

6. Untersuchungen zur Zuverlässigkeit

6.1 Notwendigkeit der Zuverlässigkeitsuntersuchungen und allgemeine Vorgehensweise

Während das Niveau der Basissicherheit größtenteils durch technologische und ökonomische Randbedingungen vorgegeben ist, bestehen mit der Gestaltung und dem Betrieb der dynamischen Sicherheitssysteme erweiterte Möglichkeiten, die Sicherheit einer Fernleitungsanlage zu beeinflussen.

Die Funktionalität und Effektivität wird bei aktiven Sicherheitssystemen wesentlich durch deren Zuverlässigkeit bestimmt. Mit der Erhöhung der Zuverlässigkeit wird folglich eine gezielte Risikominimierung möglich, da die Eintrittswahrscheinlichkeit von Schadensfällen, hervorgerufen durch nicht funktionierende Sicherheitssysteme, reduziert wird.

Des Weiteren wird die Auseinandersetzung mit Zuverlässigkeitsaspekten künftig verstärkt erforderlich sein, da tendenziell die quantitative Bewertung des Ausfallverhaltens sicherheitstechnischer Systeme an Bedeutung zunehmen wird. Der Nachweis über die Einhaltung von z.B. in Normen festgelegte Grenzwerte für die Ausfallwahrscheinlichkeit kann dabei nur auf der Basis geeigneter Modelle zur Zuverlässigkeitsbewertung erfolgen.

Speziell für Pipelinesysteme ergibt sich die Notwendigkeit der zuverlässigkeitsanalytischen Untersuchung aus folgenden Aspekten:

- Die Anforderungen an die Verfügbarkeit der Sicherheitssysteme müssen sehr hoch sein, da durch deren Ausfall im Forderungsfall die Leitungssysteme *spontan* versagen können.
- Ausfälle von Sicherheitseinrichtungen sind bei Pipelineanlagen besonders kritisch, da auf Grund der Systemstruktur (Linearität) ein unmittelbarer Zugriff auf die ausgefallenen Elemente durch das Personal bzw. eine schnelle Instandsetzung nur bedingt möglich ist.
- Die Vielzahl der technischen Varianten zur Realisierung der Sicherheitsaufgaben bedingt eine vergleichende Betrachtung unter Einbeziehung wirtschaftlicher und zuverlässigkeitstechnischer Aspekte. Ist die ausreichende Sicherheit verschiedener Lösungen nachgewiesen, kann die ökonomisch günstigste Variante gewählt werden. Bei vorgegebenen Kosten ist die Systemvariante mit der maximalen Sicherheit/Zuverlässigkeit zu favorisieren.
- Die Beurteilung der Zuverlässigkeit ist besonders bei den Komponenten der Sicherheitssysteme zur Verhinderung *prozeßbezogener* Gefährdungen nötig, da die Aktivierung des Sicherheitssystems durch den Prozeßzustand erfolgt und der Gefährdungszustand direkt vom Versagen der Sicherheitselemente abzuleiten ist.
- Funktionsprüfungen sowie die sicherheitstechnische Gestaltung der Sicherheitssysteme unterliegen insbesondere bei Pipelineanlagen ökonomischen Randbedingungen, so daß Untersuchungen zu Inspektionszyklen und zur Redundanztechnik als Maßnahmen zur Zuverlässigkeitserhöhung zwangsläufig erforderlich werden.

Bei Pipelineanlagen besteht somit das *grundsätzliche Erfordernis*, die Zuverlässigkeit der Sicherheitssysteme zu untersuchen. Die Anwendung bekannter Modellansätze, wie sie für kompakte verfahrenstechnische Anlagen entwickelt wurden, ist nur eingeschränkt möglich, da dabei die spezifische Anlagenstruktur der Pipelinesysteme unberücksichtigt bleibt. Aus diesem Grund wird zunächst eine Untersuchung des Einflusses der Struktur des Sicherheitssystems von Pipelineanlagen auf dessen Zuverlässigkeitsverhalten vorgenommen. Die dafür genutzten Modellvorstellungen, die auf Betrachtungen zur Überlebenswahrscheinlichkeit technischer Elemente beruhen, reichen jedoch nicht aus, um die prozeßimmanenten Einflüsse mit zu erfassen. Aus diesem Grund stützt sich die weitere Untersuchungsführung auf Zuverlässigkeitskenngrößen, die diesen Nachteil kompensiert.

Spezielle Untersuchungen beziehen sich auf Sicherheitssysteme zur Absicherung unzulässiger dynamischer Überdrücke.

Ziel ist es, im Ergebnis der Untersuchungen allgemeingültige Grundsätze zur sicherheitsgerechten Gestaltung und Betriebsweise der Sicherheitssysteme abzuleiten sowie ein Instrumentarium zur erarbeiten, welches einen Variantenvergleich verschiedener Sicherheitslösungen ermöglicht. Es wird nicht angestrebt, auf der Basis quantitativer Wahrscheinlichkeitsaussagen eine Entscheidung über die Suffizienz in Bezug auf die Zuverlässigkeit der Sicherheitssysteme zu treffen.

6.2 Zuverlässigkeit des pipelinespezifischen Sicherheitssystems

6.2.1 Struktur des Sicherheits- und Steuerungssystems

Die Struktur des Sicherheits- und Steuerungssystems von Pipelineanlagen gliedert sich grundsätzlich in lokale und zentrale Systemelemente /140/. Die lokalen Systemelemente übernehmen örtlich bezogene Betriebs- und Sicherheitsfunktionen. Dazu zählen insbesondere die in den Stationssteuerungen implementierten Sicherheitsfunktionen, deren Aufgabe eine Absicherung der Station oder begrenzter Leitungsabschnitte beinhaltet. Damit werden jedoch nicht alle erforderlichen Sicherheitsfunktionen abgedeckt. Diese Aufgabe übernimmt das zentrale Sicherheitssystem, welches die Koordinierung des Betriebes und der sicherheitstechnischen Funktionen der gesamten Pipelineanlage realisiert. Die Kommunikation zwischen zentraler Einheit, lokalen Stationssteuerungen sowie den Sensoren und Aktoren (Prozeßschnittstellen) erfolgt über ein Datenfernübertragungs-/Fernwirkssystem (DFÜ/FW). Die folgende Abbildung verdeutlicht die Struktur des Sicherheits- und Steuerungskonzeptes von Pipelinesystemen. Dabei ist bei den Stationssystemen und der Zentraleinheit die erforderliche Trennung zwischen sicherheitsrelevanten Funktionen und Regelungsfunktionen zu erkennen.

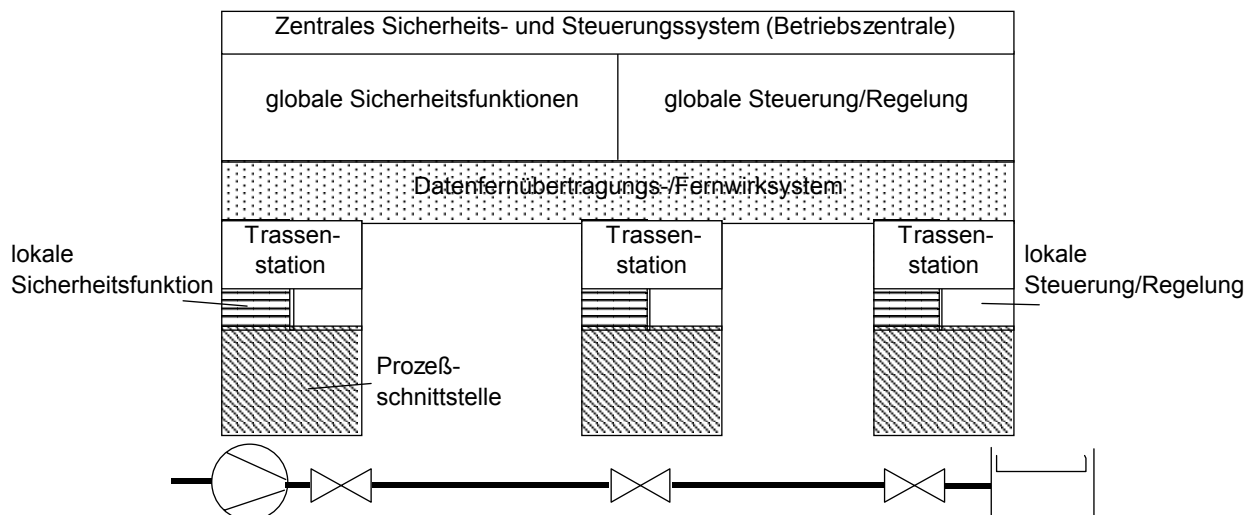


Abbildung 6.1: Struktur der Sicherheits- und Steuerungs-/Regelungssysteme

Prozeßschnittstelle:

- Erfassung der für die Pipelinesteuerung und Realisierung der Sicherheitsfunktionen erforderlichen Prozeßgrößen (Druck, Durchfluß, Temperatur, Dichte, Konzentration, Füllstand usw.)

- Übertragung der Signale sowohl an das global als auch an das zugehörige lokale Sicherheitssystem
- Realisierung der sicherheitsrelevanten Eingriffe in das Pipelinesystem (Aktoren, i.d.R. Absperrventile, Verriegelungen)
- Sicherheitsaspekte sind durch zuverlässige und geeignete Sensoren und Aktoren mit einer ausreichenden Meßgenauigkeit, robuster Bauweise und einer hohen Langzeitstabilität zu berücksichtigen
- Übernehmen i.d.R. gleichzeitig Sicherheits- und Betriebsfunktionen

Trassenstation - Lokale Sicherheitsfunktionen

- Realisierung lokaler Überwachungs-, Sicherheits- und Schutzfunktionen (z.B. Überwachung der Armaturenstellung, gesteuertes Schließen der Trassenarmatur im Bedarfsfall)
- Realisiert die vom zentralen Sicherheitssystem ausgelösten Sicherheitsfunktionen
- Trennung der Sicherheits- von den Steuerungsfunktionen erforderlich

Betriebszentrale - Zentrale Sicherheitsfunktionen

- Realisierung stationsübergreifender Überwachungs-, Sicherheits- und Schutzfunktionen
- zentral gesteuerte Prozeßeingriffe
- sichere Funktion ist von der Datenfernübertragung abhängig
- Trennung der Sicherheits- von den Steuerungsfunktionen erforderlich

Datenfernübertragung/Fernwirkssystem

- Realisierung des Informationsflusses zwischen Trassenstationen und Betriebszentrale,
- Übertragung von sicherheitsrelevanten sowie betrieblichen Meßgrößen, Stör- und Warnsignalen, Betriebsdaten sowie Stellsignalen
- auf Grund der Sicherheitsrelevanz der übertragenen Daten Gewährleistung einer hohen Betriebssicherheit erforderlich
- Strukturen der Datenwege:
 - Linienstruktur -> Netzstruktur (Ring-, Stern-, Maschennetz)
 - zunehmende Zuverlässigkeit/Verfügbarkeit*
 - zunehmende Investitionskosten*

Sicherheitsrelevante Prozeßgrößen werden von den Sensoren an die jeweiligen lokalen Steuerungseinheiten und direkt über das DFÜ-System an die Zentraleinheit übertragen. Resultieren aus den Prozeßgrößen erforderliche sicherheitsrelevante Handlungen der lokalen Sicherheitssysteme, so werden diese direkt ausgelöst. Sind globale Eingriffe durch das zentrale Sicherheitssystem notwendig, werden die Befehlssignale über das DFÜ/FW-System in der Regel erst an die jeweiligen lokalen Systeme übertragen, die dann das Stellsignal am Aktor (Trassenarmatur) erzeugen. Ausgenommen von diesem Signalweg sind Notabschaltbefehle (Not-Aus), die direkt vom Zentralsystem an die Absperrventile und Pumpen erteilt werden. Diese "harten" ungesteuerten Eingriffe in das Pipelinesystem bergen jedoch die Gefahr der Überbeanspruchung durch die dadurch entstehenden Druckstöße in sich und sind aus diesem Grunde weitgehend zu vermeiden.

Die einzelnen Elemente des Sicherheits- und Steuerungssystems verfügen generell über eine potentielle Unzuverlässigkeit in ihrer Funktionsausübung, so daß unter bestimmten Bedingungen Ausfälle auftreten. Der Ausfall eines oder mehrerer Systemelemente kann in Abhängigkeit von deren Stellung im Anlagen- bzw. Sicherheitskonzept zu Anlagenzuständen führen, deren Folgen sowohl wirtschaftliche als auch sicherheitstechnische Relevanz besitzen /9, 10/. Als der Gefährdungszustand wird ein Leitungsbruch, hervorgerufen durch die interne Überbeanspruchung, definiert. Dieser Gefährdungszustand kann eintreten, wenn die Funktion der sicherheitstechnischen Einrichtungen im Anforderungsfall durch Ausfall einzelner Elemente gestört ist .

Auf Grund der Struktur des Sicherheitssystems erhöht sich mit steigender Länge der Pipeline die Anzahl der für die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Funktionen erforderlichen Systemelemente womit zwangsläufig eine Reduzierung der Zuverlässigkeit des Sicherheitssystems verbunden sein kann, wenn gleiche Systemstrukturen vorliegen.

Daraus folgt grundsätzlich, daß besonders bei **Pipelineanlagen mit großen Längenausdehnungen** die Gewährleistung einer ausreichenden Verfügbarkeit des Sicherheitssystems ohne zuverlässigkeitserhöhende Maßnahmen nicht möglich sein wird. Dies kann durch Redundanztechnik oder durch eine entsprechende Betriebsweise in Form einer angepassten Inspektionsstrategie in Bezug auf das Sicherheitssystem erfolgen.

6.2.2 Einfluß der Redundanztechnik

Für die Untersuchung des Einflusses der Redundanztechnik wird im folgenden vorausgesetzt, daß die Anzahl der lokalen Stationssysteme n etwa proportional abhängig ist von der Länge der Pipelineanlage. Die Ausfallrate für das DFÜ/FW-System wird für die Untersuchung unabhängig von der Leitungslänge als konstant angenommen, was praktisch durch die Anpassung der Struktur (Linienstruktur, Netzstruktur) realisiert wird. Im Falle des Pipelinesystems wird in jeder Trassenstation mindestens ein weiteres gleich- oder andersartig funktionierendes Sicherheitssystem integriert (einschl. der integrierten Prozeßschnittstellen), wodurch eine homogene bzw. diversitäre Redundanzstruktur entsteht. In der Regel werden auch das DFÜ/FW-System und das zentrale Sicherheitssystem redundant ausgeführt. Zuverlässigkeitslogisch ist demnach von einer Gruppenredundanz/Reihen-Parallelschaltung auszugehen:

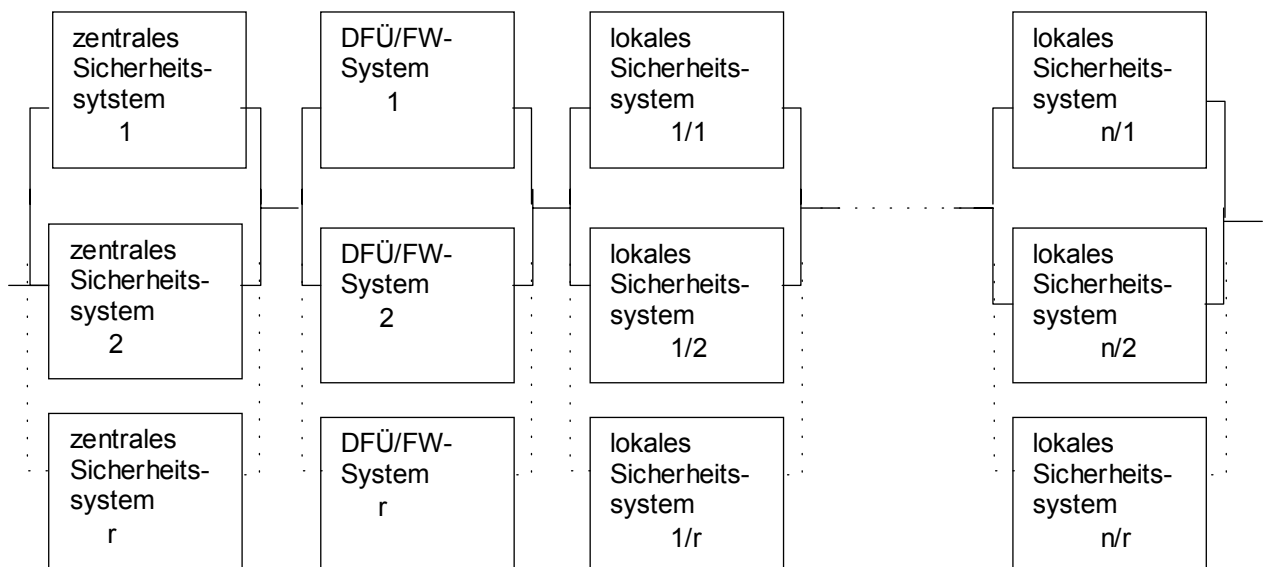


Abbildung 6.2: Zuverlässigkeitslogische Struktur eines redundanten Sicherheitssystems von Pipelineanlagen

Die Überlebenswahrscheinlichkeit dieses redundant aufgebauten Systems wird, unter der Voraussetzung, daß die Ausfallraten aller lokalen Sicherheitssysteme gleich sind, nach folgender Gleichung berechnet:

$$R_s(t) = \left[1 - \prod_{j=1}^r (1 - e^{-\lambda_{\text{zentr.}j} \cdot t}) \right] \cdot \left[1 - \prod_{j=1}^r (1 - e^{-\lambda_{\text{DFÜ/FW}j} \cdot t}) \right] \cdot \prod_{i=1}^n \left[1 - \prod_{j=1}^r (1 - e^{-\lambda_{\text{lokal}ij} \cdot t}) \right] \quad (6.1)$$

Hierbei ist n die Anzahl der Trassenstationen und r die Anzahl der jeweils parallel geschalteten Elemente (Redundanzgrad).

In folgender Abbildung ist beispielhaft der Verlauf der Überlebenswahrscheinlichkeit $R_s(t)$ über die Betriebszeit t für Sicherheitssysteme mit 3 und 40 lokalen Elementen und in jeweils einfacher ($r=1$), zweifacher ($r=2$) und dreifacher ($r=3$) Elementredundanz schematisch dargestellt.

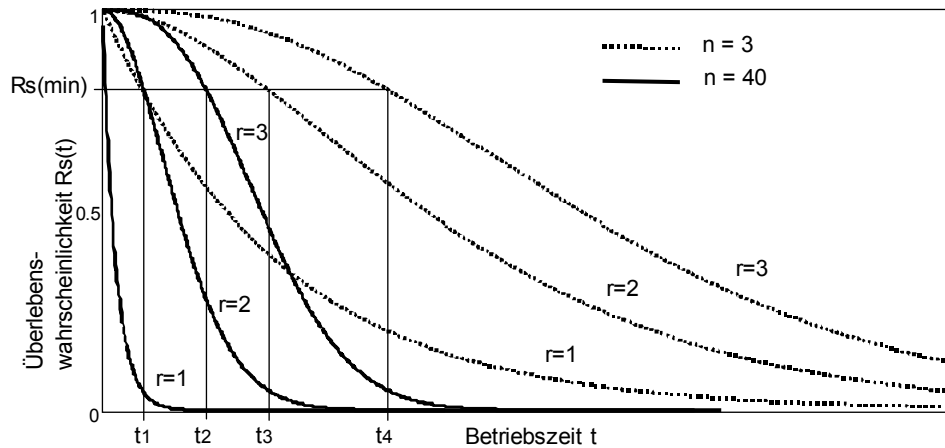


Abbildung 6.3: Zeitlicher Verlauf der Überlebenswahrscheinlichkeit für verschiedene Systeme (schematisch)

Um Aussagen über die Effektivität der Redundanztechnik zu erhalten, wird in Abbildung 6.4 die Differenz der Überlebenswahrscheinlichkeiten zwischen Systemen unterschiedlicher Redundanzgrade ($\Delta R_s(t)$) über die Betriebszeit aufgetragen.

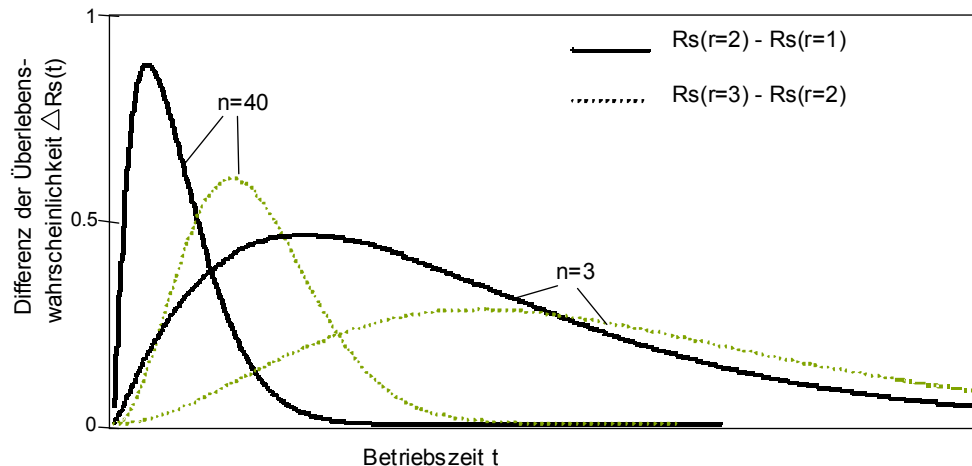


Abbildung 6.4: Effektivität der Redundanz bei verschiedenen Systemen (schematisch)

An den Verläufen von $R_s(t)$ und $\Delta R_s(t)$ ist zu erkennen, daß bei langen Pipelineanlagen (hier: 40 lokale Sicherheitselemente) der Effekt der Redundanztechnik deutlich höher ist als bei kürzeren Leitungen (hier: System mit 3 lokalen Sicherheitselementen). Dabei ist der Zuverlässigkeitsgewinn beim Übergang vom System mit dem Redundanzgrad $r=1$ zu $r=2$ größer als beim Übergang vom Redundanzgrad $r=2$ zu $r=3$. Der Zuverlässigkeitszuwachs durch Redundanz ist dann als ausreichend anzusehen, wenn für eine definierte Betriebszeit (z.B. Zeit zwischen zwei Inspektionen) eine minimale Systemüberlebenswahrscheinlichkeit

($R_{s(\min)}$) nicht unterschritten wird. Aus diesem Grund kann ein Redundanzgrad von $r > 2$ erforderlich sein, wenn die festgelegte Betriebszeit entsprechend groß sein soll (t_4). Es ist weiterhin zu erkennen, daß der Zuverlässigkeitsgewinn beim System mit $n=40$ bei einer geringeren Betriebszeit gegenüber dem System mit $n=3$ wesentlich größer ist, danach aber viel steiler abfällt. Dieser Verlauf weist darauf hin, daß mit wachsender Pipelinelänge neben dem Redundanzgrad auch zunehmend die Betriebszeit (d.h. in diesem Fall die Zeit zwischen den Funktionsprüfungen/Instandhaltungsmaßnahmen) eine bedeutende Rolle spielt. Aus diesem Grund sind die Untersuchungen so zu erweitern, daß der Einfluß der Inspektionsstrategie ausreichend berücksichtigt werden kann.

6.3 Erweiterung der Zuverlässigkeitsuntersuchung

6.3.1 Modellableitung

Neben dem Ausfallverhalten einzelner Elemente eines Sicherheitssystems und dessen Struktur bzw. Redundanzgrad haben die Inspektionsstrategie sowie die Häufigkeit, mit der das Sicherheitssystem durch das Abweichen des Prozeß- bzw. Anlagenzustandes vom bestimmungsgemäßen Zustand gefordert wird, einen erheblichen Einfluß auf die Zuverlässigkeit. Es sind deshalb Modellansätze zu wählen, die diese Einflußfaktoren berücksichtigen (Abbildung 6.5)

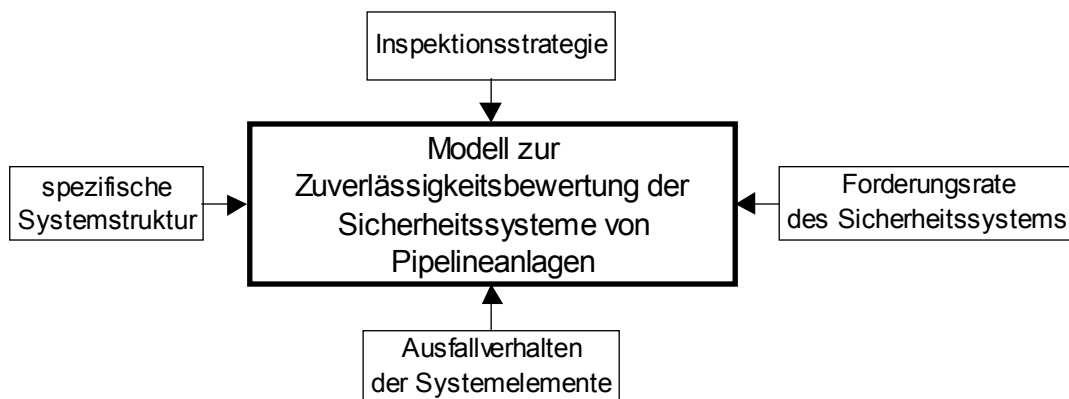


Abbildung 6.5: Einbeziehung zuverlässigkeitsrelevanter Faktoren in die Modellentwicklung

Es wird davon ausgegangen, daß das Sicherheitssystem leistungsgerecht dimensioniert ist und der Ausfall der Systemelemente zufällig erfolgt. Bei bestimmungsgemäßen Betriebszuständen bleiben Ausfälle des Sicherheitssystems verborgen, wenn nicht eine Überprüfung der Funktionsfähigkeit im Abstand von τ Zeiteinheiten erfolgt. Die Inspektion dient der Zustandsfeststellung und Funktionserhaltung des Sicherheitssystems. Durch Verkürzung des Inspektionsintervalls τ wird der Zeitraum der Ungewissheit über den Systemzustand verringert und die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls innerhalb von τ herabgesetzt /10, 11/. Charakteristisch für die betrachteten Ausfälle ist, daß diese keine Systematik erkennen lassen, nicht vorhersehbar sind und keinen vorbeugenden Maßnahmen unterliegen.

Aus sicherheitstechnischer Sicht wird die Zuverlässigkeit sowohl durch den Zustand des Sicherheitssystems als auch durch den Prozeßzustand beeinflusst, wobei beide voneinander unabhängig sind. Ein Gefährdungszustand tritt dann ein, wenn ein Systemzustand vorliegt, der das Sicherheitssystem fordert (Prozeßparameter überschreitet einen Grenzwert) und gleichzeitig das Sicherheitssystem versagt. Daraus lassen sich folgende 4 Zustände ableiten:

1. Der Prozeßparameter überschreitet den Grenzwert nicht und die Periode endet zum Zeitpunkt τ mit einer Inspektion des Sicherheitssystems.
2. Der Prozeßparameter erreicht den Grenzwert vor dem Zeitpunkt τ , wodurch das Sicherheitssystem aktiviert wird und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden.
3. Das Sicherheitssystem zur Überwachung des Grenzwertes fällt vor dem Zeitpunkt τ aus und die Prozeßgröße überschreitet den Grenzwert nicht. Die Periode endet mit einer Inspektion, wobei der Ausfall bemerkt und behoben wird.
4. Das Sicherheitssystem zur Überwachung des Grenzwertes fällt vor dem Zeitpunkt τ aus. Die Prozeßgröße überschreitet den Grenzwert und es kommt in diesem Fall zum Eintritt eines Gefährdungszustandes bzw. -ereignisses.

Als geeignete Kenngröße zur Beschreibung der Funktionserfüllung des Sicherheitssystems wird die Gefährdungswahrscheinlichkeit Q_s definiert /3/:

$$Q_s = f(\lambda_p, \lambda_s, \tau) \quad (6.2)$$

Q_s ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß sich das System zum Zeitpunkt τ in einem Gefährdungszustand befindet bzw. daß bis zum Zeitpunkt τ ein Gefährdungsereignis eingetreten ist (d.h. Versagen der Pipeline durch interne Überbeanspruchung). Die Reihenfolge der sicherheitsbedeutsamen Zustände hat einen maßgeblichen Einfluß auf den Prozeßverlauf und ist bei der Bestimmung der Kenngröße Q_s zu berücksichtigen.

Weitere Parameter zur Bestimmung von Q_s ist die Forderungsrate (λ_p) und die Ausfallrate des Sicherheitssystems (λ_s), für die eine zeitliche Konstanz vereinbart wird. Dies ermöglicht die Anwendung der homogenen Markow-Prozesse für die Systemzustandsmodellierung /19/.

6.3.2 Modellierung des Sicherheitssystems für Pipelineanlagen

Die prinzipielle Vorgehensweise zur Ermittlung der Kenngröße Q_s besteht aus folgenden Schwerpunkten /1, 4/:

1. Ableitung der zuverlässigkeitslogischen Struktur des Sicherheitssystems
2. Aufstellung des Zustandsgraphen (nach der Theorie der Markow-Prozesse)
3. Aufstellung des Differenzialgleichungssystems
4. Ermittlung der instationären Zustandswahrscheinlichkeit Q_s für den Eintritt einer definierten Gefährdung

Grundlage ist die in Abschnitt 6.2.2 abgeleitete zuverlässigkeitslogische Struktur des Sicherheitssystems. Daraus ergibt sich folgender Zustandsgraph:

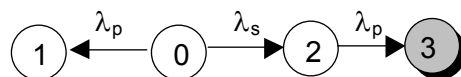


Abbildung 6.6: Zustandsgraph zur Ermittlung der Kenngröße Q_s

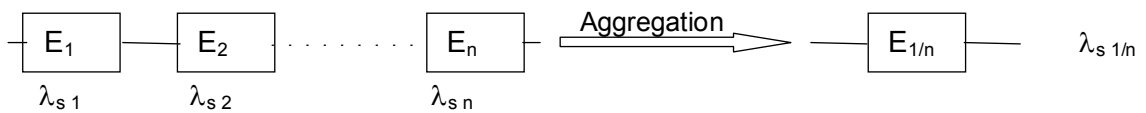
Die konstanten Übergangsfunktionen und Zustände sind dabei prinzipiell wie folgt definiert:

- λ_p - Forderungsrate; gibt an, wie oft je Zeiteinheit das Sicherheitssystem aktiviert wird.
- λ_s - Ausfallrate des Sicherheitssystems

- Zustand 0: Sicherheitssystem im Intaktzustand
 Zustand 1: Abweichungen vom Normalbetrieb, Sicherheitssystem wird aktiviert und entsprechende Maßnahmen werden eingeleitet
 Zustand 2: Sicherheitssystem ausgefallen, keine Abweichung vom Normalbetrieb
 Zustand 3: Abweichung vom Normalbetrieb, Sicherheitssystem kann nicht aktiviert werden, so daß eine definierte Gefährdung eintritt

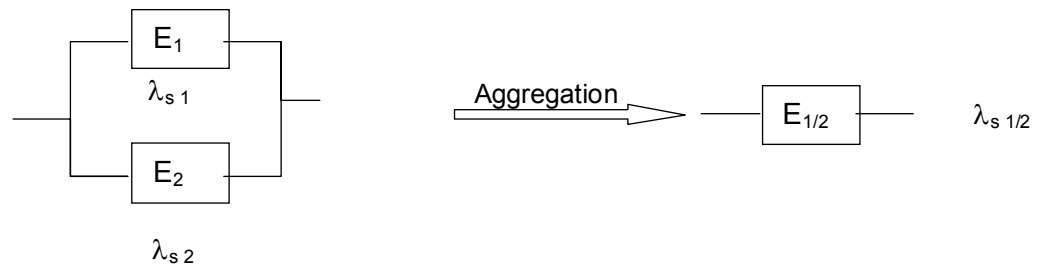
Neben der Lösung des sich daraus ergebenden Systems von Differenzialgleichungen sind für die Ermittlung der Kenngröße Q_s in /1/ und /11/ Lösungsvarianten ermittelt worden, mit denen für definiert strukturierte Systeme exakte Lösungen möglich sind. Voraussetzung dafür ist die Zurückführung der vorliegenden Struktur durch Aggregation auf die entsprechende Grundstruktur.

1.)



$$\lambda_{s1/n} = \sum_{i=1}^n \lambda_{s i} \quad (6.3)$$

2.)



$$\lambda_{s1/2}(t) = \frac{\lambda_{s1} e^{-\lambda_{s1}t} + \lambda_{s2} e^{-\lambda_{s2}t} - (\lambda_{s1} + \lambda_{s2}) e^{-(\lambda_{s1} + \lambda_{s2})t}}{e^{-\lambda_{s1}t} + e^{-\lambda_{s2}t} - e^{-(\lambda_{s1} + \lambda_{s2})t}} \quad (6.4)$$

Wegen Forderung nach einer zeitunabhängigen Ausfallrate im Intervall 0 bis τ wird eine Approximation für $\lambda_{s1/2}(t)$ mit Hilfe des Mittelwertsatzes der Integralrechnung im Intervall von 0 bis τ vorgenommen.

$$\lambda_{s1/2} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \lambda_{s1/2}(t) dt \quad (6.5)$$

Die Zulässigkeit dieser Methode im Rahmen des vorgesehenen Modellansatzes wurde in /1/ nachgewiesen.

Die Kenngröße Q_s berechnet sich allgemein mit:

$$Q_s = \int_0^{\tau} [R_s(t) - 1] dR_p(t) \quad (6.6)$$

bzw. für den hier betrachteten Fall:

$$Q_s = 1 - e^{-\lambda_p \tau} - \frac{\lambda_p}{\lambda_p + \lambda_s} \cdot (1 - e^{-(\lambda_p + \lambda_s)\tau}) \quad (6.7)$$

Die Untersuchung der Kenngröße Q_s ermöglicht es, den Einfluß der Forderungsrate des Sicherheitssystems und der Inspektionsstrategie zu bewerten.

6.3.3 Allgemeine Beziehung zwischen der Forderungsrate λ_p und des Inspektionsintervalles τ

Im folgenden wird auf Grundlage der Kenngröße Q_s der Einfluß der Forderungsrate λ_p analysiert. Des weiteren wird untersucht, inwieweit durch Redundanztechnik eine Verlängerung des Inspektionsintervalls erreicht werden kann, um die gleiche Systemzuverlässigkeit zu erreichen.

Grundsätzlich ist das Sicherheitssystem so zu gestalten, daß die Forderungsraten gering bleiben, d.h. Grenzwertüberschreitungen so wenig wie möglich stattfinden, weil damit die Sicherheit der Pipelineanlage erhöht wird. Jede Aktivierung des Sicherheitssystems kann jedoch prinzipiell als eine Funktionsprüfung betrachtet werden, bei der festgestellt werden kann, ob die Sicherheitsfunktion realisiert wird oder nicht. Daraus folgt, daß sich mit zunehmender Forderungsrate die Kenngröße Q_s tendenziell verkleinert und sich damit die Zuverlässigkeit des Sicherheitssystems erhöht. Dieser prinzipielle Zusammenhang kommt jedoch erst ab genügend großen Inspektionsintervallen zum Tragen. Um diesen Sachverhalt zu verdeutlichen, wurden die Kenngrößen $Q_s = f(\tau)$ für das Sicherheitssystem von Pipelineanlagen ermittelt, wobei unterschiedliche Forderungsraten angenommen wurden:

Fall 1: $\lambda_{p1} = 1,0 \text{ 1/a}$

Fall 2: $\lambda_{p2} = 0,5 \text{ 1/a}$

Bildet man die Differenz von Q_s beider Fälle ($\Delta Q_s(\tau) = Q_{s1}(\tau) - Q_{s2}(\tau)$), so erhält man eine Aussage darüber, wie sich durch die unterschiedlichen Forderungsraten die Zuverlässigkeit des Systems ändert.

In folgender Abbildung ist der Verlauf $\Delta Q_s = f(\tau)$ mit $\lambda_s = 0,5 \text{ 1/a}$ dargestellt. Dabei kennzeichnet der Schnittpunkt des Graphen mit $\Delta Q_s = 0$ das Inspektionsintervall, ab dem bei der größeren Forderungsrate ein Zuverlässigkeitgewinn zu erwarten ist.

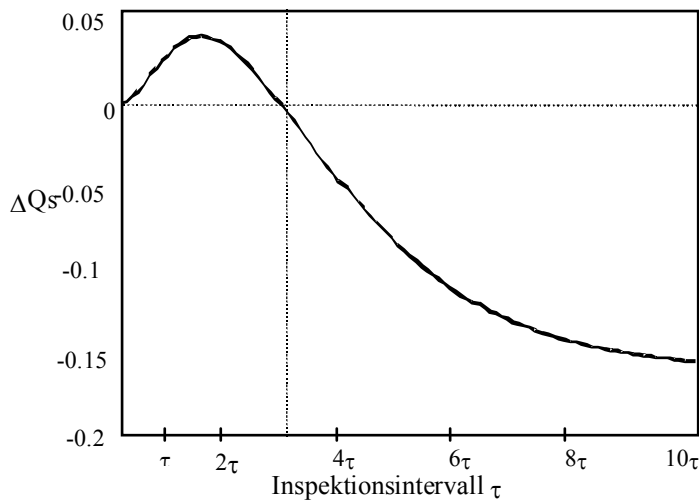


Abbildung 6.7: $\Delta Q_s = f(\tau)$ für Systeme unterschiedlicher Forderungsraten ($\lambda_s = 0,5 \text{ 1/a}$)

An diesem Beispiel tritt der Effekt des Zuverlässigkeitsgewinns infolgedessen, daß das Sicherheitssystem öfters gefordert wird, erst ab einem Inspektionszyklus von etwa 3τ auf, weil danach ein deutliches Absinken der Kenngröße Q_s zu erkennen ist.

Größere Forderungsraten verursachen keinen Zuverlässigkeitsgewinn, wenn die Inspektionsintervalle von vornherein klein gewählt werden. Es ist deshalb anzustreben, das Inspektionsintervall unter Einbeziehung der Forderungsrate festzulegen. Dabei gilt folgende Regel:

Bei Systemen mit hohen Forderungsraten kann tendenziell der Zeitraum zwischen zwei Prüfungen verlängert werden, ohne damit einen erheblichen Zuverlässigkeitsverlust zu verursachen. Werden Sicherheitssysteme selten gefordert, kann die Prüffristverlängerung nicht ohne erheblichen Zuverlässigkeitsverlust erfolgen.

Bei den Elementen des Sicherheitssystems, die parallel als Betriebs- und Überwachungseinrichtungen verwendet werden, kann grundsätzlich von einer relativ hohen Forderungsrate ausgegangen werden, da diese Elemente nicht nur bei kritischen Systemzuständen aktiviert werden. Lediglich die sicherheitsrelevanten Systeme, die von den Betriebssystemen getrennt sind, haben typischerweise geringe Forderungsraten, was bei der Festlegung der Inspektionsstrategie zu berücksichtigen ist.

Der Einfluß des Zeitraumes zwischen zwei Inspektionen auf die Zuverlässigkeit ist dagegen von Eindeutigkeit geprägt. Eine Vergrößerung der Inspektionsintervalle hat bei konstanter Forderungsrate grundsätzlich eine Vergrößerung von Q_s und damit eine Verringerung der Zuverlässigkeit zur Folge, d.h. es besteht die Möglichkeit, durch Verkürzung des Inspektionsintervalles die Zuverlässigkeit des Sicherheitssystems zu erhöhen.

Bedeutsam für den Betreiber von Pipelineanlagen ist, in welchem Maße durch die redundante Ausführung der lokalen Sicherheitssysteme die Verlängerung der Inspektionszyklen bei gleichem Zuverlässigkeitsniveau möglich ist. Diese Frage kann auf der Grundlage der erarbeiteten Modellansätze beantwortet werden, wenn dafür die konkreten Werte für die Forderungsrate und die Ausfallrate der Systemelemente bekannt sind. In Abbildung 6.8 ist beispielhaft der Verlauf von $Q_s(\tau)$ für das Sicherheitssystem in einfacher und redundanter Ausführung der lokalen Sicherheitssysteme dargestellt.

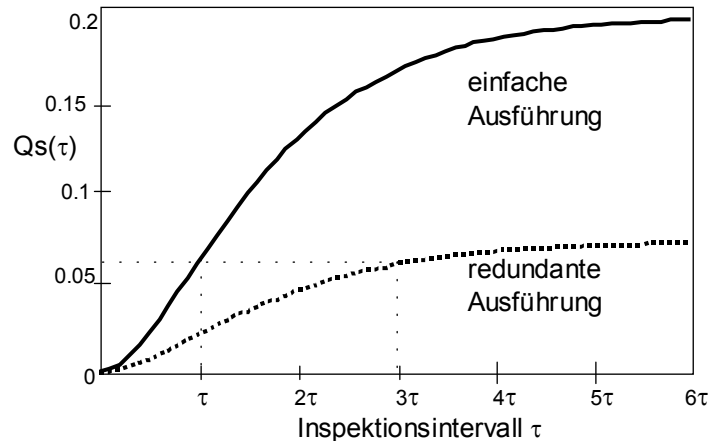


Abbildung 6.8: Verlauf von $Q_s(\tau)$ für das Sicherheitssystem in redundanter und einfacher Ausführung ($\lambda_p = 1,0 \text{ 1/a}$, $\lambda_s = 0,5 \text{ 1/a}$)

In diesem Fall kann bei gleicher Zuverlässigkeit durch die redundante Ausführung der Zeitraum zwischen zwei Inspektionen um etwa das 3-fache verlängert werden. Eine Entscheidung darüber, ob die Redundanztechnik oder die Verkürzung der Inspektionsintervalle zur Anwendung kommen soll, muß letztendlich unter Einbeziehung betriebswirtschaftlicher Gesichtspunkte erfolgen.

6.4 Spezifische Zuverlässigkeitsuntersuchungen an Sicherheitssystemen gegen unzulässige Druckstöße

In der Praxis stehen zur Realisierung einer Sicherheitsfunktion meist verschiedene Lösungen zur Verfügung. Im Ergebnis einer Untersuchung zur Systemzuverlässigkeit kann anhand der ermittelten Kenngröße Q_s eine Entscheidung darüber getroffen werden, welches aus zuverlässigkeitstechnischen Aspekten die optimale Systemvariante darstellt und damit zu favorisieren wäre.

Die Systeme zur Vermeidung unzulässiger Druckstoßbeanspruchungen sind bei Pipelineanlagen bedeutsame Sicherheitseinrichtungen. Im folgenden wird die Vorgehensweise zur konkreten Zuverlässigkeitsbewertung für diese Sicherheitssysteme abgeleitet. Dazu werden auf Basis der Kenngröße Q_s Untersuchungen zum Einfluß konkreter Maßnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit durchgeführt.

Es wird vorausgesetzt, daß die betrachtete Pipeline gegen Überbeanspruchungen durch Druckstöße, hervorgerufen durch das schnelle Schließen der Trassenarmaturen, mittels einer Kombination zweier Sicherheitseinrichtungen abgesichert ist. Ein lokales System regelt den Schließvorgang der Trassenarmatur auf Basis des Differenzdruckes (differenzdruckabhängige Schiebersteuerung), die zweite Sicherheitseinrichtung schaltet die Pumpe in der Pumpstation ab, sobald der Schieber die geöffnete Position verläßt (Endlagenüberwachung mit Pumpenabschaltung). Diese Kombination von Sicherungsmaßnahmen wird in der Praxis häufig realisiert.

In folgender Abbildung ist das Funktionsschema vereinfacht dargestellt:

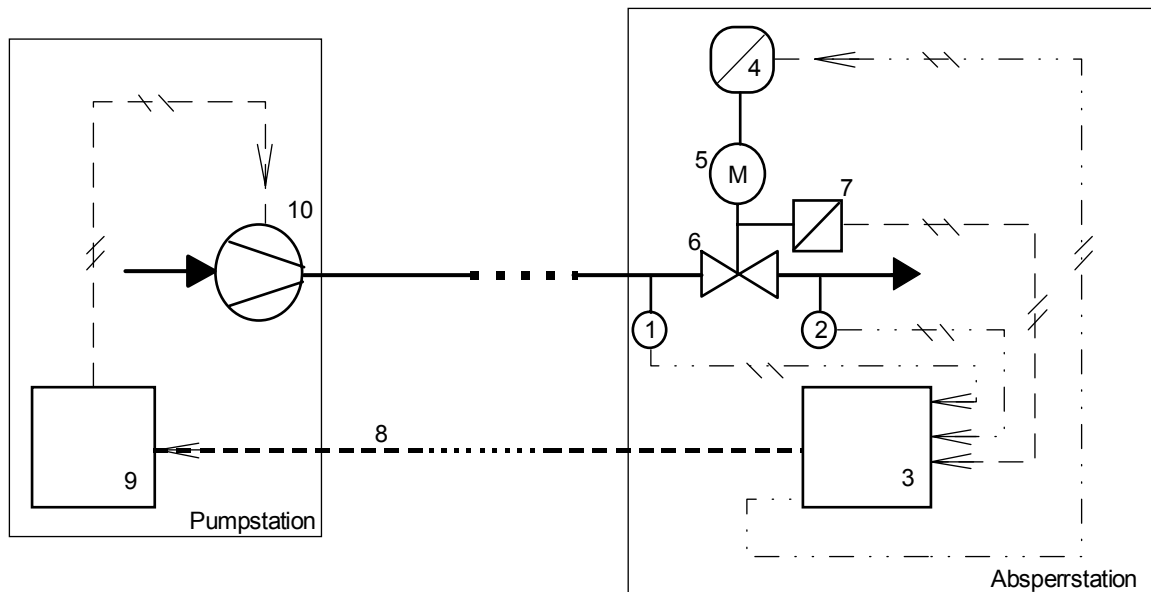


Abbildung 6.9: Funktionsschema der Sicherheitssysteme zur Druckstoßabsicherung

1, 2	-	Drucktransmitter	6	-	Absperrschieber
3	-	lokales Steuerungssystem der Absperrstation	7	-	Endlagenüberwachung
4	-	Motorsteuerung	8	-	Datenfernübertragungssystem
5	-	Schieberantrieb	9	-	zentrales Steuerungssystem (Relaisstation oder SPS)
			10	-	Förderpumpe

Funktionsweise:

Der Anforderungsfall ist das erforderliche Schließen der Absperrarmatur (Abfahren, Leckagefall). Die Drucktransmitter (1, 2) messen den Druck vor und nach der Armatur und übertragen die Meßwerte zur lokalen Stationssteuerung (3), welche die ermittelte Druckdifferenz mit einem Grenzwert vergleicht. Bei einer zu hohen Druckdifferenz wird ein Signal an die Motorsteuerung (4) zur Umsteuerung des Schieberantriebes (5) gegeben. Der Schieberschluß wird gestoppt bzw. ggf. umgekehrt, so daß ein unzulässiger Druckstoß verhindert wird.

Sobald die Trassenarmatur seine „Offen“-Stellung verläßt, wird dies von der Endlagenüberwachung (7) erfaßt. Das lokale Steuerungssystem der Armaturenstation erhält dieses Signal und überträgt es über das Fernübertragungssystem an die zentrale Steuerung (9). Von dort wird ein Abschaltbefehl für die Förderpumpen (10) ausgelöst. Auf Grund der dadurch entstehenden Entlastungswelle wird der zulässige Überdruck der Leitung nicht überschritten.

Die beiden Sicherungsmaßnahmen wirken diversitär redundant, wobei die Forderungsraten (λ_p) der Systeme identisch sind. Die Steuerung der Trassenstation ist für die Funktion beider Systeme notwendig.

Daraus folgt das in Abbildung 6.10 angegebene zuverlässigkeitslogische Schema des Sicherheitssystems, wobei die in Reihe geschalteten Komponenten zu einem Element zusammengefaßt werden:

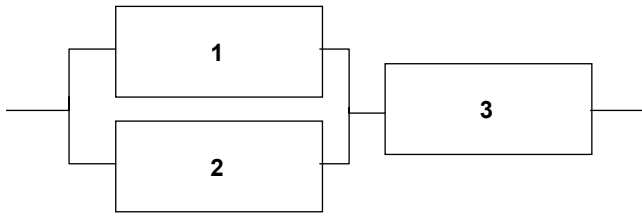


Abbildung 6.10: Zuverlässigkeitslogisches Schema des Sicherheitssystems zur Druckstoßabsicherung

- Element 1: Reihenschaltung aus Drucktransmittern (1, 2) Motor (5) und Motorsteuerung (4)
 Element 2: Reihenschaltung aus Endlagenüberwachung (7), Datenfernübertragungssystem (8) und
 zentralem Steuerungssystem (9)
 Element 3: lokale Stationssteuerung (3)

Für die Struktur des Sicherheitssystems zur Druckstoßabsicherung ergibt sich folgender Zustandsgraph zur Bestimmung der Kenngröße Q_s :

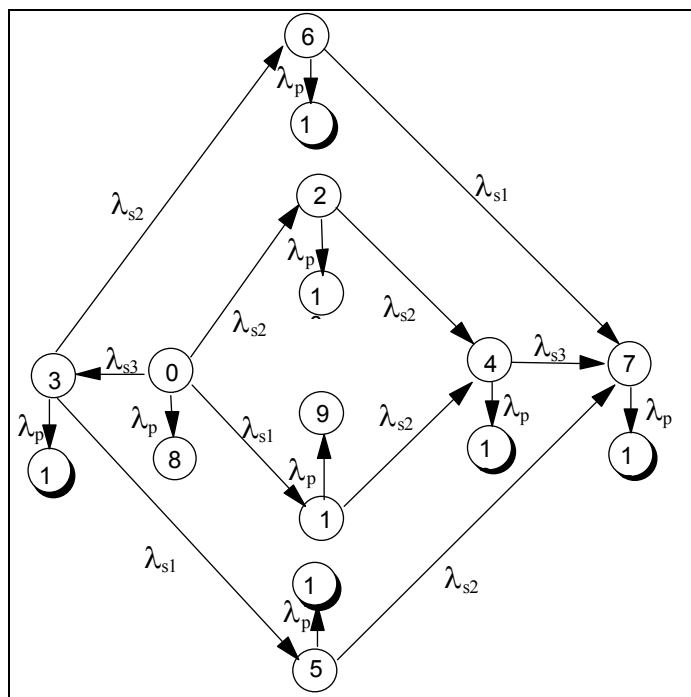


Abbildung 6.11: Zustandsgraph für das betrachtete Sicherheitssystem

Das daraus abgeleitete Differentialgleichungssystem zur Ermittlung der Kenngröße Q_s ist in Anlage 7 aufgeführt.

Die Kenngröße Q_s ermittelt sich durch Summierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Zustände 11-15:

$$Q_s = P(N_{\tau=11}) + P(N_{\tau=12}) + P(N_{\tau=13}) + P(N_{\tau=14}) + P(N_{\tau=15}) \quad (6.8)$$

Tabelle 6.1: Zustandsbeschreibung des Sicherheitssystems	
Zustand	Charakteristik
0	Intaktzustand des Sicherheitssystems
1 – 3	Ausfallzustände jeweils einzelner Elemente des Sicherheitssystems
4 – 7	Ausfallzustände mehrerer Elemente des Sicherheitssystems
8 – 10	Auslösung sicherheitsrelevanter Eingriffe durch Ansprechen des jeweils intakten Sicherheitssystems zur Druckstoßbegrenzung
11 – 15	Sicherheitskritische Zustände: Ausfall der Sicherheitssysteme zur Druckstoßbegrenzung bei Aktivierung des Absperrschiebers – Auftreten eines unzulässigen Druckstoßes

Durch Lösung des Differentialgleichungssystems erhält man den Wert der Kenngröße Q_s . Nutzt man dagegen die in /1/ ermittelte allgemeine Lösung (Gleichung 6.6), so ergibt sich für das konkrete Sicherheitssystem unter Berücksichtigung, daß sich $R_s(t)$ aus den Überlebenswahrscheinlichkeiten der Elemente r_i wie folgt berechnen läßt:

$$R_s(t) = [r_1(t) + r_2(t) - r_1(t) \cdot r_2(t)] \cdot r_3(t) \quad (6.9)$$

die Lösung für die Kenngröße Q_s :

$$Q_s = \int_0^T \left[\left(e^{-\lambda_{s1}t} + e^{-\lambda_{s2}t} - e^{-(\lambda_{s1} + \lambda_{s2})t} \right) \cdot e^{-\lambda_{s3}t} - 1 \right] \cdot (-\lambda_p \cdot e^{-\lambda_p t}) dt \quad (6.10)$$

Die für dieses Beispiel verwendeten Werte für Ausfallraten der Elemente λ_{s_i} und die Forderungsrate λ_p des Sicherheitssystems zur Druckstoßabsicherung der Pipelineanlage resultieren sowohl aus Literaturrecherchen /124-128/ als auch aus Betriebsaufzeichnungen sowie Erfahrungswerten einer seit mehr als 20 Jahren betriebenen Rohölpipeline. Für die geführten Untersuchungen ist die Genauigkeit der Zuverlässigkeitsdaten als ausreichend anzusehen, da maßgeblich ein Vergleich verschiedener Varianten vorgenommen werden soll. Für andere sicherheitstechnische Systeme ist es erforderlich, weitere statistische Erhebungen an in Betrieb befindlichen modernen Pipelineanlagen vorzunehmen, um genauere Aussagen über das Ausfallverhalten der Sicherheitseinrichtungen unter den jeweiligen Betriebsbedingungen zu erhalten.

Tabelle 6.2: Ausfallraten der Elemente der Sicherheitseinrichtung	
Element der Sicherheitseinrichtung	Ausfallrate λ_s [1/a]
1. Drucktransmitter	0,2
2. Motorsteuerung	0,1
3. Endlagenüberwachung	0,07
4. Datenfernübertragungssystem/ Fernwirkeinrichtung	0,05
5. zentrales Steuerungssystem	0,01
6. lokale Stationsteuerung	0,01

Entsprechend dem zuverlässigkeitslogischen Schema werden die Ausfallraten der einzelnen Elemente zusammengefaßt, so daß die in Reihe geschalteten Einrichtungen als ein Sicherheitselement erfaßt werden:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Element 1:} & \lambda_{s1} = \lambda_s \text{ Drucktransmitter1} + \lambda_s \text{ Drucktransmitter2} + \lambda_s \text{ Motorsteuerung} = 0,5 \text{ 1/a} \\
 \text{Element 2:} & \lambda_{s2} = \lambda_s \text{ Endlagenüberwachung} + \lambda_s \text{ DFÜ/FW} + \lambda_s \text{ zentrales Steuerungssystem} = 0,13 \text{ 1/a} \\
 \text{Element 3:} & \lambda_{s3} = \lambda_s \text{ lokale Stationssteuerung} = 0,01 \text{ 1/a}
 \end{array}$$

Die Forderungsrate des Prozesses λ_p ist ein Maß für die Häufigkeit der Aktivierung des Sicherheitssystems auf Grund eines erforderlichen Schließens einer Trassenarmatur innerhalb eines Inspektionsintervalls. Sie resultiert aus der Betriebsweise und dem Betriebsverhalten der Pipelineanlage und wird durch eine Analyse der Betriebsdaten oder durch Prozeßbeobachtungen ermittelt. Die Forderungsrate ist anlagenspezifisch und muß für jede zu betrachtende Anlage und in Abhängigkeit der Sicherheitsstruktur separat ermittelt werden. Die Auswertung von Betriebsdaten einer Pipelineanlage ergab für den betrachteten Fall eine Forderungsrate von 0,8 1/a.

Zur Festlegung des Inspektionsintervalls ist zu berücksichtigen, daß eine Inspektion im Sinne des Modellansatzes eine Funktionsprüfung der gesamten Sicherheitskette des betrachteten Sicherheitssystems beinhaltet. Praktisch ist es möglich, die Reaktion der einzelnen Elemente mit Hilfe von Simulationssignalen zu prüfen. In einigen Fällen ist es dennoch erforderlich, die Pipelineanlage abzufahren, um die Funktion der Sicherheitselemente nachzuweisen /16, 17, 156/.

Neben den festgeschriebenen Mindestprüffristen hängen die tatsächlichen Inspektionsintervalle von betriebsinternen Festlegungen oder ggf. behördlichen Forderungen ab. Für das zu untersuchende Sicherheitssystem ist ein Prüfintervall von $\tau = 1$ a üblich. Insbesondere bei den sicherheitsrelevanten Steuerungseinheiten (Stationssteuerungen bzw. globale Steuerungseinheit) werden in der Praxis immer öfter selbstüberwachende Systeme verwendet, bei denen ein Ausfall durch Selbsttest oder durch Überwachungseinheiten ("watch dogs") erkannt und die Funktion durch redundant geschaltete Systeme automatisch übernommen wird. Bei derartigen Systemen strebt das Inspektionsintervall praktisch gegen Null, so daß die Wahrscheinlichkeit eines unerkannten Ausfalles so gering ist, daß sie bei der Zuverlässigkeitsbetrachtung nicht berücksichtigt werden muß.

In folgender Tabelle sind die Werte für Q_s für die verschiedenen untersuchten Varianten aufgeführt.

Tabelle 6.3: Werte für Q_s	
Systemgestaltung	Kenngröße Q_s
Einfaches System	0,010074
Redundante Drucktransmitter	0,005242
Redundante Motorsteuerung	0,008867
Redundante lokale und globale Steuerungen	0,00719
Verkürzung von τ auf 0.5 a	0,0022
Komplett redundantes System	$9,7889 \cdot 10^{-5}$

Die Ergebnisse lassen erkennen, daß die redundante Ausführung der Drucktransmitter als die Elemente mit der höchsten Ausfallrate zu einem sehr hohen Zuverlässigkeitsgewinn führt und nur die redundante Ausführung des gesamten Sicherheitssystems (alle Einzelemente) einen noch höheren Zuverlässigkeitsgewinn verursacht. Gleichzeitig ist zu erkennen, daß gegenüber der Erhöhung der Veränderung der Systemstruktur auch die Verkürzung des Inspektionsintervalls eine gleichwertige Möglichkeit zur Zuverlässigkeitserhöhung ist.

Eine Entscheidung darüber, ob und durch welche Maßnahmen eine Erhöhung der Systemzuverlässigkeit erforderlich ist, kann entweder direkt von der Kenngröße Q_s (dazu müsste jedoch ein Grenzwert für Q_s vorgegeben sein) oder aber unter Berücksichtigung der Kosten im Verhältnis zum Zuverlässigkeitsgewinn (ΔQ_s) abgeleitet werden. Dafür ist eine Kennzahl für die Effektivität der Maßnahmen zu definieren, die sich aus dem Kostenanteil der Maßnahme und der mit dieser Maßnahme verbundenen Änderung von Q_s ergibt:

$$\text{Effektivitätskennzahl} = \Delta Q_s / \text{spezifischer Kostenanteil} \quad (6.11)$$

Je höher diese Kennzahl ist, desto höher ist auch die ökonomische Effektivität der jeweiligen Maßnahme. Erste Untersuchungen zu den Investitions- und Betriebskosten sicherheitstechnischer Einrichtungen von Pipelineanlagen wurden in /193/ durchgeführt.

6.5 Zusammenfassende Ergebnisse der Zuverlässigkeitsuntersuchungen

Mit der strukturellen Gestaltung und der betrieblichen Überwachung der dynamischen Sicherheitssysteme besteht ein hohes Potential, die Wahrscheinlichkeit eines Schadensereignisses durch Versagen der Sicherheitseinrichtungen zu minimieren. Das Modell und die Vorgehensweise zur zuverlässigkeitsanalytischen Bewertung der Sicherheitseinrichtungen von Pipelineanlagen unter der Berücksichtigung deren besonderen Struktur ermöglichen es, gezielt Ansatzpunkte für die Erhöhung der Systemsicherheit zu ermitteln. Des weiteren kann im Gegensatz zu anderen zuverlässigkeitsanalytischen Methoden der Einfluss der Inspektionsstrategie bewertet werden. Aus der Analyse des Einflusses systemstruktureller und betrieblicher Maßnahmen konnten allgemeingültige Grundsätze für die Gestaltung des Sicherheitssystems von Pipelineanlagen abgeleitet werden:

1. Da die Gewährleistung bzw. die Erhöhung der Zuverlässigkeit der Sicherheitssysteme sowohl in der Planungsphase durch Einsatz zuverlässiger Systemelemente bzw. durch redundante Systemausführungen als auch in der Betriebsphase durch eine entsprechende Inspektionsstrategie erfolgen kann, muß die geeignete Vorgehensweise unter Einbeziehung ökonomischer Randbedingungen im Rahmen einer optimierenden Betrachtung erfolgen. Es konnte jedoch festgestellt werden, daß tendenziell bei langen Pipelineanlagen die Redundanz (insbes. redundante Ausführung der lokalen Sicherheitssysteme) bevorzugt werden sollte, da zum einen der Effekt bei einer Erhöhung des Redundanzgrades bei Systemen mit steigender Elementezahl zunimmt und zum anderen der Aufwand für die erforderlichen Funktionsprüfungen steigt.
2. Ein Redundanzgrad größer 2 wird nur in Ausnahmefällen erforderlich sein, insbesondere wenn eine weitere Verlängerung der Inspektionszyklen angestrebt wird.
3. Eine optimale Inspektionsstrategie kann nur dann festgelegt werden, wenn die Forderungsrate des Sicherheitssystems berücksichtigt wird. Tendenziell kann eine Verlängerung des Inspektionsintervalls bei Systemen mit höheren Forderungsraten erfolgen. Die Forderungsrate ist von der jeweiligen Sicherheitsfunktion und dem Betriebs- und Sicherheitskonzept abhängig. Übernehmen einzelne Elemente des Sicherheitssystems (Sensoren, Aktoren) auch betriebliche Funktionen, erhöht sich damit die Forderungsrate dieser Elemente, womit die Inspektionszyklen für diese Elemente verlängert werden können. Die Forderungsrate muß ggf. im Verlaufe des Betriebes ermittelt werden. Aus diesem Grund stellt die Festlegung der optimalen Inspektionsstrategie einen Iterationsprozeß dar.

Grundsätzlich ist die vorgestellte Methodik auch für den Nachweis der Einhaltung von ggf. normativ festgelegten Grenzwerten für die Systemverfügbarkeit der sicherheitstechnischen

Einrichtungen geeignet. Voraussetzung dafür sind jedoch gesicherte Daten über die Ausfall- und Forderungsraten der einzelnen Systemelemente. Diese können jedoch nicht pauschal aus der Literatur entnommen werden, da die Datenakzeptanz wegen der jeweils verschiedensten Einsatz- und Beanspruchungsbedingungen nicht mehr gegeben ist. Erforderlich wäre eine anlagendifferenzierte Datenermittlung über eine genügend lange Betriebszeit. Es besteht jedoch die Gefahr, daß bei einer rein quantitativen Nachweisführung ein formaler Abbruch der weiterführenden sicherheitstechnischen Untersuchungen bei Erreichen eines fiktiven Grenzwertes erfolgt, was im Widerspruch zur bewährten und gesellschaftlich geforderten Vorgehensweise bei den Sicherheitsuntersuchungen potentiell gefährlicher Anlagen steht. Des weiteren ist die Aussagefähigkeit solcher rein quantitativer Zuverlässigkeitswerte ohne die Berücksichtigung weiterer anlagen- und umgebungsspezifischer Bedingungen sehr gering. Geeignet ist die quantitative Methodik für vergleichende Untersuchungen bei der Bewertung des Einflusses der Systemstruktur, alternativer Sicherheitssysteme sowie differenzierter zuverlässigkeitserhöhender Maßnahmen.