

**Management der Erhaltung
Elektromechanischer Ausrüstung
von Strassenverkehrsanlagen
Relevanz von Kenngrössen**

VSS Forschungsprojekt 21 / 98

28. Februar 2000



Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. | Einleitung..... | 1 |
| 2. | Zielsetzung Forschungsprojekt..... | 2 |
| 3. | Ausgangslage EMS..... | 3 |
| 3.1 | EMS-Konzept..... | 3 |
| 3.2 | Typenregeln | 3 |
| 3.3 | Zustandsbewertung im EMS..... | 5 |
| 4. | Definition des Zustands | 6 |
| 4.1 | Zustand einer Anlage: Grundlagen..... | 6 |
| 4.2 | Anlagen-Zustand und Zuverlässigkeit | 8 |
| 4.2.1 | Einleitung | 8 |
| 4.2.2 | Begriffe..... | 8 |
| 4.2.3 | Berechnung der Zuverlässigkeit | 10 |
| 4.2.4 | Zuverlässigkeit: Praxis-Beispiel „USV-Anlage“..... | 11 |
| 4.2.5 | Zuverlässigkeit: Praxis-Beispiel „Erfassung“ | 13 |
| 4.3 | Erweiterter Zustandsbegriff..... | 14 |
| 5. | Kenngrossen | 16 |
| 5.1 | Einleitung | 16 |
| 5.2 | Definition von Kenngrossen..... | 17 |
| 5.3 | Relevanz von Kenngrossen bez. der sicherheitstechnischen und risikobezogenen Beurteilung des Systems Strasse | 18 |
| 5.3.1 | Einleitung | 18 |
| 5.3.2 | Licht | 21 |
| 5.3.3 | Luft | 21 |



| | | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.3.4 | Kommunikation und Überwachung..... | 22 |
| 5.3.5 | Stromversorgung | 23 |
| 5.4 | Relevanz von Kenngrößen bez. Zustandsbewertung der Ausrüstungen..... | 24 |
| 5.5 | Relevanz von Kenngrößen bez. Erhaltungsmaßnahmen..... | 25 |
| 6. | Markow-Prozesse..... | 28 |
| 6.1 | Einleitung und Begriffe..... | 28 |
| 6.2 | Anwendung der Markow-Prozesse..... | 30 |
| 6.3 | Schlussfolgerung | 33 |
| 7. | Literaturverzeichnis..... | 34 |
| 8. | Abkürzungen | 35 |
| 9. | Revisionen..... | 36 |



Impressum

| | | |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Auftraggeber | Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS) Seefeldstrasse 9 8008 Zürich | |
| | Tel. 01 269 40 20 | |
| Forschungsstelle | AMSTEIN + WALTHERT Beratende Ingenieure AG Leutschenbachstr. 45 CH-8050 Zürich | |
| | Tel. 01 305 91 11 Fax 01 305 92 14 | |
| Verfasser | U. Welte urs.welte@amstein-walthert.ch | |
| Begleitende Kommission | EK 7.08 EMT | |
| Versionen | Version 1: Erst-Ausgabe Version 2: 14.09.1999 Version 3: 30.09.1999 Version 4: 14.01.2000 Version 5: 28.02.2000 | |
| Verteiler | VSS | |
| Freigegeben | Datum | Visum |

WL/MA/4972.90/R005.doc 28.02.2000 (Version 5)

R001.DOC 26.05.1999 / R002.DOC 14.09.1999 (Version 2) / R003.DOC 30.09.1999 (Version 3) /
R004.DOC 14.01.2000 (Version 4)



Zusammenfassung

Die Forschungsarbeit hat sich vorerst mit der Beurteilung des bisherigen Einsatzes von Kenngrössen im EMS befasst, wobei die Erfahrungen von den Kantonen Basel-Landschaft im Vordergrund standen. Es wurde festgestellt, dass die bisherige Zustandsbeurteilung mittels empirischer Kenngrössen (technische und physikalische Messgrössen, Umweltbedingungen, statistische Werte) für den Grossteil der EM-Anlagen korrekt ist und zu richtigen Beurteilungen (und optimierten Wartungsstrategien) führt (oder führen kann). Es ist allerdings für jedes EM-System ein *anlagespezifischer Satz von Kenngrössen* in enger Zusammenarbeit mit Lieferant und Betriebspersonal zusammenzustellen, allgemeingültige Kenngrössen *gibt es nicht*. Durch kontinuierliche Erfassung der Kenngrössen sowie deren graphischer Aufarbeitung und Darstellung ist eine *empirische Zustandseinschätzung* mit hoher Aussagekraft möglich.

Die Relevanz der Kenngrössen wird auf der Ebene „System Strasse“ und der Ebene „EM-Anlage“ diskutiert. Es wird gezeigt, dass nur Kenngrössen, die alle Aspekte des „Systems Strasse“ berücksichtigen relevant sind und über die Zustandsbewertung zu tragfähigen Entscheiden führen.

Es zeigt sich im weiteren, dass für bestimmte EM-Systeme, insbesondere elektronische, nicht dem Verschleiss unterworfenen Systeme, die Methoden der Zuverlässigkeitstheorie angewendet werden können. Dadurch ist eine *statistische Zuverlässigkeitsbeurteilung* möglich. Die Modellierung eines Systems mit Markow-Prozessen ist möglich, speziell für einfach strukturierte Systeme oder Teile von EM-Anlagen. Der Vorteil einer rechnerischen Bewältigung eines Modells besteht darin, dass Wartungsstrategien aufgrund der errechneten Verfügbarkeit optimiert und somit kostengünstiger gestaltet werden können. Am Beispiel einer USV-Anlage wird diese These im Hinblick auf die Zuverlässigkeitsbeurteilung konkretisiert.

EMS Kanton BL

**Empirische
Kenngrössen**

**Zusammenarbeit
Lieferant**

**Zustandsein-
schätzung**

System Strasse

**Relevante
Kenngrössen**

**Zuverlässigkeits-
theorie**

Markow

**Modelle
Wartungsstrategie**

Beispiel USV



1. Einleitung

Für den Betrieb der Tunnelstrecken von Autobahnen haben die elektromechanischen und elektronischen Ausrüstungen selbst und die zugeordneten Führungs- und Überwachungsanlagen in den Polizeistützpunkten und Werkhöfen eine zentrale Bedeutung. Diese Anlagen, mit ihren sicherheits- und betriebstechnisch wichtigen, aber auch empfindlichen und wartungstechnisch sehr aufwendigen Einrichtungen werden sich je länger desto mehr als die eigentlichen singulären Objekte im übergeordneten Verkehrsnetz erweisen.

EM-Anlagen: zentral für Sicherheit und Betrieb

Im Bereich des Managements zur Erhaltung dieser Ausrüstungen sind in den Kanton Basel-Landschaft und Genf systematisch Grundlagen für die Erhaltungsmaßnahmen und die Zustandsbewertung aufbereitet worden. Die Grundlagen wurden in operativen Systemen abgebildet, welche sich in der praktischen Anwendung befinden. Der Projektbericht Basel-Landschaft [1] liegt vor und wurde den interessierten Kreisen abgegeben. Inzwischen haben weitere Kantone begonnen, den Unterhalt auf der Grundlage eines EMS aufzubauen bzw. durchzuführen: es sind dies die Kantone AG, BS, LU, SG und weitere.

Grundlagen Kantone BL und GE



2. Zielsetzung Forschungsprojekt

Im Forschungsvorhaben sollen in einem ersten Schritt die für die allgemeingültige Beurteilung elektromechanischer Anlagen gültigen Kenngrößen evaluiert und grundsätzliche Algorithmen betreffend der Zustandsbewertung entwickelt werden:

**Kenngrößen
Algorithmen**

- Relevanz von Kenngrößen der elektromechanischen Ausrüstungen hinsichtlich der
 - sicherheitstechnischen und risikobezogenen Beurteilung des Systems Strasse
 - Zustandsbewertung der Ausrüstung
 - Erhaltungsmassnahmen
- Geeignete Modelle und Algorithmen für die stufengerechte Zustandsdarstellung und die Zustandsbewertung

**Relevanz der
Kenngrößen**

**Modelle und
Algorithmen**

Die Praxisumsetzung der Arbeit ist mittels der zur Verfügung stehenden EMS-Software (z.Zt. im Kanton BL im Einsatz) einfach möglich. Dieses Programm enthält die Grundlagen und die erforderlichen Module, um die Kenngrößen zu verarbeiten, darzustellen und damit einer Bewertung zu unterziehen.

Praxisumsetzung

3. Ausgangslage EMS

3.1 EMS-Konzept

Die Zielsetzung des EMS wurde in [1] detailliert dargestellt. Zusammengefasst kann das Ziel *Zustandsorientierte Erhaltung mittels software-gestütztem Hilfsmittel* definiert werden. Die schadensorientierte Erhaltung wird allerdings z.T. auch angewandt (sie kann durchaus in bestimmten Fällen sinnvoll sein), wird hier aber nicht weiter behandelt.

**Zustandsorientiert
Schadensorientiert**

3.2 Typenregeln

Das EMS basiert auf typischen Erhaltungsbedürfnissen, sogenannten Typenregeln. Durch den Einsatz der Typenregeln wird die zu verwaltende Datenmenge wesentlich reduziert, da nicht jedem System oder Aggregat eine eigene Tätigkeit zugewiesen werden muss. Somit kann dieselbe Typenregel für unterschiedliche Objekte angewendet werden.

**Typische Erhaltungs-
bedürfnisse**

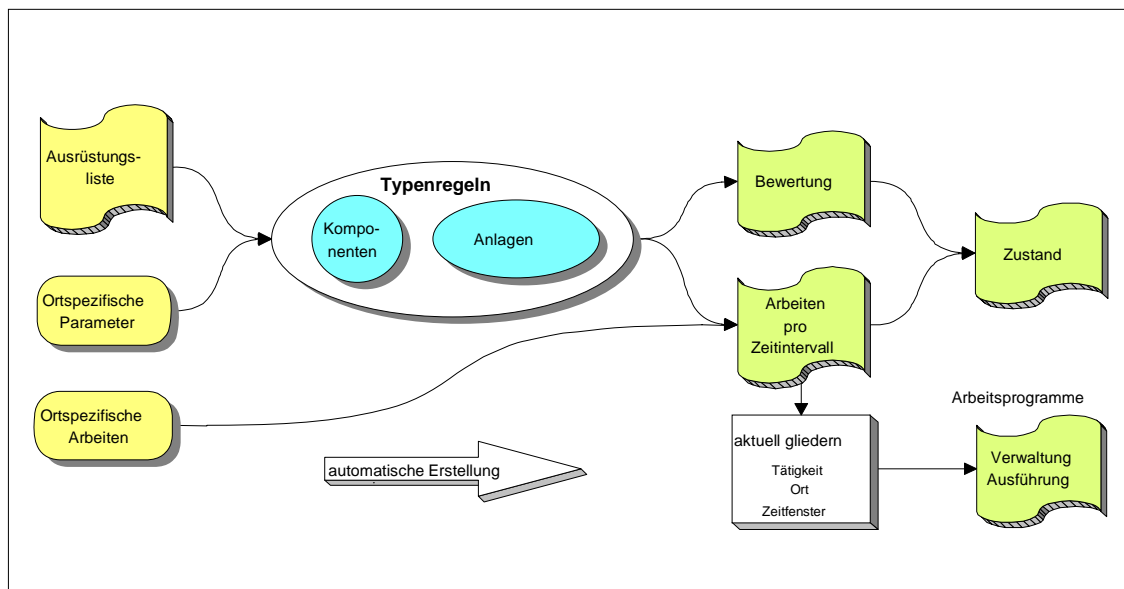


Fig. 1: Prinzip Typenregeln in der Instandhaltung [1]



Durch die Verknüpfung einer Sammlung von Typenregeln mit einem Inventar der Anlagen im Objekt kann ein Terminplan und ein Pendenzenplan für die auszuführenden Tätigkeiten erstellt werden. Das Inventar ist eine Ausrüstungsliste, basierend auf dem Anlagen-Kennzeichnungs-System (AKS).

Verknüpfung von Typenregeln mit Inventar

Damit die Typenregeln angewendet werden können, sind EM-Typen zu bilden, z.B. Transformator, Schadstoffmessstellen. Die Anzahl der Typen muss möglichst klein gehalten werden.

EM-Typen

Anwendung von Typenregeln

Es ist notwendig, die Typenregeln so zu strukturieren, dass für jeden Grundtyp aus der Sicht der Erhaltungsaktivitäten die gleiche Typenregel angewendet werden kann, unabhängig von der Funktion des Grundtyps. Ein Beispiel ist eine SPS-Unterstation, für die gleichen Unterhaltsarbeiten ausgeführt werden müssen, unabhängig davon, ob die Unterstation zur Verkehrsregelung oder zur Steuerung der Ventilation notwendig ist.

Für jeden Typ eine Typenregel

Dies kann realisiert werden, indem jeder Anlage in der Ausrüstungsliste ein oder mehrere EM-Typen zugeordnet werden, die die auszuführenden Arbeiten für diesen Typ festlegen. Zur Erstellung der Pendenzenliste wird die Ausrüstungsliste automatisch durchgegangen. Bei jeder in der Ausrüstungsliste enthaltenen Anlage werden die den Erhaltungstypen entsprechenden Typenregeln ausgelöst und die definierten Arbeiten werden in die Pendenzenliste eingetragen.

Pendenzenliste

Beispiele von Typenregeln:

- Transformator-Reinigung
- Eichung der Schadstoff-Messstellen
- Schmierung Axialventilator

Für jede Typenregel ist ein Kurzbeschreibung der Tätigkeit definiert, zusätzlich sind Angaben zu Verkehrsbeschränkungen, Personal, Aufwand und Kenngrössenerfassung enthalten. In den Typenregeln ist folglich auch die Art und der Umfang der zu erfassenden Kenngrössen geregelt.

Verkehr, Personal, Kenngrössen

3.3 Zustandsbewertung im EMS

Ein wichtiges Ziel des EMS ist die Verknüpfung der Erhaltungstätigkeiten mit einer Methode zur Zustandsbewertung. Das EMS-Instrument ermöglicht die Erfassung von Anlagen-Daten und -Kenngrößen, die für die Zustandsbewertung verwendet werden können. Die Erfassung der Daten wird in der entsprechenden Typenregel definiert.

Erfassung von Kenngrößen

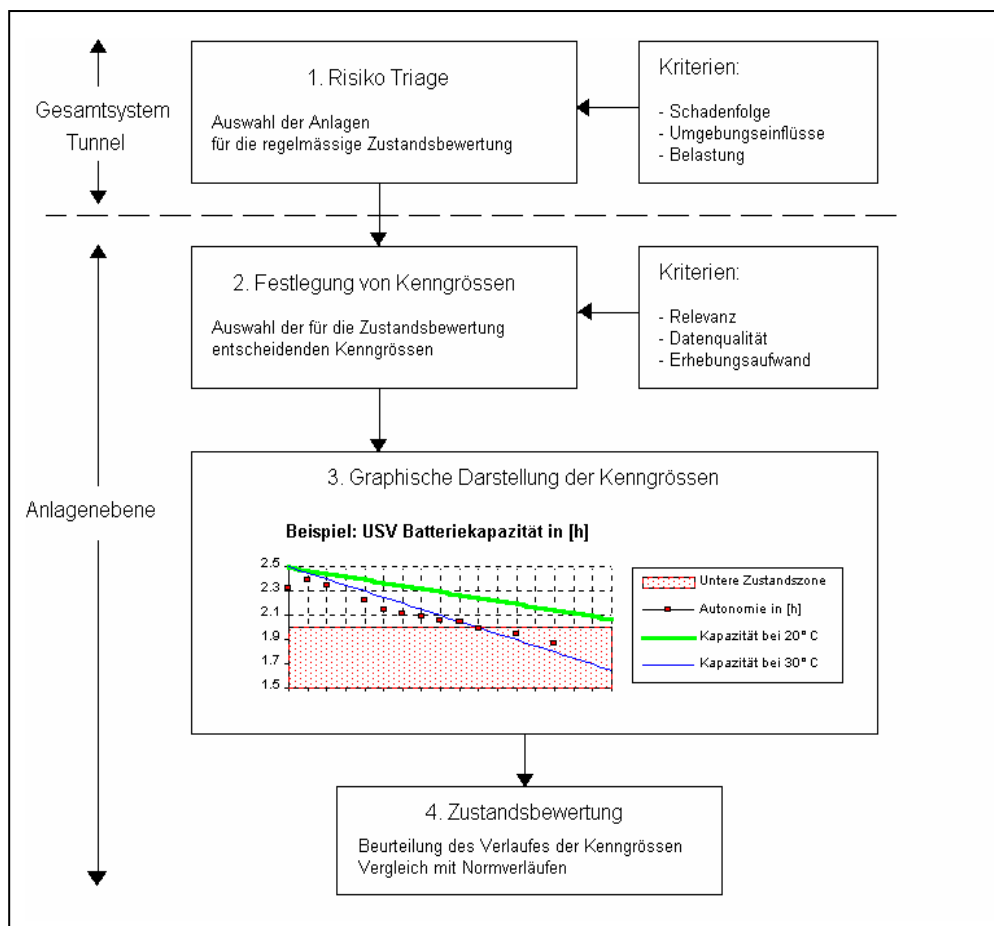


Fig. 2: Aufbau der systematischen Zustandsbewertung [1]

Die Zustandsdaten werden *graphisch*, in Form von Zeitreihen, dargestellt, damit eine einfache Beurteilung möglich wird. Der Vorschlag geht nur am Rande auf die *Qualität und Relevanz* der Kenngrößen ein; am Beispiel der USV-Batterie wird die Darstellung des wichtigen Kennwertes *Autonomie* unter Berücksichtigung des *Stressfaktors* Temperatur im Batterieraum gezeigt. Es fehlt die Beurteilung der Gesamtzuverlässigkeit der USV-Anlage.

Graphische Darstellung



4. Definition des Zustands

4.1 Zustand einer Anlage: Grundlagen

Die bisherige Definition des Systemzustands gemäss EMS [1], [2] basierte weitgehend auf einer Zustandsbetrachtung im Hinblick auf notwendige, künftige Unterhalts- oder Ersatzmassnahmen. Unter „System“ wird ein in sich geschlossenes technisches System, eine Anlage, verstanden. Es wurde dabei stillschweigend davon ausgegangen, dass ein System im Prinzip drei Zustandsbereiche umfasst.

Definition des Systemzustandes

System = Anlage

| Zustandsbereich | Definition | Bemerkung |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1 | Vollkommen funktionstüchtig | Anlage neu oder „frisch gewartet“ |
| 2 | Bez. Nutzen funktionstüchtig, Alterungserscheinungen treten auf | Zeitweise Ausfälle, Alarme stehen an, Unterhaltsarbeiten sind nötig |
| 3 | Nicht funktionstüchtig | Anlage erfüllt Nutzen nur noch z.T. regelmässige Ausfälle |

Tab. 1: Zustandsbereiche

Der Vollständigkeit halber müsste noch ein vierter Bereich definiert werden, nämlich der Bereich der Frühausfälle mit verminderter Zuverlässigkeit zu Beginn des Systemslebens. Dieser Bereich ist für die folgenden Betrachtungen jedoch nicht relevant.

Drei Zustandsbereiche

Diese Art von Zustandsbeschreibung ist weit verbreitet, sie gibt die Erwartungshaltung des Betreibers einer Anlage gut wieder. Der Zustand kann wie folgt graphisch dargestellt werden:

Erwartung des Betreibers

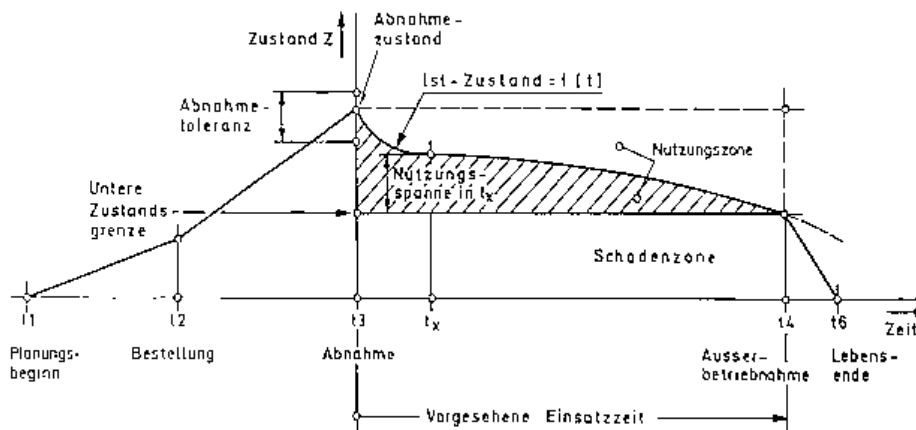


Fig. 3: Zustandsverlauf gemäss SVI/MFS [3]

Die Ausdehnung des Zeithorizontes führt zu einer Verallgemeinerung dieser Darstellung, indem von der Wartbarkeit der Systeme ausgegangen wird und die Anlagen dadurch immer wieder neue „Lebenszyklen“ durchlaufen.

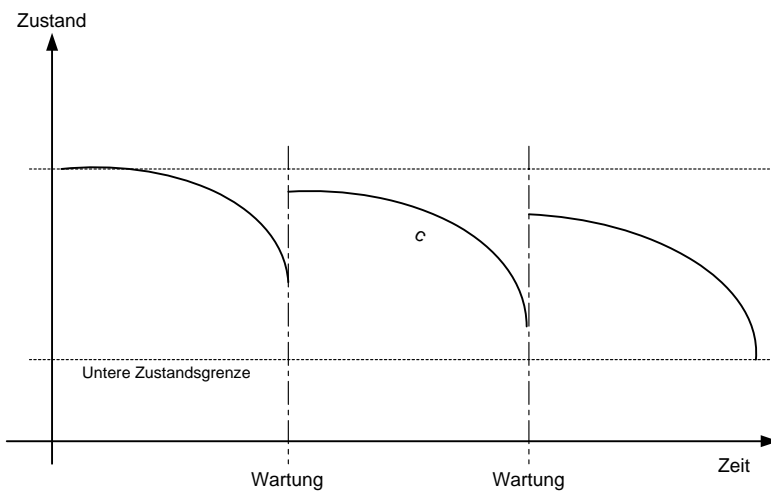


Fig. 4: Zustand und Unterhaltszyklen



Dadurch ergibt sich eine Art Definition des Zustandes aus technischer Sicht.

Der Zustand ist die Beurteilung eines EM-Systems bez. der vereinbarten Zustandsgrenzen. Der Zustand wird mit einer dimensionslosen und normierten Kennlinie dargestellt.

Definition Zustand im EMS

Ist diese Kennlinie bekannt, können daraus die Unterhaltszyklen abgeleitet werden. Zudem ist die Planung des Gesamtersatzes möglich.

4.2 Anlagen-Zustand und Zuverlässigkeit

4.2.1 Einleitung

Eine allgemein gültige Definition des Zustandes führt zwangsläufig auf den Begriff der Zuverlässigkeit. Ein Zustand eines Systems ist dann zufriedenstellend (oder innerhalb der „Zustandsgrenzen“), wenn die Anlage mit hoher Zuverlässigkeit „funktioniert“ und die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall gering ist.

Zuverlässigkeit

Wahrscheinlichkeit für Ausfall

4.2.2 Begriffe

Betrachtungseinheit

EM-Systeme sind in der Regel hierarchisch aufgebaute und im Tunnel weitverzweigte Systeme. Als sinnvolle Definition des Begriffs EM-System gilt deshalb die Betrachtungseinheit: „Unter einer Betrachtungseinheit versteht man eine Anordnung beliebiger Komplexität (Stoff, Bauteil, Unterbaugruppe, Baugruppe, Gerät, Anlage, System), welche für Untersuchungen oder Analysen als Einheit interpretiert werden“ [4]. Allerdings ist die Struktur (oder Hierarchie) der EM-Anlagen gemäss ASTRA für den konsequenten Ansatz eines allgemeinen Modells wenig geeignet. Verschiedene Anlagen sind nicht in äquivalente Untereinheiten unterteilt.

Betrachtungseinheit

Struktur EM-Anlagen

Beispielsweise sind Systeme und deren Kabelanlagen auf gleichen Stufe, jedoch in unterschiedlichen EM-Gruppen zu finden. Der Grund hierfür ist einleuchtend: Die Struktur basiert auf andern, u.a. vom Bauablauf beeinflussten Aspekten. Es sind für die Zustandsbeurteilung deshalb „Betrachtungseinheiten“ gemäss obiger Definition zu bilden.



Ausfallrate

Die Ausfallrate spielt in der Zuverlässigkeitsanalyse eine wichtige Rolle. Unter der Voraussetzung einer konstanten Ausfallrate $\lambda(t) = \lambda$ gilt $MTBF = 1/\lambda$ (MTBF: Mean Time between Failures). Wichtige Bereiche sind ausserdem die „Phase der Frühausfälle“, in der $\lambda(t)$ rasch kleiner wird und die „Phase der Verschleissausfälle“, in der $\lambda(t)$ mit zunehmender Betriebszeit schnell grösser wird.

Zuverlässigkeitsanalyse

Instandhaltbarkeit

Instandhaltbarkeit ist die Aktivität zur Erhaltung und Wiederherstellung des Sollzustandes einer Betrachtungseinheit. Dabei wird zwischen *Wartung* und *Reparatur* unterschieden. Die Grösse „Instandhaltbarkeit“ ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass der Zeitaufwand für eine Reparatur respektive für eine Wartung kleiner als eine gegebene Zeitspanne ist, wenn die Instandhaltung unter definierten Bedingungen erfolgt.

Wiederherstellung des Soll-Zustandes

Reparatur

Der Mittelwert der Reparaturzeiten heisst MTTR (Mean Time to Repair).

Mittelwert der Reparaturzeiten

Wartung

Der Mittelwert der Zeit für die Wartung heisst MTTPM (Mean Time to Preventive Maintenance).

Mittelwert Wartungszeit

Bestimmung der Ausfallrate

$\lambda(t)$ ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Betrachtungseinheit im Intervall $(t, t + \delta t)$ ausfällt. $\lambda(t)$ kann *nur experimentell* bestimmt werden, d.h. es gibt keine Herleitung der Ausfallrate aus technisch-physikalischen Eigenschaften (Kennzahlen). Für verschiedene Komponenten gibt es Resultate aus Experimenten (Ausfallratenkataloge).

Experimentelle Bestimmung

Ausfallratenkataloge

Differenzierung der Ausfallrate

Die Ausfallrate kann durch die Einführung von Faktoren π_i differenziert werden: $\lambda = \lambda_0 \cdot \prod \pi_i$. Die Faktoren π_i werden durch Grundmodelle erklärt. In der Elektronik gilt für diskrete Bauteile:

Belastungsfaktoren



$$\lambda = \lambda_b \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_A.$$

| | |
|-------------|-------------------------------|
| λ | Ausfallrate |
| λ_b | Umgebungstemperatur |
| π_E | Umweltbedingungen |
| π_Q | Fertigungsqualität |
| π_A | Bauteileigenschaft, Anwendung |

Tab. 2: Eigenschaften der π -Faktoren

Aufgrund dieses Ansatzes kann mit Hilfe von Tabellenwerken, z.B. dem MIL-HDBK-217 [5] für elektronische Schaltungen die Ausfallrate berechnet werden. Der Ansatz ist theoretisch auch für elektromechanische Systeme anwendbar, es existieren jedoch keine vergleichbare Nachschlagwerke.

MIL-HDBK-217

Zuverlässigkeit

Als Zuverlässigkeit bezeichnet man die Wahrscheinlichkeit, dass kein Ausfall in einem bestimmten Zeitintervall auftritt. Die Zuverlässigkeitsfunktion wird mit $R(t)$ bezeichnet. Der Mittelwert der ausfallfreien Zeit (MTTF = Mean Time to Failure) lässt sich berechnen:

Wahrscheinlichkeit für „kein Ausfall“

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) \delta t$$

4.2.3 Berechnung der Zuverlässigkeit

Wie oben gezeigt, geht die Zuverlässigkeitstheorie davon aus, dass die Zuverlässigkeit einer Betrachtungseinheiten *berechnet* werden kann. Dazu wird das betrachtete System in einzelne *Elemente* zerlegt – die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines (Ausfall-) Ereignisses ist sodann gleich der Zuverlässigkeitsfunktion $R_i(t)$ dieses Elementes E_i [4]. Das ganze System arbeitet ausfallfrei, wenn gleichzeitig alle Elemente $E_1, E_2, E_3, \dots, E_i$ ausfallfrei arbeiten.

Berechnung der Zuverlässigkeit

Systeme und Teilsysteme

Die Zuverlässigkeitsfunktion des Systems wird – bei der Annahme von unabhängigen Elementen – durch das Produkt gebildet:

Zuverlässigkeitsfunktion



$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

Die Ausfallrate des Systems ergibt sich aus der Summe der Ausfallraten:

Summe der Ausfallraten

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)$$

Weisen die Elemente konstante, von der Zeit unabhängige Ausfallraten auf (bei verschleissfreien, elektrischen und elektronischen Elementen in der Regel der Fall) ergibt sich für die Systemzuverlässigkeit

Verschleiss

$$R(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t}$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

Die Zuverlässigkeit strebt folglich mit einer Exponentialfunktion gegen Null. (Die obige Herleitung geht von der Annahme von *nicht-redundanten* Systemen aus.)

Exponentialfunktion

4.2.4 Zuverlässigkeit: Praxis-Beispiel „USV-Anlage“

Ein namhafter USV-Hersteller gibt für die Ausfallrate λ einen Wert von rund 1 / 250.000 Stunden an. Als Empfehlung werden folgende Ersatzmassnahmen angegeben:

USV-Anlage

| | |
|------------------------|----------------------|
| Kondensatoren | nach 10 Jahren |
| Ventilatoren | nach 5 Jahren |
| Backup-RAM-Batterie | nach 10 Jahren |
| Batterien, je nach Typ | nach 3 ... 15 Jahren |

Damit lässt sich die Zuverlässigkeitsfunktion wie folgt darstellen:

$$R(t) = e^{-0.0345t}; \quad t \text{ [Jahre]}$$

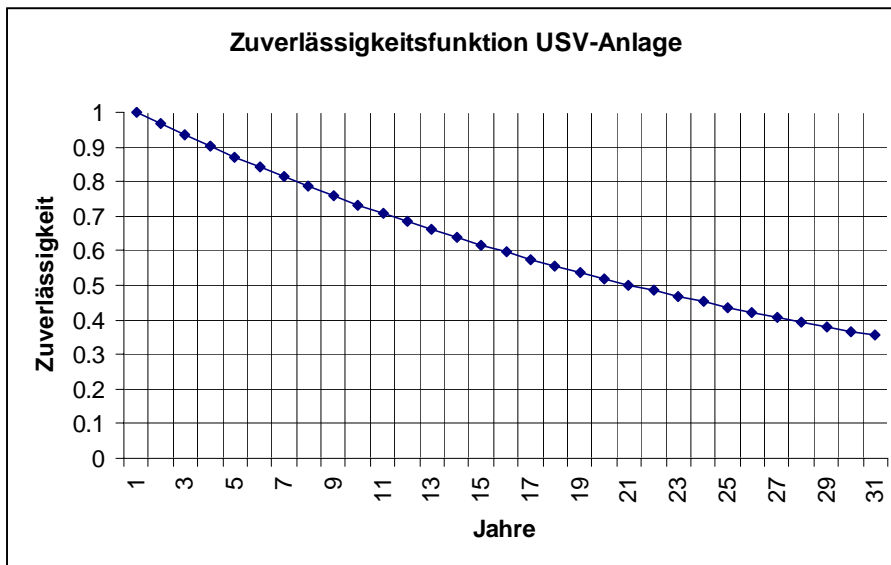


Fig. 5: Zuverlässigkeitsfunktion USV-Anlage

Fragen und Folgerungen

Die Anlage weist also nach 5 Jahren eine Zuverlässigkeit von 85 %, nach 10 Jahren von 70 % auf, d.h. innert 10 Jahren (d.h. vor der ersten Ersatz-Massnahme) fallen, statistisch betrachtet, 3 von 10 Anlagen aus. Die Werte erscheinen nicht als sonderlich hoch. Folgende Fragen stellen sich:

- Ist diese Zuverlässigkeit ausreichend oder muss sie erhöht werden?
- Durch Messung welcher Kenngrössen kann der obige „Normverlauf“ bestätigt werden?
- Wie sieht die optimale Erhaltungsstrategie für obige Anlage aus?

Zuverlässigkeit
theoretisch

Kenngrössen

Erhaltungsstrategie

Es können folgende, vorläufige Schlüsse gezogen werden:

- Für überschaubare Systeme wie eine USV-Anlage ist die Zustandsbeobachtung mittels Ausfallrate λ sinnvoll.
- Das vom Hersteller abgegebene λ ist ein Ausgangswert, der durch geeignete Massnahmen verifiziert oder angepasst werden muss.
- Neben der Kenngrösse λ sind die „Stressfaktoren“ π (Umweltbedingungen, Temperatur, etc.) zu berücksichtigen.
- Die Zustandsbetrachtung ist nur mittels detaillierter Herstellerdaten möglich, d.h. bei vernetzten Systemen (z.B. Ventilation!) wird aufgrund fehlender Daten eine Vorausberechnung des Zustands / der Zuverlässigkeit kaum möglich sein.

Verifizierung λ

Herstellerdaten
Vernetzte Systeme



4.2.5 Zuverlässigkeit: Praxis-Beispiel „Erfassung“

Sind vom Hersteller keine Ausfallraten λ verfügbar – was die Regel darstellt – können die Zahlen auch selber erfasst werden. Damit die Zuverlässigkeitswerte Aussagekraft erhalten, muss über einen entsprechenden Zeitraum Datenmaterial gesammelt werden. Bei Anlagen mit hoher Zuverlässigkeit ist die eigene Erfassung dadurch schwierig bis unmöglich.

Erfassung

Im Kanton Genf wird der Unterhalt von einer Unternehmung durchgeführt, die detaillierte Zuverlässigkeitsdaten erfasst.

| Anlage | Ausfälle, bezogen auf alle registrierten Ausfälle in einem halben Jahr |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Klima-Anlage technische Räume | 9 % |
| CO/ST-Messanlage | 4 % |
| SOS-Anlage | 4 % |
| Kamera | 4 % |
| Gruppe von SOS-Anlagen | 3 % |
| Prismen-Anzeigetafel | 3 % |
| Logikfunktion | 3 % |
| ... | ... % |

Tab. 3: Statistik der Anlagen-Ausfälle

Die Ausfälle werden im weiteren bez. ihrer Ursachen bewertet.

| Ausfall-Ursache | Anteil |
|-----------------|--------|
| Elektronik | 30 % |
| Elektrik | 14 % |
| Software | 13 % |
| Verschleiss | 12 % |
| ... | ... % |

Tab. 4: Ausfall-Ursachen



Diese Daten sind insofern interessant, dass aufgrund der Kenntnis der Ausfallursache die Zuverlässigkeitsmechanismen eingegrenzt werden – oder allenfalls spezifische Kenngrößen auf Anlagen / Subsystem-Ebene definiert werden können.

Folgerungen:

- Die detaillierte Datenerfassung erlaubt Aussagen bez. kritischer Anlagen und Elemente von Anlagen
- Der Unterhalt kann zielgerichteter durchgeführt und optimiert werden
- Die Anlagen-Zuverlässigkeit kann bei langen Betrachtungsperioden ermittelt werden.

4.3 Erweiterter Zustandsbegriff

Der Zustandsbegriff darf nicht allein auf ein technisches System, eine Anlage beschränkt werden, er muss mit Blick auf das „System Strasse“ erweitert werden. Jedes elektromechanische System hat einen unterschiedlichen Einfluss auf das System Strasse, ein Funktionieren (oder Nicht-Funktionieren) einer EM-Anlagen betrifft verschiedene Eigenschaften des Systems Strasse – und dies in unterschiedlich hohem Ausmass.

Eine Bewertung kann mittels einer Tabelle nach folgendem Muster erfolgen (VSS EK 7.08, [1]).

| | Betriebsbereitschaft | Leistungsfähigkeit | Verkehrssicherheit | Benutzerfreundlichkeit (Automobilist) | Substanz erhaltung | Wirtschaftlichkeit | Umweltverträglichkeit |
|--------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| Energieversorgung | | | | | | | |
| Beleuchtung | | | | | | | |
| Lüftung | | | | | | | |
| Signalisationsmittel | | | | | | | |
| Mess- und Überwachungselemente | | | | | | | |
| Ausrüstungen in Werkhöfen | | | | | | | |
| Kabelanlagen | | | | | | | |
| Nebeneinrichtungen | | | | | | | |

Tab. 5: Einfluss der EM-Anlagen auf die Eigenschaften des „Systems Strasse“, hier ohne Bewertungseinträge



Durch die Erweiterung des Zustandsbegriffs verlässt man die fachlich/technisch dominierte Zustandsbewertung. Begriffe wie Umweltverträglichkeit und Sicherheit sind gesellschaftlichen und politischen Beurteilungen unterworfen und können relativ rasch ändern. Als Beispiel sei die Katastrophe im Mont Blanc-Tunnel im Frühjahr 1999 erwähnt: Dieses Ereignis hat auch in der Schweiz zu einer unmittelbaren Neubeurteilung der Sicherheit von langen einröhrigen Tunnels geführt. Es wurden allerdings keine einschneidenden, neuen Massnahmen als notwendig erachtet.

5. Kenngrößen

5.1 Einleitung

Im EMS-Projekt werden Kenngrößen definiert, um folgende Ziele zu erreichen [2]:

- Hinreichende Beschreibung des Zustands einer Anlage mittels Kenngrößen
- Durch Darstellung und graphische Verknüpfung der Kenngrößen soll eine Grundlage für die Zustandsbewertung geschaffen werden.

Die Kenngrößen werden aufgrund von Betriebs- und Herstellererfahrung zusammengestellt und für die Vergleichbarkeit normiert: <1 = ungenügender Zustand, 1 = Soll-Minimum, 2 = Soll-Maximum.

Kenngrößen im EMS

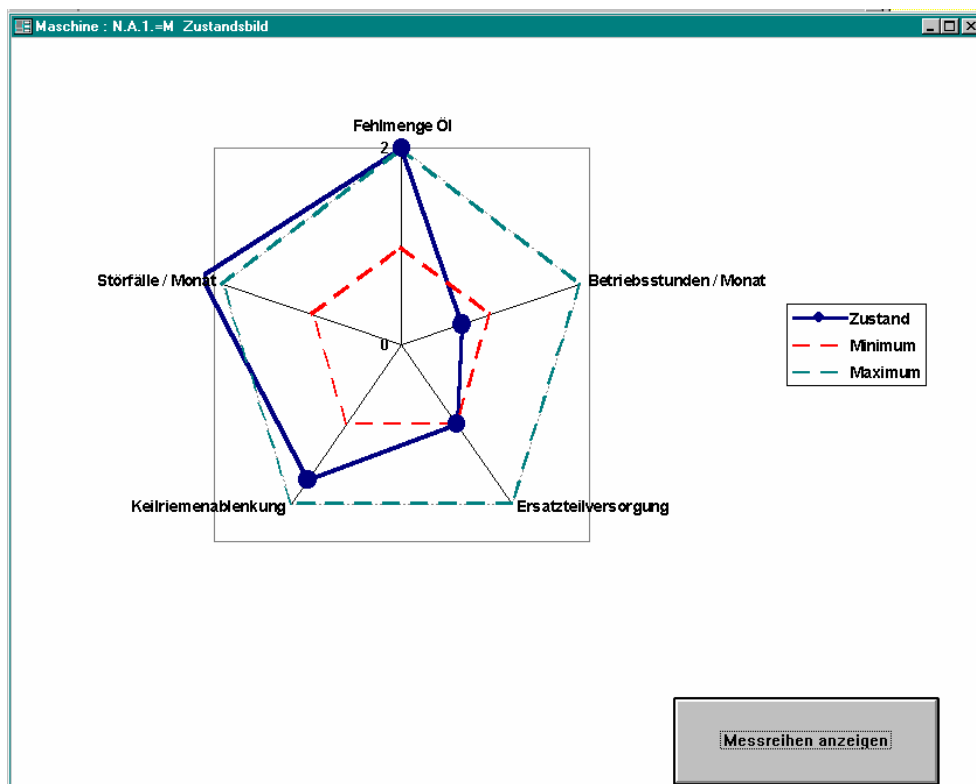


Fig. 6: Zustandsbild als Radialdiagramm [2], Systemebene

Das hier gezeigte Beispiel beschränkt sich auf die System-Ebene, berücksichtigt also keine übergeordneten Elemente, wie z.B. Sicherheitsfragen des „Systems Strasse“.



Als Kenngrößen werden verwendet (Beispiele):

| System | Kenngrösse |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| USV | Autonomiezeit Anzahl Ausfälle Umgebungstemperatur Verfärbung Batteriemodule Alter |
| Ventilation | Verschmutzungsgrad Mechanischer Zustand Anzahl Störfälle Betriebsstunden Ersatzteilversorgung |
| Software | Update-Zyklus Support-Qualität System-Stabilität |

Tab. 6: Beispiele von Kenngrößen

5.2 Definition von Kenngrößen

Definition: Kenngrößen sind mess- oder beobachtbare Größen von EM-Anlagen, Anlagen-Gruppen oder übergeordneten Einheiten, die Informationen liefern über

den *momentanen Betriebszustand*

Momentaner Zustand

- Betriebs- und Nutzungsdauer
- Zuverlässigkeit (Anzahl Ausfälle pro Zeiteinheit, Ausfallmodus, Reparaturzeiten)
- Technologie (Lampentyp, Motorentyp)
- Qualitätsniveau (Qualitätsklasse)

und die Hinweise auf den den *künftigen Betriebszustand* geben

Künftiger Zustand

- Sicherheitsfaktoren oder -koeffizienten
- Betriebsart (mechanische oder elektrische Belastung, Lastgang: stationär, alternierend, mit Spitzen)
- Betriebsumgebung (Umgebungstemperatur, Feuchte, Vibrationen, Staub)
- Wartung (Wartungsdichte, Ersatzrate, externer Support, Ersatzteilverfügbarkeit)



Kenngrossen können auch definiert werden, nur spezielle Rahmenbedingungen zu erfassen, z.B. aus dem Bereich Umweltrelevanz, Energie, Sicherheit für Verkehrsteilnehmer und Personal.

Diese sehr breite Definition lässt es zu, für eine EM-Anlage im übergeordneten Kontext der Strasse (Strassenabschnitt, Tunnel) eine Zustandsbewertung mittels Radialdiagramm zu erstellen, das als Entscheidungsgrundlage dienen kann, da sie alle für einen Entscheid relevanten Aspekte berücksichtigen kann. Es ist allerdings auch klar, dass aufgrund fehlender Unabhängigkeit (Orthogonalität) der Kenngrossen keine exakte mathematische Aggregation sinnvoll ist, die den Zustand in Form einer Zahl darstellt.

Im mathematischen Sinne können allerdings Kenngrossen für die Modellierung und Beurteilung der Zuverlässigkeit verwendet werden:

- Als Datengrundlage für die Schätzung von Modellparametern (Ausfallraten, Reparaturraten, Übergangsraten)
- Als Datengrundlage für die Differenzierung von Modellparametern ($\lambda = \lambda_0 \cdot \prod \pi_i$)
- Als Beurteilungsgrundlage für die empirische Einschätzung des Anlagenzustandes. Das ist ein Teil der Zustandsbewertung, die durch das Tiefbauamt in letzter Instanz durchgeführt wird. Dazu werden auch empirische Regeln und Erfahrung eingesetzt. Beispielsweise kann bei einer Batterieanlage mit einer grossen Anzahl verfärbter Module ein Ersatz vorgenommen werden, ohne dass ein Modell dies nahelegt.

**Kenngrossen als
Datengrundlage**

**Kenngrossen als Beur-
teilungsgrundlage**

5.3 Relevanz von Kenngrossen bez. der sicherheitstechnischen und risikobezogenen Beurteilung des Systems Strasse

5.3.1 Einleitung

Am Beispiel eines Tunnels – der über eine grosse Breite an EM-Ausrüstungen verfügt – soll vorerst gezeigt werden, was „sicherheits-technische und risikobezogene Beurteilung“ bedeutet.

Ein Tunnel ist bez. obiger Kriterien betriebsbereit, falls er über folgende Medien / Mittel verfügt:

- Licht
- Luft
- Kommunikation



Die Sicherstellung dieser Medien muss selbstredend in gewissem Ausmass auch im Notfall (Stromausfall, Anlagen-Ausfall, Schaden, Brand) gewährleistet sein, d.h. es sind für alle Systeme

- Redundanzen und/oder Rückfallebenen bereitzustellen. (Nicht betrachtet werden hier nicht-technische Elemente, die ebenso wichtig für die Risikobeurteilung sind: Polizei, Feuerwehr, Sanität; deren Organisation, Logistik, Materialbereitstellung etc.)

Aus der obigen Definition lassen sich die Kenngrössen bez. Ihrer Relevanz grob in zwei Klassen einteilen:

Zwei Klassen

- Kenngrössen zur *Beurteilung der statistischen Zuverlässigkeit* eines Systems mittels einer Modellbetrachtung. Aufgrund von Herstellerdaten und eigenen Messungen lässt sich eine Zuverlässigkeitsfunktion errechnen und in der Praxis verifizieren.
- Kenngrössen zur Erarbeitung einer *empirischen Einschätzung* des Anlagenzustandes. Dies entspricht dem bisherigen Ansatz. Kenngrössen können physikalische Grössen, Beobachtungen, Umweltbedingungen, etc. sein.

Statistische Zuverlässigkeit

Empirische Einschätzung

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Auswahl der Kategorie und den möglichen Einsatz der Kenngrössen.

| Kenngrösse | Beschreibung | Herkunft |
|------------|-----------------------------------|--------------------------|
| λ | [1] Ausfallrate | Hersteller |
| π_E | [1] Umweltbedingungen | ermittelt über Messungen |
| π_A | [1] Bauteil-, Systemeigenschaften | Hersteller |
| π_Q | [1] Qualitätsstandard | Hersteller, ermittelt |
| t_N | [s] Nutzungsdauer | ermittelt |
| t_B | [s] Betriebsdauer | ermittelt |
| (...) | [...] Verschmutzung | ermittelt |
| (...) | [...] Korrosion | ermittelt |
| T | [°C] Temperatur | ermittelt |
| V | [s/m ²] Vibration | ermittelt |
| U | [V] Spannung | ermittelt |
| I | [A] (Anlauf-)Strom | ermittelt |
| F | [%] Feuchte | ermittelt |
| L_D | [cd/m ²] Leuchtdichte | ermittelt |
| t_N | [s] Nutzungsdauer | ermittelt |
| t_B | [s] Betriebsdauer | ermittelt |
| | [1] Sicherheitskoeffizient | ermittelt |
| | [1] Technischer Support | ermittelt |
| | [1] Ersatzteilverfügbarkeit | ermittelt |
| | [1] Umweltkoeffizient | ermittelt |

Tab. 7: Kenngrössen für Zuverlässigkeitsbeurteilung und Zustandseinschätzung

Folgerung:

Kenngrossen müssen für jede Anlage separat unter folgenden Aspekten bestimmt werden:

- Sicherheitsrelevanz für das System Strasse
- Verfügbarkeit von Informationen (Beobachtbarkeit, Messbarkeit)
- Eigenschaften und Funktion der Anlage (Sicherheit, Wartungskosten)
- Datenbankaspekte (Datenhandling, Datenmodell)
- Modellierung stochastischer Prozesse (Modelltyp, Computerressourcen) definiert werden.

EM-Anlagen bez. Sicherheitsrelevanz



5.3.2 Licht

Beleuchtungsanlagen können in minimal drei Kategorien eingeteilt werden.

- Adaptationsbeleuchtung
- Durchfahrtsbeleuchtung
- Brandnotbeleuchtung

Die Brandnotbeleuchtung hat die höchste Priorität bez. der Risiko- und Sicherheitsbeurteilung, da sie als eigentliche Notbeleuchtung ab USV konzipiert ist. Im weiteren werden i.d.R. Teile der Durchfahrtsbeleuchtung als Notbeleuchtung eingesetzt, d.h. ab USV versorgt (USV-Kenngrössen: vgl. Kapitel Stromversorgung). Dadurch ergeben sich folgende *relevante Kenngrössen*:

**Brandnot-
beleuchtung**

**Durchfahrts-
beleuchtung**

| Kenngrösse | Beschreibung | Anlage | Wertebereich |
|------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| [1] | Verschmutzung, Korrosion | Brandnot- beleuchtung Durchfahrts- beleuchtung inkl. Steckver- bindungen, Anschlüsse | gross, mittel, klein, unbedeutend |

Tab. 8: Relevante Kenngrössen „Licht“

Die weiteren Kenngrössen betreffen die redundante Stromversorgung, die auch für andere Systeme verwendet wird (s. unten).

5.3.3 Luft

Die Ventilationsanlage ist das entscheidende Sicherheitselement im Tunnel ab 1 ... 1,5 km Länge und gewährleistet im Notfall die Rauchabsaugung und die Frischluftzufuhr. Die *relevanten Kenngrössen sind* (für Axial- und Längsventilatoren):

**Rauchabsaugung
Frischluftzufuhr**



| Kenngrosse | Beschreibung | Anlage | Wertebereich |
|------------|-----------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| [1] | Verschmutzung, Korrosion | Ventilator | gross, mittel, klein, unbedeutend |
| [1] | Korrosion | Ventilatorbe- festigung, -aufhängung | gross, mittel, klein, unbedeutend |
| t | [h] Betriebsstunden | Ventilator | O ... X; Revisionen bei überschreiten von bestimmten Betriebszeiten |
| I | [A] Anlaufstrom | Ventilator | Soll-Bereich gemäss Hersteller |
| (...) | [1] Umweltkoeffizient | Anlage | kleiner Grenzwert, grösser Grenzwert |
| [1] | Sicherheitskoeffizien | Anlage | kleiner Grenzwert, grösser Grenzwert |

Tab. 9: Relevante Kenngrössen „Luft“

Im weiteren sind die Stromversorgung bez. Redundanz (Einspeisung) sowie die Steuerung zu betrachten. Die Kenngrössen hängen von der spezifischen Ausführung der Anlage ab.

5.3.4 Kommunikation und Überwachung

Zu den sicherheitsrelevanten Kommunikationsanlagen zählen:

- (Übergeordnete) Leitsysteme
- Kommunikationsnetze mit passiven und aktiven Komponenten
- VTV-Anlagen
- Nationalstrassen-Telefon
- Funk
- Drahtlose Telefonie
- Brandmeldeanlage



Diese Anlagen haben sehr unterschiedliche und heterogene Charakteristiken, es gibt jedoch auch Gemeinsamkeiten: Es sind elektronische, solid-state-Systeme (keine bewegten Teile) mit Software-Steuerungen. Die Komponenten sind, sofern sie im Tunnelraum montiert sind, der Verschmutzung und Korrosion unterworfen (Kameras, NT-System). Dadurch ergeben sich folgende *relevanten Kenngrössen*:

| Kenngrösse | Beschreibung | Anlage | Wertebereich |
|------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| [1] | Verschmutzung, Korrosion | Kameras, NT-System, Verkabelung | gross, mittel, klein, unbedeutend |
| [1] | Techn. Support, update Management | Software Leitsystem inkl. Komponenten | gross, mittel, ungenügend |
| [1] | Ersatzteilverfügbarkeit | Brandmeldeanlage, Funkanlagen, Hardware leitsystem, NT-System, VTV-Anlage | gewährleistet, eingeschränkt, nicht gewährleistet |

Tab. 10: Relevante Kenngrössen „Kommunikation und Überwachung“

5.3.5 Stromversorgung

Neben der redundanten Einspeisung eines Objektes ist vor allem die USV-Anlage als sicherheitsrelevant zu betrachten. Die *relevanten Kenngrössen* sind:



| Kenngrosse | Beschreibung | Anlage | Wertebereich |
|------------|-------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| [1] | Allg. Zustand | Hochspannungsanlage, Niederspannungs-Hauptverteilung | Sichtkontrolle: gut, Mängel vorhanden |
| [1] | Thermographischer Koeffizient | dito | Bei fehlender Redundanz in der Einspeisung: z.B. thermographische Untersuchungen |
| U | [V] Zellenspannung Batterie | USV | innerhalb Soll-Grenzen |
| [1] | Verfärbung Batteriemodule | USV | ja, leicht, nicht sichtbar |
| T | [°C] Raumtemperatur | Batterie | 20 ... 25 °C |
| A | [h] Autonomie | USV | Innerhalb Soll-Grenzen |

Tab. 11: Relevante Kenngrössen „Stromversorgung“

5.4 Relevanz von Kenngrössen bez. Zustandsbewertung der Ausrüstungen

Betrachten wir lediglich die Zustandsbewertung der EM-Anlage, ohne Einbezug der übergeordneten Kriterien gemäss vorigem Kapitel, reduziert sich die Auswahl und Relevanz der Kenngrössen auf die Zielsetzung der möglichst genauen und bez. Ersatz genügend umfassendem Kenntnis des System-Zustandes.

Die Relevanz der Kenngrössen in Bezug auf die EM-Systeme gibt die folgende Tabelle an. Es ist in der Regel von einem allgemeingültigen „Set“ von Kenngrössen pro Anlage auszugehen, wobei einige Ausnahmen dieser Regel zu beachten sind:

- Anlagen gleichen Typs, die jedoch sehr unterschiedlichen Umweltbedingungen unterworfen sein können (z.B. Beleuchtungsanlage in einer Tunnelvorzone in den Alpen im Vergleich zum Stadttunnel: der vermehrte Salzeintrag im Alpentunnel erfordert eine Anpassung des Kenngrössen-Sets).

Kenngrössen-Set

Umweltbedingungen



- Anlagen gleichen Typs mit unterschiedlich komplexen Aufbau: das Kenngrössen-Set muss der Komplexität Rechnung tragen, evtl. sind die Subsysteme separat zu bewerten.

Anlagen-Komplexität

| Anlagen | Kenngrössen | | | | | | | | | | | | | | Leuchtdichte L_D [Cd/m ²] | Feuchte F [%] | | | |
|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------|----------------|-------------|-----------------------------------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|
| | Ausfallrate λ [1] | Umweltbedingungen π_E [1] | Systemeigenschaften π_A [1] | Systemzustand π_{CI} [1] | Reparaturrate μ [1] | Nutzungsdauer t_N [s] | Betriebsdauer t_B [s] | Mess-Zeit t_M [s] | Verschmutzung [hoch, mittel, klein] | Korrosion [hoch, mittel, klein, nicht feststellbar] | Temperatur [°C] | Vibration V [m/s ²] | Spannung U [V] | Strom I [A] | | | Leistung P [W] | Energie E [kWh] | Widerstand [Ω] |
| ATM-Netzwerk | X | X | X | X | X | | | | | | | | | | | | | | |
| Barrieren / Toranlagen | | | | | | X | X | | X | X | | | | | | | | | |
| Beleuchtungsanlagen | X | | | | | | | | X | | | | | | | | | | X |
| Brandmeldeanlagen (Linien) | | | | | | X | | | X | | | | | | | | | | |
| Brandnot-Fluchtwegbeleuchtung | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| EMS-Anlage | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Frostwarnanlage | X | | | | X | | X | | X | X | | | | | | | | | |
| Funkanlage | X | | | | X | | X | | | | | | | | | | | | |
| Hausinstallation | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Kommunikation / Leittechnik | X | | | | X | | X | | | | | | | | | | | | |
| Krananlagen / Hebezeuge | X | | | | | | | | X | X | X | | | | | | | | |
| MS-Anlage | | | | | | | | | | | X | | | X | X | X | X | | |
| Notruftelefonanlage | X | | | | X | | X | | X | X | | | | | | | | | |
| NS-Anlage | | | | | | | | | | | | | X | X | X | X | | | |
| Oelabscheider / Rückhaltebecken | | | | | | | | | X | | | | | | | | | | |
| Raumlüftungs- / Klimaanlage | X | | | | | X | | | | | X | | | | | | | | X |
| Schadstoff / Sichttrübung | X | | | | X | | | | X | X | | | | | | | | | |
| Telefonanlage | X | | | | | | X | | | | | | | | | | | | |
| Unterflurbefeuerungsanlage | | | | | | | X | | X | | | | | X | | X | | | |
| USV | X | X | X | X | X | | | | | | X | | | | X | | | | |
| Ventilation (Axial) | | | | | | X | X | | X | X | | X | | | X | | | | X |
| Ventilation (Strahl) | | | | | | X | X | | X | X | | X | | | X | | | | X |
| Verkehrserfassung / Ereignisdetektion | X | | | | X | | X | | X | X | | | | | | | | | |
| Verkehrsfotografieanlage | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Verkehrsregelungsanlage | X | | | | X | | | | | | | | | | | | | | |
| Wasserversorgung/Pumpenanlage | X | | | | | X | X | | | | | | | X | X | | | | |
| Zutrittskontroll-/Schliessanlage | X | | | | X | | X | | | | | | | | | | | | |

Tab. 12: Auswahl von relevanten Kenngrössen für EM-Anlagen (alphabetisch geordnet, nicht nach „ASTRA-Raster“)

Die Zustandsbewertung mittels Kenngrössen ist für jedes EM-System sinnvoll und anwendbar; allerdings wird die Kenngrösse Nutzungs- bzw. Betriebsdauer für gewisse Anlagen ausreichend sein.

5.5 Relevanz von Kenngrössen bez. Erhaltungsmassnahmen

Es ist ebenso entscheidend, die relevanten Kenngrössen für die Zustandsbewertung zu kennen, um die geeigneten präventiven Erhaltungsmassnahmen durchführen zu können.



Es ist vorerst eine *Erhaltungsstrategie* zu formulieren, bevor die relevanten Kenngrößen bestimmt werden können. Die Erhaltungsstrategie hängt von verschiedenen Faktoren ab: Oekonomische Beurteilung, Randbedingungen, Verkehr und andere (Bau-) Erhaltungsmaßnahmen, etc. Beispielsweise werden für die Durchfahrtsbeleuchtung in verschiedenen Objekten unterschiedliche Verfahren angewandt: Gesamtersatz nach einer gewissen Brenndauer (Kenngrösse Betriebszeit), Ersatz der defekten Lampen während Reinigungseinsätzen, Gesamtersatz nach einer bestimmten Ausfallquote, z.B. 5 %.

Für alle Fälle gilt, dass *die gleichen Gruppen von Kenngrößen*, wie vorgängig beschrieben, *anwendbar und relevant* sind. Auch hier ist für die Zustandsbewertung ein systematischer Ablauf notwendig, der auch eine Aufwand / Nutzenüberlegung miteinbezieht.

Ist das Kenngrößen-Set bestimmt und allenfalls verifiziert, kann der Weg zur Zustandsdarstellung und –bewertung skizziert werden. Der Weg führt über 2 möglichen Routen, wobei eine eher theoretische und eine praktisch (empirische) – oder eine Kombination von beiden – denkbar ist. (Der theoretische Weg ist im folgenden Kapitel 6 beschrieben.) Dies untenstehende Ablaufdiagramm zeigt die einzelnen Schritte im Detail auf.

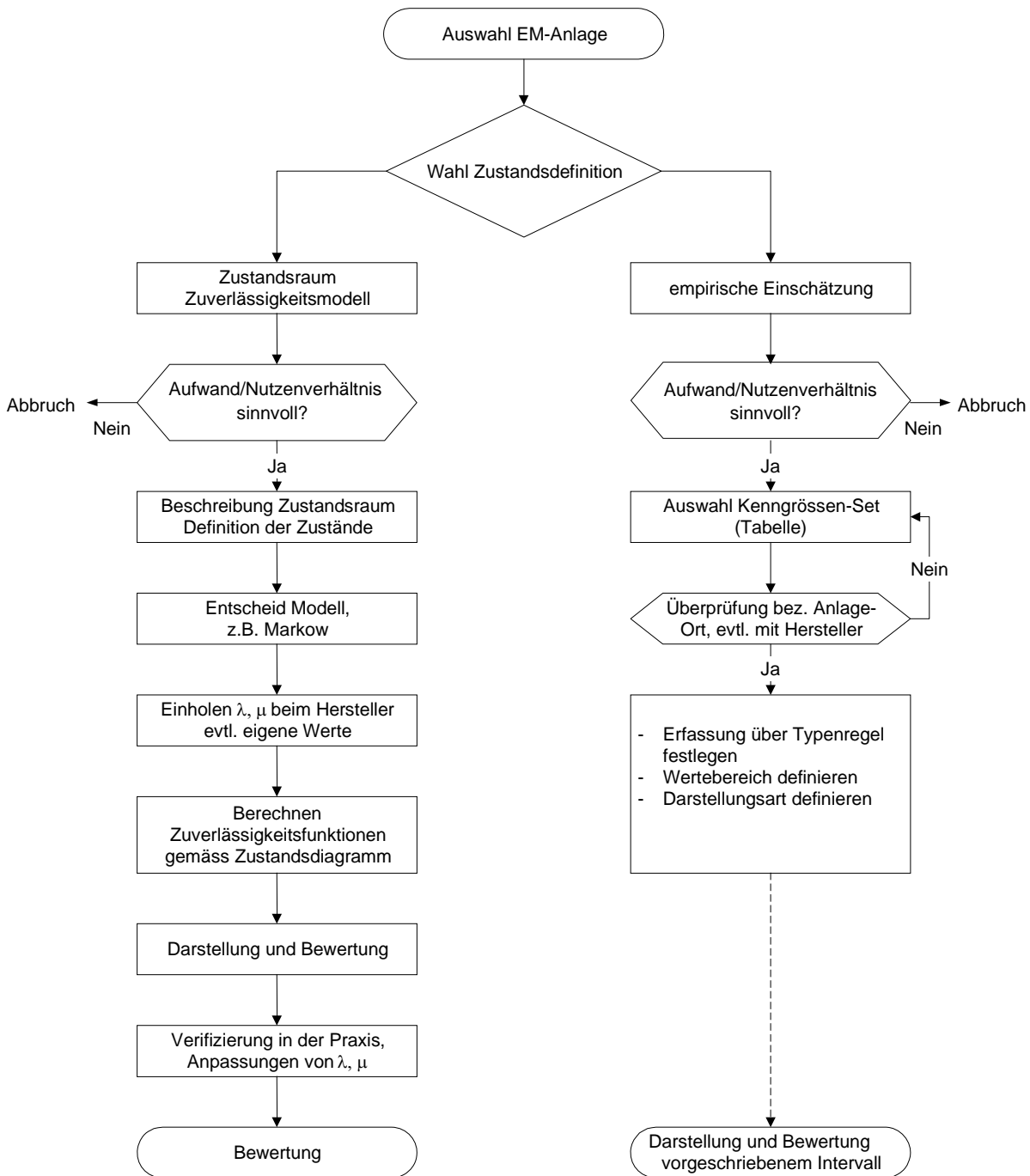


Fig. 7: Herleitung der Zustandsbewertung für eine EM-Anlage mit definiertem Kenngrössen-Set



6. Markow-Prozesse

6.1 Einleitung und Begriffe

In diesem Kapitel wird geprüft, ob sich Markow-Prozesse für die Analyse des Systemzustands bzw. der Zuverlässigkeit von EM-Anlagen eignen. Die bisherigen Überlegungen haben gezeigt, dass Zuverlässigkeitsanalysen für einen Teil der EM-Systeme grundsätzlich denkbar sind [vgl. Tab. 5].

**Eignung von
Markow-Prozessen**

Die Analyse der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit reparierbarer Systeme erfolgt mit Hilfe stochastischer Prozesse. Häufige Vereinfachungen sind, dass für ein System nur eine Reparaturmannschaft zur Verfügung steht und dass im Ausfallzustand auf Systemebene keine weiteren Ausfälle auftreten können. (Der Begriff der Reparierbarkeit ist in diesem Zusammenhang wichtig, da man davon ausgeht, dass durch die Reparatur der frühere Zustand wieder erreicht werden kann. Zudem wird die Reparaturrate μ (t) auch mathematisch beschrieben: exponentiell verteilte Reparaturzeiten.)

**Stochastische
Prozesse**

Reparierbarkeit

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über stochastische Prozesse, wobei nicht auf alle Begriffe im Detail eingegangen wird:

| Stochastischer Prozess | kann verwendet werden für die Untersuchung von | Grundlagen | Schwierigkeitsgrad |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------|
| 1. Erneuerungsprozess | Einzelelement mit beliebigen Ausfallraten und vernachlässigbaren Reparaturzeiten | Erneuerungstheorie | mittel |
| 2. Alternierender Erneuerungsprozess | Einzelelement mit beliebigen Ausfall- und Reparaturraten | Erneuerungstheorie | mittel |
| 3. Markow-Prozess (zeithomogen) | Betrachtungseinheiten beliebiger Struktur, aber mit zeitunabhängigen Ausfall- und Reparaturraten | Differentialgleichungen | klein |
| 4. Semi-Markow-Prozess | Betrachtungseinheiten mit zeitunabhängigen Ausfallraten, beliebigen Reparaturraten, nur einer Reparaturmannschaft | Erneuerungstheorie | mittel |
| 5. Semi-regenerativer Prozess | Betrachtungseinheiten mit zeitunabhängigen Ausfallraten, beliebigen Reparaturraten; verschiedene Strukturen mit weitgehend beliebigen Ausfall- und Reparaturraten | Integralgleichungen | gross |
| 6. Nicht regenerativer Prozess | Betrachtungseinheiten mit beliebigen Ausfall- und Reparaturraten | Anspruchsvolle Methoden | gross bis sehr gross |

Tab. 13: Vergleich stochastischer Prozesse

Als Punkt 3 erscheint in der Tabelle der Markow-Prozess. Zeitunabhängige Ausfallraten heisst, dass die Ausfallrate sich über die Benutzungsdauer nicht verändert, wie es zum Beispiel bei dem Verschleiss unterworfenen Teilen der Fall ist.

Markow-Prozesse werden wie folgt definiert [4].

Der homogene Markow-Prozess mit endlich vielen Zuständen kann für die Analyse von reparierbaren Systemen mit konstanter Ausfallrate und Reparaturrate (exponentiell verteilte ausfallfreie Arbeitszeiten und Reparaturzeiten) verwendet werden. Die Zustände des Prozesses beschreiben den Systemzustand. So geben sie an, ob das System in Betrieb oder ausgefallen ist, welche Elemente noch in Betrieb sind und welche gerade repariert werden. Die Markow-Eigenschaft besagt, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Übergang von einem beliebigen Zustand Z_i zur Zeit t in einen Zustand Z_j zur Zeit $t + \delta t$ nur vom momentanen Zustand und nicht von der Vorgeschichte bis zur Zeit t abhängt. Man spricht in diesem Zusammenhang von der Gedächtnislosigkeit des Markow-Prozesses.



6.2 Anwendung der Markow-Prozesse

Für Systeme, die mit den Markow-Prozess beschrieben werden sollen, muss ein *Zuverlässigkeitsmodell* erstellt werden können. Folgende Voraussetzungen gelten:

- Erstellung eines Zuverlässigkeitsblockdiagramms ist möglich
- Ausfall- und Reparaturraten sind bekannt
- Redundanzen sind bekannt
- Das Modell hat eindeutige Zustände

Zuverlässigkeitsmodell

Zuverlässigkeitsblockdiagramm

Eindeutige Zustände

Vorhandene physikalisch-technische Kenngrößen können nicht direkt zur Definition einer Klasse von Zuverlässigkeitsmodellen führen und umgekehrt. Die Wahl eines Zuverlässigkeitsmodells richtet sich nach verschiedenen Kriterien: Komplexität des Systems, Eigenschaften der Zuverlässigkeitsgrößen (Ausfallrate, Reparaturrate, Einbezug von Wartung).

Der Zustand eines Systems oder eines Einzelelementes im Markow-Modell eindeutig angegeben werden, worin auch die Problematik für komplexe Anlagen besteht. Im einfachsten Fall sind das die zwei Zustände *Ausfall* oder *Betrieb*. Im erweiterten Modellansatz sind es die Zustände *Ausfall*, *reduzierter Betrieb* oder *Betrieb*. Für die Bestimmung des Komponentenzustandes im Modell aus den Messwerten der Kenngrößen muss ein Übertragungsschema erstellt werden, das eindeutige Zustände generiert. In der folgende Tabelle ist ein (fiktives) Beispiel dargestellt.

Ausfall und Betrieb
Reduzierter Betrieb

| | Kenngrösse | | | |
|---------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------|-------------------|
| Zustand der Lüftung | Motorendrehzahl [U/min] | Volumenstrom [m ³ /min] | Klappenstellung [Grad] | Schallpegel [dBA] |
| Betrieb | 500 – 900 | 5 – 9 | 75 – 90 | < 75 |
| Reduzierter Betrieb | 100 – 499 | 3 – 5 | 15 – 74 | > 75 < 90 |
| Ausfall | 0 – 99 | 0 – 3 | 0 – 15 | > 90 |

Tab. 14: Beispiel für die Zuordnung von Messwerten von Kenngrößen zu Betriebszuständen einer (fiktiven) Lüftung. Der Zustand „Ausfall“ wird diagnostiziert, wenn mindestens einer der Werte in der Zeile „Ausfall“ liegt. Der Zustand „Reduzierter Betrieb“ wird diagnostiziert, wenn kein Wert in der Zeile „Ausfall“ liegt und mindestens 2 Werte in der Zeile „Reduzierter Betrieb“ liegen. Der Zustand „Betrieb“ wird nur angenommen, wenn alle Werte in der Zeile „Betrieb“ liegen. Somit ist der Zustand eindeutig definiert.

Zielsetzung der Modellierung ist neben der Berechnung der Zuverlässigkeit für die verschiedenen Zustände auch die Optimierung der Wartungs- bzw. Reparaturstrategien. Damit ist theoretisch ein Optimum für die Zuverlässigkeit und die Verfügbarkeit zu bestimmen.

Modellierung

An einem Beispiel soll die Modellierung eines (reparierbaren) Systems durch Markow-Prozesse gezeigt. Das Beispiel erläutert und visualisiert ein einfaches System mit „heisser“ Redundanz, d.h. „mitlaufender“ Redundanz, z.B. eine USV-Anlage mit 2 Wechselrichtereinheiten (1 aus 2) [7].

USV-Anlage

Ausgehend von dem erweiterten Zustandsblock-Diagramm (die Ausfall- und die Reparaturraten sind konstant) wird der Zustandsraum aufgestellt und anschliessend in das sogenannte Diagramm der Übergangswahrscheinlichkeiten in $(t, t+\delta t)$ übertragen. Es ist ein gerichteter Graph, wobei die Knoten den Zuständen und die Kanten den Übergangswahrscheinlichkeiten entsprechen. Zustände werden durch einen Kreis symbolisiert und fortlaufend numeriert. Betriebszustände werden normal dargestellt, Ausfallzustände (Systemausfall) werden invertiert dargestellt (weiss auf schwarz). Die Modellierung einer 1 aus 2 Redundanz, mit unterschiedlichen, konstanten Ausfallraten (λ_A und λ_B) und Reparaturraten (μ_A und μ_B) einer Reparaturmannschaft und keiner Priorität der Reparaturen, führt zu folgendem Diagramm der Übergangswahrscheinlichkeiten. Das Diagramm wird für die Berechnung der Punktverfügbarkeit aufgestellt. Für die Berechnung der Zuverlässigkeit müssen die Zustände, welche einen Systemausfall repräsentieren, absorbierend gemacht werden. Von diesen Zuständen gehen also keine Verbindungen zu anderen Zuständen weg.

1 aus 2 Redundanz

Punktverfügbarkeit

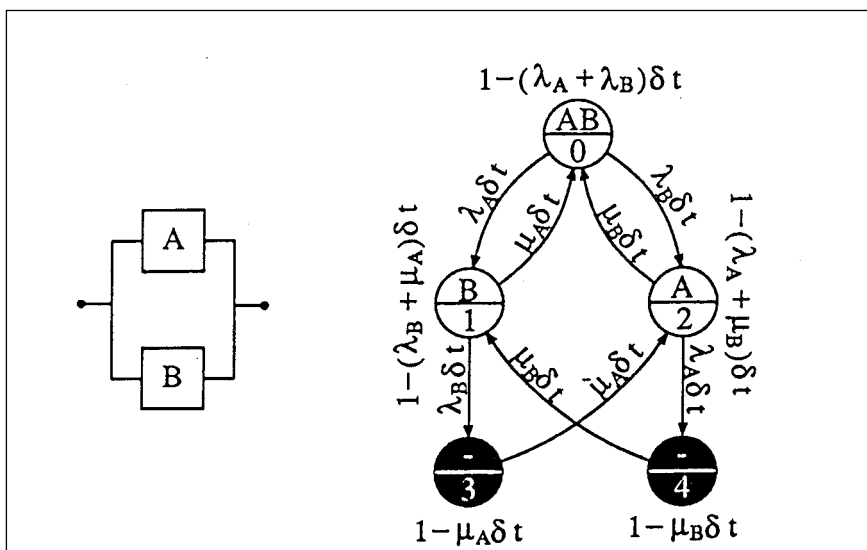


Fig. 8: Diagramm der Übergangswahrscheinlichkeiten

Das Diagramm zeigt die wahrscheinliche Verfügbarkeit in den einzelnen Zuständen (z.B. $1 - (\lambda_A + \lambda_B)\delta t$) für den Betriebszustand, sowie die von

Wahrscheinliche Verfügbarkeit



Ausfallraten λ abhängigen Übergangswahrscheinlichkeiten zum gestörten Betrieb bzw. über die Reparaturraten μ zum Normalbetrieb.



6.3 Schlussfolgerung

Die Erläuterung und das Beispiel haben gezeigt, dass eine Modellierung von EM-Anlagen mit Markow-Prozessen möglich ist, falls die Systeme nicht zu komplex sind. Die Modellierung vereinfacht sich, sofern der Zustandsraum nicht zu gross ist, d.h. nicht zu viele, nicht klar definierte Zustände bestehen. Dabei ist eine enge Zusammenarbeit mit dem Lieferanten nötig, um wichtige Herstellerdaten (z.B. Ausfallraten) zu erhalten.

Es ist denkbar, dass einzelne Systeme mit überragender Bedeutung für das „System Strasse“ und mit der Eigenschaft, dass sie sich in überschaubare Teilsysteme mit einfacher Struktur gliedern lassen, modelliert werden, z.B. Teile des ATM-Netzwerkes, der Verkehrsregelungsanlage, USV-Anlagen. Bei Neuanlagen ist bereits in der Submission die Bereitstellung von Zuverlässigkeitskennzahlen zu fordern.

Modellierung von EM-Systemen

Zustandsraum

Zusammenarbeit mit Hersteller

Teilsysteme mit einfacher Struktur



7. Literaturverzeichnis

- [1] Bundesamt für Strassen (ASTRA): EMS Kanton Basel-Landschaft, Projektbericht, 1996
- [2] Bundesamt für Strassen (ASTRA): EMS Kanton Basel-Landschaft, Nachtrag zum Projektbericht bez. Zustandsbeurteilung, 1997
- [3] Maintenance and Facility - Management Society of Switzerland, (MFS), Handbuch Instandhaltung 1984
- [4] Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme, A. Birolini, Springer Verlag 1991, Berlin, Heidelberg
- [5] MIL-HDBK-217: Reliability Prediction of electronic equipment, U.S. Department of Defence, 1979
- [6] Maintenance optimization of safety related nuclear power plant systems using probabilistic safety assessment and Markov modelling, S. Mayer, Dissertation, TU Wien, 1995
- [7] Modellierung reparierbarer Systeme durch Markow- und semi-regenerative Prozesse, R.E. Bernet, Dissertation, ETH Zürich, 1992
- [8] Techniques for Modelling the Reliability of Fault-Tolerant Systems with the Markov State-Space Approach, R.W. Butler, S.C. Johnson, NASA Reference Publication 1348, 1995



8. Abkürzungen

| | | |
|--------------|---|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| AG | : | <u>A</u> argau |
| AKS | : | <u>A</u> nlage- <u>K</u> ennzeichnungs- <u>S</u> ystem |
| ASTRA | : | Bundesamt für <u>S</u> tassen |
| ASTRA-Raster | : | Struktur der EM-Anlagen nach Vorgabe des ASTRA |
| BL | : | <u>B</u> asel- <u>L</u> andschaft |
| BS | : | <u>B</u> asel- <u>S</u> tadt |
| EM | : | <u>E</u> lektro <u>m</u> echanik |
| EMS | : | <u>E</u> quipment <u>M</u> anagement <u>S</u> ystem |
| ETH | : | <u>E</u> idgenössische <u>T</u> echnische <u>H</u> ochschule |
| GANTT-Plan | : | Terminplan mit abhängigen Tätigkeiten und Ressourcen-Verwaltung |
| LU | : | <u>L</u> uzern |
| MFS | : | <u>M</u> aintenance and <u>F</u> acility Management <u>S</u> ociety of Switzerland |
| MIL-HDBK | : | <u>M</u> ilitary <u>H</u> and <u>b</u> ook |
| MTBF | : | <u>M</u> ean <u>T</u> ime <u>B</u> etween <u>F</u> ailures |
| MTTPM | : | <u>M</u> ean <u>T</u> ime <u>t</u> o <u>P</u> reventive <u>M</u> aintenance |
| MTTR | : | <u>M</u> ean <u>T</u> ime <u>t</u> o <u>R</u> epair |
| NASA | : | <u>N</u> ational <u>A</u> eronautics and <u>S</u> pace <u>A</u> ministration |
| SG | : | <u>S</u> t. <u>G</u> allen |
| SPS | : | <u>S</u> peicherprogrammierte <u>S</u> teuerung |
| SVI | : | <u>S</u> chweizerischer <u>V</u> erband für <u>I</u> nstandhaltung, alte Bezeichnung für MFS |
| TU | : | <u>T</u> echnische <u>U</u> niversität |
| U.S. | : | <u>U</u> nited <u>S</u> tates |
| USV | : | <u>U</u> nterbrechungsfreie <u>S</u> trom <u>v</u> ersorgung |
| VSS | : | <u>V</u> ereinigung <u>S</u> chweizerischer <u>S</u> tassenfachleute |



9. Revisionen

- Version 1 26.05.1999: Erst-Ausgabe
- Version 2 14.09.1999: Straffung und kleinere Anpassungen, insbesondere in „Zusammenfassung“ und in „6.3 Schlussfolgerung“
- Version 3 30.09.1999: Erweiterung Kap. 5 bez. Kenngrößen-Relevanz zu EM-Anlagen, Herleitung der Zustandsbewertung
- Version 4 14.01.2000 Anpassung Berichtsgliederung
- Version 5 28.02.2000 Schlussredaktion