
- Geschwindigkeitsveränderungszeit (Verlustzeit infolge Verzögerung und Beschleunigung bei Störungen)
- Haltezeit (auf Haltestellen)
- Reisezeit (zwischen Anfangs- und Endpunkt; in unserem Falle zwischen den Haltestellen Paradeplatz und Bezirksgebäude)

In der zweiten und dritten Kolonne sind die Nummern der Haltestellen ausgedruckt: 17 Paradeplatz, 18 Sihlstrasse, 11 Stauffacher, 12 Bezirksgebäude. Kolonne 4 gibt die Anzahl der simulierten Fahrten. In den Kolonnen 5 bis 9 sind nun die Zeiten in Sekunden ausgedruckt. Sie enthalten alle statistisch notwendigen Daten – das eigentliche Ergebnis der Simulation

5. Ausblick

5.1 Weiterentwicklung des Modells

Wie erwähnt, ist das Modell noch unvollständig. Wenigstens zwei Randbedingungen müssen noch einbezogen und modelliert werden: Behinderungen durch Privatverkehr und verkehrsgesteuerte Ampelsysteme. Inwieweit verkehrslenkende Polizisten(-innen) in programmierbarer Form erfasst werden können, ist allenfalls noch abzuklären. Mit diesen Ergänzungen wäre das ursprünglich ins Auge gefasste Planungsinstrument weitgehend geschaffen.

Mit der praktischen Handhabung des Modells beim Lösen konkreter Probleme wird man gezwungenermassen auf Erweiterungswünsche stossen, wie etwa den Einbezug von Buslinien in das simulierte System (in beschränktem Rahmen wohl möglich), den Einbezug des Privatverkehrs bzw. seiner Steuerung an einzelnen Plätzen (z. B. Bellevue) in das Modell (denkbar).

5.2 Datenbeschaffungsprobleme

Je besser die Planungstechniken, desto umfassender müssen Informationen (Daten) über das zu planende System und seine Funktionsweise erfasst werden.

Für die Simulation der Zone Stauffacher war man gezwungen, umfassende Messungen über die durch das Ein- und Aussteigen bedingten Wartezeiten eines Tramzuges auf den verschiedenen Haltestellen durchzuführen. Diese systematisch durchgeführten Messungen liefern bereits wertvolle Informationen der benötigten Aufenthaltszeiten auf allen Haltestellen der ganzen Stadt. Das Arbeiten mit dem Modell setzt zum Teil recht umfangreiche Datenerfassungsarbeiten voraus (z. B. über Behinderungen durch den Privatverkehr).

Viele dieser Daten bewahren ihre Gültigkeit längere Zeit, andere müssen von Zeit zu Zeit bzw. von Problem zu Problem neu erfasst werden. Der Erfassungsaufwand sollte in allen Fällen mit Hilfe der mathematischen Stichprobentheorie kontrolliert werden. Auch organisatorisch wird die Erfassung, Speicherung und Aufarbeitung der vielen Daten einige Disziplin erfordern.

5.3 Möglichkeiten des Planens

Ein Modell, das die *Berücksichtigung von zufällig schwankenden Einflussgrössen* wie Haltestellenaufenthalte, Fahrplanabweichungen, Verlustzeiten durch Ampeln usw. erlaubt, vergrössert die Aussagekraft der Ergebnisse von Planungsrechnungen stark. Der Verkehrsplaner kann in *quantitativer* Weise eine Fülle von Fragen untersuchen, die er bislang nicht einmal zu stellen wagte. Zur Entscheidungsvorbereitung kann er *viel mehr alternative Lösungen* durchrechnen.

Schliesslich darf der *allgemeine Lernprozess* nicht vergessen werden, der durch das Arbeiten mit dem Modell einsetzt. Durch die Vielfalt der quantitativen «Messungen» der Verkehrsleistung beim Durchspielen von Hunderten von Verkehrssituationen erkennt man allmählich die wahre Bedeutung der einzelnen Einflüsse.

Adresse des Verfassers: *Martin Besch*, dipl. Bau-Ing. ETH, Studienabteilung der Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich, Amtshaus II, Bahnhofquai 5, 8023 Zürich 1.