

ÜBER DIE WIRKSAMKEIT ZYKLISCHER ABFERTIGUNGSSTRATEGIEN
IN REALZEITSYSTEMEN

Paul Kühn und Manfred Langenbach-Belz

Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung
Universität Stuttgart

1. EINLEITUNG

In Realzeitsystemen tritt sowohl in der Peripherie als auch in der Zentraleinheit häufig das Problem auf, daß mehrere Anforderungen aus verschiedenen Geräten bzw. Warteschlangen gleichzeitig dasselbe Betriebsmittel in Anspruch nehmen wollen. Als Beispiele seien genannt: a) der von Teilnehmerstationen erzeugte Verkehr in Teilnehmerrechensystemen, b) die aus der Peripherie kommenden Meldungen bei der Prozeßdatenverarbeitung in Realzeitrechnern, c) der Zugriff von Vorverarbeitungseinheiten auf zentrale Verarbeitungs- oder Speichereinheiten in Nachrichtenvermittlungssystemen. Zur Organisation des Verkehrs ist deshalb eine Strategie anzugeben, nach der die einzelnen wartenden Anforderungen nacheinander bedient werden. Außer den bekannten Strategien wie FIFO (first in, first out) oder auch unterbrechenden bzw. nichtunterbrechenden Prioritäten werden in der Praxis aus Gründen der einfachen hardwaremäßigen Realisierbarkeit häufig auch zyklische Abfertigungsstrategien angewendet [1]. Hierbei werden aus verschiedenen Warteschlangen in zyklisch wiederkehrender Reihenfolge wartende Anforderungen zur Bedienung abgeholt.

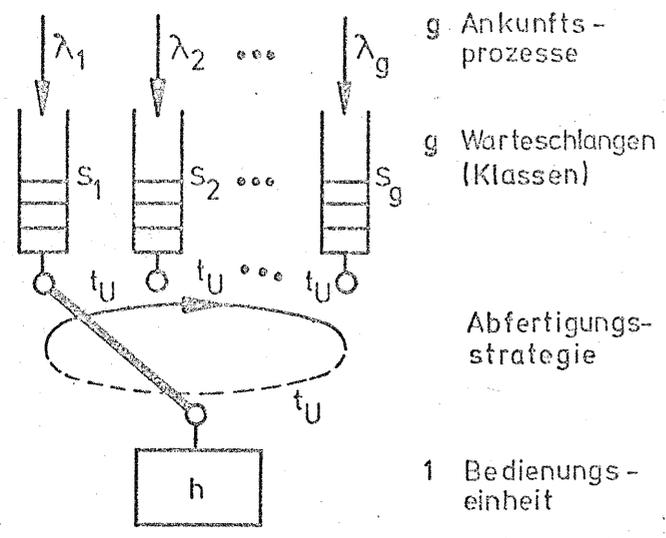
In diesem Beitrag wird anhand von Warteschlangenmodellen die Wirksamkeit verschiedener zyklischer Abfertigungsstrategien untersucht und der Wirksamkeit anderer Strategien vergleichend gegenübergestellt. Zu diesem Zweck werden numerische Ergebnisse für mittlere Wartezeiten, Wartezeitverteilungsfunktionen und Verlustwahrscheinlichkeiten angegeben, welche z.T. mit Hilfe der Simulation und z.T. aus der Warteschlangentheorie gewonnen wurden. Die erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse sollen dazu beitragen, die Auswahl einer zu implementierenden Abfertigungsstrategie bei der Entwicklung eines Systems zu erleichtern.

2. UNTERSUCHTE WARTESCHLANGENMODELLE

2.1 Modellstruktur

In Bild 1 ist die grundsätzliche Struktur des Warteschlangenmodells dargestellt. Die durch g verschiedene Ankunftsprozesse erzeugten Anforderungen werden in dafür zugeordneten Warteschlangen zwischengespeichert. Die einzelnen Warteschlangen werden jeweils bei Freiwerden der Bedienungseinheit nach einer bestimmten Abfertigungsstrategie (z.B. zyklisch oder nach Prioritäten) nach wartenden Anforderungen abgefragt, welche dann die Bedienungseinheit wieder belegen können.

Beitrag zur GI-74. 4. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik.
Berlin, 9.-12.10.1974 (Erscheint in: Lecture Notes in Mathematics and
Computer Science, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York).



Die Auswahl einer der wartenden Anforderungen innerhalb einer Warteschlange zur Bedienung erfolge entweder nach den Warteschlangendisziplinen FIFO (first in, first out) oder RANDOM (zufällig).

Für das Umschalten der Bedienungseinheit von einer zur nächsten Warteschlange wird eine konstante Umschaltzeit $t_U \geq 0$ berücksichtigt, welche z.B. der vom Betriebssystem benötigten Verwaltungszeit (overhead) entspricht.

Bild 1. Struktur des Warteschlangenmodells

2.2 Abfertigungsstrategien

2.2.1 Zyklische Abfertigungsstrategien ohne Prioritäten

Unter "Abfertigungsstrategie ohne Prioritäten" sei hier verstanden, daß jede der Warteschlangen gleichartig behandelt wird. Dies ist bei folgenden zyklischen Abfertigungsstrategien der Fall:

CYCLIC ORDINARY: Die Bedienungseinheit bearbeitet aus den einzelnen Warteschlangen jeweils nur eine Anforderung (falls vorhanden) und geht dann nach Bedienungsende mit der Umschaltzeit t_U zur nächsten Warteschlange über.

CYCLIC EXHAUSTIVE: Die Bedienungseinheit fertigt alle wartenden Anforderungen einer Warteschlange nacheinander ab und geht erst dann mit der Umschaltzeit t_U zur nächsten Warteschlange über. Diese Abfertigungsstrategie ist in der Literatur auch als alternierende oder relative Priorität bekannt [2].

CYCLIC CLOCKED: Die Bedienungseinheit wird in festen Taktzeitpunkten mit konstantem Abstand an die einzelnen Warteschlangen in zyklischer Reihenfolge angeschaltet und übernimmt eine Gruppe von wartenden Anforderungen zur Bedienung.

Die Abfertigungsstrategie CYCLIC CLOCKED wurde in [9] behandelt.

2.2.2 Zyklische Abfertigungsstrategien mit Prioritäten

In einem Modell nach Bild 1 sollen nun bestimmte Warteschlangen bevorzugt abgefertigt werden, wodurch sie Priorität gegenüber anderen Warteschlangen erhalten:

CYCLIC PRIORITY: Die Bedienungseinheit fragt während eines Zyklus bestimmte Warteschlangen mehrmals ab, wobei die Häufigkeit der "Besuche" einer Warteschlange innerhalb eines Zyklus deren Priorität bestimmt.

Dabei werde noch zwischen folgenden zwei Fällen unterschieden:

a) Geordneter Prioritätszyklus:

Die Gesamtzahl der Besuche einer Warteschlange pro Zyklus wird von der Bedienungseinheit unmittelbar nacheinander durchgeführt. Bei 3 Warteschlangen und einer Zykluslänge 6 könnte z.B. die Reihenfolge der besuchten Warteschlangen innerhalb des Zyklus lauten: (1,1,1,2,2,3).

b) Gemischter Prioritätszyklus:

Die Bedienungseinheit verteilt die Gesamtzahl ihrer Besuche bei einer bestimmten Warteschlange über den gesamten Zyklus nach einem vorgeschriebenen Gesetz (z.B. gleichmäßig verteilt). Die Reihenfolge der besuchten Warteschlangen eines zu a) entspr. Beispiels könnte daher lauten: (1,2,1,3,1,2).

Die Gesamtzahl der Besuche der einzelnen Warteschlangen innerhalb eines Zyklus werde durch geschweifte Klammern gekennzeichnet; für obiges Beispiel also {3,2,1}.

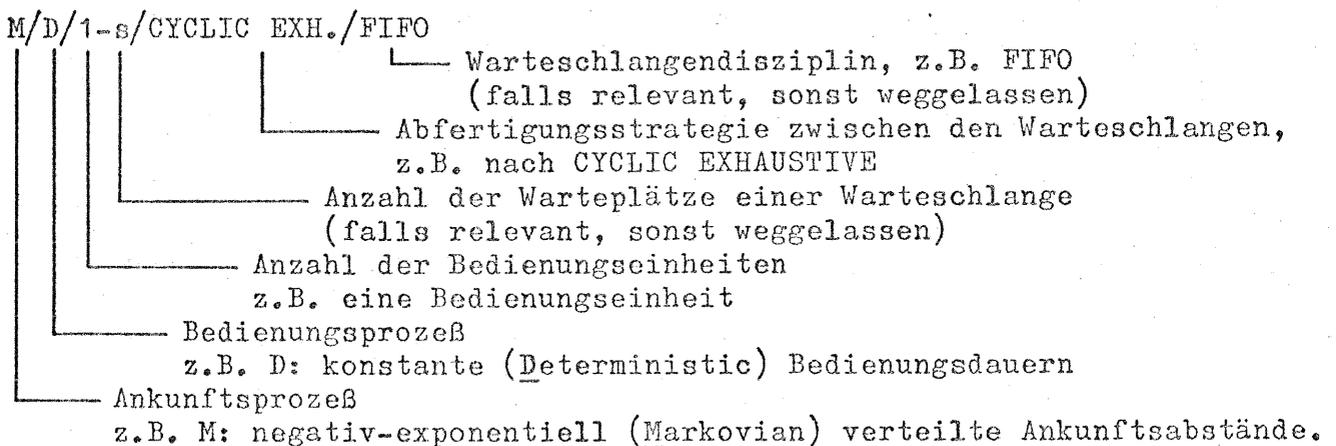
2.2.3 Nichtzyklische Abfertigungsstrategien für Vergleichszwecke

Zum Vergleich mit den zyklischen Abfertigungsstrategien werden folgende nicht-zyklischen Prioritätsstrategien herangezogen:

- PREEMPTIVE PRIORITY: Abfertigung der Warteschlangen (Klassen) mit unterbrechenden Prioritäten [2].
- NONPREEMPTIVE PRIORITY: Abfertigung der Warteschlangen mit nichtunterbrechenden Prioritäten [3].
- PREEMPTION-DISTANCE (PD)-PRIORITY: Kombination aus unterbrechenden und nichtunterbrechenden Prioritäten; Anforderungen einer betrachteten Klasse j unterbrechen Anforderungen der Klassen $\geq j+\xi$, haben aber gegenüber Anforderungen der Klassen $j+1, \dots, j+\xi-1$ nur nichtunterbrechende Priorität [4] (ξ = Unterbrechungs-Distanz).
- PROBABILISTIC PRIORITY: Abfertigung der einzelnen Warteschlangen nach beliebig vorschreibbaren Wahrscheinlichkeiten [10].

2.3 Bezeichnungen und charakteristische Größen

Zur übersichtlicheren und kurzen Kennzeichnung des Warteschlangenmodells werde eine erweiterte KENDALL'sche Notation verwendet. Es bedeute z.B.



Ferner bedeuten:

- λ_j Ankunftsrate des Ankunftsprozesses für Anforderungen der Klasse j
- h Mittlere Bedienungsdauer
- $A_j = \lambda_j h$ Angebot der Klasse j
- A Gesamtangebot, $A = A_1 + A_2 + \dots + A_g$
- w_j Mittlere Wartezeit aller Anforderungen der Klasse j
- t_{wj} Mittlere Wartezeit der wartenden Anforderungen der Klasse j
- B_j Verlustwahrscheinlichkeit für Anforderungen der Klasse j
- $W_j(>t)$ Verteilungsfunktion (VF) der Wartezeiten aller Anforderungen der Klasse j , $j = 1, 2, \dots, g$.

3. WIRKSAMKEIT ZYKLISCHER ABFERTIGUNGSSTRATEGIEN

In diesem Kapitel werden anhand einer Reihe von Beispielen die Eigenschaften der zyklischen Abfertigungsstrategien nach Abschn. 2.2 aufgezeigt und Eigenschaften anderer Strategien vergleichend gegenübergestellt. Ferner wird kurz auf die Anwendungsbezüge hingewiesen.

3.1 Einfluß der Anzahl von Warteschlangen und der Warteschlangendisziplin bei zyklischer Abfertigung ohne Prioritäten

Als Beispiel werde das Wartesystem $M/D/1/CYCLIC\ ORD./FIFO$ bzw. $RANDOM$ zugrundegelegt. Bild 2 zeigt den Einfluß der Anzahl g von Warteschlangen sowie der Warteschlangendisziplinen $FIFO$ bzw. $RANDOM$ auf die VF der Wartezeiten der Wartenden $W_j(>t)/W_j(>0)$. Hierzu sei vorausgeschickt, daß die Warteschlangendisziplin und die Abfertigungsstrategie (letztere wegen der hier gleichen Angebotswerte

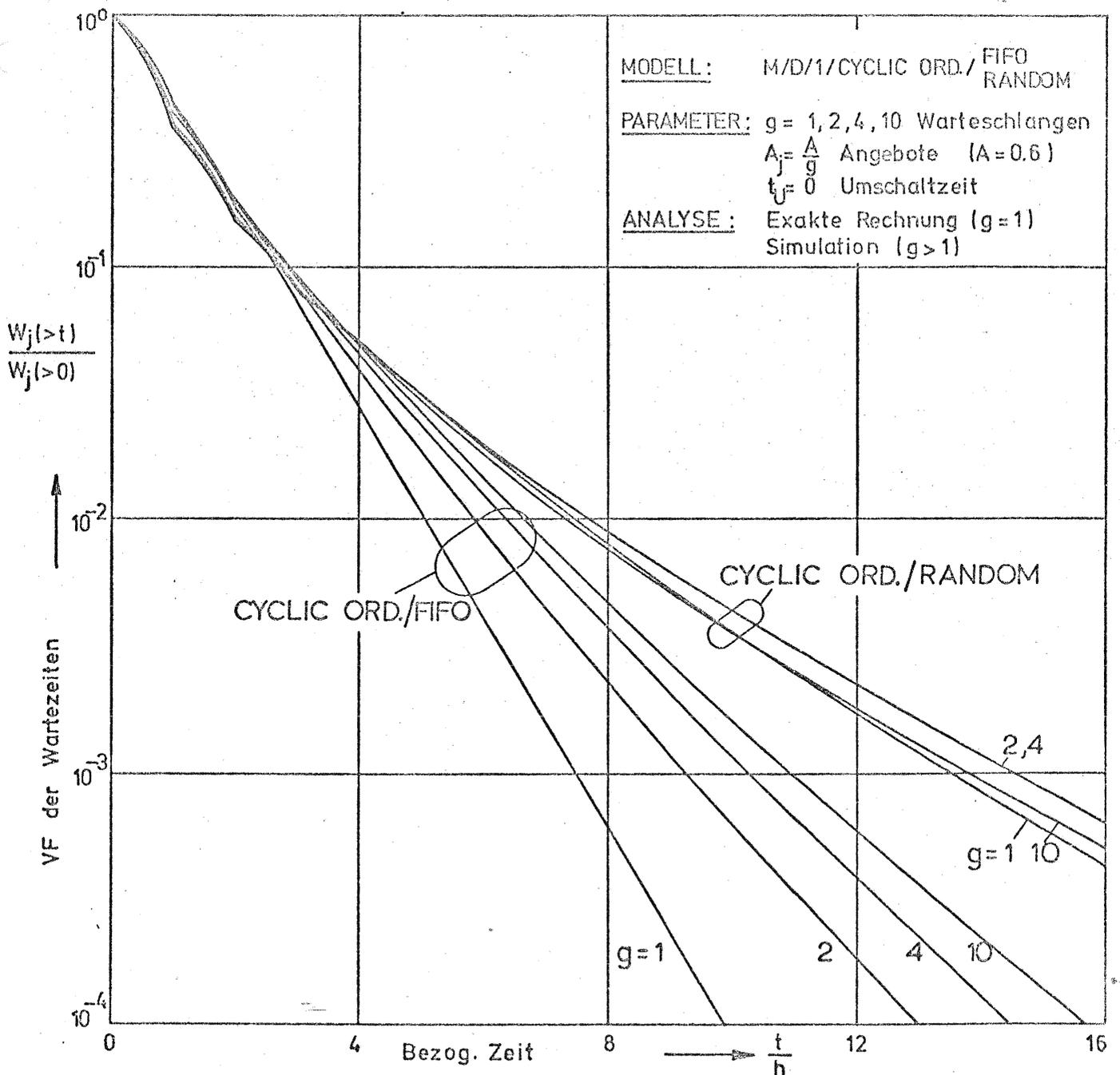


Bild 2. Einfluß der Anzahl von Warteschlangen und der Warteschlangendisziplin auf die VF der Wartezeiten

je Gruppe) keinen Einfluß auf die mittleren Wartezeiten haben, d.h. die mittlere Wartezeit der Wartenden ist einheitlich $t_{Wj} = h/2(1-A)$, $j=1,2,\dots,g$, wie bei $g = 1$. Der Einfluß drückt sich vielmehr in den höheren Momenten der VF der Wartezeiten wie folgt aus:

- CYCLIC ORD./FIFO erzeugt eine mit g zunehmende Streuung der Wartezeiten
- CYCLIC ORD./RANDOM hat generell größere Streuungen als CYCLIC ORD./FIFO, der Einfluß von g ist jedoch offenbar begrenzt (für $g \rightarrow \infty$ gehen beide Strategien aus theoretischen Überlegungen heraus gegen dieselbe Grenzkurve).

In bestimmten Anwendungsfällen der Realzeit-Datenverarbeitung (z.B. Datenvermittlungen nach dem asynchronen Zeitmultiplex-Verfahren) ist es von großer Wichtigkeit, die Streuung von Wartezeiten in bestimmten Grenzen zu halten, um Zeichenverzerrungen oder -verluste zu vermeiden. Man kann mit Hilfe dieser Untersuchungen den Einfluß praktisch realisierter Strategien bestimmen und den Verbesserungsspielraum gegenüber der günstigen Strategie FIFO ($g=1$) abschätzen.

3.2 Vergleich zyklischer Abfertigungsstrategien ohne Prioritäten

Betrachtet werde das Wartesystem M/D/1 mit den Abfertigungsstrategien CYCLIC ORD./FIFO bzw. CYCLIC EXH./FIFO. Bei gleichen Angebotswerten je Warteschlange werden die mittleren Wartezeiten von diesen Strategien nicht beeinflusst, d.h. $t_{Wj} = h/2(1-A)$, $j = 1,2,\dots,g$. Vielmehr war zu erwarten, daß sich

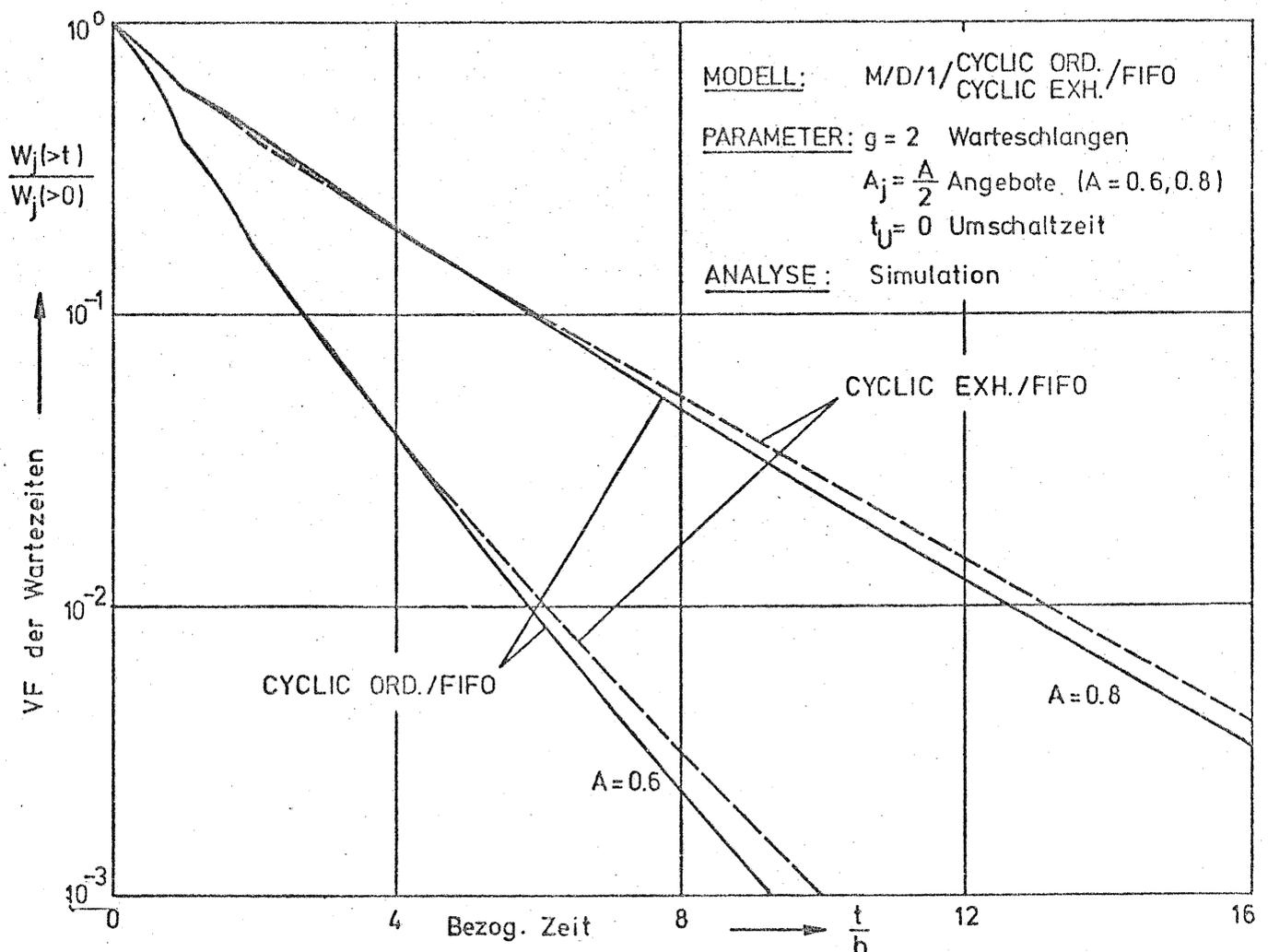


Bild 3. Einfluß zyklischer Abfertigungsstrategien ohne Prioritäten auf die VF der Wartezeiten

die Streuung der Wartezeiten bei diesen extremen Strategien deutlich unterscheidet. Bild 3 zeigt den Einfluß der beiden Abfertigungsstrategien auf die VF der Wartezeiten für den Fall $g = 2$ Gruppen. Entgegen der Erwartung führt CYCLIC EXH./FIFO nur auf eine wenig höhere Streuung der Wartezeiten verglichen mit CYCLIC ORD./FIFO. Für $g > 2$ waren die Unterschiede sogar noch geringer.

Für die praktische Anwendung bedeutet dies, daß die Strategie CYCLIC EXH. bevorzugt werden kann, da diese Strategie weniger Umschaltungen zwischen den Warteschlangen benötigt und bei endlich großer Umschaltzeit t_U somit leistungsfähiger ist (siehe auch Abschn. 3.4).

3.3 Vergleich der zyklischen Abfertigungsstrategie mit Prioritäten mit anderen Prioritätsstrategien

Die Einhaltung vorgeschriebener Bedingungen bezüglich der Antwortzeit verschiedener Klassen von Anforderungen wird i.a. durch Einführung von Prioritäten gewährleistet. Die zwei bekanntesten Fälle sind unterbrechende (PREEMPTIVE) bzw. nichtunterbrechende (NONPREEMPTIVE) Prioritäten. Bild 4 zeigt am Beispiel eines Wartesystems M/D/1 die mittleren Wartezeiten für unterbrechende und nichtunterbrechende Prioritäten, Unterbrechungs-Distanz (PD)-Prioritäten, zyklische Prioritäten sowie für den Grenzfall ohne Prioritäten.

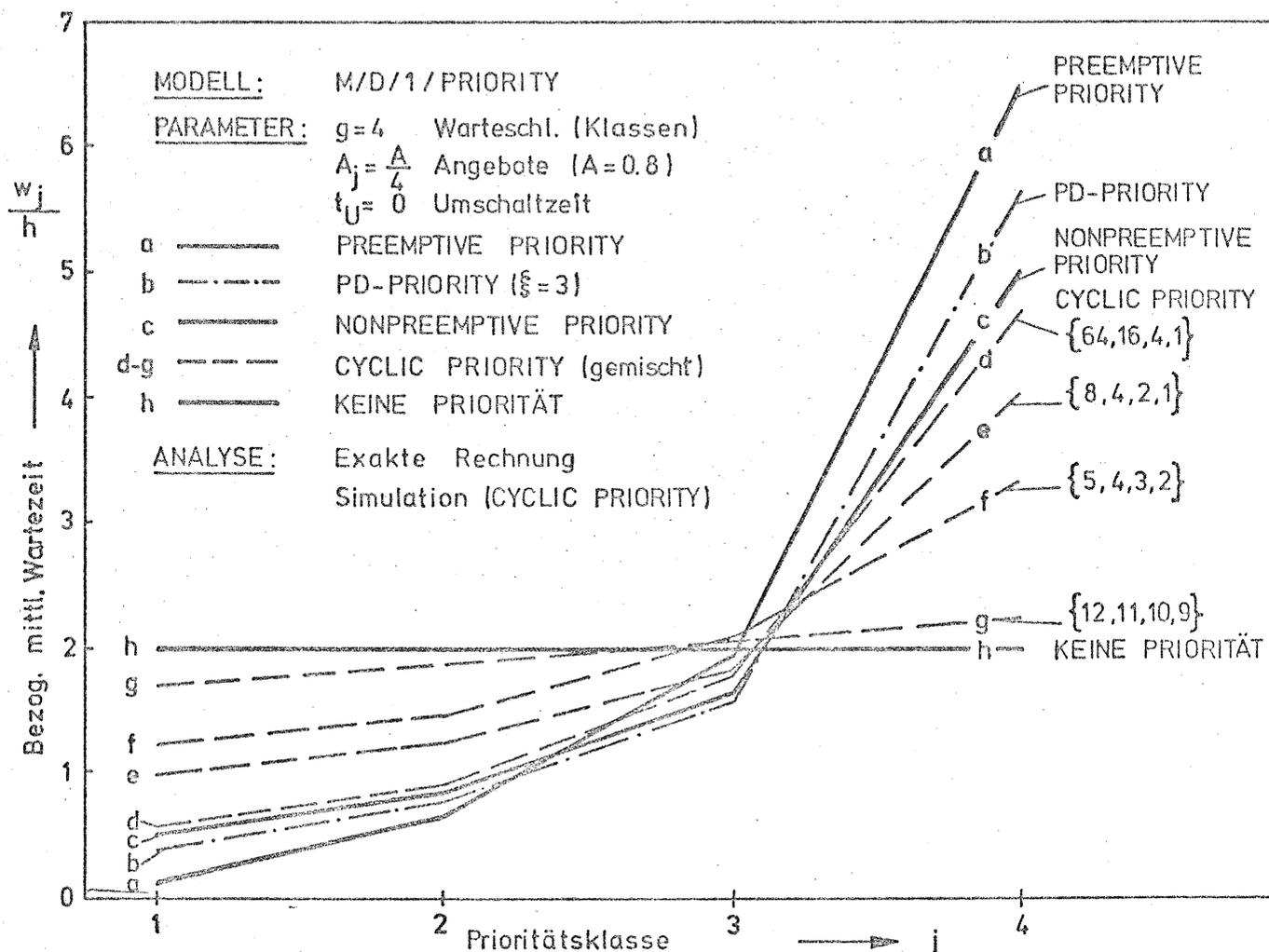


Bild 4. Vergleich verschiedener Prioritätsstrategien

Sind die Bedingungen für die hochprioritären Klassen nicht so streng wie etwa bei NONPREEMPTIVE PRIORITY, so kann mit CYCLIC PRIORITY praktisch jedes beliebige Gewicht zwischen NONPREEMPTIVE PRIORITY und der Gleichbehandlung aller Klassen (keine Prioritäten) eingestellt werden, vergl. Bild 4. Somit wird durch PD-Prioritäten einerseits und zyklische Abfertigung mit Prioritäten andererseits das gesamte Spektrum zwischen den beiden Extremfällen unterbrechender bzw. gar keiner Priorität ausgefüllt. Weitere Prioritätsstrategien, welche ebenfalls dieses Spektrum ausfüllen, sind einerseits Unterbrechungs-Verzögerungs-Prioritäten [11], andererseits wahrscheinlichkeitmäßige Prioritätsstrategien [10], vergl. auch Abschn. 4.3.

3.4 Einfluß von Zyklusfolge und Umschaltzeit bei zyklischen Abfertigungsstrategien mit Prioritäten

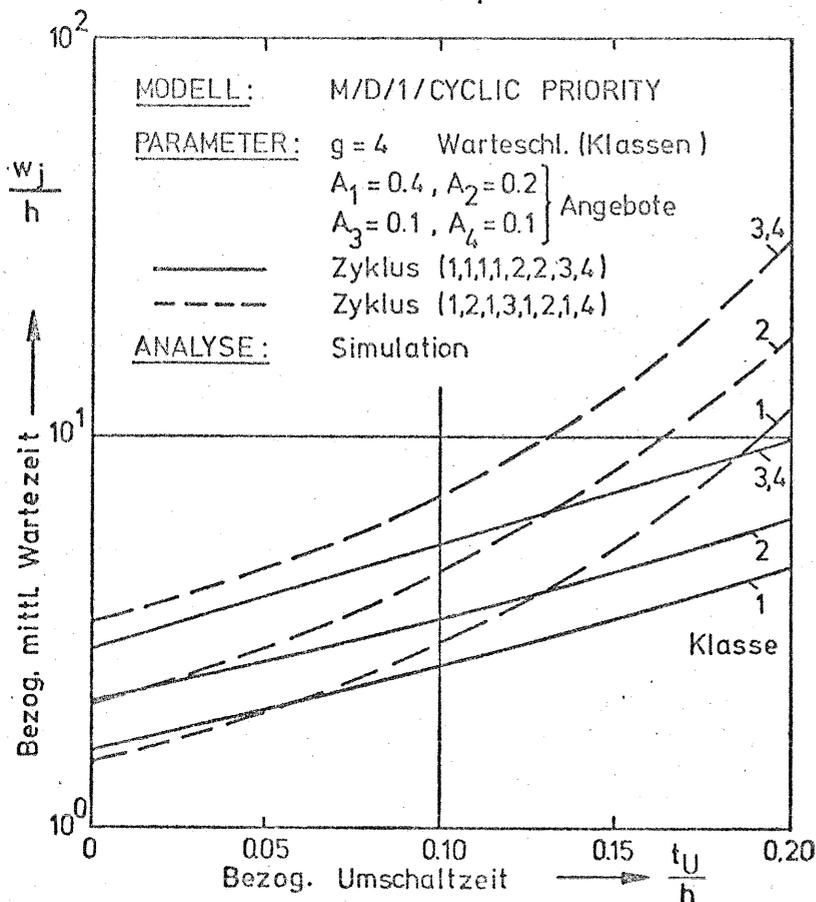


Bild 5. Einfluß von Zyklusfolge und Umschaltzeit auf die mittleren Wartezeiten

Der Einfluß von geordneter bzw. gemischter Zyklusfolge sowie der (konstanten) Umschaltzeit t_U werde am Beispiel des Wartesystems M/D/1/CYCLIC PRIORITY gezeigt (Parameter vergl. Bild 5). Für $t_U = 0$ wird die hochprioritäre Klasse 1 durch den gemischten Prioritätszyklus zu Lasten der Klassen niedrigster Priorität leicht bevorzugt. Mit zunehmender Umschaltzeit t_U jedoch zeigt sich der geordnete Prioritätszyklus infolge seiner geringeren Anzahl von Umschaltungen überlegen, vergl. Bild 5. Aus dem gleichen Grund ermöglicht der geordnete Prioritätszyklus einen höheren Maximaldurchsatz als der gemischte.

3.5 Einsatz zyklischer Abfertigungsstrategien mit Prioritäten zum Ausgleich der Auswirkungen ungleicher Angebotswerte

Abschließend soll anhand eines Warteverlustsystems M/D/1-s mit ungleichen Angeboten (Parameter vergl. Bild 6) gezeigt werden, wie mit Hilfe zyklischer Abfertigungsstrategien mit Prioritäten die Auswirkungen ungleicher Angebotswerte je Klasse ausgeglichen werden können. In Bild 6 sind hierzu die Verlustwahrscheinlichkeiten B_j der einzelnen Klassen für CYCLIC ORD. und CYCLIC PRIORITY angegeben (Verlustwahrscheinlichkeit = Wahrscheinlichkeit für Abweisen einer

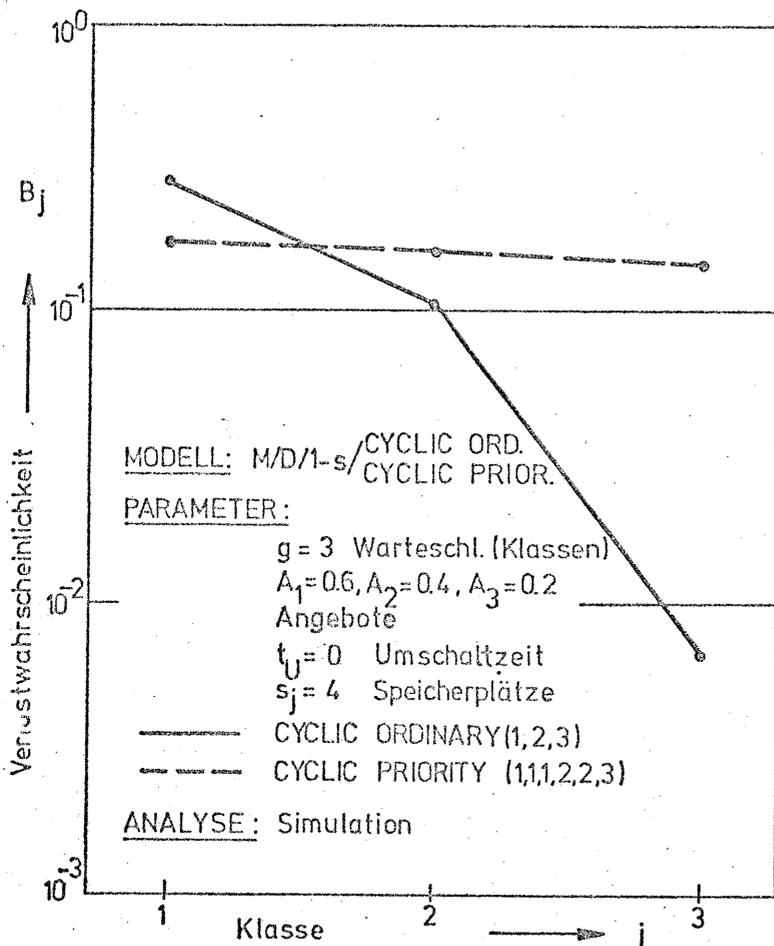


Bild 6. Ausgleich der Verlustwahrscheinlichkeiten bei ungleichen Angeboten

eintreffenden Anforderung infolge Speicherknappheit). Während CYCLIC ORD. zu sehr unsymmetrischen Verlusten führt, gleicht CYCLIC PRIORITY (mit Besuchshäufigkeiten entsprechend den Angeboten) sehr gut aus. Entsprechend könnte der Ausgleich z.B. auch bezüglich der mittleren Wartezeiten erfolgen.

In der Praxis könnte dieser Effekt z.B. so angewendet werden, daß der Zyklus in gewissen Zeitabständen entsprechend der momentanen Warteschlangenlängen neu eingestellt wird; damit wäre eine auch hardwaremäßig realisierbare dynamische Priorität zum Ausgleich momentaner Angebotsspitzen möglich.

4. ANALYSEVERFAHREN

Über die Analyseverfahren der Warteschlangenmodelle kann in diesem Rahmen nur ein Überblick gegeben werden. Es sind dies exakte und approximative Rechenverfahren sowie die Simulation.

4.1 Exakte Rechenverfahren

Für das Wartesystem M/G/1 (G: allgemeine (General) VF für den Bedienungsprozeß) sind für folgende Abfertigungsstrategien exakte Ergebnisse bekannt, welche in dieser Arbeit verwendet wurden: M/G/1/PREEMPTIVE PRIORITY nach R.G.MILLER [2], M/G/1/NONPREEMPTIVE PRIORITY nach A.COBBHAM [3], M/G/1/PD-PRIORITY nach U.HERZOG [4] sowie M/G/1/CYCLIC EXHAUSTIVE nach B.AVI-ITZHAK, W.L.MAXWELL und L.W.MILLER [5], L.TAKÁCS [6], R.B.COOPER [7] und M.EISENBERG [8]. Die Lösungen für CYCLIC EXHAUSTIVE sind zwar prinzipiell bekannt, aber sehr schwierig auswertbar. Die Lösungen für CYCLIC ORDINARY und CYCLIC PRIORITY stehen für den allgemeinen Fall M/G/1 noch ganz aus.

Für den Sonderfall M/M/1-s können jedoch exakte Lösungsverfahren angegeben werden, welche in allen Fällen zyklischer Abfertigungsstrategien ohne Takt anwendbar sind. Sie bauen auf der Lösungsmethodik auf, welche zur exakten Behandlung von Mehrschlangen-Modellen des Typs M/M/n-s/PROBABILISTIC PRIORITY angewendet wurde [10]. Hierzu werden mehrdimensionale Zustände definiert, welche die Belegungszustände der Bedienungseinheit (d.h. deren momentane Stellung im Zyklus)

sowie die einzelnen Warteschlangenlängen charakterisieren. Für die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten ist ein lineares Zustandsgleichungssystem und zur Bestimmung der VF der Wartezeiten ein lineares Differentialgleichungssystem aufzulösen, welche bei der Betrachtung der zugrundeliegenden Markoff-Prozesse für die Systemzustände bzw. Wartezeiten gewonnen werden.

4.2 Approximative Rechenverfahren

Grundlage der Approximation ist die Ersetzung der zyklischen Abfertigungsstrategien durch wahrscheinlichkeitmäßige Abfertigungsstrategien, wobei die Abfertigungswahrscheinlichkeiten für einzelne Warteschlangen entsprechend deren Prioritätshäufigkeiten im Zyklus gewählt werden. Bild 7 vergleicht für den Fall des Modells M/M/1-s die exakten Rechenergebnisse für PROBABILISTIC PRIORITY nach [10] mit Simulationsergebnissen für CYCLIC PRIORITY, woraus eine akzeptable Übereinstimmung abzulesen ist.

1.3 Simulation

Für die zyklischen Abfertigungsstrategien wurden die Ergebnisse mit Hilfe eines Simulationsprogrammes [12,13] gewonnen, wobei je Parameterkombination zwischen 100 000 und 400 000 "Rufe" erzeugt wurden. Die statistischen Vertrauensintervalle wurden aus Übersichtlichkeitsgründen (mit Ausnahme von Bild 7) weggelassen.

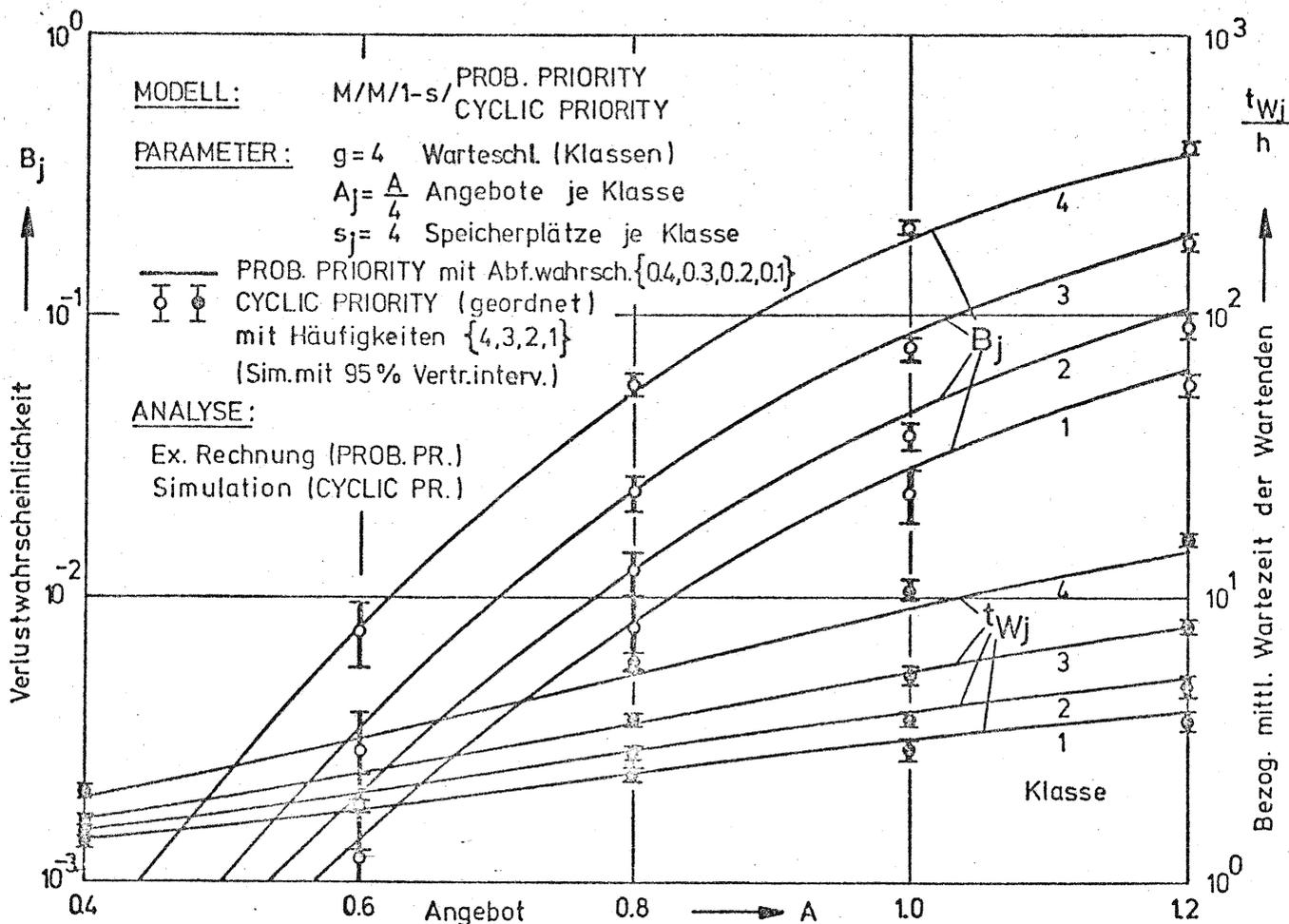


Bild 7. Vergleich von approximativer Rechnung mit Simulationsergebnissen

ZUSAMMENFASSUNG

In dem vorliegenden Beitrag wurden drei verschiedene zyklische Abfertigungsstrategien bezüglich ihrer Wirksamkeit untersucht und anderen bekannten Strategien vergleichend gegenübergestellt. Ferner wurde auf praktische Anwendungsmöglichkeiten sowie auf exakte und approximative Lösungsverfahren hingewiesen. Die erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse sollen dazu beitragen, die Auswahl einer zu implementierenden Abfertigungsstrategie durch qualitative als auch quantitative Argumente zu unterstützen.

Die Autoren möchten an dieser Stelle Herrn Dipl.-Ing. Helmut Weisschuh für die Anregung zur Behandlung der zyklischen Prioritätsstrategie danken.

SCHRIFTTUM

- [1] KRUSKAL, J.B.: Work-Scheduling Algorithms: A Nonprobabilistic Queuing Study (with possible Application to No.1 ESS). BSTJ, Vol.48(1969), S. 2963 - 2974.
- [2] MILLER, R.G.Jr.: Priority Queues. The Annals of Math. Stat., Vol.31(1960), S. 86 - 103.
- [3] COBHAM, A.: Priority Assignment in Waiting Line Problems. Opns.Res., Vol.2(1954), S. 70 - 76.
- [4] HERZOG, U.: Verkehrsfluß in Datennetzen. 21. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten. Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart (1973).
- [5] AVI-ITZHAK, B., MAXWELL, W.L. und MILLER, L.W.: Queuing with Alternating Priorities. Opns.Res., Vol. 13(1965), S. 306 - 318.
- [6] TAKÁCS, L.: Two Queues Attended by a Single Server. Opns.Res., Vol.16 (1968), S. 639 - 650.
- [7] COOPER, R.B.: Queues Served in Cyclic Order: Waiting Times. BSTJ, Vol.49 (1970), S. 399 - 413.
- [8] EISENBERG, M.: Cyclic Queue with Changeover Times. 6th Intern. Teletr. Congr. (ITC), München (1970), Congressbook S. 423/1 - 6.
- [9] LANGENBACH-BELZ, M.: Two-Stage Queuing System with Sampled Parallel Input Queues. 7th Intern. Teletr. Congr. (ITC), Stockholm (1973), Congressbook S. 434/1 - 8.
- [10] KÜHN, P.: Über die Berechnung der Wartezeiten in Vermittlungs- und Rechnersystemen. 15. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten. Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart (1972).
- [11] HERZOG, U., KÜHN, P. und ZEH, A.: Klassifizierung und Analyse von Verkehrsmodellen für das Ablaufgeschehen in Rechnersystemen. Nachrichtentech. Fachber., Vol.44(1972), S. 181 - 198.
- [12] BASTIAN, D.: Simulation von zyklisch abgefertigten Wartespeichern. Monographie Nr. 374. Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart (1972).
- [13] ARMBRUSTER, K.: Untersuchung von zyklisch abgefertigten Wartespeichern mit beliebigem Abfertigungszyklus. Monographie Nr. 430. Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart (1974).