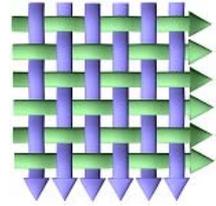


SFB 559 – Teilprojekt A 11,  
Universität Dortmund

Sonderforschungsbereich 559  
**Modellierung großer  
Netze in der Logistik**



Technical Report 03009  
SFB 559 – Teilprojekt A 11  
ISSN 1612-1376

## **Modellansatz zur Ermittlung der Verfügbarkeit von Redistributionsnetzen**

Markus Ohlbrecht

<b>1. EINFÜHRUNG</b>	<b>3</b>
<b>2. ZUVERLÄSSIGKEITSANALYSE</b>	<b>5</b>
<b>3. ZUSTANDSÄNDERUNGSMODELL FÜR MTV-SYSTEME</b>	<b>8</b>
<b>4. KONKRETISIERUNG DER FEHLERARTEN</b>	<b>19</b>
<b>5. ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>21</b>
<b>6. LITERATUR</b>	<b>22</b>

## 1. Einführung

Die Steuerung von industriellen Logistiksystemen lässt sich durch das Ebenen-Modell nach /FIR00/ beschreiben. Demnach sind die taktische Ebene und die Managementebene von herausragender Bedeutung.

Die taktische Ebene plant, steuert und überwacht die operativen Tätigkeiten wie Umschlagen, Fördern, Lagern etc. auf der physischen Materialflussebene und nimmt somit die dispositiven Aufgaben der Logistik wahr. Demgegenüber werden die Aufgaben von eher strategischer Relevanz, wie z.B. die vom eigentlichen Tagesgeschäft weitgehend entkoppelte Planung der Distributionsstruktur (Lagerstandort- und Layoutplanung), die Festlegung der Lieferantenstruktur oder die Festlegung geeigneter Bevorratungsebenen in Abstimmung mit der Wahl der Fertigungstiefe auf der Managementebene angesiedelt.

Grundsätzlich ist den sich weiter verschärfenden Rahmenbedingungen durch konsequente Kundenorientierung Rechnung zu tragen. Die Ausrichtung der Logistik am Material- und Informationsfluss bedingt implizit die prozessorientierte Gestaltung der vorwiegend dispositiven Prozesse auf der taktischen Ebene.

Betrachtet man die Ausrichtung industrieller Logistik, so lässt sich folgendes feststellen:

Die stochastische Nachfrage vieler differenzierter Kunden impliziert zwar eine wesentlich geringere Vorhersehbarkeit der Nachfrage, trotzdem ist ein hoher Lieferservice wirtschaftlich – und damit bestandsarm – sicherzustellen. Die Anforderung nach Beherrschung der Variantenvielfalt auf Teile-, Baugruppen- und Enderzeugnisebene zwingt zur Sicherstellung einer hohen Flexibilität des gesamten Produktionssystems. In der Summe sehen sich produzierende Unternehmen einer zunehmenden Konkurrenz aufgrund der sich immer stärker angleichenden Produkte mit ähnlichem Preis- und Qualitätsniveau ausgesetzt.

Zur Differenzierung vom Wettbewerb ist unter der Prämisse, dass Qualität und Preis als grundsätzliche Anforderungen erfüllt sein müssen, im wesentlichen die Logistikleistung geeignet, die weiter gesteigert werden kann und somit eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit ermöglicht.

Im Allgemeinen besteht die Logistikleistung aus den Komponenten

- Lieferzeit,
- Lieferfähigkeit,
- Liefertreue,

- Lieferqualität und
- Lieferflexibilität.

In einer einfachen Lieferanten – Kunden – Beziehung sind die optimalen Erfüllungen dieser Komponenten in Verbindung mit einem effektiven Informationsfluß u.U. als wettbewerbsentscheidende Faktoren anzusehen. Dies gilt gleichfalls für Mehrwegsysteme.

Umweltfreundliche Mehrweggebinde können jedoch nur dann wirtschaftlich sein, wenn durch Sortieren, Rücktransport usw. kein erheblicher Mehraufwand entsteht. Eine Möglichkeit, dass Mehrweggebinde wirtschaftlich werden, ist mit der Rückführung durch einen Dienstleister gegeben. Er übernimmt die Aufgabe, das Leergut abzuholen, zu reinigen, instandzuhalten und zurückzuführen. Den Bedarf an Mehrweggebinden deckt er aus einem Depot und schließt damit den Kreislauf zwischen Lieferant und Kunden.

Im einfachsten Falle handelt es sich bei Mehrwegsystemen demnach um einen geschlossenen Kreislauf von Mehrwegtransportverpackungen zwischen mehreren Kunden als Systemteilnehmern und einem Systembetreiber. Hier ist die Erfüllung der oben genannten Komponenten der Logistikleistung durch jeden Teilnehmer entscheidend für die Leistungsfähigkeit des gesamten Systems. Dem Systembetreiber kommt dabei die entscheidende Aufgabe zu, für die Leistungsfähigkeit des Systems sorgen.

Das langfristige Ziel des Teilprojekts A11 des Sonderforschungsbereiches SFB 559 besteht in der Erforschung von Redistributionsnetzen von Mehrwegtransportverpackungen (MTV). Auf der Grundlage einer verbesserten Kenntnis des dynamischen Eigenverhaltens sollen die Gesetzmäßigkeiten eines optimalen Betriebs von Mehrwegsystemen ermittelt und zu Dimensionierungsregeln verdichtet werden. Dabei wurden in der ersten Bearbeitungsphase zunächst kleine und überschaubare Mehrwegsysteme betrachtet, um einen tragfähigen Modellansatz zu entwickeln. Dieser soll im Laufe der Weiterführung des SFB in der aktuellen Bearbeitungsphase weiter ausgebaut und auf große Redistributionsnetze übertragen werden.

Ein wichtiger Aspekt bei der Betrachtung komplexer Systeme, wie sie Redistributionsnetze darstellen, ist die Systemzuverlässigkeit. Bisher wurden bei der Modellierung eines Mehrwegsystems Störungen nicht betrachtet.

Betriebliche Prozesse sind prinzipiell mit Risiken verbunden, die die Zielerreichung beeinflussen. Als Risiko wird im allgemeinen das Produkt aus der Wahrscheinlichkeit, dass ein Schaden entstehen kann und der Schwere des Schadens bezeichnet. In der Entscheidungstheorie wird als Risiko die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines

möglichen (negativen) Umweltzustandes verstanden, also das Risiko einer Handlungsmöglichkeit (vgl./Perr99/).

Aufgrund der Kenntnis des Risikos für das Eintreffen bestimmter Ereignisse sowie für verschiedene Entscheidungsmöglichkeiten lassen sich Entscheidungsregeln ableiten (vgl. /Wöhe86/). Bei der Planung und dem Aufbau eines MTV-Pools kann es für den Betreiber durchaus von Interesse sein zu wissen, unter welchen Bedingungen und mit welcher Wahrscheinlichkeit sein System ausfällt bzw. wann es seine eigentliche Aufgabe nicht mehr erfüllen kann und welche Konsequenzen sich aus bestimmten Entscheidungen ergeben können.

In der Betriebswirtschaftslehre wird dem bestehenden Risiko durch die Implementierung entsprechender Frühwarnsysteme Rechnung getragen. Es handelt sich dabei um Systeme, deren Elemente (betriebliche organisatorische Einheiten) in der Lage sind, die spezifischen Informationen aufzunehmen, zu verarbeiten und abzugeben /Hopfenb91/. Zum Beispiel können im Bereich des Produktionscontrollings Fehler und Fehlerursachen im Rahmen der Fehlerkostenrechnung berücksichtigt werden /Reichm97/. Bei dieser Art von Frühwarnsystem handelt es sich um ein strategisches Instrument, das künftige Entscheidungen beeinflussen soll, mit der Maßgabe, einem möglichen Fehler zu begegnen. Es ist demnach der Versuch, von vergangenheitsbezogenen Ereignissen auf mögliche Entwicklungen zu schließen. Diese klassische Vorgehensweise der Fehlererkennung und Fehlerbeseitigung ist nur im begrenzten Maße präventiv wirksam. Insbesondere gestiegene Kundenerwartungen und der starke Wettbewerb erfordern verstärkte Anstrengungen von Herstellern und Lieferanten, zuverlässige und sichere Produkte einzusetzen. Der Begriff "Produkt" umfasst auch Dienstleistungen.

Als geeigneter Weg zur Erreichung einer hohen Sicherheit und Zuverlässigkeit von Systemen und Produkten gilt die Qualitätsverbesserung durch Fehlervermeidung. Hier bieten sich Verfahren des Qualitätsmanagements und der Zuverlässigkeitsanalyse an.

## **2. Zuverlässigkeitsanalyse**

Definitionsgemäß ist die Zuverlässigkeit ein Maß für die Fähigkeit einer Einheit, ihre definierte Funktion unter den vorgegebenen Arbeits- und Umgebungsbedingungen voll zu erfüllen. Die Zuverlässigkeitstheorie beschäftigt sich mit der Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten von zunehmend komplexen Ereignissen sowie von Verteilungen, nach denen diese Ereignisse andauern mittels der entsprechenden Daten von einfacheren Ereignissen /Schnee73/. Der Ausfall einer Betrachtungseinheit wird im allgemeinen als Abweichung vom Leistungsziel definiert, wobei zwischen primärem,

sekundärem und kommandiertem Ausfall differenziert wird. Als primärer Ausfall wird der Ausfall einer Komponente bezeichnet. Ein sekundärer Ausfall entsteht als Folgeschaden eines Primärausfalls. Ein kommandierter Ausfall ergibt sich aus der falschen bzw. fehlenden Anregung oder dem Ausfall einer Hilfsquelle /Meyna94/. Im Rahmen der Modellentwicklung für Redistributionsnetze sind vor allem primäre und sekundäre Ausfälle relevant.

Die Aufgabe der Zuverlässigkeitsanalyse ist die Ermittlung – und ggf. Verbesserung – der Zuverlässigkeit technischer Systeme. Die Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse lassen sich in qualitative (System- und Konstruktions-FMEA, Fehlerbaum-, Ereignisablaufanalyse) und quantitative Analysen (Fehlerbaumanalyse, Berechnung von Kenngrößen nach Boole oder Markov) gliedern (vgl. Abb. 1). Die quantitative Zuverlässigkeitsanalyse verwendet probabilistische Methoden, d.h. sie geht explizit mit Wahrscheinlichkeiten um. Auch für kompliziertere Systeme, die aus vielen unterschiedlichen Komponenten bestehen, kann mit diesen Methoden die Zuverlässigkeit prospektiv ermittelt werden. Die Zuverlässigkeitsanalyse geht aus von den Kenntnissen über die Systemfunktion und über das Zusammenwirken der Komponenten im System. Aufgrund von Erfahrungs- und Schätzwerten über die Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten und mit Hilfe formalisierter Methoden (z.B. der Fehlerbaumanalyse) kann die Systemzuverlässigkeit ermittelt werden.

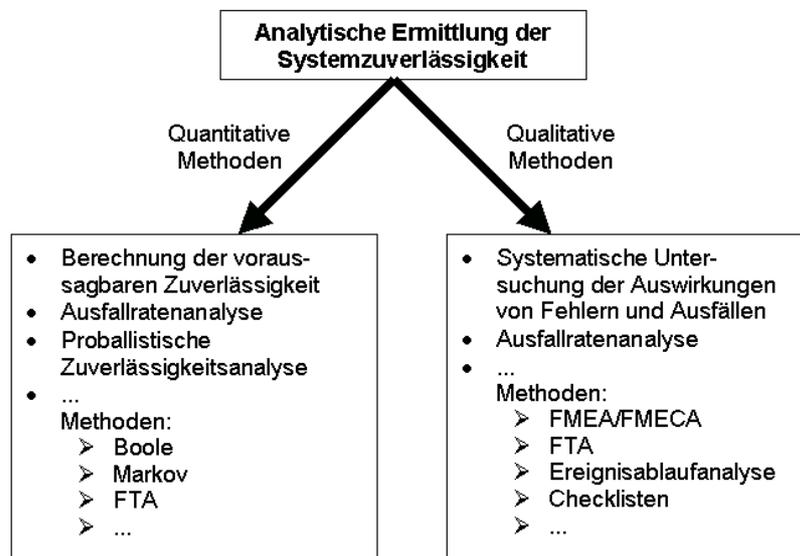


Abb. 1: Grundsätzliche Möglichkeiten der Zuverlässigkeitsanalyse

Der Nutzen der Anwendung von Zuverlässigkeitsmethoden im Rahmen von Redistributionsnetzen liegt in der frühzeitigen Fehler- und Schwachstellenerkennung sowie in der Erreichung eines höheren Qualitätsniveaus bezüglich der Logistikleistung. Um mögliche Schwachstellen eines Systems zu erkennen, bieten sich folgende Verfahren an: die Fehlerbaumanalyse (FTA) nach DIN 25424-1, die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) nach DIN 25448 und die Ereignisablaufanalyse.

Die Fehlerbaumanalyse (FTA) ist ein deduktives Verfahren, bei dem ausgehend von einem unerwünschten (Top-) Ereignis, systematisch nach dessen Ursachen gesucht wird. In Abb. 2 ist als Beispiel ein Fehlerbaum für eine fehlerhafte Belieferung eines Kunden dargestellt. Als Vorteil dieses Verfahrens gilt im allgemeinen die übersichtliche graphische Darstellung der Ausfallmechanismen und funktionaler Zusammenhänge des zu untersuchenden Systems, wobei binäre Zustände (Soll- und Fehlzustand) berücksichtigt werden. Sind Wahrscheinlichkeiten bekannt, so lassen sich mit Hilfe der Booleschen Algebra Zuverlässigkeitskenngrößen ermitteln.

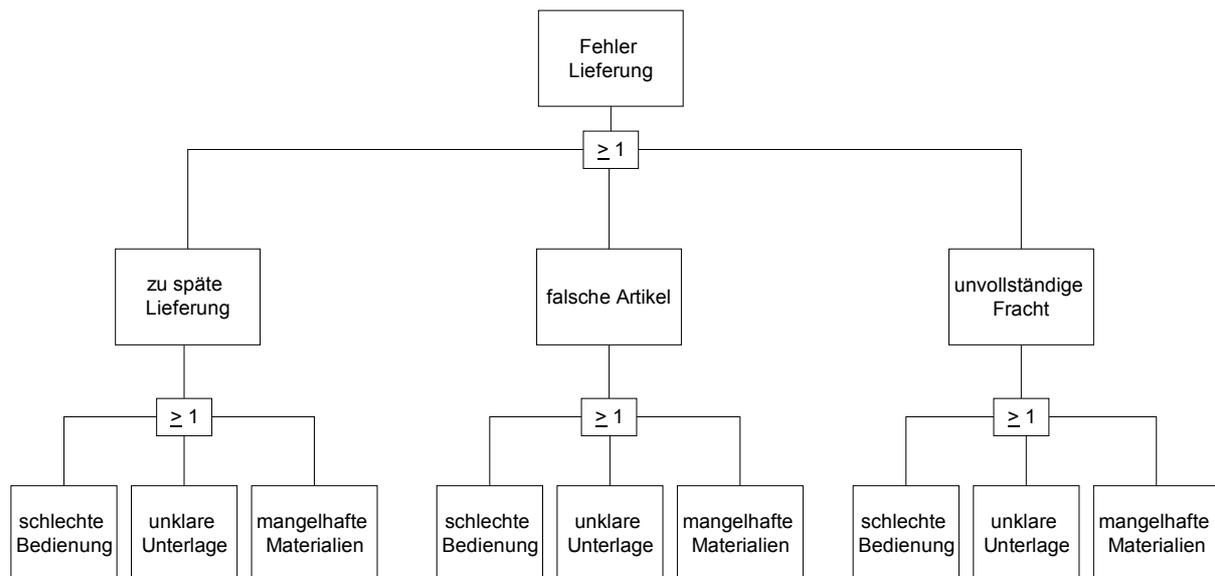


Abb. 2: Beispiel für einen Fehlerbaum zur Ermittlung von Fehlerursachen in Anlehnung an Reichmann /Reichm97/

Die FMEA ist eine formalisierte, analytisch qualitative Methode zur systematischen und vollständigen Erfassung potentieller Fehler in Konstruktion, Planung und Produktion. Sie dient der frühzeitigen Untersuchung von Ausfallursachen und –arten von Komponenten und Prozessen sowie deren Auswirkungen auf das System bzw. den Kunden. Basis ist die Norm - Ausfalleffektanalyse (DIN 25448).

Im Gegensatz zu der FMEA und FTA werden bei der Ereignisablaufanalyse - ausgehend von einem auslösenden Ereignis (initiating event) - alle möglichen Folgeereignis-Abläufe bis hin zur endgültigen Auswirkung verglichen.

Um Voraussagen über die Wahrscheinlichkeit, dass zum Betrachtungszeitpunkt keine als maßgeblich geltenden Störungen vorliegen, die unter den zu betrachtenden Bedingungen die Erfüllung der vorgesehenen Funktion verhindern (Verfügbarkeit), aufgrund der Ausfall- und Reparaturraten sowie über die Ausfallwahrscheinlichkeit / Unverfügbarkeit während eines vorgegebenen Zeitraumes treffen zu können, werden Zustandsänderungsmodelle, wie z.B. Markovprozesse (vgl. VDI 4008 Blatt 3), angewendet.

Die Annahme, dass ein System zu jedem Zeitpunkt verfügbar sein muss, ist unrealistisch. Es existieren Zeitpunkte, zu denen bestimmte Teilsysteme (Subsysteme) „ausfallen“ (z.B. Abschaltung von Subsystemen zur routinemäßigen Wartung) /Schnee73/ dürfen. Daraus ergeben sich bestimmte Kennzahlen zur Beurteilung der Zuverlässigkeit eines Systems:

- Anzahl der statistisch auftretenden reversiblen (d.h. nicht endgültigen) Ausfälle, die auch als sporadische Störungen bezeichnet werden können,
- mittlere Dauer eines Ausfalls,
- mittlere Dauer eines störungsfreien Betriebszeitraumes (MTBF – mean time between failure), woraus sich die effektive Verfügbarkeit ergibt.

### 3. Zustandsänderungsmodell für MTV-Systeme

Der zukünftige Verlauf der Prozesse von MTV-Systemen ist, aufgrund der nur im begrenzten Maße vorhandenen Vorhersehbarkeit, da eine Reihe von zufallsbedingten, nicht exakt erfassbaren Einflussgrößen existieren, als stochastisch anzusehen. Beispiele für derartige zufallsbedingte Einflussgrößen sind:

- Ausfallverhalten eines Elementes des MTV-Systems
- Nachfrageverhalten der Kunden
- Nicht systemkonformes Nutzerverhalten
- ...

Diese stochastischen Vorgänge können durch Markovmodelle abgebildet werden.

In einem Markov-Modell ist definitionsgemäß /Meyna01/ ein System durch eine endliche Anzahl von Zuständen  $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$  beschreibbar. Daraus lässt sich der Zustand des Systems in seinem zeitlichen Verlauf als Zufallsprozess  $\{z(t), t \geq 0\}$  mit endlich vielen Zuständen und stetigem Parameterbereich interpretieren.

Sind die Übergangswahrscheinlichkeiten  $P_{ij}(t_1, t_2)$  nicht davon abhängig, welche Zustände vor der Zeit  $t_1$  durchlaufen wurden, so spricht man von einem Markov-Prozess.

Diese Eigenschaft, dass die Zukunft des Prozesses von seiner Gegenwart, nicht jedoch von seiner Vergangenheit abhängt („Unabhängigkeit von der Vorgeschichte“), wird mit Markov-Eigenschaft bezeichnet.

Bei einer Abhängigkeit von der Vorgeschichte, die zum Beispiel durch eine Verweildauer in einem Zustand  $Z_i$  gegeben sein kann, spricht man von Semi-Markov-Prozessen.

Beschreibende Größen für einen Markov-Prozess mit diskretem Parameterbereich und endlich vielen Zuständen sind:

- $m$  Zustände:  $(Z_1, Z_2, \dots, Z_m)$ ,
- Zustandswahrscheinlichkeit:  $p_i(h)$  [zum Zeitpunkt  $t_n$  im Zustand  $Z_i$ ],
- Übergangswahrscheinlichkeit:  $p_{ij}(n, n+1)$ .

Um nun ein Zustandsänderungsmodell nach Markov aufzustellen, werden folgende prinzipiellen Informationen benötigt:

- Systemaufbau,
- Systemauslegung
- Ausfallarten
- Raten der Zustandsübergänge
- Art der Zeitabhängigkeit von Übergangsraten /- wahrscheinlichkeiten

## 1. Systemaufbau

Das zu analysierende Mehrwegsystem besteht der Einfachheit halber aus einem Depot und einer Lokation / Destination (s. Abb. 3). Das Depot hat die Aufgabe, termingerecht, in der richtigen Menge und Qualität die Lokation mit gebrauchsbereitem MTV – Leergut zu versorgen. In der Lokation wird das Leergut zunächst in einem Leergutlager für die Produktion bereitgehalten. Bei Abruf durch die Produktion wird die entsprechende Menge an MTV an den Produktionsort gebracht und dort mit Fertigerzeugnissen befüllt. Im Anschluss daran gelangen die befüllten Behälter ins Ausgangslager. Dort werden dann die Aufträge kommissioniert und zur Abholung bereitgestellt. Bei Abholung durch den Kunden wird die entsprechende Behältermenge im Verhältnis 1:1 mit gebrauchtem Leergut getauscht. Bei Belieferung der Lokation mit gebrauchsbereitem Leergut von dem Depot, wird ebenfalls die gleiche Menge an gebrauchten MTV getauscht. Die Transportaufgabe vom Depot zur Lokation bzw. von der Lokation zum Depot wird von einem Dienstleister (Spediteur) übernommen.

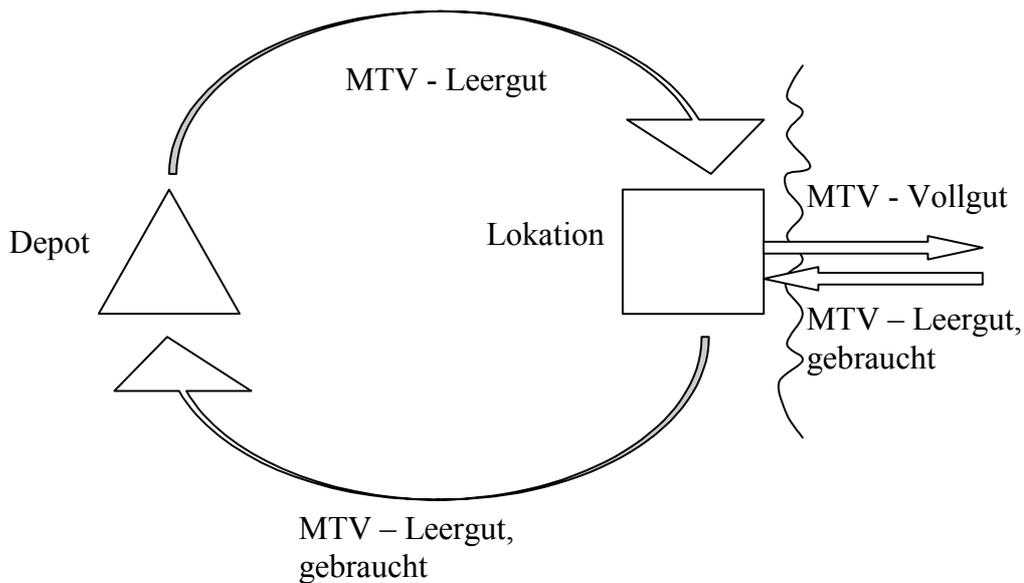


Abb. 3: Modell eines Mehrwegkreislaufes

Zur Darstellung des Betrachtungssystems empfiehlt sich neben dem klassischen Blockschaltbild die Aufstellung der Prozesskette. Hier werden jedem Systemelement entsprechende Prozesse zugeordnet. Als Systemelemente sollen hier folgende betrachtet werden:

- Depot
- Dienstleister (Transportdienstleister, Spediteur)
- Lokation (Produktionsstätte)

Gemäß dem Beispielmodell in Abb. 3 lässt sich folgende Prozesskette erstellen (Abb. 4).

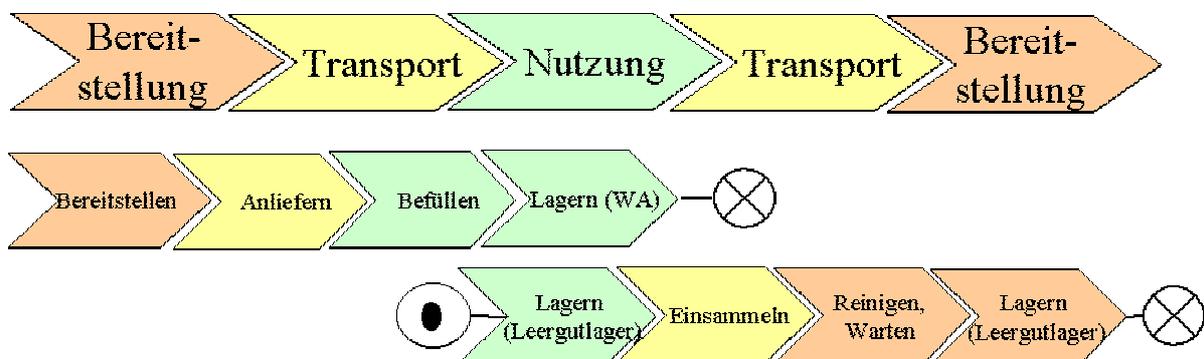


Abb. 4: Prozesskette für das Modell eines Mehrweg-Kreislaufes

## 2. Fehlerarten

Nach Aufstellen der Prozesskette lassen sich zu jedem Teilprozess Elemente zuordnen, die durch bestimmte Zustände charakterisiert werden können. Zum Beispiel ist dem Teilprozess „Bereitstellung“ des Prozesses „Depot“ ein Element „Hilfsmittel“ (z.B. Flurförderzeug) zugeordnet. Im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalyse ist dieses durch die Zustände „verfügbar“, „teilweise verfügbar“ oder „nicht verfügbar“ definiert. Die einzelnen Fehlerarten lassen sich nun einfach durch die negativen Zustände der einzelnen Elemente (beim oben genannten Beispiel wäre ein negativer Zustand „nicht verfügbar“) bestimmen.

In AAbb. 5 ist diese Zuordnung tabellarisch dargestellt. Hierbei handelt es sich um eine beispielhafte Darstellung, die hinreichend genau ist, um das generelle Vorgehen zu verdeutlichen. In konkreten Anwendungsfällen müssen eine detaillierte Prozesskette erstellt, die dazugehörigen Elemente ermittelt sowie deren Zustände definiert werden.

Prozess	Depot	Dienstleister			Lokation / Destination						Dienstleister			Depot	
		Bereitstellung	Lieferung	Anlieferung	Einlagerung	Produktion	Lager	Warenausgang	Leergutlager	Abholung	Lieferung	Reinigung / Wartung	Lager		
Teilprozess	Sub-Teil-Prozesse (Auswahl)	Kommissionierung (o.k., Fehler)	Abfertigung (frei; Wartezeit; nicht möglich)	Tausch (vereinbarungs-gem., nicht möglich)	autom. Identifizierung (möglich; teilw. möglich; nicht möglich)	Personal (verfügbar; begrenzt verfügbar; nicht verfügbar)	Personal (verfügbar; begrenzt verfügbar; nicht verfügbar)	Kommissionierung (o.k., Fehler)	Tausch (vereinbarungs-gem., nicht möglich; teilw. möglich; nicht möglich)	Personal (verfügbar; begrenzt verfügbar; nicht verfügbar)	Personal (verfügbar; begrenzt verfügbar; nicht verfügbar)	MTV-Bestand (zu hoch; soll; zu niedrig)	Abfertigung (frei; Wartezeit; nicht möglich)	Tausch (vereinbarungs-gem., nicht möglich)	MTV-Bestand (zu hoch; soll; zu niedrig)
					manuelle Identifizierung (möglich; teilw. möglich; nicht möglich)										
Ressourcen	Hilfsmittel (verfügbar; teilw. verfügbar; nicht verfügbar)	Fahrer (einsatzbereit; ausgefallen)	Transportmittel (erreichbar; nicht erreichbar)	Hilfsmittel (verfügbar; teilw. verfügbar; nicht verfügbar)	Zuverlässigkeit der Anlagen (voll verfügbar; Verzögerung; ausgefallen)	Hilfsmittel (verfügbar; teilw. verfügbar; nicht verfügbar)	Zuverlässigkeit der Anlagen (voll verfügbar; Verzögerung; ausgefallen)	Transportmittel (intakt; defekt)	Personal (verfügbar; begrenzt verfügbar; nicht verfügbar)	Hilfsmittel (verfügbar; teilw. verfügbar; nicht verfügbar)	Hilfsmittel (verfügbar; teilw. verfügbar; nicht verfügbar)	Personal (verfügbar; begrenzt verfügbar; nicht verfügbar)			
					MTV - Menge (verfügbar; begrenzt verfügbar; nicht verfügbar)										
Lenkung	Termin (eingehalten; überschritten)	Zeitfenster (innerhalb; außerhalb)	Termin (eingehalten; überschritten)	Zeitfenster (innerhalb; außerhalb)	Termin (eingehalten; überschritten)	Zeitfenster (innerhalb; außerhalb)	Termin (eingehalten; überschritten)	Zeitfenster (innerhalb; außerhalb)	Termin (eingehalten; überschritten)	Zeitfenster (innerhalb; außerhalb)	Termin (eingehalten; überschritten)	Zeitfenster (innerhalb; außerhalb)	Termin (eingehalten; überschritten)	Zeitfenster (innerhalb; außerhalb)	Termin (eingehalten; überschritten)

Abb. 5: Zustandsübersicht eines einfachen Mehrwegkreislaufes

### 3. Fehlerbäume

Der Entwicklung von entsprechenden Fehlerbäumen liegt die Modellvorstellung zu Grunde, dass die Betrachtungseinheiten zwei Zustände einnehmen können /Rakow97/:

- Sollzustand: Zustand einer Betrachtungseinheit, in dem diese fähig ist, eine geforderte Funktion zu erfüllen.
- Fehlzustand: Zustand einer Betrachtungseinheit, in dem diese unfähig ist, eine geforderte Funktion zu erfüllen.

Als Beispiel wird in Abb. 6 ein Fehlerbaum für den Fall, dass das Hilfsmittel (hier ein Flurförderzeug) sich in einem Fehlzustand befindet, dargestellt. Als Fehler wurden die beiden negativen Zustände „teilweise verfügbar“ und „nicht verfügbar“ gewählt.

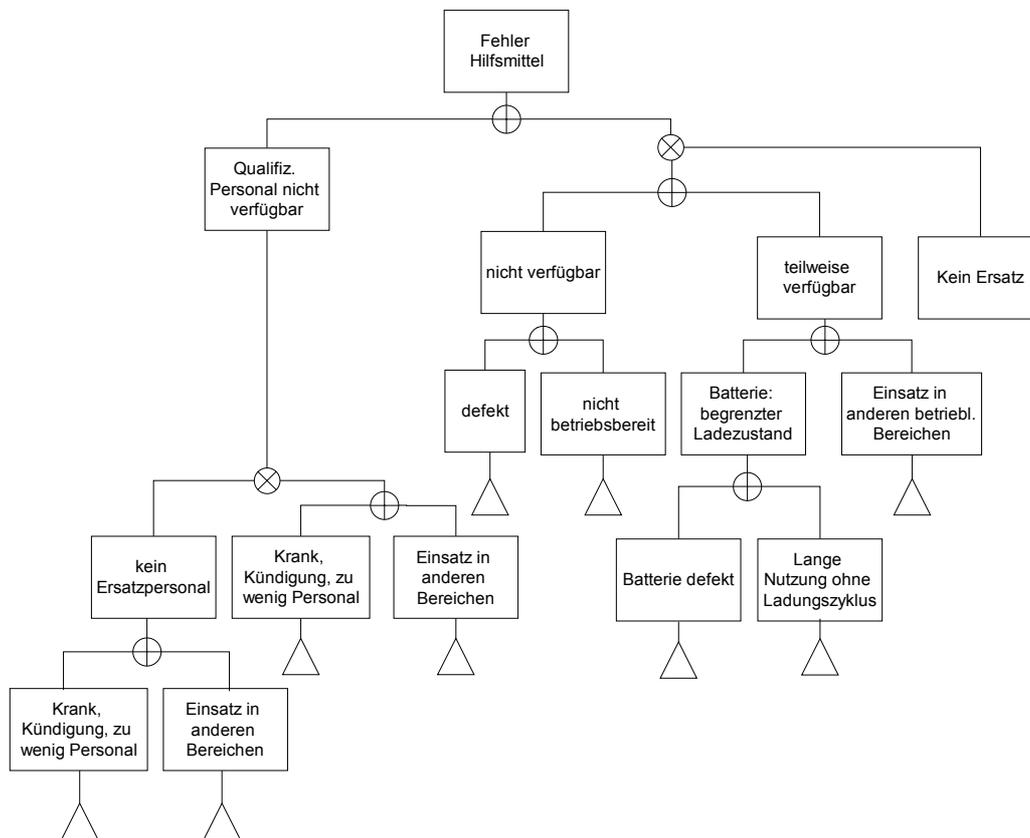


Abb. 6: Fehlerbaum für das Element Hilfsmittel

Ein Fehler in dem Element bzw. Subsystem Hilfsmittel liegt demnach vor,

- bei Abwesenheit eines ausgebildeten Staplerfahrers (qualifiziertes Personal nicht verfügbar)

- oder wenn entweder ein Stapler gerade nicht verfügbar (aufgrund eines Defektes oder nichtvorhandener Betriebsbereitschaft oder) oder nur teilweise verfügbar ist
- und wenn gleichzeitig kein Ersatzfahrzeug vorhanden ist.

### 3. Zustände und Zustandsübergänge

Durch die Fehlerbaumanalyse konnten, ausgehend von einem Fehler, die fehlerauslösenden Komponenten und deren Zustände ermittelt werden. Im Rahmen dieser Analyse waren deshalb nur die beiden Zustände „Sollzustand“ und „Fehlzustand“ definiert.

Für das hier betrachtete Gesamtsystem eines Mehrwegkreislaufes können die beiden Zustände Soll- und Fehlzustand angenommen werden. Interessant ist aber auch die Antwort auf die Frage, in welchem Zustand sich das betrachtete System zu einem bestimmten Zeitpunkt befinden wird. Dies hängt von den Zuständen der einzelnen Subsysteme und deren funktionalen Verknüpfung ab. Die funktionaler Verknüpfung ist bereits durch die Fehlerbaumanalyse gegeben. Um die einzelnen möglichen Zustände der Subsysteme zu identifizieren, können die Fehlerbaumanalyse und die Zustandsübersicht-Tabelle (AAbb. 5) herangezogen werden.

Die Fehlzustände von Subsystemen führen bei stationärer Betrachtung zum Fehlzustand des Gesamtsystems. Da allerdings einige Fehlerarten nur zeitlich begrenzt auftreten, sollte zur Beurteilung der Zuverlässigkeit des Gesamtsystems dieser Effekt mit berücksichtigt werden. Einige Systeme können also von einem Sollzustand in einen Fehlzustand übergehen und durch Behebung des Fehlers in den Sollzustand zurückkehren. Es handelt sich hierbei um reparierbare Systeme.

Am Beispiel des Subsystems *Hilfsmittel* soll dieser Effekt erläutert werden: Das Subsystem *Hilfsmittel* sei zu einem Zeitpunkt  $t=t_0$  ausgefallen, da kein Staplerfahrer gerade verfügbar ist. Der einzig vorhandene Fahrer sei gleichzeitig Betriebselektriker und gerade mit der Reparatur einer Maschine betraut. Nach Beendigung dieser Tätigkeit zum Zeitpunkt  $t=t_1$  soll er dem System wieder als Fahrer zur Verfügung stehen. Zu diesem Zeitpunkt hätte also das Subsystem *Hilfsmittel* seinen Sollzustand wieder erreicht. Fällt in diese Zeitspanne (zwischen  $t_0$  und  $t_1$ ) ein Fahrauftrag, so befindet sich das Gesamtsystem für diese Dauer (bist  $t_1$  erreicht ist) im Fehlzustand. Fällt ein Fahrauftrag auf den Zeitpunkt  $t_1$ , kann der Auftrag ausgeführt werden, das Gesamtsystem befindet sich im Sollzustand. In diesem Fall wäre der Ausfall des Subsystems von  $t_0$  bis  $t_1$  nicht gleichbedeutend mit einem Ausfall des Gesamtsystems. Für dieses Beispiel –Subsystem *Hilfsmittel*, Element „Qualifiziertes Personal“ – lassen sich folgende Zustände finden:

1. Einsatzbereit
2. Einsatz in einem andern Betriebsbereich
3. Personal ausgefallen (z.B. Abwesenheit durch Krankheit)

Zur Veranschaulichung der Zustände eines Systems kann ein Zustandsdiagramm gewählt werden. Die Zustände des Systems bzw. der Betrachtungseinheit werden hierbei als Knoten und der Übergang von einem Knoten  $i$  zu einem Knoten  $j$  als Kante eines gerichteten Graphen dargestellt. Im vorliegenden Beispiel sind die o.a. Zustände definiert, die in einem entsprechenden Zustandsdiagramm (Abb. 7) dargestellt werden können.

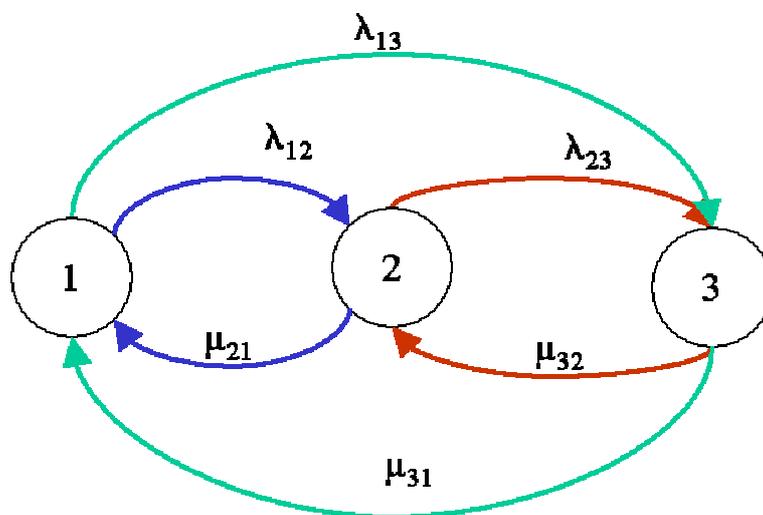


Abb. 7: Zustandsdiagramm eines Markovschen Prozesses am Beispiel der Verfügbarkeit von qualifiziertem Personal

Aus Abb. 7 wird ersichtlich, dass das Personal zu einem bestimmten Zeitpunkt einsatzbereit ist. Mit einer Übergangsrate bzw. Wahrscheinlichkeit von  $\lambda_{13}$  geht das Personal in den Zustand 3, in dem es aufgrund von z.B. Krankheit oder Urlaub oder ähnlicher Ereignisse gerade nicht verfügbar ist, über. Mit der Übergangsrate  $\lambda_{12}$  wird das Personal in einem anderen Betriebsbereich eingesetzt werden. Die Übergangsraten  $\mu_{21}$ ,  $\mu_{31}$  beschreiben die Übergänge zum einsatzbereiten Zustand und  $\mu_{32}$  vom ausgefallenen zum Zustand „Einsatz in anderen betrieblichen Bereichen“. In der folgenden weiteren Betrachtung soll angenommen werden, dass zu Beginn der Beobachtung ( $t=0$ ) das Personal einsatzbereit ist, also das System sich in Zustand 1 befindet.

Im Rahmen der Auswertung dieser Markov-Kette können die Übergangsraten in einer Matrix dargestellt werden. Dabei hat sich die Darstellung im Laplace-Bereich bei

praktischen Untersuchungen bewährt /Meyna01/. Zuvor kann das in Abb. 7 dargestellte Zustandsdiagramm noch vereinfacht werden, unter der Annahme, dass vor allem der Übergang zu Zustand 3, wenn das (Sub-)System ausfällt, interessiert. Dabei wird Zustand 2 als transienter Zustand angenommen. Es ergibt sich folgende Darstellung (Abb. 8):

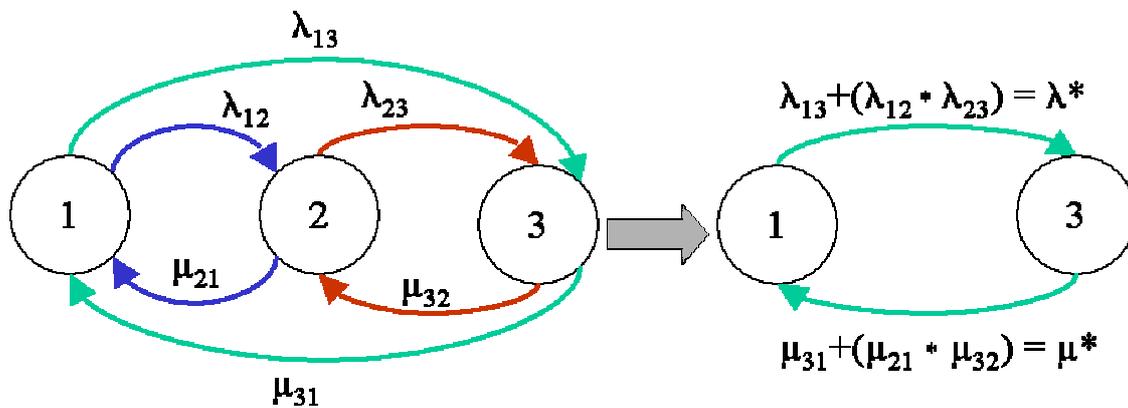


Abb. 8: Vereinfachtes Zustandsdiagramm

Aus den verbleibenden beiden Zuständen 1 und 3 kann nun eine quadratische Matrix mit 2 X 2 Feldern angelegt werden (Abb. 9). Die Zustände werden am Rand markiert.

	1	3
1	$S+\lambda^*$	$-\mu^*$
3	$-\lambda^*$	$S+\mu^*$

Abb. 9: Zustandsmatrix

Nach der Cramerschen Regel kann nun die Zustandswahrscheinlichkeit für den Zustand 3 (nicht verfügbar) bestimmt werden (unter Nicht-Verfügbarkeit  $U(t)$  versteht man die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein System zur Zeit  $t$  im nicht funktionsfähigen Zustand befindet):

$$x_j = \frac{D_j}{D} \quad \text{mit } x_j = \text{gesuchte Unbekannte (Zustandswahrscheinlichkeit)} \quad (\text{Gl. 1})$$

$D_j = \text{Zählerdeterminante}$   
 $D = \text{Systemdeterminante}$

Daraus folgt für die Nichtverfügbarkeit:

$$U(s) = \frac{D_2}{D} \quad (\text{Gl. 2})$$

mit  $D_2 = \lambda^*$  und (Gl. 3)

$$D = (s+\lambda^*)(s+\mu^*)-\mu^*\lambda^* = s(s+\lambda^*+\mu^*) \quad (\text{Gl. 4})$$

$$U(s) = \frac{\lambda^*}{s(s+\lambda^*+\mu^*)} \quad (\text{Gl. 5})$$

Nach der Retransformation in den Zeitbereich ergibt sich:

$$u(t) = \frac{\lambda^*}{\lambda^*+\mu^*} - \frac{\lambda^*}{\lambda^*+\mu^*} e^{-(\lambda^*+\mu^*)t} \quad (\text{Gl. 6})$$

Unter der Voraussetzung, dass die einzelnen Übergangswahrscheinlichkeiten bekannt sind, lässt sich nun einfach die Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmen.

Die Richtigkeit der Formel für  $u(t)$  kann durch folgende Bedingungen geprüft werden:

1. Für den Zeitpunkt  $t=0$  muss  $f(t) = 0$  sein, da die Betrachtung vom intakten System (Personal ist zum Zeitpunkt  $t=0$  einsatzbereit) ausgeht.
2. Für große Zeiträume ( $t \rightarrow \infty$ ) muss, bei stationärer Betrachtung der Nichtverfügbarkeit, wenn alle Übergangsraten, die in den intakten Zustand (Zustand 1) führen vernachlässigt werden ( $\mu^*=0$ ), die Unverfügbarkeit (gleichbedeutend mit der Ausfallwahrscheinlichkeit  $f(t)$ ) gegen 1 streben.

Beide Bedingungen werden durch die Funktion für  $f(t)$  (Gl. 6) erfüllt.

Neben der Nichtverfügbarkeit können nun auch die anderen Zuverlässigkeitskenngrößen

- stationäre Verfügbarkeit ( $V(t)$ ),
- die mittlere ausfallfreie Betriebsdauer (MTBF) und
- die mittlere Ausfalldauer (MTTR)

ermittelt werden.

Folgende Beziehungen gelten /Schnee73/:

$$V(s) = \int_0^\infty \{P_1(s)\} \text{ mit } \lim_{s \rightarrow 0} s V(s) = V_\infty \quad (\text{Gl. 7})$$

$$\text{MTBF} \triangleq \int_0^\infty \{R(t)\} \triangleq E(t) \quad (\text{Erwartungswert}) \quad (\text{Gl. 8})$$

mit  $R(t) = 1-F(t)$  (wobei  $F(t) \triangleq U(t)$ , mit  $\mu^*=0$ )

$$\text{MTTR} = \frac{\text{MTBF}}{V_\infty} - \text{MTBF} \quad (\text{Gl. 9})$$

Stationäre Verfügbarkeit:

Die Verfügbarkeit kann nach dem gleichen Verfahren wie die Nichtverfügbarkeit aus der Matrix (Abb. 9) bestimmt werden. Demnach ist

$$V(s) = \frac{D_1}{D} = \frac{\mu^*}{(\lambda^* + \mu^*)s} - \frac{\lambda^*}{(\lambda^* + \mu^*)(s + \lambda^* + \mu^*)} \quad (\text{Gl. 10})$$

bzw.

$$v(t) = \frac{\mu^*}{\lambda^* + \mu^*} - \frac{\lambda^*}{\lambda^* + \mu^*} e^{-(\lambda^* + \mu^*)t} \quad (\text{Gl. 11})$$

Nach Gleichung (Gl. 7) ist dann die stationäre Verfügbarkeit:

$$V_\infty = \frac{\mu^*}{\lambda^* + \mu^*} \quad (\text{Gl. 12})$$

Mittlere ausfallfreie Betriebsdauer MTBF:

Die mittlere ausfallfreie Betriebsdauer ergibt sich aus dem Grenzwert ( $s \rightarrow \infty$ ) der Zuverlässigkeit  $R$ . Die Zuverlässigkeit kann über die Verfügbarkeit bestimmt werden, unter der Annahme, dass alle „Reparaturraten“  $\mu^* = 0$  sind.

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda^*} \quad (\text{Gl. 13})$$

Mittlere Ausfalldauer MTTR:

Die mittlere Ausfalldauer MTTR ist durch Gleichung (Gl. 9) gegeben. Wenn man nun die zuvor bestimmten Größen MTBF (Gl. 13) und  $V_\infty$  (Gl. 12) in Gleichung (Gl. 9) einsetzt, erhält man für MTTR (Gl. 14):

$$\text{MTTR} = \frac{\lambda^* + \mu^*}{\lambda^* \mu^*} - \frac{1}{\lambda^*} \quad (\text{Gl. 14})$$

Zur Berechnung der formelmäßig bestimmten Größen seien für die einzelnen Übergangsraten folgende Werte gegeben:

$$\begin{array}{llll} \lambda_{12}=0,9 & \lambda_{13}=0,1 & \lambda_{23}=0,1 & \Rightarrow \lambda^*=0,19 \\ \mu_{21}=0,9 & \mu_{31}=0,7 & \mu_{32}=0,3 & \Rightarrow \mu^*=0,97 \end{array}$$

Für die Verfügbarkeit erhält man, bezogen auf eine 8h – Schicht, von  $v(t=8) = 0,8362$  bzw.  $v(t) = 83,62\%$ , eine mittlere ausfallfreie Betriebsdauer von 5,26 Zeiteinheiten sowie eine mittlere Ausfalldauer von 1,819 Zeiteinheiten.

Aus Gleichung (Gl. 11) wird ersichtlich, wenn die einzelnen Ausfallraten  $\lambda_{ij}$  verringert werden, dass die Verfügbarkeit des Subsystems „qualifiziertes Personal“ erhöht werden kann. Dem Entscheider steht somit die Information zur Verfügung, um geeignete Maßnahmen zu finden, um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, dass das betrachtete System sich zu einem bestimmten Zeitpunkt in einem funktionsfähigen, also hier einsatzbereitem Zustand befindet.

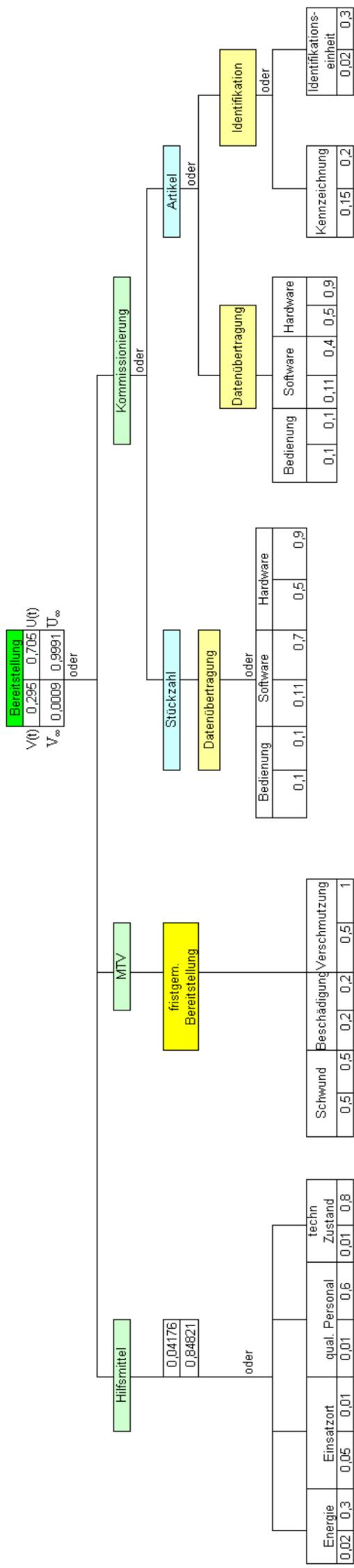
#### **4. Konkretisierung der Fehlerarten**

Eine wesentliche Bedingung von Markov ist, dass die Zustände, die ein Element einnehmen kann, zufällig sind. Bei den bisher betrachteten Elementen existieren einige, die dieser Bedingung nicht erfüllen. So ist beispielsweise eine falsche kapazitive Auslegung eines Depots ein systematischer Fehler, der nicht stochastisch verteilt ist. Er tritt nicht zufällig ein. Ressourcen hingegen, wie Maschinen, Anlagen, Personal usw. weisen hingegen ein stochastisch verteiltes Ausfallverhalten auf.

Ausgangspunkt der weiteren Betrachtung der Zuverlässigkeit eines Redistributionsnetzes soll daher das Ausfallverhalten von Prozessen - bedingt durch das Ausfallverhalten von Ressourcen - sein.

Es wird die vereinfachende Annahme getroffen, dass nur ein Ausfall einer Ressource zu einem Ausfall des zugehörigen Prozesses führt. Dies reduziert die zu betrachtende Menge an Fehlermöglichkeiten insgesamt. Ein Fehler des Systems oder Teilsystems liegt demnach dann vor, wenn eine oder mehrere Ressourcen ausgefallen sind.

In Abb. 10 ist ein Fehlerbaum für den Zustand „ausgefallen“ des Prozesses „Bereitstellung“ dargestellt.



<b>Bereitstellung</b>	$V(t)$	0,295	0,705	$U(t)$
	$V_{\infty}$	0,0009	0,9991	$U_{\infty}$

Schwund	0,5	0,5	0,2	0,2	0,5	1
Beschädigung						
Verschmutzung						

Energie	0,02	0,3	0,05	0,01	0,6	0,01	0,8
Einsatzort							
qual. Personal							
techn. Zustand							

Element	Betrachtungszeitraum	Übergangsraten	Verfügbarkeit	Unverfügbarkeit	Es werden nur zwei Zustände betrachtet. Daraus ergibt sich als Basis für die nebenstehenden Berechnungen eine 2x2 Matrix.		
	$t$	$\lambda$	$V(t)$	$U(t)$	$U_{\infty}$		
Hilfsmittel	qual. Personal	0,5	0,01	0,9957	0,9938	0,0043	0,0164
	Batterie / Energie	0,5	0,02	0,9908	0,9975	0,0022	0,0025
	Einsatzort	0,5	0,05	0,9754	0,1667	0,0246	0,0333
	techn. Zustand	0,5	0,01	0,9959	0,9877	0,0041	0,0123
	Hilfsmittel (alle Elemente ODER-verknüpft)						
MTV	Beschädigung	0,5	0,2	0,9094	0,5000	0,0906	0,5000
	Verschmutzung	0,5	0,5	0,6241	0,8667	0,1759	0,3333
	Schwund	0,5	0,5	0,6033	0,5000	0,1967	0,5000
	MTV = Bestand + ODER-verknüpft						
	Bedienung	0,5	0,1	0,9524	0,5000	0,0476	0,5000
Stückzahl	Software	0,5	0,11	0,9548	0,8542	0,0452	0,1358
	Hardware	0,5	0,5	0,8202	0,6429	0,1798	0,3571
	Datenübertragung (alle Elemente ODER-verknüpft)						
	Stückzahl (alle Elemente ODER-verknüpft)						
	Bedienung	0,5	0,1	0,9524	0,5000	0,0476	0,5000
Kommissionierung	Software	0,5	0,11	0,9548	0,8542	0,0452	0,1358
	Hardware	0,5	0,5	0,8202	0,6429	0,1798	0,3571
	Datenübertragung (alle Elemente ODER-verknüpft)						
	Kennzeichnung	0,5	0,15	0,74326	0,2521	0,25674	0,7478916
	Identifikationseinheit (alle Elemente ODER-verknüpft)						
Artikel	Identifikationseinheit	0,5	0,02	0,9908	0,9975	0,0022	0,0025
	Artikel = Identifikation+Datenübertragung (alle Elemente ODER-verknüpft)						
	Artikel = Identifikation+Datenübertragung (alle Elemente ODER-verknüpft)						
	Kommissionierung = Stückzahl+Artikel						
	Bereitstellung = Hilfsmittel + MTV + Kommissionierung						

Abb. 10: Beispielhafte Darstellung eines Fehlerbaums für den Prozess „Bereitstellung“ und Berechnung einiger Zuverlässigkeitskennwerte

## 5. Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde die Zuverlässigkeitsanalyse als ein methodisches Werkzeug zur Beurteilung eines logistischen Netzwerkes, insbesondere eines Redistributionsnetzwerkes vorgestellt.

Die vorgeschlagene Modellbildung basiert auf einer Prozesskette, deren Elemente nach Fehlerarten und nach Zuständen untersucht werden. Unter Verwendung der Fehlerbaumanalyse können die strukturell bedingten Kausalzusammenhänge aufgedeckt werden. Die Markov-Analyse erlaubt letztendlich, bei Vorliegen entsprechender Übergangsraten, eine dynamische Betrachtung der Systemzustände. Aufgrund der Vielzahl der Systemkomponenten beschränkte sich dieser Ansatz auf einen kleinen Ausschnitt des Systems eines Redistributionsnetzwerkes. Dabei wurde eine möglichst geringe Anzahl von Zuständen betrachtet, um das methodische Vorgehen noch übersichtlich darstellen zu können. Die anderen hier nicht betrachteten Systemkomponenten können auf analoge Weise analysiert werden. Durch die richtige Verknüpfung aller Elemente kann dann schließlich eine Bewertung des Gesamtsystems erfolgen.

Dieser Ansatz ist geeignet, durch Variation der Übergangswahrscheinlichkeiten im Rahmen von Simulationsexperimenten, das Zuverlässigkeitsverhalten eines Redistributionsnetzes aufzuzeigen.

## 6. Literatur

- /Meyna01/ Meyna, A.,  
Einführung in die Sicherheitstheorie:  
Sicherheitstechnische Analyseverfahren  
Hansa Verlag, München, Wien 1982
- /Krabs01/ Krabs, A.,  
Kreislauf-Optimierung in Mehrwegsystemen durch Planung, Analyse und System-  
Simulation (KOMPASS-Modell)  
Diss. Fakultät Maschinenbau der Universität Dortmund, Dortmund 2001
- /FIR00/ FIR Forschungsinstitut für Rationalisierung an der RWTH Aachen  
Skript – Industrielle Logistik  
Internet: <http://www.fir.rwth-aachen.de>  
Zugriff: 16.12.2000, 12:10 Uhr
- /GiPPb2/ Hezel, H., Kulow, B., Gehr, F., Braun, J.,  
Ergebnisbericht aus den Projektgemeinschaften des Forschungsprojektes „Geschäfts-  
prozessgestaltung mit integrierten Prozess- und Produktmodellen (GiPP)“:  
Analyse und Bewertung unternehmensübergreifender Logistikprozesse  
Teil A: Konzept zur ganzheitlichen Analyse und Bewertung unternehmensübergreifender  
Logistikprozesse – Grundkonzeption und zentrale Analyseergebnisse -,  
Erstellungsdatum: 09.10.1997  
Internet: [http://w4.siemens.de/zt\\_pp/ergebnis/b\\_b2\\_32a.html](http://w4.siemens.de/zt_pp/ergebnis/b_b2_32a.html)  
Zugriff: 08.11.2001, 14:10 Uhr
- /Schnee73/ Schneeweiß, W.,  
Zuverlässigkeitstheorie: Eine Einführung über Mittelwerte von binären Zufallsprozessen,  
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1973
- /Reichm97/ Reichmann, Th.,  
Controlling mit Kennzahlen und Managementberichten: Grundlagen einer systemge-  
stützten Controlling-Konzeption,  
5. Aufl., Verlag Franz Vahlen GmbH, München 1997
- /Hopfenb91/ Hopfenbeck, W.,  
Allgemeine Betriebswirtschaft- und Managementlehre: Das Unternehmen im Span-  
nungsfeld zwischen ökonomischen, sozialen und ökologischen Interessen,  
3. Aufl., Verlag Moderne Industrie, Landsberg a. L. 1991
- /Meyna94/ Meyna, A.,  
Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmanagement: Zuverlässigkeitsbewertung zukunftsori-  
entierter Technologien,  
(Hrsg. Brunner, F. J.), Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden 1994
- /Wöhe86/ Wöhe, G.,  
Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre,  
16. Aufl., Verlag Franz Vahlen GmbH, München 1986, S. 135 ff.
- /Perr99/ Perridon, L., Steiner, M.,  
Finanzwirtschaft der Unternehmung,  
10. Aufl., Verlag Franz Vahlen GmbH, München 1999, S. 99 ff.
- /Rakow97/ Rakowsky, K., Theis, I.,  
Safety Truth Tables – ein methodisches Werkzeug der Sicherheits- und Zuverlässig-  
keitsanalyse für die frühe Konstruktionsphase,  
in Zuverlässigkeit ist planbar: Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit verfahrens-  
technischer Systeme, Tagung technische Zuverlässigkeit `97  
VDI Verlag, Düsseldorf 1997