

Verkehrstelematik – Eine Systemanalyse

Christian HOCHREITER, Michael WISTUBA, Alfred VYCUDIL

Christian Hochreiter, Michael Wistuba, Alfred Vycudil;
Institut für StraSSenbau und Strassenerhaltung, Technische Universität Wien

1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Im vorliegenden Konferenzbeitrag wird ein Einsatzgebiet von Telematikanwendungen im Verkehrswesen, nämlich „Verkehrsumleitung bei Überlastung“, in einem Computermodell abgebildet und dessen Auswirkungen untersucht. Dabei steht die Darstellung der grundlegenden Vorgangsweise bei der Behandlung von Problemstellungen dieser Art im Vordergrund.

Bei der Entwicklung eines die Wirklichkeit abbildenden Modells ist es notwendig, die Realität zu abstrahieren. Dabei gilt: „Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“. Der vorliegende Systementwurf ist – dessen sind sich die Autoren bewußt – unpräzise. Von ihm darf keinesfalls erwartet werden, daß Zeithorizonte exakt abgebildet werden, da fehlende Detailinformationen zur Beschreibung von Abhängigkeiten von Systemvariablen durch rein qualitative Abschätzungen ersetzt werden. Die Reduktion der Wirklichkeit auf wenige Einzelteile ist aber als vollständig anzusehen, da alle grundlegenden Systembausteine enthalten sind und das Modell das Gesamtsystemverhalten richtig abbildet. Da in der Realität alle Prozesse in rückgekoppelten Regelkreisen ablaufen, werden die verschiedenen Problemkreise im Modell nicht isoliert voneinander betrachtet, sondern stehen infolge von Rückkopplungen miteinander in Beziehung [Forrester, 1972]. Aus dem Zusammenwirken der einzelnen Elemente ergeben sich kurz- und langfristige Veränderungen des Systemverhaltens. Insbesondere sind Veränderungen zufolge Systemwirkungen aufgrund realisierter Maßnahmen in der Raum- und Verkehrsplanung oft zeitverzögert [Emberger, 1999]. Der Mensch nimmt diese langfristigen Veränderungen der Umwelt oft gar nicht mehr wahr. Damit verliert er einen wesentlichen Bezugspunkt im Prozeß des Erkenntnisgewinns, nämlich den der Erfahrung [Riedl, 1981]. Aber auch bei kurzfristigen Systemwirkungen ist er nicht fähig, alle Konsequenzen klar zu durchdenken, die sich aufgrund der Wechselwirkungen der Einzelteile eines Systems ständig neu ergeben können. Die durch Rückkopplungen ausgelösten Entwicklungen sind daher vielfach unerwartet und ungewollt. Eine scheinbar abschätzbare Problematik kann über sich hinauswachsen und neue, unvorhergesehene Probleme auslösen. Der große Vorteil von computerunterstützten Analysen liegt im Sichtbarmachen der Systemwirkungen. Die Simulationstechnik, das iterative Spiel von getroffener Annahme und sich ergebendem Gesamtverhalten, vertieft das Verständnis für die Systemstruktur und -dynamik. Mit Hilfe dynamischer Modelle werden die zeitliche Entfaltung des Systems und seine Grenzen qualitativ aufgezeigt.

2 MODELLBILDUNG

2.1 Überlegungen zur Systemwirkung von Verkehrstelematik

Die Anwendung von Verkehrstelematik verfolgt im Wesentlichen zwei Ziele: eine Steigerung der Verkehrssicherheit sowie eine Vermeidung von Überlastungen der bestehenden Infrastruktur Straße. Letzteres Ziel ist Inhalt der vorliegenden Analyse. Für die Vereinfachung der Wirklichkeit im Zuge der Modellbildung gelten folgende Überlegungen als Grundlage: Auf einem fiktiven Straßennetz konstanter Länge bewegen sich Fahrzeuge. Diese fahren in erster Linie auf den attraktivsten Verkehrsrouten (kürzeste Verbindung, beste Verkehrs- und Straßenqualität,...), während Nebenrouten weniger stark frequentiert werden. Bei großem Zustrom ins Netz wird die Dichte allmählich zu-, die Attraktivität abnehmen. Dynamische Verlagerungseffekte führen in der Folge zu Dichteveränderungen im Haupt- wie Nebenroutennetz. Bei anhaltendem Zustrom wird die Dichte im Netz insgesamt solange zunehmen, bis die größtmögliche Dichte (=Stau) erreicht ist. Um dieses Problem zu vermeiden wird vielfach versucht, dem Dichtezuwachs durch „Netzverlängerung“, d.h. durch Straßenneubau bzw. -ausbau entgegenzusteuern, um auch bei erhöhter Nachfrage eine gleichbleibende Attraktivität sicherzustellen. Der Versuch das Verkehrsproblem mittels Netzverlängerung zu lösen, stößt jedoch an ökologische, ökonomische und räumliche Grenzen. Daher sollen hinkünftig durch Verkehrstelematik die Verkehrsströme dirigiert und damit das Gesamtnetz besser ausgenützt werden. Die Autoren behaupten nun, daß auch diese Maßnahme genaue-

nommen einer Netzverlängerung entspricht. Das Netz bleibt zwar physisch konstant, durch das Umleiten von Verkehr auf Nebenrouten werden den Verkehrsteilnehmern aber "neue Straßen" geöffnet, die sie von vorneherein nicht benutzt hätten. Das Netz und die gefahrenen Wege werden dadurch länger. Auch mit Verkehrstelematik ist die Netzlänge bzw. die Netzausnutzung nach oben begrenzt. Das bedeutet, daß die Maßnahme "Netzverlängerung", sei es durch den Einsatz von Telematik oder durch Straßenneubau, das Systemversagen, d.h. die Überlastung des Straßennetzes bei wachsender Verkehrsmenge bestenfalls zeitlich verzögern, nicht aber verhindern kann. Das Phänomen des Hinausschieben des Systemversagens kann mittels des in dieser Arbeit vorgestellten Modells simuliert werden.

2.2 Causal Loop Diagramm

In einem ersten Schritt wird für die vorliegende Problemstellung ein Causal Loop Diagramm entworfen, das die Grundlage für die spätere Implementierung in die regelkreisbasierte Software Stella bildet (siehe Kapitel 2.3). Durch die Methode des "Causal Loop Diagramming" werden reale Systembeziehungen auf das Wesentliche reduziert und qualitativ richtig dargestellt (siehe Abbildung 1). Alle Modellbausteine sind durch rückgekoppelte Regelkreise miteinander verbunden. Eine Rückkopplung ist eine in sich geschlossene Kette aus Ursache und Wirkung. Eine positive Rückkopplungsschleife (in der Abbildung durch ein Pluszeichen gekennzeichnet) kann die ursprüngliche Zunahme eines Elements noch verstärken und damit insgesamt zum Systemwachstum führen. Negative Rückkopplung (Minuszeichen) kann eine Veränderung gegensinnig zur ursprünglichen Änderung bewirken und so das System ins Gleichgewicht bringen.

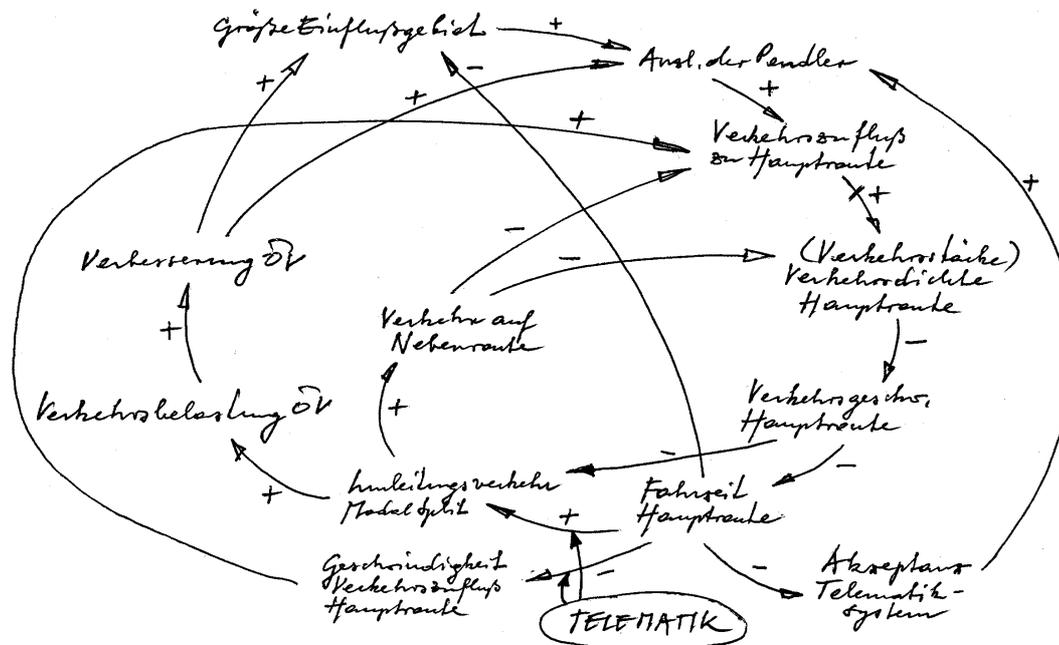


Abb. 1: Causal Loop Diagramm - regelkreisbasierter Modellentwurf

2.3 Implementierung in Stella®

Der zweite Schritt ist die Umsetzung des Causal Loop Diagramms in ein Computermodell. Für die vorliegende Problemstellung wurde das Simulationsprogramm Stella II verwendet. Die Programmiersprache von Stella® [Stella II, 1994] ist relativ schnell erlernbar und ermöglicht es auch dem Computerlaien ohne spezielle Informatikausbildung, komplexe dynamische Modelle am Computer auf einer graphischen Benutzeroberfläche zu implementieren und damit Simulationsläufe durchzuführen. Unter Verwendung vier verschiedener Symbole (siehe Abbildung 2) können die Modellbausteine samt ihren Wechselwirkungen dargestellt und alle möglichen Systemverhaltensweisen mathematisch abgebildet werden.

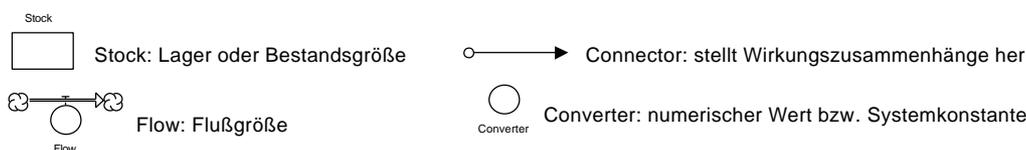


Abb. 2: Symbole der Programmiersprache Stella®

Das in Stella[®] implementierte Modell basiert auf einer fiktiven Stadt-Dorf-Beziehung: Eine Stadt beeinflusst ein 10 km entfernt liegendes Dorf. Ab einer bestimmten Verkehrszunahme auf den Haupttrouten sinkt die Geschwindigkeit unter einen definierten Grenzwert. Dann ist die Verkehrsqualität so unakzeptabel, daß der Einsatz von Telematik (im Sinne von Netzverlängerung) notwendig wird. Das "künstlich vergrößerte" Netz ist solange ausreichend, bis durch den ständigen Zustrom die Geschwindigkeit im Netz zufolge wachsender Dichte so weit absinkt, daß wiederum eine Netzverlängerung notwendig wird. Die Programmstruktur des Modells in Stella[®] ist in Abbildung 3 dargestellt. Nachfolgend werden die einzelnen Modellbausteine näher vorgestellt.

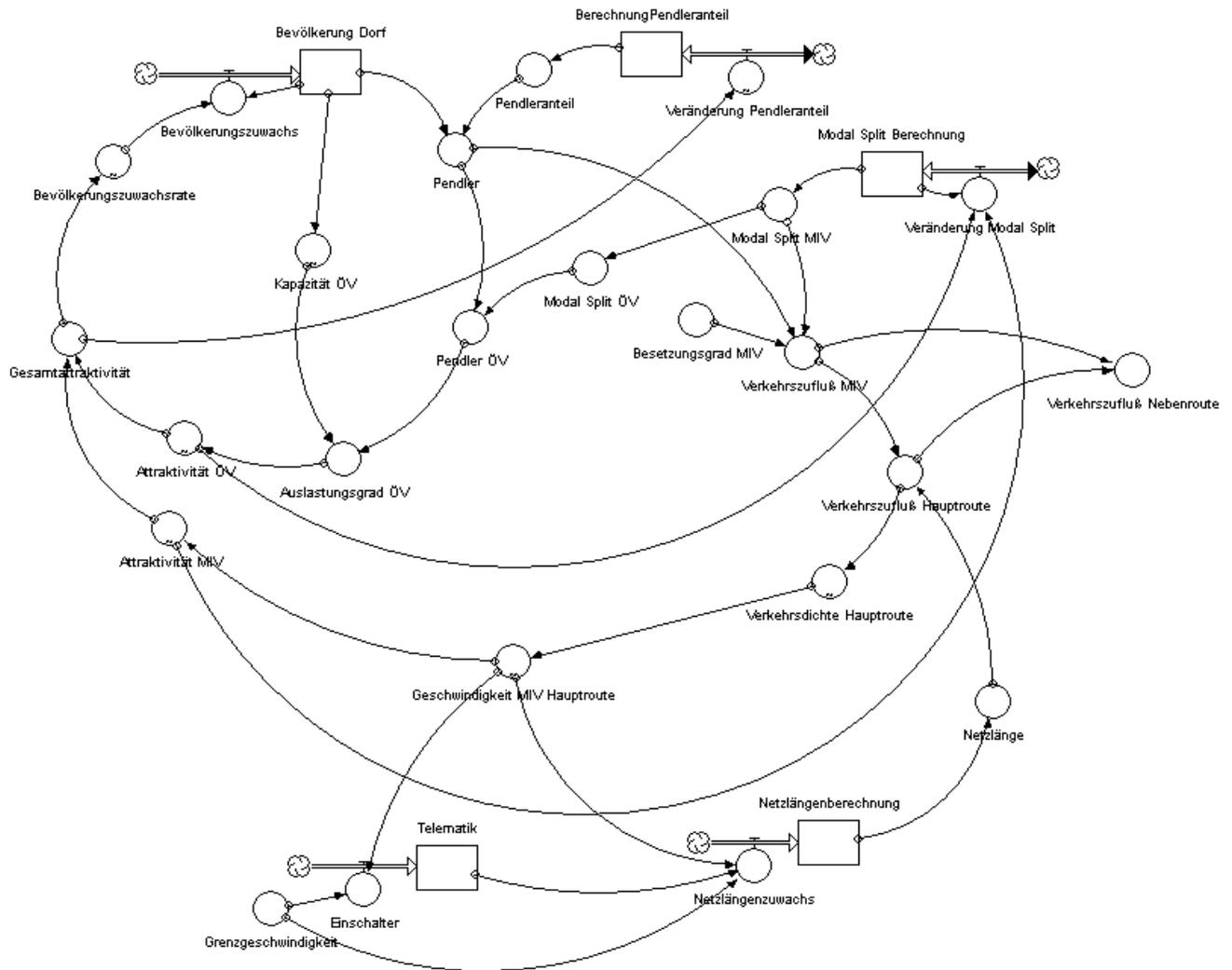


Abb. 3: Modellbildung in Stella[®]

2.3.1 Dorfbevölkerung

Bevölkerung Dorf gibt die Anzahl der Dorfbewohner in Personen an. Der Startwert ist 15.000. Über den *Bevölkerungszuwachs* wird die zeitabhängige Veränderung dieses Wertes gemäß Gleichung 1 berechnet. Die *Bevölkerungszuwachsrate* gibt die jährliche Veränderung der Dorfbevölkerung in Abhängigkeit der *Gesamtattraktivität* in Prozent an (siehe Abbildung 4).

$$\text{Bevölkerungszuwachs} = \text{Bevölkerung Dorf} \cdot \frac{\text{Bevölkerungszuwachsrate}}{100} \quad (\text{Gl.1})$$

2.3.2 Pendleranteil

Pendler gibt den Absolutwert der täglich in der Stadt arbeitenden Dorfbewohner an (siehe Gleichung 2). Der *Pendleranteil* gibt den Anteil der Pendler in Prozent der Dorfbevölkerung an. Sein Startwert ist 50 %. Er

wird soziographisch bedingt nach oben mit 60 %, nach unten mit 40 % beschränkt. Die *Veränderung Pendleranteil* gibt die Änderung des Pendleranteils in Abhängigkeit der *Gesamtattraktivität* des Verkehrssystems in Prozent an (siehe Abbildung 5). *Pendler ÖV* ist die Anzahl der Personen, die täglich mit einem öffentlichen Verkehrsmittel vom Dorf in die Stadt pendeln (siehe Gleichung 3).

$$Pendler \text{ ? } Bevölkerung \text{ Dorf ? } \frac{Pendleranteil}{100} \tag{Gl.2}$$

$$Pendler \text{ ÖV ? } Pendler \text{ ? } \frac{Modal \text{ Split } \text{ ÖV}}{100} \tag{Gl.3}$$

2.3.3 Kapazität und Auslastung des öffentlichen Verkehrssystems

Die *Kapazität ÖV* gibt die maximale Aufnahmefähigkeit des öffentlichen Verkehrssystems während der Frühspitze in Personen an. Sie steht in Relation zur *Bevölkerung Dorf* (siehe Abb. 6). Der *Auslastungsgrad ÖV* gibt die Auslastung des öffentlichen Verkehrssystems in Prozent an (siehe Gleichung 4).

$$Auslastungsgrad \text{ ÖV ? } \frac{Pendler \text{ ÖV}}{Kapazität \text{ ÖV}} \text{ ? } 100 \tag{Gl.4}$$

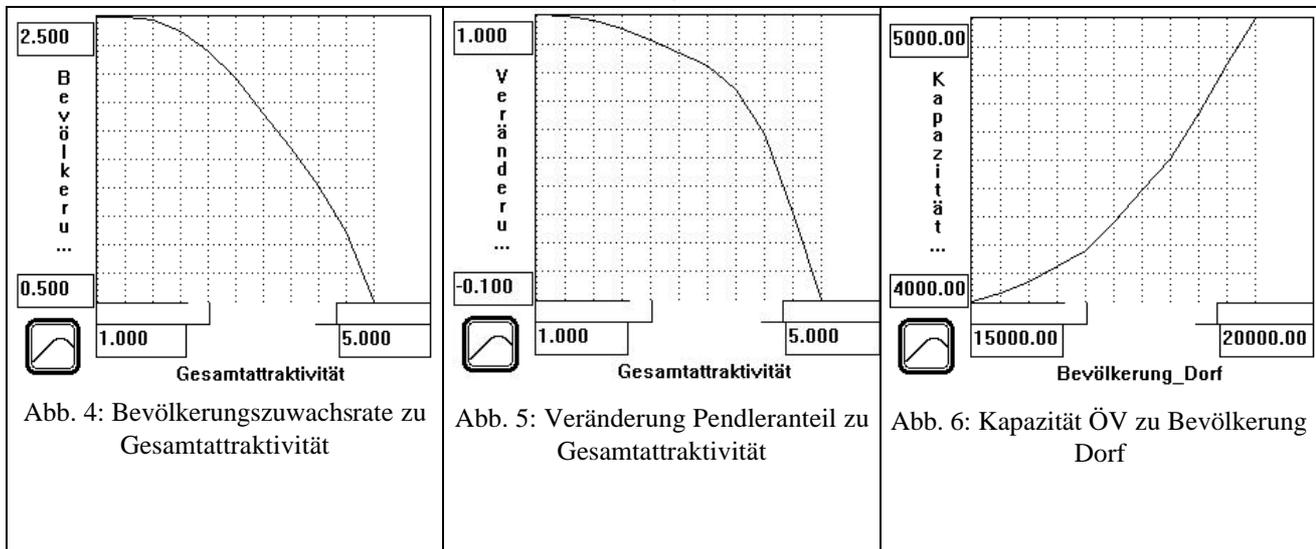


Abb. 4: Bevölkerungszuwachsrate zu Gesamtattraktivität

Abb. 5: Veränderung Pendleranteil zu Gesamtattraktivität

Abb. 6: Kapazität ÖV zu Bevölkerung Dorf

2.3.4 Modal Split

Modal Split Berechnung gibt die prozentuelle Aufteilung zwischen motorisiertem Individualverkehr (MIV) und öffentlichem Verkehr (ÖV) an. Aus der *Modal Split Berechnung* ergibt sich der *Modal Split MIV*, der den Anteil des MIV am Gesamtverkehr in Prozent angibt. Der *Modal Split ÖV* bestimmt den Anteil des ÖV am Gesamtverkehr in Prozent (siehe Gleichung 5).

$$Modal \text{ Split } \text{ ÖV ? } 100 \text{ ? } Modal \text{ Split } \text{ MIV} \tag{Gl. 5}$$

Am Beginn beträgt der *Modal Split MIV* 60 %, er ist nach oben mit 90 % und nach unten mit 10 % begrenzt. *Veränderung Modal Split* berechnet in Abhängigkeit der *Attraktivität MIV* und der *Attraktivität ÖV* die Veränderung des *Modal Split MIV*. Solange der Wert der *Modal Split Berechnung* < 90 ist, so gilt für die *Modal Split Berechnung* Gleichung 6, andernfalls *Modal Split Berechnung* = 0.

$$Modal \text{ Split } \text{ Berechnung ? } Attraktivität \text{ ÖV ? } Attraktivität \text{ MIV} \tag{Gl. 6}$$

2.3.5 Verkehrszufluß in die Stadt

Verkehrszufluß MIV ist die jährliche durchschnittliche tägliche Anzahl an Fahrzeugen, die während der Frühspitze vom Dorf in die Stadt fahren (siehe Gleichung 7). *Besetzungsgrad MIV* gibt die durchschnittliche Personenanzahl an, die sich in einem Fahrzeug befinden. Für die Berechnungen wird ein konstanter Wert von 1.2 angenommen.

$$\text{Verkehrszufluß MIV ?} = \frac{\text{Pendler ?} \cdot \frac{\text{Modal Split MIV}}{100}}{\text{Besetzungsgrad MIV}} \quad (\text{Gl. 7})$$

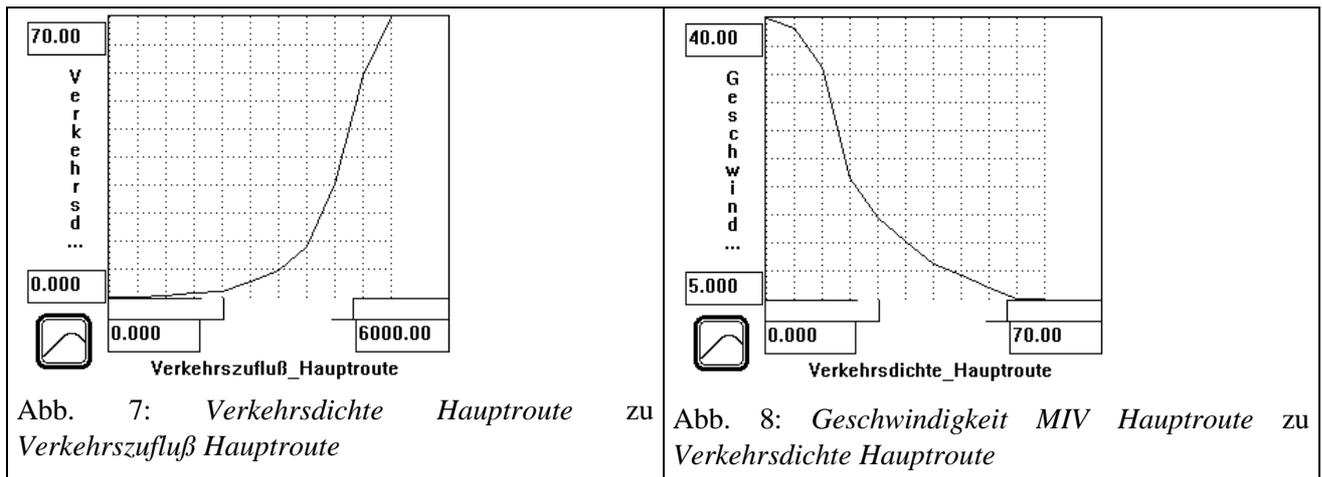
Verkehrszufluß Hauptroute ist die jährliche durchschnittliche tägliche Anzahl an Fahrzeugen, die während der Frühspitze auf den Hauptrouten in die Stadt einfahren. Sie errechnet sich aus dem *Verkehrszufluß MIV* und dem Verhältnis der Straßennetzlänge der Hauptrouten zur Gesamtstraßennetzlänge, wobei die Netzlänge der Hauptroute mit 30 km dem Eingangswert der *Netzlängenberechnung* (siehe Kapitel 2.3.8) entspricht (siehe Gleichung 8). Der *Verkehrszufluß Nebenroute* gibt die Anzahl der Fahrzeuge an, die durch den Einsatz der Verkehrstelematik auf Nebenrouten (Umleitungs- bzw. Ausweichrouten) umgeleitet wird (siehe Gleichung 9).

$$\text{Verkehrszufluß Hauptroute ?} = \text{Verkehrszufluß MIV ?} \cdot \frac{30}{\text{Netzlänge}} \quad (\text{Gl. 8})$$

$$\text{Verkehrszufluß Nebenroute ?} = \text{Verkehrszufluß MIV ?} - \text{Verkehrszufluß Hauptroute} \quad (\text{Gl. 9})$$

2.3.6 Verkehrsdichte und Geschwindigkeit auf den Hauptrouten

Die *Verkehrsdichte Hauptroute* gibt die jährliche durchschnittliche Anzahl der Fahrzeuge pro km auf den Hauptrouten der Stadt an. Dieser Wert ist abhängig vom *Verkehrszufluß* in die Stadt (siehe Abbildung 7). Die *Geschwindigkeit MIV Hauptroute* gibt die jährliche durchschnittliche Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf den Hauptrouten der Stadt während der Frühspitze an (siehe Abbildung 8).



2.3.7 Einsatz von Verkehrstelematik

Telematik zeigt an, ob das Telematiksystem “ein- oder ausgeschaltet” ist. Sobald es eingeschaltet ist, wird ein Teil des Verkehrs von den Hauptrouten auf die Umleitungsrouten umgeleitet. Ist das Telematiksystem einmal aktiviert, wird es nicht mehr ausgeschaltet. Den Zeitpunkt des Einschaltens bestimmt *Einschalter*. Dieser Wert wird von 0 auf 1 gesetzt, sobald die *Geschwindigkeit MIV Hauptroute* unter die *Grenzgeschwindigkeit* von 6 km/h (Stau) fällt.

2.3.8 Netzlänge

Die *Netzlängenberechnung* ermittelt die erforderliche Netzlänge des Gesamtnetzes (Haupt- und Nebenrouten). Die Netzlänge beträgt am Beginn 30 km und ist mit 40 km nach oben begrenzt. Der *Netzlängenzuwachs* gibt die Länge an Nebenrouten an, die nach dem Einschalten des Telematiksystems stufenweise zur Verfügung gestellt werden sollen. Bei Bedarf wird das Netz um jeweils 4 km zusätzliche Nebenroute verlängert. Wegen der maximalen Netzlänge von 40 km sind daher drei Netzerweiterungen (4+4+2 km) möglich.

2.3.9 Attraktivität der Verkehrssysteme

Gesamtattraktivität definiert die Attraktivität des gesamten Verkehrssystems. Sie wird durch das Minimum aus Attraktivität MIV und Attraktivität ÖV festgelegt (siehe Gleichung 10).

$$\text{Gesamtattraktivität} = \min \{ \text{Attraktivität MIV}, \text{Attraktivität ÖV} \} \quad (\text{Gl. 10})$$

Attraktivität MIV definiert die Attraktivität des motorisierten Individualverkehrs in Abhängigkeit der Geschwindigkeit MIV Hauptroute. Sie ist mit einer Notenskala von 1 (=sehr gut) bis 5 (=schlecht) bewertet (siehe Abbildung 9). Die Attraktivität des öffentlichen Verkehrssystems Attraktivität ÖV ist analog definiert, wobei angenommen wird, daß die Attraktivität ÖV nie unter 2 absinken kann (siehe Abbildung 10).

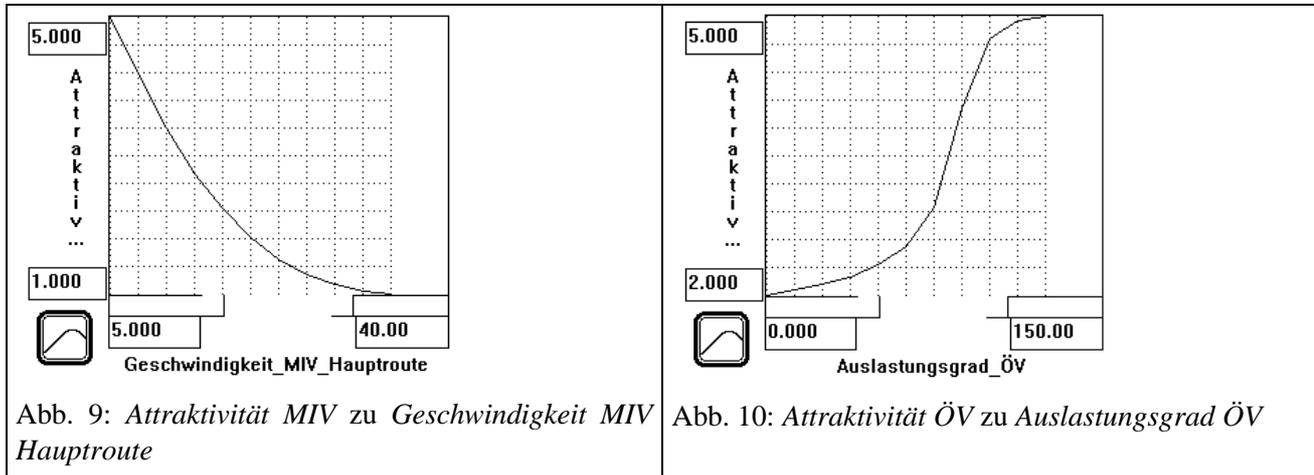


Abb. 9: Attraktivität MIV zu Geschwindigkeit MIV Hauptroute

Abb. 10: Attraktivität ÖV zu Auslastungsgrad ÖV

3 **ERGEBNISSE**

Die wesentlichen Resultate der Simulationsrechnungen sind in Abbildung 11 dargestellt. In der ersten Phase der zeitlichen Entwicklung des Systemverhaltens steigt die Verkehrsdichte auf der Hauptroute (1) durch das stetige Anwachsen des Verkehrszuflusses (3) kontinuierlich an. Gegenläufig dazu sinkt die Geschwindigkeit (2) und nähert sich der definierten Grenzgeschwindigkeit an. Ist diese erreicht, wird das Telematiksystem (5) aktiviert und dadurch zusätzliche Netzlänge (4) zur Verfügung gestellt. Die damit ausgelöste zweite Phase der Simulation zeigt zunächst einen sprunghaften Abfall der Dichte (1) in Verbindung mit einem Anstieg der Geschwindigkeit (2). Sobald die geöffnete Nebenroute ausgelastet ist, stellt sich ein ähnliches Systemverhalten wie in Phase 1 ein. In Abhängigkeit der vorhandenen Netzkapazitäten werden danach schrittweise weitere Nebenrouten zur Verfügung gestellt. Im dargestellten Modell sind zwei weitere "Telematikschritte" möglich, bei denen das Gesamtnetz jeweils um eine konstante Straßenlänge vergrößert wird. Infolge dieser Modellannahme verringert sich die Wirkung der Telematik, da der Netzzuwachs relativ abnimmt.

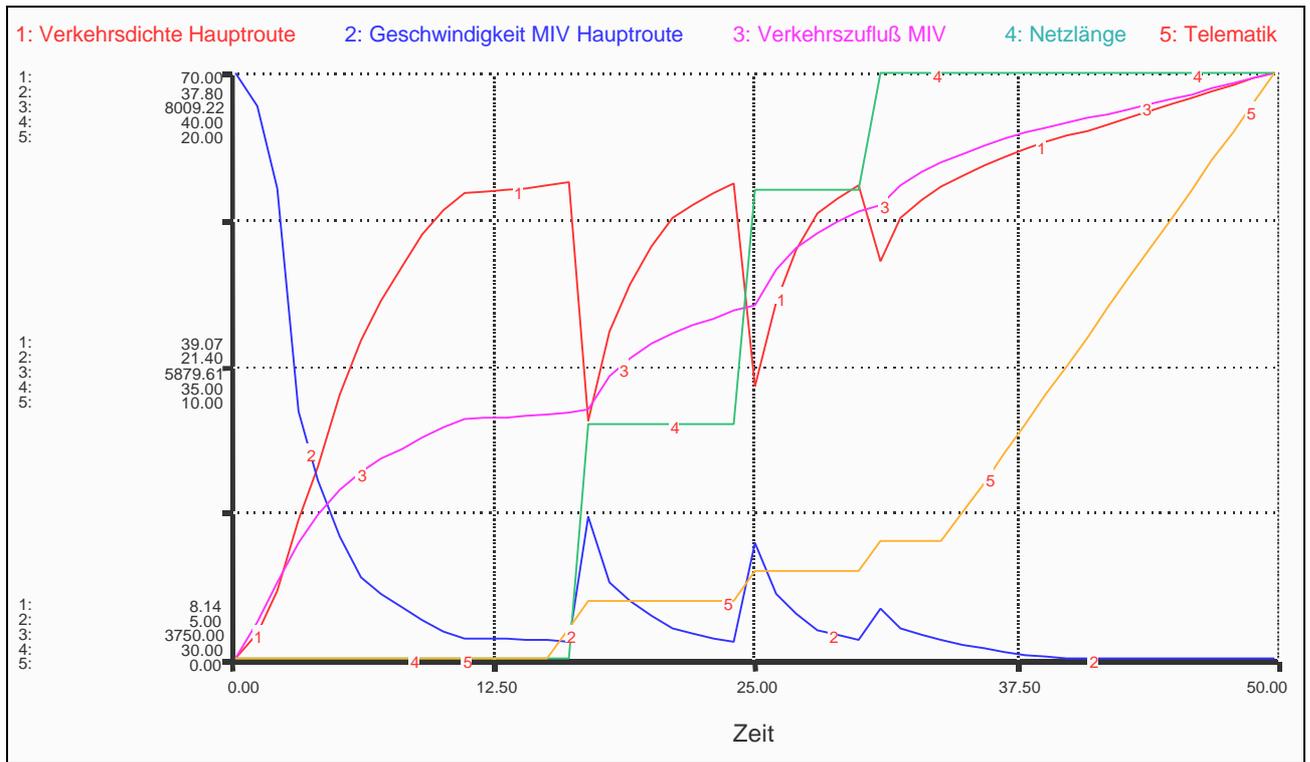


Abbildung 11: Ergebnis der Simulationsrechnung mittels Stella®

Hauptargument in der Diskussion für den Einsatz von Telematiksystemen ist neben der Förderung der Verkehrssicherheit eine zumindest kurz- und mittelfristige Anhebung der Verkehrsqualität auf den Hauptverkehrsrouten. Letzteres wird durch das vorgestellte Modell gut nachgebildet: Durch den Einsatz von Telematik (stufenweise Netzverlängerung) kann die Auslastung und damit das Systemversagen zeitlich verzögert werden, wie sich anhand der Dichteänderungen in Abbildung 12 ablesen läßt. Die maßgebende Einflußgröße ist dabei die zur Verfügung stehende Länge der nutzbaren Nebenrouten. Das Ausmaß der Zeitverzögerung ist schwer quantifizierbar. Aus Sicht der Autoren ist eine Abschätzung nur mit Hilfe einer dynamischer Modellbildung möglich, wie sie in diesem Beitrag vorgestellt wird.

Wie auch immer diese Zeitverzögerung bewertet wird, es muß berücksichtigt werden, daß es durch die Telematikanwendung gleichzeitig zu einer Anhebung der Verkehrsmenge im Gesamtnetz kommt. Abbildung 13 stellt gegenüber, wie sich der Zuwachs ohne Telematikeinsatz aufgrund des hohen Auslastungsgrades allmählich verringert, während beim Einsatz von Telematik jede einzelne Netzverlängerung zu einem neuerlichen Anstieg führt. Somit ergibt sich neben dem oben erwähnten Effekt der Zeitverzögerung auch eine größere Verkehrsmenge im Netz, deren Ausmaß wiederum durch dynamische Modellbildung abgeschätzt werden kann. Die Ausgangsproblematik der Verkehrsüberlastung wird daher durch den Telematikeinsatz nicht gelöst, sondern nur zeitlich hinausgeschoben. Außerdem muß davon ausgegangen werden, daß durch das Anwachsen der Verkehrsmenge und durch deren räumliche, strukturelle und umweltrelevante Folgen problematische Systemwirkungen potenziert bzw. neue Probleme ausgelöst werden.

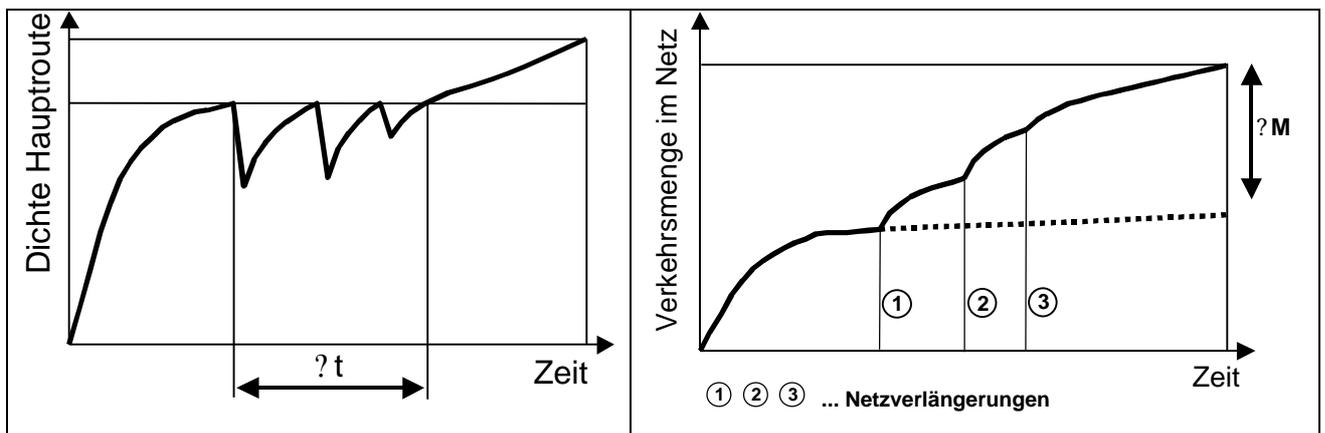


Abb. 12: Zeitliches Verzögern (?t) des Systemversagens durch Telematikeinsatz	Abb. 13: Verkehrsmengenzuwachs (?M) durch Netzvergrößerung
---	--

Die vorliegende Systemanalyse kommt daher zu dem Schluß, daß das Problem "Verkehrsüberlastung" nicht durch Telematikeinsatz im Sinne von Netzverlängerung gelöst werden kann. Durch eine Modellerweiterung müßte untersucht werden, ob die Lösung des Verkehrsproblems nicht vielmehr in dirigistischen Maßnahmen zur Regulierung der Verkehrsmenge zu suchen sind, für deren Umsetzung sich die Möglichkeiten der Telematik geradezu anbieten (elektronisch gesteuerte Zufahrtsbeschränkung und Geschwindigkeitsregulierung, dirigistische Veränderung des Modal Split).

4 ZUSAMMENFASSUNG

Mit der vorliegenden Systemanalyse werden mittels dynamischer Programmierung die Auswirkungen eines Einsatzgebietes von Telematikanwendungen im Verkehrswesen, nämlich "Verkehrsumleitung bei Überlastung" untersucht. Dabei kommen die Autoren zu dem Schluß, daß durch Telematik einerseits eine zeitverzögernde Wirkung hinsichtlich des Systemversagens erreicht werden kann, es aber andererseits zu einem Anstieg der Gesamtverkehrsmenge kommt.

5 LITERATUR

- Emberger G.: Interdisziplinäre Betrachtung der Auswirkungen verkehrlicher Maßnahmen auf sozioökonomische Systeme, Dissertation an der Sozial- und Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Wien, 1999.
- Forrester J.W.: Der teuflische Regelkreis, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1972.
- Riedl R.: Biologie der Erkenntnis, Verlag Paul Parey, 3. Auflage, 1981.
- Stella II, An Introduction to Systems Thinking, High Performance Systems, Handbuch zur Software, Hannover, 1994.