

**Analyse und Optimierung des Café Central
mittels Warteschlangentheorie und Simulation
(inkl. Umsetzung mit der Simulationssoftware Arena)**

Hausarbeitenseminar im WS 2004/2005

Georg-August-Universität Göttingen
Institut für Wirtschaftsinformatik
Abteilung Wirtschaftsinformatik I
Professor Biethahn

vorgelegt 20. August 2005
von Maik Günther
aus Stralsund

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------|
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS | III |
| TABELLENVERZEICHNIS | IV |
| SYMBOLVERZEICHNIS | V |
| 1 EINLEITUNG | 1 |
| 2 SAMMLUNG VON DATEN DER WIRKLICHKEIT | 3 |
| 2.1 Datenerhebung | 3 |
| 2.2 Datenanalyse | 4 |
| 2.3 Kritik an Datenerhebung und -analyse | 7 |
| 3 FORMULIERUNG DES WARTESCHLANGENMODELLS | 8 |
| 3.1 Warteschlange M/M/1 | 8 |
| 3.2 Café Central als Warteschlangennetz | 10 |
| 3.3 Optimierung mit Hilfe des mathematischen Modells | 12 |
| 3.4 Kritik am mathematischen Modell | 14 |
| 4 FORMULIERUNG DES SIMULATIONSMODELLS | 16 |
| 4.1 Implementierung des Simulationsmodells | 17 |
| 4.2 Optimierung mit Hilfe des Simulationsmodells | 19 |
| 4.3 Kritik am Simulationsmodell | 24 |
| 5 SCHLUSSBETRACHTUNG | 25 |
| LITERATURVERZEICHNIS | XXVI |
| ANHANG | XXX |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abb. 1: Warteschlangensystem mit einer Bedienstation | 8 |
| Abb. 2: Café Central als Jackson-Wartenetzwerk | 11 |
| Abb. 3: Logik des Simulationsmodells | 18 |
| Abb. 4: Grafik des Simulationsmodells | 19 |
| Abb. 5: <i>Kunde.TotalTime</i> in Abhängigkeit von der Replikationsanzahl | 20 |
| Abb. 6: <i>Kunde.TotalTime</i> in Abhängigkeit vom Zuschaltungszeitpunkt der zweiten Kasse (Zeitraum der Inbetriebnahme = 300 Sek.) | 22 |
| Abb. 7: <i>Kunde.WaitingTime</i> bei prozentualer Änderung der Ankunftsrate | 23 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tab. 1: Verteilung der Zwischenankunftszeiten | 5 |
| Tab. 2: Verteilung der Bedienzeiten mit quadratischem Fehler | 6 |
| Tab. 3: Routingwahrscheinlichkeiten der Wege | 6 |
| Tab. 4: Bezeichnungssystematik | 18 |

Symbolverzeichnis

| | | |
|--------------|---|---|
| q_n | = | Wahrscheinlichkeit für die Aufteilung eines Poissonstromes auf den Folgestrom n |
| t | = | Zeit |
| \bar{t}_a | = | mittlere Zwischenankunftszeit |
| \bar{t}_b | = | mittlere Bedienzeit |
| \bar{k}_w | = | Warteopportunitätskosten |
| λ | = | durchschnittliche Ankunftsrate |
| μ | = | durchschnittliche Abfertigungsrate |
| ρ | = | Verkehrsdichte |
| $P_i(n)$ | = | Wahrscheinlichkeit, dass sich n Elemente im System i befinden |
| $P_i(x > n)$ | = | Wahrscheinlichkeit, dass sich mehr als n Elemente im System i befinden |
| L_q | = | mittlere Schlängellänge (bezogen auf alle Elemente) |
| L_n | = | mittlere Anzahl an Elementen in der nicht leeren Schlange |
| V | = | mittlere Verweilzeit im System |
| W_q | = | mittlere Wartezeit eines Elements in der Schlange (bezogen auf alle Elemente) |
| W_n | = | mittlere Verweilzeit eines Elements im Wartesystem |

1 Einleitung

Mobilität ist ein Motor der wirtschaftlichen und kulturellen Entwicklung.¹ Umgekehrt wirken sich Fortschritte in Wirtschaft und Kultur positiv auf die Mobilität aus.² Eine Distanz schnell zu überwinden gilt besonders in westlich geprägten Wirtschaftsräumen als modern und fortschrittlich.³ Bezeichnend ist hierbei, dass das Warten um so störender empfunden wird, je höher die Geschwindigkeit der Fortbewegung ist.⁴ Somit ist Warten ein Vorgang, der gerade in hoch industrialisierten Staaten unter allen Umständen vermieden werden sollte. Gerade im Dienstleistungsbereich, wo eine stärkere Service-Orientierung bei einhergehender Senkung der Personalkosten gefordert wird,⁵ ist ein adäquater Umgang mit Wartesituationen erforderlich.

In dieser Arbeit, die das Ergebnis des Hausarbeitsseminars zur Unternehmensforschung an der Georg-August-Universität Göttingen ist, wird ein Warteschlangen- und ein Simulationsmodell des Café Central erstellt. Die Umsetzung des Simulationsmodells erfolgt hierbei mit der Software *ARENA*⁶. Weiterhin wird das Warteschlangen- und das Simulationsmodell unter einer Maximalbelastung optimiert wie sie in der Realität auftreten könnte. Hierbei steht u.a. die Reduzierung der Summe aus Warteopportunitätskosten (\bar{k}_w)⁷ und Bedienungskosten im Vordergrund.⁸ Bei einer Warteschlange an einer Kasse ergeben sich somit die subjektiven Kosten eines Produktes aus dessen Preis und den Wartekosten des Kunden. Dies bedeutet, dass bei einer großen Warteschlange die subjektiven Kosten für ein Produkt größer sind als bei einer kurzen Warteschlange. Folglich könnte der Kunde bei langen Schlangen von einem Kauf Abstand nehmen. Aus diesem Grund sollte alles daran gesetzt werden, Wartesituationen zu vermeiden.

¹ Vgl. *Willeke, R.*, Mobilität, 1996, S.29.

² Vgl. *Leonhardt-Weber, B.*, Verkehr, 1989, S.2.

³ Vgl. *Volkmar, H.*, Quantifizierung, 1998, S. 17-18.

⁴ Vgl. *Terzic, Z.*, Warten, 2004.

⁵ Vgl. *Lampertz, W.*, Kasseneinsatzplanung, 2004, S. 40-41.

⁶ Termini, die in Zusammenhang mit der Software *ARENA* stehen, werden in dieser Arbeit kursiv dargestellt.

⁷ Vgl. *Tietzel, M.; Müller, C.*, Rationierung, 1998, S. 8-10.

⁸ Vgl. *Zimmermann, W.*, OR I, 1995, S. 361.

Der Aufbau dieser Arbeit orientiert sich stark am Phasenschema für den Ablauf eines Simulationsexperimentes von Peter Mertens und soll somit eine systematische Vorgehensweise gewährleisten.⁹

Im Folgenden Kapitel wird auf die Sammlung von Daten der Wirklichkeit eingegangen, wobei hier das Café Central beschrieben wird und relevante Daten erhoben und analysiert werden. Anschließend wird die Datenerhebung und -analyse einer kritischen Betrachtung unterzogen. Die Erstellung des Warteschlangenmodells mit Berechnung wichtiger Leistungsgrößen, Optimierung und kritischer Beurteilung des Modells wird in Kapitel drei behandelt. Warteschlangenmodelle werden in dieser Arbeit jedoch nur am Rande dargestellt, da diese, wie in 3.4 gezeigt werden wird, komplexe Wartenetzwerke nur unter bestimmten Voraussetzungen ausreichend gut abbilden können. In Kapitel vier wird die Implementierung des Simulationsmodells, die Berechnung wichtiger Leistungsgrößen sowie die Optimierung mit anschließender Kritik am Modell erörtert. Die Arbeit endet mit einer Schlussbetrachtung, in der mögliche Handlungsempfehlungen gegeben werden.

⁹ Vgl. *Mertens, P.*, Simulation, 1982, S. 6.

2 Sammlung von Daten der Wirklichkeit

Sammeln von Daten der Wirklichkeit ist eine Grundlage für möglichst realitätsnahe Modelle. Die Datenerhebung mit anschließender Datenanalyse für das Warteschlangen- und Simulationsmodell wird im Folgenden beschrieben. Abschließend erfolgt eine kritische Betrachtung der Datenerhebung und -analyse.

2.1 Datenerhebung

Das Café Central ist das größte Café des Studentenwerkes Göttingen und befindet sich am Campus der Georg-August-Universität Göttingen.¹⁰ Im Einkaufsbereich des Cafés sind mehrere Theken bzw. Automaten vorhanden, die im Folgenden als Stationen bezeichnet werden. Es gibt einen Ankunftsstrom, der sich auf die verschiedenen Stationen aufteilt.¹¹ Von diesen Stationen können sich wiederum Wege zu Folgestationen verzweigen. Somit entsteht ein Netzwerk aus Stationen, wobei die Wege die Kanten sind.¹² Für die einzelnen Stationen sind die Bedienraten und mögliche Verzweigungswahrscheinlichkeiten zu ermitteln. Außerdem muss die Länge der Wege sowie die Länge und Geschwindigkeit der Untersuchungseinheiten¹³ in Erfahrung gebracht werden. Die Untersuchungseinheiten sind hier die Kunden, die das System durchlaufen.

Am besten eignet sich für die Datenerhebung der Zeitraum von 12.00 Uhr bis 15.00 Uhr an einem Dienstag im Semester, da das Café Central unter Maximalbelastung untersucht werden soll und hier das Kundenaufkommen am größten ist.¹⁴

Um die Erhebung der einzelnen Werte möglichst rationell durchzuführen, wurde der betreffende Zeitraum mit einer Digitalkamera gefilmt. Bei der anschließenden Auszählung der Routingwahrscheinlichkeiten zu den Folgewegen kann so der zeitliche Aufwand der Datenerhebung durch eine erhöhte Abspielgeschwindigkeit deutlich reduziert werden.

¹⁰ Vgl. *Studentenwerk Göttingen, Café*, 2005.

¹¹ Z.B. von der Treppe zur Aktionstheke, zum Essen oder zum Kaffeeautomaten.

¹² Vgl. Abbildung 2.

¹³ Vgl. *Leiner, B.*, Stichprobentheorie, 1989, S.4.

¹⁴ Laut eigenen Beobachtungen und Gespräch mit Herrn Dirk Oelkers (Leiter der Verpflegungsbetriebe).

Zwischenankunftszeiten sind exponential verteilt. Sie geben den zeitlichen Abstand zwischen dem Eintreffen zweier Ereignisse an.¹⁵ Um die Erfassung der Zwischenankunftszeiten effizient zu gestalten und Fehler bei der Erhebung und Auswertung zu vermeiden, werden die erforderlichen Daten mit Hilfe eines Organizers erhoben, welcher über ein berührungsempfindliches Display verfügt.¹⁶ Somit findet keine Ablenkung durch Schreivarbeiten während der Erhebung statt. Mittels Synchronisierung werden alle Daten auf den PC übertragen und können direkt für die Analyse übernommen werden. Dieses Form der Erfassung verhindert Medienbrüche und erleichtert die Datensammlung deutlich. Auch bei der Ermittlung der Bedienzeiten¹⁷ und der Verzweigungswahrscheinlichkeiten zu Folgestationen¹⁸ wird ein Organizer eingesetzt. Die Umsetzung der nötigen Programme erfolgt in yBasic, da der Quellcode hiermit leicht über die Notizblockfunktionalität des Organizers editiert werden kann. Vorstellbar wäre auch die Umsetzung derartiger Programme für Handys. Diese verfügen über einen internen Chronometer und sind weiter verbreitet als Organizer.

2.2 Datenanalyse

Die Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Ankunfts- und Bedienraten aus den erhobenen Daten erfolgt mit dem *InputAnalyzer*. Dieser ist im Lieferumfang von *ARENA 5.00.02* enthalten. Der *InputAnalyzer* ermittelt für eine Menge von Daten die passende Verteilung und liefert Kennzahlen, die eine Aussage über die Güte der gefundenen Verteilung zulassen. Zum einen wird der mittlere quadratische Fehler angegeben. Hier ist eine mögliche Verteilung um so besser, je kleiner dieser Wert ist. Zum anderen wendet der *InputAnalyzer* den Kolmogorov-Smirnov Test und den χ^2 -Anpassungstest an.¹⁹ Beide Tests ermitteln eine Wahrscheinlichkeit, die angibt wie gut eine gefundene Verteilung die zugrunde liegenden Daten abbildet.²⁰

¹⁵ Vgl. *Biethahn, J.*, Methoden, 2000, S.125, S.165-166.

¹⁶ Vgl. Anhang 1.

¹⁷ Vgl. Anhang 2.

¹⁸ Vgl. Anhang 3.

¹⁹ Vgl. *Kelten, W. D.; Sadowski, R. P., Sturrock, D. T.*, Arena, 2004, S. 160-161.

²⁰ Vgl. *Ahlborn, W.; Kricke, M.*, Statistik, 1994, S.58-68.

Die Ankunfts- und Bedienprozesse für das Warteschlangen- und Simulationsmodell werden durch die zugehörigen theoretischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgebildet. Somit ist sicher gestellt, dass sich unerwünschte Eigenheiten aus der Vergangenheit nicht fortsetzen.²¹ Für das Warteschlangenmodell ist dieses Vorgehen sogar erforderlich und beim Simulationsmodell wird die Performance und die Änderungsfreundlichkeit des Modells verbessert.²² Hierzu wird beim Warteschlangenmodell die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Ankunftsstromes für den kompletten Zeitraum von drei Stunden ermittelt.²³ Beim Simulationsmodell wird der Ankunftsprozess in das Warteschlangennetzwerk in Intervalle mit einer Länge von jeweils fünfzehn Minuten gegliedert. Dies soll mögliche Veränderungen im Zeitablauf realistisch darstellen, ohne Ausreißern ein zu großes Gewicht zu geben. Die nachfolgende Tabelle zeigt für das Simulationsmodell die exponential verteilten Zwischenankunftszeiten mit quadratischem Fehler an der Treppe.²⁴

| Uhrzeit | EXPO | Sq.-Error |
|-------------|------|-----------|
| 12.00-12.15 | 13.4 | 0.014746 |
| 12.15-12.30 | 11.3 | 0.009214 |
| 12.30-12.45 | 12.0 | 0.008576 |
| 12.45-13.00 | 10.6 | 0.009444 |
| 13.00-13.15 | 12.9 | 0.022784 |
| 13.15-13.30 | 14.8 | 0.013552 |
| 13.30-13.45 | 14.2 | 0.018016 |
| 13.45-14.00 | 14.9 | 0.029314 |
| 14.00-14.15 | 14.6 | 0.017623 |
| 14.15-14.30 | 19.3 | 0.021821 |
| 14.30-14.45 | 22.5 | 0.029160 |
| 14.45-14.00 | 20.0 | 0.025217 |

Tab. 1: Verteilung der Zwischenankunftszeiten

Eine Darstellung der exponential verteilten Bedienzeiten²⁵ an den einzelnen Stationen ist in der nächsten Tabelle zu finden. Diese werden für den betrachteten Zeitraum als konstant angenommen. Sie ändern sich also nicht in Abhängigkeit von der Auslastung der Station oder der Zeit. Für die Bedienzeiten hat der *InputAnalyzer* z.T. bessere Verteilungen gefunden, die auch in Tabelle 2 abgebildet sind..

²¹ Vgl. Hillier, F. S.; Liebermann, G. J., OR II, 1988, S. 778.

²² Vgl. Kelten, W. D.; Sadowski, R. P., Sturrock, D. T., Arena, 2004, S. 156.

²³ Für die Ist-Situation des Warteschlangenmodells beträgt die Zwischenankunftszeit 14,3 Sekunden; in Anhang 4 befindet sich die die Tabelle mit den entsprechenden Ankunftsdaten an den Stationen.

²⁴ Wenn nicht anders bezeichnet, so sind in dieser Arbeit alle Zeiten in Sekunden angegeben. Dies gilt auch für die Zeiten in ARENA.

²⁵ Vgl. Zimmermann, W., OR I, 1995, S. 364.

| Station | EXPO | Sq.-Error | Beste Verteilung | Sq.-Error | Ausdruck |
|--------------|------|-----------|------------------|-----------|-------------------------|
| Aktionstheke | 12.3 | 0.050428 | Exponential | 0.049349 | 1.5 + EXPO(11) |
| Brötchen | 18.8 | 0.028080 | Exponential | 0.022070 | 3.5 + EXPO(15.4) |
| Essen | 31.1 | 0.081896 | Normal | 0.073144 | NORM(34.4, 11.1) |
| Kaffee | 13.3 | 0.048685 | Weibull | 0.023002 | 4.5 + WEIB(9.58, 1.5) |
| Kasse | 11.3 | 0.046435 | Erlang | 0.012888 | 1.5 + ERLA(3.12, 3) |
| Kaugummi | 5.4 | 0.084562 | Lognormal | 0.047083 | -0.5 + LOGN(5.14, 5.74) |

Tab. 2: Verteilung der Bedienzeiten mit quadratischem Fehler

In der folgenden Tabelle werden nun die entsprechenden Verzweigungswahrscheinlichkeiten zu den Stationen dargestellt. Wege, die eine zu geringe Auslastung aufweisen, werden vernachlässigt, um die Modelle nicht unnötig aufzublähen. Sie würden die Sicht auf relevante Größen versperren und zu keinem zusätzlichen Erkenntnisgewinn führen.

| von | nach | Routingwahrscheinlichkeit in % |
|--------------|--------------|--------------------------------|
| Aktionstheke | Essen | 18.0 |
| Aktionstheke | Kasse | 82.0 |
| Brötchen | Aktionstheke | 12.2 |
| Brötchen | Kasse | 59.8 |
| Brötchen | Kaffee | 28.0 |
| Essen | Kasse | 100.0 |
| Kaffee | Kasse | 89.0 |
| Kaffee | Kaugummi | 11.0 |
| Kaugummi | Kasse | 100.0 |
| Treppe | Aktionstheke | 6.5 |
| Treppe | Brötchen | 15.9 |
| Treppe | Essen | 8.0 |
| Treppe | Kaffee | 69.6 |

Tab. 3: Routingwahrscheinlichkeiten der Wege

Für die maximale Geschwindigkeit der Kunden wird 1,0 Meter je Sekunde angegeben. Die Kundenlänge, also wie viel Platz ein Kunde benötigt, beträgt 0,7 Meter. Diese Werte konnten mit einfachen Messungen ermittelt werden. Die Kosten einer Kassiererin betragen 19,92 € pro Stunde²⁶ und die Warteopportunitätskosten eines Kunden werden auf 2,40 € pro Stunde festgelegt.

²⁶ Laut Gespräch mit Herrn Dirk Oelkers (Leiter der Verpflegungsbetriebe).

2.3 Kritik an Datenerhebung und -analyse

Auch wenn die Datenerhebung mit geeigneten Erfassungsgeräten sehr effizient gelöst wurde, können trotzdem Fehler auftreten. So muss die Zählung bei der Ankunft einer Untersuchungseinheiten manuell ausgelöst werden, was zu zeitlichen Ungenauigkeiten führen kann. Auch ist es möglich, dass die Erfassung eines Kunden vergessen wird oder doppelt erfolgt. Da die genannten Fehler nur recht selten auftreten dürften, tangieren diese die Güte der gewonnenen Daten jedoch nur marginal. Das Café Central wurde im betreffenden Zeitraum gefilmt und ein Großteil der benötigten Daten konnte so über eine erhöhte Abspielgeschwindigkeit des Filmmaterials erhoben werden. Dies trägt jedoch nicht zu Ungenauigkeiten bei, da sich die Untersuchungseinheiten im Café Central recht langsam bewegen.

Eine umfangreichere Datengrundlage könnte sicher stellen, dass die Ergebnisse der Datenerhebung allen statistischen Anforderungen genügen. Zu beachten bleibt dabei, dass dies nur mit zusätzlichem personellen Aufwand zu realisieren ist, da Datenerhebungen recht zeitintensiv sind.²⁷

²⁷ Vgl. *Leiner, B.*, Stichprobentheorie, 1989, S.46.

3 Formulierung des Warteschlangenmodells

Nach einer kurzen Einführung in M/M/1-Warteschlangen wird das Café Central als Warteschlangennetzwerk dargestellt. In Kapitel 3.3 werden die wichtigsten Kennzahlen berechnet. Anschließend erfolgt die Optimierung des Warteschlangennetzwerkes. Mit einer kritischen Beurteilung des mathematischen Modells, in der auch dessen praktische Anwendbarkeit betrachtet und weitere Lösungsvorschläge unterbreitet werden, endet dieser Abschnitt.

3.1 Warteschlange M/M/1

Die Bezeichnung M/M/1 für Warteschlangen ist auf Kendall zurückzuführen. Sie sagt aus, dass die Zwischenankunfts- und Bedienzeiten exponential verteilt sind und dass ein Bedienkanal zur Verfügung steht.²⁸ In der Langform der Notation, die von Lee vorgeschlagen wurde, wird auch die Größe der Warteraumes und die Abfertigungsregel angegeben.²⁹ In diesem Abschnitt wird der Warteraum als unbegrenzt angenommen, wobei als Abfertigungsregel first-come-first-served vorliegt.

Ein Warteschlangensystem besteht aus einem Warte- und einem Bedienungszentrum. Hierbei treten die Elemente als Input aus einem Reservoir in das Wartezentrum ein. In einem offenen Warteschlangensystem verlassen die Elemente nach der Bedienung das Wartesystem und treten nicht wieder als Input in das System ein. Die folgende Abbildung verdeutlicht den Aufbau eines solchen Wartesystems.

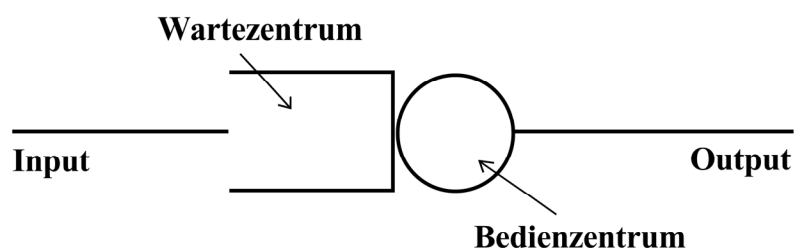


Abb. 1: Warteschlangensystem mit einer Bedienstation³⁰

²⁸ Vgl. Schassberger, R., Warteschlangen, 1973, S.368-369.

²⁹ Vgl. Zimmermann, W., OR I, 1995, S.366.

³⁰ Abb. in Anlehnung an Robertazzi, T. G., Computer, 2000, S.2.

Im Folgenden werden Formeln für die wichtigsten Leistungsgrößen von M/M/1-Warteschlangen aufgeführt³¹, wobei diese nur für den Gleichgewichtszustand gelten.³²

Eine fundamentale Aussage ist das Gesetz von Little $L = \lambda W$.³³

Die Verkehrsdichte ρ gibt die durchschnittliche Auslastung des Bedienzentrums an und ergibt sich als Quotient aus durchschnittlicher Ankunfts- und durchschnittlicher Bedienrate

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad \text{wobei } \rho < 1.$$

Wahrscheinlichkeit, dass sich n Elemente im System befinden:

$$P_i(n) = \rho^n (1 - \rho)$$

Wahrscheinlichkeit, dass sich mehr als n Elemente im System befinden:

$$P_i(x > n) = \rho^{n+1}$$

mittlere Schlangenlänge (bezogen auf alle Elemente):

$$L_q = \frac{\rho^2}{1 - \rho} = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$$

mittlere Länge der nicht leeren Schlange:

$$L_n = \frac{\rho}{1 - \rho} = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$$

mittlere Wartezeit eines Elements in der Schlange (bezogen auf alle Elemente):

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$$

mittlere Wartezeit eines Elements in der nicht leeren Schlange:

$$W_n = \frac{L_n}{\lambda} = \frac{1}{\mu - \lambda} = V^{34}$$

³¹ Für Formeln bei M/M/s-Warteschlangen siehe *Zimmermann, W.*, OR I, 1995, S. 370-371.

³² Vgl. *Biethahn, J.*, Methoden, 2000, S.125, S.127.

³³ Vgl. *Serfozo, R.*, Stochastic, 1999, S. 135-139.

³⁴ Vgl. *Zimmermann, W.*, OR I, 1995, S. 367 - 368.

3.2 Café Central als Warteschlangennetz

Das Café Central besitzt mehrere Bedienstationen, die netzwerkartig angeordnet sind. Daher stellt die einfache Abbildung des Café Central als Warteschlange mit einem Warte- und einem Bedienzentrums eine zu starke Abstraktion von der Realität dar. Eine verhältnismäßig gutes Modell erhält man mit offenen Warteschlangennetzwerken, wobei in der folgenden Betrachtung keine Rückkopplungen zwischen den einzelnen Stationen auftreten. Bei einer real auftretenden maximalen Auslastung des Warteschlangennetzwerkes treten Rückkopplungen zwischen den einzelnen Stationen sehr selten auf. Dies ist bei einer geringen Auslastung des Systems etwas häufiger zu beobachten, nimmt jedoch nicht überhand. Daher wurden Rückkopplungen vernachlässigt. Weiterhin werden für das Netzwerk $M/M/s/\infty/FIFO$ ³⁵-Warteschlangensysteme in Gleichgewichtszuständen unterstellt.

Die Äquivalenzeigenschaft der Ankunfts- und Bedienrate erleichtert die Berechnung des Warteschlangennetzwerkes erheblich. Unter den oben genannten Voraussetzung ist der Ankunftsstrom einer Station ein Poissonprozess. Die Äquivalenzeigenschaft sagt nun aus, dass dann der Abgangsstrom dieser Station, der ein Ankunftsstrom der Folgestation/en ist, auch ein Poissonprozess ist.³⁶ Die Analyse der einzelnen Warteschlangen des Netzwerkes erfolgt also unabhängig voneinander.³⁷ Somit werden die Leistungsgrößen für das Gesamtsystem, wie die mittlere gesamte Wartezeit und die mittlere Anzahl an Kunden, durch Aufsummieren der entsprechenden Werte der Stationen ermittelt.³⁸

Poissonströme können in einem Warteschlangennetzwerk beliebig verschmolzen und aufgespalten werden. Die Verschmelzung von n Poissonströmen mit den Parametern $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ führt wiederum zu einem Poissonstrom. Dieser hat dann den Parameter $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$. Bei der Aufspaltung in mehrere Ströme mit den Wahrscheinlichkeiten q_1, q_2, \dots, q_n ergeben sich die Einzelströme $q_1\lambda, q_2\lambda, \dots, q_n\lambda$.³⁹

³⁵ FIFO = first in, first out.

³⁶ Vgl. Robertazzi, T. G., Computer, 2000, S.47-48, 51-52.

³⁷ Vgl. Schassberger, R., Warteschlangen, 1973, S. 406.

³⁸ Vgl. Hillier, F. S.; Liebermann, G. J., OR II, 1988, S.555-556.

³⁹ Vgl. Bolch, G. u.a., Queue, 1998, S. 13-14.

Die Verknüpfung von M/M/s-Wartesystemen lässt ein Netzwerk entstehen, das man als gerichteten Graphen bezeichnen kann. Dieses offene Netzwerk wird als Jackson-Netzwerk bezeichnet, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- An jedem Knoten können Poissonströme aus der Umwelt auftreten. An einem Knoten ist die Ankunftsrate > 0 .
- Die Bedienzeiten sind exponential verteilt. Es können mehrere Bediener vorhanden sein.
- Die Bedienstrategie ist FIFO.
- Jeder Knoten hat einen unbeschränkten Warteraum.
- Es gibt nur eine Klasse von Kunden.
- Von mindestens einem Knoten gehen Aufträge in die Umwelt. Es können Rückkopplungen auftreten.⁴⁰

Das Café Central ist nachfolgend als Jackson-Netzwerk mit den einzelnen Stationen, Warteschlangen und Wegen dargestellt. In dieser Abbildung sind nur die für das spätere Modell relevanten Wege und Verzweigungen enthalten. Wege, die eine zu geringe Auslastung aufweisen, werden vernachlässigt.⁴¹ Die Zahlen in den Stationen geben die Anzahl der Kunden an, die diese in der Ist-Situation durchschnittlich pro Stunde durchlaufen. Es fällt sofort auf, dass die Kaffeeautomaten und die Kasse am stärksten frequentiert werden.

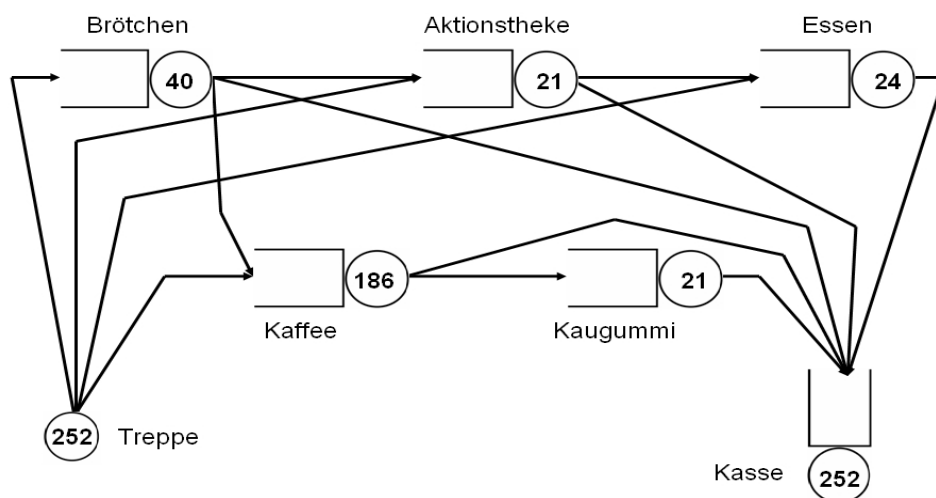


Abb. 2: Café Central als Jackson-Wartenetzwerk

⁴⁰ Vgl. *Lehmann, F.*, Wartenetze, 2001, S. 17-18.

⁴¹ Zur Begründung siehe Kapitel 2.2.

Jackson-Netzwerke unterscheiden sich von Feed-Forward-Netzwerke dadurch, dass bei ihnen Rückkopplungen auftreten dürfen.⁴² D.h. es kann Wege zur selben Station oder zu vorgelagerten Stationen geben. Beide Netzformen haben die Produktformeigenschaft gemeinsam. Diese sagt aus, dass sich die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten jedes einzelnen Knotens ergeben.⁴³ Nach dem Jackson Theorem ergibt sich folgende Formel:

$$P(k_1, k_2, \dots, k_n) = P_1(k_1) * P_2(k_2) * \dots * P_n(k_n).^{44}$$

3.3 Optimierung mit Hilfe des mathematischen Modells

Für die verschiedenen Modellsituationen werden folgende Leistungsgrößen berechnet:

- Verkehrsdichte (ρ),
- mittlere Schlängellänge (L_q),
- mittlere Anzahl der Elemente in der nicht leeren Schlange (L_n),
- mittlere Wartezeit eines Kunden in der Schlange (W_q),
- mittlere Verweilzeit eines Kunden im System (V).

Ausgangspunkt der Optimierung stellt die Betrachtung der Ist-Situation dar. Eine Auflistung der Ergebnisse für die einzelnen Stationen und für das Gesamtsystem ist im Anhang 5 zu finden. An der Ausgangssituation sind besonders die Stationen ‚Kaffee‘⁴⁵ und ‚Kasse‘ auffällig. Diese beiden Stationen haben eine recht hohe Verkehrsdichte und bilden den ‚Flaschenhals‘⁴⁶ des Systems. Auch die Station ‚Essen‘ fällt durch ihre recht hohe mittlere Verweilzeit V auf. Akuter Handlungsbedarf ist aufgrund der mäßigen Frequentierung jedoch nicht erforderlich. Eine Optimierung sollte daher an den Stationen ‚Kaffee‘ und ‚Kasse‘ ansetzen, da hier ein großes Verbesserungspotenzial zu sein scheint.

⁴² Vgl. *Streng, J.*, Neuronale Netze, 2001, S.44.

⁴³ Vgl. *Robertazzi, T. G.*, Computer, 2000, S.101.

⁴⁴ Vgl. *Bolch, G. u.a.*, Queue, 1998, S. 283-285.

⁴⁵ Zur besseren Darstellung werden Stationsnamen in Hochkommas eingeschlossen.

⁴⁶ Vgl. *Opitz, A.*, Performance, 2003, S. 6.

Als erstes wird untersucht, wie sich die Inbetriebnahme einer zweiten Kasse auf das Gesamtsystem auswirkt. Aufgrund der Äquivalenzeigenschaft können alle Stationen getrennt voneinander betrachtet werden. Daher wirkt sich eine Veränderung bei der Kanalanzahl nur auf die Leistungsgrößen der Station ‚Kasse‘ und auf das Gesamtsystem aus. In Anhang 6 sind die Ergebnisse der Änderung zu finden. Es zeigt sich, dass die Schlangenlängen und Wartezeiten der ‚Kasse‘ um deutlich mehr als die Hälfte zurück gegangen sind. Interessant ist nun, ob sich der Einsatz einer weiteren Kassiererin über den Zeitraum von drei Stunden auch aus Kostengesichtspunkten lohnt. In drei Stunden fallen hierfür zusätzliche Kosten von 59,76 € an. Diesen stehen Wartekosten der Kunden in Höhe von 16,75 €⁴⁷ gegenüber. Der Einsatz einer zweiten Kassiererin kann demzufolge nicht gerechtfertigt werden. Die zweite Kasse bringt eine Reduzierung der mittleren Verweilzeit von 53,76 Sekunden auf 20,49 Sekunden pro Kunde mit sich. Ab Warteopportunitätskosten von 8,56 Euro würde sich eine zweite Kasse lohnen. Es ist jedoch fraglich, ob solch hohe Kosten anzusetzen sind. Folglich kostet eine zweite Kassiererin so viel, dass sich ihr Einsatz nicht lohnt.

Nun soll untersucht werden, ob Veränderungen an der Station ‚Kaffee‘ zu entscheidenden Verbesserungen führen. Ein Kaffeeautomat, der beispielsweise gegenüber der Geschirrrückgabe aufgestellt wird, könnte die Belastung des Wartesystems deutlich reduzieren.⁴⁸ Dieser Automat soll über ein Münz-Zahlungssystem verfügen. Daher werden Kunden ohne genügend Kleingeld diesen Automaten nicht in Anspruch nehmen. Es wird somit an der Station ‚Kaffee‘ eine Ankunftsrate unterstellt, die das 0,5-fache der tatsächlichen Ankunftsrate beträgt.⁴⁹ Anhang 8 zeigt die Ergebnisse dieser Maßnahme. Im Vergleich zur Ausgangssituation ist nun die mittlere Verweilzeit eines Kunden im Gesamtsystem etwa 37% geringer. Sie ist sogar 23,7% kleiner als beim Einsatz von zwei Kassen. Die zusätzliche Kaffeemaschine sorgt dafür, dass weniger Kunden das Wartetzwerk betreten. Somit sinkt die Auslastung der Station ‚Kaffee‘ auf 0,32 Erlang und die der Station ‚Kasse‘ auf 0,38 Erlang, was durchaus akzeptable Werte darstellt.

⁴⁷ Bei einer Ankunftsrate von $\lambda = 0,06993$ Kunden je Sekunde.

⁴⁸ Es gibt schon einen Kaffeeautomaten außerhalb des Einkaufsbereiches. Dieser kann jedoch keinen einfachen Kaffee liefern, wie er an der Station ‚Kaffee‘ nachgefragt wird.

⁴⁹ In Anhang 7 ist die Tabelle mit den angepassten Ankunftsraten an den Stationen abgebildet.

3.4 Kritik am mathematischen Modell

Wie in Kapitel 3.2. gezeigt wurde, gibt es diverse Voraussetzungen für Jackson-Netze. Diese bilden zugleich auch Kritikpunkte an diesem Typ von Warteschlangennetzen, da sie Modelle u.U. stark einschränken können und eine hinreichend genaue Abbildung der Realität nicht mehr gegeben ist.

Für die Zwischenankunftszeiten und Bedienzeiten werden Exponentialverteilungen unterstellt. Leider bildet die Exponentialverteilung die realen Vorgänge nicht immer genügend gut ab.⁵⁰ Ggf. sind andere Verteilungen besser geeignet, die Realität abzubilden. Beispielfhaft sei hier die Erlang-Verteilung erwähnt, deren Bedienzeiten in so genannte Bedienungsphasen eingeteilt sind.⁵¹

Negativ auf die Güte des mathematischen Modells wirkt sich aus, dass unbeschränkte Warteräume gefordert werden. Somit können keine Blockierungen berücksichtigt werden. Diese treten auf, wenn Kunden nicht zur Folgestation gelangen, weil dort die Warteschlange keine freie Kapazität hat.

Es wird weiterhin angenommen, dass es nur eine Klasse von Kunden gibt. In der Praxis ist es aber manchmal erforderlich, verschiedene Klassen abzubilden und somit unterschiedliche Bedienzeiten und Routingwahrscheinlichkeiten darzustellen. Eine Umsetzung kann mit Hilfe von Multi-Klassen-Netzwerken erfolgen, in denen auch der Wechsel von Klassen zulässig ist.⁵²

Eine große Gruppe von Netzen bilden BCMP-Netze⁵³. Sie können lastabhängige Bedienraten und verschiedene Klassen von Kunden haben. Außerdem gibt es folgende Stationstypen:

- First-Come-First-Served,
- Process Sharing (Bedienkapazität der Station wird auf alle Kunden verteilt.),
- Infinite Server (Je Kunde gibt es einen Bediener. Es gibt keine Wartezeiten.),
- Last-Come-First-Served-Preemptive-Resume (Ein eintreffender Kunde unterbricht einen in Arbeit befindlichen Bedienvorgang so, dass dieser dort fortgesetzt werden kann, wo er unterbrochen wurde.).⁵⁴

⁵⁰ Vgl. Zimmermann, W., OR I, 1995, S. 376-377.

⁵¹ Vgl. Schassberger, R., Warteschlangen, 1973, S.407-416.

⁵² Vgl. Müller-Clostermann, B., Netze, 2003, S. 13-14.

⁵³ Benannt nach Baskett, Chandy, Muntz und Palacios.

⁵⁴ Vgl. Müller-Clostermann, B., Netze, 2003, S. 15.

Wenn Warteschlangennetze um gewisse Eigenschaften wie Prioritäten, Synchronisation, Auftragsverluste, Blockierungen angereichert werden, dann gelten meist die Produktformlösungen nicht mehr. Hier helfen approximative analytische Verfahren, numerische Analysen und Simulation weiter.⁵⁵ Besonders bei komplizierten Systemen findet die Simulation Anwendung.⁵⁶ Nichtsdestotrotz eignet sich die Warteschlangentheorie gut, um Wartesituationen zu beschreiben, wenn es gelingt, ein adäquates mathematisches Modell zu finden. Dies ist jedoch nicht immer möglich, da die Voraussetzungen für die Anwendung derartiger Modelle z.T. nicht zutreffen.⁵⁷

Aufgrund von Beobachtungen, die während der Datenerhebung gemacht wurden, kann für den vorliegenden Fall gesagt werden, dass das mathematische Modell die Realität ausreichend gut abbildet.

Im nachfolgenden Kapitel wird nun das Café Central als Simulationsmodell implementiert und optimiert. Es werden auch einige oben genannte Kritikpunkte am mathematischen Modell - wie unbeschränkte Warteräume - behoben.

⁵⁵ Vgl. Müller-Clostermann, B.; Flüs, C., Leistungsbewertung, 2003, S.36.

⁵⁶ Vgl. Wöhe, G.; Döring, U., BWL, 2002, S.138.

⁵⁷ Vgl. Runzheimer, B., OR IV, 1978, S.97.

4 Formulierung des Simulationsmodells

Bei komplexen Problemen, die weder experimentell untersucht noch mathematisch exakt gelöst werden können, greift man auf heuristische Verfahren zurück. Zu diesen Verfahren zählt die Simulation.⁵⁸

Laut Müller-Merbach lässt sich „die Simulation auffassen als zielgerichtetes Experimentieren an Modellen, die der Wirklichkeit nachgebildet sind.“⁵⁹

Simulation eignet sich besonders in folgenden Situationen:

- vollständiges mathematisches Optimierungsmodell nicht vorhanden bzw. nicht entwickelbar
- analytische Methoden machen Annahmen erforderlich, die den Kern des Problems verfälschen
- analytische Methoden sind zu kompliziert oder zu aufwändig
- reale Experimente sind zu kostspielig
- Beobachtungen des realen Systems sind zu gefährlich, zeitintensiv oder mit irreversiblen Konsequenzen verbunden⁶⁰

Für komplexe Warteschlangenmodelle wie das Café Central ist die Simulation daher besonders gut geeignet. Es kann nun realisiert werden, dass die Warteräume vor den Stationen begrenzt sind. Auch lassen sich komplexe Wartesysteme einfach darstellen und die Bedienzeiten müssen nicht exponential verteilt sein. Im Fall des Café Central ist das Simulationsmodell flexibler und detaillierter als das Warteschlangenmodell.

In diesem Abschnitt wird nun, nach der Implementierung des Simulationsmodells, die Berechnung wichtiger Kennzahlen sowie die Optimierung mit anschließender Kritik am Modell dargestellt.

⁵⁸ Vgl. Zimmermann, W., OR I, 1995, S.336.

⁵⁹ Vgl. Müller-Merbach, H., OR III, 1973, S.451.

⁶⁰ Domschke, W.; Drexl, A., Einführung in OR, 2002, S. 198.

4.1 Implementierung des Simulationsmodells

Die Umsetzung des Café Central in ein Simulationsmodell erfolgt mit der Software *ARENA*. Als Weiterentwicklung von SIMAN⁶¹ ist sie mit einer komfortablen Benutzeroberfläche besonders zur diskreten und kontinuierlichen Simulation komplexer Warteschlangennetzwerke geeignet.⁶²

Das Café Central besteht aus mehreren Stationen. Dies führt dazu, dass sich häufig gleiche Strukturen von *Basis-Modulen* wiederholen. Eine Zusammenfassung dieser *Module* zu *Templates*⁶³ reduziert die Komplexität des Modells und erleichtert die Arbeit deutlich. Das *Template* für die Erstellung des Warteschlangenmodells wurde mit einer eigenen Modellierungsoberfläche in *ARENA* erstellt und beinhaltet folgende *Module*:

- *KundeCreate* (erzeugt *Kunden-Entitys*),
- *Way* (Weg mit zugehöriger Station),
- *WayChoice* (Weg teilt sich aufgrund von festgelegten Wahrscheinlichkeiten in zwei Wege),
- *KundeDispose* (entfernt *Kunden-Entitys*).⁶⁴

Diese *Templates* orientieren sich grob an den *Templates* für die Simulation von Kreuzungsbereichen.⁶⁵ Durch neue Anforderungen an das Modell sind die *Templates* jedoch in weiten Teilen verändert. Es kann nun in den *Way-Modulen* eine Verteilung für die Bedienzeit hinterlegt werden. Außerdem ist es möglich, die Anzahl der Kanäle an einer Station anzugeben. Somit kann das *Way-Modul* als Weg mit zugehöriger Station angesehen werden. Eine Trennung von Weg und Station würde die Kapazitätsprüfungen der Wege sehr komplex werden lassen. *Ampel-Module* oder ähnliche *Module* werden nicht benötigt, da die eigentliche Steuerung über die Ankunftsraten, Wegkapazitäten, Bedienzeiten an den Stationen und die Wechselwahrscheinlichkeiten zu anderen Wegen bestimmt wird. Daher konnte in den *Way-Modulen* das Werfen von Steuerungssignalen entfernt werden. Zudem ist die Grafik der verschiedenen *Module* überarbeitet worden.

⁶¹ SIMulation ANalysis language.

⁶² Vgl. Domschke, W.; Drexel, A., Einführung in OR, 2002, S. 221.

⁶³ Vgl. Kelten, W. D.; Sadowski, R. P., Sturrock, D. T., Arena, 2004, S. 13.

⁶⁴ Die grafischen Darstellungen der verschiedenen *Module* sind im Anhang 9-20 abgebildet.

⁶⁵ Vgl. Masch, E.; Nolte, D.; Northoff, C.; Strewitz, R., Projektbericht, 2003, S.36-49.

Tabelle 4 zeigt die Bezeichnungssystematik, welche für die *Module* in *ARENA* verwendet wird. Dabei stellen Ausdrücke in eckigen Klammern Füllwörter dar.

| Modul | Bezeichnung nach |
|---------------------|-----------------------------|
| <i>KundeCreate</i> | Start_[Ort] |
| <i>KundeDispose</i> | Ende |
| <i>Way</i> | W_[von]_[nach] bzw. W_[Ort] |
| <i>WayChoice</i> | [Weg 1]_[Weg 2] |

Tab. 4: Bezeichnungssystematik

Die folgende Abbildung zeigt die Logik des Warteschlangensystems. Im Gegensatz zum mathematischen Modell sind hier zusätzlich die Stationen ‚K1‘ und ‚K2‘ eingefügt. Diese haben eine Bedienzeit von null Sekunden und dienen als Zusammenführungspunkte, wie sie auch im realen System zu finden sind. Ferner sind die Stationen feiner gegliedert, so dass die Vorgänge im System besser abgebildet werden. Für die Darstellung von blockierten Folgewegen wurden Bedingungen in den einzelnen Wegstücken implementiert. Auf mäßig frequentierten Wegen treten keine Blockierungen auf. Daher werden dort Kapazitätsabfragen aus Gründen der Übersichtlichkeit und Komplexitätsreduzierung unterlassen. Das *Decide-Modul* erlaubt das Zu- und Abschalten der zweiten Kasse über Variablen die *Zeit1* und *Zeit2*.

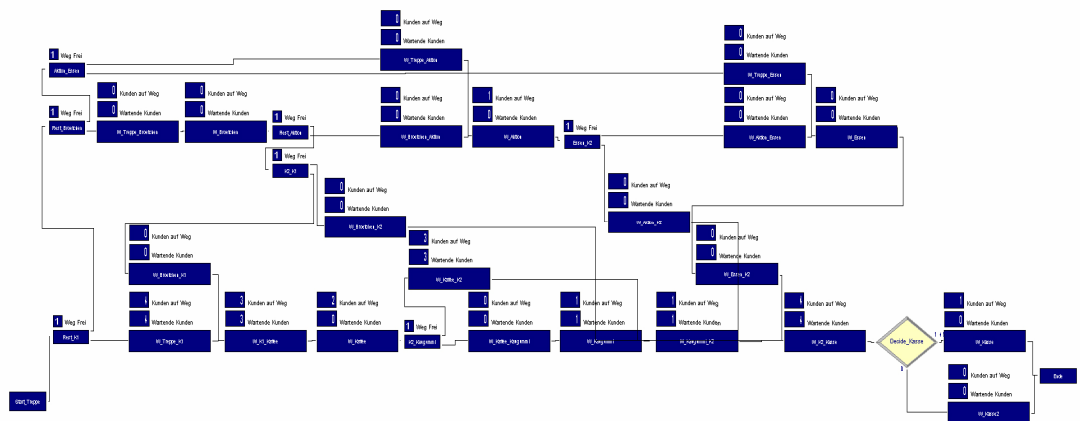


Abb. 3: Logik des Simulationsmodells

Nachfolgend wird die Grafische Darstellung des Café Central abgebildet, wobei diese nicht völlig maßstabsgetreu ist, da *ARENA* eingeschränkte Zeichenfunktionalitäten hat.

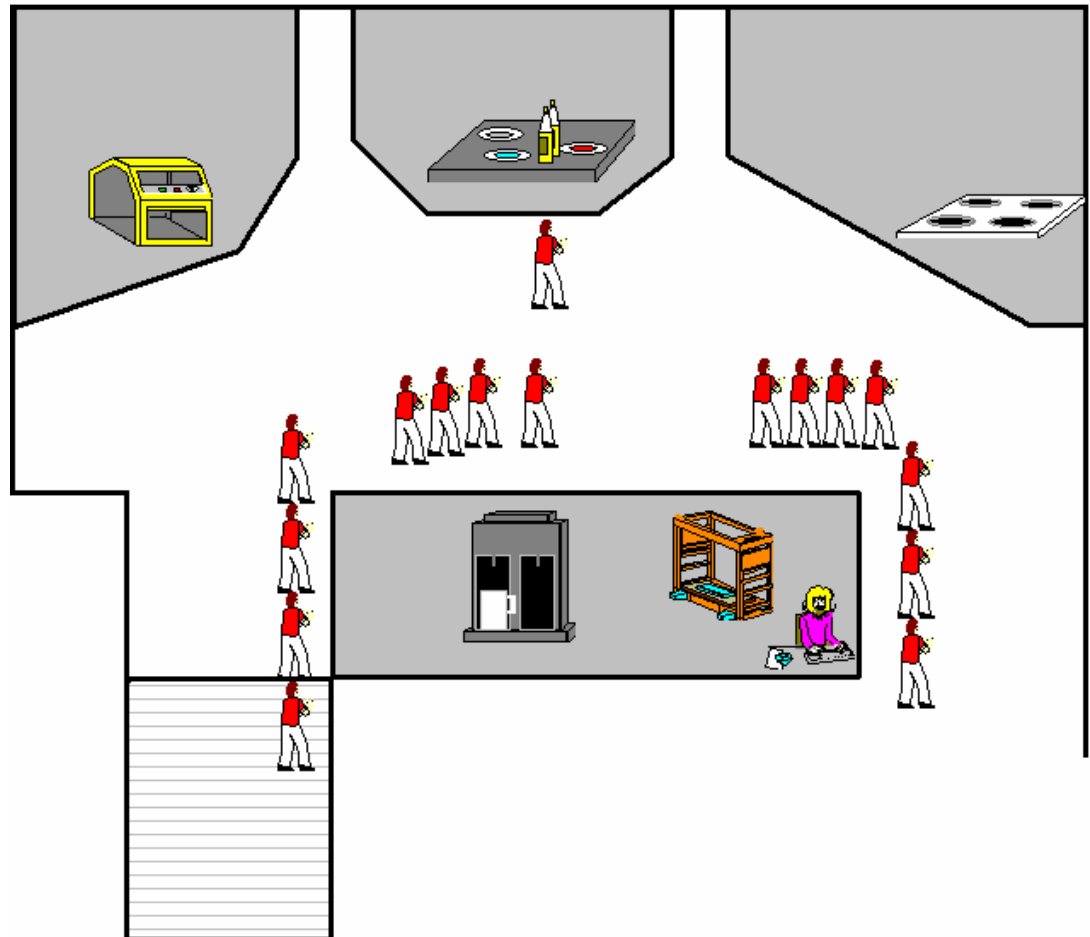


Abb. 4: Grafik des Simulationsmodells

4.2 Optimierung mit Hilfe des Simulationsmodells

Im Vorfeld der Optimierung muss die Verifizierung des Modells durchgeführt werden. Diese soll sicher stellen, dass keine Fehler bei der Implementierung aufgetreten sind.⁶⁶ Durch Vergleich des Modellverhaltens und der Simulationsergebnisse mit dem realen System konnte bestätigt werden, dass die Implementierung fehlerfrei umgesetzt wurde.

Für die Optimierung Arbeit stand das Tool *OptQuest* von OptTek Systems Inc. leider nicht zur Verfügung. Es benutzt Heuristiken, wie Tabu Search und Scatter Search

⁶⁶ Vgl. Biethahn, J. u.a., Methoden, 2000, S.125, S.177.

und hätte die Optimierung deutlich erleichtert.⁶⁷ Daher wurde für die Optimierung des Modells neben *ARENA* selbst der *ProcessAnalyzer* von Rockwell Software Inc. verwendet. Mit ihm können zuvor erstellte Modelle unter verschiedenen Parameterangaben simuliert werden, wobei die Parameter von Hand eingegeben werden müssen.⁶⁸

Bei der Ermittlung des Simulationsumfanges muss geklärt werden wie viele Replikationen erforderlich sind, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.⁶⁹ Die Replikationslänge beträgt 10800, da ein Zeitraum von drei Stunden simuliert wird.⁷⁰ Beim Test des Modells⁷¹ mit unterschiedlichen Replikationsanzahlen zeigt sich, dass schon ab 70 Replikationen keine großen Veränderungen in den Schlangenlängen und Wartezeiten zwischen den einzelnen Modellen auftreten. Daher werden bei der Optimierung 100 Replikationen verwendet. Die nachfolgende Grafik zeigt beispielhaft die Änderung der *Kunde.TotalTime* in Abhängigkeit von der Replikationsanzahl.

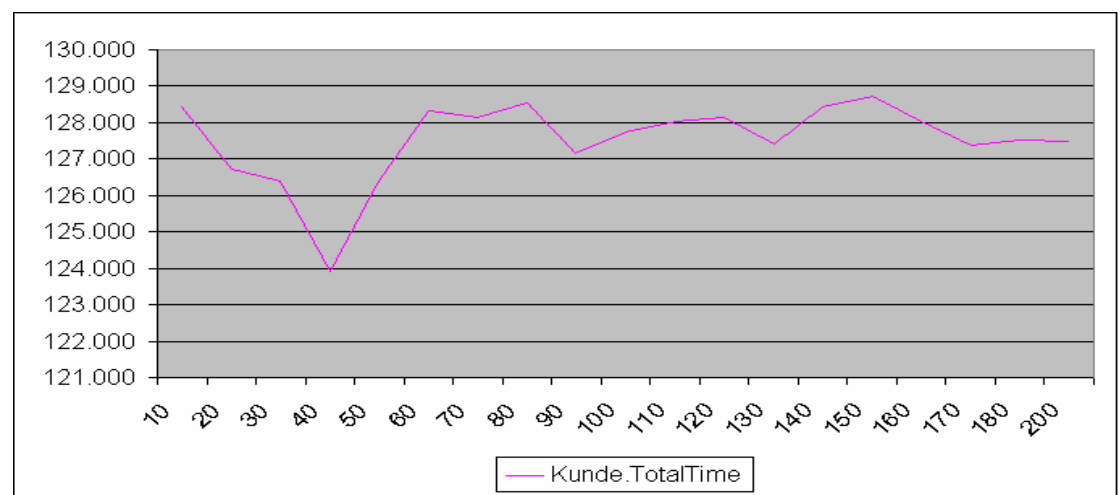


Abb. 5: *Kunde.TotalTime* in Abhängigkeit von der Replikationsanzahl

Begonnen wird die Optimierung mit der Analyse der Ist-Situation. In Anhang 21 sind die entsprechenden Daten zu finden. Die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen des mathematischen Modells ist eingeschränkt, da im Simulationsmodell die Wege z.T. in kurze Abschnitte gegliedert und zusätzlich ‚K1‘ und ‚K2‘ eingeführt wurde.

⁶⁷ Vgl. Kelten, W. D.; Sadowski, R. P., Sturrock, D. T., Arena, 2004, S. 275.

⁶⁸ Vgl. Kelten, W. D.; Sadowski, R. P., Sturrock, D. T., Arena, 2004, S. 296.

⁶⁹ Vgl. Biethahn, J. u.a., Methoden, 2000, S.125, S.178-179.

⁷⁰ Vgl. Kapitel 2.1.

⁷¹ Für den Test wurde das Modell der Ist-Situation herangezogen.

Übereinstimmend mit dem mathematischen Modell zeigen die Ergebnisse, dass die Stationen ‚Kaffee‘ und ‚Kasse‘ den „Flaschenhals“ des Systems bilden. Auch die Station ‚Essen‘ ist durch eine hohe *Queue.WaitingTime* geprägt, was mit den langen Bedienzeiten zu begründen ist und aufgrund der geringen Auslastung keinen akuten Handlungsbedarf erfordert.

Zu untersuchen ist nun, wie sich der Einsatz einer zweiten Kasse auf das System auswirkt. Die Ergebnisse stehen in Anhang 22. An der Station ‚Kasse‘ ist eine große Reduzierung der *Queue.NumberWaiting* und *Queue.WaitingTime* zu erkennen, was sich positiv auf die Verweilzeit im Gesamtsystem auswirkt. Dieser Umstand war bei der Inbetriebnahme einer zweiten Kasse zu erwarten. Erstaunlich ist jedoch, dass sich die Leistungsgrößen der anderen Stationen im Vergleich zur Ausgangssituation nur geringfügig verbessert haben. Hier hätte man deutlichere Änderungen erwarten können. Der Grund liegt darin, dass mögliche Blockierungen von Folgewegen doch nicht so große Auswirkungen auf die Leistungsgrößen haben wie zuvor vermutet. Wie schon in Kapitel 3.3 dargelegt, kann wegen zu hoher Lohnkosten auch hier der Einsatz einer zusätzlichen Kassiererin nicht empfohlen werden.

Es bleibt zu analysieren, ob eine der meist drei Angestellten, die die Stationen betreuen, die zweite Kasse für einen Zeitraum von fünf Minuten besetzen soll. Dies darf daher nur kurz geschehen, da sonst die Bedienzeiten der übrigen Stationen stark ansteigen. Z.B. muss in gewissen Abständen der Kaffeeautomat bestückt werden und die Station ‚Essen‘ bedarf einer ständigen Aufsicht. Unter der Prämisse eines kurzen Einsatzes der zweiten Kasse werden alle Bedienraten aus der Ist-Situation übernommen. In verschiedenen Replikationen wird überprüft, wann die zweite Kasse zugeschaltet werden soll. Die rote Linie in der folgenden Abbildung repräsentiert die *Kunde.TotalTime* der Ist-Situation. Es gibt dem zufolge bestimmte Zeiträume, in denen Zeitgewinne von etwa 14% erzielt werden können. Beim Auftreten einer großen Warteschlange sollte also eine zusätzliche Kasse für wenige Minuten in Betrieb genommen werden. In Anhang 23 wird dieses Szenario noch einmal für einen Betriebszeitraum von zehn Minuten verdeutlicht. Fraglich ist aber, ob bei zehn Minuten nicht die Bedienzeiten der übrigen Stationen ansteigen.

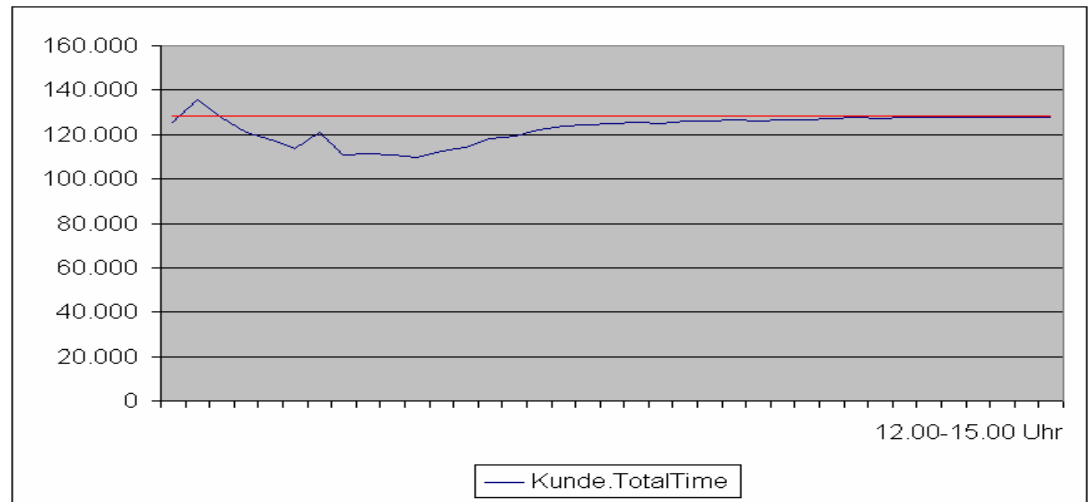


Abb. 6: *Kunde.TotalTime* in Abhängigkeit vom Zuschaltungszeitpunkt der zweiten Kasse (Zeitraum der Inbetriebnahme = 300 Sek.)

Die Dauer des Bezahlvorganges an der Kasse ist besonders durch die Zeit geprägt, die für den Austausch des Geldes benötigt wird. Lediglich ein Bruchteil der Gesamtzeit verursacht die Kassiererin bei der Erfassung der zu zahlenden Güter. Alle Preise im Café Central sind bereits auf ein Vielfaches von fünf gerundet. Somit kann an diesem Punkt nicht angesetzt werden, um die Bedienzeit an der Station ‚Kasse‘ zu reduzieren. Zukünftig sollen jedoch die Studentenausweise an der Georg-August-Universität Göttingen mit einer Bezahlungsfunktion ausgestattet sein.⁷² Dieser Umstand macht die Untersuchung einer veränderten Zahlungsmethode interessant. Die Simulation dieses Szenarios geschieht unter der Annahme, dass nicht alle Kunden mit dem Studentenausweis bezahlen werden und somit die exponential verteilte mittlere Bedienzeit der ‚Kasse‘ acht Sekunden beträgt. In Anhang 24 werden die Daten der Simulation zusammengefasst. Im Vergleich zur Ist-Situation wird die *Kunde.WaitingTime* um 60,1% und die *Kunde.TotalTime* um 39,8% reduziert, was auf eine Verbesserung der Leistungsgrößen an der ‚Kasse‘ zurückzuführen ist. Das Verhalten der übrigen Stationen ändert sich wiederum kaum. Die *Kunde.TotalTime* ist im Vergleich zum Szenario mit zwei Kassen nur 9,7 Sekunden länger. Bei zukünftigen Investitionen in Kassensysteme sollte die Bezahlung per Studentenausweis berücksichtigt werden, da sie die Wartezeiten reduzieren hilft.

⁷² Vgl. Westfälischer Anzeiger Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, Studentenausweis, 2005.

Nun wird die Situation untersucht das ein Kaffeeautomat mit Münz-Zahlungssystem außerhalb des Einkaufsbereiches aufgestellt wird. Das Modell wird derart geändert, dass die Station ‚Kaffee‘ mit 50% weniger Kunden zu rechnen hat. Die Ergebnisse dieser Änderungen sind in Anhang 25 dargestellt und übertreffen alle Erwartungen. Dieses Szenario ist mit einer *Kunde.TotalTime* von 40,29 Sekunden und einer *Kunde.WaitingTime* von 7,69 Sekunden sogar besser als die durchgehende Besetzung einer zweiten Kasse. Dank des zusätzlichen Automaten gelangen während des Simulationszeitraumes etwa 250 Kunden⁷³ weniger in das Warteschlangennetzwerk, was sich positiv auf die Stationen ‚Kaffee‘ und ‚Kasse‘ auswirkt. Es sollte also ernsthaft in Erwägung gezogen werden, einen zweiten Kaffeeautomaten mit Bezahlfunktion aufzustellen.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse soll die Auswirkung veränderter Ankunftsrate geprüft werden. Es wird hierdurch noch einmal gezeigt, wie sich eine Reduzierung des Ankunftsstromes durch einen Kaffeeautomaten vor der Geschirrrückgabe auf das System auswirkt. Die nachfolgende Abbildung zeigt die *Kunde.WaitingTime* in Abhängigkeit von der prozentualen Änderung der Ankunftsrate. Selbstverständlich sind die Ergebnisse der Analyse idealisiert. Beispielsweise stehen bei einer Erhöhung des Ankunftsstromes um 40% mehr als 200 Kunden am Ende des Simulationszeitraums nach einem Kaffee an. In der Realität wird dieser Zustand niemals erreicht. Die Grafik zeigt jedoch wie sensibel das System reagiert. Bei 80% beträgt die *Kunde.WaitingTime* 9 Sekunden und bei 120% schon 296 Sekunden.

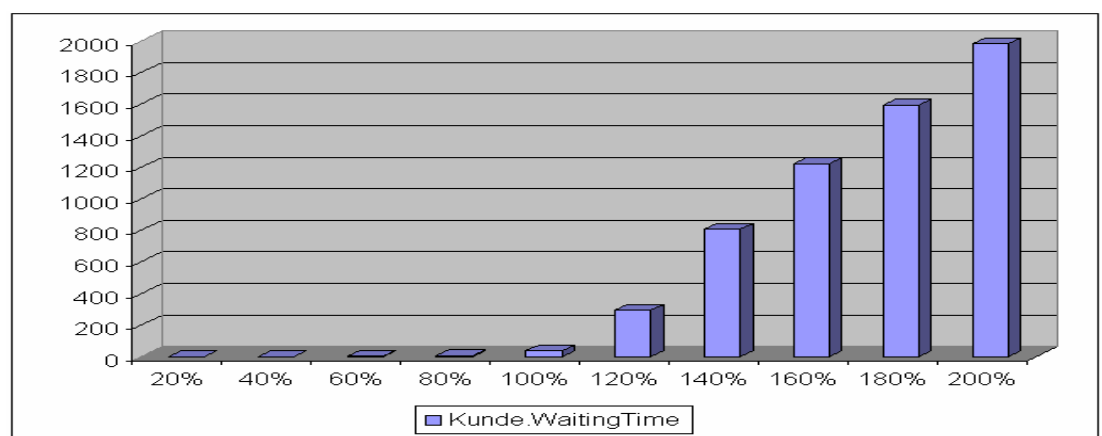


Abb. 7: *Kunde.WaitingTime* bei prozentualer Änderung der Ankunftsrate

⁷³ Dies entspricht einer Reduzierung um etwa 32%.

4.3 Kritik am Simulationsmodell

Im Rahmen der Validierung wird nun die Frage geklärt, ob das Modell eine hinreichend genaue Abbildung der Realität ist.⁷⁴ Das in dieser Arbeit verwendete Simulationsmodell kann die Realität natürlich nicht detailgetreu abbilden. Hierzu müssten die Wege und Stationen noch feiner untergliedert werden. Zur Abbildung unterschiedlichen Verhaltens wären lastenabhängige Bedienzeiten wünschenswert. Da das Café Central in dieser Arbeit unter einer Maximalbelastung untersucht werden sollte, ist dies nicht im Modell umgesetzt worden. Auch findet menschliches Verhalten in Wartesituationen nur dahingehend Anwendung, dass der Kunde als egoistisch und zielorientiert implementiert ist. Er steuert seine Zielstation auf einem vorher festgelegten Weg direkt an und ändert dabei seine Geschwindigkeit nicht. Rücksichtsvolles Verhalten fehlt in dieser Simulation also gänzlich. Dennoch kann aufgrund von zahlreichen Beobachtungen gesagt werden, dass das Simulationsmodell das reale System recht gut abbildet. Markante Eigenschaften des Café Central wie die starke Abhängigkeit der Leistungsgrößen von der Ankunftsrate, Blockierungen von Folgewegen sowie die Stationen ‚Kaffee‘ und ‚Kasse‘, welche den „Flaschenhals“ des Systems darstellen, finden sich auch im Modell wieder.

Ein Kritikpunkt kann zu den *Templates* geäußert werden. Sie haben den Nachteil, dass einige Änderungen an ihnen nicht in das Simulationsmodell übernommen werden. In diesen Fällen muss dann das Modell völlig neu konstruiert werden. Trotzdem erleichtern sie die Arbeit am Modell und erlauben auch dem Laien schnell verschiedene Simulationsexperiment durchzuführen.

⁷⁴ Vgl. Biethahn, J. u.a., Methoden, 2000, S.125, S.177.

5 Schlussbetrachtung

Mit dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass es im Café Central diverse Verbesserungsmöglichkeiten bei der Vermeidung von Wartesituationen gibt. Als besonders vielversprechend ist die Einrichtung einer zweiten Kaffeemaschine mit Münz-Bezahlsystem zu erachten. Auch sollten die Kassen entsprechend umgerüstet werden, wenn zukünftig die Studentenausweise mit einer Bezahlfunktion ausgestattet sind.

Es hat sich im Simulationsmodell und im mathematischen Modell gezeigt, dass eine zusätzliche Kassiererin zwar wünschenswert, aber nicht bezahlbar ist. Ihre Lohnkosten stehen in keinem Verhältnis zu den Wartekosten der Kunden. Daher sollte die zweite Kasse nur von bereits vorhandenem Personal bedient werden, um zusätzliche Lohnkosten zu vermeiden. Dies kann jedoch nur kurzzeitig erfolgen, da das Personal schon jetzt stark ausgelastet ist.

Technische Neuerungen wie RFID⁷⁵ könnten zukünftig den Bezahlvorgang weiter verkürzen. Hierzu müssten Umverpackungen schon vom Hersteller mit Wie sich diese Technologien im praktischen Einsatz am Point of Sale bewähren bleibt abzuwarten und muss im Einzelnen geprüft werden.

Die Leistungsgrößen von Warteschlange- und Simulationsmodell sind nur eingeschränkt vergleichbar, da sie unter verschiedenen Prämissen und Detaillierungsgraden entwickelt wurden. Es kann aber festgestellt werden, dass beide Modelltypen ähnliche Optimierungsergebnisse liefern. Das Szenario eines zusätzlichen Kaffeeautomaten konnte bei beiden Modellen als beste Lösung favorisiert werden.

Mathematische Modelle erlauben eine schnelle Berechnung der Leistungsgrößen, haben aber den Nachteil, dass für eine Problemsituation ein passendes mathematisches Modell gefunden werden muss. Mit Simulationsmodellen können Problemstellungen detaillierter abgebildet werden und sie eignen sich besser, um Einflussgrößen auf das Verhalten eines Systems zu ermitteln. Leider sind Berechnungen in derartigen Modellen sehr langwierig, was bei der Lösung einfacher Fragestellungen gegen Simulationsmodelle und für mathematische Modelle spricht.

⁷⁵ Vgl. *Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik*, RFID, 2004, S. 14-21.

Literaturverzeichnis

Ahlborn, Walter; Kricke, Manfred [Statistik, 1994]: Hilfsblätter zu den Vorlesungen in Statistik II für Wirtschaftswissenschaftler, Göttingen [Druckort]: o. Verlag, 1994

Biethahn, Jörg u.a. [Methoden, 2000]: Methoden der praktischen Entscheidungsfindung, 4., überarbeitete Auflage, Göttingen [Druckort]: o. Verlag, 2000

Bolch, Gunter u.a. [Queue, 1998]: Queueing Networks and Markov Chains. Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications, New York u.a.: Wiley, 1998

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik [RFID, 2004]: Risiken und Chancen des Einsatzes von RFID-Systemen. Trends und Entwicklungen in Technologien, Anwendungen und Sicherheit, Ingelheim: Secu Media, 2004

Domschke, Wolfgang; Drexl, Andreas [Einführung in OR, 2002]: Einführung in Operations Research, 5., überarbeitete und erweiterte Auflage, Berlin u.a.: Springer, 2002

Hillier, Frederick S.; Lieberman, Gerald J. [OR II, 1988]: Operations Research. Einführung (Introduction to Operations Research, deutsch), übersetzt von Gabriele Bauer u.a., 4. Auflage, München; Wien: Oldenbourg, 1988

Kelten, W. David; Sadowski, Randall P., Sturrock, David T. [Arena, 2004]: Simulation with Arena, 3. Auflage, Boston u.a.: McGraw-Hill, 2004

Lampertz, Winfried [Kasseneinsatzplanung, 2004]: Tesco. Zeitnahe Kasseneinsatzplanung, in: Retail Technology Journal. Informations-, Kommunikations- und Sicherheitstechnik im Handel, 5 (2004), Heft 1, S. 40-41

Lehmann, Fritz [Wartenetze, 2001]: Wartenetze. Quantitative Modelle für Rechen- und Kommunikationssysteme II, München [Druckort]: o. Verlag, 2001

Leiner, Bernd [Stichprobentheorie, 1989]: Stichprobentheorie. Grundlagen, Theorie und Technik, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, München; Wien: Oldenbourg, 1989

Leonhardt-Weber, Birgit [Verkehr, 1989]: Die Entwicklung der Qualitätsmerkmale im Verkehr. Eine Analyse vor dem Hintergrund der technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung, München: VVF, 1990

Masch, Eduard; Nolte, Dirk; Northoff, Christian; Strewitz, Robert [Projektbericht, 2003]: Studienprojektbericht. Konzeption und Implementierung von Arena-Templates zur Simulation von Verkehrskreuzungen, Göttingen [Druckort]: o. Verlag, 2003

Mertens, Peter [Simulation, 1982]: Simulation, 2., neu bearbeitete Auflage, Stuttgart: Poeschel, 1982

Müller-Merbach, Heiner [OR III, 1973]: Operations Research. Methoden und Modelle der Optimalplanung, 3., durchgesehene Auflage, München: Vahlen, 1973

Müller-Clostermann, Bruno [Netze, 2003]: Stochastische Netze. Warteschlangennetze, Essen [Druckort]: o. Verlag, 2003

Müller-Clostermann, Bruno; Flüs, Corinna [Leistungsbewertung, 2003]: Kapazitätsplanung und Leistungsbewertung. Teil B: Leistungsbewertung, Essen [Druckort]: o. Verlag, 2003

Opitz, Alek [Performance, 2003]: Performance Measurement and Tuning in Distributed Systems, Cottbus [Druckort]: o. Verlag, 2003

Robertazzi, Thomas G. [Computer, 2000]: Computer Networks and Systems. Queueing Technology and Performance Evaluation, 3. Auflage, New York u.a.: Springer, 2000

- Runzheimer, Bodo* [OR IV, 1978]: Operations Research II. Methoden der Entscheidungsfindung bei Risiko, Wiesbaden: Gabler, 1978
- Schassberger, Rolf* [Warteschlangen, 1973]: Warteschlangen, Wien; New York: Springer, 1973
- Serfozo, Richard* [Stochastic, 1999]: Introduction to Stochastic Networks. Stochastic Modelling and Applied Probability, New York u.a.: Springer, 1999 (Applications of Mathematics, Nr. 44)
- Streng, Jörg* [Neuronale Netze, 2001]: Optimierung und Analyse von Fachwerkstrukturen durch Neuronale Netze, Stuttgart [Druckort]: o. Verlag, 2001 (zugl. Diss. Universität Stuttgart, 2001)
- Studentenwerk Göttingen* [Café, 2005]: Café Central, <http://www.studentenwerk-goettingen.de/cafeterien/central.php>, 1. Januar 2005
- Terzic, Zoran* [Warten, 2004]: Traktat über die Schlange. Ein Regelwerk kulturellen Wartens, <http://www.brock.uni-wuppertal.de/Projekte/zoran/Traktat/schlange.html>, 23. November 2004
- Tietzel, Manfred; Müller, Christian* [Rationierung, 1998]: Ökonomische Theorie der Rationierung, hrsg. von *Manfred Tietzel*, München: Vahlen, 1998
- Volkmar, Henning* [Quantifizierung, 1998]: Quantifizierung nachhaltiger motorisierter Mobilität, 1. Auflage, Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger, 1999 (CUTEC-Schriftenreihe, Nr. 33, zugleich Dissertation Clausthal Technische Universität, 1998)
- Westfälischer Anzeiger Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG* [Studentenausweis, 2005]: Chipkarte statt Studenausweis. Mit „elektronischer Geldbörse“ in die Mensa, <http://www.wa-online.de/computer/?storyid=1447>, 09. Januar 2005

Willeke, Rainer [Mobilität, 1996]: Mobilität, Verkehrsmarktforschung, externe Kosten und Nutzen des Verkehrs, Frankfurt am Main: Verband der Automobilindustrie e.V., 1996

Wöhe, Günther; Döring, Ulrich [BWL, 2002]: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 21., neubearbeitete Auflage, München: Vahlen, 2002

Zimmermann, Werner [OR I, 1995]: Operations Research. Quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung, 7., verbesserte und ergänzte Auflage, München; Wien: Oldenbourg, 1995

Anhang

| | | |
|------------|--|---------|
| Anhang 1: | Quellcode zur Ermittlung der Zwischenankunftszeit | XXXII |
| Anhang 2: | Quellcode zur Ermittlung der Bedienzeit | XXXIII |
| Anhang 3: | Quellcode zur Ermittlung der Routingwahrscheinlichkeiten zu Folgewegen | XXXIV |
| Anhang 4: | Ankunftsraten für das mathematische Modell in der Ist-Situation | XXXIV |
| Anhang 5: | Leistungsgrößen des mathematischen Modells in der Ist-Situation | XXXV |
| Anhang 6: | Leistungsgrößen des mathematischen Modells bei zwei Kassen | XXXV |
| Anhang 7: | Ankunftsraten für das mathematische Modell bei einer zusätzlichen Kaffeemaschine | XXXVI |
| Anhang 8: | Leistungsgrößen des mathematischen Modells mit zusätz- licher Kaffeemaschine | XXXVI |
| Anhang 9: | Eingabemaske des <i>KundeDispose-Moduls</i> | XXXVII |
| Anhang 10: | Operand View des <i>KundeDispose-Moduls</i> | XXXVII |
| Anhang 11: | Logic View des <i>KundeDispose-Moduls</i> | XXXVII |
| Anhang 12: | Eingabemaske des <i>Way-Moduls</i> | XXXVIII |
| Anhang 13: | Operand View des <i>Way-Moduls</i> | XXXVIII |
| Anhang 14: | Logic View des <i>KundeDispose-Moduls</i> | XXXIX |
| Anhang 15: | Eingabemaske des <i>WayChoice-Moduls</i> | XXXIX |
| Anhang 16: | Operand View des <i>WayChoice-Moduls</i> | XL |
| Anhang 17: | Logic View des <i>WayChoice-Moduls</i> | XL |
| Anhang 18: | Eingabemaske des <i>KundeCreate-Moduls</i> | XLI |
| Anhang 19: | Operand View des <i>KundeCreate-Moduls</i> | XLI |
| Anhang 20: | Logic View des <i>KundeCreate-Moduls</i> | XLI |
| Anhang 21: | Leistungsgrößen des Simulationsmodells in der Ist-Situation | XLII |
| Anhang 22: | Leistungsgrößen des Simulationsmodells bei zwei Kassen | XLII |
| Anhang 23: | <i>Kunde.TotalTime</i> in Abhängigkeit vom Zuschaltungszeitpunkt der zweiten Kasse (Zeitraum der Inbetriebnahme = 600 Sek.) | XLIII |

| | |
|--|-------|
| Anhang 24: Leistungsgrößen des Simulationsmodells bei Bezahlungsfunktion des Studentenausweises | XLIII |
| Anhang 25: Leistungsgrößen des Simulationsmodells bei einer zusätzlichen Kaffeemaschine | XLIV |

```
#Zwischenankunft.bas
m1=int((fn 17)/100)
mz$="Zeitausgabe"
open new "memo",mz$ as #4
draw -1
form btn 10,65,30,40,"Start",1
form btn 50,40,105,90,"Stop",1
draw "0",20,20,2
while (asc(input$(1))<>14)
wend

start:
m=int((fn 17)/100)
m$=str$(m-m1)
draw str$(m),20,20,2
if (asc(inkey$)=15) then goto stop
goto start

stop:
print #4, m$
m1=m
goto start
end
```

Anhang 1: Quellcode zur Ermittlung der Zwischenankunftszeit

```
#Stoppuhr.bas
mz$="Bedienzeiten"
open new "memo",mz$ as #4
draw -1
form btn 10,40,65,90,"Start",1
form btn 85,40,65,90,"Stop",1

start:
s$=str$(int((timer-a%)/60))
draw s$+" ",20,20,2
if (asc(inkey$)=15) then goto stop
goto start

stop:
print #4, s$
while (asc(input$(1))<>14)
wend
s$="00"
a%=timer
goto start
end
```

Anhang 2: Quellcode zur Ermittlung der Bedienzeit

```
#Counter.bas
draw -1
form btn 10,40,65,90," LINKS",1
form btn 85,40,65,90,"RECHTS",1
dim n%(2)

start:
c=asc(input$(1))-14
if ((c>=0) and (c<=2))
n%(c)=n%(c)+1
draw str$(n%(c),5),10+c*50,20,2
endif
goto start
```

Anhang 3: Quellcode zur Ermittlung der Routingwahrscheinlichkeiten zu Folge-
wegen

| Station | Ankunftsrate |
|--------------|--------------|
| Aktionstheke | 0,0059 |
| Brötchen | 0,0111 |
| Essen | 0,0066 |
| Kaffee | 0,0518 |
| Kasse | 0,0699 |
| Kaugummi | 0,0057 |
| Treppe | 0,0699 |

Anhang 4: Ankunftsraten für das mathematische Modell in der Ist-Situation

| Station | Leistungsgröße | Ergebnis |
|---------------------|----------------|----------|
| Aktionstheke | ρ | 0,07 |
| | L_q | 0,01 |
| | L_n | 0,08 |
| | W_q | 0,96 |
| | \vee | 13,26 |
| Brötchen | ρ | 0,21 |
| | L_q | 0,06 |
| | L_n | 0,26 |
| | W_q | 4,96 |
| | \vee | 23,76 |
| Essen | ρ | 0,22 |
| | L_q | 0,06 |
| | L_n | 0,28 |
| | W_q | 9,26 |
| | \vee | 42,37 |
| Kaffee | ρ | 0,69 |
| | L_q | 1,52 |
| | L_n | 2,21 |
| | W_q | 29,44 |
| | \vee | 42,74 |
| Kasse | ρ | 0,79 |
| | L_q | 2,97 |
| | L_n | 3,76 |
| | W_q | 42,46 |
| | \vee | 53,76 |
| Kaugummi | ρ | 0,31 |
| | L_q | 0,14 |
| | L_n | 0,44 |
| | W_q | 2,38 |
| | \vee | 7,76 |
| Gesamtsystem | L_q | 4,75 |
| | L_n | 6,59 |
| | W_q | 84,50 |
| | \vee | 183,65 |

Anhang 5: Leistungsgrößen des mathematischen Modells in der Ist-Situation

| Station | Leistungsgröße | Ergebnis |
|---------------------|----------------|----------|
| 2 Kassen | ρ | 0,79 |
| | L_q | 0,64 |
| | L_n | 1,43 |
| | W_q | 9,20 |
| | \vee | 20,49 |
| Gesamtsystem | L_q | 2,42 |
| | L_n | 4,71 |
| | W_q | 56,19 |
| | \vee | 150,38 |

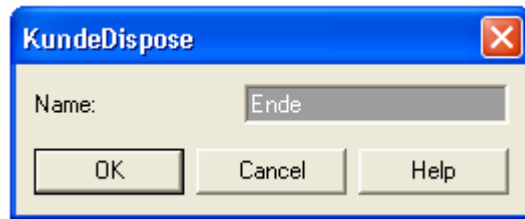
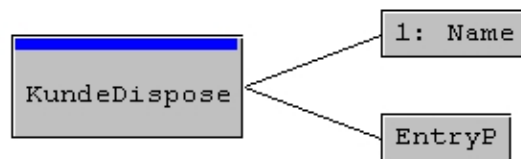
Anhang 6: Leistungsgrößen des mathematischen Modells bei zwei Kassen

| Station | Ankunftsrate |
|--------------|--------------|
| Aktionstheke | 0,0034 |
| Brötchen | 0,0096 |
| Essen | 0,0034 |
| Kaffee | 0,0259 |
| Kasse | 0,0350 |
| Kaugummi | 0,0028 |
| Treppe | 0,0350 |

Anhang 7: Ankunftsrate für das mathematische Modell bei einer zusätzlichen Kaffeemaschine

| Station | Leistungsgröße | Ergebnis |
|---------------------|----------------|----------|
| Aktionstheke | ρ | 0,04 |
| | L_q | 0,00 |
| | L_n | 0,04 |
| | W_q | 0,54 |
| | V | 12,84 |
| Brötchen | ρ | 0,18 |
| | L_q | 0,04 |
| | L_n | 0,22 |
| | W_q | 4,15 |
| | V | 22,95 |
| Essen | ρ | 0,11 |
| | L_q | 0,01 |
| | L_n | 0,13 |
| | W_q | 4,22 |
| | V | 37,34 |
| Kaffee | ρ | 0,32 |
| | L_q | 0,15 |
| | L_n | 0,48 |
| | W_q | 5,98 |
| | V | 18,48 |
| Kasse | ρ | 0,38 |
| | L_q | 0,23 |
| | L_n | 0,61 |
| | W_q | 6,55 |
| | V | 17,35 |
| Kaugummi | ρ | 0,02 |
| | L_q | 0,00 |
| | L_n | 0,02 |
| | W_q | 0,08 |
| | V | 5,46 |
| Gesamtsystem | L_q | 0,44 |
| | L_n | 1,49 |
| | W_q | 21,54 |
| | V | 114,43 |

Anhang 8: Leistungsgrößen des mathematischen Modells mit zusätzlicher Kaffeemaschine

Anhang 9: Eingabemaske des *KundeDispose*-ModulsAnhang 10: Operand View des *KundeDispose*-ModulsAnhang 11: Logic View des *KundeDispose*-Moduls



Way

Name: W_Kaffee_K2

Länge des Weges: 5

MaxWaySpeed: 1

Bedingung

Bedingung: Way 9.UsedCapacity+Kun

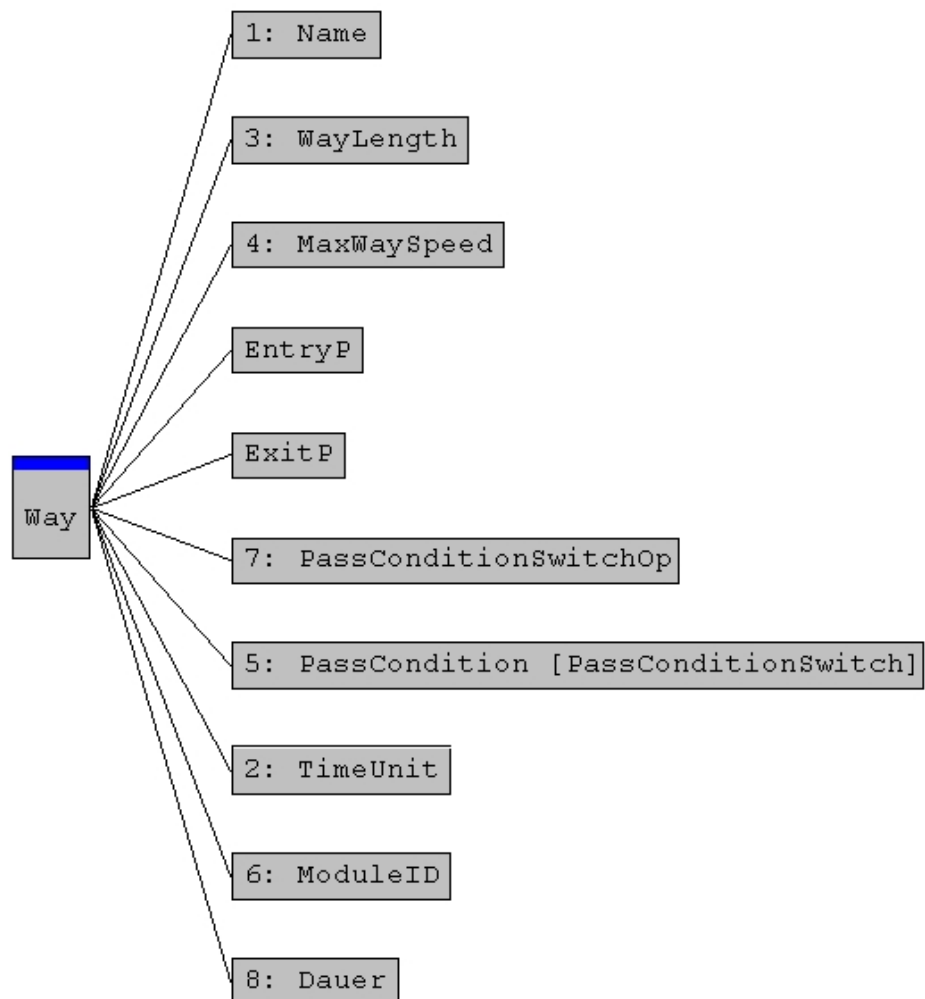
Zeiteinheit: Seconds

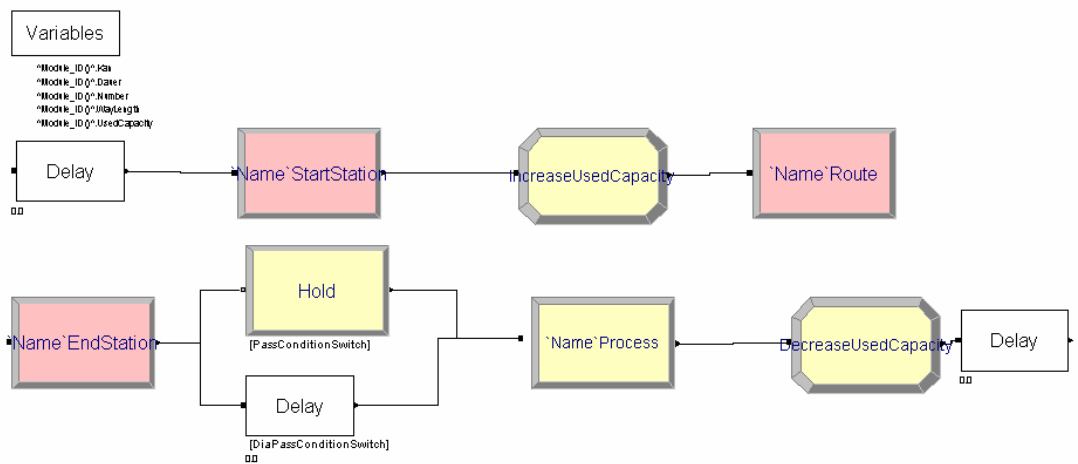
Module ID: Way 5

Bedienzeit: ABS(0)

Kanäle: 1

OK Cancel Help

Anhang 12: Eingabemaske des *Way-Moduls*Anhang 13: Operand View des *Way-Moduls*

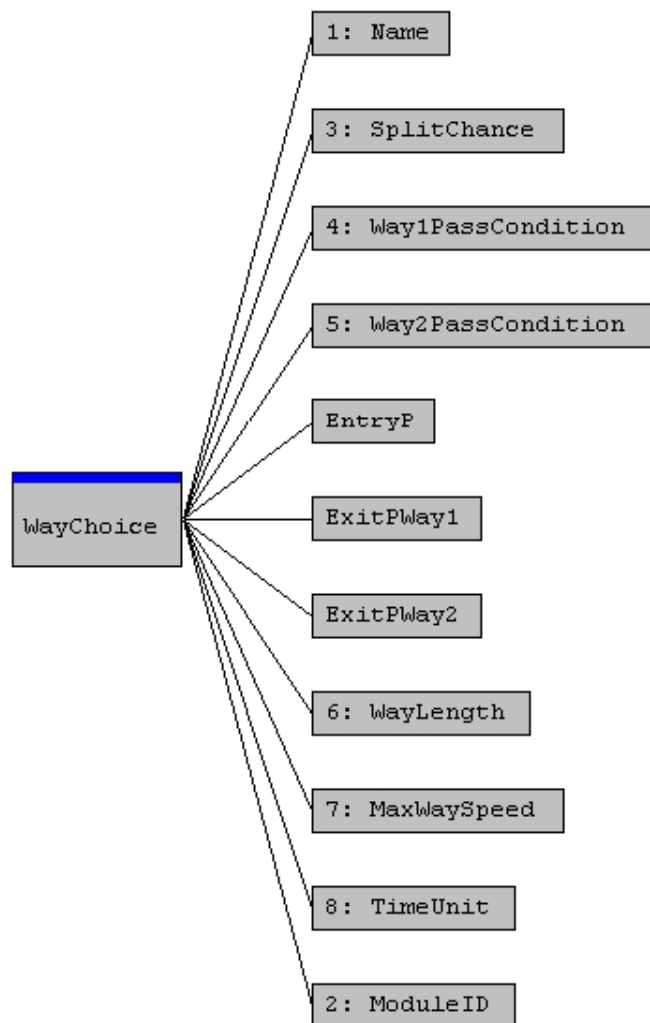
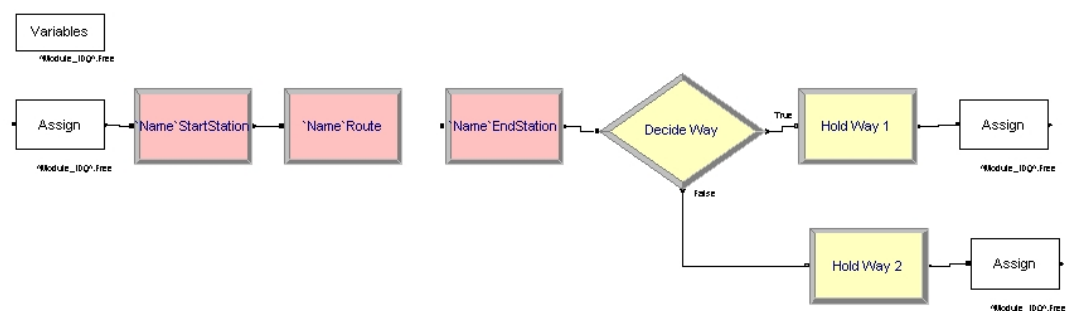
Anhang 14: Logic View des *KundeDispose*-Moduls

The **WayChoice** dialog box contains the following fields and values:

| | |
|---------------------------|-------------|
| Name: | Rest_K1 |
| Chance Weg 1: | 30 |
| Weg 1 Bedingung: | 1 == 1 |
| Weg 2 Bedingung: | 1 == 1 |
| Weg Länge: | 0 |
| Maximale Geschwindigkeit: | 1 |
| Zeiteinheit: | Seconds |
| Module ID: | WayChoice 1 |

Buttons: OK, Cancel, Help

Anhang 15: Eingabemaske des *WayChoice*-Moduls

Anhang 16: Operand View des *WayChoice*-ModulsAnhang 17: Logic View des *WayChoice*-Moduls

KundeCreate

Name: Start_Treppe

Zwischenankunftszeit: EXPO(SchedValue(TREPF

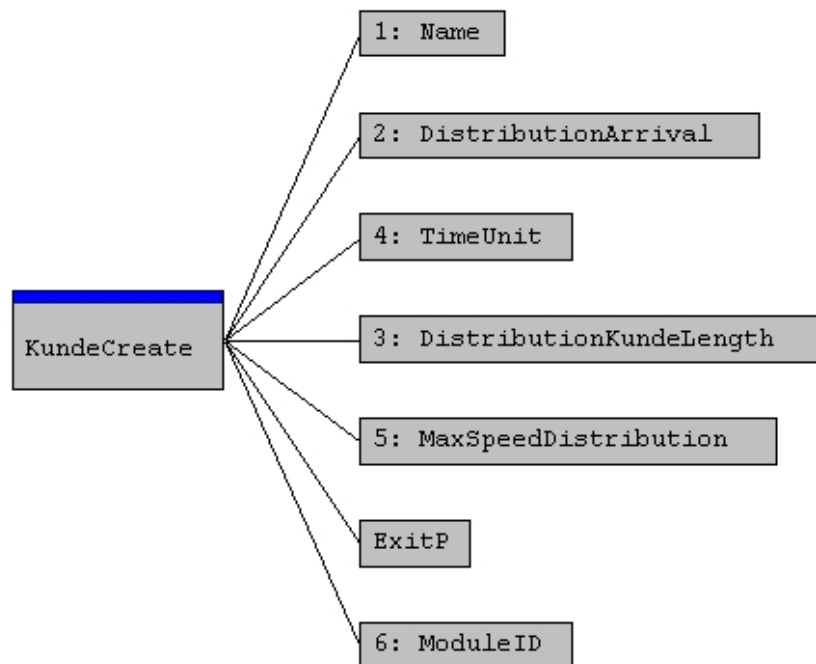
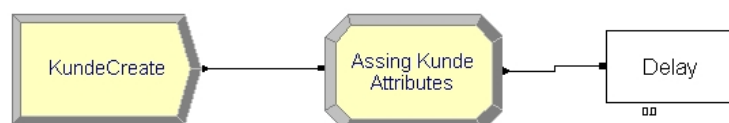
Zeiteinheit: Seconds

Kunde Länge: 0.7

Maximale Geschwindigkeit: 1

ModuleID: KundeCreate 1

OK Cancel Help

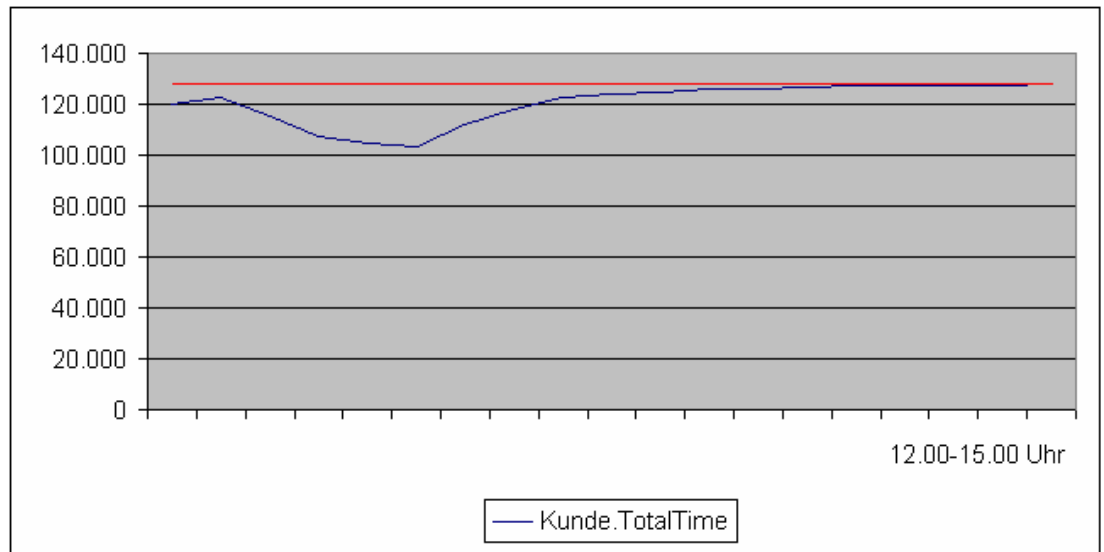
Anhang 18: Eingabemaske des *KundeCreate*-ModulsAnhang 19: Operand View des *KundeCreate*-ModulsAnhang 20: Logic View des *KundeCreate*-Moduls

| Station | Leistungsgröße | Ergebnis |
|---------------------|-----------------------------|----------|
| Aktionstheke | <i>Resource.Utilization</i> | 0,02 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,00 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 0,00 |
| Brötchen | <i>Resource.Utilization</i> | 0,11 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,00 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 9,66 |
| Essen | <i>Resource.Utilization</i> | 0,24 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,04 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 44,29 |
| Kaffee | <i>Resource.Utilization</i> | 0,67 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,91 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 28,71 |
| Kasse | <i>Resource.Utilization</i> | 0,76 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 1,19 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 20,82 |
| Kaugummi | <i>Resource.Utilization</i> | 0,01 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,06 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 0,00 |
| Gesamtsystem | <i>Kunde.WaitingTime</i> | 79,74 |
| | <i>Kunde.TotalTime</i> | 127,74 |

Anhang 21: Leistungsgrößen des Simulationsmodells in der Ist-Situation

| Station | Leistungsgröße | Ergebnis |
|---------------------|-----------------------------|----------|
| Aktionstheke | <i>Resource.Utilization</i> | 0,02 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,00 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 0,00 |
| Brötchen | <i>Resource.Utilization</i> | 0,11 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,00 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 7,01 |
| Essen | <i>Resource.Utilization</i> | 0,24 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,04 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 43,52 |
| Kaffee | <i>Resource.Utilization</i> | 0,67 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,54 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 22,35 |
| Kasse | <i>Resource.Utilization</i> | 0,38 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,06 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 5,11 |
| Kaugummi | <i>Resource.Utilization</i> | 0,01 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,00 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 0,00 |
| Gesamtsystem | <i>Kunde.WaitingTime</i> | 18,50 |
| | <i>Kunde.TotalTime</i> | 67,21 |

Anhang 22: Leistungsgrößen des Simulationsmodells bei zwei Kassen



Anhang 23: *Kunde.TotalTime* in Abhängigkeit vom Zuschaltungszeitpunkt der zweiten Kasse (Zeitraum der Inbetriebnahme = 600 Sek.)

| Station | Leistungsgröße | Ergebnis |
|---------------------|-----------------------------|----------|
| Aktionstheke | <i>Resource.Utilization</i> | 0,02 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,00 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 0,00 |
| Brötchen | <i>Resource.Utilization</i> | 0,10 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,00 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 8,49 |
| Essen | <i>Resource.Utilization</i> | 0,24 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,04 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 44,15 |
| Kaffee | <i>Resource.Utilization</i> | 0,68 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,57 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 23,02 |
| Kasse | <i>Resource.Utilization</i> | 0,56 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,56 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 13,88 |
| Kaugummi | <i>Resource.Utilization</i> | 0,01 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,00 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 0,00 |
| Gesamtsystem | <i>Kunde.WaitingTime</i> | 31,78 |
| | <i>Kunde.TotalTime</i> | 76,92 |

Anhang 24: Leistungsgrößen des Simulationsmodells bei Bezahlfunktion des Studentenausweises

| Station | Leistungsgröße | Ergebnis |
|---------------------|-----------------------------|----------|
| Aktionstheke | <i>Resource.Utilization</i> | 0,02 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,00 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 0,00 |
| Brötchen | <i>Resource.Utilization</i> | 0,11 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,00 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 7,64 |
| Essen | <i>Resource.Utilization</i> | 0,24 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,04 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 42,39 |
| Kaffee | <i>Resource.Utilization</i> | 0,35 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,04 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 11,78 |
| Kasse | <i>Resource.Utilization</i> | 0,49 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,30 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 12,97 |
| Kaugummi | <i>Resource.Utilization</i> | 0,01 |
| | <i>Queue.NumberWaiting</i> | 0,00 |
| | <i>Queue.WaitingTime</i> | 0,00 |
| Gesamtsystem | <i>Kunde.WaitingTime</i> | 7,69 |
| | <i>Kunde.TotalTime</i> | 40,29 |

Anhang 25: Leistungsgrößen des Simulationsmodells bei einer zusätzlichen Kaffee
maschine