

**KfK 3736
Mai 1984**

Verfügbarkeitsanalysen für kerntechnische Anlagen: Modelle, Methoden, Computer-Codes

**F. Fischer, W. Haußmann
Institut für Datenverarbeitung in der Technik
Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung**

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Datenverarbeitung in der Technik
Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung

KfK 3736

PWA 24/84

Verfügbarkeitsanalysen für kerntechnische Anlagen:
Modelle, Methoden, Computer-Codes

F. Fischer

W. Haußmann

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Diese Arbeit zeichnet den Weg nach, der methodisch bei Verfügbarkeitsuntersuchungen im Kernforschungszentrum Karlsruhe beschritten wurde. Dazu wird das wesentlichste Handwerkzeug kurz vorgestellt und die Verknüpfungen zur neueren wissenschaftlichen Literatur gegeben. Ebenso werden die dazu entwickelten Programme beschrieben.

Abstract

Availability studies for nuclear plants: Models, Methods, Computer-Codes

This report follows the way which was used in doing availability studies at Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH (KfK). The essential tools are presented and relations to the recent scientific literature are explained. Finally special computer codes for availability studies are described which have been developed at KfK.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Untersuchungsgegenstand	3
3. Zielgrößen, Aufgabenstellung	7
4. Situationsbeschreibung	12
5. Situationsverbesserung	14
6. Lösungsmöglichkeiten	15
6.1 Mathematisch-analytische Modellbildung	15
6.1.1 Boolesche Modelle	15
6.1.2 Markoff-Prozesse	18
6.2 Anwendung von Simulationsverfahren	23
6.3 Programme	24
Literaturverzeichnis	28
Anhang	
A 1 Tabellen im Anhang	29-34
A 2 Ein neues Approximationsverfahren für Seriensysteme mit endlichen Zwischenlagern	35-75
A 3 Programmbeschreibung APSIS	76-103

1. Einleitung

Die Entsorgung der Kernkraftwerke wird in der Bundesrepublik unter Einschluß der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente verfolgt.

Schwerpunktmäßig wird innerhalb des Projekts Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung (PWA) an der Verbesserung von Verfahrensschritten unter dem Blickwinkel der Erhöhung der Betriebs- und Anlagenzuverlässigkeit, der Minimierung des Wasteanfalls, der endlagergerechten Konditionierung radioaktiver Abfälle und an Entwürfen alternativer Abfall-Verfestigungsverfahren gearbeitet.

Innerhalb des PWA-Vorhabens "Kritikalitäts- und Sicherheitsfragen, Logistik" war die Aufgabe gestellt, Methoden und mathematische Werkzeuge bereitzustellen, die eine Quantifizierung und Bewertung verfahrenstechnischer Anlagen zur Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung unter Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsgesichtspunkten ermöglichen.

Die vorliegende Arbeit soll

- den Weg nachzeichnen, der methodisch bei Verfügbarkeitsuntersuchungen im Kernforschungszentrum Karlsruhe beschritten wurde,
- Verknüpfungen zur neueren wissenschaftlichen Literatur darüber herstellen,
- dem Planer und Nutzer Hilfsmittel zur Bewertung der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von (Produktions-)Anlagen an die Hand geben.

Folgende Bearbeitungsreihenfolge bietet sich an:

- Zielformulierung und Aufgabenbeschreibung
- Aufnahme des Ist-Zustandes
- Aufstellung, Berechnung und ggf. Optimierung von Lösungsalternativen.



2. Untersuchungsgegenstand

Die Entwicklung chemischer Produkte in der Verfahrenstechnik bzw. komplizierter technischer Geräte, stellt hohe Anforderungen an Qualität, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der sie erzeugenden Systeme. Mit zunehmendem Komplexitätsgrad der Produktionsprozesse sind vertiefte Kenntnisse über Möglichkeiten zur Beurteilung und Beeinflussung der oben angeführten Kenngrößen unerlässlich.

Produkte werden oft auf verketteten Systemen hergestellt. Verkettung bedeutet, daß Störungen einer Maschine den Produktionsablauf vor- oder nachgelagerter Maschinen beeinflussen. In welchem Ausmaß diese Beeinflussung erfolgt, hängt vom Verkettungsgrad ab.

Gegenstand unserer Untersuchungen sind Produktionssysteme, die aus einer Anzahl miteinander zusammenhängender Prozeßteile (Verfahrenseinheiten, Maschinen) bestehen. Das zu produzierende Material durchläuft (durchfließt) nacheinander sämtliche Prozeßteile in der gleichen Abfolge. Gewöhnlich arbeitet ein Prozeßteil mit einer gewissen Produktionsrate (Durchsatz). Fällt er aus, ist die Produktion der Station unterbrochen bis die Reparatur erfolgreich durchgeführt ist. Es treten im allgemeinen Kapazitätsverluste durch die Fortpflanzung der Störungen auf. Das führt zu einer Reduzierung der Anlagenverfügbarkeit. Jede Störung, die eine Leistungsverminderung bewirkt, erhöht die Kosten und kann ggf. sogar das Sicherheitsrisiko der Anlage erhöhen.

Bereits in der Planungsphase von Produktionssystemen sind folglich Überlegungen einzubeziehen, die

- die Sicherheits- und Verfügbarkeitsanforderungen an das System festlegen,
- die Vergleiche mit ähnlich gearteten, schon in Betrieb befindlichen Anlagen ermöglichen,
- methodische Unterstützung bieten bei der Quantifizierung von Unsicherheiten im Produktionsablauf.

Kernbrennstoffe und die Prozeßsysteme zur behälterlosen Einlagerung und Verfestigung von mittel- und leichtaktivem Abfall MAW/LAW in untertägigen Hohlräumen (in situ-Konzept) Beispiele für die oben genannten Systeme.

Beispiel (in-situ-Konzept)

In Form von Pellets vorkonditionierte LAW/MAW-Konzentrate einer Wiederaufarbeitungsanlage werden übertage am Standort des Endlagers mit einer Zementsuspension vermischt und über eine Förderleitung in eine Karverne eingebracht, wo das aus Pellets und Suspension bestehende Produkt aushärtet. Bis zur Endlagerung des LAW/MAW-Konzentrats sind im Groben folgende Verfahrensschritte durchzuführen: Granulatherstellung, Herstellen der Granulat-Zementsuspension, Förderung des Produkts untertage.

Bemerkung

- ° Das in-situ-Konzept wurde stellvertretend für andere denkbare Verfahrens-Anlagen ausgewählt, weil die Zusammenarbeit in einem recht frühen Planungsstadium ermöglicht und Daten bereitgestellt wurden.
- ° Verfügbarkeitsuntersuchungen für geplante Wiederaufarbeitungsanlagen wurden begonnen, aus innerbetrieblichen Gründen jedoch nicht zu Ende geführt.

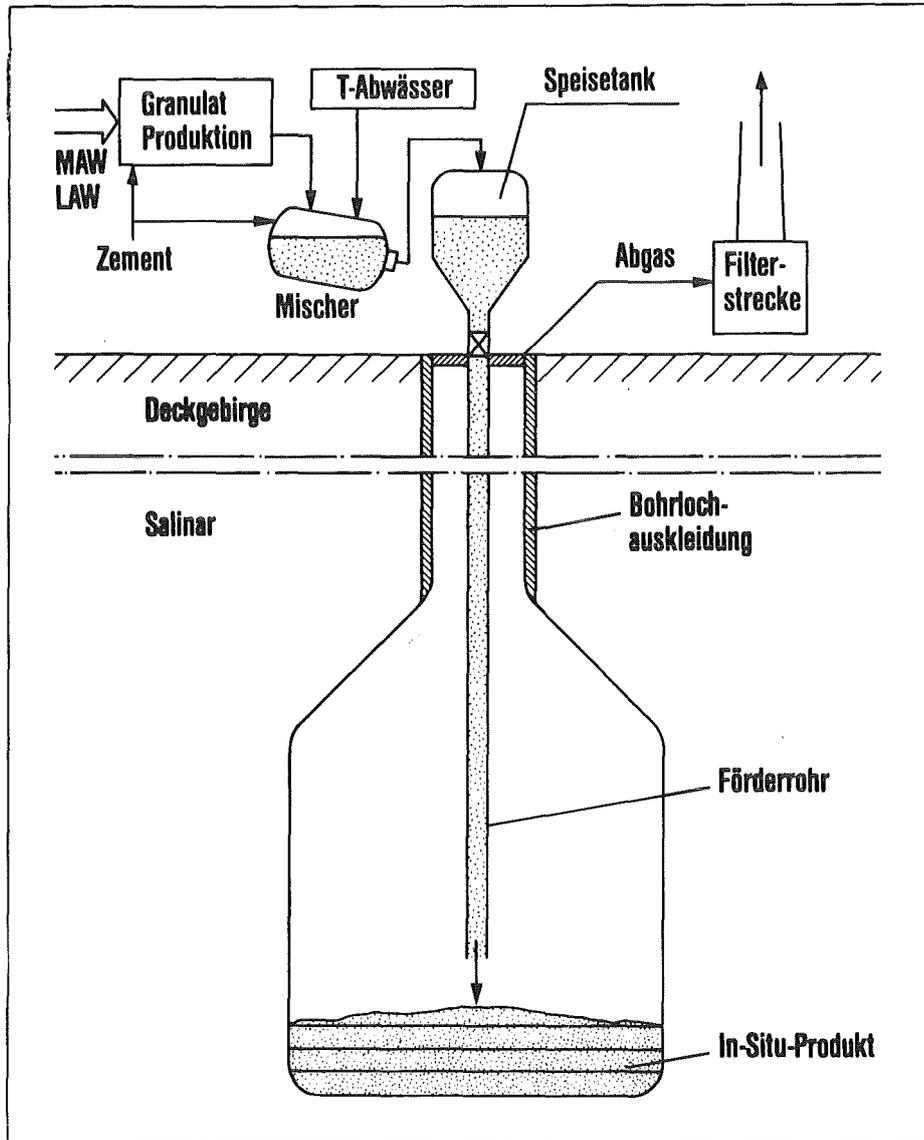


Abb. 1: Schematische Darstellung des In-situ Konzeptes

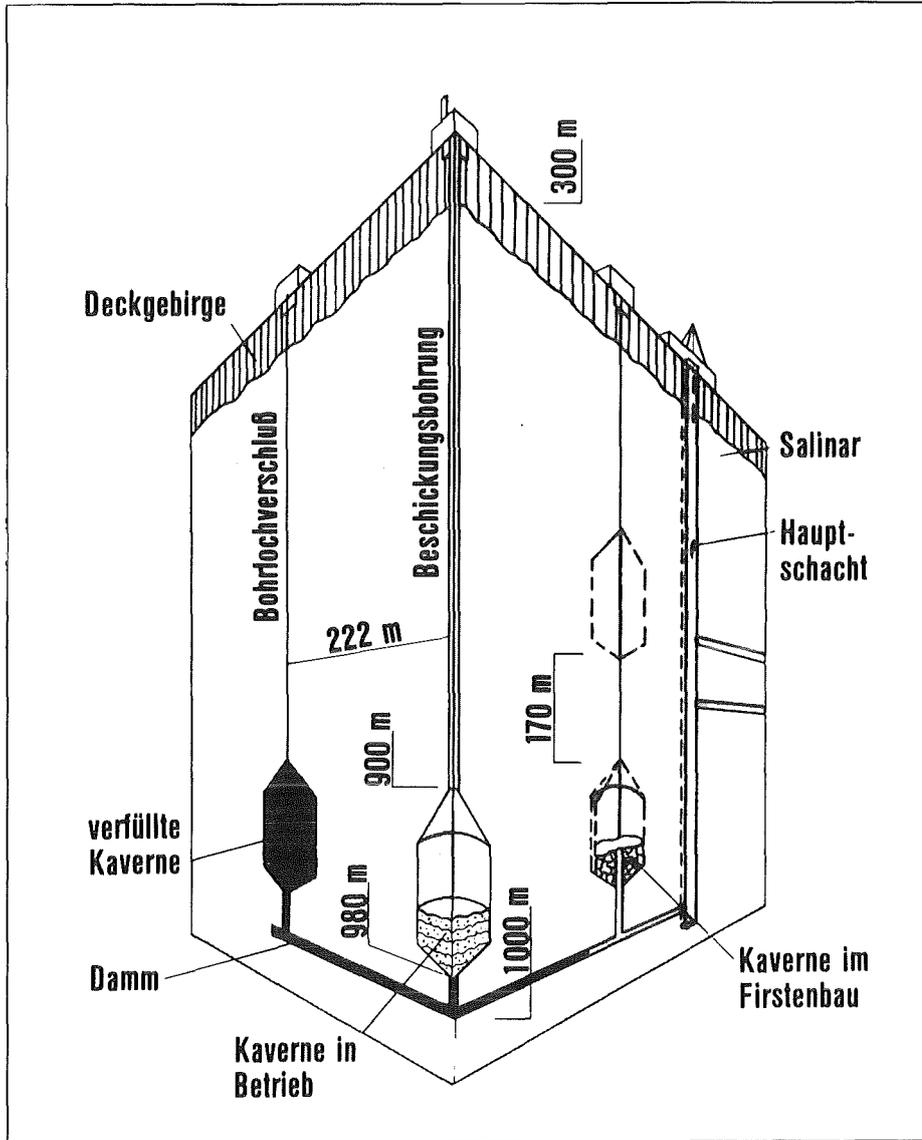


Abb. 2: In-situ Kavernenfeld

3. Zielgrößen, Aufgabenstellung

Mit Hilfe von systemanalytischen Methoden gilt es, die "Effektivität" des zugrundeliegenden Produktionssystems zu bestimmen.

Dabei ist die Systemanalyse, d.h. die Struktur- und Ablaufanalyse, in die notwendigen Entwicklungsstufen einer Projekt- bzw. Produktionsplanung einzuordnen, wie die nachstehende Übersicht grob wiedergibt.

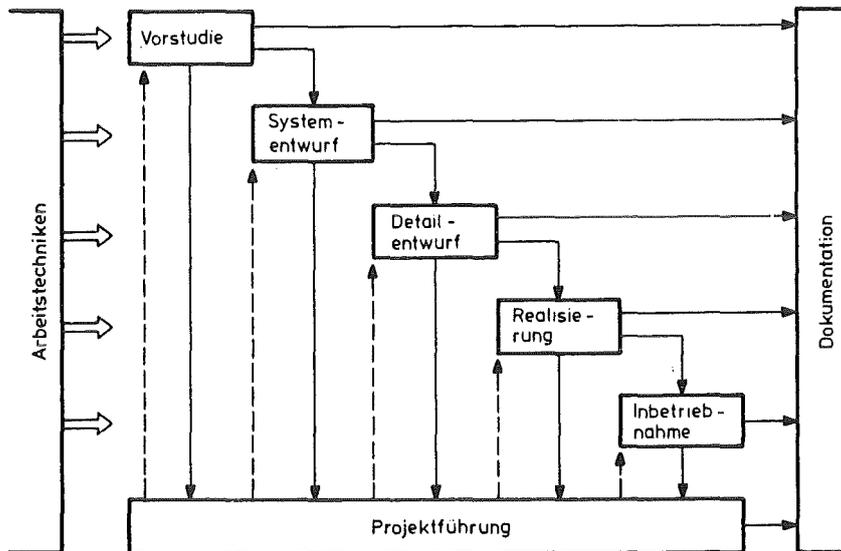


Abb. 3 Entwicklungsstufen eines Systems (Darstellung in Anlehnung an System ORGWARE der Fa. ADV/Orga, ->: Arbeitsergebnisse, --->: Steuerung =>: Unterstützung)

Quelle: LOCKEMANN et al, S. 69

Die sehr allgemein gehaltene Zielformulierung bedarf einer genaueren Erläuterung.

Es bieten sich eine ökonomische, technische bzw. ökonomisch-technische Vorgehensweise an.

In dieser Arbeit wird "Effektivität" in einem weiter unten definierten technischen Sinne verstanden.

Kostengesichtspunkte im Zusammenhang mit technischen Effektivitätsbetrachtungen werden jedoch ausführlich in den Arbeiten von REISCH und STETTEN behandelt.

Im technischen Sinne beschreibt "Effektivität" die Qualität des Systems in seinem zeitlichen Betriebsverhalten.

Zur Quantifizierung der Zielgröße "Effektivität" können wir die Größen

- ° Zuverlässigkeit
- ° Verfügbarkeit
- ° Nutzungsgrad

heranziehen, die wiederum durch charakteristische Kenngrößen, die das technische System beschreiben, genauer bestimmt sind.

(3.1) Definition:

Zuverlässigkeit ist die Fähigkeit einer Betrachtungseinheit, den vereinbarten Anforderungen während einer vereinbarten Zeitdauer zu genügen.

Oder etwas mathematischer formuliert:

Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit, daß die Lebensdauer der Betrachtungseinheit einen vorgegebenen Wert überschreitet ($R(t) = \text{Prob}(T > t)$)

(3.2) Definition:

- (i) Verfügbarkeit ist die Wahrscheinlichkeit, die Betrachtungseinheit zu einem vorgegebenen Zeitpunkt in einem funktionsfähigen Zustand anzutreffen. (Bezeichnung: $V(t)$)
- (ii) Stationäre Verfügbarkeit heißt der Grenzwert der Verfügbarkeit $V(t)$ für $t \rightarrow \infty$, falls er existiert.

$$V = \lim_{t \rightarrow \infty} V(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad ,$$

wobei

MTBF = mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen

MTTR = mittlere Reparaturzeit .

- (iii) Der Nutzungsgrad ist definiert als die relative Laufdauer einer Betrachtungseinheit unter Berücksichtigung organisatorischer Störungen

$$N = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + T_{org}}$$

Bemerkung:

- Für den Bereich der Verfahrens- und Produktionstechnik ist vorrangig die stationäre Verfügbarkeit von Interesse. In dieser Arbeit wird der Begriff Verfügbarkeit verstanden als
 - Quotient aus mittlerer produktiver Zeit und insgesamt zur Verfügung stehender Zeitoder gleichbedeutend
 - Quotient aus mittlerem erzieltem Durchsatz und theoretisch möglichem Durchsatz.
Durchsatz ist die Produktionsgeschwindigkeit in Mengeneinheiten pro Zeiteinheit.
- In der Literatur gehen die Begriffe Zuverlässigkeit (Reliability), Verfügbarkeit (Availability), Nutzungsgrad (utilization) häufig durcheinander. Daher empfiehlt es sich auf Begriffsgrenzungen zu achten, vor allem, um bei der Vielzahl der verwendeten Begriffe zu Verfügbarkeits- und Zuverlässigkeits-

kenngrößen Mißverständnissen vorzubeugen.

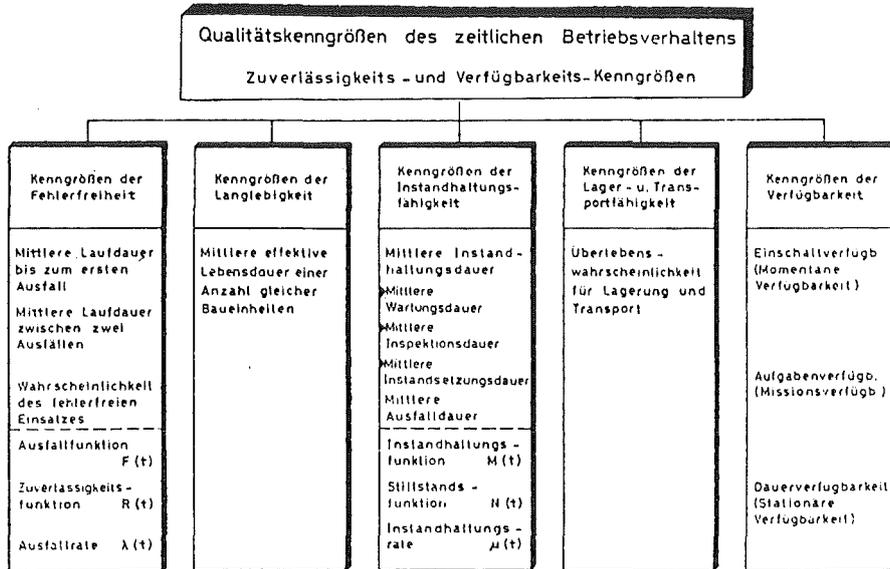


Abb. 4: Übersicht ausgewählter Qualitätskenngrößen des zeitlichen Betriebsverhaltens: Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitskenngrößen

Quelle: REISCH, S. 22

Zur Definition der in Abb. 4 verwendeten Begriffe siehe Tabelle A-1 im Anhang.

Vergleiche auch die übersichtliche Tabelle A-2 Verfügbarkeits- und Zuverlässigkeitskenngrößen aus der Energiewirtschaft, die VETTERKIND entnommen ist.

Welche Einflußfaktoren auf die Verfügbarkeit von Systemen einwirken, ist der Tabelle A-3 zu entnehmen (nach REISCH).

Nach der Klärung des Begriffsumfeldes, kehren wir zu unserer Aufgabenstellung zurück.

Festzustellen ist anhand von systemanalytischen Untersuchungen, ob unter Berücksichtigung vorgelegter Daten zu Produktionsgeschwindigkeiten, mittleren Produktions- und Reparaturzeiten und Lagerkapazitäten

- ° die Effektivität des Produktionssystems hinreichend ist, um das gesteckte Produktionsziel zu erreichen, bzw.
- ° Verbesserungsmöglichkeiten der Anlagenstruktur bestehen, um die Effektivität des Systems zu erhöhen.

Beispiel (in-situ-Konzept)

Die Effektivität des Produktionssystems muß hinreichend sein, um einen fünfjährigen Einlagerungsbetrieb in eine Kaverne (dem entspricht die Menge von 15.000 [m³/a] konditioniertem MAW/LAW) zu gewährleisten.

4. Situationsbeschreibung

Ohne hinreichende Vorlage von Eingangsinformationen über technische Verfahrensabläufe ist keine fundierte Verfügbarkeitsanalyse möglich, die dann zu einer mathematischen Modelldarstellung des Systems führt.

In einer ausgezeichneten Übersicht geben die Tab. A-4 und Tab. A-5 einen umfassenden Orientierungsrahmen zur Festlegung der Arbeitsschritte und des Ist-Zustandes des Systems für eine Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsanalyse.

Am Ende dieser gründlichen und zeitaufwendigen Vorbereitungsphase sind dann anhand vorgegebener produktions-(verfahrens-) technischer Fließschemata der zu untersuchenden Anlage Schaltbildstrukturen zu entwickeln, die dem logischen Produktionsablauf Rechnung tragen. Sie ähneln den Schaltbildern, wie sie in der Zuverlässigkeitsrechnung üblich sind und können als Modelle zur mathematischen bzw. simulativen Behandlung dienen.

Beispiel (in situ-Konzept)

Die einzelnen Produktionsschritte Granulatherstellung, Herstellung der Granulat-Zement-Suspension, Förderung nach untertage unterliegen zufälligen Einflüssen (Prozeßteile fallen unvor-gesehen aus. Reparaturen sind je nach vorliegendem Störfall von unterschiedlicher Dauer). Während das Granulatlager bis zu einem gewissen Grad Störungen bei der Granulatherstellung abfangen kann, schlägt eine Störung bei der Herstellung der Granulat-Zement-Suspension sofort auf die Förderung nach untertage durch, d.h. die Förderung ist unterbrochen, sobald die Herstellung der Suspension ins Stocken gerät.

Es sind daher bereits in der Planungsphase Maßnahmen vorzusehen, die einen reibungslosen Produktionsablauf gewährleisten.

Bemerkung:

Es ist nicht Aufgabe dieser Arbeit eine ausführliche technische Erörterung des in-situ-Projekts vorzunehmen.

Es sei aber auf zwei ausführliche Darstellungen verwiesen (KRÄMER/KRÖBEL (1981) bzw. (1983)).

Fließschemata des Granulier- und Förderprozesses und die entsprechenden Zuverlässigkeits-Blockschaltbilder sind dort ebenso zu finden.

5. Situationsverbesserung

Ohne bereits an dieser Stelle auf Details einzugehen, ist aus der Grobstruktur der Abb. 5 zu schließen, daß eine feste Verkettung durch eine serielle Anordnung von Prozeßteilen den Stillstand des Gesamtsystems zur Folge hat, sobald auch nur eine Maschine ausfällt.

Damit trotzdem das Produktionsziel erreicht wird, sind u.a. folgende Maßnahmen denkbar:

- ° Erhöhung der Zuverlässigkeit (bzw. Verfügbarkeit) von Maschinen
- ° Redundante (d.h. mehrfache) Auslegung von Maschinenteilen
- ° Errichtung von Pufferlagern.

Welche Maßnahmen zur Erhöhung der Effektivität des Produktionssystems sinnvoll erscheinen, hängt von den baulichen, verfahrenstechnischen und ökonomischen Gegebenheiten ab.

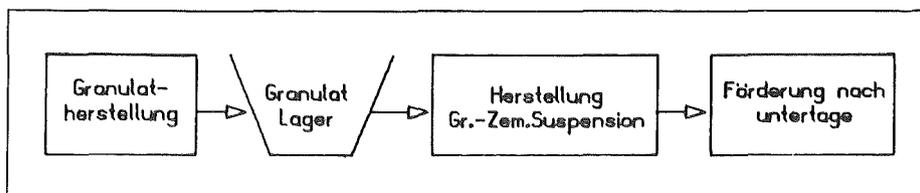


Abb. 5: Logische Grobstruktur des Produktionsprozesses zur In-situ-Endlagerung LAW/MAW

6. Lösungsmöglichkeiten

Als Ziel ist vorgegeben, die Effektivität - d.h. hier die Verfügbarkeit - des zugrunde liegenden Produktionssystems anzugeben. Da Ausfälle oder unterschiedliche Prozeßdauern nicht nur von fest vorgeprägter (deterministischer) sondern auch von zufälliger (stochastischer) Natur sein können, muß dem zufälligen Verhalten des Produktionssystems Rechnung getragen werden. Für die Analyse bieten sich deshalb die digitale Simulation oder die mathematisch-analytische Modellbildung mit Hilfe der Theorie der stochastischen Prozesse an.

6.1 Mathematisch-analytische Modellbildung

In diesem Abschnitt wird in einem Überblick das mathematische Werkzeug vorgestellt. Zunächst werden Vorschriften für die Anwendung der Booleschen Algebra auf Probleme der Zuverlässigkeitsanalyse vorgestellt. Nach einer kritischen Diskussion der Booleschen Modelle geben wir eine kurze Einführung in die Zuverlässigkeitsanalyse mittels Markoff'scher Prozesse.

6.1.1 Boolesche Modelle

Boolesche Modelle (vgl. Entwurf VDI 4008 Blatt 2) beschreiben Systeme mit Hilfe von Aussagen über das Verhalten von Systembestandteilen und logischen Verknüpfungen dieser Aussagen nach den Regeln der Schaltalgebra. Die Systemelemente werden charakterisiert durch ihren Zustand "ausgefallen" oder "intakt". Auch bei dem System wird lediglich zwischen einwandfreier Funktion und Ausfall unterschieden. Jede Möglichkeit einer teilweisen Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems oder seiner Komponenten wird generell ausgeschlossen.

Der Zustand des Systems und jedes Elements läßt sich durch Boolesche Variable mathematisch beschreiben. Dazu definiert man für jedes Element i eine Variable α_i wie folgt:

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 & \text{intakt} \\ \text{falls } i\text{-te Komponente} \\ 0 & \text{defekt} \end{cases}$$

Der Zustand des Systems ist eine Boolesche Funktion der Variablen $\alpha_1, \dots, \alpha_n$:

$$S(\alpha_1, \dots, \alpha_n) = \begin{cases} 1 & \text{intakt} \\ \text{falls System} \\ 0 & \text{defekt} \end{cases}$$

Zur Verknüpfung der Booleschen Variablen stehen die Operationen "Konjunktion" ("und", in Zeichen \wedge) "Disjunktion" ("oder", in Zeichen \vee) und "Negation" ("nicht", in Zeichen \neg) zur Verfügung. Der logischen Verknüpfung kann eine rechnerische zugeordnet werden. Es ergibt sich (Z = Boolesche Variable für Systemzustand):

für die Konjunktion	$Z = \alpha_1 \wedge \alpha_2$
die rechnerische Verknüpfung	$Z = \alpha_1 \cdot \alpha_2$
für die Disjunktion	$Z = \alpha_1 \vee \alpha_2$
die rechnerische Verknüpfung	$Z = \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2$
für die Negation	$Z = \bar{\alpha}_1$
die rechnerische Verknüpfung	$Z = 1 - \alpha_1$

Mit dieser Methode können serielle Produktionssysteme ohne Zwischenlager behandelt werden. Bei diesen Systemen ist zur Funktion des Gesamtsystems die Funktion eines jeden Elements erforderlich.

Die Boolesche Funktion lautet

$$Z = \alpha_1 \wedge \alpha_2 \wedge \alpha_3 \cdots \wedge \alpha_n$$

die System Funktion lautet

$$S(.) = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdots \alpha_n.$$

Mit der Systemfunktion und den Intaktwahrscheinlichkeiten p_i der Elemente, läßt sich die Intaktwahrscheinlichkeit p_{int} des Systems bestimmen

$$p_{\text{int}} = \prod_{i=1}^n p_i$$

Bemerkung:

Das Ausfall- und Reparaturverhalten einer einzelnen Komponente ist bei dieser Betrachtungsweise total unabhängig von den restlichen Komponenten, die auch nach Ausfall einer Komponente und somit des Systems noch "weiterarbeiten". Wird z.B. unterstellt, daß die nicht ausgefallenen Komponenten ihren Betrieb einstellen und somit auch nicht mehr ausfallen können, so entsteht eine die Ausfallwahrscheinlichkeit einer einzelnen Komponente beeinflussende Abhängigkeit, die mit Booleschen Modellen nicht mehr behandelbar ist. Jedoch sind andere Systeme wie die Parallel-, Parallel-Reihen-Anordnung und Vermaschungen mit Booleschen Modellen behandelbar. Hier sei auf die reichhaltige Literatur verwiesen. (Reinschke /1973/, Höfle-Isphording /1978/).

Kritik an Booleschen Modellen:

- keine Berücksichtigung verschiedener Ausfallmodi
- nur statische Modelle, Zeit nicht explizit enthalten, somit keine zeitlichen Reihenfolgen modellierbar
- Änderung des Ausfallverhaltens in Abhängigkeit vom Zustand anderer Komponenten nicht möglich.

Im nachfolgenden Abschnitt werden Zuverlässigkeitsmodelle behandelt, die die Mängel der Booleschen Modelle nicht besitzen.

6.1.2 Markoff-Prozesse

Man bezeichnet einen Zufallsprozeß $Z(t)$ als einen Markoff-Prozeß, wenn die Übergangswahrscheinlichkeiten von Zustand i zum Zustand j innerhalb (t_1, t_2) , $p_{ij}(t_1, t_2)$, nicht davon abhängen, welche Zustände vor der Zeit t_1 durchlaufen wurden ("Unabhängigkeit von der Vorgeschichte"). Diese Unabhängigkeit bezeichnet man als Markoff-Eigenschaft.

Bezüglich der Theorie der Markoffschen Prozesse sei hier wiederum auf die reichhaltige Literatur verwiesen (Reinschke, /1973/, Gaede /1977/, Heller /1978/ etc.). Eine kurze Zusammenfassung findet sich aber auch in Haußmann /1982/.

Wir greifen hier aber als ein Anwendungsbeispiel das im vorherigen Abschnitt beschriebene Seriensystem auf. Der Einfachheit halber besteht es nur aus 2 Komponenten.

Das System hat die Zustände

$$(0,0), (1,0), (0,1), (1,1).$$

Die Ausfallrate der Komponenten sei λ_i ($i=1,2$) und die Reparaturrate sei μ_i ($i=1,2$).

Damit erhält man die Übergangsmatrix \underline{P} .

von \ nach	0,0	1,0	0,1	1,1
0,0	$1-\mu_1-\mu_2$	μ_1	μ_2	
1,0	λ_1	$1-\lambda_1-\mu_2$		μ_2
0,1	λ_2		$1-\lambda_2-\mu_1$	μ_1
1,1		λ_2	λ_2	$1-\lambda_1-\lambda_2$

Lösung des Gleichungssystems

$$\underline{p}^* \cdot \underline{P} = 0$$

$$\sum_{i=1}^n p_i^* = 1 .$$

In unserem Beispiel ergibt sich für die stationäre Zustandswahrscheinlichkeit $p(1,1)$:

$$p(1,1) = \left(1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} \right)^{-1} .$$

Für beliebig lange Seriensysteme fanden Barlow und Proschan /1975/ die folgende Verallgemeinerung für die Systemverfügbarkeit:

$$V_{\text{sys}} = \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{\text{MTTR}_i}{\text{MTBF}_i} \right)^{-1}$$

Die Anwendung dieser Formel ist nicht auf Systeme mit exponentiellen Verteilungen beschränkt, sondern es sind beliebige Verteilungen mit endlichen Erwartungswerten zulässig.

Dieses hier kurz vorgestellte Verfahren ist auch auf Produktionssysteme mit endlichen Zwischenlagern anwendbar.

Es sind bestimmte grundsätzliche Annahmen, zum Zustandsraum und zu den Verteilungen von Systemparametern zu treffen:

- Das System befindet sich in einem eingeschwungenen (stationären) Zustand.
- Die Betriebs- und Reparaturdauern sind bei einem diskreten Parameterraum geometrisch verteilt mit den Wahrscheinlichkeiten p_i und r_i ($i=1, \dots, k$) bzw. bei einem kontinuierlichen Parameterraum exponentiell verteilt mit den Parametern $\lambda_i = 1/\text{MTBF}_i$, $\mu_i = 1/\text{MTTR}_i$ ($i=1, \dots, k$).

- Aufeinander folgende Betriebs- und Reparaturdauern sind unabhängig.
- Der Transport der Werkstücke nimmt keine Zeit in Anspruch.
- Die Versorgung der ersten Maschine ist zuverlässig. Ebenso kann die letzte Maschine ihre Produkte immer abgeben. Für die i -te Maschine eines Lagermodells wird eine Variable α_i definiert:

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 & \text{falls die Maschine } i \text{ intakt} \\ 0 & \text{falls die Maschine } i \text{ defekt} \end{cases}$$

Der Zustand des j -ten Lagers ($j=1, \dots, k-1$) wird beschrieben durch die Variable n_j ($0 \leq n_j \leq N_j$). Das System kann beschrieben werden durch den Vektor

$$(\alpha_1, \dots, \alpha_k; n_1, \dots, n_{k-1})$$

Die Anzahl der Zustände des Systems beträgt:

$$2^k \prod_{j=1}^{k-1} (N_j + 1).$$

Die Systemverfügbarkeit V_{sys}^N , ist dann definiert als die Summe aller Zustandswahrscheinlichkeiten, für die gilt: Die letzte Maschine gibt ein fertiggestelltes Produkt an das Ausgangslager ab.

Das Ergebnis für ein Zwei-Maschinen-Liniensystem mit einem dazwischenliegenden Zwischenlager lautet:

$$\text{Mit } s := \frac{p_2}{r_2} \cdot \frac{r_1}{p_1} = \frac{1-V_2}{V_2} \cdot \frac{V_1}{1-V_1} = \frac{s_2}{s_1}$$

$$s_1 := \frac{p_1}{r_1} \quad s_2 := \frac{p_2}{r_2} \quad r := \frac{r_2}{r_1}$$

$$C = \frac{(p_1+p_2)(r_1+r_2) - p_1 r_2 (p_1+p_2+r_1+r_2)}{(p_1+p_2)(r_1+r_2) - p_2 r_1 (p_1+p_2+r_1+r_2)}$$

gilt für $s \neq 1$:

$$V_{\text{sys}}^N = \frac{1 - sC^N}{(1+s_1) - (1+s_2) sC^N}$$

und für $s=1$

$$s_1 = s_2 \quad r = \frac{p_2}{p_1} = \frac{r_2}{r_1} \quad \text{und}$$

$$V_{\text{sys}}^N = \frac{1+r-r_2(1+s_2)+N \cdot r_2(1+s_2)}{(1+2s_2)(1+r-r_2(1+s_2))+N \cdot r_2(1+s_2)^2}$$

Gilt $r=1$ (d.h. $V_1=V_2$ mit identischen Parametern)

$$V_{\text{sys}}^N = V^0 \cdot \frac{2-r_2/V_2+Nr_2/V_2}{2-r_2/V_2+(Nr_2/V_2^2) \cdot V^0} \cdot$$

Es gilt die Ungleichskette:

$$V_{\text{sys}}^{(b)} \leq V_{\text{sys}}^{(a)} \leq V_{\text{sys}}^N \leq V_{\text{sys}}^\infty$$

Parameterstudien haben gezeigt:

- ° Die entscheidende Kenngröße für die Dimensionierung von Zwischenlagern ist die mittlere Reparaturzeit der Komponenten des Systems.
- ° Bei vorgegebener Lagerkapazität liefern ausbalancierte Systeme (d.h. die Verfügbarkeit der Komponenten ist angenähert identisch) die höchste erzielbare Systemverfügbarkeit.

Varianten solcher "Einlagermodelle" und vergleichende Untersuchungen zu "Zweilagermodellen" sind ausführlich beschrieben in Haußmann /1982/. Mehrlager-Seriensysteme sind mit vertretbarem formalen Aufwand nicht mehr exakt mathematisch-analytisch zu behandeln. Darauf deutet die zu berücksichtigende Anzahl von Systemzuständen hin. In Haußmann /1982/ werden für ein Zweilagermodell die Zustandsgleichungen aufgestellt und numerisch gelöst. Mit dem Einsatz paralleler Rechner und Algorithmen scheint nun aber auch eine numerische Behandlung größerer Systeme möglich.

Es liegt jedoch auch nahe, die bei Ein- und Zweilager-Liniensysteme gewonnenen mathematischen Werkzeuge für Mehrlager-Seriensysteme zu nutzen. Dazu werden größere Seriensysteme mit Zwischenlagern in eine Reihe von Ein- bzw. Zweilager-Linien-

systeme zerlegt und auf diese die bekannten Berechnungsmethoden angewandt.

Eine andere Methode ist die Zerlegung in GI/G/1/N- Warteschlangensysteme (siehe Abb. 6).

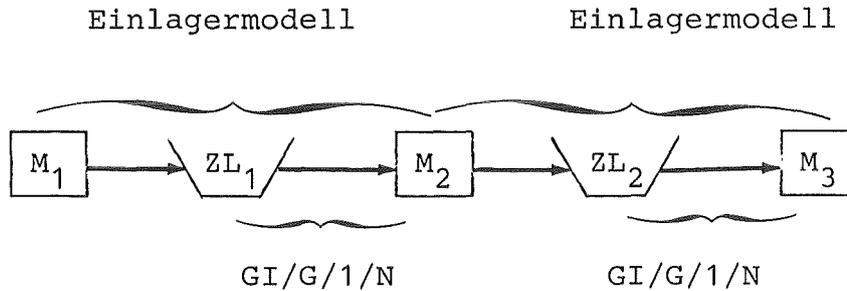


Abb. 6 : Zerlegung eines Zweilagermodells

Das Problem bei der Rückführung auf Einlagermodelle ist die Bestimmung "neuer" Ausfallwahrscheinlichkeiten, die so geschickt verändert werden müssen, daß der ursprüngliche Prozeß möglichst exakt wiedergegeben wird. Die Ergebnisse aus den Einlagermodellen werden als die einer neuen fiktiven Maschine mit exponentiellen Reparatur- und Ausfallverhalten betrachtet. Der Algorithmus benutzt außerdem die Tatsache, daß die Reparaturwahrscheinlichkeiten unbeeinflusst bleiben.

Die wesentlichen Schritte bei der Zerlegung in Warteschlangensysteme sind:

1. Zerlegung in GI/G/1/N-Schlangen
2. Analyse der einzelnen Warteschlangensysteme
 - Bildung einer einzigen Verteilung aus den Ausfall,- Reparatur- und Bedienverteilungen der Maschinen
 - Berechnung der Zustandwahrscheinlichkeiten
 - a) mit Diffusionsapproximation falls
$$cv^2 = \text{Varianz}/\text{Mittelwert}^2 < 1$$
 - b) mit C2/C2/1/N-Warteschlangensystem falls $cv^2 \geq 0.5$

3. Berechnung effektiver Bedien- und Ankunftszeiten der Systeme

Beide hier kurz vorgestellten Approximationsverfahren liefern (siehe Anhang) sehr gute Übereinstimmung mit exakten Ergebnissen und Simulationsmodellen.

Zusammenfassend ist festzuhalten:

Die Zerlegung in Einlagermodelle führt auf relativ einfache numerische Berechnungen. Dieser Vorteil ist bei der Zerlegung in GI/G/1/N-Systeme nicht mehr gegeben. Hier konnte nur durch rekursive Verfahren akzeptable Rechenzeiten und Speicherplatzanforderungen erreicht werden. Allerdings fällt die Voraussetzung exponentieller Bedien- und Reparaturverteilungen weg, so daß hier eine größere Allgemeinheit vorliegt. Auch ist eine Erweiterung auf Systeme mit Verzweigungen und Einmündungen möglich. Ausführlich dokumentiert sind diese Verfahren in Haußmann (/Anhang/, Fischer /1983/).

6.2 Anwendung von Simulationsverfahren

Für komplexere Systeme als Liniensysteme ohne bzw. mit Zwischenlagern wie die verzweigten Strukturen der Wiederaufarbeitung (Abb. 2) und der Entsorgungsstruktur (Abb. 4 und 5) eignen sich zur Prozeßnachbildung Simulationsverfahren. Solche Verfahren haben einige Vorteile:

- ° Simulationen sind flexibel in bezug auf die Prozeßstruktur und gestatten somit die Behandlung prozeßtechnischer Besonderheiten.
- ° Die Zahl der Verteilungen für Betriebs- und Reparaturen ist beliebig.
- ° Mehrere Einflußgrößen können verändert werden. Es ist möglich, verschiedene Maßnahmen, die auf eine Verbesserung der Gesamtverfügbarkeit abzielen, miteinander zu vergleichen.

Für Verfügbarkeitsuntersuchungen der o.a. Strukturen wurde im IDT ein Simulationsprogramm APSIS (Availability for Processing Systems with Interstage Storage) entwickelt und angewandt (ausführlicher: Anhang).

6.3 Programme

Es wurden Programme zu

- Einlagermodellen
- Zweilagermodellen
- Approximationsmodellen
- Simulationsverfahren

implementiert.

Das Simulationsprogramm ist ausführlich in einem Primärbericht dokumentiert. Nachfolgend eine kurze Beschreibung der einzelnen Programme und die Nennung der Datei in der sie abgespeichert sind.

EINLAG. FORT (M1)

EINGABE: $a_1, a_2, b_1, b_2, IN, JN, KN$

a_i = Ausfallwahrscheinlichkeiten $i=1,2$

b_i = Reparaturwahrscheinlichkeiten $i=1,2$

Für Parameterstudien besteht die Möglichkeit einer Schleifenbildung mit

IN Anfangswert für Lagerkapazität

JN Endwert für Lagerkapazität

KN Increment

AUSGABE: Systemverfügbarkeit für Einlagermodelle nach:

Gershwin/Schick, Buzacott, Artamonov, Haußmann.

Unterschieden wird außerdem zwischen time- und operation dependent failures und ob nur ein oder mehrere Ereignisse während eines Zyklus erlaubt sind.

EINLAG1. PL1 (LEV)

EINGABE: α_1 = Durchsatz der 1. Maschine in $\frac{ME}{ZE}$

α_2 = Durchsatz der 2. Maschine in $\frac{ME}{ZE}$

λ_1 = Ausfallrate der 1. Maschine

λ_2 = Ausfallrate der 2. Maschine

μ_1 = Reparaturrate der 1. Maschine
 μ_2 = Reparaturrate der 2. Maschine
Max = Lagerkapazität

AUSGABE: - Einzelverfügbarkeiten der Maschinen
- Stationäre Zustandswahrscheinlichkeiten
- Systemverfügbarkeit ohne Zwischenlager
- Systemverfügbarkeit mit Zwischenlager
nach Lewin, Wijngaard, Königsberg, Sevastyanov,
Vladziewskii

EINLAG1. PL1 (HAU)

EINGABE: a_1 = Ausfallwahrscheinlichkeit 1. Maschine
 a_2 = Ausfallwahrscheinlichkeit 2. Maschine
 b_1 = Reparaturwahrscheinlichkeit 1. Maschine
 b_2 = Reparaturwahrscheinlichkeit 2. Maschine
 c_1 = Ausfallwahrscheinlichkeit der 1. Maschine
im blockierten Zustand
 c_2 = Ausfallwahrscheinlichkeit der 2. Maschine
im blockierten Zustand
NN = Kapazität des Zwischenlagers.

Bemerkung:

Die Gleichungen des Einlagermodells werden aufgebaut und in einer Matrix abgespeichert. Die Lösung des LGS erfolgt mit den HARWELL-Routinen MA28AD und MA28CD. Besonderheit des Einlagermodells ist die Behandlung blockierter Maschinen.

AUSGABE: Zustandswahrscheinlichkeiten und Systemverfügbarkeit.

EINLAG1. PL1 (MM1)

EINGABE: λ Ankunftsrate einer M/M/1/N-Schlange
 μ Bedienrate einer M/M/1/N-Schlange
N maximale Anzahl von Kunden im System

Bemerkung:

Das Programm dient im wesentlichen zum Testen der HARWELL-Routinen

AUGABE: Zustandswahrscheinlichkeiten

EINLAG1. PL1 (WOB)

Wie EINLAG1. PL1 (HAU), jedoch geänderter Zyklusablauf.

ZWEILAG. FORT (M1)

EINGABE: a_i Ausfallwahrscheinlichkeiten $i=1,2,3$
 b_i Reparaturwahrscheinlichkeiten $i=1,2,3$
 c_i Ausfall-WS im blockiertem Zustand $i=1,2,3$
 N_i Lagerkapazität $i=1,2$

Bemerkung:

Das Programm verwendet die Harwell-Routinen MA28AD und MA28CD, deren Handhabung am besten in den Harwell-Unterlagen nachzulesen sind.

AUSGABE: Zustandswahrscheinlichkeiten, Verfügbarkeit, identische Zustandswahrscheinlichkeiten etc., für Zweilagermodell

ZWEILAG. FORT (M2)

Wie member M1, jedoch wird neben den Harwell-Routinen ein SOR-Algorithmus zur Lösung des LGS verwendet.

APPROX. FORT (DIFF1)

EINGABE: a_i, b_i, N_i wie oben aufgeführt

Bemerkung:

Die Zustandswahrscheinlichkeiten werden mit einem Diffusionsprozeß berechnet. Die Ankunftsrate wird vergrößert.

AUSGABE: Durchsatz eines Zweilagermodells

APPROX. FORT (DIFF2)

Wie 'Member' DIFF1, jedoch keine vergrößerte Ankunftsrate

APPROX. FORT (C2)

Wie DIFF1, jedoch werden die Zustandswahrscheinlichkeiten mit einem C2/C2/1/N-Modell berechnet.

APPROX. PL1 (F1)

EINGABE:	Ausfallwahrscheinlichkeiten	a_i
	Reparaturwahrscheinlichkeiten	b_i
	Zwischenkapazitäten	N_i

Bemerkung:

Dieses Programm zerlegt längere Linien zunächst in Zweilagermodelle und dann weiter in Einlagermodelle.

AUSGABE: Systemverfügbarkeit

APSYS. DATA (·)

Simulationsprogramm, ausführlich beschrieben im Anhang.

Alle oben aufgeführten Programme befinden sich auf dem Band DV2209.

Literaturverzeichnis:

Barlow, R.E. and Proschan, F. /1975/, "Statistical Theory of Reliability and Life Testing", Holt, Rinehart and Winston, INC.

Fischer, F. /1983/, "Availability Studies for Processing Systems with In-process Storage", KfK-Bericht Nr. 3564^{*)}.

Gaede, K.-W. /1977/, "Zuverlässigkeit - Mathematische Modelle", Carl Hanser Verlag München Wien.

Haußmann, W. /1982/, "Modellierung und Analyse von seriellen Produktionssystemen", KfK-Bericht Nr. 3322.

Heller, W.-D., Lindenberg, H., Nuske, M., und Schriever, K.-H. /1978/, "Stochastische Systeme", Walter de Gruyter, Berlin-New York.

Höfle-Isphording, U. /1978/, "Zuverlässigkeitsrechnung", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

Krämer, R., Kröbel, R. /1981/ (Hrsg.), unveröffentlicht.

Krämer, R., Kröbel, R. /1983/, "Das in-situ-Projekt - Eine Alternative zur Entsorgung von schwach- und mittelaktiven Abfällen" KfK-Nachrichten, Jhrg. 15, Heft 1, 1983, s. 39-44.

Lockemann et al /1983/, "Systemanalyse, DV-Einsatzplanung", Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.

Reinschke, K. /1974/, "Zuverlässigkeit von Systemen", VEB Verlag Technik Berlin.

Vetterkind, D. /1977/, "Graphentheoretische Modelle zur Berechnung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Kraftwerksanlagen", Dissertation, TH Aachen.

VDI-Handbuch Technische Zuverlässigkeit, Markoff-Zustandsänderungsmodelle mit endlich vielen Zuständen, Richtlinie 4008, Blatt 3.

*) KfK-Bericht Nr. 3564 Druckfehler auf Seite 18, Zeile Tab. 4
richtig muß es lauten: $r_1 = 0.2$ $r_2 = 0.15$ $r_3 = 0.1$ $r_4 = 0.15$

A N H A N G

A 1

Tabellen im Anhang

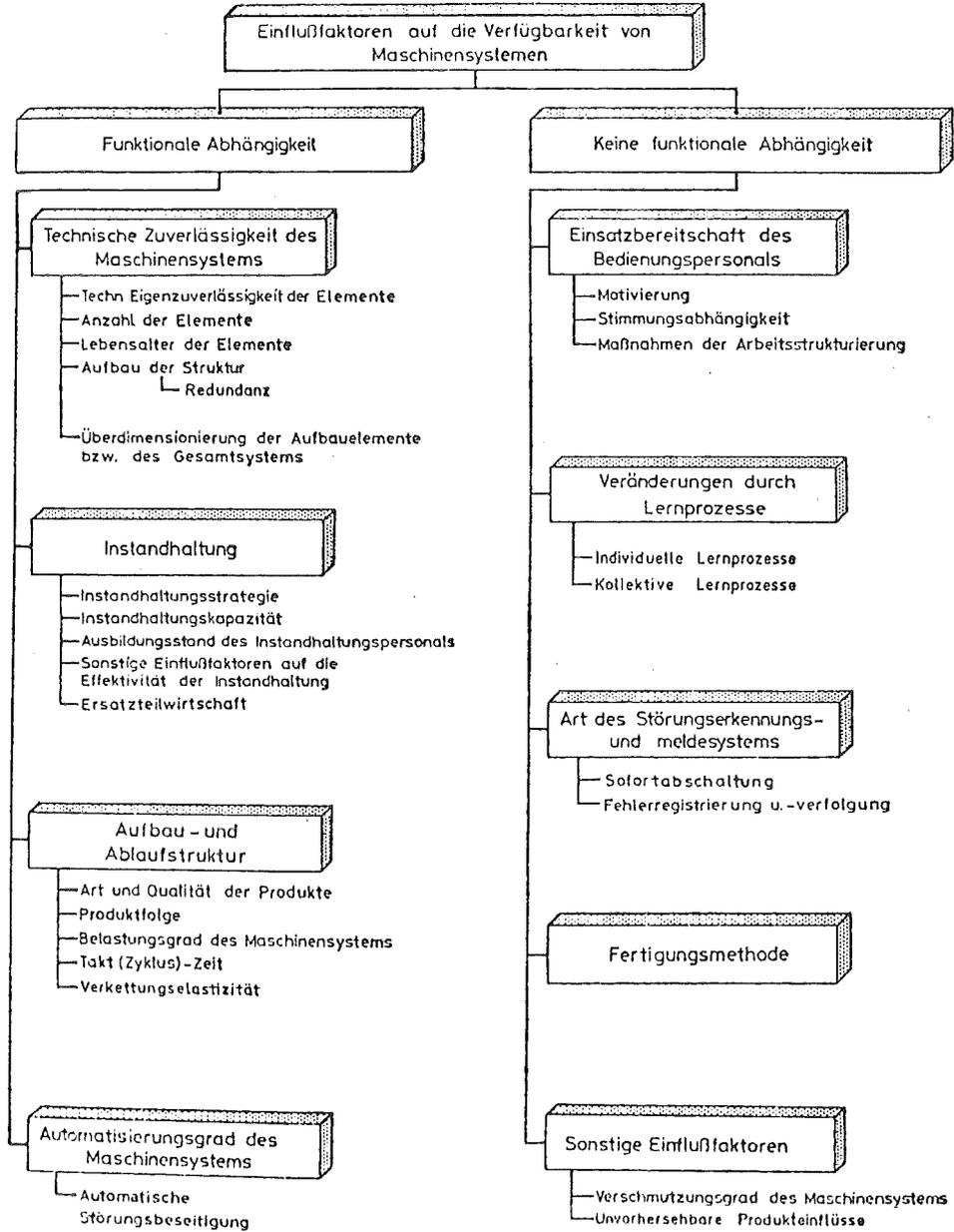
- Tab. A-1: Definition von ausgewählten Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitskenngrößen
- Tab. A-2: Verfügbarkeits- und Zuverlässigkeitskenngrößen in der elektrischen Energiewirtschaft
- Tab. A-3: Übersicht der Einflußfaktoren auf die Verfügbarkeit von Maschinensystemen
- Tab. A-4: Arbeitsschritte und ihre Eingangsinformationen der Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsanalyse
- Tab. A-5: Methodisches Vorgehen bei der Ist-Zustandserfassung

DEFINITION VON AUSGEWÄHLTEN ZUVERLÄSSIGKEITS- UND VERFÜGBARKEITSKENNGRÖSSEN			
NR	BEGRIFF	SYMBOL	DEFINITION
1	LAUFDAUER	T_0	Es handelt sich um die effektive Zeitspanne vom Beanspruchungsbeginn bis zum Ausfallzeitpunkt einer Betrachtungseinheit. Für <u>nicht</u> instandsetzungsfähige Betrachtungseinheiten ist diese Kenngröße die Lebensdauer; für instandsetzungsfähige Betrachtungseinheiten handelt es sich um die Zeitdauer zwischen dem Beendigungszeitpunkt des Instandhaltungsvorganges und dem nächsten Stillstand durch ein Ausfallereignis. Während der Laufdauer erfüllt die Betrachtungseinheit unter definierten Umgebungs- und Funktionsbedingungen die gestellten Funktionsanforderungen. Ausdrücke mit zum Teil anderem Sinninhalt: Operationsdauer, Ausfallabstand, fehlerfreie Laufdauer, Funktionsdauer, Störabstand.
2	AUSFALLDAUER	T_A	Für instandsetzungsfähige Betrachtungseinheiten ist dies die Zeitspanne vom Ausfallzeitpunkt bis zur Wiederherstellung der Einsatzbereitschaft; es sind darin die Zeiten für Fehlersuche, Fehlerdiagnose, Instandsetzung, Demontage- und Montage, Probeauf etc. enthalten, d.h. es ist die Zeitdauer, in der sich die Betrachtungseinheit in einem nicht funktionsfähigen Zustand befindet. Ausdrücke mit zum Teil anderem Sinninhalt: Stillstandsdauer, Unterbrechungsdauer, Instandhaltungsdauer, Stördauer.
3	MITTLERE LAUFDAUER	\bar{T}_0	Für <u>nicht</u> instandsetzungsfähige Betrachtungseinheiten ist diese Kenngröße der Erwartungswert der Lebensdauer einer Anzahl gleicher Betrachtungseinheiten. Für instandsetzungsfähige Betrachtungseinheiten handelt es sich um den Erwartungswert aus den Laufdauerabschnitten zwischen zwei Ausfällen oder den Erwartungswert der Laufdauerabschnitte bis zum ersten Ausfall. Bei zeitunabhängigen Ausfallraten entspricht der Erwartungswert dem arithmetischen Mittelwert der Laufdauerabschnitte. (Englischer Ausdruck: MTBF = mean time between failures)
4	MITTLERE AUSFALLDAUER	\bar{T}_A	Für instandsetzungsfähige Betrachtungseinheiten handelt es sich um den Erwartungswert der Ausfalldauerabschnitte einer einzelnen Betrachtungseinheit oder einer Anzahl gleicher Betrachtungseinheiten. Bei zeitunabhängiger Instandhaltungsrate ($\mu(t) = \mu = \text{konst.}$) entspricht der Erwartungswert dem arithmetischen Mittelwert der Ausfalldauerabschnitte. Es ist dies die Zeit, die im Mittel vergeht, bis die Instandhaltungsvorgänge beendet sind. (Englischer Ausdruck: MTTR = mean time to repair)
5	AUSFALLRATE	$\lambda(t)$	Es handelt sich um die Anzahl der ausgefallenen Betrachtungseinheiten im Zeitintervall $(t, t + \Delta t)$, bezogen auf den Bestand der nicht ausgefallenen Betrachtungseinheiten zum Zeitpunkt t . Der so definierte Wert liefert eine statistische Schätzung (als Ausfallquote $\bar{\lambda}(t)$ bezeichnet) für $\lambda(t)$, d.h. zahlenmäßig ist die Ausfallrate gleich dem für die Grundgesamtheit geltenden Wert der Ausfallquote für das gegen Null gehende Zeitintervall Δt . Das Produkt $\lambda(t) \cdot \Delta t$ ist die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Betrachtungseinheit des Bestandes im Zeitintervall $(t, t + \Delta t)$ ausfällt unter der Bedingung, daß sie den Zeitraum $(0, t)$ überlebt hat.
6	INSTANDHALTUNGSRATE	$\mu(t)$	Es handelt sich um die Anzahl der instanzugewalteten Betrachtungseinheiten (s. i. a. Zahl der abgeschlossenen Instandhaltungsaufträge) im Zeitintervall $(t, t + \Delta t)$ bezogen auf den Bestand an instanzuhaltenden Betrachtungseinheiten zum Zeitpunkt t . Der so definierte Wert liefert eine statistische Schätzung (als Instandhaltungsquote $\bar{\mu}(t)$ bezeichnet) für $\mu(t)$; d.h. zahlenmäßig ist die Instandhaltungsrate gleich dem für die Grundgesamtheit geltenden Wert der Instandhaltungsquote für das gegen Null gehende Zeitintervall Δt . Das Produkt $\mu(t) \cdot \Delta t$ ist die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Betrachtungseinheit des instanzuhaltenden Bestandes im Zeitintervall $(t, t + \Delta t)$ instanzugehalten wird unter der Bedingung, daß sie im Zeitraum $(0, t)$ als ausgefallen gilt.

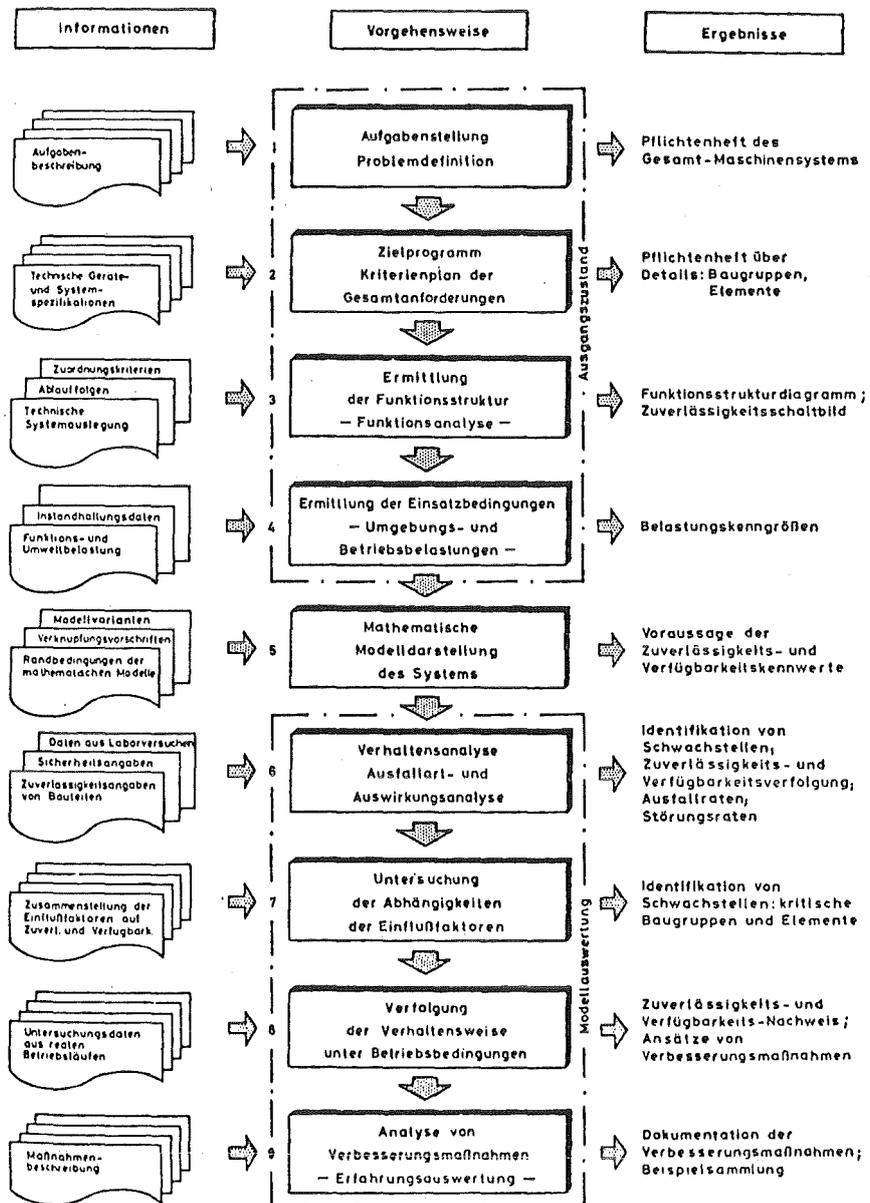
Tab. A-1: Definition von ausgewählten Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitskenngrößen
Quelle: REISCH, S. 23

Kenngröße	VDEW-Definitionen	zusätzlich definiert im probabilistischen Ansatz des Inst. für Elektr. Anlagen, RWTH Aachen
Nennzeit Betriebszeit Reservezeit (kalte Res.) Verfügbarkeitszeit Nichtverfügbarkeitszeit Störanteil der NV-Zeit Plananteil der NV-Zeit geforderte Betriebszeit	T_N T_B T_R $T_V = T_B + T_R$ $T_{NV} = T_N - T_B - T_R = T_N - T_V$ T_{NVSI} T_{NVPI} $(T_N - T_R - T_{NVPI})$	$E(t_B) = \text{Erwartungswert der Betriebszeit}$ $E(t_A) = \text{Erwartungswert der Zeit für Vollaustalle}$ $T_{PI} = \text{Dauer für planmäßige Instandhaltung}$ $T_{Bq} = T_N - T_{PI} - T_R$
Leistung Nennleistung elektr. Nennarbeit Erzeugung Reservearbeit verfügbare Arbeit nichtverfügbare Arbeit Betriebsleistung Reserveleistung verfügbare Leistung nichtverfügbare Leistung Leistungsvermögen der Stufe n m-tes Zeitintervall der Stufe n Leistungsvermögen ausgefallene Leistung	P P_N $A_N = T_N \cdot P_N$ $A_B \text{ (aus Zählerständen ermittelt)}$ $A_R = \int p_R \cdot dt_B + \int p_V \cdot dt_R$ <p style="font-size: small;">PR, PV = Momentanwerte der Reserve- bzw. verfügb. Leistg</p> $A_V = A_B + A_R$ $A_{NV} = A_N - A_V$ $P_B = \frac{A_B}{T_B}$ $P_R = \frac{\int p_R \cdot dt_B}{T_B}$ $P_V = P_B + P_R$ $P_{NV} = P_N - P_V$	S_{Vn} t_{nm} $\text{Erwartungswert } E(S_V) = \left[\sum_{n=1}^k S_{Vn} \cdot \sum_{m=1}^j t_{nm} \right] / t_{Bq}$ $\text{Erwartungswert } E(S_S)$
Ereignis-Zuverlässigkeit Zeit-Zuverlässigkeit Leistungsverlässlichkeit Instandhaltungsfaktor Funktionsverfügbarkeit Zeitverfügbarkeit Arbeitsverfügbarkeit Leistungsverfügbarkeit	$Z_e = \frac{n_e}{n_e + n_{ne}}$ <p style="font-size: small;">ne = Anz der erfolg. Betätig nne = Anz der nichterfolg. Betätigungen</p> $Z_T = \frac{T_B}{T_B + T_{NVSI}}$ $k_T = \frac{T_B + T_R}{T_N} = \frac{T_V}{T_N}$ $k_A = \frac{P_V \cdot T_V}{A_N} = \frac{(P_B + P_R) \cdot T_N}{P_N \cdot T_N} = \frac{A_B + A_R}{P_N \cdot T_N}$ $k_P = \frac{P_B + P_R}{P_N} = \frac{P_V}{P_N}$	$P_S = \text{Versagenswahrscheinlichkeit von Schaltern}$ $V_F = \frac{E(t_B)}{E(t_B) + E(t_A)} = \text{Funktionsverläßlichkeit}$ $V_L = \frac{E(S_V)}{E(S_V) + E(S_S)}$ $W = \frac{T_N - T_{PI}}{T_N}$ $k_F = V_F \cdot W$ $k_L = V_L \cdot W, \text{ entspricht der Arbeits-Verfügbarkeit nach VDEW bei } T_R \equiv 0$
Zeitausnutzung Leistungsausnutzung Arbeitsausnutzung	$\eta_T = \frac{T_B}{T_N}$ $\eta_P = \frac{P_B}{P_N}$ $\eta_A = \frac{A_B}{A_N}$	
Zusammenhang $k_A = k_T \cdot k_P$		
für $T_R \equiv 0$ gelten folgende Identitäten: $k_T = \frac{T_B}{T_N} = \frac{T_B}{T_B + T_{NVSI}} \cdot \frac{T_B + T_{NVSI}}{T_N} = \frac{T_B}{T_B + T_{NVSI}} \cdot \frac{(T_B + T_{NV}) - T_{NVPI}}{T_N} = \frac{T_B}{T_B + T_{NVSI}} \cdot \frac{T_N - T_{NVPI}}{T_N} = \frac{E(t_B)}{E(t_B) + E(t_A)} \cdot \frac{T_N - T_{PI}}{T_N} = V_F \cdot W = k_F$ $k_A = \frac{A_B + A_R}{P_N \cdot T_N} = \frac{\sum_{n=1}^k S_{Vn} \cdot t_n}{P_N \cdot (T_N - T_{NVPI})} \cdot \frac{T_N - T_{NVPI}}{T_N} = \frac{\sum_{n=1}^k S_{Vn} \cdot t_n}{P_N \cdot t_{Bq}} \cdot \frac{T_N - T_{PI}}{T_N} = V_L \cdot W = k_L$		

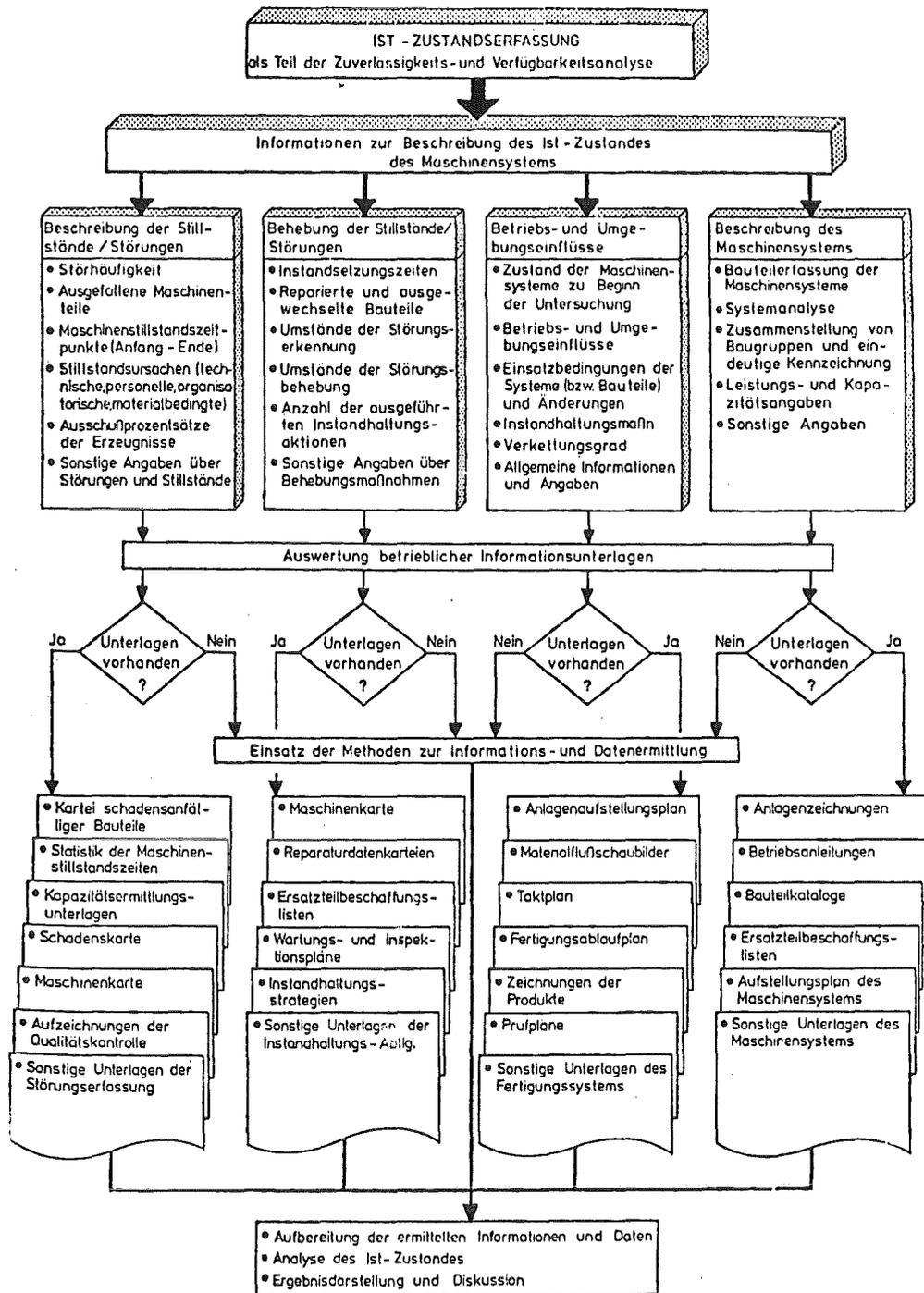
Tab. A-2: Verfügbarkeits- und Zuverlässigkeitskenngrößen in der elektrischen Energiewirtschaft
 Quelle: VETTERKIND. S. 9



Tab. A-3: Übersicht der Einflußfaktoren auf die Verfügbarkeit von Maschinensystemen
Quelle: REISCH, S. 45



Tab. A-4: Arbeitsschritte und ihre Eingangsinformationen der Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsanalyse
Quelle: REISCH, S. 79



Tab. A-5: Methodisches Vorgehen bei der Ist-Zustandserfassung

Quelle: REISCH, S. 89

A N H A N G

A 2

Ein neues Approximationsverfahren für Serien-
systeme mit endlichen Zwischenlagern

Teil I

J. A. Buzacott

W. Haußmann

TABLE OF CONTENTS

1. Introduction
2. Model for obtaining exact results
3. Approximation procedure .
4. Numerical Examples
5. Conclusions
6. References

Zusammenfassung

Mit Hilfe einer Markovkette werden die Zustandswahrscheinlichkeiten eines nuklearen Abfallbehandlungssystems bestimmt. Dieses System besteht aus drei unzuverlässigen Maschinen und zwei endlichen Zwischenlagern. Es wird ebenfalls ein neues Approximationsverfahren vorgestellt, das Ergebnisse aus der Warteschlangentheorie nutzt. Einige numerische Beispiele zeigen die Genauigkeit der approximativen Methode.

Abstract

A new approximation procedure for serial systems with finite buffers, Part I

A Markov chain model is used to determine the ergodic system state probabilities of a nuclear waste management production line consisting of three unreliable machines and two finite buffers. We present a new approximation procedure which uses results from queueing theory. Some numerical examples show the accuracy of the approximation procedure.

1. Introduction

In this paper we consider automatic transfer lines with unreliable work stations and finite storages. A transfer line can be defined as a number of automatic machines, each of which carries out its processing or assembly operation on the workpiece transferred from the preceding stage. We are interested in calculating the system through-put in steady state.

Most of the existing literature (see the references) analyses systems with two machines and one finite buffer. We present a Markov chain model for a three-stage transfer line. Some proposed approximation procedures for longer lines deal only with systems where the work stations must have identical repair times. Our approximation procedure treats systems with non-identical repair times. The basic idea of the approximation procedure is the modelling of the production line as a series of GI|G|1|N-queues.

2. Model for obtaining exact results.

The model that was developed for obtaining the exact state probabilities and the system throughput may be summarized as follows (it is described in more detail in Hausmann [1982]):

The production model is formulated as a discrete time parameter Markov chain model. The state of the system is described by a set of numbers

$$p = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, n_1, n_2) \quad (2.1)$$

where the variable α_i is defined as

$$\alpha_i = \begin{cases} 0 & \text{if machine } i \text{ is working} \\ 1 & \text{if machine } i \text{ is defective} \end{cases} \quad (2.2)$$

The variable n_j is defined as the actual number of workpieces in the storage j ($j=1,2$). Each storage has a maximum capacity N_j ($j=1,2$). With these definitions it is possible to describe the state of the system at any instant of time.

In order to construct the transition probability matrix \underline{P} we make the following assumptions:

- the system is in steady state
- the first machine is never starved and the last machine is never blocked
- the line is observed at the instant of transfer
- up- and down times are independent of each other and have geometric distributions with parameter a_i and b_i , $i=1,2,3$
- a machine is blocked if, after processing, the workpiece can't be placed in the succeeding buffer or machine
- only one event can occur during a cycle
- a blocked or starved machine has a failure probability c_i ($i=1,2,3$), so that both time and operation dependent failures can be modelled
- a repair man for each stage is available.

One can show that with these assumptions the corresponding Markov chain is irreducible and aperiodic. This is sufficient for the existence of the steady state distribution

$$P \cdot P = P, \quad \sum_i p_i = 1$$

In order to get an idea of the structure of the steady state probabilities a production line with the smallest possible state space was investigated. If both storages have a maximum storage capacity $N_j = 1$, we have to solve a system of 32 linear equations. We also assumed that the machines were identical. The calculations were carried out with the analytical computer language REDUCE and the following expression for the state probability $p(111,00)$ was found ($p(110,10)$ is the normalization factor) :

$$\begin{aligned}
 p(111,00) = p(111,10) & (12a^6b + 110a^5b^2 + 105a^5b + 380a^4b^3 + 507a^4b^2 \\
 & + 628a^3b^4 + 1239a^3b^3 + 532a^2b^5 + 1548a^2b^4 + 222ab^6 + 936ab^5 + 36b^7 + 216b^6) / \\
 & (24a^6b + 18a^6 + 214a^5b^2 + 192a^5b + 726a^4b^3 + 804a^4b^2 + 1194a^3b^4 \\
 & + 1680a^3b^3 + 1018a^2b^5 + 1841a^2b^4 + 432ab^6 + 1008ab^5 + 72b^7 + 216b^6).
 \end{aligned} \quad (2.3)$$

The expressions for the other state probabilities were even larger, so it was impossible to find a regular structure.

Numerical methods were then used to determine the steady state probabilities. Since the transition probability matrix tends to be both very large and sparse, a special storage scheme was used in the numerical solution so that all zero entries in the matrix could be excluded. It was also observed that the transition probability matrix P has a special structure which might possibly be exploited to

develop an efficient algorithm. The numerical methods that may be used to solve the system of linear equations are discussed in Duff(1977) and Stewart(1975). There are two main types of methods: iterative and direct methods. Iterative methods (modifications of the Jacobi, Seidel algorithms) use only the non-zero elements and they don't change the matrix so computer memory requirements are minimal. The disadvantages are the convergence speed and the accuracy of the results. Direct methods (variants of the Gaussian eliminations) yield to very accurate results but they produce new nonzero elements, the so-called "fill-in". This fill-in can become so large that memory is exceeded. The simultaneous equations were solved with both methods. In the case of the direct method, the subroutine MA1BA from the HARWELL program library was used and a successive overrelaxation (SOR) iterative algorithm was implemented.

If the failure and repair probability of a machine is independent from the state of the storage capacity, the following relation for the machine states must hold:

$$p(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \prod_{i=1}^3 \left(\alpha_i \frac{a_i}{a_i + b_i} + (1 - \alpha_i) \frac{b_i}{a_i + b_i} \right) \quad (2.4)$$

On the other side $p(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ can be determined by the numerically calculated state probabilities:

$$p(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \sum_{n_1=0}^{N_1} \sum_{n_2=0}^{N_2} p(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \quad (2.5)$$

Equations (2.4) and (2.5) must yield to the same results. This was one of the tests for the accuracy of the numerical results which is, of course, no absolute guaranty.

The calculations were done with an IBM 3033. Parameter studies with maximum storage capacities up to 20 units were carried out. This meant that systems of simultaneous equations of size 3528 had to be solved. For these calculations memory capacity was not yet exceeded, so treatment of longer transfer lines or lines with larger storage capacities is feasible.

It was found that the direct method performed much better. In some cases up to 1000 iterations with the iterative method were necessary to get the accuracy of the direct method.

3. Approximation Procedure

As indicated above the basic idea of the approximation method is to decompose the production line into individual GI|GI|1N- queues ignoring some of the interactions between the components of the system. We also assume that the output from any queue in the line forms a renewal process. The procedure iteratively alters the mean and variances of the effective service and arrival times. First we have to determine the effective service time of a station with breakdowns. Gaver[1962] derived the effective or service completion time for a station where breakdowns appear at random according to a Poisson process, and service and repair times are independently and identically distributed (i.i.d.)

with arbitrary distribution functions. He defined the service completion time as the duration of the period that elapses between the instant at which the service of an arrival begins and at which service of the next arrival may begin, provided an arrival is present. This period is simply the service time if there are no breakdowns. With interruptions it is, in addition to the service time, the sum of the breakdowns occurring during service. He considered the following types of interruptions:

- postponable breakdowns. When an interruption appears during service it does not take effect until the end of the service time and then all repair times are appended to the service time.
- pre-emptive resume breakdowns. When a breakdown occurs, service is stopped and the station is immediately repaired. Service is then continued from the point at which it was interrupted.

Gaver showed that in both cases service completion times have the same distribution. If λ is the rate of breakdowns occurring at random and R and S are the repair and service times with distribution function $L(x)$ and $V(x)$ ($\hat{L}(s), \hat{V}(s)$ are the Laplace transforms), then the service completion time C is given by

$$C = S + \sum_{i=0}^N R(i). \quad (3.1)$$

Taking conditional expectations he found :

$$\hat{C}(s) = \hat{V}(s + \lambda - \lambda \hat{L}(s)) \quad (3.2)$$

Differentiation yields to

$$E(C) = E(S) (1 + \lambda E(R)) \quad (3.3)$$

$$\text{Var}(C) = \text{Var}(S) (1 + \lambda E(R))^2 + \lambda E(S) E(R^2) \quad (3.4)$$

$$E(C^3) = E(R^3)E(S)\lambda + 3E(R^2)E(S)\lambda E(C) + 3E(C)E(C^2) \quad (3.5)$$

We have analysed a server in isolation. In this case failures occur independent from the state of the system. In order to apply the derived formula and compare the results with a Markov chain model we have to make sure that failures in the Markov chain model appear independent from the storage state. This means, we have to apply the time-dependent failure model and therefore c_i is equal a_i , ($i=1,2,3$).

So far we have calculated only the service completion time of a station with breakdowns in isolation. If we want to decompose our production line into single GI|GI|1N- queues we have to determine the effective arrival and service completion times when the stations are dependent on each other. For queue i we approximate the effective service completion time \hat{S}_i by the service completion time C_i plus the blocking time:

$$\hat{S}_i = C_i + \text{blocking time} \quad (3.6)$$

The blocking phenomenon applied in this paper is as follows: The workpiece which completed processing at station i has to go directly to stage $i+1$. If the queue at station $i+1$ is full then we say station i is blocked. Station i holds the finished workpiece until the service completion occurs

at station $i+1$. This remaining service time we will approximate by the service completion time of station $i+1$ if the squared coefficient of variation is greater than 1 and by the residual life time RS of station $i+1$ otherwise. In this case we get for the effective service completion time:

$$\hat{S}_i = C_i + RS_{i+1} p(N_{i+1}) \quad (3.7)$$

where $p(N_{i+1})$ is the probability that the queue at station $i+1$ is full. The expected residual life time is given by

$$E(RS_i) = \frac{E(C_i)^2 + \text{Var}(C_i)}{2E(C_i)} \quad (3.8)$$

with variance

$$\text{Var}(RS_i) = \frac{E(C_i^3)}{3E(C_i)} - \left(\frac{E(C_i^2)}{2E(C_i)}\right)^2$$

If the blocking time is approximated by the residual life time the expected effective service time is:

$$E(\hat{S}_i) = E(C_i) + \frac{E(C_{i+1})^2 + \text{Var}(C_{i+1})}{2E(C_{i+1})} \cdot p(N_{i+1}) \quad (3.9)$$

and the variance is given by

$$\begin{aligned} \text{Var}(\hat{S}_i) = \text{Var}(C_i) + & \left(\frac{E(C_{i+1}^3)}{3E(C_{i+1})} \right. \\ & \left. - \frac{E(C_{i+1}^2)}{2E(C_{i+1})} \right)^2 \cdot p(N_{i+1}) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Next we have to identify the effective arrival time \hat{A}_i to station i , which can be treated as the interdeparture time of station $i-1$. In steady state through-put at each queue must be the same. This means that the through-put at each individual queue i must converge to the system

through-put $R = (1 - p(O_{last}) / E(\hat{S}_{last}))$ which must be equal to the system input $I = (1 - p(N_1) / E(\hat{A}_1))$. Because we have finite storages fraction $1 - p(N_i)$ of the arrivals to queue i are lost. The only arrival rate to queue i which guarantees a throughput of R is then $R / (1 - p(N_i))$ and, therefore the effective arrival time to queue i (see also Hillier and Boling (1967), Altiook(1982)) is :

$$E(\hat{A}_i) = \frac{E(\hat{A}_1) \cdot (1 - p(N_i))}{(1 - p(N_1))} \quad (3.11)$$

which is equivalent to

$$E(\hat{A}_i) = \frac{E(\hat{S}_1) \cdot (1 - p(N_i))}{(1 - p(O_1))}$$

For the variance of effective arrival times we will use a result from Disney(1974). He developed the variance of the inter-departure time of a M/G/1 queue and applying this, we obtain:

$$\begin{aligned} \text{Var}(\hat{A}_i) = \text{Var}(\hat{S}_{i-1}) + p(O_{i-1}) \cdot 2\hat{A}_{i-1}^2 - \\ p(O_{i-1})^2 \cdot \hat{A}_{i-1}^2. \end{aligned} \quad (3.12)$$

where $p(O_{i-1})$ is the probability that storage $i-1$ is empty.

Gelenbe(1976) derived the moments of the inter-departure time of a GI/G/1 queue. If his derivations are applied to a GI/G/1 queue it is found that the following expression for the variance of the effective inter-arrival time:

$$\begin{aligned} \text{Var}(\hat{A}_i) = \text{Var}(\hat{S}_{i-1}) + p(O_{i-1}) \cdot E(\hat{A}_{i-1}^2) - \\ p(O_{i-1})^2 \cdot E(\hat{A}_{i-1})^2. \end{aligned} \quad (3.13)$$

which reduces to equation (3.12) if the arrival process is

exponential. Equation (3.13) seems to work very well but is not yet verified by simulation, therefore we shall only use the formula by Disney. Now, each queue can be analyzed as a single GI|GI|N-queue. For determining the state probabilities we shall use the results from Gelenbe (1975). In order to facilitate readers not familiar with the results derived by Gelenbe a brief summary is presented. Consider a GI|GI|N-queue. Let the service times be independent and identically distributed random variables with mean $1/\mu$ and variance V_s . Similarly let the arrival times be random variables with mean $1/\lambda$ and variance V_a . Let N be the maximum number of customers in the system (including this one being served). Then the stationary probability density function for $(X(t), t > 0)$, which is the stochastic diffusion process approximating the number of customers in the system, is given by

$$f = \begin{cases} -(\lambda \cdot p(0)/b) (1 - e^{-\gamma x}) & 0 \leq x \leq 1 \\ -(\lambda \cdot p(0)/b) (e^{-\gamma} - 1) e^{-\gamma x} & 1 \leq x \leq N-1 \\ -(\mu \cdot p(N)/b) (e^{-\gamma(x-N)} - 1) & N-1 \leq x \leq N \end{cases}$$

where

$$b = \lambda - \mu$$

$$\alpha = \lambda^3 V_a + \mu^3 V_s$$

$$\gamma = \frac{2b}{\alpha}$$

$$p(0) = (1 - \rho) (1 - \rho^2 e^{\gamma(N-1)})^{-1}$$

$$p(N) = \rho \cdot p(0) \cdot e^{\gamma(N-1)}$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

IF $\rho = 1$ we have

$$p(0) = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot (1 + (N-1) \cdot (\lambda^2 V_a + \mu^2 V_s)^{-1})^{-1}.$$

The proposed approximation technique may now be summarized as follows:

- decompose the production line into single GI|G|1|N-queues
- calculate effective arrival times (3.11) - (3.13) to queue i
- calculate effective service completion times (3.9), (3.10) of queue i
- determine the system throughput R which is given by

$$R = \frac{(1 - \text{prob}(\text{last queue is empty}))}{\text{service completion time of last station}}$$

By repeating this successively different values of R are received which normally converge very fast. Numerical examples are given in the next section.

4. Numerical Examples

With the approximation procedure formulated in section 3 it is generally possible to analyse production lines with k stages and $k-1$ finite buffers, where the stages have arbitrary distributed service and repair times and where failures occur by a Poisson process. In this section we will apply the approximation procedure to a production line with 3 stages and two finite buffers. For such a system exact data are available (see section 1). Stations have deterministic service times of 1 time unit, and failure and repair times are geometrically distributed with parameter a_i and b_i , $i=1,2,3$.

In this case we find the mean, variance and third moment of the service completion from (3.3)-(3.5) and we obtain :

$$E(C_i) = 1 + \frac{a_i}{b_i}$$

$$\text{Var}(C_i) = 2 \frac{a_i}{b_i^2}$$

$$E(C_i^3) = 3 \frac{a_i}{b_i^3} + \frac{6a_i E(C_i)}{b_i^2} + E(C_i)^3.$$

The mean and the variance of the residual life time can be determined by (3.8). For the mean we find :

$$E(RS_i) = \frac{E(C_i)^2 + 2 \frac{a_i}{b_i^2}}{2 \cdot E(C_i)}$$

We assume that the first station can never be starved. Therefore the first machine is always operating and so the service completion time $E(C_1)$ will be the effective arrival time to queue II. Similarly, the third station will never be blocked and so the effective service completion time of queue III remains $E(C_3)$. Finally, we approximate the three stage production line by queue II and III (see figure 1) with the following equations:

Queue II:

$$E(\hat{A}_{II}) = E(C_I)$$

$$\text{Var}(\hat{A}_{II}) = \text{Var}(C_I)$$

$$E(\hat{S}_{II}) = E(C_I) + P(N_{III}) \cdot E(RS_{III})$$

$$\text{Var}(\hat{S}_{II}) = \text{Var}(C_I) + P(N_{III}) \cdot \text{Var}(RS_{III})$$

Queue III :

$$E(\hat{A}_{III}) = \frac{E(C_1) \cdot (1-p(N_{III}))}{(1-p(N_1))}$$

$$\text{Var}(\hat{A}_{III}) = \text{Var}(\hat{S}_{II}) + p(O_{II}) \cdot 2\hat{A}_{II}^2 - p(O_{II})^2 \cdot \hat{A}_{II}^2$$

$$E(\hat{S}_{III}) = E(C_{III})$$

$$\text{Var}(\hat{S}_{III}) = \text{Var}(C_{III})$$

Throughput is determined by $R = \frac{(1-p(O_{III}))}{E(C_{III})}$.

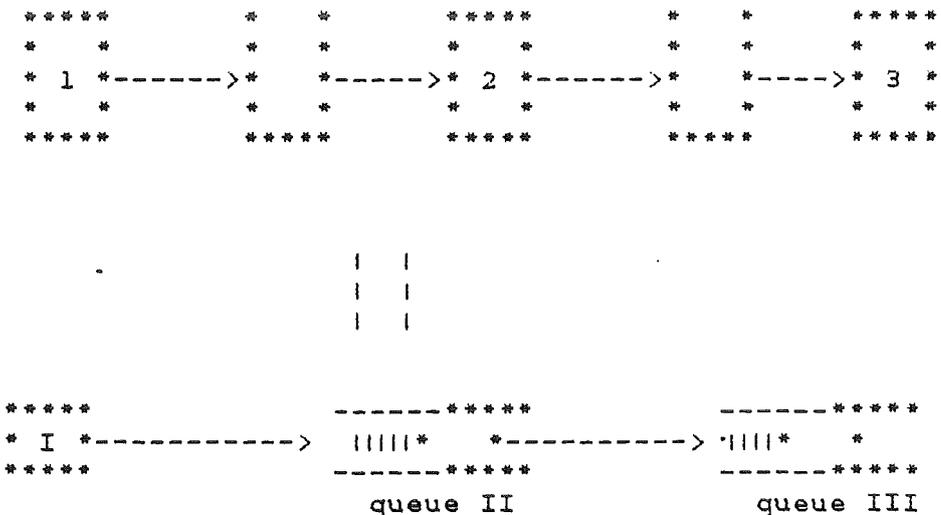


Fig. A2-I: The production line is decomposed into two GI|G|1|N- queues.

We applied both the exact procedure and the approximate method in order to obtain comprehensive numerical results. Table I and II give values for the through-put for stages with non-identical service completion times and identical storage capacities and also with storage capacities with $\frac{N_i}{MTTR_i} = 2$. From table II it is obvious that the

reversibility property is fulfilled. Table III shows values for the through-put if stages and buffers are identical. The maximum relative error occurred is less than 5%, if the squared coefficients of the service completion times are not significantly greater than 1. In table III the maximum error is 13.7%, however the squared coefficient of the service completion time is 6.4. In this case the calculation of $p(0_i)$ and $p(N_i)$ should be carried out by a different method, i.e. the Coxian phase method (Yao, (1983)). Badel and Shum (1975) observed that over a wide range of parameter values, maximum relative error of the diffusion approximation does not exceed 15%. In their study maximum error occurred at $\rho=0.9$ with a squared coefficient of variation greater than 4. Best results were achieved for small ρ and scv's. In our parameter study maximum error occurred at $\rho=1.0$ with $scv = 6.4$.

5. Conclusions

In this paper we studied a production line consisting of three stages and two finite buffers. A Markov chain model and an approximation procedure was developed. The Markov chain approach can be extended to longer lines if the structure of the transition probability matrix P is exploited. The maximum relative error of the approximation for system throughput is less than 5% for small ρ and scv^S . The error might be reduced if the state probabilities are determined by a Coxian Phase model which yields better results for bigger squared coefficients of arrival and service times. The approximation procedure can also be applied to k -stage lines with finite buffers, arbitrarily distributed service and arrival times and breakdowns appearing at random by a Poisson process.

Results:

Example	Markov Model	Approx.	Error(%)
1	.4765	.4635	-2.72
2	.5515	.5319	-3.8
3	.5856	.5675	-3.09
4	.5515	.5350	-3.2
5	.4765	.4659	-2.2

Input data:

Example	A_{II}	scv_{II}^A	S_{II}	scv_{II}^S	S_{III}	scv_{III}^S	N_1	N_2
1	1.99	3.00	1.42	1.67	1.11	.35	8	8
2	1.66	2.39	1.43	1.67	1.25	.96	8	8
3	1.43	1.68	1.43	1.68	1.43	1.68	8	8
4	1.25	.95	1.43	1.68	1.66	2.39	8	8
5	1.11	.35	1.43	1.68	1.99	3.00	8	8

Input data:

Example	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
1	.1666	.1071	.0555	.1666	.2500	.5000
2	.1333	.1071	.0833	.2000	.2500	.3333
3	.1071	.1071	.1071	.2500	.2500	.2500
4	.0833	.1071	.1333	.3333	.2500	.2000
5	.0555	.1071	.1666	.5000	.2500	.1666

Tab. A2-I: Through-put of a 3-stage system with non-identical machines and identical buffer sizes.

Results:

Example	Markov Model	Approx.	Error(%)
6	.4885	.4811	-1.50
7	.5582	.5430	-2.7
8	.5856	.5675	-3.09
9	.5582	.5431	-2.7
10	.4885	.4810	-1.5

Input data:

Example	A_{II}	scv_{II}^A	S_{II}	scv_{II}^S	S_{III}	scv_{III}^S	N_1	N_2
6	1.99	3.00	1.43	1.68	1.11	.35	12	4
7	1.66	2.39	1.43	1.68	1.25	.96	10	6
8	1.43	1.68	1.43	1.68	1.43	1.68	8	8
9	1.25	.96	1.43	1.67	1.66	2.39	6	10
10	1.11	.35	1.43	1.67	2.00	3.00	4	12

Tab. A2-II: Through-put of a 3-stage system with non-identical machines and buffer sizes.

a_i	b_i	S_i	scv_i^S	$N_1=N_2$	Markov	Approx.	Error
.0131	.2500	1.05	.38	8	.9147	.8930	2.3
-	-	-	-	12	.9231	.9108	1.33
-	-	-	-	14	.9281	.9161	1.29
.0625	.2500	1.25	1.28	8	.7002	.6738	3.77
-	-	-	-	12	.7247	.7070	2.44
-	-	-	-	14	.7395	.7178	2.93
.0125	.0500	1.25	6.4	8	.5841	.504	13.7
-	-	-	-	12	.6078	.5486	9.74
-	-	-	-	14	.6268	.5661	9.6

Tab. A2-III: Through-put of a 3-stage system with identical machines and buffer sizes.

6. References

Altiok, T. (1982), "Approximate analysis of exponential tandem queues with blocking.", *European Journal of Operation Research* 11 (1982) ,390-398

Artamonov, G.T. (1976), "Productivity of a two-instrument discrete processing line in the presence of failures.", *Cybernetics*, 12, 3, 464-468 (1977)

Badel, M. and Shum, A.V.Y. (1976), "Accuracy of an approximate computer system model", In: Gelenbe, E., ed.: *Modelling and performance evaluation of computer systems*. North-Holland Publishing Company (1976).

Buzacott, J.A. (1967), "Reliability of systems with in service repair ", Ph.D. Thesis, University of Birmingham

Buzacott, J.A. and Hanifin, L.E. (1978); "Models of automatic transfer lines with inventory banks. A review and comparison." *AIIE Transactions*, 6, 197-207.

Duff, I.S. (1977), "A survey of sparse matrix research ", *Proceedings of the IEEE*, Vol.65, No. 4, 500-535.

Disney, R.L., Cherry, W.P. (1974), "Some topics in queueing network theory ", In: Clarke, A.D.(ed.): *Mathematical methods in queueing theory*. Berlin: Springer (1974)

Gaver, D.P. (1962), "A waiting line with interrupted service, including priorities.", *Journal Royal Stat.Soc.Series*, Vol.

B 24, No. 1, (1962)

Gelenbe, E. (1975), "On approximate computer system models.", Journal of the Association for Computing Machinery, Vol.22, No. 2, 1975. pp.261-269

Gelenbe, E. and Pujolle, G. (1976), " The behaviour of a single queue in a general queueing network.", Acta Informatica 7, 123-136 (1976)

Gershwin, S.B. and Schick, I.C. (1980), "Modelling and analysis of two-and three-stage transfer lines with unreliable machines and finite buffers", Report LIDS-R-979, MIT

Hatcher, J.M. (1969), "The effect of internal storage on the rate of a series of stages having exponential service times.", AIIE Transactions, 1, 2, 150-156

Hausmann, W. (1982), "Modellierung und Analyse von seriellen Produktionssystemen", Report KfK 3322, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut fuer Datenverarbeitung in der Technik

Hillier, F.S. and Boling, R.W. (1966), "The effect of some design factors on the efficiency of production lines with variable operation times.", J.Ind.Eng., 17, 12, 651-658

Hillier, F.S. and Boling, R.W. (1967), "Finite queues in series with exponential or Erlang service times - a numerical approach", Operation Research, 15, 2, 286-303

Koenigsberg, E. (1959), "Production lines and internal storage - a review ", Management Science, 5, 155-165

Levin, A.A. and Pasko, I.I. (1969), "Calculating the output of transfer lines.", Machines and Tooling, 40, 12-16.

Okamura, K. and Yamashina, H. (1977), "Analysis of the effect of buffer storage capacity in transfer line systems.", AIIE Transactions, 9, 127-135

Sevastyanov, B.A. (1962), "Influence of storage bin capacity on the average standstill time of a production line.", Theory Prob. Appl., 7, 429-438.

Sheskin, T.E. (1976), "Allocation of interstage storage along an automatic production line", AIIE Transactions, 8, 146-152.

Stewart, W.J. (1978), "A comparison of numerical techniques in Markov modelling.", Comm. of ACM, Vol.21, No.2, 145-152.

Yao, D. and Buzacott, J.A., (1982), "A work station model for flexible manufacturing systems. Part II: The method of Coxian Phase.", Working Paper 82-26, University of Toronto, Department of Industrial Engineering

Wijngaard, J. (1979), "The effect of interstage buffer storage of the output of two unreliable production units in series, with different production rates.", AIIE Transactions 11, 42-47.

Zimmern, B. (1956), "Etudes de la propagation des arrêts
aleatoires dans les chaines de production.", Revue de sta-
tistique applique, Paris, 4, 85 -104.

A N H A N G

A 2

Ein neues Approximationsverfahren für Serien-
systeme mit endlichen Zwischenlagern

Teil II

J.A. Buzacott

W. Haußmann

TABLE OF CONTENTS

1. Introduction
2. The C2/C2/1/N-queueing model
3. The recursive algorithm
4. Numerical examples
5. References

Zusammenfassung

Dieser Artikel behandelt Produktionssysteme approximativ. Dazu werden Ergebnisse aus der Warteschlangentheorie verwendet. Unter anderem müssen die Zustandswahrscheinlichkeiten einer $C2/C2/1/N$ -Schlange bestimmt werden, bei der der Ankunftsprozeß (Bedienprozeß) gestoppt wird, sobald das Lager voll (leer) ist. Für dieses Modell wird ein rekursiver Algorithmus entwickelt, der die ergodischen Zustandswahrscheinlichkeiten der Schlange berechnet. Mit diesem rekursiven Algorithmus ist es möglich das lineare Gleichungssystem der Ordnung $4*N$ auf die Ordnung 4 zu reduzieren (N = Anzahl der Kunden im System). Mit diesem Approximationsverfahren ist es prinzipiell möglich allgemeine serielle Produktionssysteme mit endlichen Zwischenlagern zu analysieren, bei denen der Variationskoeffizient der Ankunfts- und Bedienzeiten größer 0.5 ist.

Abstract

A new approximation procedure for serial systems with finite buffers, Part II

The purpose of this paper is the approximate analysis of production systems. The approximation procedure uses results from queueing theory and requires the determination of the state probabilities of a $C2/C2/1/N$ -queue, where the arrival (service) process is turned off, as soon as the storage contents hit the upper (lower) boundary. For this model a recursive algorithm is developed to calculate the steady state probabilities. The recursive scheme reduces a system of linear equations of order $4*N$ to a system of order 4 (N = maximum number of customers in the system). The applied approximation procedure can be used to study general series production systems with finite buffers and squared coefficients of variation of arrival and service times greater than 0.5. Numerical examples for a three-stage nuclear waste management production system are presented.

1. Introduction

In this paper we are applying an approximation procedure which was first proposed in Haussmann, Buzacott [1983]. One result of that research was, that the accuracy of the approximation procedure was found best only if the squared coefficients of the arrival and service processes were less than 1. To overcome this weakness, the steady state probabilities of the storage content are calculated here in a different way. Instead of a diffusion approximation a C2|C2|1|N-queue is used, which yields to exact steady state probabilities.

In a C2|C2|1|N-queue, arrival and service times follow a Coxian distribution with two phases.

A typical two-stage Coxian distribution is illustrated in figure 1.

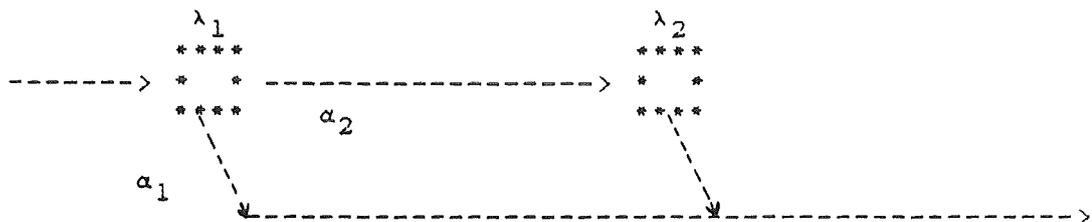


Fig. A2-II: Coxian distribution with two phases.

An arrival (served job) first goes through phase 1. After completion of phase 1, it leaves the arrival stage (service stage) with probability α_1 or goes through the additional phase 2 with probability α_2 . The sojourn times in phase 1 and phase 2 are exponentially distributed. This facilitates

the writing down of the global balance equations. Marie (1980) gave formulas to approximate general distributions with squared coefficients of variation (scv) greater than 0.5 by a two-phase Coxian distribution.

Since a C2 distribution has three independent parameters the approximation is not unique. One choice can be, i.e. (Marie(1980)):

$$\lambda_1 = 2\mu, \alpha_2 = 0.5/scv, \lambda_2 = \lambda_1\alpha_2, \alpha_1 = 1-\alpha_2 \quad (1.1)$$

where $1/\mu$ is the mean and scv the squared coefficient of variation of the original distribution to be approximated.

Some authors Marie, R. (1980), Steward, W. and Marie, R. (1980), Yao, D.D.W. and Buzacott, J.A. (1983) have already treated queues with Coxian distributions. The major difference in our work and theirs is that the arrival (service) processes are turned off as soon as maximum (zero) storage capacity is reached. This means that, in contrast to the cited papers, blocked customers are not lost. This behaviour is characteristically true for transfer lines where blocked parts or jobs are not scrapped. The arrival process is simply interrupted when blocking occurs. As soon as blocking disappears the arrival process is resumed at the point of interruption.

2. The C2|C2|1|N - queueing model.

The C2|C2|1|N-queueing model is formulated as a homogeneous Markov process with discrete state space and continuous

time parameter. The steady-state probabilities of the system can be described by

$$P(n, j) ; Q(n, j), \quad n=0, \dots, N; \quad j=1, 2 \quad (2.1)$$

$P(\cdot, \cdot)$ indicates that the arrival process is in phase 1, whereas $Q(\cdot, \cdot)$ relates to the arrival process in phase 2. The service is in phase 1 (phase 2), if $j=1$ ($j=2$). The number of customers in the system is given by n ; there can be maximum N customers in the system.

The parameters of the arrival process are given by $(\lambda_1, \lambda_2, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_1 + \alpha_2 = 1)$ and the service process is characterized by $(\mu_1, \mu_2, \theta_1, \theta_2, \theta_1 + \theta_2 = 1)$. Figure 2 shows a C2|C2|1|N-queueing system.

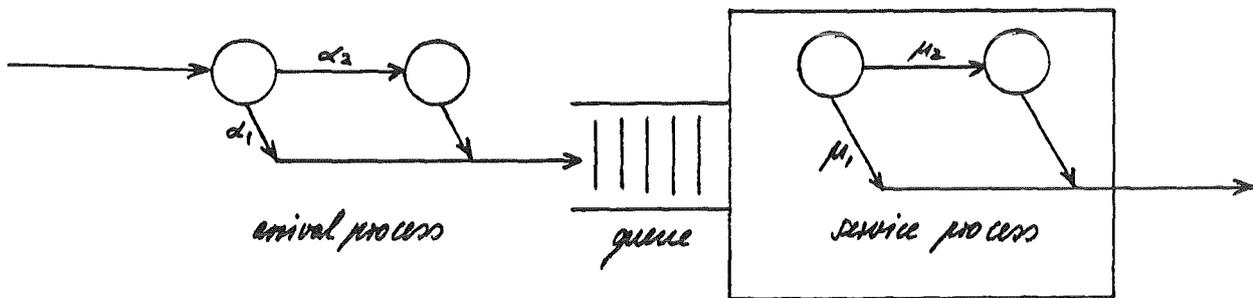


Fig. A2-III: C2|C2|1|N- queueing system

The parameters of the arrival and service process induce the following probabilities:

$$\lambda_1 dt = \text{prob}(\text{arrival process leaves phase 1})$$

$$\lambda_1 \alpha_2 dt = \text{prob}(\text{arrival process goes from phase 1 to phase 2, } n \rightarrow n)$$

$$\lambda_1 \alpha_1 dt = \text{prob}(\text{arrival process leaves phase 1, joins$$

queue $n \rightarrow n+1$, and arrival process is again in phase 1)
 $\lambda_2 dt =$ prob(arrival process leaves phase 2, joins queue
 $n \rightarrow n+1$ or is served, and arrival process is in phase 1)

$\mu_1 dt =$ prob(service process leaves phase 1)

$\mu_1 \theta_2 dt =$ prob(service process goes from phase 1 to
phase 2, $n \rightarrow n$)

$\mu_1 \theta_1 dt =$ prob(customer leaves system from service
phase 1, $n \rightarrow n-1$, next customer is in service phase 1)

$\mu_2 dt =$ prob(customer leaves system from service phase 2,
 $n \rightarrow n-1$, next customer is in phase 1)

Now we can write down the global balance equations as follows:

$$\mu_1 P(N,1) = \alpha_1 \lambda_1 P(N-1,1) + \lambda_2 Q(N-1,1) \quad (2.2)$$

$$\mu_2 P(N,2) = \alpha_1 \lambda_1 P(N-1,2) + \lambda_2 Q(N-1,2) \quad (2.3)$$

$$+ \theta_2 \mu_1 P(N,1)$$

$$Q(N,1) = Q(N,2) = 0$$

$$(\lambda_1 + \mu_1) P(N-1,1) = \alpha_1 \lambda_1 P(N-2,1) + \lambda_2 Q(N-2,1) \quad (2.4)$$

$$+ \mu_1 \theta_1 P(N,1) + \mu_2 P(N,2)$$

$$(\lambda_1 + \mu_2) P(N-1,2) = \alpha_1 \lambda_1 P(N-2,2) + \lambda_2 Q(N-2,2) \quad (2.5)$$

$$+ \mu_1 \theta_2 P(N-1,1)$$

$$(\lambda_2 + \mu_1) Q(N-1,1) = \alpha_2 \lambda_1 P(N-1,1) \quad (2.6)$$

$$(\lambda_2 + \mu_2) Q(N-1,2) = \alpha_2 \lambda_1 P(N-1,2) + \mu_1 \theta_2 Q(N-1,1) \quad (2.7)$$

$n=2, \dots, N-2$

$$(\lambda_1 + \mu_1) P(n, 1) = \alpha_1 \lambda_1 P(n-1, 1) + \lambda_2 Q(n-1, 1) \quad (2.8)$$

$$+ \mu_1 \theta_1 P(n+1, 1) + \mu_2 P(n+1, 2)$$

$$(\lambda_1 + \mu_2) P(n, 2) = \alpha_1 \lambda_1 P(n-1, 2) + \lambda_2 Q(n-1, 2) \quad (2.9)$$

$$+ \theta_2 \mu_1 P(n, 1)$$

$$(\lambda_2 + \mu_1) Q(n, 1) = \alpha_2 \lambda_1 P(n, 1) + \mu_1 \theta_1 Q(n+1, 1) \quad (2.10)$$

$$+ \mu_2 Q(n+1, 2)$$

$$(\lambda_2 + \mu_2) Q(n, 2) = \alpha_2 \lambda_1 P(n, 2) + \mu_1 \theta_2 Q(n, 1) \quad (2.11)$$

$$(\lambda_1 + \mu_1) P(1, 1) = \mu_1 \theta_1 P(2, 1) + \mu_2 P(2, 2) \quad (2.12)$$

$$+ \alpha_1 \lambda_1 P(0, 1) + \lambda_2 Q(0, 1)$$

$$(\lambda_1 + \mu_2) P(1, 2) = \mu_1 \theta_2 P(1, 1) \quad (2.13)$$

$$(\lambda_2 + \mu_1) Q(1, 1) = \mu_1 \theta_1 Q(2, 1) + \mu_2 Q(2, 2) \quad (2.14)$$

$$+ \alpha_2 \lambda_1 P(1, 1)$$

$$(\lambda_2 + \mu_2) Q(1, 2) = \alpha_2 \lambda_1 P(1, 2) + \mu_1 \theta_2 Q(1, 1) \quad (2.15)$$

$$\lambda_1 P(0, 1) = \mu_2 P(1, 2) + \mu_1 \theta_1 P(1, 1) \quad (2.16)$$

$$\lambda_2 Q(0, 1) = \mu_1 \theta_1 Q(1, 1) + \mu_2 Q(1, 2) + \lambda_1 \alpha_2 P(0, 1) \quad (2.17)$$

$$P(0, 2) = Q(0, 2) = 0$$

The transition probability matrix is shown in Figure 3.

Transition Probability Matrix

	$P(5,1)$	$P(5,2)$	$P(4,1)$	$P(4,2)$	$Q(4,1)$	$Q(4,2)$	$P(3,1)$	$P(3,2)$	$Q(3,1)$	$Q(3,2)$	$P(2,1)$	$P(2,2)$	$Q(2,1)$	$Q(2,2)$	$P(1,1)$	$P(1,2)$	$Q(1,1)$	$Q(1,2)$	$P(0,1)$	$Q(0,1)$
$P(5,1)$	$-\mu_1$		$\alpha_1 h_1$		h_2															
$P(5,2)$	$\mu_1 \theta_2$	$-\mu_2$		$\alpha_1 h_1$		h_2														
$P(4,1)$	$\mu_1 \theta_1$	μ_2	$-(\mu_1 \theta_2)$				$\alpha_1 h_1$		h_2											
$P(4,2)$			$\mu_1 \theta_2$	$-\mu_2$				$\alpha_1 h_1$		h_2										
$Q(4,1)$			$\alpha_2 h_1$		$-\mu_2$															
$Q(4,2)$			$\alpha_2 h_1$	$\mu_1 \theta_2$	$-\mu_2$															
$P(3,1)$			$\mu_1 \theta_1$	μ_2			$-\mu_1$				$\alpha_1 h_1$		h_2							
$P(3,2)$							$\mu_1 \theta_2$	$-\mu_2$				$\alpha_1 h_1$		h_2						
$Q(3,1)$					$\mu_1 \theta_1$	μ_2	$\alpha_2 h_1$		$-\mu_2$											
$Q(3,2)$							$\alpha_2 h_1$	$\mu_1 \theta_2$	$-\mu_2$											
$P(2,1)$							$\mu_1 \theta_1$	μ_2			$-\mu_1$				$\alpha_1 h_1$		h_2			
$P(2,2)$										$\mu_1 \theta_2$	$-\mu_2$					$\alpha_1 h_1$		h_2		
$Q(2,1)$									$\mu_1 \theta_1$	μ_2	$\alpha_2 h_1$		$-\mu_2$							
$Q(2,2)$										$\alpha_2 h_1$	$\mu_1 \theta_2$	$-\mu_2$								
$P(1,1)$										$\mu_1 \theta_1$	μ_2			$-\mu_1$					$h_1 \alpha_1$	h_2
$P(1,2)$														$\mu_1 \theta_2$	$-\mu_2$					
$Q(1,1)$											$\mu_1 \theta_1$	μ_2	$\alpha_2 h_1$		$-\mu_2$					
$Q(1,2)$														$\alpha_2 h_1$	$\mu_1 \theta_2$	$-\mu_2$				
$P(0,1)$														$\mu_1 \theta_1$	μ_2				$-\mu_1$	
$Q(0,1)$																$\mu_1 \theta_1$	μ_2	$h_1 \alpha_1$	h_2	$-\mu_2$

Fig. A2-IV: Transition probability matrix for N=5.

3. The recursive algorithm

The steady state probabilities of a homogenous Markov process are given by

$$\begin{aligned} P \cdot p &= 0 & (3.1) \\ \sum_I p_I &= 1 \end{aligned}$$

where P is the transition probability matrix and p the state vector.

The recursive algorithm follows basically the method suggested by Herzog, U., Woo, L., and Chandy, K.M. [1975].

The principle strategies of the method are:

- to determine boundary states and derive expressions for all remaining state probabilities as functions of the boundary states
- to solve a reduced system of equations for these (unknown) boundaries
- to determine all interesting state probabilities by means of the newly calculated boundaries.

The critical step is to choose the boundaries and find a recursive scheme for the remaining state probabilities. By selecting $P(N,1), P(N,2), P(N-1,1), P(N-1,2)$ as boundaries and by adding (2.8), (2.9) for $n=s$ and (2.10), (2.11) for $n=s-1$ the following recursive scheme was derived:

$$Q(N-1,1) = \frac{\alpha_2 \lambda_1}{\lambda_2 + \mu_1} \cdot P(N-1,1)$$

$$Q(N-1,2) = \frac{\alpha_2 \lambda_1}{\lambda_2 + \mu_2} \cdot P(N-1,2) + \frac{\mu_1 \theta_2}{\lambda_2 + \mu_2} \cdot Q(N-1,1)$$

For $i=N-2$ to 1 do

$$P(i,1) = \left(\frac{\lambda_1 + \mu_1}{\lambda_2} P(i+1,1) - \frac{\mu_1 \theta_1}{\lambda_2} P(i+2,1) - \frac{\mu_2}{\lambda_2} P(i+2,2) - \frac{\mu_1 \theta_1}{\lambda_2 + \mu_1} Q(i+1,1) - \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_1} Q(i+1,2) \right) / \left(\frac{\alpha_1 \lambda_1}{\lambda_2} + \frac{\alpha_2 \lambda_1}{\lambda_2 + \mu_1} \right)$$

$$Q(i,1) = \frac{\mu_1 \theta_1}{\lambda_2 + \mu_1} Q(i+1,1) + \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_1} Q(i+1,2) + \frac{\alpha_2 \lambda_1}{\lambda_2 + \mu_1} P(i,1)$$

$$P(i,2) = \left(\frac{\lambda_1 + \mu_2}{\lambda_2} P(i+1,2) - \frac{\mu_1 \theta_2}{\lambda_2} P(i+1,1) - \frac{\mu_1 \theta_2}{\lambda_2 + \mu_2} Q(i,1) \right) / \left(\frac{\alpha_1 \lambda_1}{\lambda_2} + \frac{\alpha_2 \lambda_1}{\lambda_2 + \mu_2} \right)$$

$$Q(i,2) = \frac{\alpha_2 \lambda_1}{\lambda_2 + \mu_2} P(i,2) + \frac{\mu_1 \theta_2}{\lambda_2 + \mu_2} Q(i,1)$$

end

$$P(0,1) = \frac{\mu_1 \theta_1}{\lambda_1} P(1,1) + \frac{\mu_2}{\lambda_1} P(1,2)$$

$$Q(0,1) = \frac{\mu_1 \theta_1}{\lambda_2} Q(1,1) + \frac{\mu_2}{\lambda_2} Q(1,2) + \frac{\lambda_1 \alpha_2}{\lambda_2} P(0,1)$$

The main procedure of the algorithm is now to determine coefficients $C(i,j,k,l)$; $i=1,4$; $j,k=1,2$; $l=0,N$; (i refers to boundaries, j to arrival phases, k to service phases and l to storage content), so that every state can be expressed

as a linear combination of the boundaries and these coefficients:

$$\begin{aligned}
 P(l, k) &= C(1, l, k, 1) \cdot P(N, 1) + C(2, l, k, 1) \cdot P(N, 2) \\
 &\quad + C(3, l, k, 1) \cdot P(N-1, 1) + C(4, l, k, 1) \cdot P(N-1, 2) \\
 Q(l, k) &= C(1, 2, k, 1) \cdot P(N, 1) + C(2, 2, k, 1) \cdot P(N, 2) \\
 &\quad + C(3, 2, k, 1) \cdot P(N-1, 1) + C(4, 2, k, 1) \cdot P(N-1, 2)
 \end{aligned}$$

where $l=0, \dots, N$ and $k=1, 2$.

For computing the coefficients the recursive scheme has to be calculated four times, whereby l is alternatively assigned to a boundary state and 0 to all others, i.e. $P(N, 1)=0, P(N, 2)=1, P(N-1, 1)=0, P(N-1, 2)=0$. From this run through all the coefficients $C(2, j, k, 1)$ are determined. All $C(1, j, k, 1)$ can be calculated by using $4 \cdot N - 4$ of the $4 \cdot N$ equations. The remaining 4 equations and the normalizing condition

$$\begin{aligned}
 &P(N, 1) \cdot \sum_{j, k, l} C(1, j, k, l) + P(N, 2) \cdot \sum_{j, k, l} C(2, j, k, l) \\
 + &P(N-1, 1) \cdot \sum_{j, k, l} C(3, j, k, l) + P(N-1, 2) \cdot \sum_{j, k, l} C(4, j, k, l) = 1
 \end{aligned}$$

are then utilized to calculate the four unknown boundary states. All the remaining state probabilities can now be determined with the recursive scheme and the known boundaries.

4. Numerical examples

For example, in this section we will consider a three-stage nuclear waste processing line, which is illustrated in Fischer, F, Haussmann, W. [1981]. The applied approximation procedure is described in detail in Haussmann, W. and Buzacott, J.A. [1983]. In this paper, only the increase in accuracy of the approximation procedure is demonstrated, when the blocking probabilities are calculated with a $M/M/1/N$ -queue in contrast to a diffusion approximation. For the data we also refer to the cited papers.

Altiok, T. and Stidham, S. [1982] drew attention to the fact, that literature contains different kinds of blocking definitions:

- whenever a buffer is full and the subsequent machine is busy, then the preceding machine is said to be blocked and can't start processing a workpiece.
- whenever a buffer is full and the subsequent machine is busy, the preceding machine can start processing a workpiece and is only blocked if there is no storage space after completing an item.

The last definition can be incorporated into a transfer line model by redefining what is meant by storage capacity. Hillier and Boling [1967] increased the buffer capacity by 1, so $n=N+1$ stands for blocking. In other words, they considered the machine preceding the buffer as a possible storage place.

In the following examples this definition is applied.

From Table I-III it is obvious that the approximation with the C2-model (Approx.2) improved the accuracy, especially if the squared coefficient of variation is significantly greater than 1.

This is very important, because in most applications (i.e. Fischer, F., Haussmann, W. (1981)) the scv's are large.

For a detailed interpretation of the influence of the storage capacities see Haussmann (1982).

Combining the calculation of the blocking probabilities with a diffusion process (Haussmann, W., Buzacott, J.A. (1983)) and with a C2|C2|1|N-queue, it is now possible to analyse and get insight into the behaviour of a great variety of series systems with finite buffers.

Results:

Example	Markov Model	Approx. 1	Error (%)	Approx. 2	Error (%)
2	.5515	.5319	-3.8	.5438	-1.4
3	.5856	.5675	-3.09	.5809	-0.8
4	.5515	.5350	-3.2	.5462	-0.96

Input data:

Example	A_{II}	scv_{II}^A	S_{II}	scv_{II}^S	S_{III}	scv_{III}^S	N_1	N_2
2	1.66	2.39	1.43	1.67	1.25	.96	8	8
3	1.43	1.68	1.43	1.68	1.43	1.68	8	8
4	1.25	.95	1.43	1.68	1.66	2.39	8	8

Input data:

Example	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
2	.1333	.1071	.0833	.2000	.2500	.3333
3	.1071	.1071	.1071	.2500	.2500	.2500
4	.0833	.1071	.1333	.3333	.2500	.2000

Tab. A2-IV: Through-put of a 3-stage system with non-identical machines and identical buffer sizes.

Results:

Example	Markov Model	Approx. 1	Error (%)	Approx. 2	Error (%)
7	.5582	.5430	-2.7	.5526	-1.0
8	.5856	.5675	-3.09	.5809	-0.8
9	.5582	.5431	-2.7	.5530	-0.93

Input data:

Example	A_{II}	scv_{II}^A	S_{II}	scv_{II}^S	S_{III}	scv_{III}^S	N_1	N_2
7	1.66	2.39	1.43	1.68	1.25	.96	10	6
8	1.43	1.68	1.43	1.68	1.43	1.68	8	8
9	1.25	.96	1.43	1.67	1.66	2.39	6	10

Tab. A2-V: Through-put of a 3-stage system with non-identical machines and buffer sizes.

S_i	$scv_i^{S_i}$	$N_1=N_2$	Markov	Approx. 1	Error	Approx. 2	Error
1.25	1.28	8	.7002	.6738	3.77	.6855	-2.1
-	-	12	.7247	.7070	2.44	.7135	-1.5
-	-	14	.7395	.7178	2.93	.7229	-2.2
1.25	6.4	8	.5841	.504	13.7	.5523	-5.4
-	-	12	.6078	.5486	9.74	.5845	-3.8
-	-	14	.6268	.5661	9.6	.5975	-4.6

Tab. A2-VI: Through-put of a 3-stage system with identical machines and buffer sizes.

5. References

Altiok, T. Stidham, J. /1982/, "A note on transfer lines with unreliable machines, random processing times, and finite buffers," AIIE Transactions, Juni 1982.

Fischer, F., Haussmann, W.H. /1981/, unveröffentlicht.

Haussmann, W., Buzacott, J.A. /1983/, "Analysis of a threestage production line with two finite storage buffers," Working paper Report of the University of Toronto.

Haussmann, W. /1982/, "Analyse und Modellierung von seriellen Produktionssystemen," Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-Nr. 3340.

Herzog, U., Woo, L., Chanty, K.M. /1975/, "Solution of queueing problems by a recursive technique", IBM J. Res. Develop., May 1975.

Hillier, F.S. and Boling, R.W. /1967/, "Finite queues in series with exponential or Erlang service times - a numerical approach", Operation Research, 15,2,286-303

Marie, R. /1980/, "Calculating equilibrium probabilities for $\lambda(n)/C_k^1/N$ queues," Proceedings of performance 1980, 28-30 May, Toronto.

Stewart, W., Marie, R. /1980/, "A numerical solution for the $\lambda(n) | C_k | r | N$ queue," Europ. J. Opnl. Res. 5, 56-68.

Yao, D. and Buzacott, J.A., /1982/, "A work station model for flexible manufacturing systems. Part II: The method of Coxian Phase.", Working Paper 82-26, University of Toronto, Department of Industrial Engineering.

A N H A N G

A 3

AP SIS

(Programmbeschreibung)

Ein Simulationsprogramm für die Verfügbarkeits- und
Zwischenlagerproblematik von Entsorgungsstrukturen

F. Fischer

W. Haußmann

A. Berliner

Zusammenfassung

Die Verfügbarkeit von Maschinen bzw. eines Produktionssystems ist eine der Kenngrößen, die es bei der Planung von Systemen bzw. deren Betrieb zu berücksichtigen gilt.

Es war die Aufgabe gestellt, die Systemverfügbarkeit von Entsorgungsstrukturen (z.B. einer Wiederaufarbeitungsanlage für abgebrannten Kernbrennstoffe bzw. einer Anlage zur Verfestigung und Endlagerung von MAW/LAW in untertägigen Hohlräumen) zu ermitteln. Die Systemverfügbarkeit sollte dabei in Abhängigkeit vom Betriebs- und Reparaturverhalten, den Produktionsgeschwindigkeiten und Pufferlagergrößen bestimmt werden.

Da exakte analytisch- mathematische Verfahren derart komplexe Prozesse nicht nachbilden können, wurde ein Simulationsprogramm APSIS (Availability for Processing with Interstage Storage) entwickelt, das beliebige Strukturen der Entsorgung nachbildet.

Die Programmbeschreibung zu APSIS bildet den Inhalt dieses Berichts.

I N H A L T

1. Aufgabenstellung
2. Realisierung
 - 2.1 Steuerung der Simulation
 - 2.1.1 Prinzipien
 - 2.1.2 Steuerungsmechanismus
 - 2.2 Verhalten der Elementarten
 - 2.2.1 EINGANG
 - 2.2.2 AUSGANG
 - 2.2.3 PROZESS
 - 2.2.4 PROZESS1
 - 2.2.5 LAGER
 - 2.2.6 MISCHER
 - 2.2.7 FALLROHR
 - 2.3 Zufallsverteilungen
 - 2.4 Eingabe
 - 2.4.1 Eingabeformat
 - 2.4.2 Spezifizieren eines Eingangs
 - 2.4.3 Spezifizieren eines Ausgangs
 - 2.4.4 Spezifizieren eines Prozesses
 - 2.4.5 Spezifizieren eines Lagers
 - 2.4.6 Spezifizieren eines Mischers
 - 2.4.7 Spezifizieren eines Fallrohrs
 - 2.5 Eingabebeispiel
3. Graphische Ausgabe
 - 3.1 Eingabe für Graphik
 - 3.2 Eingriff des Bedieners
 - 3.3 Darstellung
 - 3.3.1 Eingänge
 - 3.3.2 Prozesse
 - 3.3.3 Lager
 - 3.3.4 Ausgänge
4. Anhang

1. Aufgabenstellung

Ziel der Arbeit war es, ein Programm zur Simulation von Durchsatz, Betriebs- und Reparaturverhalten von Entsorgungsstrukturen (z.B. eine Wiederaufarbeitungsanlage oder eine Anlage zur Verfestigung und Endlagerung von MAW/LAW in untertägigen Hohlräumen) zu erstellen. Dabei waren folgende Vorgaben zu beachten:

1. Eine Anlage besteht aus einer Anzahl von Elementen (Ein- und Ausgängen, Prozesseinheiten, Lagern, Mischern, Fallrohren), die untereinander durch Leitungen verbunden sind.
2. In den Leitungen ist ein kontinuierlicher Fluß vorgesehen. Sie können abgeschaltet sein oder Material mit der vorgesehenen Geschwindigkeit transportieren. Eine Veränderung der Transportgeschwindigkeit ist nicht möglich.
3. Jedes Element kann beliebig viele Ein- und Ausgänge haben, ebenso können beliebig viele Eingänge in die Anlage bzw. Ausgänge aus der Anlage vorhanden sein.
4. Die Struktur der Anlage darf vom Simulationsprogramm her nicht fixiert sein, vielmehr soll sie durch die Eingabe frei wählbar sein.
5. Jedes Element der Anlage (ausser Ein- und Ausgängen) kann ausfallen und repariert werden. Das statistische Verhalten der Ausfälle und Reparaturen soll durch Eingabe wählbar sein (sowohl Verteilungsfunktion als auch Verteilungsparameter).

Ziel der Simulation ist es, aus den Parametern der einzelnen Elemente den mittleren Durchsatz durch die Gesamtanlage zu ermitteln. Hierzu sollen vom Simulationsprogramm folgende Möglichkeiten bereitgestellt werden:

6. Abgestufte, ausschaltbare Kontrollausdrucke des Simulationsablaufs.
7. Graphische Ausgabe zur Überwachung des Simulationsablaufs mit Eingriffsmöglichkeit in die Simulation.

2. Realisierung

Als Programmiersprache wurde SIMULA verwendet, da diese von allen verfügbaren Sprachen die besten Voraussetzungen für die Lösung der Aufgabe und für Wartungsfreundlichkeit der Programme bietet.

Grundlage des gesamten Systems ist eine Oberklasse ELEMENT, die die gemeinsamen Teile aller Anlagenelemente enthält. In dieser Oberklasse sind alle Komponenten enthalten, die zur Verknüpfung der Elemente und zur Steuerung des Simulationsablaufs notwendig sind.

Ausserdem enthält die Oberklasse virtuelle Spezifikationen für Prozeduren, die in allen Unterklassen gleichartige Aufgaben erfüllen, die jedoch im Detail verschiedene Funktionen haben.

2.1 Steuerung der Simulation

2.1.1 Prinzipien

Jedes Element ist nur für sich selbst verantwortlich. Zustandsentscheidungen werden nur aufgrund eigener Daten, Daten der unmittelbaren Umgebung (Leitungen der direkten Vorgänger oder Nachfolger) oder globaler Daten des Hauptprogramms (z.B. Simulationszeit) getroffen.

Es dürfen niemals von aussen Daten eines Elements verändert werden. Nur das Hauptprogramm darf bei Beginn eines Simulationslaufs die Elemente durch Aufruf der lokalen Prozedur INIT initialisieren. Der Modul EINGRIFF darf ausgewählte Daten der Elemente verändern, danach ist aber ein Neustart der Simulation erforderlich.

Ein Anstoß (REACTIVATE) eines Elements führt nur zur Neuberechnung seines Zustands, aus der Tatsache, daß es aktiviert wurde, darf das Element keine Rückschlüsse ziehen.

Das Hauptprogramm darf nur über die Funktionen NEW, STRUKT, LIST, ERGEBNIS, INIT, STAT_INIT sowie über Simulationsanweisungen (ACTIVATE, REACTIVATE, CANCEL) auf die einzelnen Elemente einwirken.

2.1.2 Steuerungsmechanismus

Ein Element enthält für jede seiner Leitungen ein Exemplar der Klasse LEITUNG. In diesen ist das Gegenstück der Leitung festgelegt, die Transportgeschwindigkeit sowie der Zustand der Leitung. Folgende Zustände sind möglich:

DISABLED : Die Leitung ist gesperrt.

ENABLED : Die Leitung ist im Prinzip arbeitsbereit. Wenn die Umgebung es zulässt wird sie arbeiten.

READY : Die Leitung wird auf jeden Fall arbeiten, wenn das Gegenstück arbeitet.

ACTIVE : Es wird Material durch die Leitung transportiert.

Für ein Element gelten nun folgende Verhaltensregeln:

- a) Ein Leitung darf nicht ACTIVE gesetzt werden, wenn das Gegenstück DISABLED ist. Die Arbeitsbereitschaft der Leitung wird in diesem Fall durch Setzen von ENABLED oder READY signalisiert.
- b) Wenn das Gegenstück einer Leitung ENABLED, READY oder ACTIVE ist, so kann die Leitung auf ACTIVE gesetzt werden. Ist das Gegenstück der Leitung nicht ACTIVE, so muß es informiert werden.
- c) Wenn das Gegenstück einer Leitung ACTIVE ist, diese Leitung aber nicht bedient werden kann (auf Grund von Störungen anderer Leitungen) so muß die Leitung DISABLED gesetzt werden und das Element, das das Gegenstück enthält muß informiert werden.

Es ergibt sich dann beispielsweise folgender Ablauf:

Gegeben sei ein Prozess mit 3 Eingängen und 3 Ausgängen. Alle Leitungen waren ENABLED geschaltet. Alle Vorgänger und zwei Nachfolger haben darauf gemäß (a) mit Setzen der Leitungen auf ACTIVE reagiert. Der dritte Nachfolger jedoch hat die Leitung DISABLED. Da ein Prozess nur arbeiten kann, wenn alle Leitungen aktiv sind, müssen nun die bereits aktiven Leitungen wieder gestoppt werden. Gemäß (c) werden also alle Eingänge und zwei Ausgänge auf DISABLED gesetzt. Der letzte Ausgang bleibt ENABLED. Die Vorgänger und zwei Nachfolger werden gemäß (c) informiert und reagieren gemäß (a) mit Setzen der Leitungen auf ENABLED oder READY.

Angenommen, der dritte Nachfolger kann nach einer gewissen Zeit arbeiten, so ergibt sich folgender Ablauf:

Der dritte Nachfolger setzt die Leitung gemäß (b) ACTIVE und informiert unseren Prozess. Alle Vorgänger und Nachfolger haben ihre Leitungen ENABLED, READY oder ACTIVE. Gemäß (b) reagiert unser Prozess mit dem Setzen aller Leitungen auf ACTIVE und er informiert alle Vorgänger und zwei Nachfolger. Diese reagieren ebenfalls gemäß (b) durch Setzen der Leitungen auf ACTIVE - die Anlage läuft.

Bild 2.1

Statischer Aufbau eines Elements

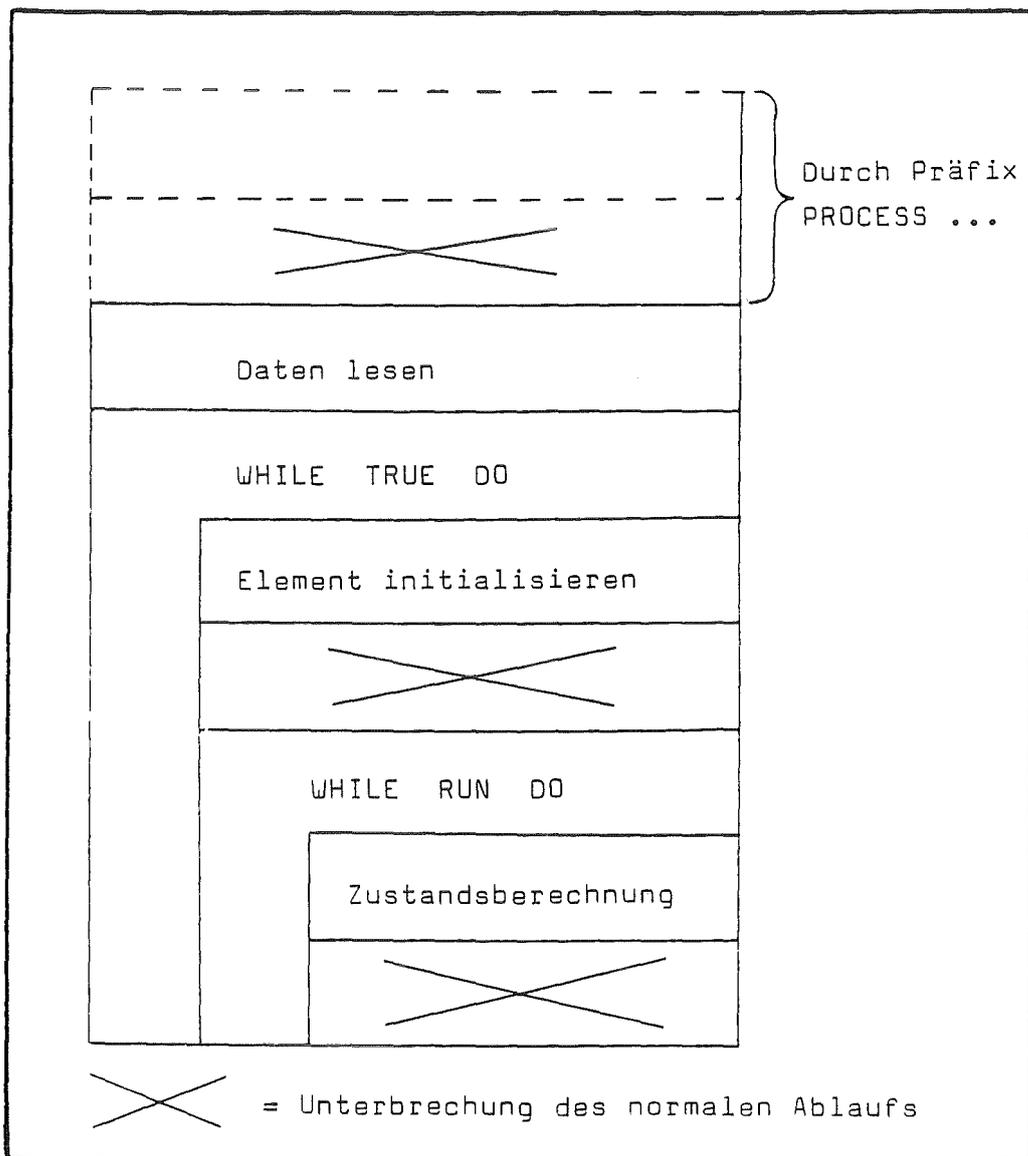
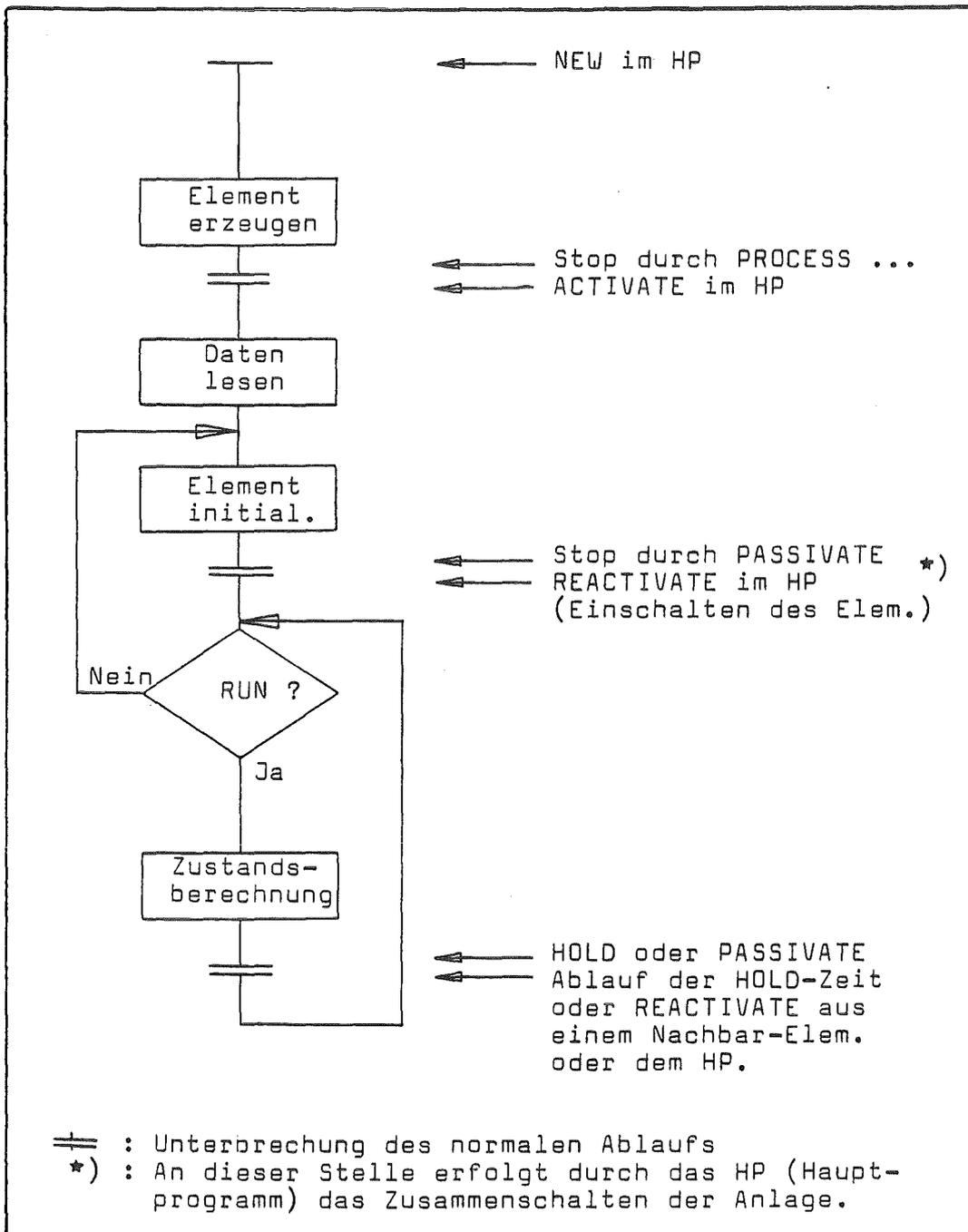


Bild 2.2

Dynamisches Verhalten eines Elements



2.2 Verhalten der Elementarten

Die hier beschriebenen Vorgänge laufen in dem Block "Zustandsberechnung" des Bildes 2.1 bzw. 2.2 ab.

2.2.1 EINGANG

Komponenten vom Typ EINGANG dienen der Versorgung der Anlage. Sie haben keine Eingangsleitungen und arbeiten ohne Ausfälle. Ihre Ausgangsleitungen sind immer geöffnet. Die abgegebenen Materialmengen werden protokolliert.

2.2.2 AUSGANG

Ausgänge dienen der Abnahme der von der Anlage erzeugten Produkte. Sie haben keine Ausgangsleitungen und arbeiten ohne Ausfälle. Ihre Eingangsleitungen sind immer geöffnet. Die empfangenen Materialmengen werden protokolliert.

2.2.3 PROZESS

Prozesse stellen die Verarbeitung von Produkten dar. Sie können nur arbeiten, wenn alle Eingangsleitungen versorgt werden und alle Ausgangsleitungen die Produkte auch abnehmen können. Die Störung eines Anschlusses hat ein Blockieren des Prozesses zur Folge. Wenn ein Prozess arbeitet, so läuft sein "Betriebsstundenzähler". Bei Erreichen der Betriebszeit (die von einem Zufallsgenerator geliefert wird) wird der Prozess ("zu Reparaturarbeiten") abgeschaltet. Nach Ablauf der Reparaturzeit, die ebenfalls von einem Zufallsgenerator geliefert wird, fordert der Prozess eine neue Betriebszeit vom Zufallsgenerator an und arbeitet weiter. Reparaturzeiten, Wartezeiten usw. werden protokolliert.

2.2.4 PROZESS1

Dieser Typ verhält sich genau wie ein PROZESS mit einer Ausnahme: Der Betriebsstundenzähler läuft auch dann, wenn PROZESS1 aufgrund von Störungen in der Umgebung gerade nicht arbeiten kann.

2.2.5 LAGER

Ein Lager dient zur Pufferung von Material um andere Komponenten voneinander zu entkoppeln. Seine Beschreibungsparameter sind: Betriebsverhalten, Reparaturverhalten, Lagerkapazität, Empfindlichkeit der Pegelschalter.

Solange ein Lager nicht voll ist, sind die Eingangsleitungen geöffnet. Mit Erreichen der Lagerkapazität werden die Leitungen geschlossen. Sinkt nun der Lagerinhalt ab, so werden mit Unterschreiten des oberen Schwellenwerts die Eingangsleitungen wieder geöffnet. Entsprechend sind die Ausgangsleitungen geöffnet, solange das Lager nicht leer ist. Bei Leerlauf werden die Leitungen geschlossen und erst bei Überschreiten des unteren Schwellenwerts wieder geöffnet. Dabei läuft immer ein Betriebsstundenzähler mit. Mit Ablauf der Betriebszeit werden alle Leitungen geschlossen und das Lager wird repariert. Während der Reparatur ändert sich der Lagerinhalt nicht. Betriebs- und Reparaturzeiten werden auch hier von einem wählbaren Zufallsgenerator geliefert. Reparaturzeiten, Lagerbestände usw. werden protokolliert.

2.2.6 MISCHER

Der Typ MISCHER stellt die Tätigkeit eines Betonmischers dar. Seine beschreibenden Parameter sind: Betriebs- und Reparaturverhalten, Eingangsmengen, Mischzeit, Maximalzeit.

Der Mischer beginnt mit dem Öffnen der Eingangsleitungen. Ist auf einer Leitung die vorgesehene Eingangsmenge angekommen, so wird diese Leitung geschlossen. Sind alle Leitungen geschlossen, so beginnt der Mischvorgang und der Betriebsstundenzähler läuft. Ist die Betriebszeit abgelaufen, so wird der Mischer angehalten und repariert. Nach Ablauf der vorgesehenen Mischzeit wird die (eine) Ausgangsleitung geöffnet und das Produkt wird ausgegeben. Nach vollständiger Entleerung des Mixers folgt nun noch ein Spülgang um den Mischer zu reinigen. Danach werden die Eingänge wieder geöffnet.

Dieser ganze Zyklus muß innerhalb der vorgesehenen Maximalzeit durchlaufen werden, um zu verhindern, daß das Material im Mischer erhärtet. Sobald feststeht, daß der Zeitrahmen nicht eingehalten werden kann, wird der Inhalt des Mixers "weggeworfen". Dies geschieht mit der gleichen Geschwindigkeit wie bei der Ausgabe auf die Ausgangsleitung. Danach folgt ein Spülgang und der Mischer beginnt wieder von vorne.

Reparaturzeiten, Durchsatz, weggeworfene Materialmengen usw werden protokolliert.

2.2.7 FALLROHR

Das Fallrohr ist ein Modell für ein Rohr, mit dem Material in unterirdische Kavernen transportiert werden kann.

Beschreibende Parameter: Schmierzeit, Standzeit, Spülzeit. Ein Fallrohr hat einen Eingang und einen Ausgang. Wenn die dort angeschlossenen Komponenten bereit sind, wird das Rohr geschmiert (um einen reibungslosen Materialtransport zu gewährleisten). Nach Ablauf der Schmierzeit beginnt der Materialtransport. Der Betriebsstundenzähler läuft ebenfalls. Bei einer Unterbrechung des Transports, die länger als die vorgesehene Standzeit dauert, muß das Rohr gereinigt (Spülzeit) und danach wieder geschmiert werden.

2.3 Zufallsverteilungen

Zur Realisierung der benötigten Zufallsverteilungen wurden die in SIMULA eingebauten Generatoren verwendet. Diese konnten jedoch nicht direkt angesprochen werden; da die Zuordnung einer Verteilung zu einem Element erst zur Laufzeit des Simulationsprogramms erfolgen sollte. Um dies zu ermöglichen, musste jede Zufallsfunktion in eine Klasse eingebunden werden. Alle diese Klassen wurden unter der Oberklasse VF zusammengefasst. Die Unterklassen haben nun folgende Funktion:

- Bereitstellen der Zufallsverteilung unter dem Namen VERTEILUNG,
- Lesen der zur Verteilung gehörenden Parameter,
- Generieren einer Anfangszufallszahl U aus der globalen Zufallszahl UU.
- Ausdrucken des Verteilungsnamens, der Parameter und der Zufallszahl (hierzu kann die Prozedur INOUT) verwendet werden.

Beispiel:

```
REF (VF) V;
```

Der Aufruf

```
V := NEW NEGEXPV;
```

erzeugt einen Verbund, der

- eine negative Exponentialverteilung enthält,
- eine reelle Zahl A liest,
- eine Anfangszufallszahl U generiert,
- den Text "NEGEXP(A,U);" (mit den entsprechenden Werten für A und U) ausdrückt.

Jeder Aufruf

```
R := V.VERTEILUNG;
```

weist der reellen Variablen R eine neue Zufallszahl, negativ exponentiell verteilt mit dem Mittelwert $1/A$ zu.

Zur Zeit sind folgende Zufallsgeneratoren eingebaut:

- ZUVERLAESSIG : Liefert bei Aufruf den Wert 'unendlich'.
- KONSTANT(a) : Liefert konstant den Wert a.
- NEGEXP(a) : Liefert negativ exponentiell verteilte Werte mit dem Mittelwert $1/a$.
- NORMAL(a,b) : Liefert normalverteilte Werte mit dem Mittelwert a und der Standardabweichung b.
- ERLANG(a,b) : Liefert Werte gemäß der Erlang-Verteilung mit dem Mittelwert $1/a$ und Standardabweichung $1/(a*\sqrt{b})$.
- POISSON(a) : Liefert Werte gemäß der Poisson-Verteilung mit dem Parameter a.
- UNIFORM(a,b) : Liefert gleichmässig verteilte Werte im Intervall (a,b).

2.4 Eingabe

Die Eingabe für APSIS sollte folgende Forderungen erfüllen:

- hohe Flexibilität,
- geringer Programmieraufwand,
- Eingabedatei gut strukturiert und durch (Kommentar-) Texte zwischen den Zahlen gut lesbar.

Die erste Forderung ergibt sich aus dem flexiblen Aufbau des ganzen Programms. Die Konsequenz ist aber leider eine Zerstückelung und Streuung der lesenden Programmteile auf das ganze Simulationsprogramm.

Eine Zusammenfassung der Eingabe war nur insoweit möglich, als jedes Programmteil alle für sich relevanten Daten selbst liest (z.B. liest ein Element seine Vorgänger/Nachfolger, ein Lager seine Kapazität, eine Verteilung seine Parameter usw). Eine weitergehende Zusammenfassung war nicht möglich, da Anzahl und Bedeutung sehr vieler Daten der Eingabe erst nach Auswertung der vorangegangenen Daten bekannt ist. Beispielsweise kann erst nach Lesen des Namens einer Verteilungsfunktion (und auch nur durch die Funktion selbst) Anzahl und Bedeutung der Parameter entschieden werden.

Die zweite und dritte Forderung wird durch die Konstruktion eigener Leseprogramme erfüllt:

NEXTINT : Lesen der nächsten INTEGER-Zahl,
NEXTREAL: Lesen der nächsten REAL-Zahl,
NEXTWORD: Lesen des nächsten Wortes,
SEMIC : Lesen bis zum Schlußzeichen ";".

Dabei gilt:

Eine Zahl beginnt mit Vorzeichen oder Ziffer. Alle bis dorthin aufgetretenen Buchstaben und Sonderzeichen werden als Kommentar betrachtet und überlesen.

Ein Wort besteht aus maximal 18 Buchstaben und Ziffern. Es beginnt mit einem Buchstaben. Es endet mit einem Leerzeichen oder einem Sonderzeichen. Alle bis zum ersten Buchstaben gefundenen Sonderzeichen und Ziffern werden überlesen.

Durch die Verwendung dieser Eingabeprogramme werden alle kommentierenden Texte überlesen. Nur der wesentliche Teil der Eingabe gelangt in das Simulationsprogramm.

Nachteil: Da die Bedeutung einer Zahl nur aus ihrer Position in der Eingabedatei geschlossen wird, können sich leicht Fehler einschleichen. Ein Vergleich zwischen Eingabe und vom Programm verstandener Information (wird ausgedruckt) ist unbedingt erforderlich!

2.4.1 Eingabeformat

Zur Notation:

Worte, die so in die Eingabedatei geschrieben werden, sind in den folgenden Schemata groß geschrieben.

Syntaktische Variable sind klein geschrieben, ihre Bedeutung wird anschließend an das Schema erklärt.

Nicht unterstrichen sind Worte, die reine Kommentarfunktion haben, Gestrichelt unterstrichen sind Worte, die auch nur Kommentarfunktion haben, die aber nur durch genau ein anderes Wort ersetzt werden dürfen.

Durchgezogen unterstrichen sind Worte, Sonderzeichen und syntaktische Variable, die in der angegebenen Bedeutung verwendet werden müssen.

Die Eingabedatei hat folgendes Aussehen:

```
SIMULIERE: i1 ELEMENTE, ZUFALLSZAHL = i2 ;
```

```
< i1 Elementspezifikationen >
```

```
i3 SIMUALTIONSLAEUFE UEBER r1 ZEITEINHEITEN ;  
monitor, list, plot ;
```

```
< wenn plot=PLOT: Eingabe für Graphik (siehe 3.1) >
```

Dabei bedeuten:

i1, i2 : Integerzahlen.

r1 : eine reelle Zahl.

monitor : Das Wort MONITOR wenn ein Simulationsablaufprotokoll gewünscht wird, sonst NOMONITOR.

list : Das Wort LIST wenn die Ergebnisse der einzelnen Simulationsläufe gelistet werden sollen, sonst NOLIST.

plot : Wenn graphische Ausgabe gewünscht wird, sonst NOPLOT.

2.4.2 Spezifizieren eines Eingangs

```
EINGANG name : i1 AUSGAENGE ;  
                AUSGAENGE : id1 ( r1 ), id2 ( r2 ), ... ;  
                        +-----i1 Stück-----+
```

Dabei bedeuten:

i1 : Anzahl der Ausgangsleitungen.
id1,id2..: Namen der Elemente an den Ausgangsleitungen.
r1,r2.. : Geschwindigkeiten auf den Leitungen.

2.4.3 Spezifizieren eines Ausgangs

```
AUSGANG name : i1 EINGAENGE ;  
                EINGAENGE : id1 ( r1 ), id2 ( r2 ), ... ;  
                        +-----i1 Stück-----+
```

Dabei bedeuten:

i1 : Anzahl der Eingangsleitungen.
id1,id2..: Namen der Elemente an den Eingangsleitungen.
r1,r2.. : Geschwindigkeiten auf den Leitungen.

2.4.4 Spezifizieren eines Prozesses

```
PROZESS name : i1 EINGAENGE, i2 AUSGAENGE ;  
                EINGAENGE : id1 ( r1 ), id2 ( r2 ), ... ;  
                        +-----i1 Stück-----+  
                AUSGAENGE : id3 ( r3 ), id4 ( r4 ), ... ;  
                        +-----i2 Stück-----+  
                BETRIEBSVERTEILUNG = vname1( vparam1,... ) ;  
                <nur wenn vname1 =/ ZUVERLAESSIG :  
                REPARATURVERTEILUNG= vname2( vparam2,... ) ; >
```

Dabei bedeuten:

*i*1 : Anzahl der Eingangsleitungen.
*i*2 : Anzahl der Ausgangsleitungen.
*id*1,*id*2..: Namen der Elemente an den Eingangsleitungen.
*r*1,*r*2.. : Geschwindigkeiten auf den Eingangsleitungen.
*id*3,*id*4..: Namen der Elemente an den Ausgangsleitungen.
*r*3,*r*4.. : Geschwindigkeiten auf den Ausgangsleitungen.
*vname*1 : Name der Betriebsverteilungsfunktion.
*vparam*1..: Wert(e) der Parameter der Betriebsverteilung.
*vname*2 : Name der Reparaturverteilungsfunktion.
*vparam*2..: Wert(e) der Parameter der Reparaturverteilung.

2.4.5 Spezifizieren eines Lagers

```
LAGER name : i1 EINGAENGE, i2 AUSGAENGE ;  
                EINGAENGE : id1 ( r1 ), id2 ( r2 ), ... ;  
                +-----i1 Stück-----+  
                AUSGAENGE : id3 ( r3 ), id4 ( r4 ), ... ;  
                +-----i2 Stück-----+  
                KAPAZITAET = r5, MIN = i3 %, MAX = i4 %,   
                ANFANGSINHALT = r6 %;  
                BETRIEBSVERTEILUNG = vname1( vparam1,... ) ;  
                <nur wenn vname1 =/ ZUVERLAESSIG :  
                REPARATURVERTEILUNG= vname2( vparam2,... ) ; >
```

Dabei bedeuten:

- i1 : Anzahl der Eingangsleitungen.
- i2 : Anzahl der Ausgangsleitungen.
- id1,id2..: Namen der Elemente an den Eingangsleitungen.
- r1,r2.. : Geschwindigkeiten auf den Eingangsleitungen.
- id3,id4..: Namen der Elemente an den Ausgangsleitungen.
- r3,r4.. : Geschwindigkeiten auf den Ausgangsleitungen.
- r5 : Kapazitaet des Lagers in Mengeneinheiten.
- i3 : Untere Schaltschwelle in Prozent der Kapazität.
- i4 : Obere Schaltschwelle in Prozent der Kapazität.
- r6 : Anfangsinhalt des Lagers in Prozent der Kapazität.
- vname1 : Name der Betriebsverteilungsfunktion.
- vparam1..: Wert(e) der Parameter der Betriebsverteilung.
- vname2 : Name der Reparaturverteilungsfunktion.
- vparam2..: Wert(e) der Parameter der Reparaturverteilung.

2.4.6 Spezifizieren eines Mischers

```
MISCHER name : i1 EINGAENGE;  
                EINGAENGE : id1 ( r1 ), id2 ( r2 ), ... ;  
                    +-----i1 Stück-----+  
                AUSGANG   : id3 ( r3 );  
                MENGEN = r5, r6,...  
                    +- i1 Stück -+  
                MISCHZEIT= r7, SPUELZEIT= r8, VERWEILZEIT= r9 ;  
                BETRIEBSVERTEILUNG = vname1( vparam1,... ) ;  
                <nur wenn vname1 =/ ZUVERLAESSIG :  
                REPARATURVERTEILUNG= vname2( vparam2,... ) ; >
```

Dabei bedeuten:

i1 : Anzahl der Eingangsleitungen.
id1,id2.. : Namen der Elemente an den Eingangsleitungen.
r1,r2.. : Geschwindigkeiten auf den Eingangsleitungen.
id3 : Name des Elements an der Ausgangsleitung.
r3 : Geschwindigkeit auf der Ausgangsleitung.
r5,r6.. : Abnahmemenge je Eingangsleitung für eine Füllung.
r7 : Notwendige Mischzeit.
r8 : Dauer eines Spuelvorgangs.
r9 : Maximalzeit vom Beginn der Füllung bis Ende der Leerung.
vname1 : Name der Betriebsverteilungsfunktion.
vparam1.. : Wert(e) der Parameter der Betriebsverteilung.
vname2 : Name der Reparaturverteilungsfunktion.
vparam2.. : Wert(e) der Parameter der Reparaturverteilung.

2.4.7 Spezifizieren eines Fallrohrs

```
FALLROHR name ;  
    EINGANG : id1 ( r1 ) ;  
    AUSGANG : id2 ( r2 );  
    SCHMIERZEIT= r3, SPUELZEIT= r4, STANDZEIT= r5 ;  
    BETRIEBSVERTEILUNG = vname1( vparam1,... ) ;  
    <nur wenn vname1 =/ ZUVERLAESSIG :  
    REPARATURVERTEILUNG= vname2( vparam2,... ) ; >
```

Dabei bedeuten:

id1 : Name des Elements an der Eingangsleitung.
r1 : Geschwindigkeiten auf der Eingangsleitung.
id2 : Name des Elements an der Ausgangsleitung.
r2 : Geschwindigkeit auf der Ausgangsleitung.
r3 : Dauer des Schmiervorgangs.
r4 : Dauer eines Spuelvorgangs.
r5 : Maximalzeit eines Stillstands bevor gereinigt wird.
vname1 : Name der Betriebsverteilungsfunktion.
vparam1.. : Wert(e) der Parameter der Betriebsverteilung.
vname2 : Name der Reparaturverteilungsfunktion.
vparam2.. : Wert(e) der Parameter der Reparaturverteilung.

2.5 Eingabebeispiel

SIMULIERE 5 ELEMENTE, ZUFALLSZAHL=324567;

EINGANG E : 1 AUSGANG;
AUSGANG: P1(8);

PROZESS P1: 1 EINGANG, 1 AUSGANG;
EINGANG: E(8);
AUSGANG: L1(8);
BVF: NEGEXP(1.25);
RVF: NEGEXP(5);

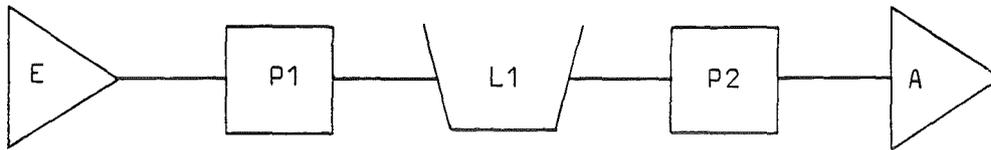
LAGER L1: 1 EINGANG, 1 AUSGANG;
EINGANG: P1(8);
AUSGANG: P2(8);
KAP= 1.6, MIN=10%, MAX=90%, ANF=0;
BVF: ZUVERLAESSIG;

PROZESS P2: 1 EINGANG, 1 AUSGANG;
EINGANG: L1(8);
AUSGANG: A(8);
BVF: NEGEXP(1.25);
RVF: NEGEXP(5);

AUSGANG A : 1 EINGANG;
EINGANG: P2(8);

10 SIMULATIONS-LAEUFE UEBER 1000 ZEITEINHEITEN;
NOMONITOR, NOLIST, NOPLOT;

Durch diese Eingabe wird folgende Anlage simuliert:



In allen Leitungen der Anlage fließen 8 ME/ZE (Mengeinheiten/Zeiteinheit). Beide Prozesse haben eine mittlere Betriebszeit von 0.8 Zeiteinheiten und eine mittlere Reparaturzeit von 0.2 Zeiteinheiten, exponentiell verteilt. Das Lager hat eine Kapazität von 2 ME. Es öffnet die Ausgangsleitung ab 0.2 ME Inhalt und schließt die Eingangsleitung bei 1.8 ME Inhalt. Es arbeitet ohne Ausfälle. Bei Simulationsstart ist es leer.

Es soll eine Statistik über 10 Simulationsläufe erstellt werden. Dabei beginnt jeder Lauf mit den Anfangsbedingungen und endet zum Zeitpunkt 1000 ZE. Es soll nur das Endergebnis gedruckt werden.

ENDERGEBNIS AUS 10 LAEUFEN UEBER JE 1000.00 ZEITEINHEITEN :

EINGANG E:

DURCHSATZ	:	5.68 ME/ZE	VARIANZ:	0.94 %
AUSLASTUNG	:	70.94 %	VARIANZ:	0.95 %

PROZESS P1:

REPARATURZEIT	:	17.76 %	VARIANZ:	1.80 %
MITTL. REP. ZEIT:		0.20 ZE	VARIANZ:	2.75 %
WARTEZEIT	:	11.28 %	VARIANZ:	4.17 %
WARTEN AUF EIN:		0.00 %	VARIANZ:	0.00 %
WARTEN AUF AUS:		11.28 %	VARIANZ:	4.17 %
INTAKT-ZEIT	:	82.24 %	VARIANZ:	0.42 %

LAGER L1:

REPARATURZEIT	:	0.00 %	VARIANZ:	0.00 %
MITTL. REP. ZEIT:		0.00 ZE	VARIANZ:	0.00 %
ERSTER LEERL.	:	0.89	VARIANZ:	124.32 %
ERSTER UEBERL.:		2.97	VARIANZ:	80.35 %
LEERLAEUFE	:	522.90	VARIANZ:	3.04 %
UEBERLAEUFE	:	510.30	VARIANZ:	3.03 %
DELTA_T (LEER):		1.91 ZE	VARIANZ:	3.04 %
DELTA_T (VOLL):		1.96 ZE	VARIANZ:	2.98 %
MITTLERER INH.:		48.86 %	VARIANZ:	2.29 %
INTAKT-ZEIT	:	100.00 %	VARIANZ:	0.12 %

PROZESS P2:

REPARATURZEIT	:	17.19 %	VARIANZ:	2.73 %
MITTL. REP. ZEIT:		0.20 ZE	VARIANZ:	3.78 %
WARTEZEIT	:	11.87 %	VARIANZ:	3.63 %
WARTEN AUF EIN:		11.87 %	VARIANZ:	3.63 %
WARTEN AUF AUS:		0.00 %	VARIANZ:	0.00 %
INTAKT-ZEIT	:	82.81 %	VARIANZ:	0.60 %

AUSGANG A:

DURCHSATZ	:	5.67 ME/ZE	VARIANZ:	0.95 %
AUSLASTUNG	:	70.93 %	VARIANZ:	0.95 %

3. Graphische Ausgabe

APSYS enthält als zusätzliche Ausgabemöglichkeit einen Graphikteil. Dieser stellt die Anlage auf einem graphischen Bildschirm dar und zeigt die Veränderungen während der Simulation.

Durch Bediener-Eingriff können die wichtigsten Anlagenparameter verändert werden. Die Wirkung dieser Änderungen kann sofort am Bildschirm betrachtet werden.

Zur graphischen Darstellung wird das Programmsystem UNILOT auf einem Vektor-Refresh-Bildschirm verwendet. Die Darstellung enthält die statistischen Daten der einzelnen Anlagenkomponenten in Form von Linien, die in der Höhe verändert werden. Bei einer Unterbrechung der Simulation, bei der der Bediener Parameter der Anlage verändert, werden die statistischen Daten zurückgesetzt.

3.1 Eingabe für Graphik:

Bei graphischer Ausgabe müssen noch folgende Werte in die Eingabedatei aufgenommen werden:

PLOT-UNIT = plot-unit; INT-TIME = int-time; PLT-TIME = plt-time;

id: (x , y); <für jedes Element>

Dabei bedeutet:

plot-unit : Die Gerätenummer des Graphik-Bildschirms
(z.Z. ADAGE : 58).

int-time : Die Zeit zwischen zwei Simulationsunterbrechungen (Eingriffsmöglichkeiten).

plt-time : Zeitabstand in dem die statistischen Werte graphisch dargestellt werden.

id : Elementname wie in (2.3.2).
x, y : Gewünschte Position des Elements auf dem Bildschirm (in cm von der linken unteren Ecke).

Für jedes Element muß so eine Position definiert werden. Die Elemente sind in der gleichen Reihenfolge anzugeben, wie die der Anlagendefinition (siehe 2.3.2).

3.2 Eingriff des Bedieners

Nach dem Start der Simulation wird die Anlage auf den Bildschirm gezeichnet. Jeweils nach Ablauf von plt-time Zeiteinheiten werden die neuesten statistischen Werte in die Graphik übertragen. Jeweils nach int time Zeiteinheiten wird die Simulation unterbrochen. Der Bediener hat nun folgende Eingabemöglichkeiten:

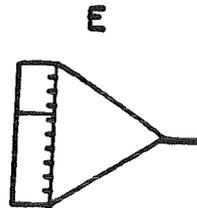
INT-TIME = real; <Interrupt-Zeit verstellen>
PLT-TIME = real; <Plot-Zeit verstellen>
id : KAP = real; <Lagerkapazität verändern>
id : BVF = vname (vpar,...);
<Betriebsverteilung neu definieren,
Notation wie in der Anlagenbeschreibung>
id : RVF = vname (vpar,...);
<Reparaturverteilung neu definieren,
Notation wie in der Anlagenbeschreibung>
RETURN-Taste : <Simulation fortsetzen>

Beispiel:

INT-TIME = 1000;
PLT-TIME = 150;
L1: KAP=2.5;
<RETURN>

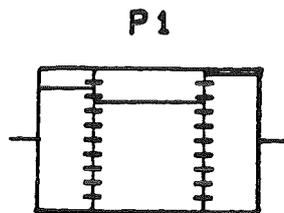
3.3 Darstellung

3.3.1 Eingänge



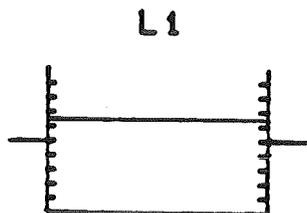
Die Linie stellt die Abnahmequote der nachfolgenden Elemente aus dem Eingang dar.

3.3.2 Prozesse



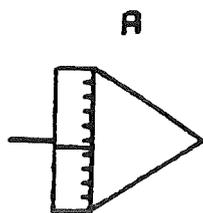
Die beiden äußeren Linien stellen die Verfügbarkeit der Ein- und Ausgänge (Versorgung durch Vorgänger, Abnahme durch Nachfolger) dar. Die mittlere Linie zeigt die Einsatzbereitschaft des Prozesses (BVF/RVF);

3.3.3 Lager



Die Linie zeigt den mittleren Lagerinhalt (in Prozent der Kapazität).

3.3.4 Ausgänge



Die Linie zeigt die Versorgung des Ausgang durch die vorangehenden Komponenten.

Anhang

Die wichtigsten im Programm verwendeten Namen.

Name	Typ	Bedeutung
ALLNINP	BOOLEAN PROCEDURE	Alle Nachfolger Input-Ready?
ALLVOUT	BOOLEAN PROCEDURE	Alle Vorgänger Output-Ready?
ANFBESTAND	REAL	Anfangsbestand des Lagers in ME
ASPEED	REAL ARRAY	Ausgabegeschwindigkeiten
AUSFALL	PROCEDURE	Ausschalten eines Elem. während der Reparatur
BETRIEB	REF(VF)	Betriebsverteilungsfkt. des Elem.
BTZEIT	REAL	Summe der Betriebszeiten
BZEIT	REAL	Bis zur Rep. verbleibende Zeit
DEFEKT	BOOLEAN PROCEDURE	Element ausgefallen ?
DELTA_T	REAL	Zeit seit der letzten Aktivität
DELTA_T_LEER	REAL	$\sum (t_{leer_i} - t_{leer_{i-1}})$
DELTA_T_VOLL	REAL	$\sum (t_{voll_i} - t_{voll_{i-1}})$
DURCHSATZ	REAL	Seit Anlagenstart durchges. Menge
ELEM	REF(ELEMENT)ARRAY	Enthält die Elemente der Anlage
ELEMENT_ID	PROCEDURE	Ausdrucken des Elementnamens
END_ERG	PROCEDURE	Ausdrucken der Statistik e.Größe
ERGEBNIS	PROCEDURE	Ausdrucken der Statistik e.Elem.
ESPEED	REAL ARRAY	Eingabegeschwindigkeiten
FUELLTEMPO	REAL PROCEDURE	Füllungsgeschwindigkeit e. Lagers
ID	TEXT	Name eines Elements
INFORMIERE	PROCEDURE	Anstoßen aller Elemente der unmitt. Umgeb., die von einer Zustandsänderung betroffen sind.
INHALT	REAL	Aktueller Inhalt eines Lagers
INIT	PROCEDURE	Initialisieren eines Elements
INPUT	BOOLEAN	Schalter: Input-Ready/Not Ready
KAPAZITAET	REAL	Fassungsvermögen des Lagers in ME
LAST_LEER	REAL	Zeitpunkt letzter Leerlauf
LAST_VOLL	REAL	Zeitpunkt letzter Überlauf
LASTEV	REAL	Zeitpunkt letzter Aktivität
LASTINP	BOOLEAN	Letzter Wert von 'INPUT'
LASTOUT	BOOLEAN	Letzter Wert von 'OUTPUT'
LEER	BOOLEAN PROCEDURE	Lager leer ?
LIST	PROCEDURE	Zwischenerg.drucken,Zw.summen bilden
LISTE	BOOLEAN	Zwischenergebnis drucken ?
LS	BOOLEAN	Leer-Schalter des Lagers

Name	Typ	Bedeutung
M_INHALT	REAL	Mittlerer Inhalt des Lagers
MAXI	REAL	Schaltpunkt des Voll-Schalters
MINI	REAL	Schaltpunkt des Leer-Schalters
MONITOR	BOOLEAN	Ablaufinfo drucken ?
N_AUS	INTEGER	Anzahl der Ausgänge eines Elem.
N_EIN	INTEGER	Anzahl der Eingänge eines Elem.
N_ELEM	INTEGER	Anzahl der Elemente der Anlage
N_LEER	INTEGER	Anzahl der Leerläufe des Lagers
N_VOLL	INTEGER	Anzahl der Überläufe des Lagers
NACHF	REF(ELEMENT)ARRAY	Nachfolger des Elements
NACHF_ID	TEXT ARRAY	Namen der Nachfolger
NEXTINT	INTEGER PROCEDURE	Lesen der nächsten ganzen Zahl
NEXTREAL	REAL PROCEDURE	Lesen der nächsten reellen Zahl
NEXTWORD	TEXT PROCEDURE	Lesen des nächsten Wortes
NREP	INTEGER	Anzahl der Defekte des Elements
PLT	BOOLEAN	Schalter: Plot Ein/Aus
READELEM	PROCEDURE	Lesen der Strukturinfo e. Elem.
READLAGER	PROCEDURE	Lesen der Lagergrößen
READVERTEILU	PROCEDURE	Lesen der Bvf und Rvf
REPANF	REAL	Zeitpunkt des Rep.beginns
REPARATUR	REF(VF)	Reparaturverteilungsfkt.
RPZEIT	REAL	Summe der Reparaturzeiten
RUN	BOOLEAN	Schalter: Anlage Ein/Aus
RZEIT	REAL	Momentan verbleibende Repzeit.
SEMIC	PROCEDURE	Liest bis zum Semikolon
SIMANF	REAL	Zeitpunkt des Anlagenstarts
SIMANZ	INTEGER	Anzahl der Läufe
SIMZEIT	REAL	Dauer eines Laufs
SPEED	REAL	Aktuelle Füllgeschw. e. Lagers
STATUS	PROCEDURE	Drucken des Elementzustands
STRUKT	PROCEDURE	Knüpfen der Anlagenstruktur
T_LEER	REAL	Zeitpunkt erster Leerlauf
T_VOLL	REAL	Zeitpunkt erster Überlauf
VERTEILUNG	REAL PROCEDURE	Berechnungsfkt. e. VF-CLASS
VERTFKT	REF(VF)PROCEDURE	Erzeugen einer Verteilungsfkt
VOLL	BOOLEAN PROCEDURE	Lager voll ?
VORG	REF(ELEMENT)ARRAY	Vorgänger eines Elements
VORG_ID	TEXT ARRAY	Namen der Vorgänger
VS	BOOLEAN	Voll-Schalter eines Lagers

Name	Typ	Bedeutung
WARTEAUF	PROCEDURE	Reaktivierung eines Lagers bei Erreichen einer bestimmten Füllung
WAZEIT	REAL	Wartezeit auf Ausgabe
WEZEIT	REAL	Wartezeit auf Eingabe
WZEIT	REAL	Gesamtwartezeit
ZW_ERG	PROCEDURE	Zwischenerg, -summe einer Größe

In den mit dem Präfix 'S_' bzw. 'S2_' versehenen Variablen werden (durch die Prozedur 'ZW_ERG') Summe bzw. Summe über die Quadrate der zugehörigen Variable gebildet.

Z.B. gilt :

$$S_AUSFALL = \sum AUSFALL$$
$$S2_AUSFALL = \sum AUSFALL^2$$