

2. Stand des Wissens bei der sicherheitstechnischen Gestaltung und Bewertung von Fernleitungsanlagen

2.1 Anforderungen aus Verordnungen und Technischen Regeln

Die rechtlichen Grundlagen in der BRD in Bezug auf Fernleitungsanlagen zum Transport gefährlicher Stoffe unterliegen derzeit einem grundsätzlichen Wandel. Bisher unterliegt diese Anlagengruppe dem Gerätesicherheitsgesetz /179/, jedoch werden künftig die Regelungen zur Genehmigung und zu technischen Anforderungen hauptsächlich dem Umweltressort übertragen.

Zulassungsverfahren für Fernleitungen werden in Abhängigkeit der Betriebsparameter (insbesondere in Abhängigkeit des zu transportierenden Stoffes) durch die Verordnung brennbarer Flüssigkeiten /176/, das Wasserhaushaltsgesetz /27/ oder die Gashochdruckleitungsverordnung /174/ geregelt. Die Anforderungen an die Anlagen sind in entsprechenden technischen Regelwerken und Richtlinien /171,173/ fixiert. Zugelassene Sachverständige überprüfen während des Baus und vor der Inbetriebnahme, ob eine Konformität mit den in den Regelwerken gestellten Anforderungen besteht.

Mit dem Gesetz zur Umsetzung der UVP-Änderungsrichtlinie /178/ werden die Zulassungsverfahren der Fernleitungsanlagen durch das Umweltverträglichkeitgesetz geregelt. Im Rahmen der darin geforderten Umweltverträglichkeitsprüfung werden allgemeine Auswirkungen auf die Umwelt durch den Bau und den Betrieb einer Fernleitungsanlage untersucht. Grundlegende technische Anforderungen werden in der geplanten Verordnung über Rohrfernleitungsanlagen in Verbindung mit der Technischen Regel für Fernrohrleitungen /64, 65/ zusammengefasst.

Die Anforderungen sowohl aus dem bisherigen Regelwerk als auch aus den neuen Vorschriften beziehen sich vornehmlich auf einzelne sicherheitstechnische Aspekte. Sie betreffen Betrieb, Ausrüstung und Prüfung von Fernleitungsanlagen. Insbesondere die technischen Anforderungen sind weitestgehend unspezifisch (z.B. Leckageüberwachung).

Umgebungsspezifische Aspekte, wie z. B. das unterschiedliche Schutzbedürfnis oder das differenzierte Auftreten der Schädigungseinflüsse, werden nicht oder nur unzureichend berücksichtigt. Eine methodische Untersuchung oder sicherheitstechnische Bewertungen des gesamten Fernleitungssystems unter Einbeziehung der relevanten Einflußfaktoren und Betrachtungen zu Auswirkungen von Schadensfällen werden nicht gefordert.

2.2 Stand der Technik bei sicherheitstechnischen Maßnahmen

Für die Gestaltung und Betriebsweise von Pipelineanlagen kommen sicherheitstechnische Prinzipien zur Anwendung, die sich in der Vergangenheit generell bei der Gruppe der nach deutschem Recht der überwachungsbedürftigen Anlagen bewährt haben /157-159, 171-176/. Dazu gehören im wesentlichen:

Anlagengestaltung nach dem safe-life-Prinzip, vor allem durch eine ausgeprägte Überdimensionierung belasteter Bauelemente,
 Prüfungen und Überwachung durch sachverständige Personen (TÜV-Sachverständige) bei Herstellung, Aufstellung und Betrieb,
 staatliche Überwachung (Zulassungen, Erlaubnisse, Anzeigen).

Bei diesen Prinzipien erscheint insbesondere auf Grund des hohen investiven Aufwandes die konsequente Durchsetzung des safe-life-Prinzipes durch kostenintensive interne Redundanz

(Überdimensionierung) aus ökonomischer Sicht nicht tragbar und wird verstärkt durch differenzierte Sicherheitstechnik, über die Redundanztechnik und die schadensbegrenzende Schutzebene substituiert.

Der fortschrittliche Erkenntnisstand auf vielen Gebieten der Wissenschaft und Technik findet sowohl bei der Projektierung als auch bei der Verlegung und dem Betrieb der Pipelineanlagen Anwendung. Dies betrifft sowohl theoretische als auch praktische Erkenntnisse und Verfahren aus den Bereichen Werkstoffkunde, Informationstechnik, Apparate- und Sicherheitstechnik. Dazu zählen im wesentlichen folgende Schwerpunkte:

- **Dimensionierung der Rohrleitung:**

Die Auslegung der Pipeline erfolgt unter Einbeziehung der Untersuchungsergebnisse auf dem Gebiet der Metallurgie sowie des Festigkeitsverhaltens von Rohrleitungen im Betrieb unter verschiedenen Beanspruchungen /79-86/. Die Berechnungsvorschriften für den Großteil der verwendeten Rohrtypen sind im technischen Regelwerk und in Normen enthalten. Für dynamisch beanspruchte Rohre basieren die Berechnungsmodelle vornehmlich auf Innendruck-Schwellversuchen, wobei sich der Geltungsbereich auf den untersuchten Rohrtyp beschränkt.

Grundsätzlich ist die Dimensionierung der Rohre so vorzunehmen, daß die zugrunde gelegten Beanspruchungen σ mit einer bestimmten Sicherheit (Sicherheitsfaktor S_s) unter den zulässigen Werkstoffkennwerten K bleiben. Der Sicherheitsfaktor S_s ist im allgemeinen definiert durch:

$$S_s = \frac{\text{Werkstoffkennwert}}{\text{Beanspruchung}} \quad (2.1)$$

Im Pipelinebau werden entsprechend der Berechnungsvorschriften in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen folgende Sicherheitsfaktoren gefordert /171/:

$S_s = 1,2 - 2$	gegen Verformung
$S_s = 2 - 4$	gegen Bruch
$S_s = 2 - 3$	gegen Dauerbruch
$S_s = 5 - 10$	gegen Zeitschwingbruch

Der Freiheitsgrad der Ingenieure, im Rahmen der Dimensionierung Einfluss auf die Sicherheit nehmen zu können, beschränkt sich auf die Werkstoffauswahl, die Qualitätssicherung, die Wahl des Sicherheitsfaktors und die Festlegung des Berechnungsdruckes.

- **Prüfung und Lebensdauerabschätzung**

Entsprechend der Forderungen der technischen Vorschriften sind Fernleitungsanlagen erstmalig und in regelmäßigen Abständen durch sachverständige Personen dahingehend zu überprüfen, ob der Zustand der Leitung den Anforderungen des technischen Regelwerkes entspricht. Prüfzyklen und der allgemeine Umfang der Prüfungen sind in den Regelwerken festgelegt und bisher noch verbindlich. Ausgenommen davon sind jedoch Prüfungen, die unter der Verantwortung und Koordinierung des Betreibers erforderlich sind (z.B. Funktionsprüfungen von Sicherheitseinrichtungen).

Im Rahmen der erstmaligen Prüfung wird neben der Ermittlung unzulässiger montage- und verlegungsbedingter Fehler und der Feststellung der generellen Dichtheit bzw. Belastbarkeit des Systems, auch der ursprüngliche Zustand der Rohrleitung festgestellt (Primärdaten). Ein Vergleich dieser Daten mit den im Rahmen von wiederkehrenden Prüfungen erfaßten Daten läßt auf die Fehlerentwicklung schließen.

Um eine Voraussage über die Zeit bis zu einem wahrscheinlichen Ausfall von Pipelinerohren zu treffen, haben sich verschiedene Methoden zur Lebensdauerberechnung etabliert /122/. In der Regel sind diese Methoden komplex, erfordern einen hohen mathematischen Aufwand und basieren auf Wahrscheinlichkeitsaussagen unter Einbeziehung von Beanspruchungs- und Beanspruchbarkeitsbetrachtungen. In gleicher Weise können ermittelte Fehlstellen in Rohrfernleitungen beurteilt werden. Die Methoden der Rohrinspektion sind mit der Molchtechnik sehr leistungsfähig und sichern mit einer hohen Zuverlässigkeit die Erkennung von Fehlstellen (Risse, Einschlüsse, Korrosionsschäden) ab, so daß die notwendigen Eingangsdaten mit einer hohen Genauigkeit zur Verfügung gestellt werden können /130-135/. Die bei einer Molchung gewonnenen Daten ergeben ein Bild über die Art und Schwere der gefundenen Defekte. Darauf aufbauend kann ein Monitoring- und Reparaturprogramm entwickelt werden. Die "Metall loss and crack detection pigs" erfassen auf Grundlage der Magnetfluß- oder Ultraschalltechnik Veränderungen des Pipelinematerials und ermitteln Innen- und Außenkorrosion sowie Längsrisse. "Geometry Pigs" ermitteln Veränderungen im Innendurchmesser (Beulen, Ovalitäten).

- **Korrosionsschutzmaßnahmen** /68-78/

Ausgehend vom Mechanismus der zu berücksichtigenden Korrosionsart dienen zum Korrosionsschutz drei Maßnahmen:

1. Beschichtung der Rohroberfläche durch einen organischen Überzug; Es wird die tragende Rohrwandung gegen korrosionsreaktive Einflüsse isoliert (externer Korrosionsschutz),
2. kathodischer Korrosionsschutz zur Kompensation der kathodischen Reaktionen (externer Korrosionsschutz),
3. Inhibitorzugabe zu korrosiven Transportmedien und damit Reduzierung der Korrosionsreaktion (interner Korrosionsschutz).

Die erforderliche Wirksamkeit äußerer Korrosionsschutzmaßnahmen unterirdisch verlegter Leitungen ist wesentlich von den örtlichen Bodenverhältnissen abhängig, also trassenwegabhängig.

Als äußerer Korrosionsschutz findet in der Regel eine Kombination der unter 1. und 2. genannten Maßnahmen Anwendung. Obwohl durch Maßnahmen der Korrosionsüberwachung die Wirksamkeit der Schutzhülle nachgewiesen werden kann, ist bei erdverlegten Rohrleitungen in der Praxis generell mit lokal begrenzten Beschädigungen zu rechnen (Transport, Verlegung, Bodenkräfte), so daß ein kathodischer Korrosionsschutz notwendig ist /77/.

Trotz des heutigen technischen Standes auf dem Gebiet des passiven und aktiven Korrosionsschutzes treten auch bei modernen Anlagen immer wieder Probleme hinsichtlich der ausreichenden Wirksamkeit des Korrosionsschutzes auf. Des weiteren muß im Verlauf der Betriebszeit eine regelmäßige Überwachung und Anpassung der Korrosionsschutzmaßnahmen an die sich ändernden Bedingungen erfolgen.

- **Maßnahmen zur Druckstoßabsicherung**

Es liegen umfangreiche Ergebnisse aus theoretischen und praktischen Untersuchungen zur Problematik der Druckstöße in Leitungssystemen, deren Ausbreitung und die resultierenden Beanspruchungen vor /98-120/.

Unter Einbeziehung der Entstehungsursachen von Druckstößen und der physikalischen Gesetzmäßigkeiten für deren Entstehung und Ausbreitung kommen zur Druckstoßabsicherung spezielle Sicherheitssysteme zum Einsatz /89, 90/:

1. druck-/differenzdruckabhängige Schiebersteuerung
→ gezielte prozeßzustandsabhängige Steuerung des Ventilschlusses
2. Veränderung der Schließcharakteristik der Absperrorgane
→ prozeßzustandsunabhängige (statische) Beeinflussung des Ventilschlusses
3. Fernabschaltung der Pumpen durch Endlagenschalter von Absperrorganen
→ Erzeugung einer Entlastungswelle bei Ventilschluß
4. Fernabschaltung der Pumpen durch Grenzwertgeber für Druck oder Durchfluß
→ Erzeugung einer Entlastungswelle bei auftretendem Druckstoß

Eine Funktionsbeschreibung der einzelnen Systeme ist in Anlage 1 enthalten.

Die Aufgabe der Systeme besteht darin, auftretende Druckstöße zu verhindern bzw. die daraus resultierenden Druckbeanspruchungen der Pipelineelemente zu minimieren.

In der Praxis werden häufig mehrere Sicherheitsmaßnahmen zur Vermeidung von Druckstößen kombiniert (z.B. differenzdruckgesteuertes Schließen der Trassenarmatur sowie Endlagenüberwachung mit Pumpenabschaltung). Die Realisierung dieser Sicherheitssysteme erfolgt bei modernen Pipelineanlagen mit Hilfe der Feldinstrumentierung in Verbindung mit dem zentralen Pipelinesteuerungssystem und lokalen Stationssteuerungen.

Diese Systeme stellen typische *dynamische Sicherheitseinrichtungen* dar, die jedoch in ihrem Aufbau und ihrer Funktionsweise an die spezifische Charakteristik der Pipelineanlage (Längenausdehnung) angepaßt sind und deshalb einer besonderen sicherheitstechnischen Bewertung auf Grundlage modifizierter Methoden bedürfen. Das Potential zur Reduzierung der Wahrscheinlichkeit des Versagens der Leitung auf Grund betrieblicher Fehler besteht in der Erhöhung der Zuverlässigkeit der eingesetzten Sicherheitstechnik.

- **Einsatz moderner Methoden und Verfahren der Leckerkennung und -ortung** /89, 92-96, 140, 141, 147-151/

Prinzipiell basieren die Leckerkennungs- und -ortungssysteme auf folgenden physikalischen Zusammenhängen /150, 151/:

1. Ein Leck verursacht eine Änderung des Druckes (und damit auch einen Druckstoß) und zwar einen Druckabfall, der am Leckort im allgemeinen am größten ist.
2. Durch ein Leck fließt eine Teilmenge aus, so daß der Durchfluß hinter dem Leck entsprechend fällt.
3. Auf Grund der Druckänderung steigt der Durchfluß vor dem Leckort an.
4. Bei Stoffaustritt durch einen engen Spalt werden Schallwellen emittiert.

Zur Leckerkennung werden im allgemeinen die Prozeßparameter (Druck, Durchfluß, Druckgradient) genutzt, wobei in der Regel die für den Betrieb notwendige Feldinstrumentierung unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeitsaspekte für das Lecküberwachungssystem verwendet werden /149/. Die Auswahl des Verfahrens richtet sich nach den Prozeßbedingungen und nach der erforderlichen Genauigkeit (Erkennungsschwellen). Dabei ist zu berücksichtigen, daß einige Leckerkennungs- und -ortungsverfahren nur eine eingeschränkte Genauigkeit besitzen und definierte Betriebsbedingungen erfordern. In folgender Tabelle sind die wichtigsten Verfahren zur Leckerkennung und -ortung aufgeführt.

Tabelle 2.1: Prinzipien der Leckerkennung und Leckortung	
Leckerkennungsverfahren	Prinzip
Druckfallverfahren:	Erfassung von Druckabfällen verursacht durch Leckagen
Mengenänderungsverfahren	Erfassung von Durchflußänderungen verursacht durch Leckagen
Mengenvergleichsverfahren	Vergleich der Eingangs- und Ausgangsmengen an der Leitung
Leckortungsverfahren	
Druckgradientenverfahren:	Erfassung und Auswertung von Änderungen des Druckgradienten in der Leitung
Druckstoßerfassung:	Erfassung von Druckstößen, die durch das Auftreten einer Leckage verursacht wurden
Druckdifferenzverfahren	Überwachung und Vergleich der Ruhedrucke von Leitungsabschnitten bei Förderpausen (geeignet zur Erkennung schleichender Leckagen)
Lecksuchmolchung	Erfassung der Schallwellen durch ausströmendes Medium (geeignet zur Erkennung schleichender Leckagen)

Eine hohe Sensibilität und Zuverlässigkeit bei der Erkennung von Stoffaustritten wird durch lokale Lecküberwachungen mit Hilfe spezieller Systeme (z. B. Sensorschläuche) erreicht. Diese Verfahren sind jedoch auf Grund des technischen und ökonomischen Aufwandes meist nur örtlich begrenzt einsetzbar und werden zur Überwachung der Pipeline in besonders schutzbedürftigen Gebieten (Flußquerungen, Trinkwassereinzugsgebiete o.ä.) verwendet. /147/.

- **Gefahrenabwehr**

Grundlage für die Gefahrenabwehr ist eine Alarm- und Einsatzplanung, die wiederum an die jeweiligen spezifischen regionalen Gegebenheiten anzupassen ist.

Zu den wesentlichsten Bestandteilen einer effektiven Gefahrenabwehr gehören:

- gesicherte Informationskette (vgl. Abbildung 2.1),
- Aufnahme und Beseitigung austretender Gefahrstoffe,
- spezifische Maßnahmen zur Gefahrenabwehr und -bekämpfung (Evakuierung, Ölsperren, Brand- und Explosionsvorsorge, Brandbekämpfung),
- Reparaturmaßnahmen.

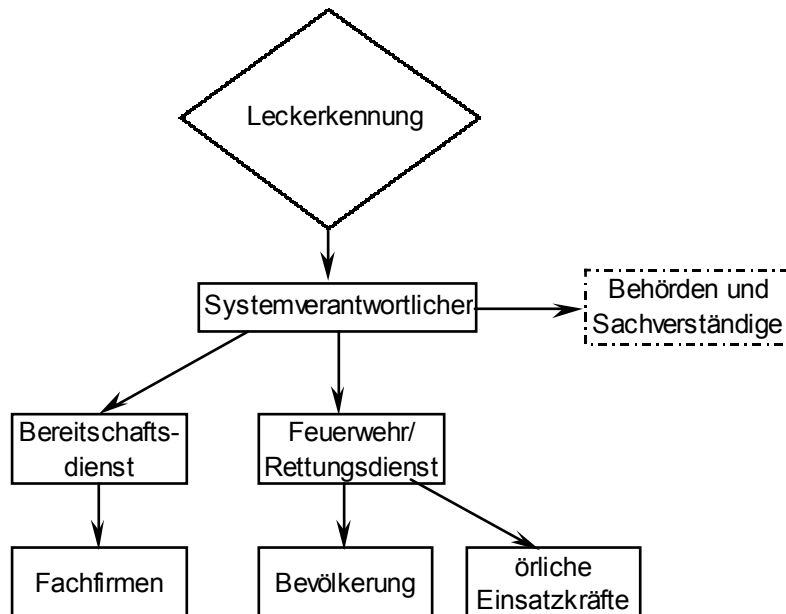


Abbildung 2.1: Informationskette bei einem Schadensfall

Die Festlegung spezifischer Maßnahmen zur Schadensbegrenzung muß sich wesentlich an den möglichen Auswirkungen bei einem Schadensfall orientieren /48/.

Es ist ersichtlich, daß auf vielen Gebieten ein vielschichtiges und detailliertes Wissen vorliegt. Dennoch fehlen bisher Entwicklungen für eine methodische Vorgehensweise zur sicherheitstechnischen Bewertung von Fernleitungssystemen, bei denen die Erkenntnisse aus den Teilgebieten der Pipelinetechnik umfassend einbezogen werden können. Zwar wurde in /181/ der zu dieser Zeit vorhandene Wissensstand zusammenfassend dargestellt und somit ein Kompendium für Planer und Betreiber von Pipelineanlagen erarbeitet. Dennoch ist auch darin eine konzeptionelle Vorgehensweise zur strukturierten Bewertung der einzelnen Teilprobleme in Bezug auf die Systemsicherheit nicht enthalten. In /195/ erfolgt eine Zusammenstellung und Klassifizierung der auf die Gesamtsicherheit druckführender Rohrleitungssysteme wirkenden Einflußgrößen, wobei sich aber vordergründig auf kleinkalibrige innerbetriebliche Rohrleitungen und nicht auf Fernleitungen bezogen wurde. Die Charakteristik der Einflußgrößen unterscheidet sich jedoch bei diesen Systemen zum Teil erheblich.

Das nachfolgende Zitat aus einem Gutachten zu "Rechtliche und technische Aspekte der Sicherheitskonzeption von Fern- und Verbindungsleitungen zum Transport brennbarer Flüssigkeiten" /228/ verdeutlicht diesen bestehenden Mangel:

"Zur Erfassung der Sicherheitsrisiken durch und der Sicherheitskonzepte von Fern- und Verbindungsleitungen zum Transport gefährlicher Flüssigkeiten erscheint es hilfreich, eine zusammenfassende Analyse zur Verfügung zu haben. Durch die hierfür erforderliche methodische und analytische Betrachtung würden die Betreiber angeleitet, sich umfassend mit allen Sicherheitsaspekten ihrer Anlage zu beschäftigen und sich in nachvollziehbarer Weise hierzu zu äußern."

2.3 Sicherheitstechnische Bewertungsmethoden

Die Vorgehensweise zur Analyse komplexer technischer Systeme wird unter dem Begriff "Risikoanalyse" zusammengefaßt. Die Risikoanalyse bietet die Möglichkeit, die spezifischen Besonderheiten von Pipelineanlagen bei der sicherheitsbezogenen Untersuchung zu

berücksichtigen, wenn eine entsprechende methodische Anpassung erfolgt. Der Ablauf einer Risikoanalyse umfaßt grundsätzlich folgende Teilschritte:

- Datenermittlung
- Anlagenabgrenzung und Abgrenzen der sicheren Betriebsbedingungen
- Systematische Gefahrensuche
- Beurteilung und Bewertung der ermittelten Gefahren nach Wahrscheinlichkeit und Tragweite
- Maßnahmenplanung und Beurteilung des verbleibenden Risikos

Die Durchführung der Teilschritte bedarf also Methoden, mit denen die verschiedenen Aspekte des Systems, z.B. Gefahren, Auswirkungen von Ausfällen, chemische und physikalische Zusammenhänge untersucht werden können. In Anlage 2 sind die Analysemethoden aufgeführt und kurz bewertet, die in der chemischen Industrie sowie für spezielle Problemstellungen häufig angewendet werden. Sie unterscheiden sich erheblich in ihrer Zielstellung und im Umfang ihrer Untersuchungsführung /66/. Für die systematische Gefahrensuche eignen sich einige der Methoden auch für Pipelineanlagen (z.B. Fehlerbaumanalyse). Der Großteil der Methoden zur Gefahrenbeurteilung, bezieht sich aber entweder auf spezielle Anlagengruppen (z.B. auf räumlich-komplexe stoffverarbeitende Anlagen) oder diese haben spezifische Zielstellung (Human Reliability Analysis), so daß sie für Pipelineanlagen nicht geeignet sind. Bei den Bewertungsverfahren wird nicht berücksichtigt, daß Art, Wirkungsweise und Wahrscheinlichkeit des Auftretens der differenzierten Ursachen für ein Rohrversagen vom Anlagenzustand, den Betriebsbedingungen und den sich entlang des Trassenverlaufes ändernden Umgebungsbedingungen abhängen und in gleicher Weise sich das potentielle Schadensausmaß in Abhängigkeit der Territorialbedingungen ändert. Diese Anforderungen sind demnach in der zu entwickelten Methode zur Risikobewertung zu realisieren.