

Mehrklassen-Signalflußsimulation für Nachrichtenverkehrsmodelle

Mit diesem Beitrag wird ein Mehrklassen-Signalflußmodell als Grundlage für die Simulation von großen Rechner-Netzwerken aufgestellt. Im Mittelpunkt der Betrachtungen steht die Aufstellung des Modells und die Überprüfung der 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.

In diesem Beitrag betrachten wir anhand eines Beispiels eines Bedienungsnetzes mit vier Bedienstationen, wobei die Bedienstationen als Wartesysteme angesehen werden, wie Simulationsmodelle für Mehrklassen-Bedienungsnetzen aufgebaut werden können.

1 Vorbetrachtungen

1.1 Flußmodelle

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. [7]). 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. [[3], [5], [9] und [10]) 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 bei einem elementaren Wartesystem folgende Zufallsprozesse vorhanden: $A(t)$ - Ankunftsratenprozeß, $B(t)$ - Bedienratenprozeß und $D(t)$ - Abgangsratenprozeß. Außerdem ändert sich der innere Zustand $Z(t)$, der als Warteschlangenlänge oder Pufferinhalt interpretiert wird.

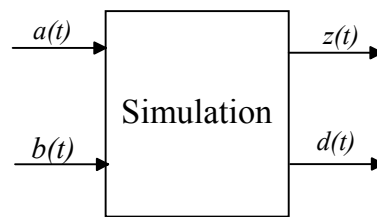


Bild 1: Zusammenhang zwischen den Realisierungen der Zufallsprozesse bei der Simulation

Bei der Simulation müssen Realisierungen der oben genannten Zufallsprozesse und der Zusammenhang zwischen diesen nachgebildet werden. Die Realisierungen werden dementsprechend mit $a(t)$, $b(t)$, $z(t)$ und $d(t)$ bezeichnet. Dabei fassen wir die Ankunftsraten- und Bedienratenprozesse unter der Bezeichnung Eingangsprozesse (englisch: defining process) Prozesse und die Zustandsprozesse und Abgangsratenprozesse unter dem Namen Ausgangsprozesse (englisch: derived process) zusammen (s. [11]). In Bild 1 ist der Zusammenhang zwischen den Realisierungen der Eingangs- und Ausgangsprozessen dargestellt.

1.2 Ankunftsratenprozesse

Es ist bekannt, daß für die *Ankunftsratenprozesse* 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.

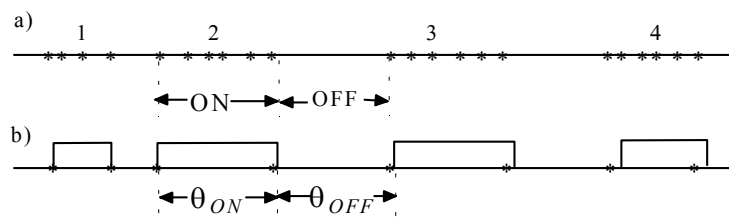


Bild 2: Übergang vom Ereignisstrom zum Kontinuumsfluß

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

1.3 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 als Grundlage der Simulation 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 durch den Verzicht auf die Ereignisorientierung der strukturelle Aufbau des Simulators mit synchroner zeitdiskrete Abtastung aller Signale wesentlich vereinfacht wird.

Die nachfolgenden Betrachtungen werden in drei Etappen durchgeführt. Als erstes wird im Abschnitt 2 das Mehrklassen-Signalflußmodell dargestellt. Danach wird in den Abschnitten 3, 4, 5 und 6 die Modellierung und Simulation einer Mehrklassen-Bedienstation betrachtet. Anschließend erfolgt im Abschnitt 9 die Darlegung der Auswertung der Simulation.

2 Beispiel eines Mehrklassen-Signalflußmodell eines Bedienungsnetzes

.Wir betrachten jetzt ein Bedienungsnetz, das aus M Bedienstationen, die wir mit B_i ($i=1,2,\dots,M$) bezeichnen, besteht. In Bild 3 ist ein Beispiel mit $M=4$ Stationen dargestellt. Dabei nehmen wir an, daß die einzelnen Bedienstationen Wartesysteme sind. In diesem Beispiel haben wir zwischen den Quellen Q_1, Q_2, Q_3 und Q_4 und Senken S_1, S_2, S_3 und S_4 die vier Kommunikationspfade P_1, P_2, P_3 und P_4 (s. Bild 3).

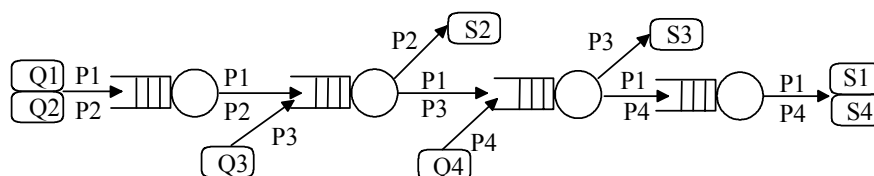


Bild 3: Beispiel eines Bedienungsnetzes mit 4 Bedienstationen

Weil wir die verschiedenen Kommunikationspfade unterscheiden müssen, entstehen in den einzelnen Bedienstationen Kommunikationsklassen, die den einzelnen Pfaden zugeordnet sind. In unserem Beispiel sind in den Bedienstationen B_1 und B_4 je 2 Klassen und in den Bedienstationen B_3 und B_4 je 3 Klassen vorhanden. Jeder Klasse K_{ij} ($i=1,2,\dots,M$; $j=1,2,\dots,K_i$) in der Bedienstation B_i wird ein Ankunftsratensignal $a_{ij}(t)$, ein Bedienratensignal $b_{ij}(t)$, ein Zustandssignal $z_{ij}(t)$ und ein Abgangsratensignal $d_{ij}(t)$ zugeordnet.

Bei den Mehrklassen-Bedienstationen können zwei Bedienungs-Disziplinen unterschieden werden:

- Bedienung ohne Prioritäten und
- Bedienung mit Prioritäten.

Bei der Bedienung ohne Prioritäten werden alle Kommunikationsklassen gleichberechtigt behandelt. Wir können hier von Processor-Sharing sprechen. Die Unterscheidung in verschiedene Kommunikationsklassen ist hier nur wegen der verschiedenen Pfade notwendig.

Bei der Bedienung mit Prioritäten wird jeder Kommunikationsklasse eine Priorität zugeordnet und die Klasse mit der höchsten Priorität wird gegenüber den niederrangigen Klassen solange bedient bis der Warteraum leer ist und keine Ankunftsrate für diese höchstrangige Klasse vorhanden ist. Anschließend wird die Klasse mit der darunter liegenden Priorität vorrangig bedient. Diese Prozedur wird nacheinander für alle Prioritätsklassen für die Signale anstehen durchgeführt bis wieder höherrangige Signale anstehen oder am Schluß die niederrangigste Klasse bedient wird.

Die ON/OFF-Ankunftsprozesse können mit Hilfe von MATLAB implementiert werden. Nachfolgend wird die entsprechende MATLAB-Funktion für die Erzeugung eines ON/OFF-Prozesses angegeben

Aus dem Bild 1 ist zu erkennen, daß für die Simulation des Bedienungsnetzes die Modelle der Ankunftsprozesse an den Quellen Q1, Q2, Q3 und Q4 und der Bedienstationen B1, B2, B3 und B4 implementiert werden müssen. Die Simulation der Ankunftsprozesse wird im nachfolgenden Abschnitt 3 betrachtet, während die Modellierung und Simulation der Mehrklassen-Bedienstationen einen breiteren Raum einnimmt und deshalb auf vier Abschnitte verteilt werden muß.

3 Nachbildung der ON/OFF-Ankunftsprozesse

Bei der Simulation der Ankunftsprozesse geht es um die Implementierung des in Bild 2b dargestellten ON/OFF-Prozesses. Dabei wird für die Nachbildung der Ankunftsprozesse MATLAB genutzt. In der Anlage wird das entsprechende MATLAB-Programm angegeben.

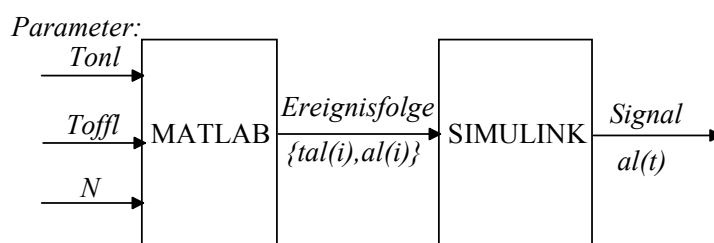


Bild 4: Erzeugung der Ereignisfolge eines ON/OFF-Prozesses in MATLAB und Überführung über SIMULINK in ein Signal

Die Wertepaare der Ankunftsprozesse werden an ein entsprechendes SIMULINK-Programm übergeben. In Bild 4 wird die Erzeugung der Ereignisfolge eines ON/OFF-Prozesses in MATLAB und die Überführung in SIMULINK in ein Ankunftssignal charakterisiert.

4 Zustands- und Abgangsratenmodelle für die Kommunikations- Klassen einer Mehrklassen-Bedienstation

In [1] wurde ein elementares Warte-Verlust-System (d.h. ein Bedienungssystem mit einer Bedienstation) mit einer Kommunikationsklasse betrachtet. Dort wurden auch die mathematischen Gleichungen für das Zustandsmodell, das Abgangsratenmodell und das Verlustratenmodell des Wart-Verlust-Systems angegeben. Man kann jetzt für jede Kommunikationsklasse derartige Gleichungen aufstellen, wenn wir davon ausgehen, daß für jede Klasse ein eigener Warteraum zur Verfügung steht. Da wir es hier mit einem Wartesysteme zu tun haben, fällt das Verlustratenmodell fort und das Zustandsmodell vereinfacht sich etwas.

Die Gleichung für das Zustandsmodell der Klasse K_{ij} in der Station B_i nimmt jetzt die Form

$$\frac{dz_{ij}(t)}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{if } z_{ij}(t) = 0 \text{ and } (a_{ij}(t) - b_{ij}(t)) \leq 0 \\ a_{ij}(t) - b_{ij}(t) & \text{else} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, K_i) \quad (1)$$

an, während die Gleichung für das Abgangsratenmodell der Klasse K_{ij} in der Station B_i die Form

$$d_{ij}(t) = \begin{cases} \min\{a_{ij}(t), b_{ij}(t)\} & \text{if } z_{ij}(z) = 0 \\ b_{ij}(t) & \text{if } z_{ij}(t) > 0 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, K_i) \quad (2)$$

hat.

In Bild 5 wird der Signalflußplan für die Gleichung angegeben, der bei der Implementierung mit SIMULINK entsteht. Dabei wurde anstelle der Bedingung $z_{ij}(t) = 0$ die Bedingung $z_{ij}(t) \leq 0$ gesetzt. Rein theoretisch ändert das am Ergebnis nichts. Aber praktisch wird dadurch die Genauigkeit erhöht, wenn man berücksichtigt, daß die a_{ij} und b_{ij} reell sind.

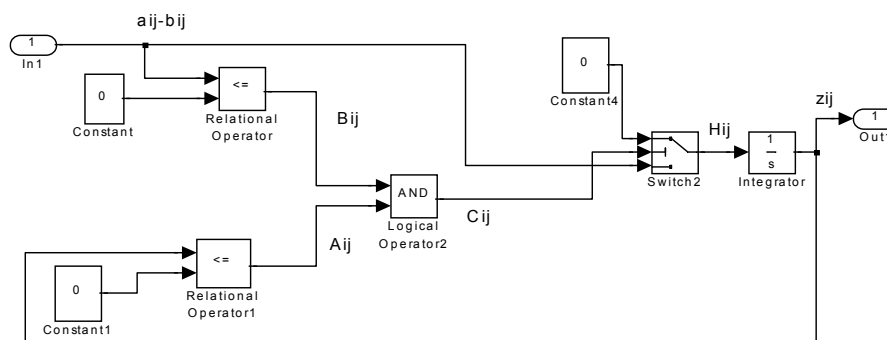


Bild 5: Signalflußplan des Zustandsmodells

Wir können diesen Signalflußplan mit Hilfe der Beziehungen

$$A_{ij} = z_{ij} \leq 0$$

$$B_{ij} = ((a_{ij} - b_{ij}) \leq 0)$$

$$C_{ij} = A_{ij} \text{ and } B_{ij}$$

$$H_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } C_{ij} > 0 \\ a_{ij} - b_{ij} & \text{else} \end{cases}$$

anhand der Gleichung (1) aufstellen.

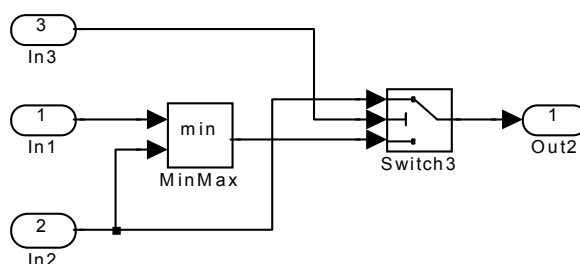


Bild 6: Signalflußplan des Abgangsratenmodells

In Bild 6 ist der Signalflußplan des Abgangsratenmodells, das in der Gleichung (2) mathematisch formuliert wurde, angegeben.

Wir müssen innerhalb des Stationsmodells für jede Klasse K_{ij} das Zustandsmodell und das Abgangsratenmodell nutzen. Aus Gründen der besseren Übersicht fassen wir diese beiden Modelle in Bild 7 zusammen. Dabei spielt eine Rolle, daß diese Modellansätze sowohl für die einzelnen Kommunikationsklassen K_{ij} sowohl für die Bedienungsdiziplin ohne Prioritäten als auch mit Prioritäten gelten.

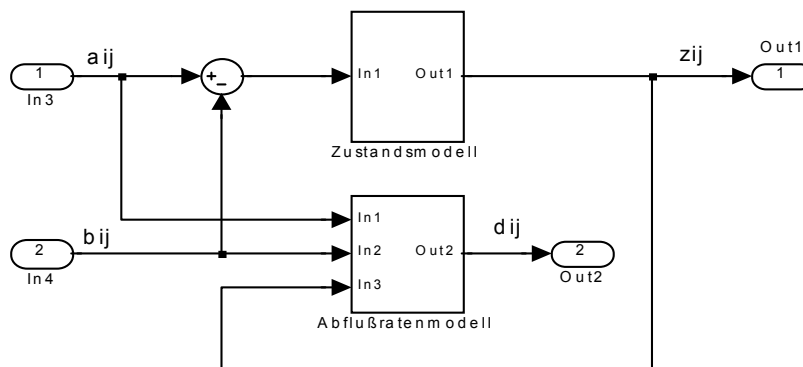


Bild 7: Zusammenfassung des Signalflußplanes für das Zustands- und Abflußratenmodells

5 Bedienratenmodelle einer Mehrklassen-Bedienstation

5.1 Modell der wirksamen Bedienraten für eine Einklassen-Bedienstation

Im Gegensatz zum Einklassenmodell können die Signale $b_{ij}(t)$ in (1) und (2) nicht einfach durch die vorgegebenen Bedienrate b_i der entsprechenden Station B_i ersetzt werden, sondern es muß ein Zusammenhang mit der vorgegebenen Bedienrate b_i hergestellt werden.

Wir führen jetzt den Begriff wirksame Bedienrate b_{wi} der Station B_i mit dem Ansatz

$$b_{wi}(t) = \sum_{j=1}^K b_{ij}(t) \quad (z)$$

ein und nennen die Größe $b_{ij}(t)$ wirksame Bedienrate der Klasse K_{ij} in der Station B_i . Bei einem Einklassensystem gilt nach (z)

$$b_{wi}(t) = b_{i1}(t)$$

Die wirksame Bedienrate ist in diesem Fall

$$b_{i1} = \begin{cases} 0 & \text{if } ((z_{i1}(t) = 0) \text{ and } (a_{i1}(t) = 0)) \\ b_i & \text{if } ((z_{i1}(t) > 0) \text{ or } ((z_{i1}(t) = 0) \text{ and } (a_{i1} > 0))) \end{cases}$$

Obwohl in (1) und (2) bei einem Einklassenmodell die Verwendung von b_i genügt, ist in diesem Fall die Benutzung der wirksamen Bedienrate b_{i1} auch richtig.

Wir betrachten jetzt die einzelnen Kommunikationsklassen K_{ij} der Station B_i unter der Bedingung, daß jede Klasse jeweils allein den Einfachbediener der Bedienstation belastet. Das entspricht dem Fall, daß jede Kommunikationsklasse eine eigene Bedienstation hat oder anders ausgedrückt tun wir so, als ob jeder Klasse ein Einklassenmodell entspricht. In diesem Fall können wir für jede Kommunikationsklasse K_{ij} der Bedienstation B_i die Signale E_{ij} und G_{ij} mit

$$E_{ij}(t) = (z_{ij}(t) = 0) \text{ and } (a_{ij}(t) = 0)$$

und

$$G_{ij}(t) = (z_{ij}(t) > 0) \text{ or } ((z_{ij}(t) = 0) \text{ and } (a_{ij}(t) > 0)).$$

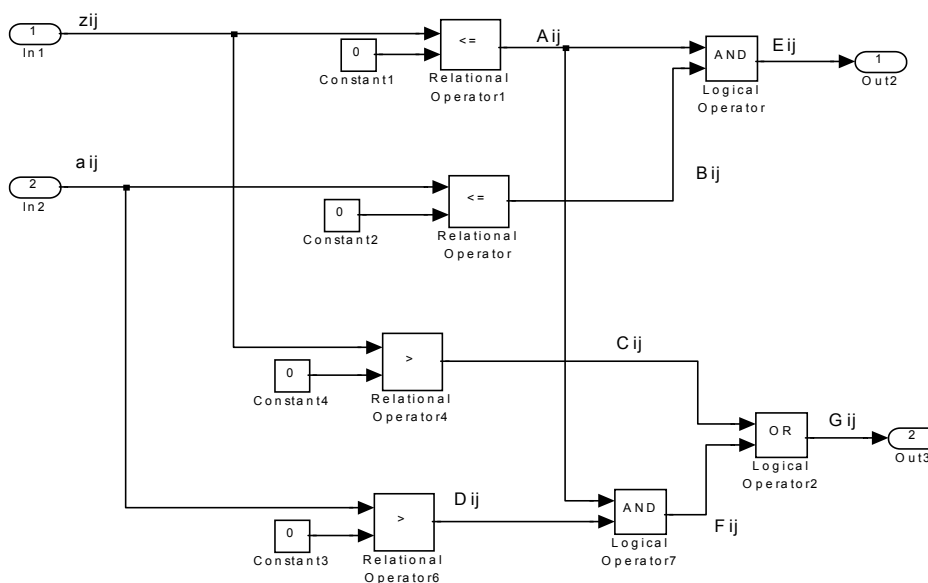


Bild 8: Modell für die Bestimmung der E_{ij} und G_{ij}

Diese Beziehungen können jetzt in einen Signalflußplan entsprechend Bild 8 implementiert werden. Dabei gelten die Ansätze

$$A_{ij} = (z_{ij} \leq 0)$$

$$B_{ij} = (a_{ij} \leq 0)$$

$$C_{ij} = z_{ij} > 0$$

$$D_{ij} = a_{ij} > 0$$

$$E_{ij} = A_{ij} \text{ and } B_{ij}$$

$$F_{ij} = A_{ij} \text{ and } D_{ij}$$

$$G_{ij} = C_{ij} \text{ or } F_{ij}$$

eingeführen. Hierbei gilt, daß in diesem Fall unter der Bedingung $E_{ij}(t)$ die Bedienrate b_i unwirksam und unter der Bedingung $G_{ij}(t)$ die Bedienrate b_i voll wirksam ist. In Bild 9 sind für ein Beispiel mit drei Kommunikationsklassen für die einzelnen Klassen die Zeitabschnitte, in denen die Bedingungen E_{ij} und G_{ij} gelten, eingetragen.

5.2 Bedienratenmodell für eine Mehrklassen-Bedienstation mit Prioritäten

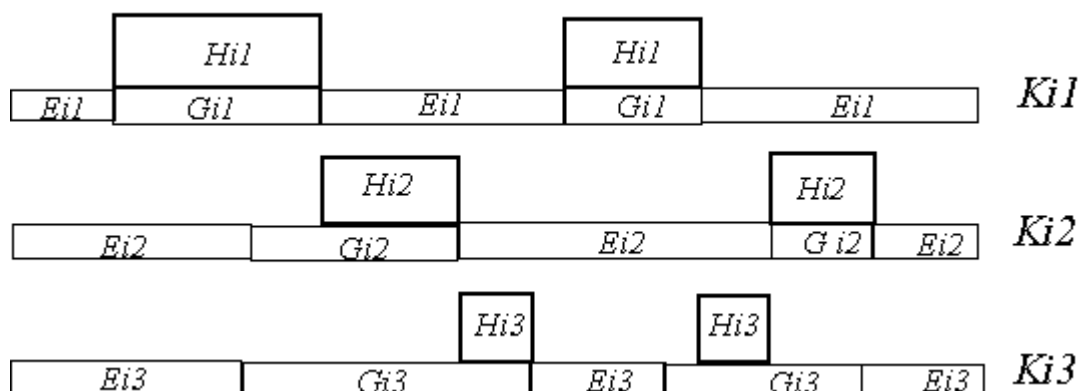


Bild 9: Zur Entstehung der wirksamen Bedienraten beim System mit Prioritäten

Auf dieser Grundlage kann jetzt bei der Bedienungsdisziplin mit Prioritäten für ein Modell mit K_i Kommunikationsklassen für die Bedienstation B_i ein allgemeiner Ansatz für die wirksame Bedienrate der verschiedenen Kommunikationsklassen gemacht werden. In diesem Fall nennen wir die Kommunikationsklassen auch Prioritätsklassen. Es gilt allgemein der Ansatz für K_i Prioritätsklassen der Bedienstation B_i

$$b_{ij} = \begin{cases} b_i & \text{if } H_{ij} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, K_i)$$

In Bild 9 sind die Abschnitte angegeben, in denen die Bedingung H_{ij} gilt. Es zeigt sich, daß in unserem Beispiel mit 3 Klassen sich

$$\begin{aligned} H_{i1} &= G_{i1} \\ H_{i2} &= G_{i2} \text{ and } E_{i1} \\ H_{i3} &= G_{i3} \text{ and } E_{i1} \text{ and } E_{i2} \end{aligned}$$

Allgemein erhalten wir auf dieser Grundlage für eine Bedienstation mit K_i Prioritätsklassen

$$\begin{aligned} H_{i1} &= G_{i1} \text{ if } j = 1 \\ H_{ij} &= G_{ij} \text{ and } E_{i1} \text{ and } E_{i2} \text{ and } \dots \text{ and } E_{ij-1} \text{ if } 1 < j \leq K_i \end{aligned}$$

Für diese Formeln kann man den Berechnungsaufwand als Zahl Q_{K_i} der erforderlichen logischen Operationen mit

$$Q_{K_i} = \sum_{l=0}^{K_i} (l-1),$$

ansetzen, woraus

$$Q_{K_i} = K_i^2 / 2$$

folgt: Der Berechnungsaufwand wächst also für jede Bedienstation mit Prioritäten quadratisch mit der Zahl der Prioritätsklassen K_i .

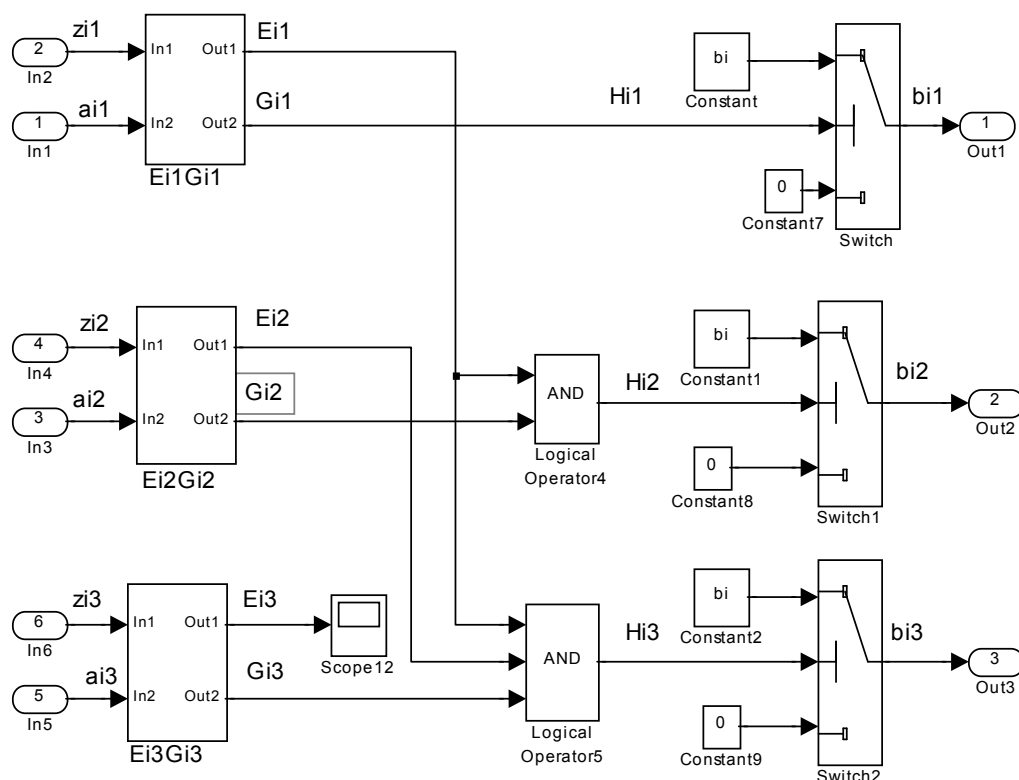


Bild 10: Dreiklassen-Bedienratenmodell mit Prioritäten

In Bild 10 ist das Dreiklassen-Bedienratenmodell mit Prioritäten in den Signalflußplan überführt worden. Dabei werden für die drei Elemente $E_{ij}G_{ij}$ ($j=1,2,3$) die Submodelle entsprechend Bild 8 genutzt. Analog können andere Mehrklassen-Bedienratenmodelle aufgebaut werden. Für unser Demonstrationsbeispiel in Bild 3 benötigen wir 2 Zweiklassenmodelle und 2 Dreiklassenmodelle.

5.3 Mehrklassen-Bedienratenmodell für ein System ohne Prioritäten

5.3.1 Zweiklassenmodell

Wir betrachten jetzt das Zweiklassenmodell ohne Prioritäten für die Station B_i . Beim Zweiklassenmodell ohne Prioritäten können die wirksamen Bedienraten der beiden Klassen nur die Werte 0 , $b_i/2$ oder b_i annehmen. Wenn wir die Bedingung unter der für die Klasse K_{i1} die wirksame Bedienrate den Wert b_i annimmt, mit H_{i11} bezeichnen und unter der für die Klasse K_{i2} die wirksame Bedienrate den Wert $b_i/2$ annimmt, dann können wir für die wirksame Bedienrate der Klasse K_{i1} den Ansatz

$$b_{i1} = \begin{cases} b_i & \text{if } H_{i11} \\ b_i/2 & \text{if } H_{i12} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

machen. Analog machen wir für die wirksame Bedienrate der Klasse K_{i2} den Ansatz

$$b_{i2} = \begin{cases} b_i & \text{if } H_{i21} \\ b_i/2 & \text{if } H_{i22} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

In Bild 5 sind die Zeitabschnitte mit den Bedingungen E_{ij} und G_{ij} eingezeichnet. Daraus können die Bedingungen H_{ilr} ($l=1,2;r=1,2$) mit

$$\begin{aligned} H_{i11} &= G_{i1} \text{ and } E_{i2} \\ H_{i12} &= G_{i1} \text{ and } G_{i2} \\ H_{i21} &= G_{i2} \text{ and } E_{i1} \\ H_{i22} &= H_{i12} \end{aligned} \quad (5)$$

gewonnen werden. Die H_{ilr} sind ebenfalls in das Bild 5 eingetragen.

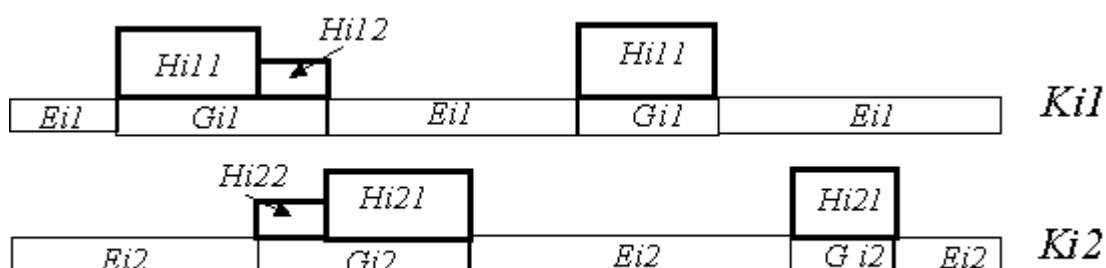


Bild 11: Zur Entstehung der wirksamen Bedienraten beim Zweiklassensystem ohne Prioritäten

5.3.2 Dreiklassenmodell

Analog können die Beziehungen für die wirksamen Bedienraten für das Dreiklassenmodell ohne Prioritäten einer Bedienstation B_i aufgestellt werden.

In diesem Fall gelten die nachfolgenden Ansätze für die wirksamen Bedienraten der drei Kommunikationsklassen

$$b_{i1} = \begin{cases} b_i & \text{if } H_{i11} \\ b_i/2 & \text{if } H_{i12} \\ b_i/3 & \text{if } H_{i13} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

$$b_{i2} = \begin{cases} b_i & \text{if } H_{i21} \\ b_i/2 & \text{if } H_{i22} \\ b_i/3 & \text{if } H_{i23} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

und

$$b_{i3} = \begin{cases} b_i & \text{if } H_{i31} \\ b_i/2 & \text{if } H_{i321} \\ b_i/3 & \text{if } H_{i333} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

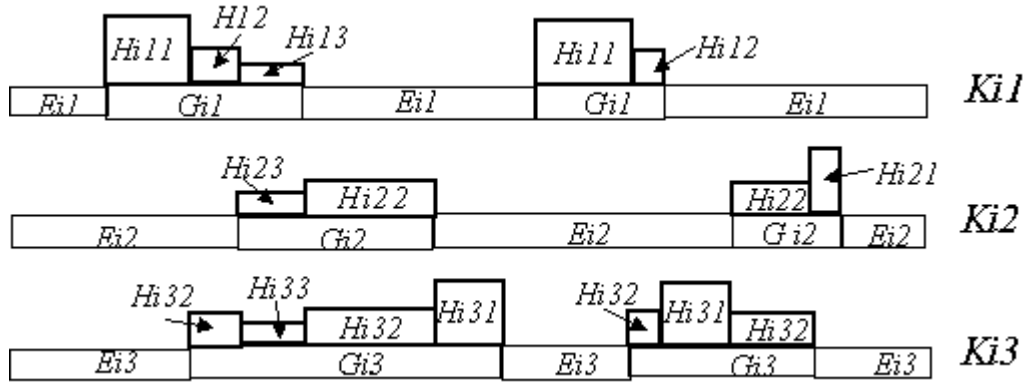


Bild 6: Zur Entstehung der wirksamen Bedienraten beim Dreiklassensystem ohne Prioritäten

In Bild 6 sind für das Dreiklassenmodell ohne Prioritäten die Bedingungen G_{ij} , E_{ij} und H_{ij} eingezeichnet. Auf dieser Grundlage ergibt sich

$$\begin{aligned} H_{i11} &= G_{i1} \text{ and } E_{i2} \text{ and } E_{i3} \\ H_{i12} &= (G_{i1} \text{ and } G_{i2} \text{ and } E_{i3}) \text{ or } (G_{i3} \text{ and } G_{i3} \text{ and } E_{i2}), \\ H_{i13} &= G_{i1} \text{ and } G_{i2} \text{ and } G_{i3} \\ H_{i21} &= G_{i2} \text{ and } E_{i1} \text{ and } E_{i3} \\ H_{i22} &= G_{i2} \text{ and } G_{i1} \text{ and } E_{i3}) \text{ or } (G_{i2} \text{ and } G_{i3} \text{ and } E_{i1}) \\ H_{i23} &= H_{i13} \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} H_{i31} &= G_{i3} \text{ and } E_{i1} \text{ and } E_{i2} \\ H_{i32} &= (G_{i3} \text{ and } G_{i2} \text{ and } E_{i1}) \text{ or } (G_{i3} \text{ and } G_{i1} \text{ and } E_{i2}). \\ H_{i33} &= H_{i13} \end{aligned}$$

5.3.3 Allgemeines Mehrklassenmodell

Für das allgemeine Mehrklassenmodell mit K_i Kommunikationsklassen kann jetzt für die wirksamen Bedienraten angesetzt werden.

$$b_{ij} = \begin{cases} b_i & \text{if } H_{i1j} \\ b_i/2 & \text{if } H_{i2j} \\ b_i/3 & \text{if } H_{i3j} \\ \vdots & \vdots \\ b_i/K_i & \text{if } H_{ijj} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, K_i)$$

Wir verzichten hier auf die Aufstellung der Formeln für die $H_{i,r}$. Anstelle dessen führen wir eine Analyse der für die Berechnung der wirksamen Bedienraten benötigten logischen Operationen Q durch. Für den allgemeinen Fall ergibt sich für die Bedienstation B_i

$$Q_{K_i} = \begin{cases} 2(K_i - 1) * K_i & \text{if } K_i = 2 \\ \left[2(K_i - 1) + \left(K_i \sum_{j=1}^{K_i-2} \frac{(K_i - 1) \cdot (K_i - 2) \dots j + 1}{j! (K_i - 1 - j)!} - 1 \right) \right] \cdot K_i & \text{if } K_i = 3, 4, \dots \end{cases}$$

Die Auswertung dieser Formel zeigt für jede Bedienstation mit wachsender Zahl der Kommunikationsklassen ein sehr schnelles Anwachsen der Zahl der logischen Operationen. Das kann durch die Betrachtung der durch den Summeausdruck in der Formel nachgewiesen werden. Diese Summe liefert den Hauptanstieg von Q_{K_i} bei wachsendem K_i . Die einzelnen Summanden des Summeausdrucks sind Binomial-Koeffizienten, für deren Summe 2^{K_i-2} gilt. Daraus folgt

$$Q_{K_i} \sim K_i^2 * 2^{K_i-2} .$$

was einem schnelleren Anwachsen als einem exponentieller Anstieg entspricht. Wir haben es hier also mit einer Explosion der logischen Operationen zu tun. Für eine größere Zahl von Kommunikationsklassen ist deshalb der Weg über das Mehrklassenmodell ungeeignet.

5.3.4 Gesamtheit von Zweiklassenmodellen

Man kann einen anderen Weg für das Bedienratenmodell ohne Prioritäten gehen, bei dem die Explosion der logischen Operationen vermieden wird. Dieser Weg besteht darin, daß man im Bedienungsnetz den Kommunikationspfad hervorhebt, der zu untersuchen ist. In den einzelnen Bedienstationen werden die anderen Kommunikationsklassen zu einer zusammengefaßt. Damit können auch die anderen Kommunikationspfade des Bedienungsnetzes zu einem Pfade zusammenfaßt werden. Wir erhalten ein Zweiklassen-Bedienungsnetz. Man kann jetzt dieses Herangehen für jeden Kommunikationspfad vornehmen und wir erhalten für die Zahl der logischen Operationen mit

$$Q = 4 * M$$

eine lineare Abhängigkeit von der Zahl der Bedienstationen. Wir können uns deshalb beim prioritätsfreien Modell für jeden Kommunikationspfad auf ein Bedienungsnetz beschränken, das in allen Bedienstationen höchstens zwei Kommunikationsklassen enthält. Deshalb können wir uns in diesem Fall auf Ein- und Zweiklassen-Bedienratenmodelle beschränken.

In Bild 12 ist das Zweiklassen-Bedienratenmodell ohne Prioritäten für eine Bedienstation angegeben.

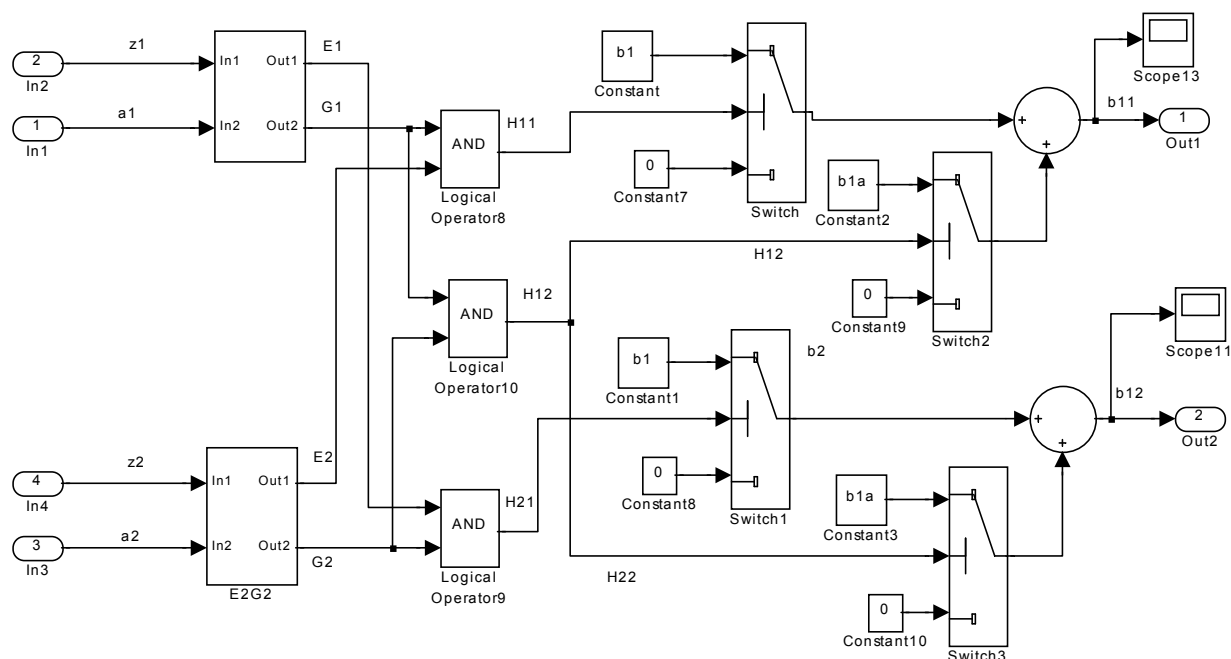


Bild 12: Zweiklassen-Bedienratenmodell ohne Prioritäten für eine Bedienstation

6 Aktuelle Wartezeiten in den Bedienstationen

6.1 Aktuelle Wartezeiten in Bedienstationen mit Prioritäten

In der Praxis interessieren vor allem die aktuelle Wartezeiten t_{wij} ($i=1,2,\dots,M$; $j=1,2,\dots,K_i$) in den einzelnen Prioritätsklassen der Bedienstationen B_i . Für das allgemeine Mehrklassenmodell können wir für die aktuellen Wartezeiten ansetzen

$$t_{wij} = \frac{\sum_{l=1}^j z_{il}}{b_i} \quad (i=1,2,\dots,M; j=1,2,\dots,K_i) .$$

Dieser Ansatz geht davon aus, daß nur die höher- und gleichrangigen Warteschlangenlängen die Wartezeit bestimmen. Für $K_i = 3$ ergibt sich somit

$$\begin{aligned} t_{wi1} &= z_{i1} / b_i \\ t_{wi2} &= (z_{i1} + z_{i2}) / b_i \\ t_{wi3} &= (z_{i1} + z_{i2} + z_{i3}) / b_i \end{aligned} .$$

Diese Formeln müssen bei der Aufstellung des Signalflußplanes der Bedienstation mit Prioritäten berücksichtigt werden.

6.2 Aktuelle Wartezeiten in den Bedienstationen ohne Prioritäten

Jetzt wird für die Mehrklassen-Bedienstation ohne Prioritäten die aktuelle Wartezeit näher betrachtet. Dabei müssen wir davon ausgehen, daß in jeder Kommunikationsklasse alle

Warteschlangenlängen z_{ij} die Wartezeit beeinflussen. Dabei ist die Wartezeit für alle Klassen gleich. Deshalb gilt für die aktuelle Wartezeit aller Klassen der Station B_i

$$t_{wi} = \frac{\sum_{j=1}^{K_i} z_{ij}}{b_i}$$

Für ein Zweiklassenmodell folgt daraus

$$t_{wi} = (z_{i1} + z_{i2}) / b_i.$$

Diese Formel muß im Signalflußplan für das Zweiklassenmodell der Bedienstation ohne Prioritäten berücksichtigt werden .

7 Signalflußpläne für Mehrklassen-Bedienstationen

7.1 Signalflußpläne für eine Zweiklassen- und Dreiklassen-Bedienstation mit Prioritäten

Wir betrachten jetzt den Signalflußplan für das *Zweiklassenmodell* einer Bedienstation mit Prioritäten. Die Elemente dieses Signalflußplanes sind das Bedienratenmodell und die Zustands- und Abgangsratenmodelle Klasse1 und Klasse2 für die beiden Kommunikationsklassen K_{i1} und K_{i2} . In diesen Signalflußplan können entsprechende Glieder für die Bestimmung der aktuellen Wartezeit der einzelnen Klassen hinzugefügt werden.

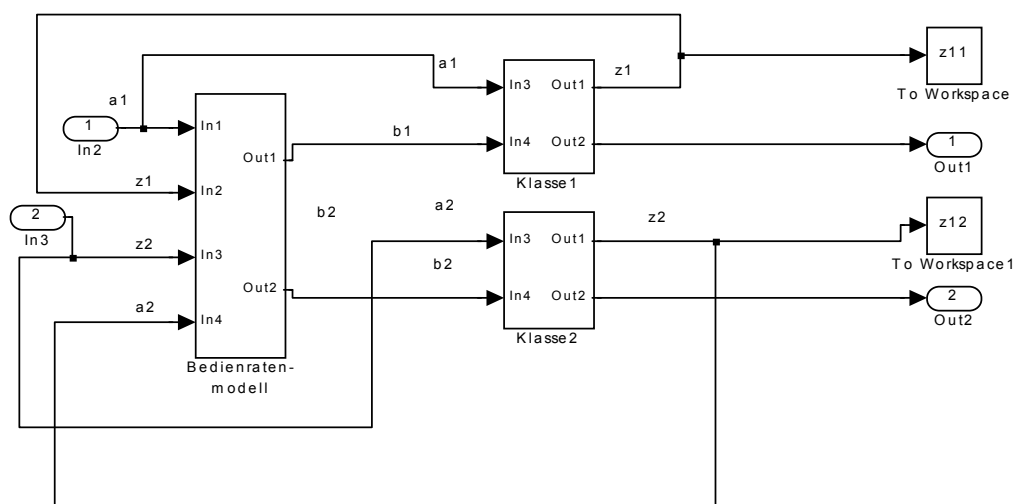


Bild 13: Signalflußplan für ein Zweiklassenmodell

Analog zum Signalflußplan für das Zweiklassenmodell erhalten wir das Dreiklassenmodell einer Bedienstation mit Prioritäten. Dabei müssen als Submodelle für die Elemente des Signalflußplanes in Bild 14 das Bedienratenmodell (s. Bild 10) und für die Klassen 1, 2 und 3

die Zustands- und Abgangsratenmodelle (s. Bild 7) genutzt werden. Auch in diesem Signalflußplan ist es sinnvoll entsprechende Glieder für die Bestimmung der aktuellen Wartezeit hinzuzufügen.

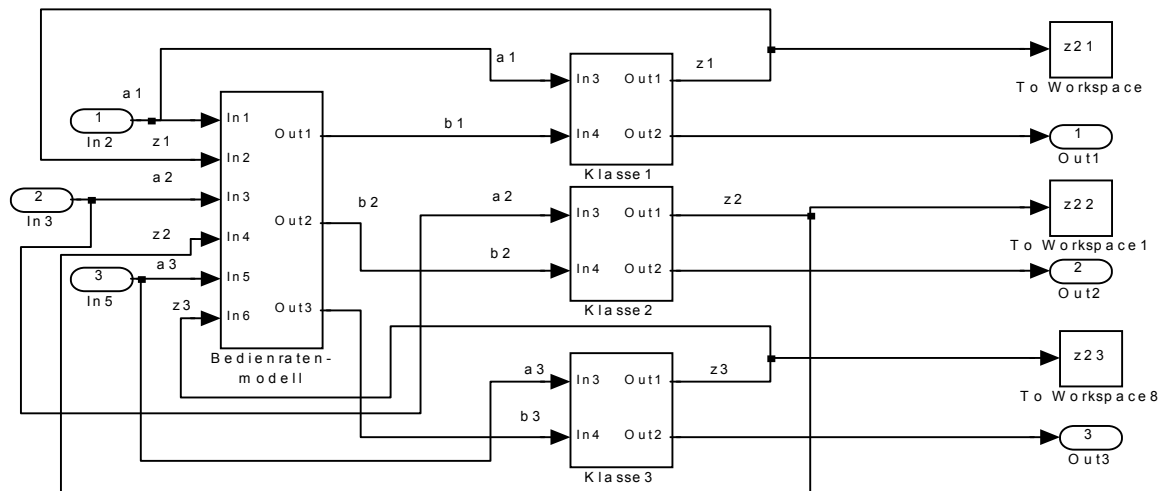


Bild 14: Signalflußplan für das Dreiklassenmodell einer Bedienstation

7.2 Signalflußplan für eine Zweiklassen-Bedienstation ohne Prioritäten.

In Bild 15 ist das Zweiklassen-Bedienungsmodell einer Bedienstation ohne Prioritäten dargestellt. Dabei sind wieder Submodelle, die bereits eingeführt wurden die Systemelemente. Es sind dies das Bedienratenmodell (s. Bild 12) und die beiden Zustands- und Abgangsratenmodelle (s. Bild 7). Außerdem ist im Signalflußplan noch die Bestimmung der aktuellen Wartezeit (s. Abschnitt 6.2) vorhanden.

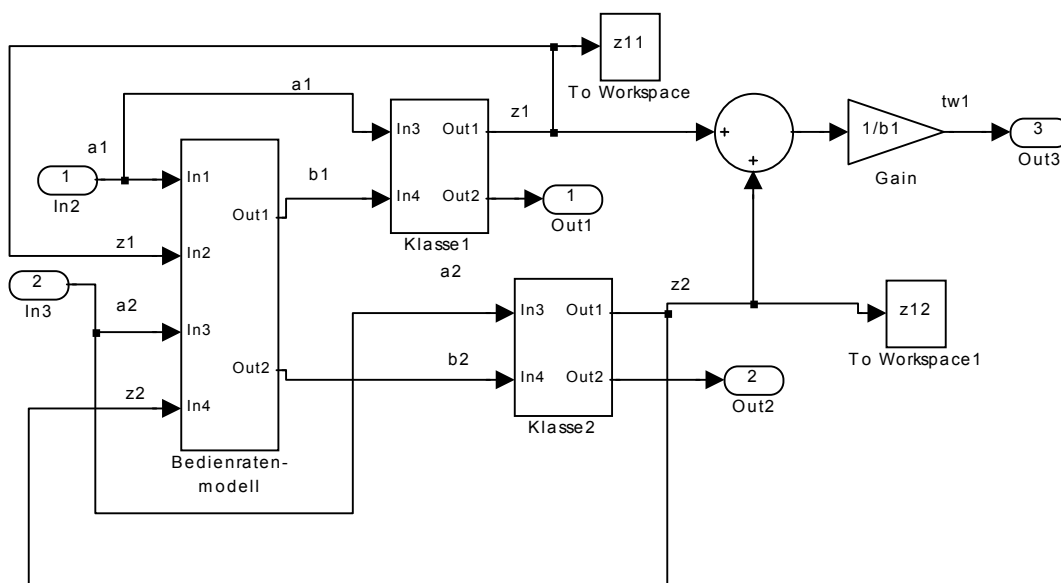


Bild 15: Zweiklassenmodell einer Bedienstation ohne Prioritäten

8 Simulation eines Beispiels eines Mehrklassen-Bedienungszuges

Nachfolgend werden für das in Bild 3 angegebene Beispiel eines Bedienungszuges ohne und mit Prioritäten die Signalflußpläne für die Simulation dargestellt.

Der Signalflußplan des Mehrklassenbedienungszuges ist, wie bereits in den vorangehenden Abschnitten festgestellt wurde, hierarchisch aufgebaut. Dabei unterscheidet sich die hierarchische Struktur für das Modell mit und ohne Prioritäten.

8.1 Simulation eines Beispiels eines Mehrklassen-Bedienungszuges mit Prioritäten

Wir gehen jetzt zur Simulation des im Abschnitt 2 angegebenen Beispiels für ein Mehrklassen-Bedienungszug über, wobei wir als Bedienungsdisziplin Bedienung mit Prioritäten annehmen.

In Bild 16 ist die hierarchische Struktur für die Simulation des Mehrklassenbedienungszuges mit Prioritäten für das oben eingeführte Beispiel angegeben.

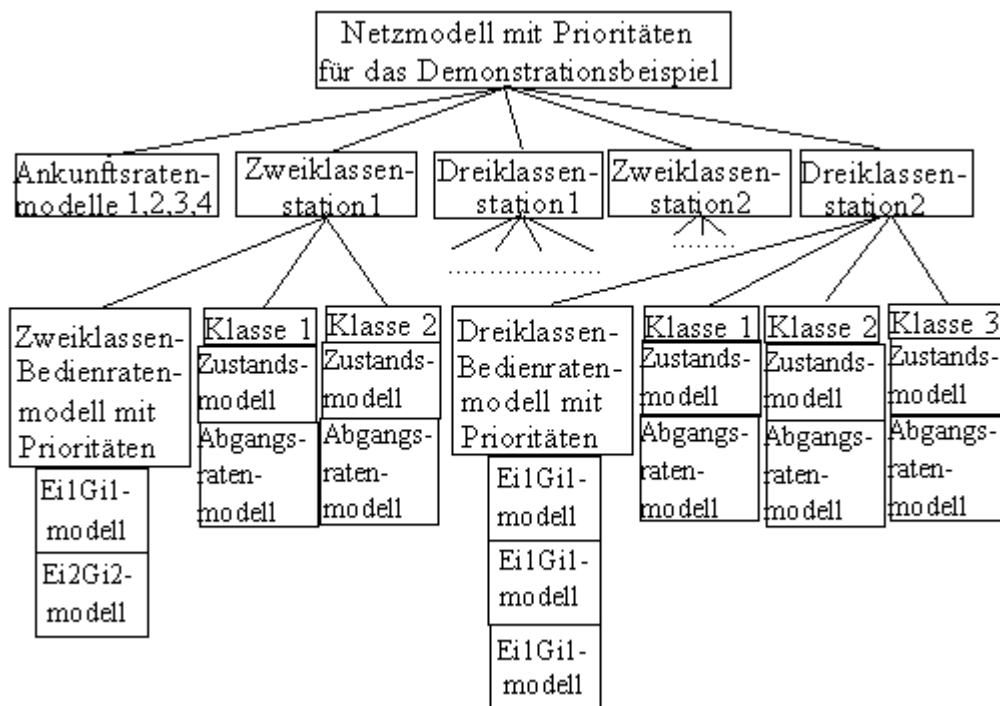


Bild 16: Hierarchischer Aufbau des Netzmodells mit Prioritäten für das Demonstrationsbeispiel

Auf der Grundlage der Stationsdarstellung des Bedienungszetes in Bild 3 erhalten wir den Signalflußplan des Signalflußmodells dieses Bedienungszetes mit den zwei Zweiklassen-Bedienstationen und zwei Dreiklassen-Bedienstationen als Elemente dieses Signalflußplanes (s. Bild 17).

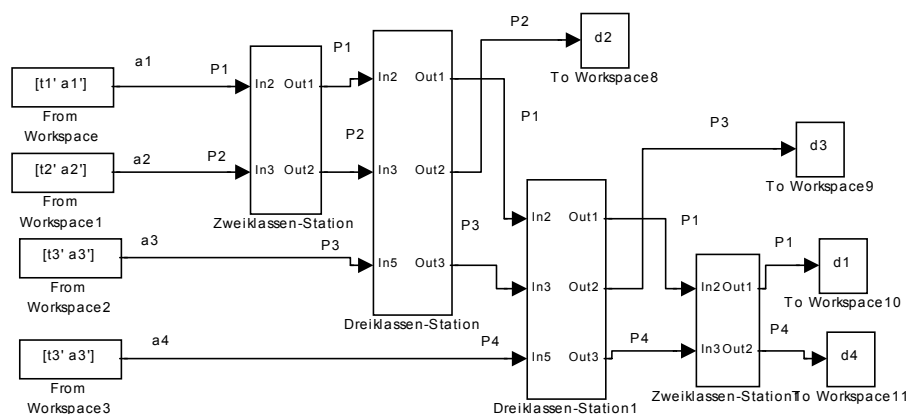


Bild 17: Signalflußplan des Beispiels für ein Mehrklassen-Bedienungszetes mit Prioritäten

Dieser Signalflußplan bildet im hierarchisch aufgebauten SIMULINK-Modell die oberste Ebene. Für die Elemente müssen entsprechende Submodelle in SIMULINK aufgebaut werden. Dabei ist der Signalflußplan Bild 17 unabhängig davon welche Bedienungsdisziplin angenommen wird.

8.2 Simulation des Zweiklassenmodells ohne Prioritäten

Wegen dieser wesentlichen Reduzierung des Berechnungsaufwandes beim Zweiklassenmodell für ein Bedienungsnetz ohne Prioritäten wird das Mehrklassen-Bedienungsmodell nicht weiter betrachtet und jetzt die Simulation für das Zweiklassen-Bedienungsnetz ohne Prioritäten dargestellt.

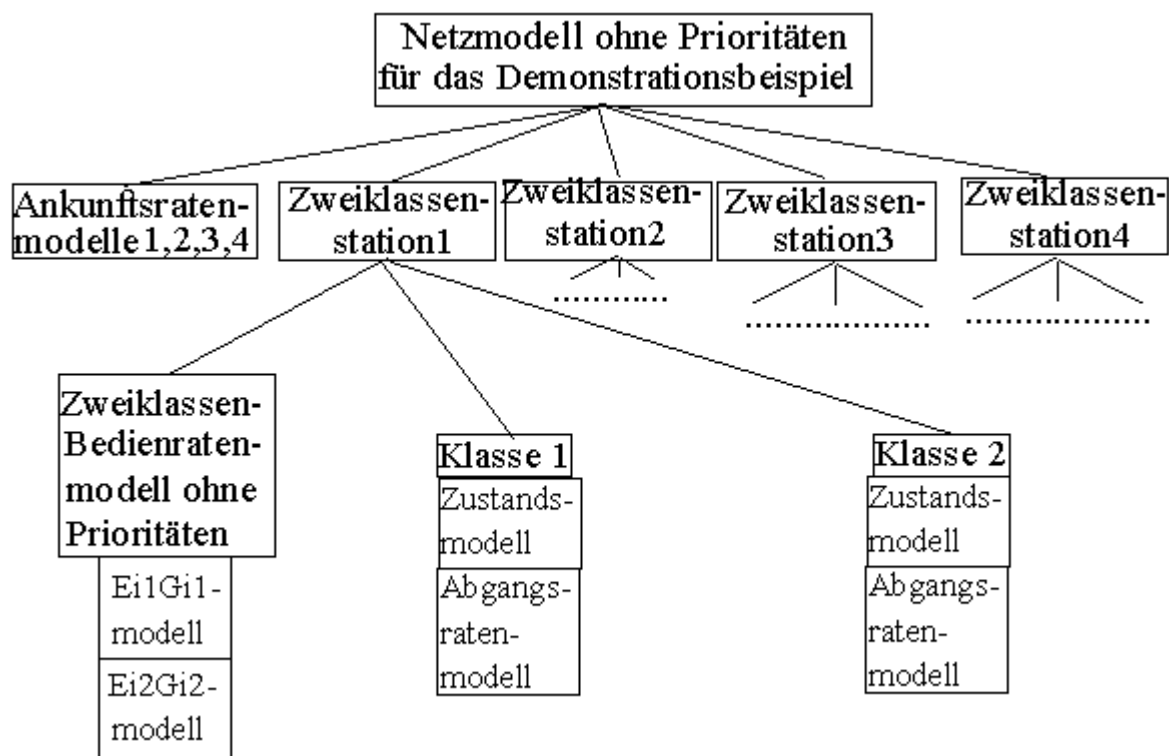


Bild 18: Hierarchischer Aufbau des Netzmodells ohne Prioritäten für das Demonstrationsbeispiel

In Bild 18 wird der hierarchische Aufbau des Netzmodells mit Prioritäten für das Demonstrationsbeispiel angegeben. Bild 19 enthält den Signalflußplan für das Netzmodell ohne Prioritäten, wobei die vier Bedienstationen die Elemente dieses Signalflußplanes sind.

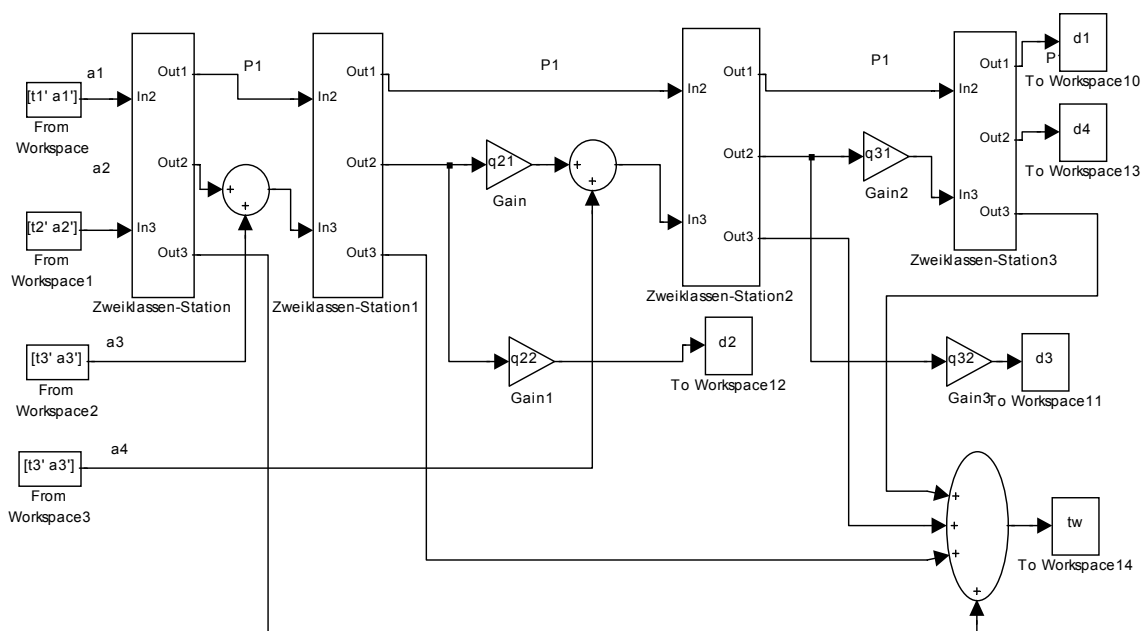


Bild 19: Signalflußplan des Zweiklassenbedienungsnetzes ohne Prioritäten

9 Zur Auswertung der Simulationsläufe

In diesem Kapitel wird die Auswertung der Simulationsläufe betrachtet, die in der Verdichtung der Realisierungen zu den Schätzungen der wahrscheinlichkeitstheoretischen Charakteristika besteht.

Bei der Simulation stellt die Nachbildung der Realisierungen eine notwendige Zwischenstufe dar. Das eigentliche Ziel der Simulation besteht meist in der Herstellung des Zusammenhangs zwischen den Schätzungen von wahrscheinlichkeitstheoretischen Charakteristika der bestimmenden und abgeleiteten Größen.

Die Realisierungen der ON/OFF-Ankunftsprozesse wurden in unserem Simulationsmodell für vorgegebene wahrscheinlichkeitstheoretische Charakteristika erzeugt. Vorgegeben wurden hier für die Ankunftsprozesse mit exponentiellen Verteilungen der ON- und OFF-Phasen deren mittleren Dauern T_{on} und T_{off} und die konstanten Ankunftsraten λ in der ON-Phase. Außerdem wurde die konstante Bedienrate b als Eingangsgröße vorgegeben, bei der Realisierung und Mittelwert exakt übereinstimmen.

Als Ausgangsgrößen betrachten wir die Mittelwerte T_{wij} und Varianzen V_{wij} der Wartezeiten. Die mittlere Wartezeit kann durch die Mittelwertbildung in MATLAB mit der Standardfunktion *mean* und die Standardabweichung der Wartezeit wird in MATLAB durch die Standardfunktion *var* gewonnen.

10 Literatur

- [1] G. Bergholz: Signalflußsimulation von Nachrichtenverkehrsmodellen. Arbeitsbericht (2002)

- [2] G. Bergholz: Digitale Simulation analoger Übertragungssysteme. Verlag Die Wirtschaft (1972)
- [3] Y.Guo et al.: Time-stepped Hybrid Simulation (TSHS) For Large Scale Networks. Proc. of INFCOM (2000)
- [4] D. C. Grünigen: Digitale Signalverarbeitung. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag München Wien (2002)
- [5] G. Haßlinger, Th. Klein: Breitband-ISDN und ATM-Netze. BG Teubner Verlag Stuttgart Leipzig (1999)
- [6] I. Hoffmann: MATLAB und SIMULINK. Addison-Wesley (1998)
- [7] U. Hofmann: Modellierung von Kommunikationssystemen. Manz Fortis Verlag Wien (2000)
- [8] B. Melamed et al.: Hybrid discrete-continuous fluid-flow simulation. Rutgers University and Georgia Institute of Technology (2001)
- [9] B. Liu et al.: A Study of Network Simulation Efficiency: Fluid Flow Simulation vs. Packet level Simulation. IEEE INFOCOM (2001)
- [10] B. Liu et al.: Fluid Simulation of Large Scale Networks: Issues and Tradeoffs. Las Vegas, NV, June (1999)
- [11] Y. Wardi, B. Melamed: Loss Volume In Continuous Flow Models: Fast Simulation And Sensitivity Analysis Via IPA. Georgia Institute of Technology (2000)

11 Anlage: MATLAB-Funktion für die Erzeugung der vier Ankunftsprozesse

```
function [t, l, alpha]=OnOff(N,lambda,Ton,Toff)
%-----
% Erzeugung eines ON/OFF-Prozesses
% mit MATLAB
%-----
% Anteil der On-Phase:
%-----
alpha=Ton/(Ton+Toff);
%-----
% Erzeugung von Exponentialverteilungen für die Dauern der On- und Off-Phasen
%-----
Tn=RANDOM('exp',alpha,1,N);
```

```
Tf=RANDOM('exp',1-alpha,1,N);
%-----
%Erzeugung der On- und Off-Zeitpunkte:
%-----
t3(1)=0;
t1(1)=0;
t(1)=t1(1);
l(1)=lambda;
t2(1)=Tn(1);
t(2)=t2(1);
l(2)=0;
for i=2:1:N
    t1(i)=t2(i-1)+Tf(i-1);
    j=2*i-1;
    t(j)=t1(i);
    l(j)=lambda;
    t2(i)=t1(i)+Tn(i);
    j=2*i;
    t(j)=t2(i);
    l(j)=0;
end;
```
