

**Weiterentwicklung
von Methoden zur
Ermittlung von Leck-
und Bruchhäufigkeiten
druckführender
Komponenten**

Vorhaben RS 1180 (AP 3.1)

Technischer Bericht/ Technical Report

Reaktorsicherheitsforschung-
Vorhabens Nr.:/
Reactor Safety Research-Project No.:
RS 1180 (AP 3.1)

Vorhabensitel / Project Title:
Weiterentwicklung und
Erprobung von Methoden und
Werkzeugen für probabilisti-
sche Sicherheitsanalysen

Development and Test
Applications of Methods and
Tools for Probabilistic Safety
Analyses

Berichtstitel:
Weiterentwicklung von
Methoden zur Ermittlung von
Leck- und Bruchhäufigkeiten
druckführender Komponenten

Autor / Authors:
H. Grebner, U. Jendrich,
F. Michel, H. Reck, D. Sayar,
J. Sievers, R. Wenke

Berichtszeitraum / Publication Date:
Juli 2010

Anmerkung:
Das diesem Bericht zugrunde lie-
gende F&E-Vorhaben wird im Auf-
trag des Bundesministeriums für
Wirtschaft und Technologie
(BMWi) unter dem Kennzeichen
RS1180 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt
dieser Veröffentlichung liegt beim
Auftragnehmer.

Kurzfassung

Im Rahmen des Vorhabens RS1180 'Weiterentwicklung und Erprobung von Methoden und Werkzeugen für probabilistische Sicherheitsanalysen', wurden im Arbeitspaket 3.1 'Weiterentwicklung von Methoden zur Ermittlung von Leck- und Bruchhäufigkeiten druckführender Komponenten' Untersuchungen zur Entwicklung einer Schnittstelle zwischen der Anwendung von statistischen Methoden und von Strukturzuverlässigkeitsmodellen, zur Entwicklung von Ansätzen zur Berücksichtigung der Einflüsse von verschiedenen Schädigungsmechanismen, Prüfkonzepten und Lerneffekten und zur Entwicklung geeigneter Strukturzuverlässigkeitsmodelle für Behälter mit hohem Energieinhalt durchgeführt.

Aus früheren Untersuchungen mit Strukturzuverlässigkeitsmodellen ergab sich, dass die Annahmen zur Rissverteilung wesentlichen Einfluss auf die Berechnung der Leck- und Bruchwahrscheinlichkeiten haben. Daher wurde eine Auswertung der Betriebserfahrung im Hinblick auf Rissereignisse in deutschen Kernkraftwerken auf Basis der GRS-Datenbank KomPass sowie mit der Datenbank OPDE der OECD/NEA für internationale Ereignisse vorgenommen sowie die einschlägige Literatur ausgewertet. Ziel dieser Arbeit war die Ermittlung einer Anfangsrissverteilung für den Einsatz im GRS-Strukturzuverlässigkeitsprogramm PROST. Rissverteilungen abgeleitet aus der Betriebserfahrung, die Eingabeparameter für die Strukturzuverlässigkeitsmodelle zur Bestimmung von Leck- und Bruchwahrscheinlichkeiten in druckführenden Komponenten sind, bilden die Schnittstelle zu der statistischen Methodik.

Für die beobachteten Ereignisse wurde jeweils das mittlere Risstiefen- zu Wanddickenverhältnis bestimmt sowie das mittlere Verhältnis Risstiefe zu halber Risslänge ermittelt. Insgesamt wurden etwa 100 unmittelbar verwertbare Ereignisse mit Riss gefunden.

Für das betrachtete Anwendungsbeispiel wurde eine Auswertung mit dem statistischen Verfahren mit aktuellen Daten aus KomPass und OPDE durchgeführt sowie PROST-Berechnungen mit den neu bestimmten Anfangsrissverteilungen vorgenommen. Weiterhin wurde ein Ansatz für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Riss an der untersuchten Stelle auftritt, aus der Literatur abgeleitet. Die mit PROST ermittelten Leck- bzw. Bruchwahrscheinlichkeiten multipliziert mit der Risswahrscheinlichkeit liegen jeweils

über den Ergebnissen mit der statistischen Methode. Dies deutet daraufhin, dass die untersuchte Stelle bei der realistischen Nachbildung der Belastung in PROST höher beansprucht wird als es dem Mittel der bei der statistischen Methode betrachteten Fälle entspricht. Weitere PROST-Berechnungen für andere Positionen der Volumenausgleichsleitung mit anderen Annahmen bezüglich der Belastung würden dann auch Hinweise bezüglich der Aussagegenauigkeit der angesetzten Risswahrscheinlichkeit ermöglichen.

Die Arbeiten zur Entwicklung von Ansätzen zur Berücksichtigung verschiedener Einflüsse können für die Ergebnisse aus der deutschen Betriebserfahrung wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Anzahl der Leckereignisse an sicherheitstechnisch bedeutsamen Rohrleitungen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR ist insgesamt gering.
- Die schon in vorangegangenen Untersuchungen festgestellte Nennweitenabhängigkeit von Leckereignissen an sicherheitstechnisch bedeutsamen Rohrleitungen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR wurde bestätigt, d. h. von Leckereignissen waren vor allem Rohrleitungen mit kleineren Durchmessern betroffen.
- Die Leckereignisse wurden durch verschiedene Schädigungsmechanismen ausgelöst, von denen keiner über den gesamten Betrachtungszeitraum dominiert. Ein signifikanter, mechanismusspezifischer Trend bei der Anzahl der Leckereignisse war nur für den Mechanismus „mechanische Ermüdung“ zu erkennen.
- Die Häufigkeit von Rohrleitungsleckagen an Schweißnahtbereichen sicherheitstechnisch bedeutsamer Rohrleitungen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR hat im Betrachtungszeitraum abgenommen. Dagegen haben Rohrleitungsleckagen, die im Grundwerkstoffbereich aufgetreten sind, insbesondere in Anlagen mit DWR an Bedeutung gewonnen.

Die Arbeiten zur Entwicklung von Strukturzuverlässigkeitsmodellen für Behälter umfassten eine Abfrage der KomPass-Datenbank nach Ereignissen mit Rissen, Lecks oder Brüchen bei Behältern sowie Berechnungen mit PROST für einen ausgewählten Speisewasserbehälterfall, bei dem nach kurzer Betriebszeit (458 Tagen) mehrere Rissbefunde mit Risstiefen bis zu 82 % der Wandstärke aufgrund des Schädigungsmechanismus Spannungsrisskorrosion festgestellt wurden. Zur Festlegung der Risswachstumsgeschwindigkeit wurden hier zwei der in PROST verfügbaren Korrosionsmodelle bezüglich des Schadensbefunds angepasst. Für eine konstante Rissgeschwindigkeit von $da/dt = 3.1 \cdot 10^{-7}$ mm/s ergeben die Berechnungen eine nahezu hundertprozentige Leckwahrscheinlichkeit nach etwa drei Jahren.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die probabilistischen Strukturzuverlässigkeitsmodelle ein wertvolles Instrument zur Ergänzung der bisher im Rahmen der PSA eingesetzten Methodik zur Abschätzung von Leck- und Bruchhäufigkeiten basierend auf der Betriebserfahrung sein können.

Abstract

Within the framework of the research and development project RS1180 'Further Development and Testing of Methods and Tools for Probabilistic Safety Analyses' investigations have been performed in the work package 3.1 'Further Development of Methods for the Investigation of Leak and Break Frequencies of Pressure Retaining Components' for developing an interface for the application of statistical methods and structural reliability models. In addition, approaches with respect to considering the effects of various damage mechanisms, testing concepts and learning effects as well as suitable structural reliability models for vessels with high energy contents have been developed.

Previous studies with structural reliability models indicated that the assumptions for crack distribution have a significant influence on the calculation of leak and break probabilities. Therefore, an evaluation of the operating experience has been performed with regard to the crack events in German nuclear power plants based on the GRS database KomPass as well as the OECD/NEA database OPDE for international events. Moreover, the relevant literature has been evaluated. The objective of this work was the determination of an initial crack distribution for the application in the GRS structural reliability program PROST. Crack distributions based on the operational experience representing input parameters for structure reliability models for the evaluation of leak and break probabilities in pressure retaining components are the interface to the statistical method.

For the observed events, the mean crack depth in proportion to the wall thickness as well as the mean ratio of crack depth to half of crack length have been calculated. In total, 100 directly applicable events with cracks have been observed.

For the application example considered, an evaluation was conducted with the statistical procedure with current data from KomPass and OPDE and PROST calculations were performed with the newly determined initial crack distribution. Furthermore, an approach for the probability that a crack occurs at the examined position, was derived from literature. The leak and break probabilities generated by PROST multiplied with the crack probability range in each case above the results gained with the statistical method. This is an indication that the location under consideration is higher loaded when it is realistically modeled with PROST than the middle of the locations considered

by the statistical method. Further calculations with PROST for other positions of the volume control system with different assumptions concerning the load would give hints to the accuracy of the crack occurrence probability.

The work for the development of approaches for the determination of various influences can be summarized for the results based on German operating experience as follows:

- The number of leak events in safety-related significant piping in German plants with PWR and BWR is generally low.
- The already in previous tests ascertained nominal size dependency of leak events in safety-related significant piping in German plants with PWR and BWR was confirmed, i.e. leak events effected mainly piping with smaller diameters.
- Leak events were initiated by various damage mechanisms, of which no one dominated over the total period of observation. A significant, mechanism-specific trend in regards to the number of leak events was only recognizable for the mechanism „mechanical fatigue“.
- The frequency of pipe leaks at welded joints of safety-related significant piping in German plants with PWR and BWR has decreased during the period of observation. However, pipe leaks occurring in the basis material area, especially in plants with PWR, gained in importance.

The work for the development of structural reliability models for vessels comprised of a KomPass database search for events with cracks, leaks or breaks of vessels as well as calculations with PROST in the case of a feedwater vessel. For the determination of the crack propagation two corrosion models as available in PROST were adapted with regard to the damage findings. For a constant crack speed of $da/dt = 3.1 \cdot 10^{-7}$ mm/s the calculations show a nearly one hundred percent leak probability after approx. three years.

In summary, it can be stated, that probabilistic structural reliability models are a valuable tool to supplement the methodology for assessing leak and break frequencies based on the operating experience as applied so far in the frame of PSA.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Arbeitsprogramm.....	4
3	Schnittstellenentwicklung.....	6
3.1	Anwendungsfall zur Schnittstellenentwicklung	6
3.2	Auswertung der statistischen Methodik.....	8
3.3	Festlegung von Anfangsrissverteilungen	10
3.3.1	Auswertung der Betriebserfahrung	12
3.3.2	Abschätzungen der Anfangsrissgröße aus der Literatur.....	15
3.4	PROST-Berechnungen für den Anwendungsfall ‘Thermische Ermüdung’	16
3.5	Risswahrscheinlichkeit und Vergleich der beiden Verfahren	23
4	Ansätze zur Berücksichtigung der Einflüsse von Schadensmechanismen, Prüfkonzepten und Lerneffekten	27
4.1	Ausgangssituation, Zielsetzung und Vorgehensweise	27
4.2	Auswertung von Daten zu Ereignissen in DWR- und SWR-Anlagen.....	28
4.2.1	Ereignisse in deutschen Anlagen mit DWR und SWR.....	28
4.2.2	Ereignisse in US-amerikanischen Anlagen mit DWR und SWR	44
4.3	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick	49
5	Strukturzuverlässigkeitsmodelle für Behälter	52
5.1	Problemstellung	52
5.2	PROST-Berechnungen	52
5.3	Ergebnisse.....	55
6	Zusammenfassung	56
6.1	Arbeiten zur Schnittstellenentwicklung und -erprobung.....	56
6.2	Arbeiten zur Entwicklung von Ansätzen zur Berücksichtigung verschiedener Einflüsse.....	58
6.3	Arbeiten zur Entwicklung von Strukturzuverlässigkeitsmodellen für Behälter	59

6.4	Schlussfolgerungen	59
7	Literatur	61
8	Anhang	64
9	Verteiler	66

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1-1	Schaltplanausschnitt mit Volumenregelsystem.....	7
Abb. 3.1-2	Finite-Elemente-Modell des Rohrleitungsabschnitts des Volumenregelsystems, Gesamtmodell und Ausschnitt des Riss- und Schichtungsbereichs (Anwendungsfall “Thermische Ermüdung“)	8
Abb. 3.3-1	Anpassung einer Lognormalverteilung an die a/t-Werte aus KomPass und OPDE.....	13
Abb. 3.3-2	Anpassung einer Lognormal- bzw. einer Exponentialverteilung an die a/c-Werte aus KomPass und OPDE	13
Abb. 3.3-3	Dichtefunktion der an die a/t-Werte aus KomPass und OPDE angepassten Lognormalverteilung	14
Abb. 3.3-4	Dichtefunktion der an die a/c-Werte aus KomPass und OPDE angepassten Lognormalverteilung	15
Abb. 3.3-5	Lognormalverteilung für Inertgasschweißung nach /KHA 99/ für Beispiel Volumenregelsystem DN 50	16
Abb. 3.4-1	Belastungseingabe in PROST: Rissöffnende Spannung entlang der Wanddicke an der Rissposition	17
Abb. 3.4-2	Leckhäufigkeit in Abhängigkeit von der Betriebszeit, PROST- Berechnung des Anwendungsfalls mit Anfangsrissen gemäß deutscher Betriebserfahrung	19
Abb. 3.4-3	Bruchhäufigkeit in Abhängigkeit von der Betriebszeit, PROST- Berechnung des Anwendungsfalls mit Anfangsrissen gemäß deutscher Betriebserfahrung	19
Abb. 3.4-4	Leckhäufigkeit in Abhängigkeit von der Betriebszeit, PROST- Berechnung des Anwendungsfalls mit Anfangsrissen gemäß internationaler Betriebserfahrung	20
Abb. 3.4-5	Bruchhäufigkeit in Abhängigkeit von der Betriebszeit, PROST- Berechnung des Anwendungsfalls mit Anfangsrissen gemäß internationaler Betriebserfahrung	20
Abb. 3.4-6	Leckhäufigkeit in Abhängigkeit von der Betriebszeit, PROST- Berechnung des Anwendungsfalls mit Anfangsrissen gemäß internationaler Betriebserfahrung mit deutschen SWR	21

Abb. 3.4-7	Bruchhäufigkeit in Abhängigkeit von der Betriebszeit, PROST-Berechnung des Anwendungsfalls mit Anfangsrissen gemäß internationaler Betriebserfahrung mit deutschen SWR.....	21
Abb. 3.5-1	Leckhäufigkeiten aus PROST-Berechnung multipliziert mit der Risswahrscheinlichkeit (0,026).....	25
Abb. 3.5-2	Bruchhäufigkeiten aus PROST-Berechnung multipliziert mit der Risswahrscheinlichkeit (0,026).....	25
Abb. 4.2-1	Anzahl der Leckagen und sonstiger Ereignisse an Rohrleitungen der J- und K-Systeme von deutschen Anlagen mit DWR; Anlagen in Betrieb	29
Abb. 4.2-2	Anzahl der Leckagen und sonstiger Ereignisse an Rohrleitungen der J- und K-Systeme von deutschen Anlagen mit SWR; Anlagen in Betrieb	30
Abb. 4.2-3	Nennweitenabhängige Häufigkeit von Leckagen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher Anlagen mit DWR und SWR.....	32
Abb. 4.2-4	Zeitliche Entwicklung der nennweitenabhängigen Häufigkeit für Leckagen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher DWR-Anlagen.....	33
Abb. 4.2-5	Zeitliche Entwicklung der nennweitenabhängigen Häufigkeit für Leckagen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher SWR-Anlagen.....	33
Abb. 4.2-6	Alle Meldepflichtigen Ereignisse an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher DWR-Anlagen differenziert nach Schädigungsmechanismus	34
Abb. 4.2-7	Leckagen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher DWR-Anlagen differenziert nach Schädigungsmechanismus	35
Abb. 4.2-8	Alle Meldepflichtigen Ereignisse an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher SWR-Anlagen differenziert nach Schädigungsmechanismus	36
Abb. 4.2-9	Leckagen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher SWR-Anlagen differenziert nach Schädigungsmechanismus	36
Abb. 4.2-10	Zeitliche Entwicklung der Leckhäufigkeit durch einzelne Schädigungsmechanismen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher DWR-Anlagen.....	37

Abb. 4.2-11	Zeitliche Entwicklung der Leckhäufigkeit durch einzelne Schädigungsmechanismen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher SWR-Anlagen.....	38
Abb. 4.2-12	Zeitliche Entwicklung der Häufigkeit von Leckagen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher DWR-Anlagen nach Schadensort	40
Abb. 4.2-13	Zeitliche Entwicklung der Häufigkeit von Leckagen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher SWR-Anlagen nach Schadensort	40
Abb. 4.2-14	Nennweitungsspezifische Leckhäufigkeit an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher DWR-Anlagen aus originalen (durchgezogene Verläufe) und modifizierten Ereignisdaten (gestrichelte Verläufe) für $25 < DN \leq 100$ mm.....	43
Abb. 4.2-15	Nennweitungsspezifische Leckhäufigkeit an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher DWR-Anlagen aus originalen (durchgezogene Verläufe) und modifizierten Ereignisdaten (gestrichelte Verläufe) für $DN \leq 25$ mm.....	44
Abb. 4.2-16	Leckereignisse an Rohrleitungen Class 1 und 2 US-amerikanischer DWR-Anlagen nach Nennweitenbereichen	45
Abb. 4.2-17	Leckereignisse an Rohrleitungen Class 1 und 2 US-amerikanischer SWR-Anlagen nach Nennweitenbereichen	46
Abb. 4.2-18	Leckereignisse an Rohrleitungen (Klasse 1 und 2) US-amerikanischer DWR-Anlagen nach Schädigungsmechanismen	48
Abb. 4.2-19	Leckereignisse an Rohrleitungen (Klasse 1 und 2) US-amerikanischer SWR-Anlagen nach Schädigungsmechanismen	48
Abb. 5.2-1	Verwendete Risswachstumsgeschwindigkeiten für den Speisewasserbehälter	53
Abb. 5.3-1	Berechnete Leckwahrscheinlichkeiten für das Beispiel Speisewasserbehälter	55

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.2-1	Ergebnisse der Neuberechnung des Beispiels im Vergleich zu den ursprünglichen Werten im Datenband zum PSA-Leitfaden /FAK 05a/ (aus (/GRE 08/)) 9
Tab. 3.2-2	Ergebnisse der Neuberechnung des Beispiels mit OPDE-Daten im Vergleich zu den deutschen Werten (Auswertung nur für DN 50)..... 10
Tab. 3.4-1	Verteilungen der Anfangsrissgrößen für PROST-Berechnungen zum Anwendungsbeispiel 'Thermische Ermüdung' 17
Tab. 3.4-2	Eingabedatensatz für die weiteren verteilten Größen in der PROST-Parameterstudie zum Anwendungsbeispiel 'Thermische Ermüdung' (siehe Kapitel 3.1) 18
Tab. 3.4-3	Leckwahrscheinlichkeit nach 40 Jahren 23
Tab. 3.4-4	Bruchwahrscheinlichkeit nach 40 Jahren 23
Tab. 3.5-1	Risswahrscheinlichkeit nach /KHA 99/ 24
Tab. 3.5-2	Vergleich der Bruchhäufigkeiten nach verschiedenen Verfahren..... 26
Tab. 5.2-1	Eingabedaten für die Testrechnungen zum Speisewasserbehälter (Anfangswerte, alle Abmessungen in mm) 54
Tab. A-1	Reaktorjahre deutscher SWR und DWR 64

1 Einleitung und Zielsetzung

Von der GRS wurde Ende der 80er Jahre eine Methode zur Ermittlung der Eintrittshäufigkeiten von Lecks und Brüchen in Rohrleitungen entwickelt. Diese stützt sich wesentlich auf die Statistik der Betriebserfahrung mit Lecks und Brüchen in Rohrleitungen, eine vereinfachende Beschränkung von Leckagen auf die Population 'leckrelevanter Stellen', und die Nutzung der Gegebenheit, dass die großen Rohrleitungen für den Bruchausschluss qualifiziert sind. Sie wurde erstmals am Beispiel des Druckwasserreaktors der Referenzanlage Biblis B im Rahmen der deutschen Risikostudie Phase B (DRS-B) erprobt /GRS 90/ und danach bei mehreren PSAs für Druckwasserreaktoren und für eine Siedewasserreaktor-Referenzanlage der Baulinie 69 /HOE 03/ erfolgreich eingesetzt. Die damit erzeugten Datensätze sind im Einklang mit der entsprechenden generischen und nationalen Betriebserfahrung. Einwände gegen die Methode sind nicht bekannt. Vielmehr wurde sie in die technischen Fachdokumente /FAK 05/ und /FAK 05a/ zum PSA-Leitfaden /BMU 05/, wie bereits auch in /FAK 97/ und teilweise in das Referenzdokument des ASME PSA Standards /ASM 02/ übernommen.

Sammlungen meldepflichtiger Ereignisse an mechanischen Komponenten von Kernkraftwerken sind bei der GRS im Wesentlichen in zwei Datenbanken enthalten. Während in der Datenbank KomPass /MIC 03/ derzeit etwa 800 Ereignisse von deutschen Anlagen enthalten sind, ist die Datenbank OPDE /LYD 08/, /REC 06/ eine internationale Sammlung von Ereignissen mit derzeit etwa 3700 Einträgen aus elf Mitgliedsländern der OECD Nuclear Energy Agency (NEA).

Die Datenbasis der weltweiten Betriebserfahrung ermöglicht wegen der geringen Population vergleichbarer Komponenten nur eine direkte Quantifizierung der Zuverlässigkeit von Komponenten bis zum Bereich von derzeit ca. 10^{-4} pro Reaktorjahr. Zur Einschätzung der Strukturzuverlässigkeit passiver Komponenten, insbesondere der Leck- und Bruchwahrscheinlichkeiten, gehört zum heutigen Stand von Wissenschaft und Technik der Einsatz probabilistischer strukturmechanischer Analysemethoden. Mit diesen Methoden können auch Leckwahrscheinlichkeiten im Bereich von kleiner 10^{-4} pro Reaktorjahr bestimmt werden. In diesem Zusammenhang wurde bei der GRS mit der Entwicklung eines entsprechenden Analysewerkzeugs PROST (Probabilistische Strukturbeurteilung) mit probabilistischen Ansätzen zur quantitativen Abschätzung der Strukturzuverlässigkeit von defektbehafteten Rohrleitungskomponenten begonnen /GRE 04/, /GRE 10/. begonnen. Diese zunächst auf Rohrleitungsstücke und den Schädigungsmechanismus Ermüdung begrenzte Programmentwicklung ermöglicht die Be-

rechnung von Leck- und Bruchwahrscheinlichkeiten für verschiedene Rohrleitungsgeometrien, Belastungsannahmen und Rissverteilungen. Dabei kann insbesondere auch der Einfluss von wiederkehrenden Prüfungen und daraus resultierenden Reparaturmaßnahmen auf die Leckwahrscheinlichkeit untersucht werden.

Abb. 1-1 zeigt den derzeitigen Stand der Methoden der GRS zur Bestimmung von Leck- und Bruchwahrscheinlichkeiten.

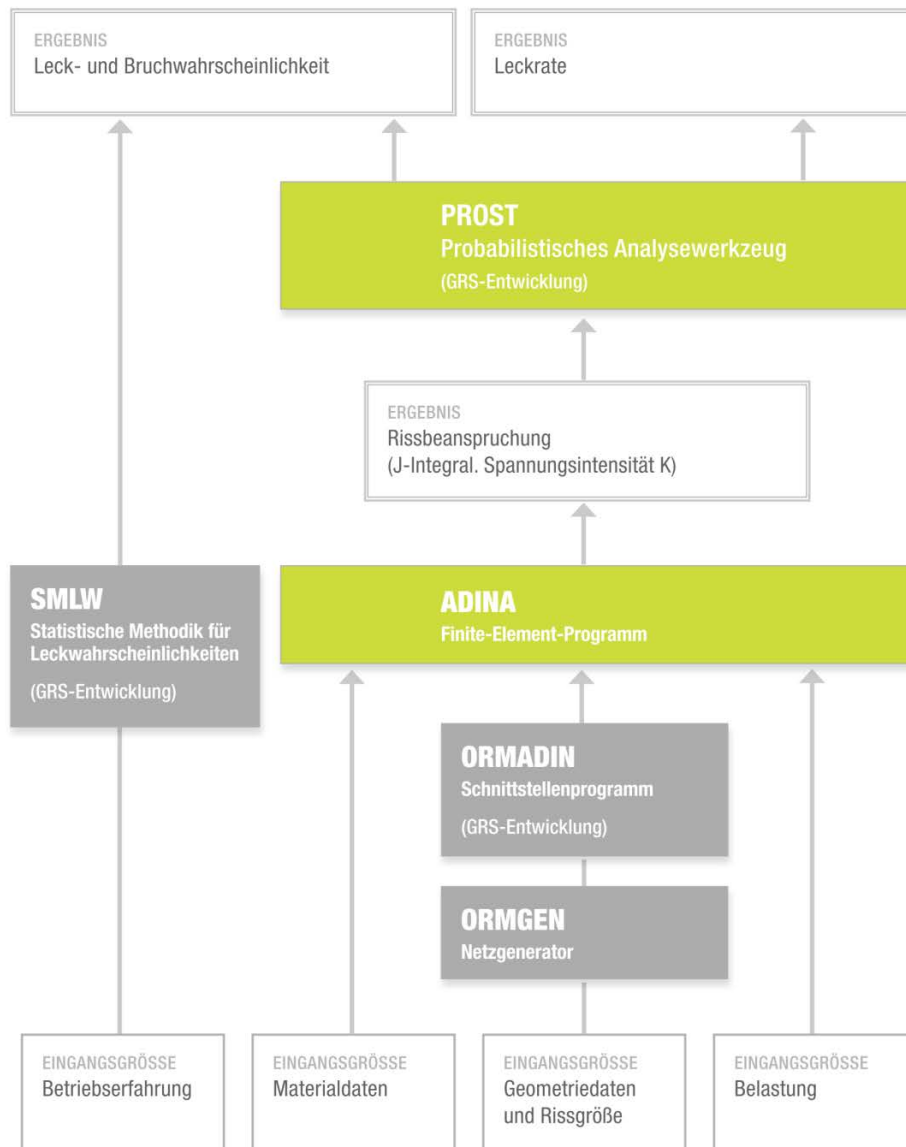


Abb. 1-1 Methoden der GRS zur Bestimmung von Leck- und Bruchwahrscheinlichkeiten

Übergeordnete Zielsetzung der Arbeiten im Rahmen des Vorhabens RS1180 'Weiterentwicklung und Erprobung von Methoden und Werkzeugen für probabilistische Sicherheitsanalysen, (Arbeitspaket AP 3.1) ist, die vorhandenen Methoden zur Ermittlung von Leck- und Bruchhäufigkeiten druckführender Komponenten gemäß dem Stand von Wissenschaft und Technik für die PSA weiter zu entwickeln. Dabei ergeben sich die folgenden Einzelzielsetzungen:

- Es ist eine Schnittstelle zwischen der Anwendung der statistischen Methodik basierend auf der Betriebserfahrung (SMLW) und der Methodik basierend auf Strukturzuverlässigkeitsmodellen (PROST) zu entwickeln und zu erproben.
- Im Hinblick auf die Nutzung generischer Datensätze für Leck- und Bruchhäufigkeiten sind auf Grundlage der verfügbaren Daten zur Betriebserfahrung mit druckführenden Komponenten Ansätze zur Berücksichtigung und differenzierten Bewertung der Einflüsse verschiedener Schädigungsmechanismen sowie von Prüfkonzepten und Lerneffekten zu entwickeln und zu erproben. Weiterhin sind aus den verfügbaren Daten Verteilungsfunktionen für die Eingabeparameter der Strukturzuverlässigkeitsmodelle, insbesondere für die Annahmen zu Rissverteilungen in Rohrleitungen und Behältern, abzuleiten.
- Es sind geeignete Strukturzuverlässigkeitsmodelle für Behälter mit hohem Energieinhalt (Innendruck ≥ 20 bar oder Temperatur ≥ 100 °C) z. B. für den Speisewasserbehälter, zu entwickeln und zu erproben.

Im Folgenden werden das Arbeitsprogramm, die durchgeführten Untersuchungen sowie die erzielten Ergebnisse zusammengefasst.

2 **Arbeitsprogramm**

Im Sinne der Zielsetzung sollten folgende Arbeiten durchgeführt werden.

- Schnittstelle zwischen statistischer Methodik und Strukturzuverlässigkeitsmodellen

Zur Entwicklung und Erprobung einer Schnittstelle zwischen der Anwendung der statistischen Methode basierend auf der Betriebserfahrung und der Methodik basierend auf Strukturzuverlässigkeitsmodellen sollten im Einzelnen die folgenden Arbeiten durchgeführt werden:

- Identifizierung und Festlegung relevanter Merkmale für die Analyse des vorhandenen Datenbestands (Datenbanken KomPass, OPDE),
 - Diskussion der Übertragbarkeit generischer Daten auf anlagenspezifische Gegebenheiten,
 - Erarbeitung und Festlegung der Schnittstelle,
 - Vergleichsanalyse mit statistischer Methodik und Strukturzuverlässigkeitsmodellen.
- Ansätze zur Berücksichtigung verschiedener Einflüsse

Zur Entwicklung und Erprobung von Ansätzen zur Berücksichtigung der Einflüsse von verschiedenen Schädigungsmechanismen, Prüfkonzepten und Lerneffekten bei Anwendung statistischer Methoden sollten im Einzelnen folgende Arbeiten durchgeführt werden:

- Vertiefte Analyse des vorhandenen Datenbestands (KomPass, OPDE) mittels statistischer Methoden zur Feststellung von Korrelationen zu den Einflussfaktoren Mechanismus, Prüfkonzept und Lerneffekte,
- Ableitung von Korrelationsfaktoren und Implementierung in die statistische Methode zur Ermittlung von Leck- und Bruchhäufigkeiten aus der Betriebserfahrung,
- Parametrische Untersuchungen zum Einfluss von Änderungen im Prüfkonzept oder in der betrieblichen Fahrweise oder der Verwendung eines bezüglich relevanter Schädigungsmechanismen optimierten Werkstoffs auf Leck- und Bruchwahrscheinlichkeiten einer Rohrleitung,

- Exemplarische Erprobung der verbesserten Methode und Bewertung der Vorgehensweise.
- Strukturzuverlässigkeitsmodelle für Behälter mit hohem Energieinhalt

Die Methodik zur Bestimmung von Leck- und Bruchwahrscheinlichkeiten basierend auf dem für Rohrleitungsstücke anwendbaren Prototyp PROST sollte z. B. für einen Speisewasserbehälter erweitert werden. Dabei sollten folgende Arbeiten durchgeführt werden:

- Erweiterung der probabilistischen Berechnungsmöglichkeiten auf die angesprochenen Behälter
- Festlegung von Verteilungsfunktionen für die Eingabeparameter unter Berücksichtigung der Betriebserfahrung für die angesprochenen Behälter,
- Erprobung der entwickelten Berechnungsmodelle.

3 Schnittstellenentwicklung

3.1 Anwendungsfall zur Schnittstellenentwicklung

Der Fachband zu PSA-Daten /FAK 05a/ des geltenden PSA-Leitfadens enthält eine Methodik zur nennweitenabhängigen Ermittlung der Eintrittshäufigkeit von Lecks in Rohrleitungen basierend auf der Auswertung der Betriebserfahrung von Kernkraftwerken sowie einen Anwendungsfall. Dabei wurden Leck- und Bruchhäufigkeiten für leckrelevante Stellen des Volumenregelsystems deutscher Druckwasserreaktoren (DWR) ermittelt, insbesondere wurden die Abschnitte der Nennweite DN 50 betrachtet. Dieser Anwendungsfall wurde im Rahmen des Vorhabens SR 2608 bezüglich der zu betrachtenden Betriebszeit und der gefundenen Lecks aktualisiert /GRE 08/.

Unter den dieser Auswertung zugrundeliegenden Ereignissen befindet sich auch ein Fall mit relativ großer Leckrate, der zum Gegenstand zusätzlicher Untersuchungen wurde, insbesondere auch unter strukturmechanischen Aspekten /GRE 01, GRE 04/. Das Ermüdungsrisswachstum, das in diesem Fall zum Leck führte, war auf eine thermomechanische Belastung auf Grund einer defekten Rückstoßklappe zurückzuführen. Abb. 3.1-1 zeigt einen Schaltplanausschnitt mit der Leckstelle und der betroffenen Rückstoßklappe.

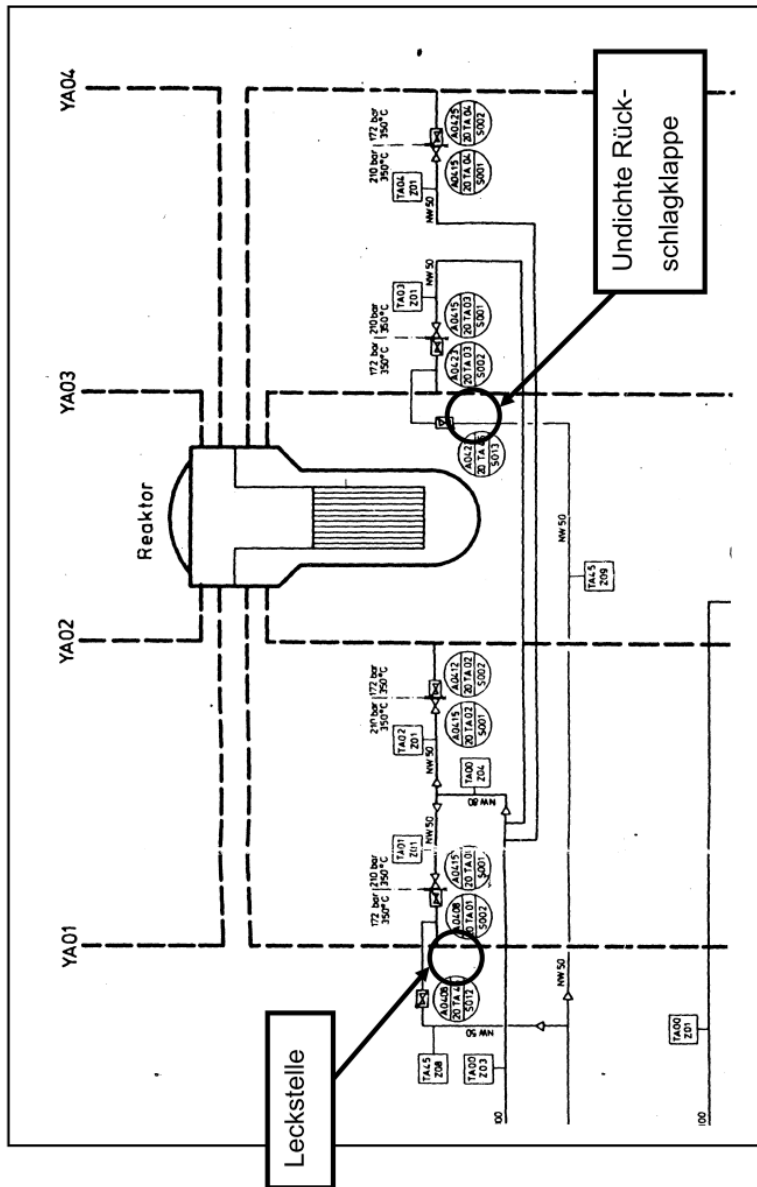


Abb. 3.1-1 Schaltplanausschnitt mit Volumenregelsystem

Im Rahmen der PROST-Entwicklung /GRE 04/ wurde für diesen Anwendungsfall ein Finite-Elemente-Modell entwickelt (siehe Abb. 3.1-2).

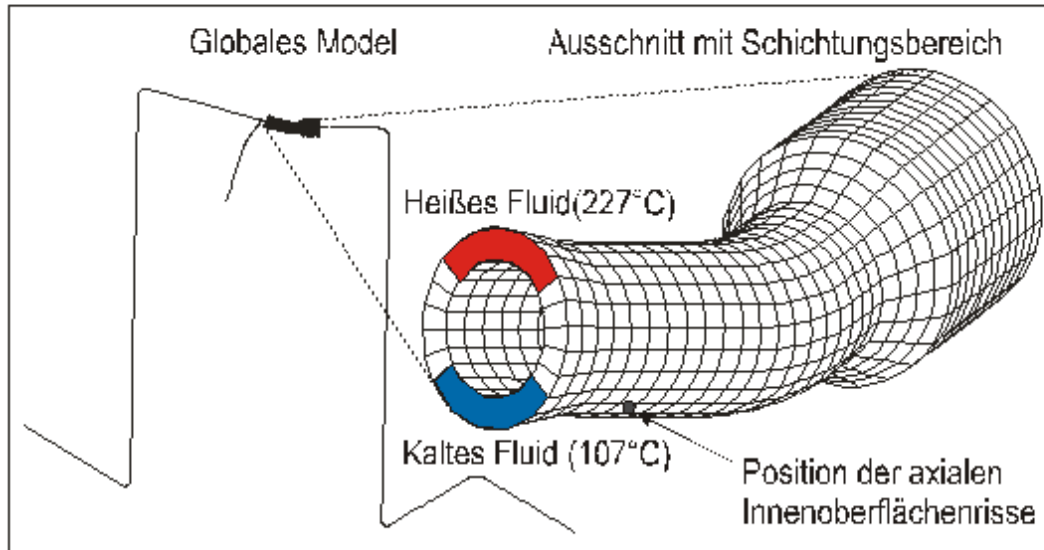


Abb. 3.1-2 Finite-Elemente-Modell des Rohrleitungsabschnitts des Volumenregelsystems, Gesamtmodell und Ausschnitt des Riss- und Schichtungsbereichs (Anwendungsfall 'Thermische Ermüdung')

Da für diesen Fall sowohl Ergebnisse der statistischen Methodik basierend auf der Betriebserfahrung als auch Ergebnisse des Strukturzuverlässigkeitsprogramms PROST zur Verfügung standen, wurde dieser Anwendungsfall als Basis für die Entwicklung der Schnittstelle zwischen den beiden Ansätzen festgelegt.

3.2 Auswertung der statistischen Methodik

Im Rahmen des Vorhabens SR 2608 wurde das in seinen Grundzügen auf das Jahr 1995 zurückgehende Anwendungsbeispiel auf aktuelle Verhältnisse angepasst /GRE 08/. Hierzu wurde die in der GRS-Datenbank KomPass /MIC 03/ enthaltene Sammlung von Ereignissen aus deutschen Kernkraftwerken (ca. 800 Einträge) durchsucht im Hinblick auf Risse, Lecks und Brüche im Volumenregelsystem von DWR mit Einträgen von Ereignissen bis einschließlich 2006. Während die seinerzeit verwendete Anzahl leckrelevanter Stellen nicht verändert wurde, ergaben sich mehr Leckereignisse sowie eine signifikante Erhöhung der Betriebsdauer (von ursprünglich 191 auf 314 Jah-

re). Die neu ermittelten Bruchhäufigkeiten für leckrelevante Stellen der Nennweite DN 50 sind in Tab. 3.2-1 im Vergleich mit den bisherigen Werten dargestellt. Dabei sind, wegen der geringen Anzahl von Lecks der Nennweite DN 50, die Lecks der Nennweiten DN 80 und 100 in die Auswertung einbezogen.

Tab. 3.2-1 Ergebnisse der Neuberechnung des Beispiels im Vergleich zu den ursprünglichen Werten im Datenband zum PSA-Leitfaden /FAK 05a/ (aus /GRE 08/)

Kenngroße für Verteilung λ_B für DN 50 (mit DN 80 und 100)	Ergebnisse im Datenband zum PSA-Leitfaden /FAK 05a/	Aktualisierte Ergebnisse
$\lambda_{B,5}$ (5 %-Quantil)	$2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$
$\lambda_{B,50}$ (50 %-Quantil)	$7 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
$\lambda_{B,95}$ (95 %-Quantil)	$3 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$
Erwartungswert	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$

Die neuen Werte unterscheiden sich nur wenig von den alten, d. h. die Einflüsse aus der gestiegenen Anzahl von Leckereignissen (von drei auf zehn) und der ebenfalls erhöhten Betriebsdauer (von 191 auf 341 Reaktorjahre) kompensieren sich in etwa.

Um die Datenbasis zu vergrößern, wurde beschlossen, im Rahmen des Vorhabens RS1180 die OPDE-Datenbank /LYD 08, REC 06/ ebenfalls in die Auswertung einzubeziehen. Die OPDE-Datenbank enthält derzeit etwa 3700 Einträge von Ereignissen aus elf Ländern (u. a. USA, Schweden, Deutschland). Nach bisherigen Kenntnissen sind zumindest die in der OPDE enthaltenen Ereignisse aus USA, Schweden und Deutschland repräsentativ für die in diesen Ländern betriebenen Kernkraftwerke.

Wendet man die gleiche Abfrage wie bei der Datenbank KomPass auf Risse, Lecks und Brüche im Volumenregelsystem von DWR-Anlagen auf die OPDE-Datenbank an (ohne die deutschen Einträge), so ergeben sich für die Bereiche DN 50 43 Ereignisse, die in die Auswertung mit eingehen. Die ausgewerteten Kraftwerke (69 Anlagen) haben zusammen eine Betriebszeit von 1835 Jahren.

Zusammen mit den deutschen DN 50-Ereignissen ergeben sich dann die in Tab. 3.2-2 dargestellten Bruchhäufigkeiten.

Die Ergebnisse sind fast identisch. Außerdem ist zu beachten, dass hier bezüglich Geometrie, Material und Fahrweise die Volumenregelsysteme der ausländischen Anlagen alle als vergleichbar mit den betrachteten deutschen Anlagen angesehen wurden.

Tab. 3.2-2 Ergebnisse der Neuberechnung des Beispiels mit OPDE-Daten im Vergleich zu den deutschen Werten (Auswertung nur für DN 50)

Kenngröße für Verteilung λ_B für DN 50	Nur deutsche Ereignisse (aus /GRE 08/)	Ergebnis für OPDE-Auswertung (mit deutschen Ereignissen)
$\lambda_{B,5}$ (5 %-Quantil)	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
$\lambda_{B,50}$ (50 %-Quantil)	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
$\lambda_{B,95}$ (95 %-Quantil)	$5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$
Erwartungswert	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$

3.3 Festlegung von Anfangsrissverteilungen

Bei der Anwendung von Strukturzuverlässigkeitsprogrammen zur Ermittlung von Leck- und Bruchwahrscheinlichkeiten von Rohrleitungskomponenten für den Schädigungsmechanismus Ermüdung geht man üblicherweise davon aus, dass sich in den betrachteten Komponenten Anfangsrisse befinden, deren Größe durch Verteilungen beschrieben wird.

In früheren Untersuchungen /GRE 04/ hat sich gezeigt, dass die Größe der Anfangsrisse (bestimmt durch Mittelwert und 'Breite, der Verteilungen) einen wesentlichen Einfluss auf die ermittelten Leck- und Bruchwahrscheinlichkeiten hat.

In Fällen, bei denen man nicht weiß, ob die betrachtete Komponente einen Riss aufweist, oder wenn die Größe eines eventuell vorhandenen Risses nicht bekannt ist, ist es notwendig, zur Festlegung der Anfangsrissgrößen auf weitere Überlegungen zu-

rückzugreifen. Bei der GRS wurden im Rahmen dieses Projekts die folgenden zwei Wege untersucht:

- Eine Auswertung der Betriebserfahrung hinsichtlich gefundener Risse und
- die Verwendung von Abschätzungen der Anfangsrissgröße aus der Literatur.

3.3.1 Auswertung der Betriebserfahrung

Mit Hilfe geeigneter Abfragen lassen sich aus den in der GRS verfügbaren Datenbanken KomPass und OPDE Ereignisse mit Oberflächenrissen ausgeben. Die Abfrage der KomPass-Datenbank ergab in deutschen DWR-Anlagen 34 Fälle, von denen sich ohne weitergehende Nachforschungen 8 verwenden ließen, um Werte für die Verhältnisse Risstiefe zu Wanddicke (a/t) und Risstiefe zu Risslänge (a/c) zu bestimmen. Aus den acht Fällen ergaben sich ein mittlerer a/t -Wert von 0,42 mit einer Standardabweichung von 0,15 und ein mittlerer a/c -Wert von 0,43 mit einer Standardabweichung von 0,31.

In einer weiteren KomPass-Abfrage wurden dann auch die Siedewasserreaktor (SWR)-Anlagen einbezogen, wodurch sich die Zahl der unmittelbar verwendbaren a/t -Werte auf 18 und die der a/c -Werte auf 14 erhöhten. Aus diesen Werten ergaben sich ein mittlerer a/t -Wert von 0,42 mit einer Standardabweichung von 0,17 und ein mittlerer a/c -Wert von 0,35 mit einer Standardabweichung von 0,26.

Im nächsten Schritt wurde zur Erweiterung der statistischen Basis die OPDE-Datenbank herangezogen. Die Abfrage bei der OPDE beschränkte sich zunächst auf die amerikanischen und schwedischen Einträge, weil diese nach bisherigen Erkenntnissen repräsentativ sind. Dabei wurden über 700 Ereignisse ausgewiesen. Von diesen konnten 94 zur Ermittlung von a/t -Werten und 57 zur Ableitung von a/c -Resultaten verwendet werden. An die gewonnenen Ergebnisse können Verteilungsfunktionen angepasst werden, wie beispielhaft in Abb. 3.3-1 und Abb. 3.3-2 für die Summe aus KomPass- und den verwendbaren OPDE-Werten dargestellt.

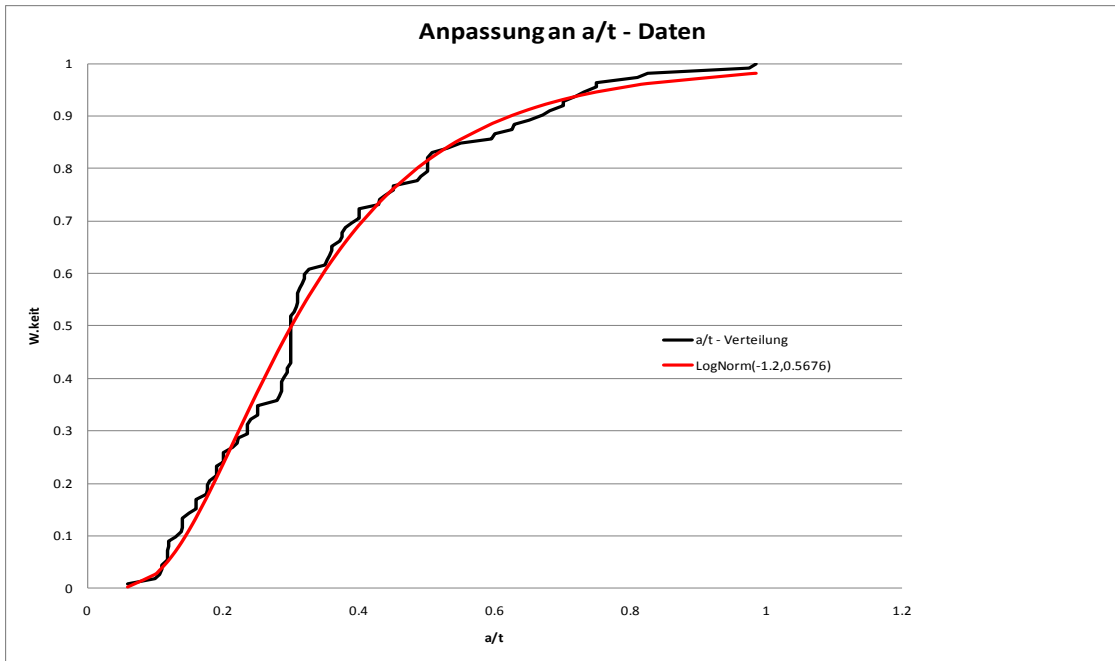


Abb. 3.3-1 Anpassung einer Lognormalverteilung an die a/t-Werte aus KomPass und OPDE

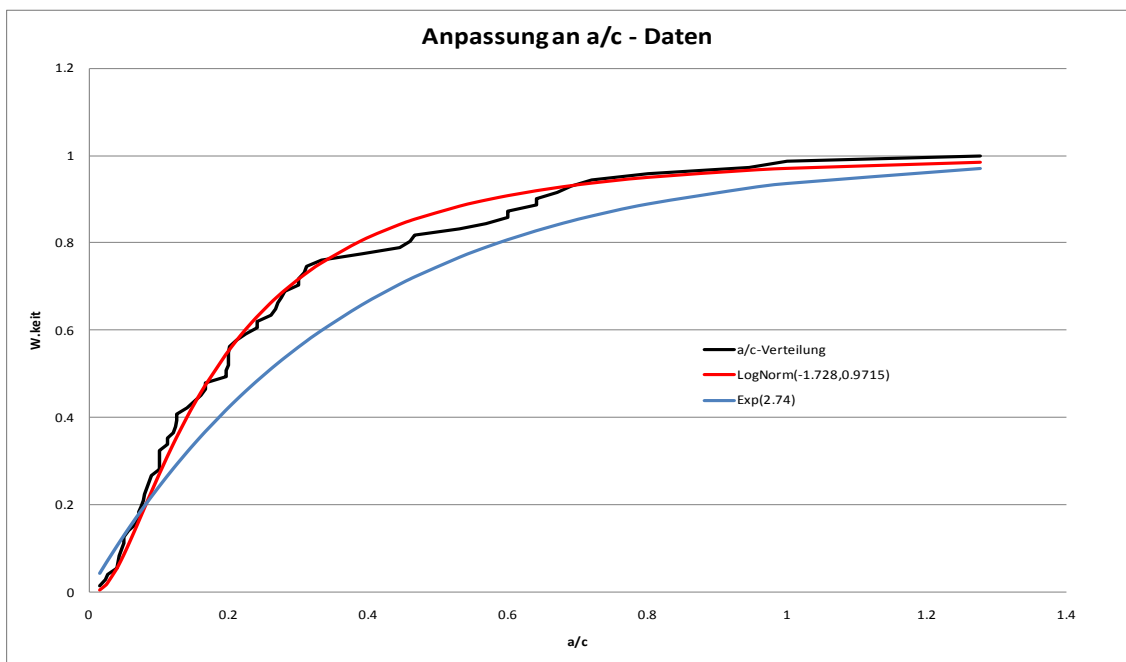


Abb. 3.3-2 Anpassung einer Lognormal- bzw. einer Exponentialverteilung an die a/c-Werte aus KomPass und OPDE

In beiden Fällen lassen sich die Werte am besten mit einer Lognormalverteilung anpassen, wobei für $\ln(a/t)$ sich der Mittelwert zu $-1,2$ und die Standardabweichung zu $0,57$ ergeben. Die Anpassung mit einer Exponentialverteilung in Abb. 3.3-2 erfolgte aus Vergleichsgründen. Die entsprechenden Werte für $\ln(a/c)$ sind $-1,7$ und für die Standardabweichung $0,97$. Abb. 3.3-3 und Abb. 3.3-4 zeigen ergänzend die Dichtefunktionen der beiden Verteilungen.

Aus den angegebenen Verteilungen können für konkrete Anwendungen Verteilungen für die Anfangsrisssgrößen abgeleitet werden. Beispielsweise ergibt sich für den Rohrleitungsbereich DN 50 des Volumenregelsystems (Wandstärke $t = 6.3$ mm), dass der Maximalwert der Risstiefenverteilung (Dichtefunktion) bei einer Risstiefe von etwa $1,4$ mm liegt.

Rissverteilungen abgeleitet aus der Betriebserfahrung, die Eingabeparameter für die Strukturzuverlässigkeitsmodelle zur Bestimmung von Leck- und Bruchwahrscheinlichkeiten in druckführenden Komponenten sind, bilden die Schnittstelle zu der statistischen Methodik. Diese Vorgehensweise basierend auf Datenbanken mit Ereignissen hat jedoch den Nachteil, dass man Rissgrößen zum Zeitpunkt des Auffindens benutzt, ohne Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung dieser Risse.

Dichtefunktion

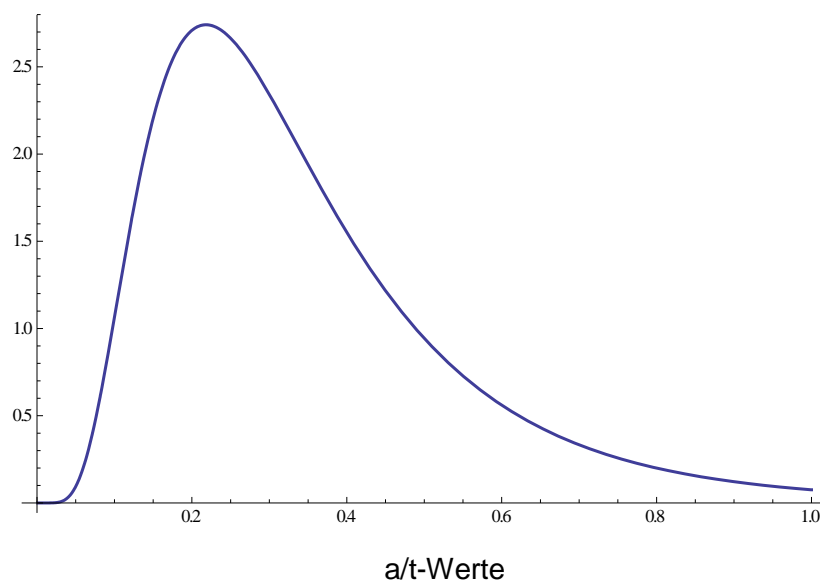


Abb. 3.3-3 Dichtefunktion der an die a/t -Werte aus KomPass und OPDE angepassten Lognormalverteilung

Dichtefunktion

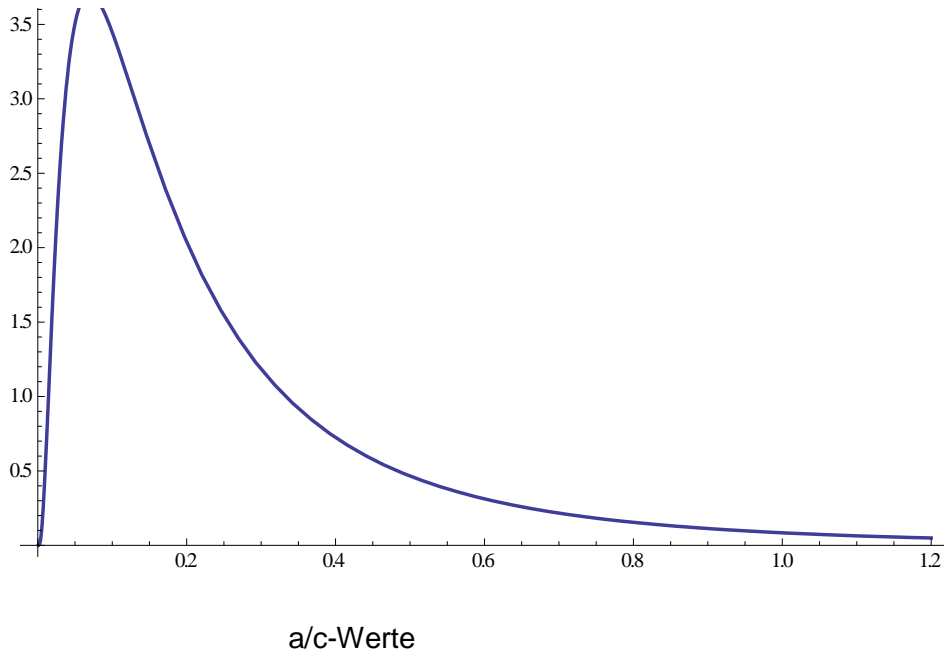


Abb. 3.3-4 Dichtefunktion der an die a/c-Werte aus KomPass und OPDE angepassten Lognormalverteilung

3.3.2 Abschätzungen der Anfangsrissgröße aus der Literatur

Grundlage dieser Abschätzungen ist die Veröffentlichung /KHA 99/. In dieser Arbeit wird mit numerischen Verfahren die Entstehung von Fehlstellen in Schweißnähten simuliert. Die ermittelten Fehlstellen werden als Anfangsrisse interpretiert, deren Tiefe durch Lognormalverteilungen beschrieben wird. Für je einen typischen ferritischen und austenitischen Werkstoff und zwei unterschiedliche Schweißverfahren (Handschiweißung und Inertgasschiweißung beim Hersteller) werden Medianwerte und Shape-Parameter in grafischer Form sowie mittels Interpolationskurven angegeben. Details sind in /GRE 10/ beschrieben.

Für das bereits erwähnte Beispiel eines DN 50-Abschnitts des Volumenregelsystems erhält man (bei 6,3 mm Wanddicke) als Medianwert der Risstiefenverteilung etwa 2,7 mm. Abb. 3.3-5 zeigt die entsprechende Lognormalverteilung. Der Maximalwert der Dichtefunktion liegt hier bei etwa 2,2 mm.

Angaben zu den Längen der Risse sind in /KHA 99/ nicht enthalten.

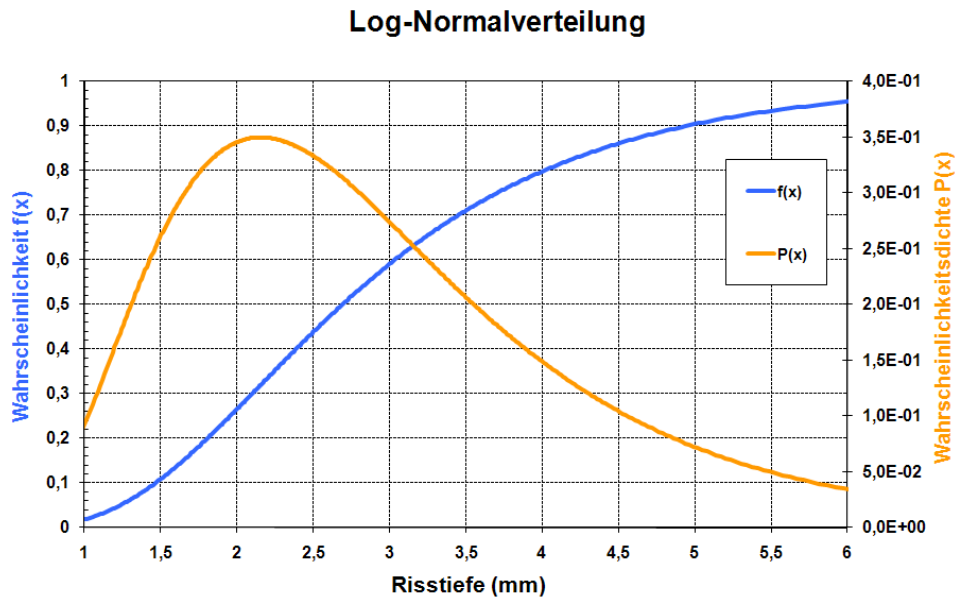


Abb. 3.3-5 Lognormalverteilung für Inertgasschweißung nach /KHA 99/ für Beispiel Volumenregelsystem DN 50

3.4 PROST-Berechnungen für den Anwendungsfall ‘Thermische Ermüdung‘

Nach den im Kapitel 3.3 beschriebenen Vorgehensweisen zur Festlegung von Anfangsrissverteilungen wurden nun für den Anwendungsfall aus Kapitel 3.1 entsprechende Verteilungen ermittelt (siehe Tab. 3.4-1). Damit wurden dann PROST-Berechnungen durchgeführt, wobei die weiteren Eingabedaten (siehe Tab. 3.4-2) aus /GRE 04/ übernommen wurden. Abb. 3.4-1 zeigt den Verlauf der rissöffnenden Spannung, der mit einer Finite-Elemente-Berechnung bestimmt wurde, als Funktion der Wanddicke.

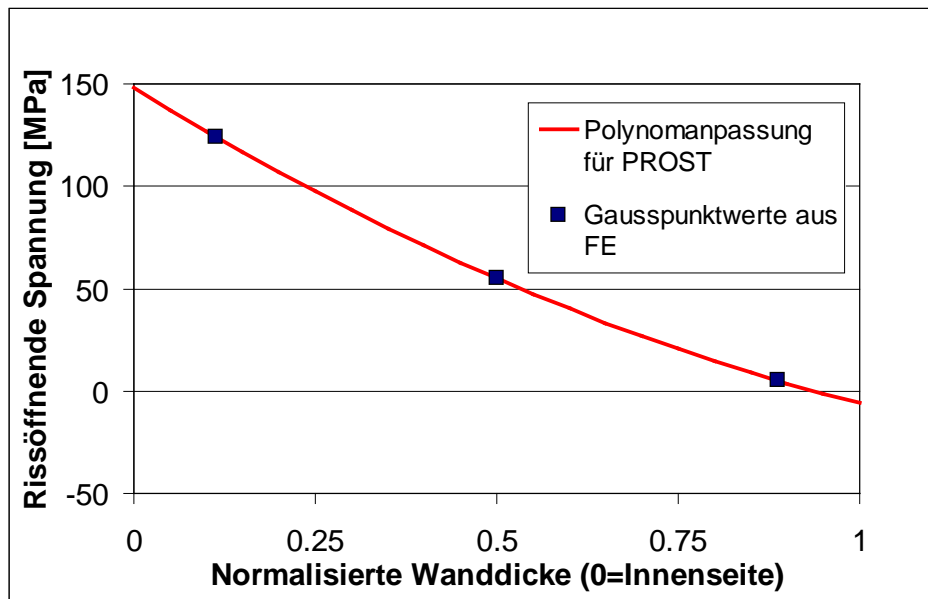


Abb. 3.4-1 Belastungseingabe in PROST: Rissöffnende Spannung entlang der Wanddicke an der Rissposition

Die gezeigte Belastung resultiert aus dem Innendruck und einer zyklisch auftretenden Temperaturschichtung (mit etwa 1500 Zyklen pro Jahr) bei einem ΔT von 120°C.

Tab. 3.4-1 Verteilungen der Anfangsrisserößen für PROST-Berechnungen zum Anwendungsbeispiel 'Thermische Ermüdung'

Verteilung nach	Risstiefe, Typ und Mittelwert	Risstiefe, Standardabweichung	c/a, Typ und Mittelwert	c/a, Standardabweichung
Betriebserfahrung deutsche DWR (Fall 1)	normal, 2,65 mm	0,95 mm	normal, 5,11	4,98
Betriebserfahrung international (Fall 2)	normal, 2,16 mm	1,24 mm	normal, 9,22	10,28
Betriebserfahrung international (mit deutschen SWR, Fall 3)	lognormal, 1,90 mm	3,59 mm	lognormal, 5,63	2,64
/KHA 99/ (Fall 4)	lognormal, 2,70 mm	0,47 mm	normal, 9,22*	10,28*

*: Werte von Fall 2 übernommen

Tab. 3.4-2 Eingabedatensatz für die weiteren verteilten Größen in der PROST-Parameterstudie zum Anwendungsbeispiel 'Thermische Ermüdung' (siehe Kapitel 3.1)

Parameter	Verteilungstyp	Mittelwert	Standard-Abweichung	95 %-Quantile	Minimum	Maximum
Innenradius [mm]	Normal	23,85	0,25	-	23,5	24,2
Wanddicke [mm]	Normal	6,3	0,4	-	5,5	7,1
E-Modul [GPa]	-	185	-	-	-	-
Bruchzähigkeit [MPa m ^{1/2}]	Normal	266	20	-	-	-
Fließspannung [MPa]	Normal	310	32	-	263	449
Streckgrenze [MPa]	Normal	178	25	-	130	240
Zugfestigkeit [MPa]	Normal	442	32	-	390	605
Risswachstums-konstante C [mm/Zyklus/(MPa m ^{1/2}) ^m]	Log-normal	5,06 E-10	-	1,26 E-08	2,8 E-13	9,19 E-07
Risswachstums-exponent m	-	3,93	-	-	-	-
Dauerfestigkeit ΔK [MPa m ^{1/2}]	-	3,0	-	-	-	-

Die mit PROST für die Fälle 1, 2, 3 und 4 berechneten Leck- und Bruchwahrscheinlichkeiten sind in den Abb. 3.4-2 bis Abb. 3.4-9 als Funktion der Betriebszeit dargestellt. Tab. 3.4-3 und Tab. 3.4-4 enthalten die berechneten Werte für eine Betriebszeit von 40 Jahren.

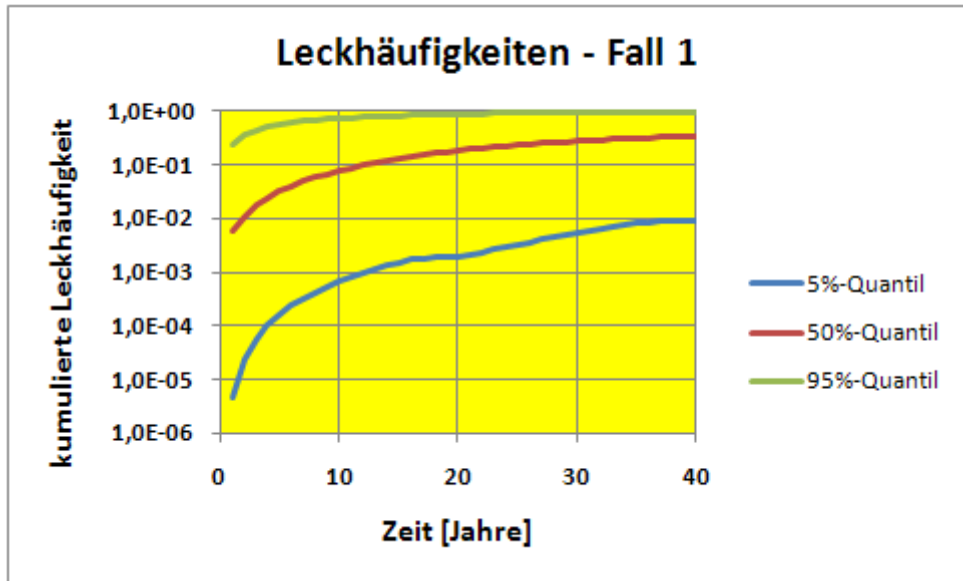


Abb. 3.4-2 Leckhäufigkeit in Abhängigkeit von der Betriebszeit, PROST-Berechnung des Anwendungsfalls mit Anfangsrissen gemäß deutscher Betriebserfahrung

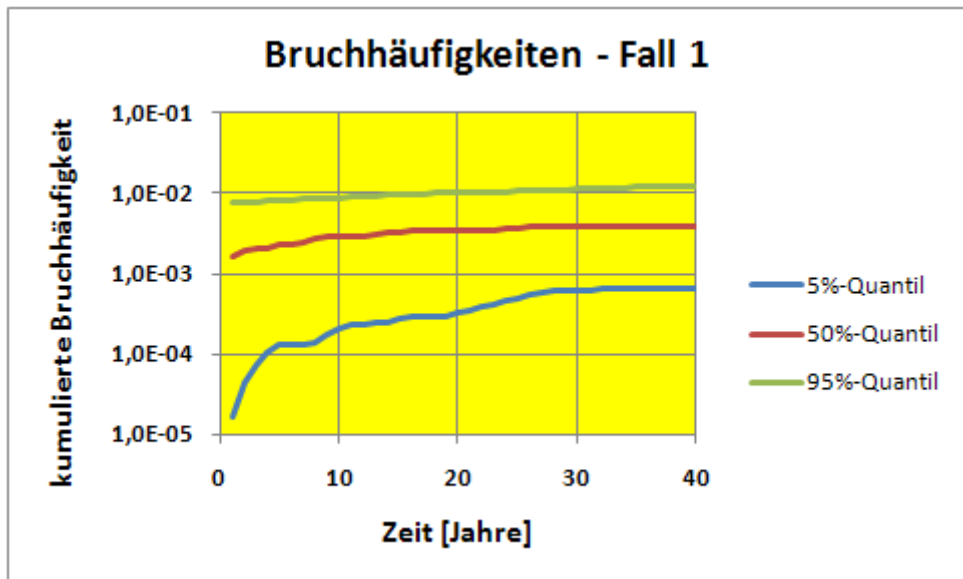


Abb. 3.4-3 Bruchhäufigkeit in Abhängigkeit von der Betriebszeit, PROST-Berechnung des Anwendungsfalls mit Anfangsrissen gemäß deutscher Betriebserfahrung

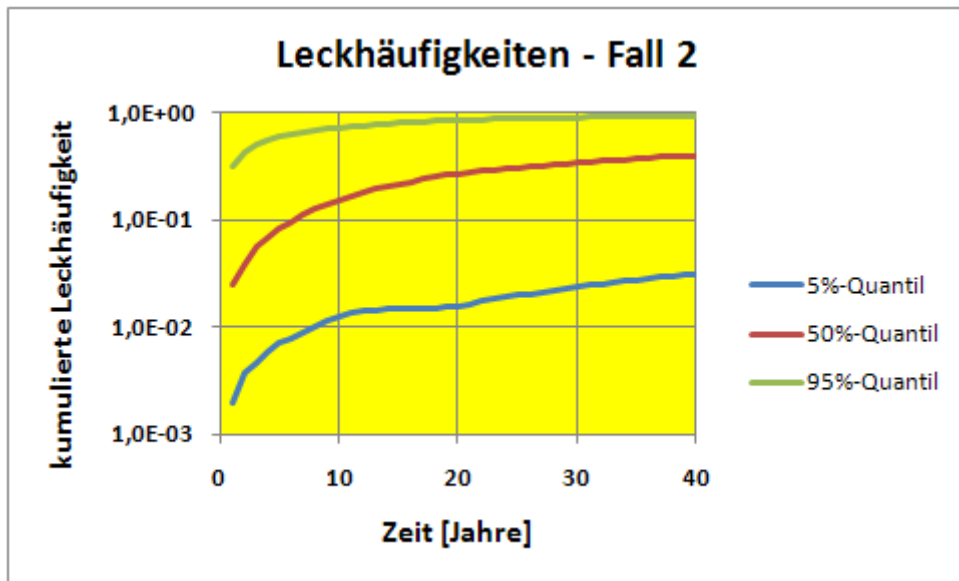


Abb. 3.4-4 Leckhäufigkeit in Abhängigkeit von der Betriebszeit, PROST-Berechnung des Anwendungsfalls mit Anfangsrissen gemäß internationaler Betriebserfahrung

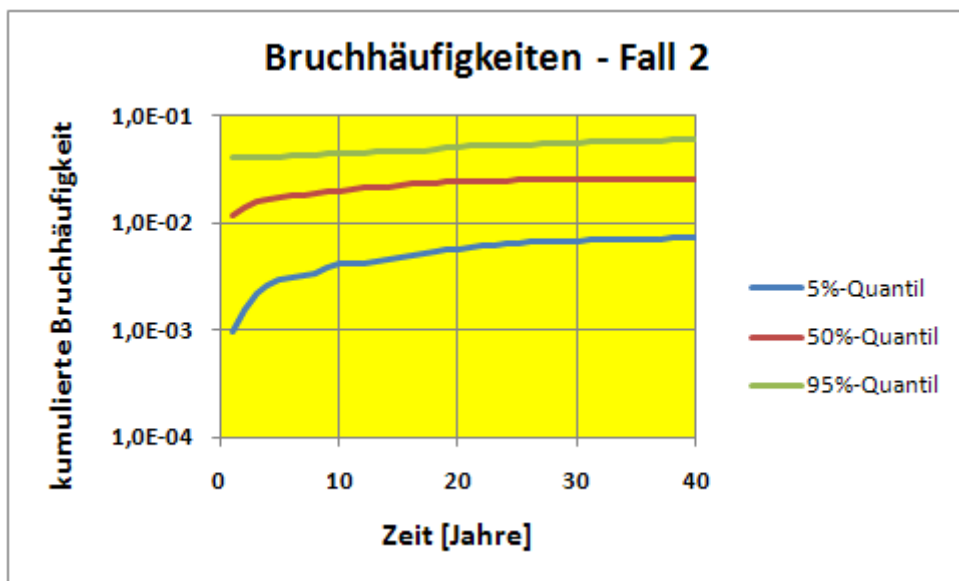


Abb. 3.4-5 Bruchhäufigkeit in Abhängigkeit von der Betriebszeit, PROST-Berechnung des Anwendungsfalls mit Anfangsrissen gemäß internationaler Betriebserfahrung

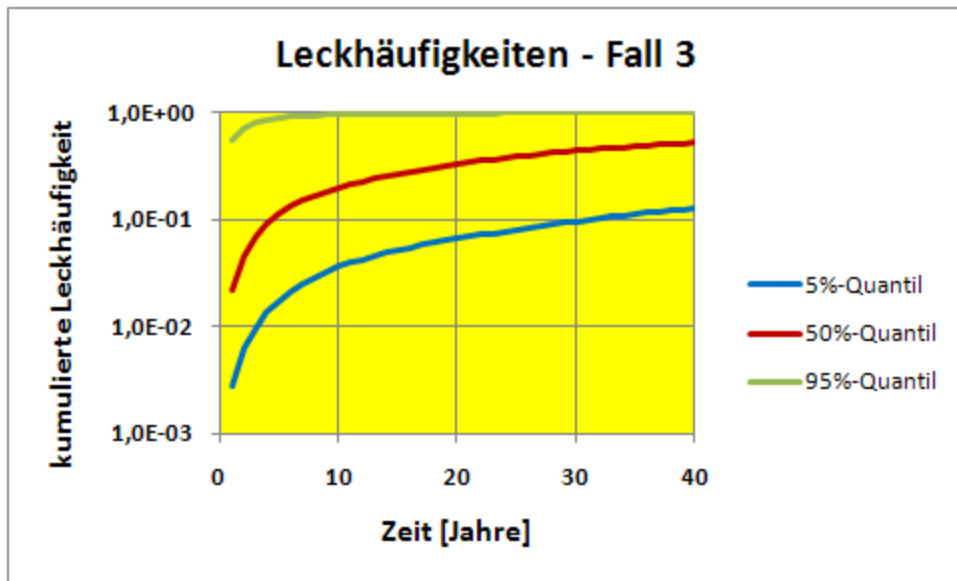


Abb. 3.4-6 Leckhäufigkeit in Abhängigkeit von der Betriebszeit, PROST-Berechnung des Anwendungsfalls mit Anfangsrissen gemäß internationaler Betriebserfahrung mit deutschen SWR

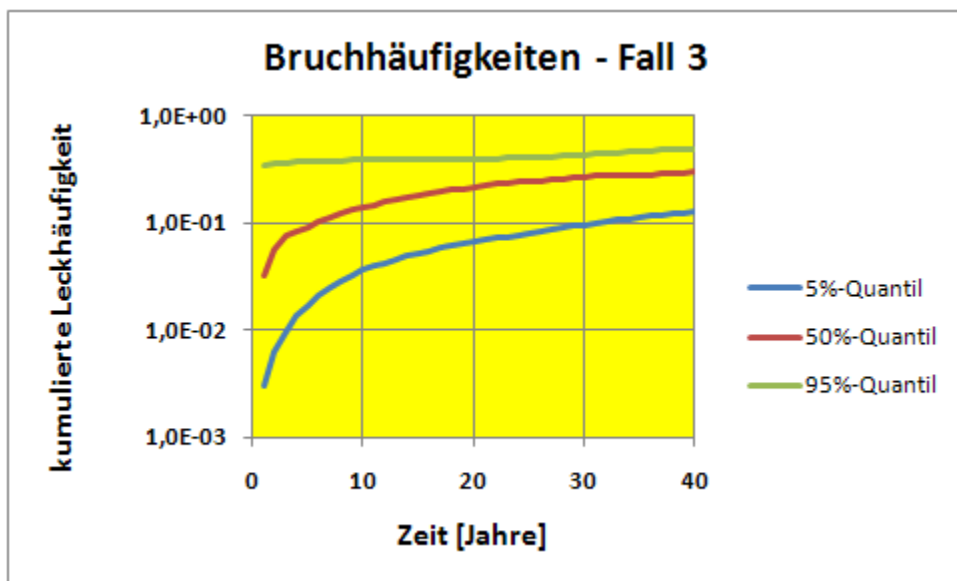


Abb. 3.4-7 Bruchhäufigkeit in Abhängigkeit von der Betriebszeit, PROST-Berechnung des Anwendungsfalls mit Anfangsrissen gemäß internationaler Betriebserfahrung mit deutschen SWR

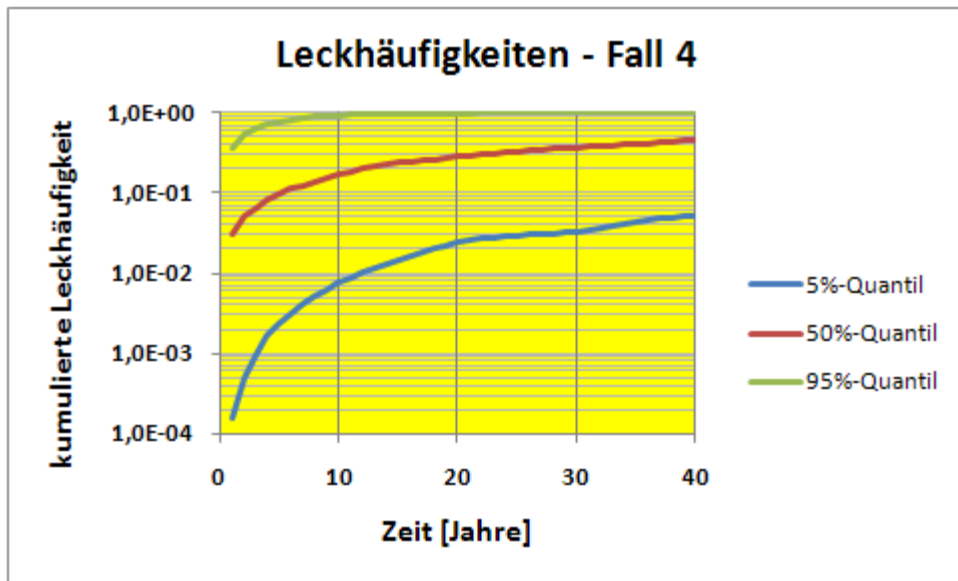


Abb. 3.4-8 Leckhäufigkeit in Abhängigkeit von der Betriebszeit, PROST-Berechnung des Anwendungsfalls mit Anfangsrissen gemäß /KHA 99/

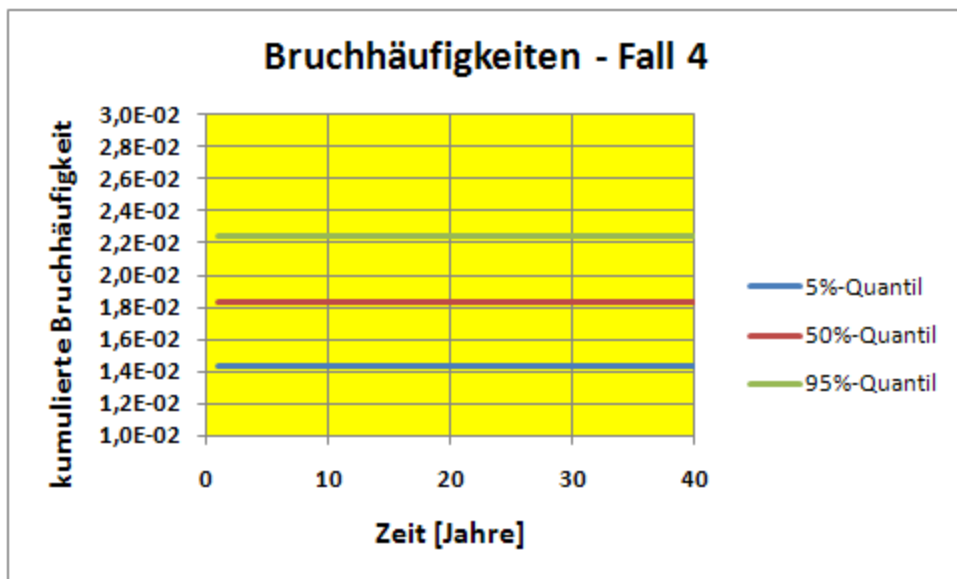


Abb. 3.4-9 Bruchhäufigkeit in Abhängigkeit von der Betriebszeit, PROST-Berechnung des Anwendungsfalls mit Anfangsrissen gemäß /KHA 99/

Tab. 3.4-3 Leckwahrscheinlichkeit nach 40 Jahren

Fall	1	2	3	4
5 %-Quantil	$9,4 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$
50 %-Quantil	$3,4 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$5,3 \cdot 10^{-1}$	$4,6 \cdot 10^{-1}$
95 %-Quantil	$9,7 \cdot 10^{-1}$	$9,4 \cdot 10^{-1}$	1,0	1,0

Tab. 3.4-4 Bruchwahrscheinlichkeit nach 40 Jahren

Fall	1	2	3	4
5 %-Quantil	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
50 %-Quantil	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$
95 %-Quantil	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$

Die Ergebnisse zeigen, dass die unterschiedlichen Annahmen zu den Rissgrößenverteilungen teilweise erheblichen Einfluss haben. Insbesondere zeigt der Vergleich zwischen den Ergebnissen der Fälle 2 und 3, die sich im Wesentlichen nur in den Verteilungstypen für die Risstiefe und das Längen-zu-Tiefen-Verhältnis unterscheiden, dass sich die Leckwahrscheinlichkeit (50 %-Quantil) nach 40 Jahren etwa um 30 % erhöht und die entsprechende Bruchwahrscheinlichkeit um den Faktor 11. Die Ergebnisse mit der aus der Literatur abgeleiteten Risstiefenverteilung reihen sich in die Bandbreite der anderen Ergebnisse ein.

3.5 Risswahrscheinlichkeit und Vergleich der beiden Verfahren

Bei der Betrachtung des Schadensmechanismus Ermüdung wird bei PROST (und auch bei vielen anderen Strukturzuverlässigkeitsprogrammen) wie beschrieben von Anfangsrissen ausgegangen. Dies bedeutet, dass bei der Analyse einer bestimmten Stelle eines Rohrleitungssystems bei jedem Berechnungsdurchgang mit einem im Allgemeinen unterschiedlich großen Anfangsrisss begonnen wird.

In einem Kraftwerk muss an der betrachteten Stelle jedoch nicht unbedingt ein Anriss vorhanden sein. Um dies zu berücksichtigen, muss die Wahrscheinlichkeit dafür bestimmt werden, dass an der untersuchten Stelle ein Riss auftritt, und die mit PROST

bestimmten Leck- und Bruchwahrscheinlichkeiten mit dieser Wahrscheinlichkeit multipliziert werden.

Zur Ermittlung der Risswahrscheinlichkeit wird auf ein weiteres Ergebnis aus /KHA 99/ zurückgegriffen. Wie in Tab. 3.5-1 dargestellt, wird dort die Risswahrscheinlichkeit für Rohre mit verschiedenen Wanddicken (in Zoll) pro Einheitslänge (1 Zoll) der betrachteten Schweißnaht basierend auf Simulationsrechnungen des Schweißvorgangs mit Hilfe des Computerprogramms RR-PRODICAL angegeben. Hinsichtlich der Werkstoffe wird dabei lediglich je ein typischer Austenit und Ferrit betrachtet. Außerdem wird noch unterschieden, ob eine Durchstrahlungsprüfung vorgenommen wurde oder nicht.

In unserem Anwendungsfall haben wir eine Wanddicke von 6,3 mm (0,25 Zoll) und eine Abschnittslänge von 140 mm (5,51 Zoll). Damit ergibt sich die Risswahrscheinlichkeit zu 0,026 für den Fall mit Prüfung und zu 0,332 für den Fall ohne Prüfung.

Als Beispiel zeigt Abb. 3.5-1 die Leckhäufigkeit nach PROST für den Anwendungsfall mit Anfangsrissen gemäß deutscher Betriebserfahrung (siehe Abb. 3.4-2) multipliziert mit 0,026. Abb. 3.5-2 zeigt die Bruchhäufigkeit (siehe Abb. 3.4-3) multipliziert mit 0,026 für den gleichen Fall.

Alternativ könnte zur Ermittlung der Risswahrscheinlichkeit auch eine Auswertung der Betriebserfahrung verwendet werden.

Tab. 3.5-1 Risswahrscheinlichkeit nach /KHA 99/

Rohrwanddicke [Zoll]	Risswahrscheinlichkeit, Risse pro Zoll mit Prüfung	Risswahrscheinlichkeit, Risse pro Zoll ohne Prüfung
0,25	0,0047	0,0602
0,50	0,0030	0,0384
0,75	0,0020	0,0256
1,00	0,0035	0,0448
1,50	0,0067	0,0858
2,00	0,0120	0,1536
2,50	0,0256	0,3277

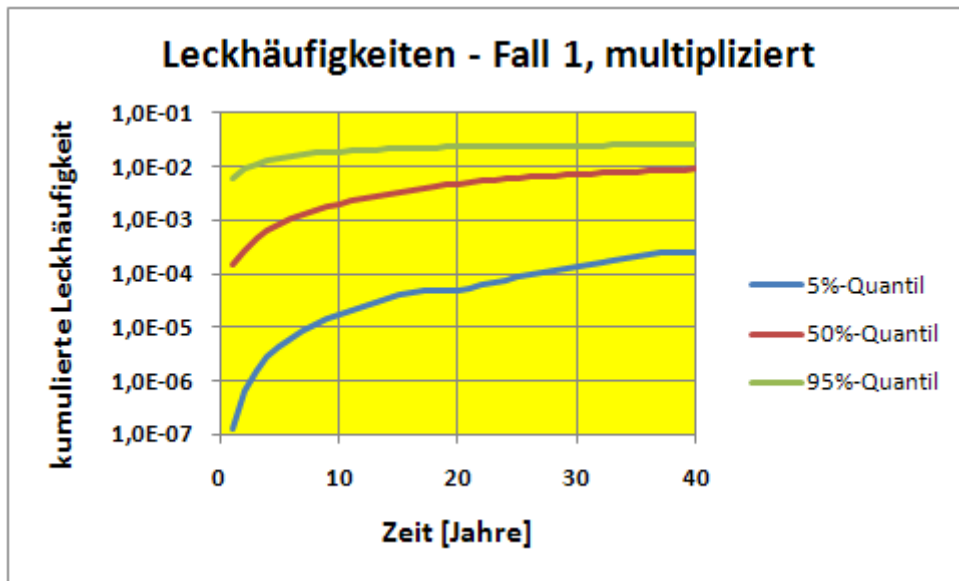


Abb. 3.5-1 Leckhäufigkeiten aus PROST-Berechnung multipliziert mit der Risswahrscheinlichkeit (0,026)

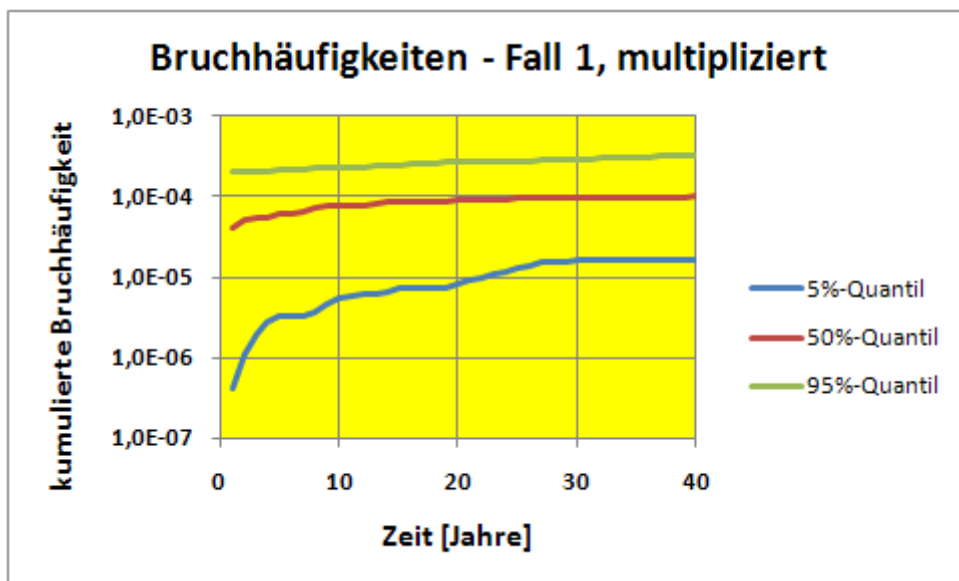


Abb. 3.5-2 Bruchhäufigkeiten aus PROST-Berechnung multipliziert mit der Risswahrscheinlichkeit (0,026)

Für einen Vergleich der Strukturzuverlässigkeitsergebnisse mit den Resultaten der statistischen Methode muss ermittelt werden, welche Berechnungszeit von PROST dem Zeitpunkt der Auswertung mit der statistischen Methode entspricht. Hierzu wird die Gesamtbetriebsdauer aller gemäß OPDE-Datenbank betrachteten DWR-Anlagen von

2176 Jahren durch die Anzahl der Anlagen (83), davon 69 ausländische und 14 deutsche Anlagen, dividiert, wobei sich 26 Jahre ergeben. Die PROST-Ergebnisse zum Berechnungszeitraum 26 Jahre werden dann zum Vergleich herangezogen.

Die Tab. 3.5-2 zeigt die 5 %-, 50 %- und 95 %-Quantile der Bruchhäufigkeit für die verschiedenen Fälle.

Die Tabelle zeigt, dass die PROST-Ergebnisse jeweils deutlich über den Werten der statistischen Methode liegen. Dies deutet daraufhin, dass die untersuchte Stelle bei der realistischen Nachbildung der Belastung in PROST höher beansprucht wird als es dem Mittel der bei der statistischen Methode betrachteten Fälle entspricht. Weitere PROST-Berechnungen für andere Positionen der Volumenausgleichsleitung mit anderen Annahmen bezüglich der Belastung würden dann auch Hinweise bezüglich der Aussagegenauigkeit der angesetzten Risswahrscheinlichkeit ermöglichen.

Tab. 3.5-2 Vergleich der Bruchhäufigkeiten nach verschiedenen Verfahren

Kenngröße für Verteilung λ_B für DN 50	Ergebnis der statistischen Methode (OPDE-Auswertung mit deutschen Ereignissen siehe Tab. 3.2-2)	Strukturzuverlässigkeitsauswertung			
		Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
$\lambda_{B,5}$ (5 %-Quantil)	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
$\lambda_{B,50}$ (50 %-Quantil)	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$
$\lambda_{B,95}$ (95 %-Quantil)	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4}$

4 Ansätze zur Berücksichtigung der Einflüsse von Schadensmechanismen, Prüfkonzepthen und Lerneffekten

4.1 Ausgangssituation, Zielsetzung und Vorgehensweise

Der Erkenntnisstand aus der Betriebserfahrung mit Schädigungsphänomenen in Rohrleitungen ist seit dem Ende der 80er Jahre erheblich angewachsen. Daher wurden von der GRS bereits in /HOE 03b/, Anhang 2 ergänzende Überlegungen angestellt, inwieweit sich dieser Erkenntniszuwachs für die Weiterentwicklung der Methodik zur nennweitenabhängigen Ermittlung der Eintrittshäufigkeiten von Lecks in Rohrleitungen nutzen lässt. Aufbauend auf den Überlegungen in /HOE 03b/ war die Zielsetzung dieses Arbeitspaketes, Ansätze zur Berücksichtigung und differenzierten Bewertung der Einflüsse verschiedener Schädigungsmechanismen sowie von Prüfkonzepthen und Lerneffekten zu entwickeln und zu erproben.

Um Datensätze für die weitere Bewertung der verschiedenen Einflüsse auf die Leck- und Bruchhäufigkeit zu generieren, wurde zunächst die Betriebserfahrung mit sicherheitstechnisch bedeutsamen Rohrleitungen in deutschen und ausländischen Anlagen ausgewertet. Hierzu wurden die bei der GRS verfügbaren Datenbanken KomPass zu meldepflichtigen Ereignissen an druckführenden Komponenten in deutschen Anlagen und OPDE zu relevanten Ereignissen an Rohrleitungen in ausländischen Anlagen herangezogen /REC 06/. Die Auswertungen wurden so vorgenommen, dass eine möglichst große Vergleichbarkeit zu früheren Arbeiten der GRS gegeben ist.

Um einen Überblick zum aktuellen Stand von Leckereignissen in deutschen Anlagen zu gewinnen und allgemeine Trends abzuschätzen, erfolgte in einem ersten Schritt sowohl eine allgemeine Auswertung als auch die Berechnung der nennweitenabhängigen Eintrittshäufigkeit aus der deutschen Betriebserfahrung. Anschließend wurden die Daten im Hinblick auf Schädigungsmechanismen und Schadensorte analysiert. Daraus sollten mögliche Einflüsse von Alterungs- oder Lerneffekten einschließlich der Prüfkonzepthe auf die Leckhäufigkeit herausgearbeitet werden. Ferner wurde geprüft, welchen Beitrag einzelne Schädigungsmechanismen zu den Leckhäufigkeiten leisten und inwieweit dabei Trends erkennbar sind. Anhand eines ausgewählten Schädigungsmechanismus wurde darüber hinaus exemplarisch untersucht, wie Lerneffekte bei der Ermittlung der Eintrittshäufigkeit berücksichtigt werden können.

Zur Abrundung der Arbeiten wurde in einem weiteren Schritt die ausländische Betriebserfahrung – exemplarisch für US-amerikanische Anlagen mit DWR und mit SWR – ausgewertet. Insbesondere wurden dabei Trends von Schadenshäufigkeiten und Schadensursachen analysiert. Weiterhin wurden nennweitenspezifische Verteilungen der Ereignisse und Schädigungsmechanismen untersucht.

Abschließend wurden aus den durchgeführten Untersuchungen Schlussfolgerungen hinsichtlich der nach heutigem Stand möglichen Berücksichtigung der Einflüsse einzelner Schädigungsmechanismen und der für diese erkennbaren Lerneffekte abgeleitet.

4.2 Auswertung von Daten zu Ereignissen in DWR- und SWR-Anlagen

4.2.1 Ereignisse in deutschen Anlagen mit DWR und SWR

4.2.1.1 Überblick über alle Ereignisse an Rohrleitungen

Zur Auswertung von Ereignissen in deutschen Kernkraftwerken wurde die Datenbank KomPass herangezogen. In dieser Datenbank werden von der GRS alle meldepflichtigen Ereignisse an druckführenden Komponenten in deutschen Anlagen erfasst. Dabei wird unter anderem zwischen den Schadensbildern Riss, Leck und Bruch differenziert.

Grundlage für die Auswertungen waren Abfragen nach meldepflichtigen Ereignissen an Rohrleitungen in J- und K-Systemen¹ deutscher Anlagen mit DWR und SWR im Zeitraum 1973 bis 2008. Daten aus dem Jahr 2009 wurden nicht berücksichtigt, da für einen Teil der Ereignisse noch keine endgültige Meldung vorlag und somit diese Ereignisse noch nicht ausreichend und qualitätsgesichert in der Datenbank erfasst werden konnten. Die Beschränkung auf J- und K-Systeme erfolgte insbesondere wegen der eindeutigen Erkennbarkeit und Meldepflicht für Leckereignisse (Lecks und Brüche) an diesen Systemen sowie aus Gründen der Vergleichbarkeit mit vorangegangenen Arbeiten /HOE 03/.

¹ J-System: Nukleare Wärmeerzeugung, K-Systeme: Hilfssysteme

Im Ergebnis der durchgeführten Abfrage wurden 211 Riss-, Leck- und Bruch-Ereignisse in Anlagen mit DWR und 104 Ereignisse in Anlagen mit SWR identifiziert. Davon waren in DWR-Anlagen 165 Ereignisse und in SWR-Anlagen lagen 58 Ereignisse mit Leckagen verbunden (Leck- und Bruch-Ereignisse). Die Verteilung dieser Ereignisse über den Zeitraum 1973 bis 2008 wird in Abb. 4.2-1 und Abb. 4.2-2 getrennt für Anlagen mit DWR und SWR dargestellt. Zusätzlich ist in den Abbildungen die Anzahl der jeweils in Betrieb befindlichen Anlagen wiedergegeben. Diese kann auch der Tab. A-1 im Anhang (Kapitel 8) entnommen werden.

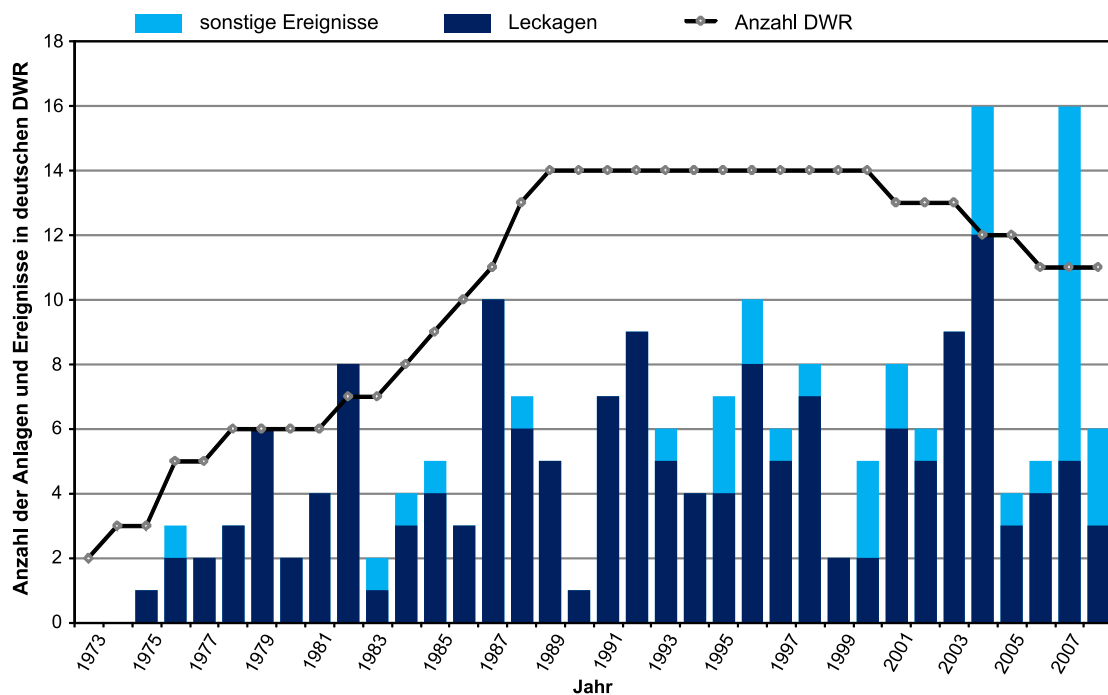


Abb. 4.2-1 Anzahl der Leckagen und sonstiger Ereignisse an Rohrleitungen der J- und K-Systeme von deutschen Anlagen mit DWR; Anlagen in Betrieb

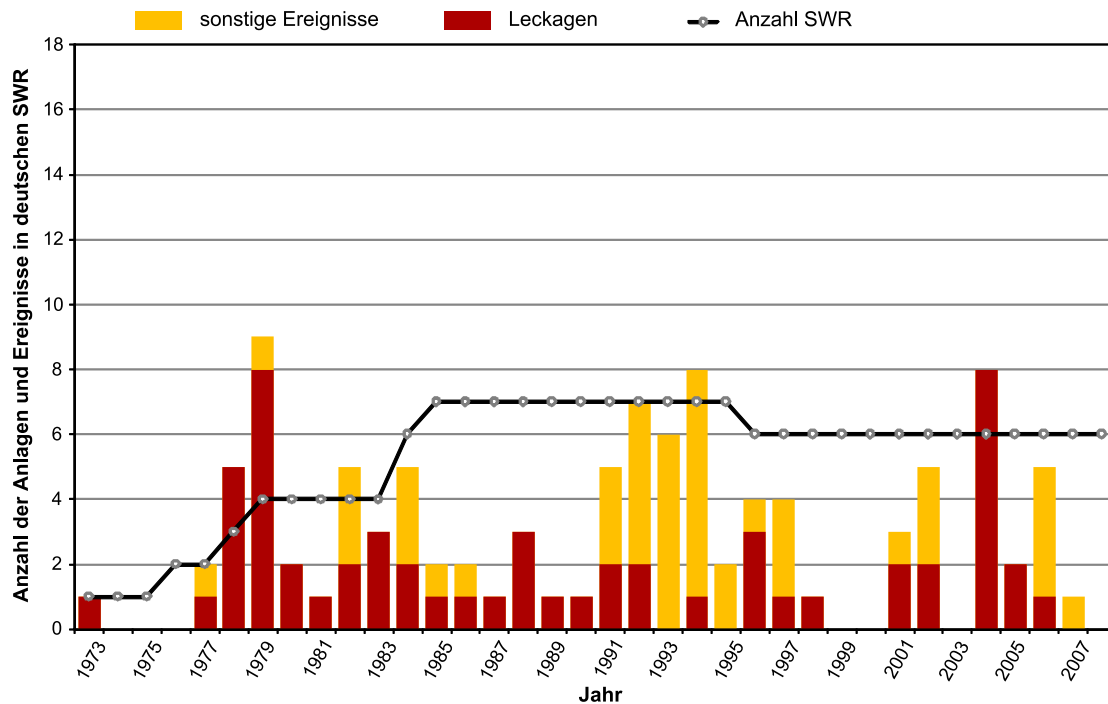


Abb. 4.2-2 Anzahl der Leckagen und sonstiger Ereignisse an Rohrleitungen der J- und K-Systeme von deutschen Anlagen mit SWR; Anlagen in Betrieb

Anhand der Verteilung der Leckereignisse und sonstiger Ereignisse über die Kalenderjahre kann weder für DWR- noch für SWR-Anlagen ein eindeutiger Trend ausgemacht werden. Die Anzahl der Ereignisse mit Leckagen bleibt bei beiden Anlagentypen auf einem vergleichsweise geringen Niveau, d. h., bei diesem Auflösungsgrad ist weder eine eindeutige Zunahme noch eine Abnahme von Ereignissen erkennbar, die sich z. B. infolge von Alterungseffekten oder auch Lerneffekten ergeben könnte.

4.2.1.2 Häufigkeit von Ereignissen für verschiedene Nennweitenklassen

Da in der PSA mit der Leckhäufigkeit für bestimmte Nennweitenklassen D gearbeitet wird, wurde diese Häufigkeit $\lambda_{L,D}$ in Form einer Punktschätzung für die verschiedenen, in der Datenbank KomPass erfassten Nennweitenklassen aus der jeweiligen Anzahl der Ereignisse berechnet. Die Häufigkeit $\lambda_{L,D}$ pro Reaktorjahr (RJ) für den Eintritt eines Ereignisses ist dabei die Anzahl der gemeldeten Leck- und Bruchereignisse $N_{L,D}$ aus den einzelnen Nennweiten-Klassen bezogen auf die Betriebszeit T aller Anlagen des betroffenen Typs:

$$\lambda_{L,D} = N_{L,D} / T.$$

In Abb. 4-2-3 ist die Häufigkeit von Leckagen an Rohrleitungen, wie sie aus den Daten für den Zeitraum 1973 bis 2008 und den entsprechenden Reaktorjahren hervorgeht, für die verschiedenen Nennweitenbereiche dargestellt. Für große Nennweiten $DN > 400$ mm sind keine Leck- und Bruch-Ereignisse in DWR- und SWR-Anlagen aufgetreten. Wie bereits in einer Auswertung der GRS von 2003 festgestellt /HOE 03/, liegt die Häufigkeit für Leckagen in DWR im Nennweitenbereich $50 < DN \leq 100$ mm höher als für den Bereich $25 < DN \leq 50$ mm, während ansonsten eine abnehmende Leckhäufigkeit mit zunehmender Nennweite festzustellen ist.

Wie sich die nennweitenabhängige Häufigkeit für Leckagen seit 1983 entwickelt hat, ist in Abb. 4.2-4 für DWR-Anlagen und in der Abb. 4.2-5 für SWR-Anlagen wiedergegeben. Dabei wurde nach der oben stehenden Formel für die einzelnen Kalenderjahre jeweils die Häufigkeit aus dem von Beginn des Auswertezitraums bis zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Datenbestand errechnet. In beiden Darstellungen sind nur die Nennweitenbereiche bis 400 mm aufgeführt, da für größere Nennweiten keine Leckagen aufgetreten sind. Die Berechnung der Leckhäufigkeiten erfolgte entsprechend der obigen Gleichung mit den Daten seit 1973. Aufgrund der geringen Gesamtpopulation streuen die Werte in den ersten Jahren sehr stark; deshalb wurde auf eine Wiedergabe der Werte vor 1983 verzichtet.

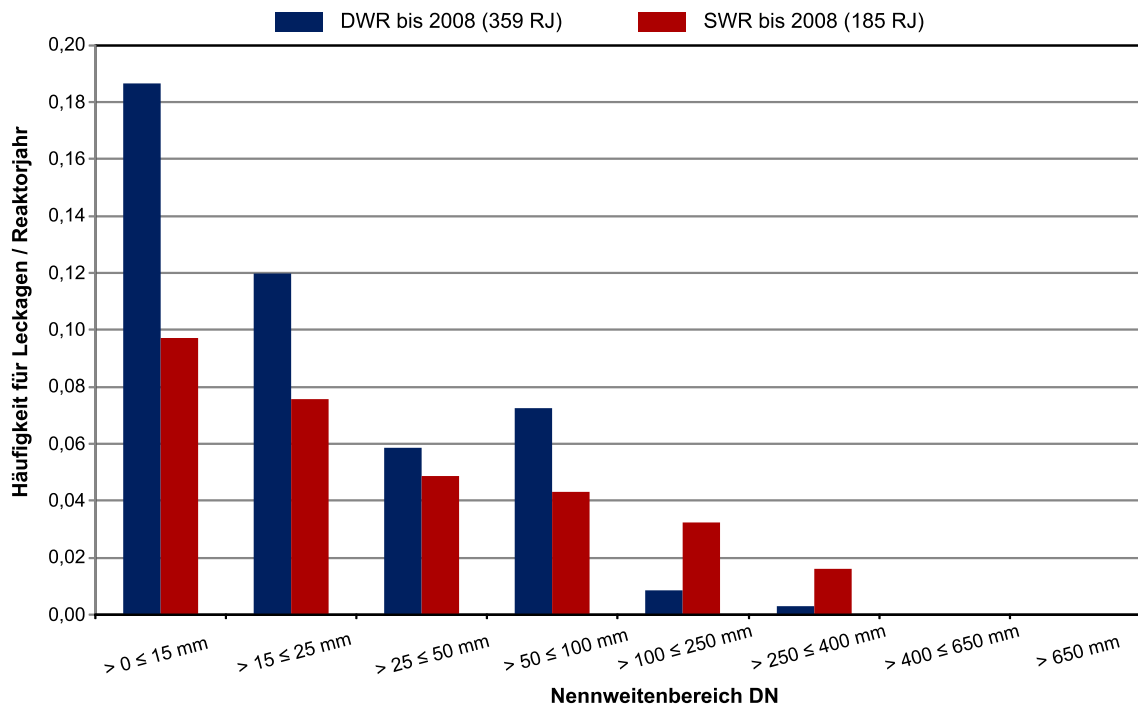


Abb. 4.2-3 Nennweitenabhängige Häufigkeit von Leckagen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher Anlagen mit DWR und SWR

Bei DWR-Anlagen verbleiben die Leckhäufigkeiten bis auf geringfügige Schwankungen auf einem gleichbleibenden Niveau. Ein Trend ist nicht erkennbar (siehe Abb. 4-2-4).

Für SWR-Anlagen zeichnet sich für die Leckhäufigkeit bei den meisten Nennweitenbereichen ein fallender Trend ab (siehe Abb. 4.2-5). Für die beiden Nennweitenklassen zwischen 25 und 100 mm scheint eine geringe Zunahme der Leckhäufigkeit vorzuliegen, wobei zu beachten ist, dass die Verläufe auf Grund der geringen Anzahl an Ereignissen (8 Ereignisse für $25 > DN \leq 50$ mm und 6 Ereignisse für $50 > DN \leq 100$ mm im Zeitraum 1973 - 2008) starken Schwankungen unterliegen.

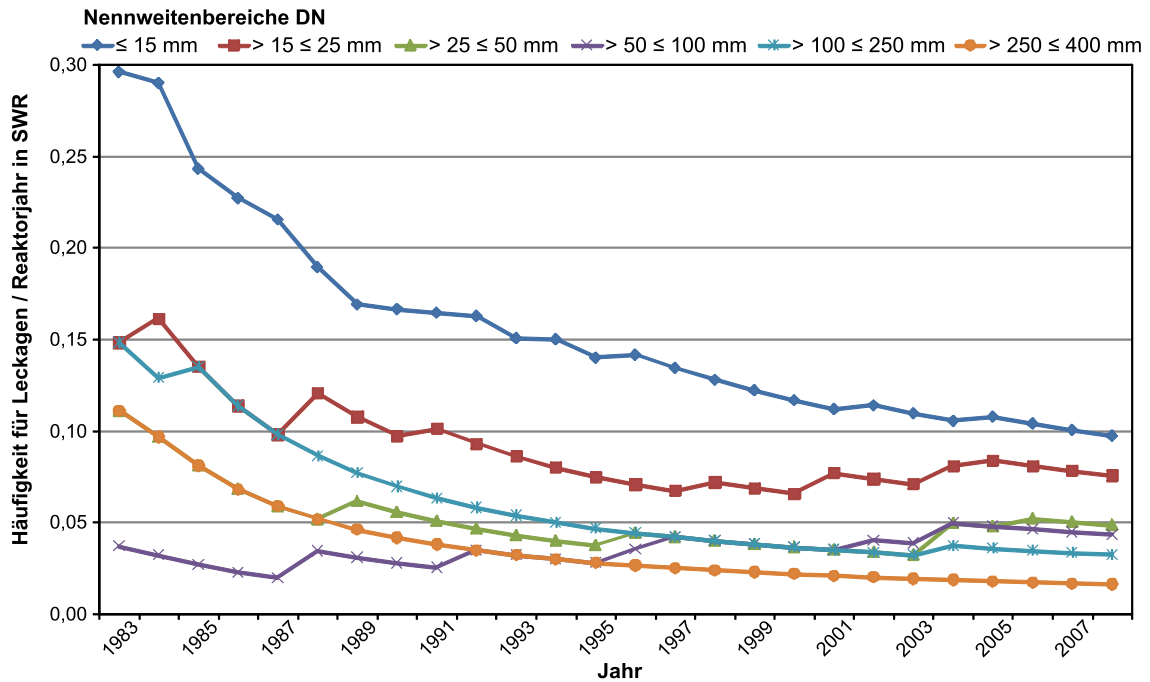


Abb. 4.2-4 Zeitliche Entwicklung der nennweitenabhängigen Häufigkeit für Leckagen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher DWR-Anlagen

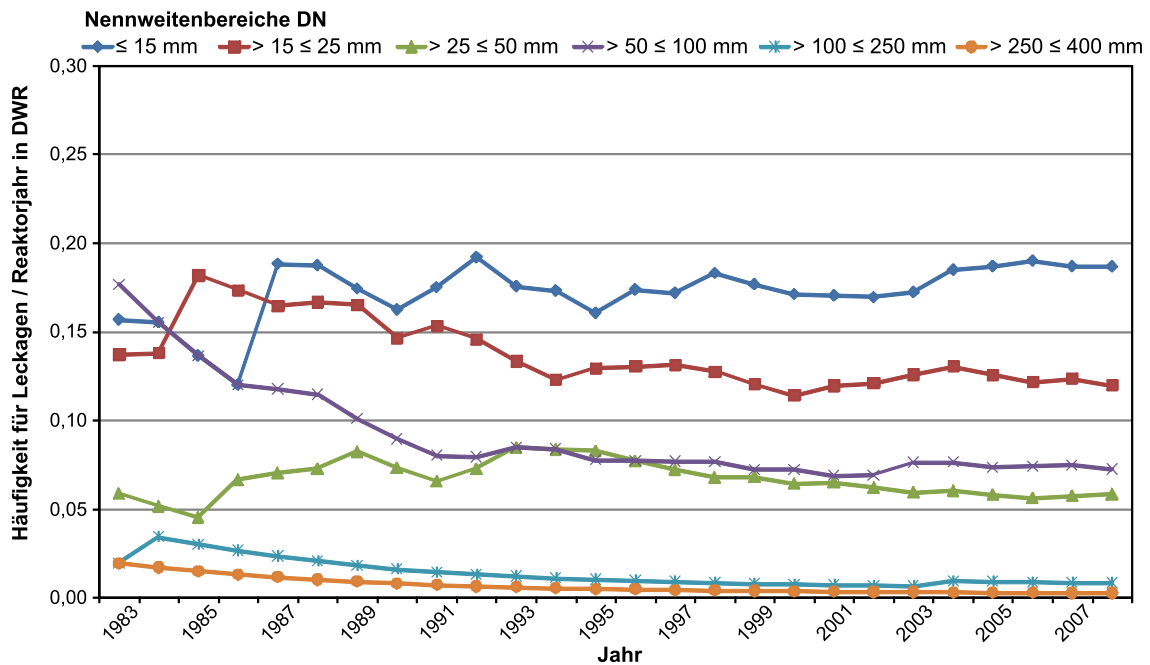


Abb. 4.2-5 Zeitliche Entwicklung der nennweitenabhängigen Häufigkeit für Leckagen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher SWR-Anlagen

4.2.1.3 Schädigungsmechanismen

In den folgenden Auswertungen wurde eine Aufteilung der Ereignisse nach Schädigungsmechanismen vorgenommen. Dabei sollte festgestellt werden, welche Bedeutung den einzelnen Schädigungsmechanismen bei sicherheitstechnisch bedeutsamen Ereignissen an Rohrleitungen zukommt und inwieweit ein Einfluss von Alterungs- oder Lerneffekten einschließlich der Veränderungen des Prüfverhaltens erkennbar ist. Hierbei wurden in einer Abbildung zunächst alle meldepflichtigen Ereignisse und in einer weiteren Abbildung nur Leckagen für den jeweiligen Anlagentyp einbezogen. Die ermittelten Verteilungen der Ereignisse über die Jahre für DWR- und SWR-Anlagen sind in den Abb. 4.2-6 bis Abb. 4.2-9 dargestellt.

Bei den Korrosionsmechanismen wurde nach trans- und interkristalliner Spannungsrisskorrosion (TSpRK, ISpRK), Dehnungsrisskorrosion (DRK), Erosionskorrosion und sonstiger Korrosion (Flächen-, Loch-, Mulden-, Reibkorrosion) unterschieden. Desweiteren wird unterschieden zwischen mechanischer und thermischer Ermüdung, Fertigungsfehlern und Ereignissen, bei denen der Schädigungsmechanismus nicht bekannt ist (keine Angabe).

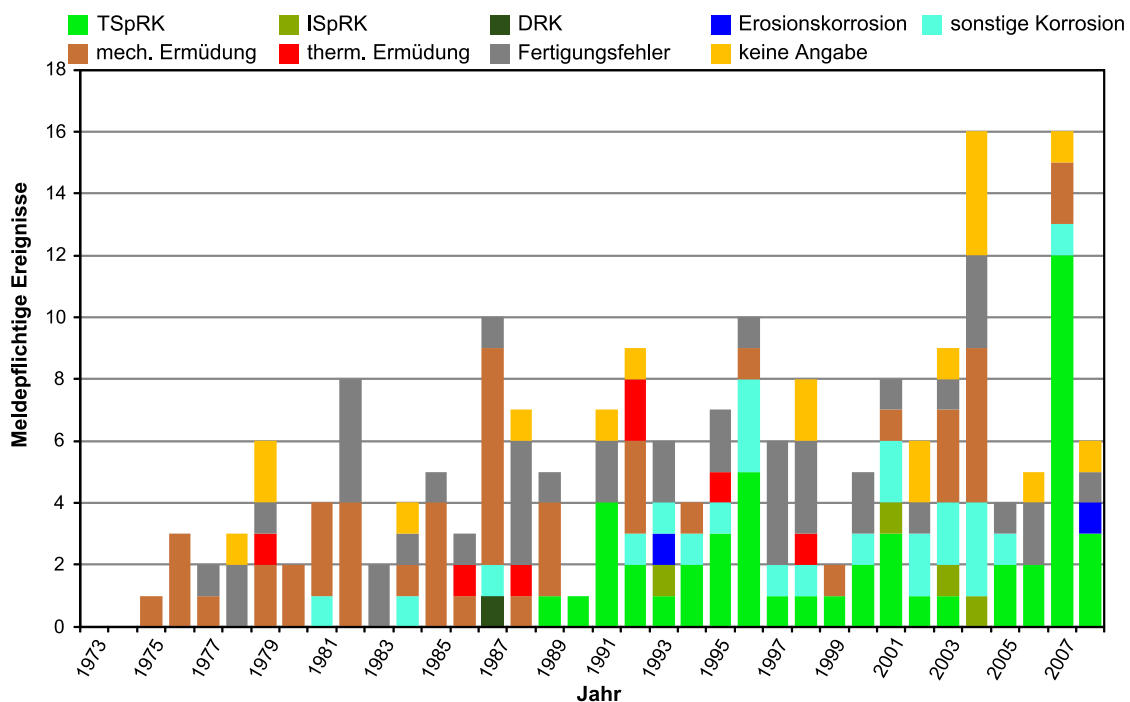


Abb. 4.2-6 Alle Meldepflichtigen Ereignisse an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher DWR-Anlagen differenziert nach Schädigungsmechanismus

Bei DWR-Anlagen (siehe Abb. 4.2-6 und Abb. 4.2-7) wurde ein Großteil der Ereignisse und Leckagen durch mechanische Ermüdung und transkristalline Spannungsrisskorrosion (TSpRK) verursacht, wobei die Anzahl der Leckereignisse infolge TSpRK in den letzten zehn Jahren deutlich niedriger ist, als die Anzahl gemeldeter Ereignisse durch diesen Schädigungsmechanismus. Ereignisse aufgrund mechanischer Ermüdung sind gehäuft im Zeitraum 1975 bis 1989 aufgetreten. Die Trends für beide Schädigungsmechanismen werden als signifikant angesehen und daher weiter unten für eine Berücksichtigung von Lerneffekten in Betracht gezogen.

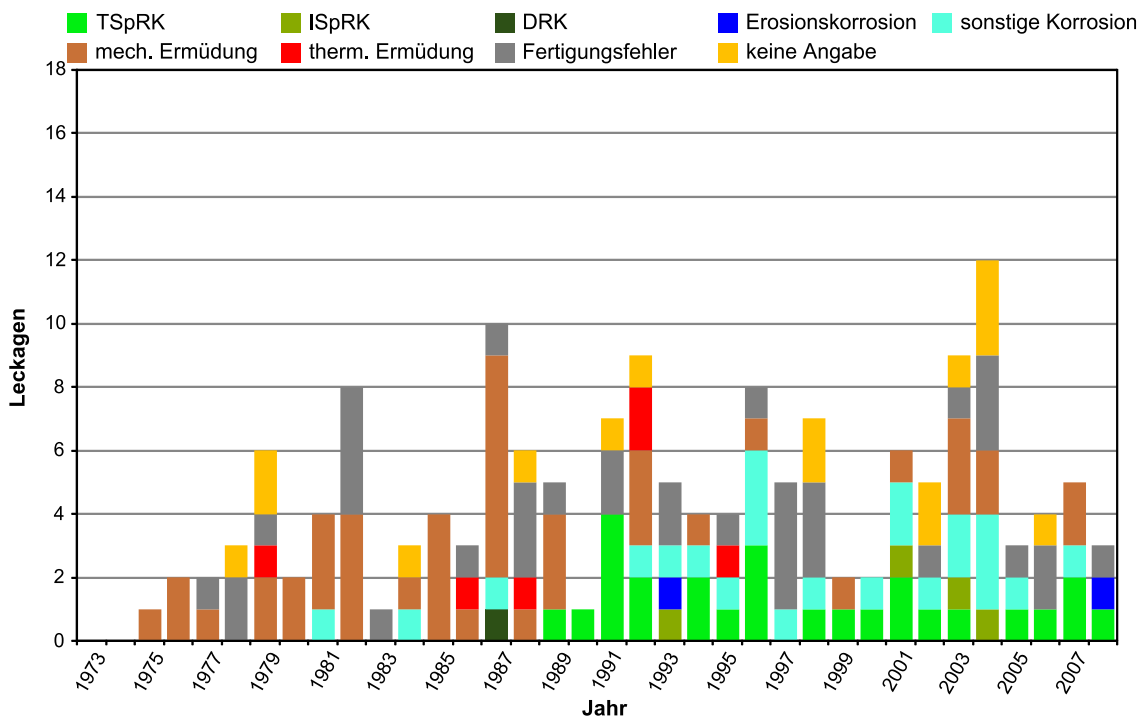


Abb. 4.2-7 Leckagen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher DWR-Anlagen differenziert nach Schädigungsmechanismus

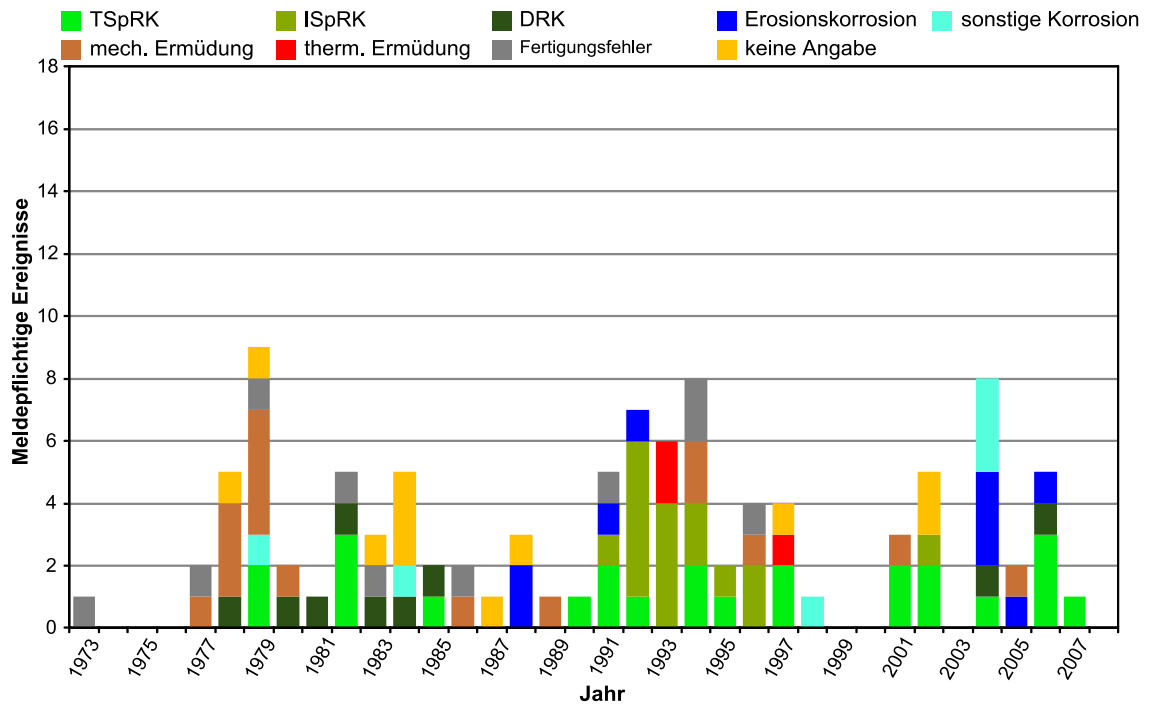


Abb. 4.2-8 Alle Meldepflichtigen Ereignisse an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher SWR-Anlagen differenziert nach Schädigungsmechanismus

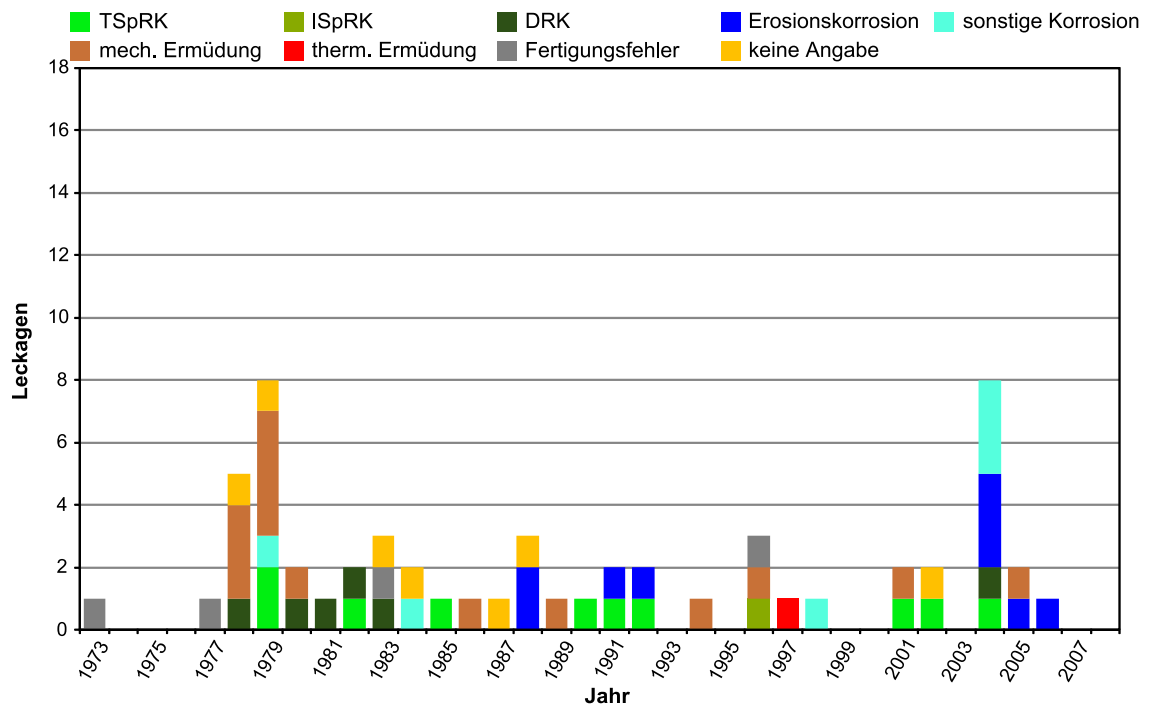


Abb. 4.2-9 Leckagen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher SWR-Anlagen differenziert nach Schädigungsmechanismus

Bei SWR-Anlagen (siehe Abb. 4.2-8 und Abb. 4.2-9) erschwert die geringe Anzahl an Leckagen und die ungleichmäßige Verteilung auf die verschiedenen Mechanismen fundierte Aussagen in Bezug auf die vorherrschenden Schädigungsmechanismen. Ähnlich wie in DWR-Anlagen ist auch hier z. B. bei Ereignissen infolge TSpRK und ISpRK die Anzahl der Ereignisse mit Leckagen deutlich niedriger als die Gesamtzahl der Ereignisse, d. h. die Schädigungen wurden im Rahmen von wiederkehrenden Prüfungen erkannt, ehe ein Leck entstanden ist.

Einen detaillierten Überblick zum Einfluss verschiedener Schädigungsmechanismen auf die Leckhäufigkeit in deutschen Anlagen mit DWR und SWR geben die Abb. 4.2-10 und Abb. 4.2-11, in denen die ermittelten mechanismusspezifischen Häufigkeiten über die Kalenderjahre aufgetragen sind. Mechanismen, die zu einer vernachlässigbaren Anzahl von Leckereignissen geführt haben (DRK und Erosionskorrosion bei DWR-Anlagen sowie ISpRK und thermische Ermüdung bei SWR-Anlagen), wurden in diesen Diagrammen nicht berücksichtigt.

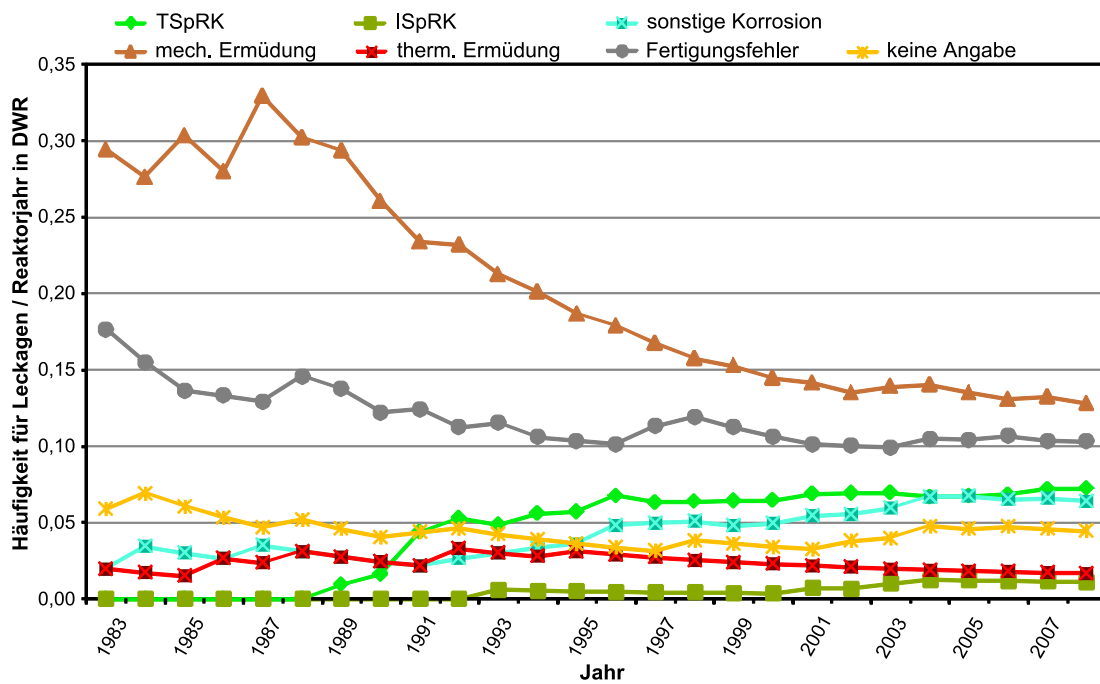


Abb. 4.2-10 Zeitliche Entwicklung der Leckhäufigkeit durch einzelne Schädigungsmechanismen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher DWR-Anlagen

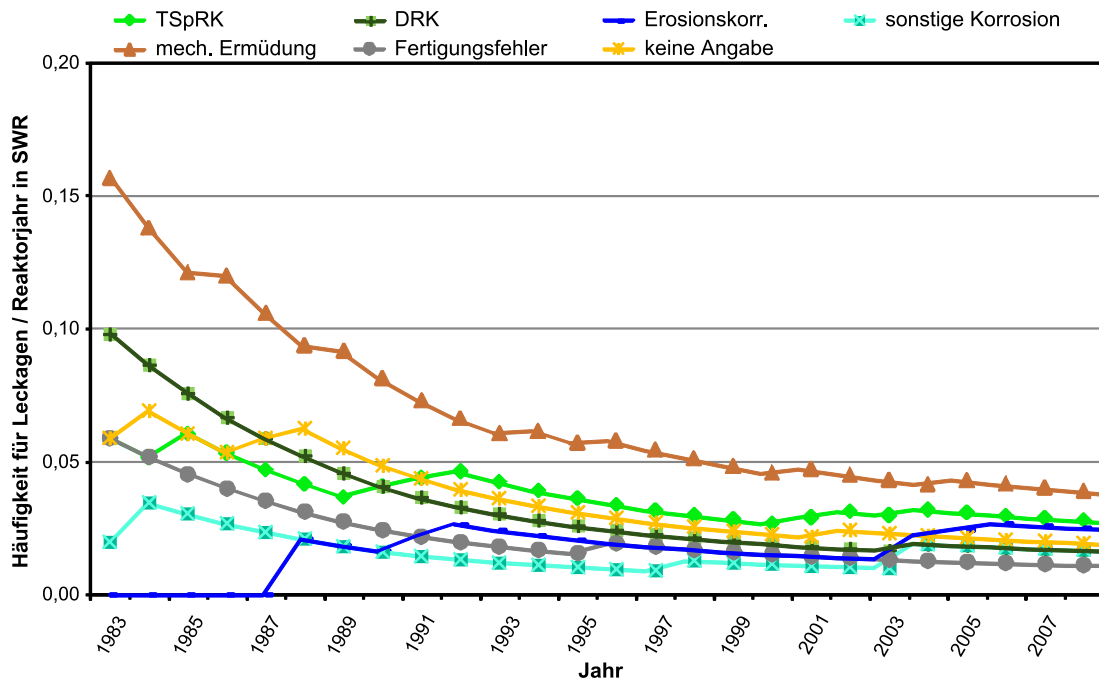


Abb. 4.2-11 Zeitliche Entwicklung der Leckhäufigkeit durch einzelne Schädigungsmechanismen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher SWR-Anlagen

Bei DWR-Anlagen ist mit der Zeit ein deutlicher Abfall der Leckhäufigkeit für Ereignisse infolge mechanischer Ermüdung erkennbar. Ähnlich, wenn auch auf niedrigerem Niveau, verläuft die Kurve für die Leckhäufigkeit infolge von Fertigungsfehlern. Die Leckhäufigkeit infolge anderer Schädigungsmechanismen verbleibt in erster Näherung auf gleichem Niveau, wobei Leckereignisse infolge chloridinduzierter transkristalliner Spannungsrisskorrosion erst seit Ende der 80er Jahre aufgetreten sind. Bei SWR-Anlagen nimmt die Leckhäufigkeit für die meisten Schädigungsmechanismen in den 80er Jahren ab und verbleibt dann auf geringem Niveau. Weder für Anlagen mit DWR noch für SWR ist ein signifikanter Anstieg mechanismusspezifischer Leckhäufigkeiten erkennbar. Dies wird so interpretiert, dass bislang Schädigungsmechanismen in der Regel durch die in den Anlagen implementierten Maßnahmen wirksam beherrscht werden.

4.2.1.4 Schadensorte

Ähnlich wie die vorherige Analyse der Ereignisse nach Schädigungsmechanismen wurde eine Untersuchung nach dem jeweiligen Schadensort vorgenommen, wobei zwischen Schweißnahtbereich, Grundwerkstoff sowie Flansch/Dichtung differenziert wurde. Diese Analysen beschränken sich auf Leckereignisse, da diese mit Sicherheit erkannt werden, während die Auffindwahrscheinlichkeit von Anrissen auch vom Prüfkonzept abhängt. Die zeitliche Entwicklung der Leckereignisse pro Reaktorjahr ist in Abb. 4.2-12 für DWR-Anlagen und in Abb. 4.2-13 für SWR-Anlagen wiedergegeben.

In DWR-Anlagen war anfangs vorwiegend der Schweißnahtbereich von Leckereignissen betroffen, während im Grundwerkstoff kaum Leckagen auftraten. Erst im Laufe der Zeit haben Ereignisse mit Leckagen im Grundwerkstoff zugenommen, wogegen im Schweißnahtbereich weniger Ereignisse zu verzeichnen sind. Die Verläufe für beide Häufigkeiten scheinen bis auf geringfügige Schwankungen gleichbleibende Werte erreicht zu haben, wobei die Leckhäufigkeit im Schweißnahtbereich immer noch größer ist als im Grundwerkstoff.

Bei SWR-Anlagen findet man anders als bei DWR-Anlagen zu Anfang sowohl für den Schweißnahtbereich als auch für den Grundwerkstoff ähnlich hohe Leckhäufigkeiten, die beide im Laufe der Zeit gesunken sind. Die Leckhäufigkeit im Schweißnahtbereich liegt hier aber unterhalb derjenigen im Grundwerkstoff. Auch hier scheinen die Verläufe nahezu gleichbleibende Werte erreicht zu haben, wobei die Signifikanz dieser Aussage durch die geringe Anzahl an Ereignissen eingeschränkt ist.

Dieser hohe Anteil an Ereignissen in Grundwerkstoffbereichen gibt Anlass, die Kriterien für die Zählung „leckrelevanter Stellen“ innerhalb von Rohrleitungssystemen zu hinterfragen. Diese Stellen werden zur Bestimmung der Leckhäufigkeiten von Rohrleitungssystemen herangezogen. Unter sonst ähnlichen Bedingungen wird die Leckwahrscheinlichkeit am Gesamtsystem als proportional zur Anzahl dieser Stellen angenommen, wobei diese teilweise vereinfachend mit der Anzahl der Schweißnähte und anderer Besonderheiten, gleichgesetzt wurde.

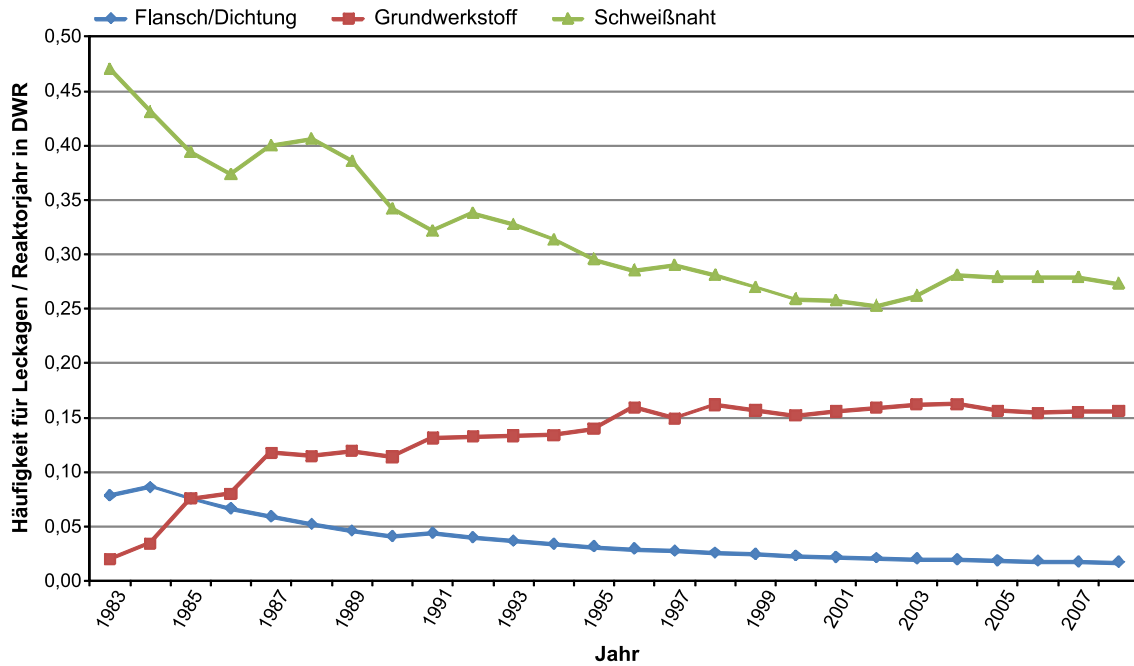


Abb. 4.2-12 Zeitliche Entwicklung der Häufigkeit von Leckagen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher DWR-Anlagen nach Schadensort

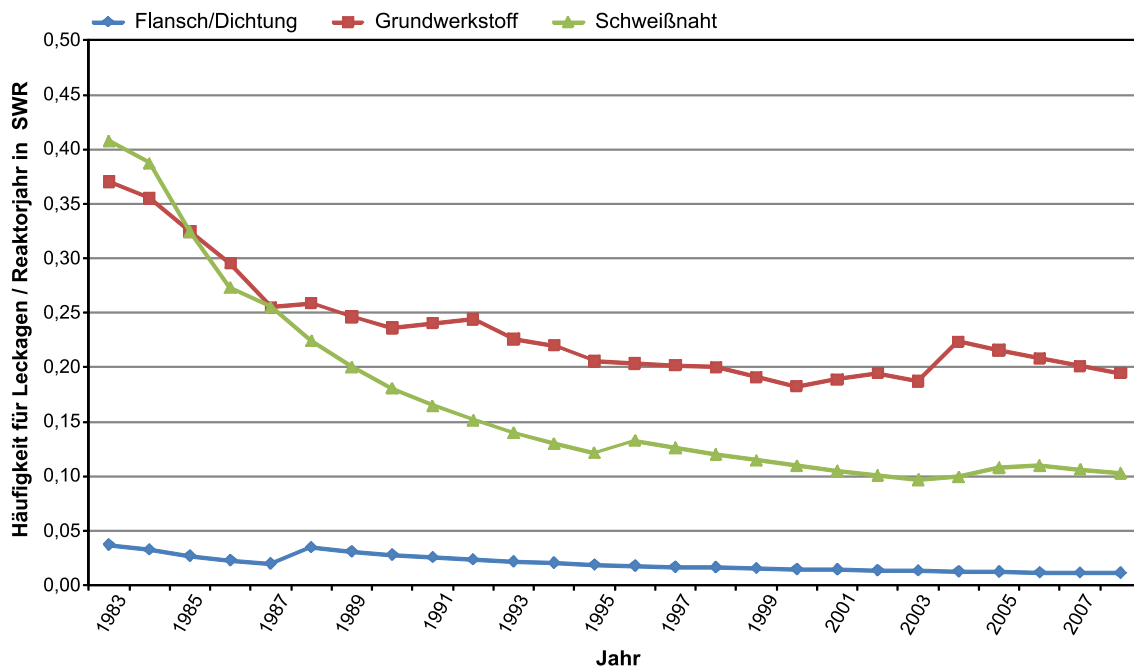


Abb. 4.2-13 Zeitliche Entwicklung der Häufigkeit von Leckagen an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher SWR-Anlagen nach Schadensort

4.2.1.5 Berücksichtigung von Lerneffekten

Lerneffekte wirken sich in der Regel auf die Erkennung und Vermeidung der Ursachen von Schädigungen aus und sind daher mechanismusspezifisch. Auch Alterungseffekte treten aufgrund von spezifischen Schädigungsmechanismen ein. Betrachtet man entsprechend die Gesamtzahl der Ereignisse und die der Leckereignisse aufgeschlüsselt nach Schädigungsmechanismen (siehe Abb. 4.2-6 bis Abb. 4.2-9), so fallen zwei Trends auf, die auf Alterungs- oder Lerneffekte schließen lassen und beide nach 1989 deutlich wurden, also nach Inbetriebnahme der jüngsten Anlagen:

1. Das Auftreten von Ereignissen durch transkristalline Spannungsrisskorrosion (TSpRK) bei Anlagen mit DWR seit 1989
2. Eine Abnahme der Ereignisse durch mechanische Ermüdung bei Anlagen mit DWR und SWR seit etwa 1990

Eine genauere Betrachtung lässt darauf schließen, dass es sich in beiden Fällen um eine Art Lerneffekt handelt, jedoch in jeweils unterschiedlicher Ausprägung.

Zu 1.: Aus den Trends für 'TSpRK' lässt sich entnehmen, dass in den 90er Jahren sowohl die Zahl der Rissbefunde als auch der Leckereignisse ansteigt; danach steigt jedoch nur noch die Zahl der Rissbefunde weiter an, während die Anzahl von Leckereignissen wieder geringer wird und nur noch einen kleinen Beitrag zur Gesamtzahl liefert. Dies lässt auf eine Erkennung der Ursachen und eine entsprechende frühzeitige Erkennung der Schädigungen durch gezielte Prüfungen schließen, ohne dass die Ursachen bisher vollständig beseitigt werden konnten. - Diese Hypothese sollte durch die Verfolgung der weiteren Entwicklung in den nächsten Jahren überprüft werden.

Zu 2.: Die Trends für 'mechanische Ermüdung, zeigen eine deutliche Abnahme der Gesamtzahl der Ereignisse mit und ohne Leck seit 1990. Dies lässt auf wirksame Maßnahmen zur Vermeidung der Ursachen schließen.

Die Berücksichtigung von Lerneffekten bei der Ermittlung der nennweitenabhängigen Eintrittshäufigkeit von Lecks in Rohrleitungen ist jedoch nur dann angebracht, wenn diese Lerneffekte auch deutliche Veränderungen in der Anzahl der Ereignisse mit Lecks hervorrufen. Die deutlichste Änderung zeigte die vorgenommene Analyse der Daten für den Schädigungsmechanismus 'mechanische Ermüdung'. Wegen der größeren Häufigkeit und insgesamt größeren Anzahl wurde diese nur für DWR als signifikant

betrachtet und deshalb hier exemplarisch weiter untersucht. Ein vergleichbarer Trend zeigt sich zwar auch für SWR, die Zahl der Ereignisse ist jedoch sehr gering.

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Ursachen für Schädigungen durch mechanische Ermüdung in DWR-Anlagen bis 1989 weitgehend behoben wurden. Nach unseren Kenntnissen waren dies insbesondere ungünstig angebrachte Halterungen im Bereich aktiver Einrichtungen, die bereits während der Inbetriebnahme der Anlagen bzw. in den ersten Betriebsjahren zu Schäden an Rohrleitungen kleinerer Durchmesser infolge hochzyklischer Ermüdung geführt haben. Der Wechsel von 1989 nach 1990 wird im Weiteren von uns vereinfachend als Zeitpunkt für das Einsetzen des Lerneffekts gesehen.

Um diesen Lerneffekt auf die nennweitenspezifische Leckhäufigkeit von Rohrleitungen in DWR-Anlagen zu berücksichtigen, wurden die Datensätze für die Zeit nach 1990 wie folgt modifiziert: Alle Ereignisse infolge mechanischer Ermüdung, die vor 1989 aufgetreten sind, wurden bei der Berechnung der Leckhäufigkeit nach 1990 nicht weiter berücksichtigt, wodurch sich zwangsläufig insgesamt geringere Werte ergeben.

Ein Vergleich der originalen mit den modifizierten Leckhäufigkeiten für DWR-Anlagen findet sich in Abb. 4.2-14 und Abb. 4.2-15. Veränderungen der Leckhäufigkeiten durch diese Modifikation treten nur bei Nennweiten $DN \leq 100$ mm auf. Die Abweichungen für Nennweiten $25 < DN \leq 100$ mm (siehe Abb. 4.2-14) fallen hierbei nicht so stark aus wie für die kleineren Nennweiten $DN \leq 25$ mm (siehe Abb. 4.2-15), da bei letzteren vor 1990 mehr Ereignisse durch mechanische Ermüdung vorlagen. Die Differenzen zwischen den originalen und modifizierten Werten werden durch die Mittelung über den gesamten Zeitraum mit der Zeit geringer, können jedoch nicht verschwinden. Der maximale Abminderungsfaktor zeigt sich für die Nennweitenklasse $15 < DN \leq 25$ mm und beträgt im letzten ausgewerteten Jahr 2008 etwa 1,5. Dieser geringe Wert nahe 1 erklärt sich durch die Mittelung über alle Schädigungsmechanismen, wobei ein gegenläufiger Effekt durch den leichten Anstieg aus verschiedenen anderen Mechanismen seit 1990 zu verzeichnen ist.

Für eine differenziertere Betrachtung zur Berücksichtigung von Lerneffekten bei der Generierung von Leckhäufigkeiten wäre die vorgenommene vereinfachende Modifikation der Daten noch zu hinterfragen: Da die Maßnahmen zur Beherrschung von Schädigungsmechanismen häufig über mehrere Jahre verteilt vorgenommen werden und bei einzelnen Anlagen zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen können, ist die Fest-

legung eines Zeitpunktes für das Einsetzen des Effektes nicht realistisch. Darüber hinaus wird der Lerneffekt durch die Eliminierung aller Ereignisse durch diesen Schädigungsmechanismus vor dem gewählten Zeitpunkt sicher überschätzt. Dies lässt sich am Beispiel der mechanischen Ermüdung schon an der Tatsache ablesen, dass auch nach dem gewählten Zeitpunkt noch Leckereignisse durch diesen Mechanismus auftreten. Die vorgenommene vereinfachte Modifikation der Daten führt daher eher zu einer Überschätzung des Lerneffektes und ein realistischer „Korrekturfaktor“ wäre noch kleiner. Für probabilistische Analysen ist diese Korrektur daher nach unserer Einschätzung nicht erforderlich und Leckhäufigkeiten können zum heutigen Zeitpunkt ohne Berücksichtigung solcher Effekte hinreichend genau bestimmt werden.

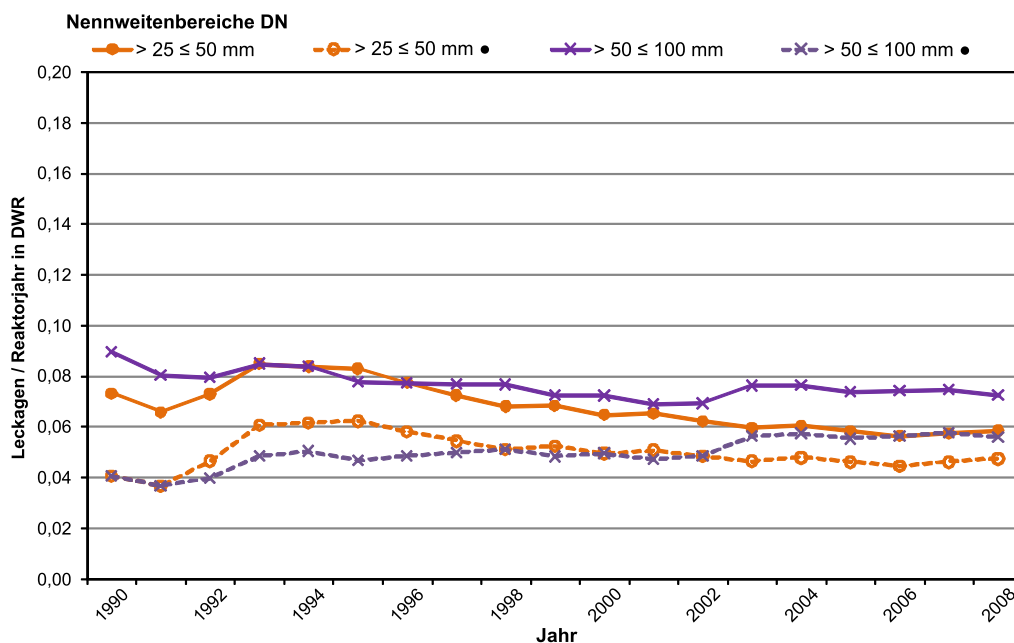


Abb. 4.2-14 Nennweittenspezifische Leckhäufigkeit an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher DWR-Anlagen aus originalen (durchgezogene Verläufe) und modifizierten Ereignisdaten (gestrichelte Verläufe) für $25 < DN \leq 100$ mm

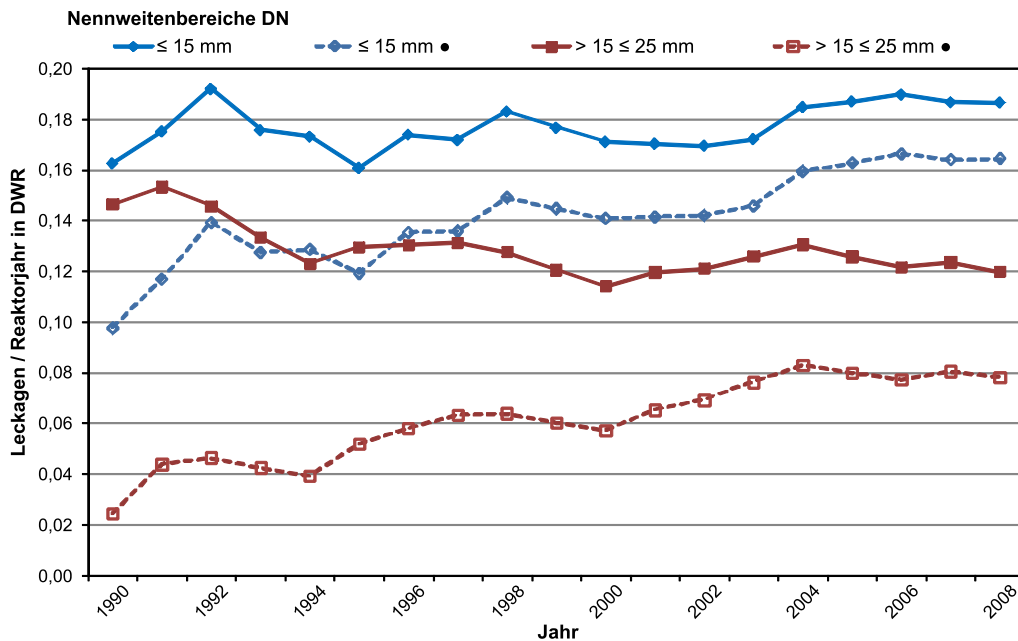


Abb. 4.2-15 Nennweitenspezifische Leckhäufigkeit an Rohrleitungen der J- und K-Systeme deutscher DWR-Anlagen aus originalen (durchgezogene Verläufe) und modifizierten Ereignisdaten (gestrichelte Verläufe) für DN ≤ 25 mm

4.2.2 Ereignisse in US-amerikanischen Anlagen mit DWR und SWR

4.2.2.1 Überblick über alle Ereignisse an Rohrleitungen

Zur Abrundung der Untersuchungen wurde die Betriebserfahrung mit Rohrleitungen in ausländischen Anlagen ausgewertet. Hierzu wurde, ähnlich wie bei der Abfrage zu meldepflichtigen Ereignissen in deutschen Anlagen in der Datenbank KomPass, eine Abfrage in der OPDE-Datenbank durchgeführt. Die OPDE-Datenbank wurde im Rahmen des internationalen Projektes der OECD/NEA 'OECD Pipe Failure Data Exchange Project, erstellt /LYD 08, REC 06/. Sie enthält Daten zu sicherheitstechnisch bedeutsamen Ereignissen an Rohrleitungen von Kernkraftwerken der Mitgliedsstaaten von OECD/NEA. Die GRS ist an der Datenpflege dieser Datenbank beteiligt. Insgesamt stehen ca. 3.700 Datensätze zur Verfügung. Um eine möglichst geschlossene, größere Population analysieren zu können, wurde die Abfrage auf Ereignisse an Rohrleitungen in US-amerikanischen Anlagen mit DWR und SWR beschränkt.

Eine vollständige Übereinstimmung der Abfragen in den Datenbanken KomPass und OPDE ist wegen der unterschiedlichen Gestaltung der Datenbanken nicht möglich. Bei der OPDE-Datenbankabfrage wurde nach Ereignissen für Komponenten der Klassen 1 und 2 nach ASME im Zeitraum 1973 bis 2008 gesucht. Alle Ereignisse vom Typ 'leak', 'rupture' oder 'severance' wurden dabei als Leckereignisse gezählt, während alle anderen Ereignistypen als 'sonstige Ereignisse' gewertet wurden. Insgesamt wurden für DWR-Anlagen 578 Ereignisse identifiziert, wovon 432 als Leckereignisse eingestuft wurden. Von US-amerikanischen SWR-Anlagen wurden 684 Ereignisse identifiziert, davon 246 mit Leckagen.

4.2.2.2 Verteilung der Ereignisse auf Nennweitenklassen

Ebenso wie bei deutschen Anlagen wurden die Ereignisse in den US-amerikanischen Anlagen nach Nennweitenklassen eingeteilt. Auf eine Berechnung der Leckhäufigkeit wurde verzichtet, da nach Kenntnis der GRS aus der Mitwirkung an dieser Datenbank nicht alle Leckereignisse in der Datenbank erfasst sind, und sich daher zu geringe, nicht vergleichbare Leckhäufigkeiten ergeben würden.

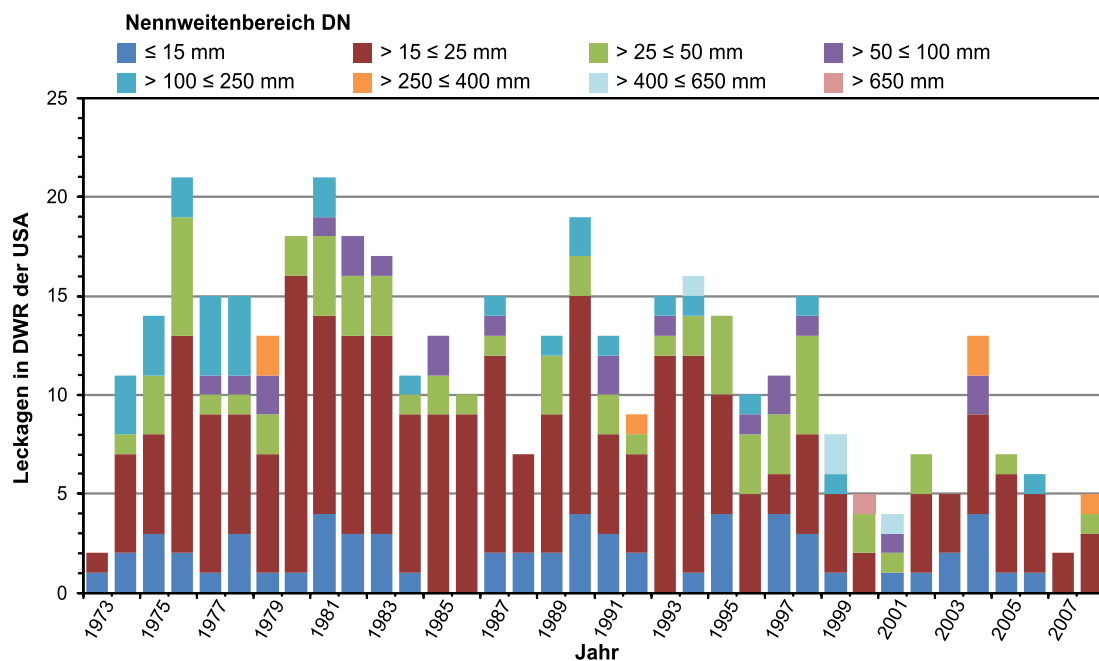


Abb. 4.2-16 Leckereignisse an Rohrleitungen Class 1 und 2 US-amerikanischer DWR-Anlagen nach Nennweitenbereichen

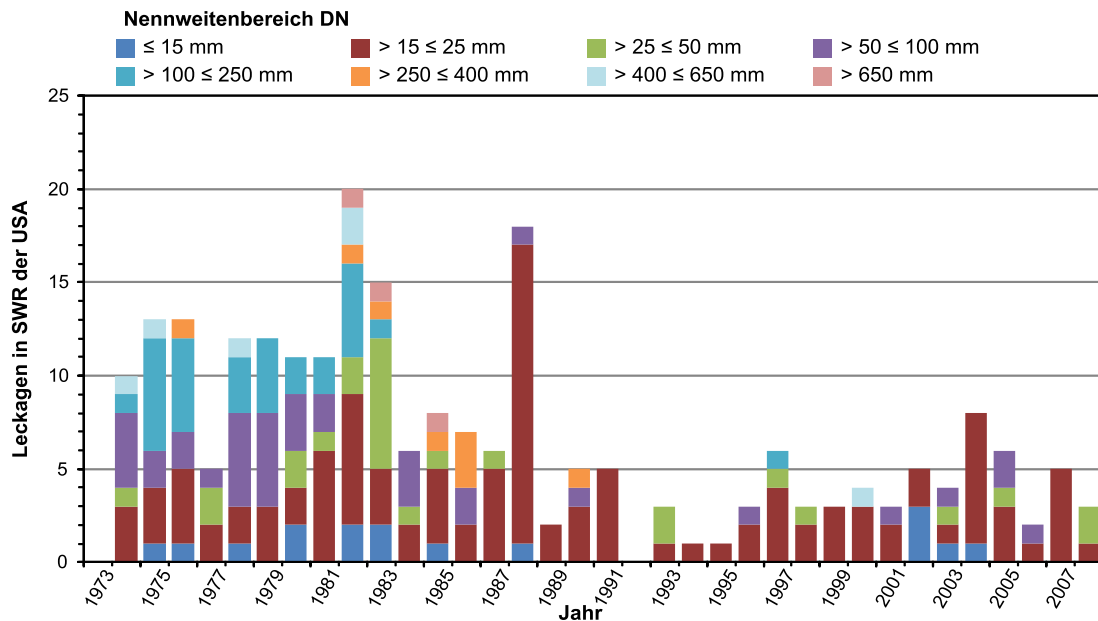


Abb. 4.2-17 Leckereignisse an Rohrleitungen Class 1 und 2 US-amerikanischer SWR-Anlagen nach Nennweitenbereichen

In Abb. 4.2-16 ist die Verteilung der Leckagen in DWR-Anlagen und in Abb. 4.2-17 für SWR-Anlagen wiedergegeben. Für beide Anlagentypen ist ein abnehmender Trend erkennbar. Auch in US-amerikanischen Anlagen waren insbesondere Leitungen mit kleineren Abmessungen von Leckagen betroffen. Allerdings sind auch Ereignisse an Rohrleitungen DN > 400 aufgetreten, insbesondere in den 70er Jahren bei SWR-Anlagen.

4.2.2.3 Schädigungsmechanismen

Um zu untersuchen, inwieweit Alterungs- oder Lerneffekte erkennbar sind, wurden die Leckereignisse an Rohrleitungen US-amerikanischer Anlagen mit DWR und SWR, wie zuvor bei deutschen Anlagen, nach Schädigungsmechanismen aufgeschlüsselt.

In DWR-Anlagen haben Schädigungen durch mechanische Ermüdung einen Großteil der Leckereignisse verursacht (siehe Abb. 4.2-18). Hier zeigt sich ein qualitativ vergleichbares Bild zu deutschen Anlagen für die 70er und 80er Jahre, jedoch fällt die Abnahme an Ereignissen mit diesem Schädigungsmechanismus nicht so deutlich aus wie bei deutschen Anlagen. Andere Schädigungsmechanismen sind eher unregelmäßig und mit stärker variierender Ereigniszahl aufgetreten, so dass hier kein weiterer einzelner Mechanismus hervorzuheben ist. Das erstmalige Auftreten von Schädigungen

durch transkristalline Spannungsrisskorrosion ist hier nicht so deutlich ausgeprägt wie in deutschen DWR-Anlagen. Die international stark beachteten Ereignisse durch interkristalline Spannungsrisskorrosion an Nickellegierungen treten hier nicht in Erscheinung, da diese vorwiegend Dampferzeuger-Heizrohre und Behälter-Stützen betreffen, aber nicht Rohrleitungen.

Bei SWR-Anlagen (siehe Abb. 4.2-19) haben Schädigungen durch interkristalline Spannungsrisskorrosion (IGSCC) bis ca. 1987 einen Großteil der Leckereignisse verursacht. Diese Ereignisse betrafen Rohrleitungen aus unstabilisierten Chrom-Nickel-Stählen und sind gehäuft zwischen 1973 und 1983 aufgetreten. Ihre Anzahl hat sich danach signifikant verringert, einzelne Leckagen infolge dieses Mechanismus sind aber auch in den letzten Jahren aufgetreten. Dieser Effekt ist jedoch wegen der Verwendung stabilisierter Chrom-Nickel-Stähle auf deutsche Anlagen nicht übertragbar, bei denen nur einige Anrisse im Bereich von nicht optimal ausgeführten Schweißnähten, aber keine Lecks aufgetreten sind (vergleiche Abb. 4.2-8 und 4.2-9). Die deutliche Abnahme der Anzahl an Leckereignissen in den USA nach 1987 zeigt, dass wirksame Maßnahmen ergriffen wurden, um diesen Schädigungsmechanismus zu unterbinden oder aber so frühzeitig festzustellen, dass Leckagen vermieden werden konnten. Andere Schädigungsmechanismen sind ebenso unregelmäßig verteilt wie bei US-amerikanischen DWR-Anlagen.

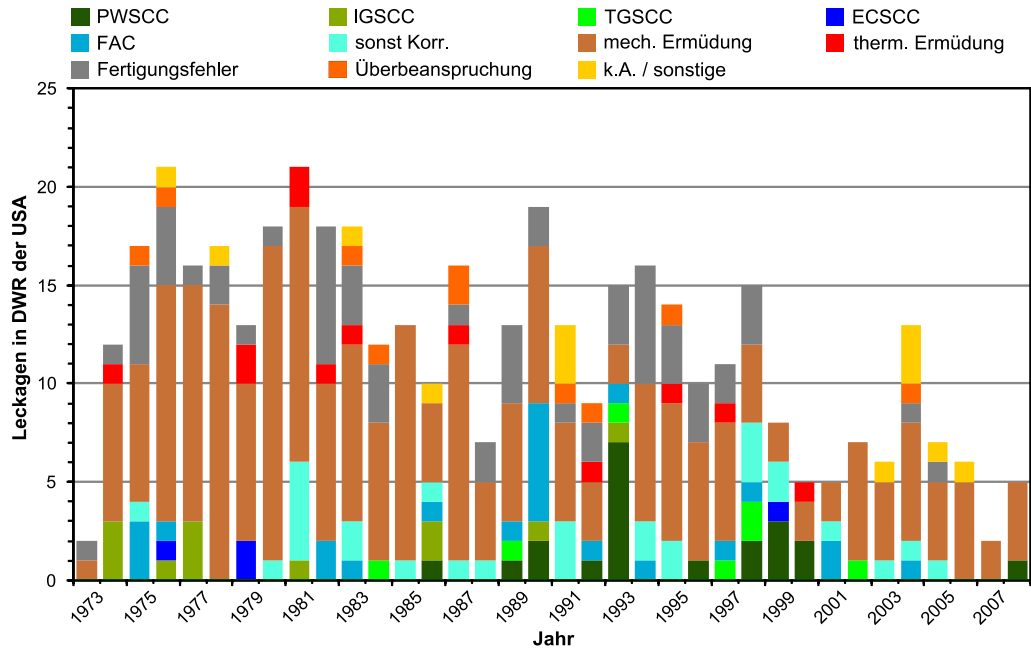


Abb. 4.2-18 Leckereignisse an Rohrleitungen (Klasse 1 und 2) US-amerikanischer DWR-Anlagen nach Schädigungsmechanismen

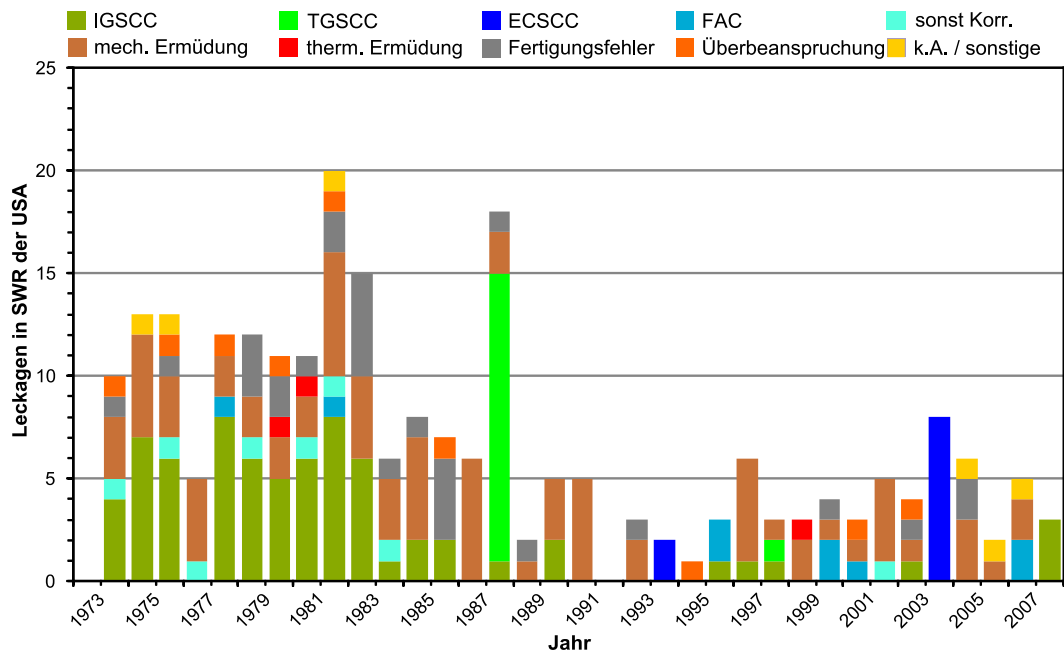


Abb. 4.2-19 Leckereignisse an Rohrleitungen (Klasse 1 und 2) US-amerikanischer SWR-Anlagen nach Schädigungsmechanismen

4.3 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

Verschiedene Schädigungsmechanismen, Prüfkonzepte und Lerneffekte können Einfluss auf die Eintrittshäufigkeit von Lecks an Rohrleitungen haben. Um Ansätze zur Berücksichtigung und differenzierten Bewertung dieser Einflüsse auf die nennweitenabhängige Ermittlung von Leckhäufigkeiten zu entwickeln, wurde die Betriebserfahrung mit sicherheitstechnisch bedeutsamen Rohrleitungen in Kernkraftwerken mit DWR und SWR gezielt ausgewertet. Hierzu wurden die bei der GRS verfügbaren Datenbanken KomPass und OPDE herangezogen. Untersucht wurden insbesondere Leckereignisse in deutschen Kernkraftwerken, die im Zeitraum 1973 bis 2008 aufgetreten sind. Die daraus ermittelten zeitabhängigen Leckhäufigkeiten wurden näher betrachtet, wobei zwischen Nennweitenbereichen, auslösenden Schädigungsmechanismen und Schadensort differenziert wurde. Zur Abrundung der Untersuchungen wurden für denselben Betrachtungszeitraum auch Leckereignisse an Rohrleitungen US-amerikanischer Kernkraftwerken mit DWR und SWR ausgewertet.

Die Ergebnisse aus der deutschen Betriebserfahrung können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die Anzahl der Leckereignisse an sicherheitstechnisch bedeutsamen Rohrleitungen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR ist insgesamt gering.
2. Die schon in vorangegangenen Untersuchungen festgestellte Nennweitenabhängigkeit von Leckereignissen an sicherheitstechnisch bedeutsamen Rohrleitungen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR wurde bestätigt, d. h. von Leckereignissen waren vor allem Rohrleitungen mit kleineren Durchmessern betroffen.
3. Die Leckereignisse wurden durch verschiedene Schädigungsmechanismen ausgelöst, von denen keiner über den gesamten Betrachtungszeitraum dominiert. Ein signifikanter, mechanismusspezifischer Trend bei der Anzahl der Leckereignisse war nur für den Mechanismus 'mechanische Ermüdung' zu erkennen. Interpretiert man diesen Trend als Lerneffekt und 'korrigiert, die Daten rückwirkend, um die daraus zu erwartenden Leckwahrscheinlichkeiten für die Zukunft zu prognostizieren, ergibt sich ein Korrekturfaktor nahe 1, der für probabilistische Analysen unbedeutend ist. Daher können Leckhäufigkeiten zum heutigen Zeitpunkt ohne Berücksichtigung solcher Effekte hinreichend genau bestimmt werden.

4. Die Häufigkeit von Rohrleitungsleckagen an Schweißnahtbereichen sicherheitstechnisch bedeutsamer Rohrleitungen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR hat im Betrachtungszeitraum abgenommen. Dagegen haben Rohrleitungsleckagen, die im Grundwerkstoffbereich aufgetreten sind, insbesondere in Anlagen mit DWR an Bedeutung gewonnen. Dies gibt Anlass, die Kriterien für die Zählung 'leckrelevanter Stellen, innerhalb von Rohrleitungssystemen zu hinterfragen. Hierzu besteht weiterer Untersuchungsbedarf.

Bei der mit geringerem Detaillierungsgrad vorgenommenen Auswertung von Leckereignissen an sicherheitstechnisch bedeutsamen Rohrleitungen in US-amerikanischen Anlagen waren bei zwei Schädigungsmechanismen Trends erkennbar, die auf einen Lerneffekt schließen lassen. Ein Vergleich mit den Daten von deutschen Anlagen zeigt hier teilweise ähnliche Trends, jedoch führen Unterschiede, die konstruktiver, system- oder werkstofftechnischer sowie betrieblicher Art sein können, auch zu deutlich anderen Entwicklungen.

Als Ansätze für weiterführende Arbeiten zur Ermittlung der Eintrittshäufigkeiten von Lecks und Brüchen in Rohrleitungen haben sich ergeben:

- Die Kriterien für die Zählung der 'leckrelevanten Stellen, als maßgebliche Größe für die Leckwahrscheinlichkeit an einem Rohrleitungssystem sollten überprüft werden. Bei der Weiterentwicklung sollten durch geeignete Kriterien auch Leckereignisse im Grundwerkstoff angemessen berücksichtigt werden.
- Um die Auswirkungen von technischen Weiterentwicklungen auf die Leckhäufigkeiten berücksichtigen zu können, wäre es grundsätzlich sinnvoll, die Daten aus deutschen Kernkraftwerken nach Generationen oder nach den jeweils gültigen Anforderungen an die festigkeitsmäßige, werkstofftechnische und konstruktive Auslegung der Rohrleitungssysteme aufzuteilen. Auf der Basis der verfügbaren Datenmenge ergeben sich jedoch in jedem Falle nur sehr kleine Zahlen, aus denen kaum noch signifikante Trends abgeleitet werden können. Daher erscheint es sinnvoller, die generischen Daten von deutschen Anlagen heranzuziehen und ggf. anlagenspezifische Besonderheiten zu bewerten.
- Die Datenbasis kann grundsätzlich um Daten aus der weltweiten Betriebserfahrung erweitert werden. Die aus diesen Daten generierten Leckhäufigkeiten sind jedoch aufgrund der unterschiedlichen konstruktiven, werkstoff- und systemtechnischen sowie betrieblichen Randbedingungen nicht direkt auf deutsche Anlagen übertragbar. Die weltweite Betriebserfahrung kann aber zur Überprüfung von Hy-

pothesen zum Einfluss von verschiedenen Parametern auf die Leckhäufigkeit herangezogen werden.

- Die aus der bisherigen Betriebserfahrung erkennbaren Trends haben keinen signifikanten Einfluss auf die Leckhäufigkeiten. Bei einem möglichen Langzeitbetrieb könnten jedoch z. B. Alterungseffekte, Optimierungen oder geänderte Betriebsweisen wie Lastfolgebetrieb einen Einfluss auf die Leckhäufigkeiten haben. Daher sollte die Auswertung der Betriebserfahrung zur Ermittlung der Leckhäufigkeiten in einem angemessenen Zeitraum von ca. 5 Jahren fortgeschrieben werden.

5 Strukturzuverlässigkeitsmodelle für Behälter

Zur Bearbeitung dieses Unterpunkts wurde zunächst eine Abfrage der KomPass-Datenbank nach Ereignissen mit Rissen, Lecks oder Brüchen bei Behältern durchgeführt. Im betrachteten Zeitraum (bis einschließlich 2006) wurden 102 Ereignisse gefunden, wovon acht Fälle Speisewasserbehälter betreffen.

Zur Anwendung für Berechnungen mit PROST wurde einer dieser Speisewasserbehälterfälle ausgewählt. Im Folgenden werden Problemstellung, Rechenmodell und Ergebnis kurz beschrieben.

5.1 Problemstellung

An einem Speisewasserbehälter eines DWR aus einem höherfesten Feinkornbaustahl wurden nach kurzer Betriebszeit, d. h. 458 Tagen (11.000 h), mehrere Rissbefunde aufgrund des Schädigungsmechanismus Spannungsrisskorrosion festgestellt, die einen Austausch des Behälters nach sich zogen. Der Behälter ist 50 m lang und hat bei einem Durchmesser von 4 m eine Wanddicke von 17 mm. Die Risse waren bis zu 14 mm tief und mehrere hundert mm lang.

Der Behälter hat einen Betriebsdruck von 1 MPa und eine Auslegungstemperatur von 200 °C. Die Fließspannung des Werkstoffs StE 47 beträgt 560 MPa.

5.2 PROST-Berechnungen

Im Rahmen des Vorhabens RS1163 /GRE 10/ wurde PROST bezüglich Berücksichtigung des Schädigungsmechanismus Spannungsrisskorrosion für austenitische und ferritische Stähle erweitert. Dabei wurden vier Modelle implementiert, wobei im Rahmen der hier durchgeführten Analysen zum Speisewasserbehälter zwei Modelle eingesetzt wurden. Im Modell 1 kann eine konstante Risswachstumsgeschwindigkeit berücksichtigt werden, wobei der Wert normal verteilt sein kann. Im Modell 2 können Geschwindigkeiten abhängig von der Rissbeanspruchung in Form des Spannungsintensitätsfaktors K_I berücksichtigt werden mit dem funktionellen Zusammenhang:

$$\frac{da}{dt} = A \cdot K_I^m$$

Dabei ist K_I in $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ einzusetzen, und da/dt ergibt sich in mm/s .

Obwohl es sich hier um einen ferritischen Werkstoff handelt, wurden für den hier betrachteten Fall die beiden für Austenite vorgesehenen Modelle verwendet, da diese für die Beschreibung des Risswachstums nach entsprechender Anpassung geeignet sind.

Für die Anpassung der Modelle wurde aus der gefundenen Befundtiefe und der Betriebszeit die Risswachstumsgeschwindigkeit abgeschätzt. Nimmt man an, dass die Geschwindigkeit konstant ist (wie in Modell 1), dann erhält man in diesem Fall $da/dt = 3,1 \cdot 10^{-7} \text{ mm/s}$. Geht man von einer ähnlichen K-Abhängigkeit aus wie im Modell 2 für Austenite (Exponent $m = 3$), dann folgt für den Vorfaktor des Wachstumsgesetzes hier der Wert $A = 4 \cdot 10^{-11}$. Abb. 5.2-1 zeigt die angepassten Risswachstumsgeschwindigkeiten.

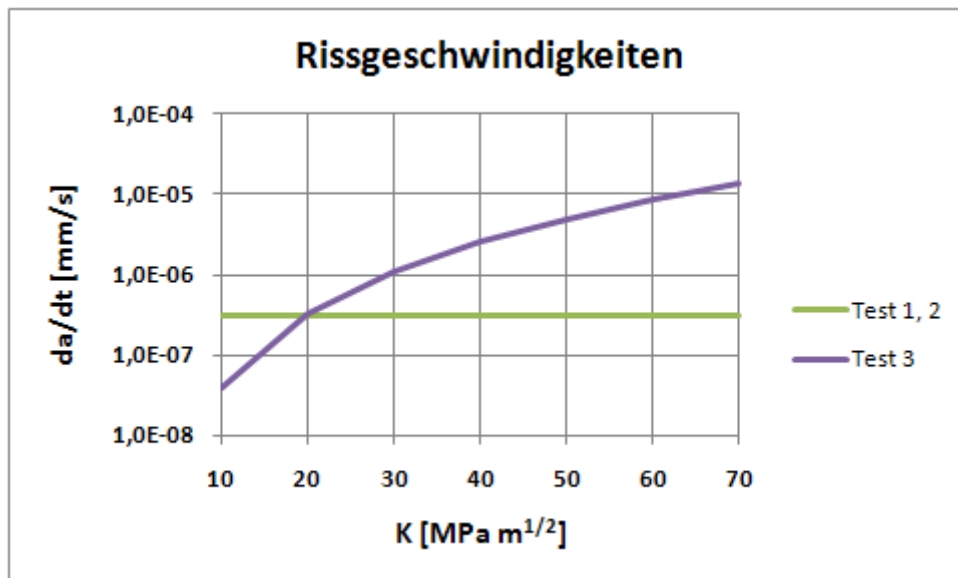


Abb. 5.2-1 Verwendete Risswachstumsgeschwindigkeiten für den Speisewasserbehälter

Die beiden Rechnungen Test 1 und Test 2 unterscheiden sich durch die Eingabe der Initiierungsrissstiefe. Bei Test 1 ist diese als Normalverteilung vorgegeben (Daten siehe

auch /GRE 10/; Mittelwert 1 mm, Standardabweichung 0,3 mm), bei Test 2 wird ein fester Wert verwendet (1 mm).

Bei dem Anwendungsfall Speisewasserbehälter wurde für den Mittelwert der Anfangsrisstiefe nach /KHA 99/ der Wert 1,8 mm bestimmt. Die Anfangsrislänge wurde abgeschätzt, indem angenommen wurde, dass das Wachstum in Längsrichtung genauso groß war wie das in Tiefenrichtung.

Tab. 5.2-1 Eingabedaten für die Testrechnungen zum Speisewasserbehälter (Anfangswerte, alle Abmessungen in mm)

Bezeichnung	Mittelwert der Risstiefe	Standardabweichung der Risstiefe	Mittelwert der Risslänge	Standardabweichung der Risslänge	Modellnummer	Initiierungsrisstiefe
Test 1	1,8	0,2	108,0	10,0	1	normalverteilt MW 1
Test 2	1,8	0,2	108,0	10,0	1	1
Test 3	1,8	0,2	108,0	10,0	2	normalverteilt MW 1

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorhabens RS1180 'Weiterentwicklung und Erprobung von Methoden und Werkzeugen für probabilistische Sicherheitsanalysen' wurden im Arbeitspaket AP 3.1 'Weiterentwicklung von Methoden zur Ermittlung von Leck- und Bruchhäufigkeiten druckführender Komponenten' folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Entwicklung und Erprobung einer Schnittstelle zwischen der Anwendung von statistischen Methoden basierend auf der Betriebserfahrung und von Strukturzuverlässigkeitsmodellen,
- Entwicklung und Erprobung von Ansätzen zur Berücksichtigung der Einflüsse von verschiedenen Schädigungsmechanismen, Prüfkonzepten und Lerneffekten,
- Entwicklung und Erprobung geeigneter Strukturzuverlässigkeitsmodelle für Behälter mit hohem Energieinhalt (Druckhalter, Speisewasserbehälter).

6.1 Arbeiten zur Schnittstellenentwicklung und -erprobung

Zunächst wurden verfügbare Untersuchungsergebnisse bzw. Analysemodelle aus abgeschlossenen Vorhaben im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit im Sinne der Zielsetzung überprüft. Für Rohrleitungen des Typs DN 50 des Volumenregelsystems von deutschen DWR-Anlagen sind aus statistischen Untersuchungen basierend auf der Betriebserfahrung entsprechende Ergebnisse verfügbar. Weiterhin wurden probabilistische Analysemethoden zur Berechnung von Leck- und Bruchwahrscheinlichkeiten in den Vorhaben RS1127 und RS1163 bereit gestellt und im Rahmen eines Anwendungsbeispiels thermomechanische Ermüdungsbelastung im Volumenregelsystem eines DWR, in dem es in einer Anlage zu einem Leckvorkommnis kam, erprobt. Dabei ergab sich, dass die bisher mit großen Kenntnisunsicherheiten getroffenen Annahmen zur Rissverteilung wesentlichen Einfluss auf die Berechnung der Leck- und Bruchwahrscheinlichkeiten haben. Daher wurde eine Auswertung der Betriebserfahrung im Hinblick auf Rissereignisse in deutschen DWR- und SWR-Anlagen auf Basis der GRS-Datenbank KomPass für Rohrleitungsschäden vorgenommen.

Darüber hinaus wurde die einschlägige Literatur ausgewertet. Ziel dieser Arbeit war die Ermittlung einer Anfangsrissverteilung für den Einsatz im GRS-Strukturzuverlässigkeitsprogramm PROST. Rissverteilungen abgeleitet aus der Betriebserfahrung, die Eingabeparameter für die Strukturzuverlässigkeitsmodelle zur Bestimmung von Leck-

und Bruchwahrscheinlichkeiten in druckführenden Komponenten sind, bilden die Schnittstelle zu der statistischen Methodik. Diese Vorgehensweise, die auf Datenbanken mit Ereignissen basiert, hat jedoch den Nachteil, dass man Rissgrößen zum Zeitpunkt des Auffindens ohne Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung dieser Risse benutzt.

Für die gefundenen Ereignisse aus der Datenbank KomPass wurde jeweils das mittlere Risstiefen- zu Wanddickenverhältnis bestimmt sowie das mittlere Verhältnis Risstiefe zu halber Risslänge ermittelt. Die Datenbank KomPass mit etwa 800 Ereignissen in Rohrleitungen enthält jedoch insgesamt nur 18 unmittelbar verwertbare Ereignisse mit Riss, wobei unterschiedliche Wanddicken, Werkstoffe und Nennweiten zusammengefasst sind.

Die Auswertung der Ereignisse aus der Betriebserfahrung in KomPass ergab einen mittleren a/t -Wert von 0,42 (mit einer Standardabweichung von 0,17) und ein mittleres a/c -Verhältnis von 0,35 (mit 0,26 als Standardabweichung).

Zur Erweiterung der Datenbasis für die Methodik zur Bestimmung von Risstiefenverteilungen basierend auf Auswertungen der Betriebserfahrung wurden auch Abfragen der OPDE Datenbank, die etwa 3700 Ereignisse aus 11 Ländern enthält, durchgeführt. Hierbei konnten 94 unmittelbar verwertbare Ereignisse zur a/t -Festlegung ermittelt werden.

Für das betrachtete Anwendungsbeispiel wurde eine Auswertung mit dem statistischen Verfahren mit aktuellen Daten aus KomPass und OPDE durchgeführt sowie PROST-Berechnungen mit den neu bestimmten Anfangsrissverteilungen vorgenommen. Weiterhin wurde ein Ansatz für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Riss an der untersuchten Stelle auftritt, aus der Literatur abgeleitet. Die mit PROST ermittelten Leck- bzw. Bruchwahrscheinlichkeiten multipliziert mit der Risswahrscheinlichkeit liegen jeweils über den Ergebnissen mit der statistischen Methode. Dies deutet daraufhin, dass die untersuchte Stelle bei der realistischen Nachbildung der Belastung in PROST höher beansprucht wird als es dem Mittel der bei der statistischen Methode betrachteten Fälle entspricht. Weitere PROST-Berechnungen für andere Positionen mit anderen Annahmen bezüglich der Belastung der Volumenausgleichsleitung würden dann auch Hinweise bezüglich der Aussagegenauigkeit der angesetzten Risswahrscheinlichkeit ermöglichen.

6.2 Arbeiten zur Entwicklung von Ansätzen zur Berücksichtigung verschiedener Einflüsse

Die Ergebnisse aus der deutschen Betriebserfahrung können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Anzahl der Leckereignisse an sicherheitstechnisch bedeutsamen Rohrleitungen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR ist insgesamt gering.
- Die schon in vorangegangenen Untersuchungen festgestellte Nennweitenabhängigkeit von Leckereignissen an sicherheitstechnisch bedeutsamen Rohrleitungen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR wurde bestätigt, d. h. von Leckereignissen waren vor allem Rohrleitungen mit kleineren Durchmessern betroffen.
- Die Leckereignisse wurden durch verschiedene Schädigungsmechanismen ausgelöst, von denen keiner über den gesamten Betrachtungszeitraum dominiert. Ein signifikanter, mechanismusspezifischer Trend bei der Anzahl der Leckereignisse war nur für den Mechanismus 'mechanische Ermüdung' zu erkennen. Interpretiert man diesen Trend als Lerneffekt und 'korrigiert' die Daten rückwirkend, um die daraus zu erwartenden Leckwahrscheinlichkeiten für die Zukunft zu prognostizieren, ergibt sich ein Korrekturfaktor nahe 1, der für probabilistische Analysen unbedeutend ist. Daher können Leckhäufigkeiten zum heutigen Zeitpunkt ohne Berücksichtigung solcher Effekte hinreichend genau bestimmt werden.
- Die Häufigkeit von Rohrleitungsleckagen an Schweißnahtbereichen sicherheitstechnisch bedeutsamer Rohrleitungen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR hat im Betrachtungszeitraum abgenommen. Dagegen haben Rohrleitungsleckagen, die im Grundwerkstoffbereich aufgetreten sind, insbesondere in Anlagen mit DWR an Bedeutung gewonnen. Dies gibt Anlass, die Kriterien für die Zählung 'leckrelevanter Stellen' innerhalb von Rohrleitungssystemen zu hinterfragen. Hierzu besteht weiterer Untersuchungsbedarf.

Bei der mit geringerem Detaillierungsgrad vorgenommenen Auswertung von Leckereignissen an sicherheitstechnisch bedeutsamen Rohrleitungen in US-amerikanischen Anlagen waren bei zwei Schädigungsmechanismen Trends erkennbar, die auf einen Lerneffekt schließen lassen. Ein Vergleich mit den Daten von deutschen Anlagen zeigt hier teilweise ähnliche Trends, jedoch führen Unterschiede, die konstruktiver, sys-

tem- oder werkstofftechnischer sowie betrieblicher Art sein können, auch zu deutlich anderen Entwicklungen.

6.3 Arbeiten zur Entwicklung von Strukturzuverlässigkeitsmodellen für Behälter

Eine Abfrage der KomPass-Datenbank nach Ereignissen mit Rissen, Lecks oder Brüchen bei Behältern ergab für den betrachteten Zeitraum bis einschließlich 2006 102 Ereignisse, wovon acht Fälle Speisewasserbehälter betreffen.

Zur Anwendung für Berechnungen mit PROST wurde einer dieser Speisewasserbehälterfälle, bei dem nach kurzer Betriebszeit (458 Tage) mehrere Rissbefunde mit Risstiefen bis zu 82 % der Wandstärke aufgrund des Schädigungsmechanismus Spannungsrisskorrosion festgestellt wurden, ausgewählt. Zur Festlegung der Risswachstumsgeschwindigkeit wurden hier zwei der in PROST verfügbaren Korrosionsmodelle bezüglich des Schadensbefunds angepasst. Nimmt man eine konstante Rissgeschwindigkeit von $da/dt = 3.1 \cdot 10^{-7}$ mm/s an, so ergeben die Berechnungen eine nahezu hundertprozentige Leckwahrscheinlichkeit nach etwa drei Jahren. Dagegen ist die Berechnung mit einem Modell, bei dem sich die Risswachstumsgeschwindigkeit abhängig von der Rissgröße bzw. der Rissbeanspruchung ändert, nicht zufriedenstellend, weil bei kleinen Risstiefen zu kleine Rissgeschwindigkeiten auftreten, die nicht die Befunde reproduzieren können. Eine verbesserte Anpassung dieses Korrosionsmodells müsste auf Basis von entsprechenden Laboruntersuchungen mit dem Werkstoff unter Mediumfluss durchgeführt werden.

6.4 Schlussfolgerungen

Mit den heute zur Verfügung stehenden Strukturzuverlässigkeitsprogrammen können prinzipiell für bestimmte Schadensmechanismen quantitativ Leck- und Bruchwahrscheinlichkeiten berechnet werden. Durch ihren Einsatz zur Bestimmung der ortsabhängigen Leckwahrscheinlichkeit können Teilbereiche einer Anlage im Hinblick auf ihre Versagensrelevanz unterschieden werden. Es lassen sich Trends bezüglich der Veränderung von Einflussparametern quantitativ bestimmen. Einschränkungen bezüglich der Einsatzfähigkeit im Rahmen von probabilistischen Sicherheitsanalysen werden insbesondere bezüglich der Aussagegenauigkeit absoluter Leck- bzw. Bruchwahrscheinlichkeiten gesehen, da die Ergebnisse teilweise stark von den Unsicherheiten für rele-

vante Eingabeparameter, wie Rissgeometrie oder erwartete Belastungen, sowie bestimmter Parameter zur Charakterisierung der Schadensmechanismen abhängen.

Insgesamt können die probabilistischen Strukturzuverlässigkeitsmodelle ein wertvolles Instrument zur Ergänzung der bisher im Rahmen der PSA eingesetzten Methodik zur Abschätzung von Leck- und Bruchhäufigkeiten basierend auf der Betriebserfahrung sein.

7 Literatur

- /ASM 02/ American Society of Mechanical Engineers (ASME)
Standard for Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant
Applications. The American Society of Mechanical Engineers, April 5, 2002
- /BMU 97/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Bekanntmachung der Leitfäden zur Durchführung von Periodischen
Sicherheitsüberprüfungen (PSÜ) für Kernkraftwerke in der Bundesrepublik
Deutschland vom 18. August 1997 - Leitfaden Probabilistische Sicherheits-
analyse, Bundesanzeiger Nr. 232a vom 11. Dezember 1997
- /FAK 97/ Facharbeitskreis probabilistische Sicherheitsanalyse für
Kernkraftwerke (FAK)
Daten zur Quantifizierung von Ereignisablaufdiagrammen und
Fehlerbäumen, Bundesamt für Strahlenschutz, Fachbereich
Kerntechnische Sicherheit, BfS-KT-18/97, April 1997
- /FAK 05/ Facharbeitskreis (FAK) Probabilistische Sicherheitsanalyse für
Kernkraftwerke
Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke,
Stand: August 2005, BfS-SCHR-37/05, Wirtschaftsverlag NW / Verlag für
neue Wissenschaft GmbH, Salzgitter ISSN 0937-4469,
ISBN 3-86509-414-7, Oktober 2005
- /FAK 05a/ Facharbeitskreis (FAK) Probabilistische Sicherheitsanalyse für
Kernkraftwerke:
Daten zur Quantifizierung von Ereignisablaufdiagrammen und
Fehlerbäumen, Stand: August 2005, BfS-SCHR-38/05, Wirtschaftsverlag
NW / Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Salzgitter, ISSN 0937-4469,
ISBN 3-86509-415-5, Oktober 2005
- /GRE 01/ Grebner, H., M. Scheuerer, J. Sievers
Vertiefte Untersuchungen zu alterungsbedingten Schichtungsvorgängen –
Leckstörfall im Volumenregelsystem KWB-B, Technische Notiz, Gesell-
schaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln 2001

- /GRE 04/ Grebner, H., T. Schimpfke, J. Peschke, J. Sievers
Weiterentwicklung der strukturmechanischen Analysemethodik zur
Bestimmung der Strukturzuverlässigkeit passiver Komponenten, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3236, Köln
2004
- /GRE 08/ Grebner, H., J. Sievers
Aktualisierung und Ergänzung der Angaben zu Leckhäufigkeiten im
Methoden- und Datenband PSA, Fachliche Unterstützung des Facharbeits-
kreises Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, GRS-V-SR
2608 – 1/2008, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)
mbH,, Köln, 2008
- /GRE 10/ Grebner, H., Y. Wang, T. Schimpfke, J., Sievers
Weiterentwicklung der strukturmechanischen Analysemethodik zur
Bestimmung der Strukturzuverlässigkeit passiver Komponenten, Phase II,
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, , GRS-A-
3544, Köln, 2010
- /GRS 90/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B. Hrsg. Verlag TÜV-
Rheinland, Köln, ISBN-10: 3885858096, ISBN-13: 978-3885858096; 1990
- /HOE 03/ Höfler, A., S. Beliczey, H. Reck
Schätzung von Leckhäufigkeiten für sicherheitsrelevante Rohrleitungen der
SWR-Referenzanlage im Leistungsbetrieb, Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3206, Köln, November 2003
- /HOE 03b/ Höfler, A., S. Beliczey, H Schulz
Bereitstellung von Methoden zur Ermittlung von Leck- und
Bruchhäufigkeiten von Rohrleitungen sowie Anpassung an die
Gegebenheiten der von Kernkraftwerken mit DWR der 2. Generation, Ab-
schlussbericht zum VGB-Projekt SA „AT“ 14/01, Gesellschaft für
Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juli 2003

- /KHA 99/ Khaleel, M. A., O. J. V. Chapman, D. O. Harris, F. A. Simonen
Flaw size distribution and flaw existence frequencies in nuclear piping,
PVP-Vol. 386, ASME, 1999
- /LYD 08/ Lydell, B., J. Riznic
OPDE - The international pipe failure data exchange project, Nuclear
Engineering and Design 238 (2008), 2115-2123, 2008
- /MIC 03/ Michel, F., H. Reck, H. Schulz
Entwicklung qualifizierter Werkzeuge zur anlagenübergreifenden
Bewertung des Alterungsmanagements passiver maschinentechnischer
Einrichtungen in Kernkraftwerken. 29. MPA-Seminar, Stuttgart, 9. und 10.
Oktober, 2003
- /REC 06/ Reck, H., H. Schulz
Internationale Betriebserfahrung mit Rohrleitungen in Kernkraftwerken:
Fortschritt des OECD Pipe Failure Data Exchange (OPDE) Datenbank
Projektes. 32. MPA-Seminar, Stuttgart, 5. und 6. Oktober, 2006

8 Anhang

Tab. A-1 Reaktorjahre deutscher SWR und DWR

Jahr	KWW	KKB	KKI-1	KKP-1	KKK	KRB-II-B	KRB-II-C	KWO	KKS	KWB-A	KWB-B	GKN-1	KKU	KKG	KWG	KKP-2	KMK	KBR	KKE	KKI-2	GKN-2	Anzahl SWR	Anzahl DWR	Σ SWR-Reaktorjahre	Σ DWR-Reaktorjahre	
1968								0														0	1	0	0	
1969								1															0	1	0	1
1969								2															0	1	0	2
1971								3															0	1	0	3
1972	0							4	0														1	2	0	4
1973	1							5	1														1	2	1	6
1974	2							6	2	0													1	3	2	8
1975	3							7	3	1													1	3	3	11
1976	4	0						8	4	2	0	0											2	5	4	14
1977	5	1						9	5	3	1	1											2	5	6	19
1978	6	2	0					10	6	4	2	2	0										3	6	8	24
1979	7	3	1	0				11	7	5	3	3	1										4	6	11	30
1980	8	4	2	1				12	8	6	4	4	2										4	6	15	36
1981	9	5	3	2				13	9	7	5	5	3										4	6	19	42
1982	10	6	4	3				14	10	8	6	6	4	0									4	7	23	48
1983	11	7	5	4				15	11	9	7	7	5	1									4	7	27	55
1984	12	8	6	5	0	0		16	12	10	8	8	6	2	0								6	8	31	62
1985	13	9	7	6	1	1	0	17	13	11	9	9	7	3	1	0							7	9	37	70
1986	14	10	8	7	2	2	1	18	14	12	10	10	8	4	2	1	0						7	10	44	79
1987	15	11	9	8	3	3	2	19	15	13	11	11	9	5	3	2	1	0					7	11	51	89

Jahr	KWVW	KKB	KKI-1	KKP-1	KKK	KRB-II-B	KRB-II-C	KWO	KKS	KWB-A	KWB-B	GKN-1	KKU	KKG	KWG	KKP-2	KMK	KBR	KKE	KKI-2	GKN-2	Anzahl SWR	Anzahl DWR	Σ SWR-Reaktorjahre	Σ DWR-Reaktorjahre
1988	16	12	10	9	4	4	3	20	16	14	12	12	10	6	4	3	2	1	0	0		7	13	58	100
1989	17	13	11	10	5	5	4	21	17	15	13	13	11	7	5	4	3	2	1	1	0	7	14	65	113
1990	18	14	12	11	6	6	5	22	18	16	14	14	12	8	6	5	4	3	2	2	1	7	14	72	127
1991	19	15	13	12	7	7	6	23	19	17	15	15	13	9	7	6	5	4	3	3	2	7	14	79	141
1992	20	16	14	13	8	8	7	24	20	18	16	16	14	10	8	7	6	5	4	4	3	7	14	86	155
1993	21	17	15	14	9	9	8	25	21	19	17	17	15	11	9	8	7	6	5	5	4	7	14	93	169
1994	22	18	16	15	10	10	9	26	22	20	18	18	16	12	10	9	8	7	6	6	5	7	14	100	183
1995	23	19	17	16	11	11	10	27	23	21	19	19	17	13	11	10	9	8	7	7	6	7	14	107	197
1996		20	18	17	12	12	11	28	24	22	20	20	18	14	12	11	10	9	8	8	7	6	14	113	211
1997		21	19	18	13	13	12	29	25	23	21	21	19	15	13	12	11	10	9	9	8	6	14	119	225
1998		22	20	19	14	14	13	30	26	24	22	22	20	16	14	13	12	11	10	10	9	6	14	125	239
1999		23	21	20	15	15	14	31	27	25	23	23	21	17	15	14	13	12	11	11	10	6	14	131	253
2000		24	22	21	16	16	15	32	28	26	24	24	22	18	16	15	14	13	12	12	11	6	14	137	267
2001		25	23	22	17	17	16	33	29	27	25	25	23	19	17	16		14	13	13	12	6	13	143	280
2002		26	24	23	18	18	17	34	30	28	26	26	24	20	18	17		15	14	14	13	6	13	149	293
2003		27	25	24	19	19	18	35	31	29	27	27	25	21	19	18		16	15	15	14	6	13	155	306
2004		28	26	25	20	20	19	36		30	28	28	26	22	20	19		17	16	16	15	6	12	161	318
2005		29	27	26	21	21	20	37		31	29	29	27	23	21	20		18	17	17	16	6	12	167	330
2006		30	28	27	22	22	21			32	30	30	28	24	22	21		19	18	18	17	6	11	173	341
2007		31	29	28	23	23	22			33	31	31	29	25	23	22		20	19	19	18	6	11	179	352
2008		32	30	29	24	24	23			34	32	32	30	26	24	23		21	20	20	19	6	11	185	363

9 Verteiler

		Exemplare: gedruckte Form	Exemplare: pdf
BMWi			
Referat III B 4		1 x	
GRS-PT/B			
Internationale Verteilung	(FIZ)	40 x	
Projektbegleiter	(stu)	3 x	1 x
GRS			
Bereichsleiter	(erv, paa, prg, rot, stc, ver, zir)		je 1 x
Abteilungsleiter	(som, wil)		je 1 x
Projektleiter	(row)	1 x	1 x
Projektbetreuung	(wal, ham)		1 x
Informationsverarbeitung	(nit)		1 x
Autoren	(grb, jed, mif, rec, say, siv, wen)	je 1 x	
Bibliothek	(Köln)	1 x	
Gesamtauflage:		Exemplare	53

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de