

Gerhard Bergholz, Dresden

Signalflußsimulation von Nachrichtenverkehrsmodellen

Mit diesem Beitrag wird ein Signalflußmodell als Grundlage für die Simulation von großen Rechner-Netzwerken aufgestellt. Im Mittelpunkt der Betrachtungen steht die Modellaufstellung und die Machbarkeit der Simulation mit diesem Modell. Der prinzipiellen Implementierungsmöglichkeit wird große Aufmerksamkeit geschenkt, um über Schnittstellenprobleme und den Zeitaufwand für die Simulation einen Eindruck zu bekommen. Dabei werden die weitverbreiteten Werkzeuge MATLAB und SIMULINK genutzt.

Ziel unserer nachfolgenden Betrachtungen ist die Simulation eines Bedienungsnetzes als Signalflußmodell. In diesem Beitrag beschränken wir uns auf ein elementares Bedienungssystem mit einer Bedienstation als Grundmodell, das als Warte-Verlustsystem angesehen wird. Dabei werden einige Sachverhalte, die für die Simulation eines Bedienungsnetzes wichtig sind, mit berücksichtigt.

1 Vorbetrachtungen

Die Leistungsbewertung von modernen Rechner-Netzwerken (wie zum Beispiel des WWW) mit Hilfe der traditionellen Forderungsstromsimulation, wie sie für Bedienungsmodelle angewendet wird, ist entsprechend der Anforderungen dieser Netze an die Modellierung so aufwendig geworden, daß eine praktische Simulation mit den vorhandenen Methoden nicht mehr durchführbar scheint. Das zeigt sich besonders bei selbstähnlichem Verkehr (s. [6]). Das größte zeitaufwendige Hindernis für die Realisierbarkeit der ereignisorientierten Simulation ist die Notwendigkeit, eine sehr große Zahl von Ereignissen über längere Zeit parallel zu speichern und zu verarbeiten.

Für die oben genannte Klasse von Anwendungen müssen neue Wege der Simulation gesucht werden. Ein solcher Weg besteht darin, einen Wechsel vom traditionellen Paradigma der ereignisorientierten Simulation zu einem Paradigma vorzunehmen, das in der Literatur mit dem Begriff *Flußmodelle* (s. [2], [4], [8] und [9]) verbunden wird.

Ein wesentlicher Unterschied zur herkömmlichen Betrachtungsweise besteht darin, daß nicht die Zwischenankunftszeiten und Bedienzeiten, sondern die Ankunftsraten und Bedienraten als Zufallsgrößen eingeführt werden. Dabei verschwinden außerdem die Pakete als Forderungen aus dem Modell. Der Weg besteht hierbei darin, die Ereignisorientierung der Simulation einzuschränken oder zu verlassen. In diesem Flußmodell sind folgende Zufallsprozesse vorhanden: $A(t)$ - Ankunftsratenprozeß, $B(t)$ - Bedienratenprozeß, $G(t)$ - Verlustratenprozeß und $D(t)$ - Abgangsratenprozeß. Außerdem ändert sich der innere Zustand $Z(t)$, der als Warteschlangenlänge oder Pufferinhalt interpretiert wird. Um später als Bestandteil eines Bedienungsnetzes genutzt werden zu können, muß im Grundmodell mit einer Bedienstation auch der Abgangsratenprozeß $D(t)$ betrachtet werden.

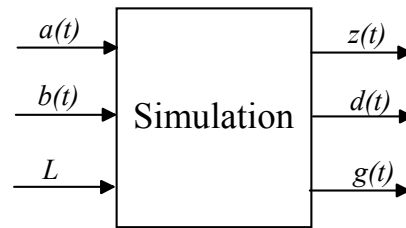


Bild 1: Zusammenhang zwischen den Realisierungen der Zufallsprozesse bei der Simulation

Bei der Simulation müssen Realisierungen der oben genannten Zufallsprozesse und der Zusammenhang zwischen diesen nachgebildet werden. Die Realisierungen werden dementsprechend mit $a(t)$, $b(t)$, $z(t)$, $d(t)$ und $g(t)$ bezeichnet. Dabei fassen wir die Ankunftsraten- und Bedienratenprozesse unter der Bezeichnung bestimmende (englisch: defining) Prozesse und die Zustandsprozesse, Abgangsratenprozesse und Verlustratenprozesse unter dem Namen abgeleitete (englisch: derived) Prozesse zusammen (s. [10]). In Bild 1 ist der Zusammenhang zwischen den Realisierungen der bestimmenden und abgeleiteten Prozesse dargestellt, wobei die konstante Puffergröße L mit eingezeichnet wurde.

Es ist bekannt, daß für die *Ankunftsprozesse* in modernen Kommunikationssystemen der Übergang von den bisher meist angewandten Poissonprozessen zu ON/OFF-Prozessen notwendig ist, um den realen Bedingungen im Rechnernetz Rechnung zu tragen. Deshalb muß für die aktuellen Ankunftsraten $a(t)$ eine Analyse beim Vorhandensein von ON/OFF-Prozessen durchgeführt werden.

In Bild 2a ist ein entsprechender paketorientierter Ereignisstrom mit 4 ON-Phasen angegeben.

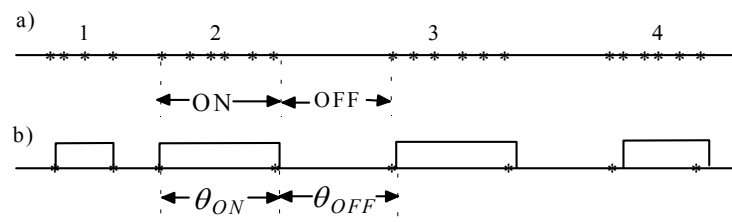


Bild 2: Übergang vom Ereignisstrom zum Flüssigkeitsfluß

Um den Aufwand bei der Simulation zu verringern, werden in den Flußmodellen nur die beiden sprungförmigen Veränderungen beim Übergang von ON nach OFF und von OFF nach ON berücksichtigt, während die dazwischen liegenden Ereignisse, die Paketankünften entsprechen, vernachlässigt werden (s. Bild 2b). Dem Ereignisstrom jeder ON-Phase wird anstelle dessen ein Flüssigkeitsfluß mit einer Flußrate λ zugeordnet. Es wird jetzt angenommen, daß die Ankunftsraten λ innerhalb der ON-Phase konstant sind und die Dauern der ON- und OFF-Phasen Θ_{on} und Θ_{off} jeweils exponentiell verteilt sind. Diese Annahmen sind für die Durchführung der Simulation nicht zwingend. In der Praxis wird häufig nicht nur ein einzelner Ankunftsprozeß betrachtet, sondern der Summenprozeß für die Überlagerung von n ON/OFF-Ankunftsprozessen. Ein Flußmodell, das über die Ereignisse an den ON/OFF-Übergängen nachgebildet wird heißt *ereignisorientiertes Flußmodell*.

Die nachfolgenden Betrachtungen werden in drei Etappen durchgeführt. Als erstes wird im Abschnitt 2 das Signalflußmodell dargestellt. Danach wird im Abschnitt 3 die hierarchisch aufgebaute Signalflußdarstellung des elementaren Bedienungssystems für das zeitkontinuierliche Signalflußmodell durchgeführt, die gleichzeitig das graphische Programm für die Simulation ist. Im Abschnitt 4 erfolgt eine erste Betrachtung der Genauigkeit und des Berechnungsaufwandes für das zeitkontinuierliche Signalflußmodell als Funktion der Abtastzeit.

2 Signalflußmodelle

Es ist naheliegend nach Simulationsmethoden zu suchen, die keine Ereignisorientierung mehr enthalten. Als gewissen Gegensatz zum ereignisorientierten Flußmodell führen wir deshalb das Signalflußmodell ein. Der Grund für diese Bezeichnung besteht darin, daß wir in diesem Modell alle Prozesse als Signale auffassen, wobei die Ereignisorientierung verlassen wird. Dementsprechend kann in diesem Fall synonym zur Bezeichnung Prozeß auch die Bezeichnung Signal verwendet werden. Wir können also z. B. den Prozeß $a(t)$ auch Ankunftssignal nennen.

Der Vorteil der Signalorientierung besteht darin, daß auf eine Ereignisorientierung der Simulation völlig verzichtet wird, was den strukturellen Aufbau des Simulators wesentlich vereinfacht.

Eine wichtige Unterteilung der Signalflußmodelle kann in zeitdiskrete und zeitkontinuierliche Signalflußmodelle erfolgen. Beim zeitdiskreten Signalflußmodell wird angenommen, daß alle Signale zeitdiskret mit äquidistantem Zeitabstand h sind. Ein solches System wird in der Signalflußtheorie manchmal auch Tastsystem genannt. Das zeitkontinuierliche Signalflußmodell zeichnet sich dadurch aus, daß alle Zeitwerte innerhalb der Beobachtungszeit T angenommen werden können.

Gleichungen für das zeitkontinuierliche Signalflußmodell

Wir führen jetzt die mathematischen Beziehungen für das zeitkontinuierliche Signalflußmodell ein. Es wird eine Bedienstation mit einem endlichen Puffer P als Warteraum für die wartenden Forderungen und einem Einfachserver S für deren Bedienung betrachtet. Zum Zeitpunkt t hat der Ankunftsrateprozeß am Eingang des Puffers die Rate $a(t)$ und wird mit der Bedienrate $b(t)$ im Server entladen. Der aktuelle Pufferinhalt (Warteschlangenlänge), der als Zustand angesehen werden kann, wird mit $z(t)$ bezeichnet. Die Pufferkapazität (Warteraumgröße) heißt L . Die Abflußrate vom Server nach außen wird mit $d(t)$ bezeichnet und die Verlustrate wird $g(t)$ genannt. Die Zeitvariable t soll sich im Intervall $[0, T]$ befinden. Es wird angenommen, daß zu Beginn der Simulation der Puffer leer ist, was bedeutet $z(0) = 0$. Des weiteren gilt für ein zeitkontinuierliches Signalflußmodell mit wertkontinuierlichem Ankunftssignal die Annahme, daß die Größen $a(t)$, $b(t)$, $z(t)$, $d(t)$ und $g(t)$ kontinuierlich und differenzierbar sind. Für ein zeitkontinuierliches Signalflußmodell mit wertdiskretem Ankunftssignal wird eine stückweise Stetigkeit und Differenzierbarkeit dieser Signale angenommen.

Von Wardi und Melamed (s. [7], [10]) wurde ein kontinuierliches Flußmodell (Continuous Flow Model), abgekürzt CFM genannt, eingeführt. Dabei wurde dort von stückweise stetigen und differenzierbaren Prozessen ausgegangen. Die auf dieser Grundlage aufgestellten Gleichungen, die den Zusammenhang zwischen den abhängigen Signalen und den unabhängigen Signalen herstellen, konnten von uns in leicht modifizierte Form übernommen werden, wobei der Gültigkeitsbereich

entsprechend unserer obigen Annahmen für die beiden Fälle wertkontinuierliches und wertdiskretes Ankunftssignal unterschiedlich angenommen wird.. Für die Bestimmung des Zustands $z(t)$ gilt dementsprechend

$$\frac{dz}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{if } z(t) = 0 \text{ and } a(t) - b(t) \leq 0 \text{ or } (z(t) = L \text{ and } a(t) - b(t) \geq 0) \\ a(t) - b(t) & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

Die Bestimmung der Abflußrate $d(t)$ ergibt sich mit

$$d(t) = \begin{cases} \min\{a(t), b(t)\} & \text{if } z(t) = 0 \\ b(t) & \text{if } z(t) > 0 \end{cases} \quad (2)$$

Für die Ermittlung der Verlustrate gilt der Ansatz

$$g(t) = \begin{cases} a(t) - b(t) & \text{if } z(t) = L \text{ and } a(t) - b(t) \geq 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

Diese Gleichungen werden im Abschnitt 4 mit Hilfe von SIMULINK in Form eines Signalflußplanes implementiert.

Beim zeitkontinuierlichen Signalflußmodell muß zwischen dem gedanklichen Modellansatz und dessen Simulationsimplementierung unterschieden werden. Der gedankliche Modellansatz geht von einer kontinuierlichen Zeit aus und es gibt in diesem Modell keine Abtastzeitpunkte. Mit dem Analogrechner konnte dieses Gedankenmodell auch praktisch implementiert werden. Die Implementierung der kontinuierlichen Zeit auf einem Digitalrechner kann dagegen nur als Approximation an entsprechenden zeitlichen äquidistanten Stützstellen mit der Abtastzeit h unter Verwendung geeigneter Lösungsverfahren erfolgen. Zu beachten ist hierbei, daß alle drei Modellgleichungen (1), (2) und (3) zu den gleichen äquidistanten Abtastzeitpunkten berechnet werden. In einem Bedienungsnetz gilt die Berechnung zu den gleichen Abtastzeitpunkten auch für die Berechnung der einzelnen Bedienstationen

Zeitkontinuierliches Signalflußmodell mit wertdiskretem Ankunftssignal

Wir versuchen jetzt den wertdiskreten Summenankunftsprozeß, der durch die Überlagerung von n ON/OFF-Prozessen entsteht, direkt als Ankunftsprozeß des elementaren Bedienungssystems zu nutzen. Als Bedienprozeß wird der Einfachheit halber eine konstante Bedienzeit angenommen. Dabei zeigt sich, daß das Modell mit wertdiskretem Ankunftsprozeß und konstanter Bedienzeit zu einem stückweise wertkontinuierlichen Zustandsprozeß mit Gleichung (1) führt. Das sich daraus ergebende Signalflußmodell unter Einbeziehung der Gleichungen (2) und (3) wird Signalflußmodell mit wertdiskretem Ankunftsprozeß genannt.

In der Systemtheorie wird bei der Untersuchung analoger (d.h. wertkontinuierlicher zeitkontinuierlicher) Systeme die sogenannte Sprungantwortfunktion, die auch Übergangsfunktion genannt wird, für die Analyse der dynamischen Eigenschaften eines Signalflußblockes genutzt.

In Bild 3 wurde für das Zustandsmodell ein Signalflußblock eingeführt. Am Eingang des Signalflußblockes wird ein Sprungsignal angelegt und am Ausgang des Signalflußblockes erhält man die entsprechende Übergangsfunktion. Dabei ist die Differenz zwischen Ankunftssignal und Bediensignal $a(t) - b$ das Eingangssignal und der Zustand $z(t)$ das Ausgangssignal des

Signalflußblockes. Am Ausgang ergibt sich dann eine Sprungantwortfunktion entsprechend der Beziehung (1).

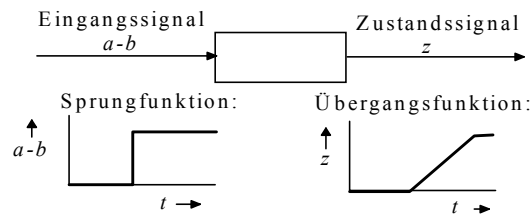


Bild 3: Sprungantwortfunktion für den Signalflußblock

Man kann jetzt das wertdiskrete Ankunfts-signal für die Überlagerung von n ON/OFF-Prozessen als eine endliche Folge von Sprungeingangssignalen auffassen. Wir haben es also beim Zustandsprozeß mit einem stückweise wertkontinuierlichen Prozeß zu tun, wobei die wertkontinuierlichen Abschnitte aus Übergangsfunktionen bestehen. Auf dieser Grundlage wird der Zustandsprozeß zu einer Folge von Übergangsprozessen für das Signalflußglied.

3 Simulation des zeitkontinuierlichen Signalflußmodells für ein elementares Bedienungssystem

Wie gehen jetzt dazu über, das zeitkontinuierliche Signalflußmodell, das in den Gleichungen (1), (2) und (3) seinen mathematischen Ausdruck findet, zu implementieren. Für die Simulation der wertkontinuierlichen Signalflußmodelle kann ein Werkzeug herangezogen werden, das für die Simulation von Signalflußsystemen entwickelt wurde. Wie die nachfolgenden Betrachtungen zeigen, ist das Werkzeug SIMULINK, unter Nutzung von MATLAB für die Parameterversorgung und Signalauswertung, besonders gut für diesen Zweck geeignet. Das gilt nicht nur für das zeitkontinuierliche sondern auch für das zeitdiskrete Signalflußmodell. Und auch für die Simulation eines Bedienungsnetzes gilt diese Aussage.

Das Vorhandensein einer Anzahl geeigneter Lösungsverfahren für die Lösung der obigen Differentialgleichungen (z.B. verschiedener Formen des Runge-Kutta-Verfahrens) in MATLAB und SIMULINK macht die numerische Umsetzung der Gleichungen (1), (2), und (3) effizient (Von uns wird der SIMULINK-Solver ode45 genutzt, der dem Runge-Kutta-Verfahren der Ordnung 4 und 5 nach Dormand-Price entspricht.). Ein bedeutender Vorteil dieses Herangehens besteht darin, daß wir es hier mit einem über Jahrzehnte auf den Gebieten Regelungstechnik, mechanische Systeme, Signalverarbeitung, Kommunikationstechnik und Ökologie entwickelten und erprobten Apparat unter der Bezeichnung dynamische Systeme zu tun haben, für den in MATLAB, aber besonders in SIMULINK umfangreiche ausgefeilte Werkzeuge zur Verfügung stehen, die u. a. auch als zeitdiskreten Bestandteil die Lösung von Differenzgleichungen und von gemischten Modellen einbezieht. Wichtig ist für die Implementierung der Gleichungen (1), (2) und (3) auch das Vorhandensein von Bedingungsoperatoren, logischen Operatoren und Schaltern, die in SIMULINK innerhalb des Signalflußplanes eingesetzt werden können

Das Gesamtmodell für die Simulation eines elementaren Bedienungssystems ist hierarchisch aufgebaut (s. Bild 4). Dieser hierarchische Aufbau kann direkt in SIMULINK umgesetzt werden. Dabei wird als erstes die Erzeugung der einzelnen Ankunftsrateprozesse dargestellt. Danach

erfolgt die Darstellung der drei Teilmodelle des Stationsmodells und anschließend das Zusammenspiel dieser drei Teilmodelle im Stationsmodell. Schließlich wird am Ende dieses Abschnitts das Gesamtmodell für die Simulation des elementaren Bedienungssystems als Signalflußplan mit den entsprechenden Ausgängen, die eine geeignete Signalauswertung in MATLAB ermöglichen, angegeben. Bei dieser graphischen Darstellung ist zu beachten, daß die SIMULINK-Signalflußpläne die graphischen Programme für die Simulation in SIMULINK sind und für die Durchführung der Simulation direkt genutzt werden können.

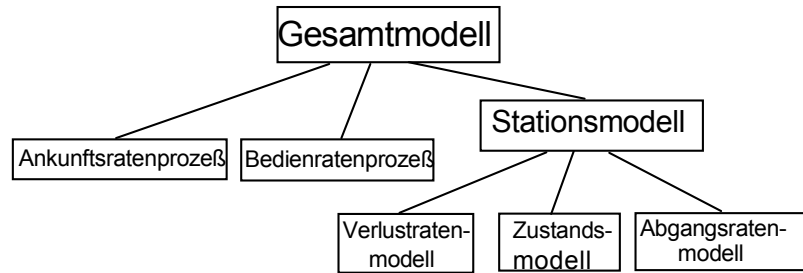


Bild 4: Hierarchischer Aufbau des Signalflußplanes

Erzeugung der Ankunftsprozesse

Wir wollen jetzt als wertdiskreten Ankunftsrateprozess die überlagerten ON/OFF-Prozesse benutzen. Wichtig ist hierbei, daß man die ereignisorientierte Simulation des Zustandsmodells vermeidet. Für die Nachbildung des zeitlichen Verlaufs eines wertdiskreten ON/OFF-Prozesses kann mit MATLAB ein entsprechender Algorithmus implementiert werden, der den Zusammenhang zwischen der mittleren On-Phasen-Dauer T_{on} , der mittleren OFF-Phasen-Dauer T_{off} , der Ankunftsrate λ während der On-Phase und der Stichprobengröße N einerseits und der Ereignisfolge $\{t_i, a_i\}$ andererseits herstellt.

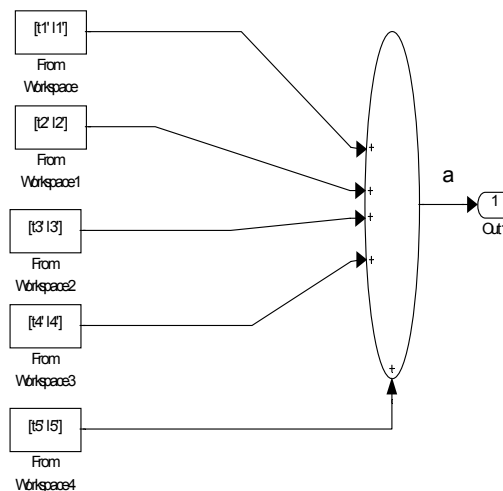


Bild 5: Signalflußplan für die Überlagerung von 5 ON/OFF-Ankunftsprozessen

Die Ereignisfolgen $\{tk_i, lk_i\}$ für die einzelnen ON/OFF-Prozesse mit $(k = 1, 2, \dots, n)$ sind die Eingangsgrößen in eine SIMULINK-Signalflußplan für die Erzeugung des überlagerten Summenprozesses (s. Bild 5). Die Überlagerung zum Summenankunftsstrom a erfolgt durch den Summenblock sum (s. Bild 5), in den die einzelnen ON/OFF-Prozesse einmünden.

Dabei ist zu beachten, daß die Simulation der Überlagerung der ON/OFF-Prozesse in SIMULINK nicht wertdiskret sondern zeitdiskret erfolgt. Damit beschränkt sich die wertdiskrete Simulation auf die Nachbildung der einzelnen ON/OFF-Prozesse in MATLAB, die für die einzelnen ON/OFF-Prozesse völlig unabhängig voneinander durchgeführt werden kann. Mit dem Signalflußplan in Bild 5 wird der wertdiskrete Ankunftsprozeß als ein stückweise kontinuierlicher Ankunftsprozeß interpretiert.

In einem Bedienungsnetz müssen nur die ON/OFF-Ankunftsprozesse des Gesamtnetzes in MATLAB simuliert werden, während die Verbindungen zwischen den einzelnen Bedienstationen direkt innerhalb von SIMULINK über die Abgangssignale $d(t)$ zeitkontinuierlich nachgebildet werden.

Teilmodelle der Bedienstation

Nach den Gleichungen (1), (2) und (3) können wir für die Bedienstation drei Teilmodelle unterscheiden: das Zustandsmodell, das Abgangsratenmodell und das Verlustratenmodell. Diese drei Teilmodelle werden nachfolgend in Form von SIMULINK-Signalflußplänen dargestellt.

Als erstes beschreiben wir den Signalflußplan des *Zustandsmodells* (s. Bild 6), bei dem die Gleichung (1) in Blöcke des Signalflußplanes umgesetzt wird. Die Beziehung der rechten Seite mit der zweiten Zeile von (1) ergibt bei der Überführung in den Bildbereich der Laplace-Transformation die Beziehung

$$z^*(s) = (1/s) * (a^*(s) - b^*(s))$$

Es muß also vor $z(t)$ ein Integrierer $(1/s)$ geschaltet werden. Die Bedingungen der rechten Seite werden durch relationelle Operatoren, logische Operatoren und dem switch-Operator erzeugt, wobei als zweiter Eingang die Konstante 0 zugeführt wird. Gegenüber (1) werden folgende Änderungen vorgenommen. Anstelle von $z(t) = 0$ wird $z(t) \leq 0$ und anstelle von $z(t) = L$ wird $z(t) \geq L$ genutzt. Bezüglich des Ergebnisses ist diese Änderung ohne Einfluß, aber praktisch wird die Sicherheit für das richtige Ergebnis erhöht, wenn man berücksichtigt, daß z zustandskontinuierlich ist.

Das Teilmodell in Bild 6 wird als SIMULINK-Submodell genutzt. Dementsprechend muß die Signaldifferenz $a(t) - b(t)$ von außen über In1 zugeführt werden. Das Zustandssignal $z(t)$ wird nach außen über Out1 abgeführt. Außerdem wird die Bedingung

$$z(t) \leq 0 \text{ and } a(t) - b(t) \geq 0$$

als Signal F zur weiteren Nutzung im Verlustratenmodell über Out2 nach außen abgeführt.

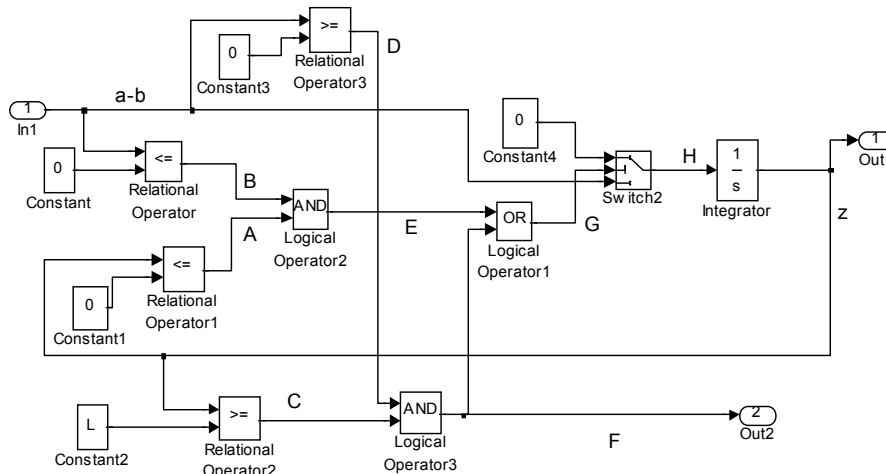


Bild 6: Signalflußplan des Zustandsmodells

Wir gehen jetzt zum *Abgangsratenmodell* (s. Bild 7) auf der Grundlage der Gleichung (2) über. Man kann dieses Teilmodell auch Abflußratenmodell nennen. Dieses Modell ist wesentlich einfacher. Für die Sicherung des Minimums wird der Minimax-Operator min genutzt und für die Bedingung der switch-Operator. Für die Zuführung der Signale $a(t)$ und $b(t)$ von außen werden die Eingänge In1 und In2 genutzt. Über den Eingang In3 wird das vom Zustandsmodell kommende Signal $z(t)$ zugeführt. Der einzige Ausgang dient dem Signal.

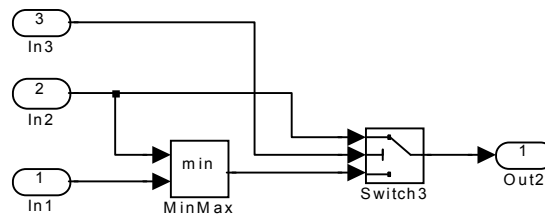


Bild 7: Signalflußplan des Abgangsratenmodells

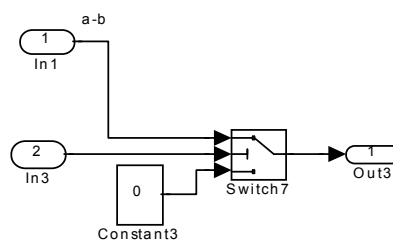


Bild 8: Signalflußplan des Verlustratenmodells

Als letztes Teilmodell der Bedienstation betrachten wir das *Verlustratenmodell* auf der Grundlage der Gleichung (3). Der entsprechende Signalflußplan wird in Bild 8 angegeben. Der Vergleich wird wieder mit einem switch-Operator durchgeführt. Das Eingangssignal In1 liefert die Signaldifferenz $a(t) - b(t)$, und über In3 wird das Steuersignal F der Bedingung von (1) zugeführt. Am Ausgang ist nur Out3 für das Signal $g(t)$ vorhanden.

Modell der Bedienstation

Nachdem die drei Teilmodelle als Submodelle eingeführt wurden, kann jetzt dazu übergeordnet das Modell der Bedienstation in Bild 9 betrachtet werden. Dabei wird die Möglichkeit des hierarchischen Modellaufbaus von SIMULINK genutzt. Obwohl dieses Modell zu den drei oben dargestellten Teilmodellen übergeordnet ist, stellt es selbst auch ein Submodell dar, das in das übergeordnete Gesamtmodell eingeordnet ist (s. Bild 10).

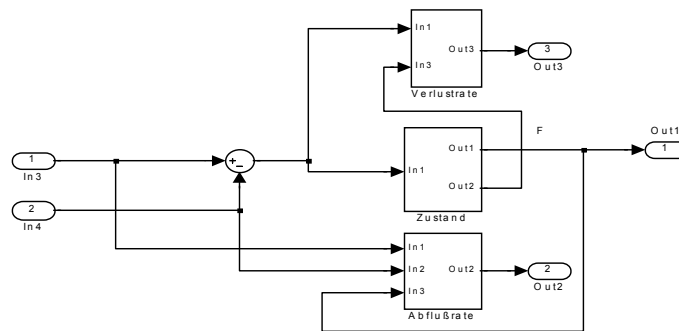


Bild 9: Signalflußplan für das Modell der Bedienstation

In diesem Modell sind als einzige Blöcke die drei Teilmodelle enthalten. Die beiden Eingangssignale $a(t)$ und $b(t)$ kommen über In3 und In4. Als Verbindung zwischen dem Zustandsmodell und dem Abgangsratenmodell tritt $z(t)$ auf und als Verbindung zwischen dem Zustandsmodell und dem Verlustratenmodell wird die entsprechende Bedingung F weitergeleitet. Als Ausgänge Out1, Out2 und Out3 dienen die Signale $z(t)$, $d(t)$ und $g(t)$.

Signalflußplan des Gesamtmodells

Wir gehen jetzt zum Signalflußplan des Gesamtmodells für die Simulation eines elementaren Bedienungssystems über (s. Bild 10).

Zusätzlich zum Block für die Bedienstation müssen auf der Eingangsseite die Erzeugung der Eingangssignale der Bedienstation innerhalb des Gesamtmodells und auf der Ausgangsseite die Weiterleitung der Ausgangssignale in den Arbeitsraum (Workspace) von MATLAB gesichert werden.

Die Erzeugung der Eingangssignale erfolgt mit dem entsprechenden zusammengesetzten Block Ankunftsprozeß für die Generierung der Überlagerung von n ON/OFF-Prozessen (s. Bild 5) und der Konstantwertquelle Bedienprozeß. Im Signalflußplan ist die Weiterleitung aller signifikanten Signale an den Arbeitsraum von MATLAB über die Böcke 'To Workspace' vorgesehen. Der Aufruf des in Bild 10 dargestellten Signalflußplanes führt zur Ausführung der Simulation des Signalflußmodells unter Nutzung der entsprechenden Submodelle.

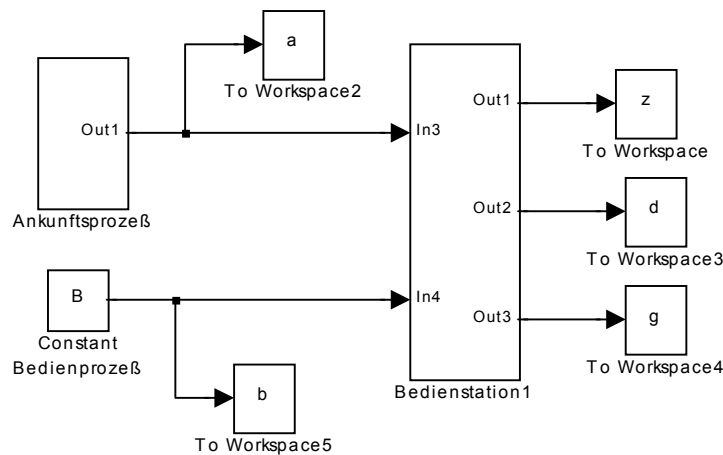


Bild 10: Signalflußplan für das Gesamtmodell

Dabei ist die Aufstellung eines MATLAB-Programmes für die Parameterbereitstellung, den Aufruf des SIMULINK-Programmes und die Verdichtung der Ausgangssignale des SIMULINK-Programmes zweckmäßig. Mit Hilfe von MATLAB können die Parameter L -Puffergröße, T_{on} -Dauer der ON-Phase, T_{off} -Dauer der OFF-Phase, λ - Ankunftsrate für die ON-Phase für SIMULINK bereitgestellt werden. Eine Auswertung und Verdichtung der Ausgangssignale von Bild 10 kann ebenfalls mit MATLAB erfolgen. Genauigkeit und zum Berechnungsaufwand des zeitkontinuierlichen Signalflußmodells.

4 Zur Genauigkeit und zum Berechnungsaufwand des zeitkontinuierlichen Signalflußmodells

Beim zeitkontinuierlichen Signalflußmodell muß zwischen dem gedanklichen Modellansatz und dessen Simulationsimplementierung unterschieden werden. Der gedankliche Modellansatz geht von einer kontinuierlichen Zeit aus und es gibt in diesem Modell keine Abtastzeitpunkte. Mit dem Analogrechner konnte früher dieses Gedankenmodell auch implementiert werden. Die Implementierung der kontinuierlichen Zeit kann dagegen auf einem Digitalrechner nur als Approximation mit entsprechenden zeitlichen äquidistanten Stützstellen erfolgen, in denen die Berechnungen durchgeführt werden. Dabei hängt die Genauigkeit der Simulation vom Lösungsverfahren und von der Abtastzeit h des Lösungsverfahrens der Differentialgleichungen ab. Je kleiner die Abtastzeit h gewählt wird, um so genauer werden die Simulationsergebnisse. Andererseits gilt, genau so wie beim wertdiskreten Flußmodell, daß die Anzahl der Berechnungszeitpunkte bestimmend für die erforderliche Rechenzeit ist. So hängt beim zeitkontinuierlichen Signalflußmodell für eine vorgegebene Beobachtungszeit T die erforderliche Rechenzeit von der Abtastzeit h ab, wobei der erforderliche Berechnungsaufwand umgekehrt proportional zu h ist. Aber im Gegensatz zum wertdiskreten Flußmodell ist bei einem zeitkontinuierlichen Signalflußmodell die Anzahl der Berechnungszeitpunkte völlig unabhängig von der Größe des Bedienungsnetzes. Der Grund hierfür besteht darin, daß bei der Simulation alle Bedienstationen zeitsynchron im gleichen Zeittakt arbeiten.

Die Genauigkeit der Simulation als Funktion der Abtastzeit h kann grob durch den Vergleich des Verlaufs des Zustandsprozesses $z(t)$ für verschiedene Abtastzeiten bei identischer Realisierung der überlagerten ON/OFF-Ankunftsprozesse analysiert werden.

Wir haben für ein Beispiel mit 5 ON/OFF-Ankunftsprozessen und konstanter Bedienzeit den Vergleich vorgenommen. Um den Verlauf des Zustandsprozesses graphisch vergleichen zu können, wurde eine relativ kurze Beobachtungszeit von $T = 12$ Sekunden gewählt. Als Abtastzeiten wurden $h = 0.001, 0.01$ Sekunden angenommen. In unserem Beispiel gilt für die mittlere Zeit einer ON/OFF-Periode $T_{onoff} = 0.704$ Sekunden. In Bild 11 wurde der Vergleich für diese beiden Abtastzeiten angestellt. Dabei ist zu beachten, daß sich für die beiden verglichenen Abtastzeiten der Berechnungsaufwand um den Faktor 10 unterscheidet.

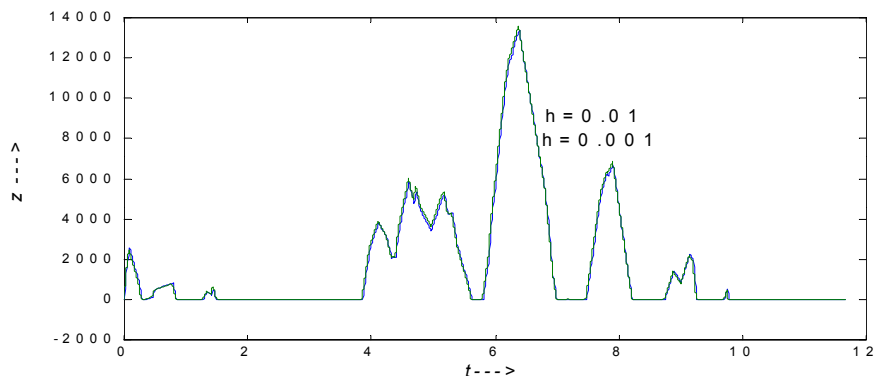


Bild 11: Vergleich des aktuellen Zustandsprozesses für verschiedene Abtastzeiten

Die sehr gute Übereinstimmung der beiden Zustandsverläufe in Bild 11 zeigt, daß eine Abtastzeit von $h = 0.001$ Sekunden nicht erforderlich ist. Auch eine weitere Erhöhung der Abtastzeit auf das Zehnfache bringt zwar eine schlechtere aber noch befriedigende Übereinstimmung des Zustandsverlaufs. Diese Ergebnisse werden durch einen Vergleich der Mittelwerte und Standardabweichungen bei größeren Beobachtungszeiten bestätigt werden.

Aus den obigen Vergleichen ist zu erkennen, daß die Simulation des Signalflußmodells bezüglich des Berechnungsaufwandes und der Genauigkeit ein vielversprechender Ansatz ist, wobei die im Vergleich zur ereignisorientierten Simulation besseren Verteilungsmöglichkeiten der Berechnungen auf parallele Prozessoren positiv wirksam werden können.

5 Ausblick

Bei den obigen Betrachtungen haben wir uns auf ein Einklassen-Modell beschränkt. Als nächster Schritt ist eine Modellerweiterung auf ein Zweiklassenmodell mit und ohne Prioritäten vorgesehen. In den weiteren Untersuchungen ist außerdem die Erweiterung der Simulation auf Bedienungsnetze geplant. Diese Arbeiten können ebenfalls im Rahmen von SIMULINK und MATLAB erfolgen.

6 Literatur

- [1] G. Bergholz: Digitale Simulation analoger Übertragungssysteme. Verlag Die Wirtschaft (1972)
- [2] Y.Guo et al.: Time-stepped Hybrid Simulation (TSHS) For Large Scale Networks. Proc. of INFCOM (2000)
- [3] D. C. Grünigen: Digitale Signalverarbeitung. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag München Wien (2002)

-
- [4] G. Haßlinger, Th. Klein: Breitband-ISDN und ATM-Netze. BG Teubner Verlag Stuttgart Leipzig (1999)
- [5] I. Hoffmann: MATLAB und SIMULINK. Addison-Wesley (1998)
- [6] U. Hofmann: Modellierung von Kommunikationssystemen. Manz Fortis Verlag Wien (2000)
- [7] B. Melamed et al.: Hybrid discrete-continuous fluid-flow simulation. Rutgers University and Georgia Institute of Technology (2001)
- [8] B. Liu et al.: A Study of Network Simulation Efficiency: Fluid Flow Simulation vs. Packet level Simulation. IEEE INFOCOM (2001)
- [9] B. Liu et al.: Fluid Simulation of Large Scale Networks: Issues and Tradeoffs. Las Vegas, NV, June (1999)
- [10] Y. Wardi, B. Melamed: Loss Volume In Continuous Flow Models: Fast Simulation And Sensitivity Analysis Via IPA. Georgia Institute of Technology (2000)