



RESSORTFORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Zentrale Untersuchungen und Auswertung zu ak- tuellen Fragestellungen im Hinblick auf druck- führende Anlagenteile von Kernkraftwerken im Leistungsbetrieb – Los 1: Regelwerks- und Ad-hoc-Themen

Arbeitspaket 3 – Prüfmöglichkeiten von
Rohrleitungen für die Nachwärmeabfuhr

Vorhaben 4717Ro1370

AUFTRAGNEHMER:IN
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Stuttgart

Anne Jüngert



Zentrale Untersuchungen und Auswertung zu aktuellen Fragestellungen im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken im Leistungsbetrieb

– Los 1: Regelwerks- und Ad-hoc-Themen

Arbeitspaket 3 – Prüfmöglichkeiten von Rohrleitungen für die Nachwärmeabfuhr

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung im Rahmen der Ressortforschung des BMU (ReFoPlan) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autor:innen. Das BASE übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der Auftragnehmer:innen wieder und muss nicht mit der des BASE übereinstimmen.

BASE-RESFOR-016/21

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2021110329440

Berlin, November 2021

Impressum

**Bundesamt
für die Sicherheit
der nuklearen Entsorgung
(BASE)**

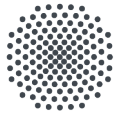
RESSORTFORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Auftragnehmer:in
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Stuttgart

Anne Jüngert

030 184321-0
www.base.bund.de

Erscheinungsdatum: November 2021



Universität Stuttgart



Materialprüfungsanstalt
Universität Stuttgart

Abschlussbericht Final Report

FKZ 4717R01370

Vorhaben

**Zentrale Untersuchungen und Auswertung zu aktuellen
Fragestellungen im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von
Kernkraftwerken im Leistungsbetrieb**

AP3

Prüfmöglichkeiten von Rohrleitungen für die Nachwärmeabfuhr

BEAUFTRAGT VOM



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

30.09.2020

Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

Hinweis:

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) mit dem Förderkennzeichen 4717R01370 gefördert. Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung der Auftraggeberin übereinstimmen. Die Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart und die Autoren übernehmen keine Haftung für Schäden, die aufgrund von weiterführenden oder fehlerhaften Anwendungen der in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse auftreten.

Abschlussbericht Final Report

FKZ 4717R01370

Vorhaben

**Zentrale Untersuchungen und Auswertung zu aktuellen
Fragestellungen im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von
Kernkraftwerken im Leistungsbetrieb**

AP3

Prüfmöglichkeiten von Rohrleitungen für die Nachwärmeabfuhr

Autoren / Authors: Dr.-Ing. Anne Jüngert

BEAUFTRAGT VOM



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

Dienststelle / Performing Organization: Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart
Berichtsdatum / Publication Date: September 2020
MPA Berichts-Nr. / MPA Report-No.: 8483 000 003

Inhalt

	Seite
1 Einleitende Bemerkungen	9
1.1 Ausgangssituation	9
1.2 Zielsetzung	9
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	9
2 Projektdurchführung	11
2.1 Aufarbeitung des aktuellen Kenntnisstandes	11
2.1.1 Kernkraftwerke in Deutschland	11
2.1.2 Nachwärmeabfuhrsysteme deutscher Kernkraftwerke	11
2.1.3 Komponenten des Nachwärmeabfuhrsystems	12
2.1.4 Werkstoffe und Fehlstellen	13
2.2 Prüfvorschriften und Prüfmöglichkeiten	14
2.2.1 Prüfvorschriften	14
2.2.2 Prüfmöglichkeiten	18
2.2.2.1 Prüfmöglichkeiten für Stahlrohrleitungen	18
2.2.2.2 Prüfmöglichkeiten für Spezialfälle wie erdverlegte Rohrleitungen und Spannbetonrohre	21
2.3 Analyse und Bewertung ausgewählter, repräsentativer Rohrleitungssysteme	24
2.3.1 GKN2	24
2.3.2 KKP 2	26
2.4 Vergleichende Bewertung	27
2.4.1 Vergleich der Prüfungen in GKN2 und KKP2 mit dem KTA-Regelwerk	27
2.4.2 Bewertung der Erdbebensicherheit aus den EU-Stresstests	28
3 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	33

Kurzfassung

Das Gesamtziel des Vorhabens ist die Beleuchtung von wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen, die in deutschen Kernkraftwerken an den Rohrleitungssystemen der Zwischenkühl- und Nebenkühlwassersysteme durchgeführt werden. Diese Rohrleitungssysteme wurden nicht entsprechend des KTA-Regelwerks ausgelegt und hergestellt. Die wiederkehrenden Prüfungen werden entsprechend KTA-Regel 3211.4 anlagenspezifisch festgelegt und durchgeführt.

Im Vorhaben wurde im ersten Schritt der Kenntnisstand für die betreffenden Rohrleitungen aufgearbeitet. Hier wurden die verwendeten Werkstoffe und die Schädigungsmechanismen betrachtet. Als häufigste Schadensursache sind Korrosionsschäden in ferritischen Werkstoffen genannt. Die Informationen hierzu stammen aus der Literatur und aus Aussagen der Anlagenbetreiber.

Im nächsten Schritt wurden geeignete Prüfmöglichkeiten für Rohrleitungssysteme für die vorliegenden Schädigungsmechanismen aufgezeigt. Außerdem wurden Prüfkonzpte aus ähnlichen Bereichen, wie der Pipelineprüfung und der Prüfung von Abwasserkanälen dargestellt.

Für ausgewählte Anlagen wurden Informationen zu den Prüfumfängen und Prüfintervallen der Rohrleitungssysteme zur Verfügung gestellt und ausgewertet. Für die betrachteten Anlagen entsprechen die Prüfumfänge und Prüfintervalle im Wesentlichen dem KTA-Regelwerk und gehen in einigen Punkten sogar darüber hinaus. Außerdem wurden spezifische Lösungen für spezielle Prüfprobleme, wie z.B. Stutzenkanten in Kleinrohrleitungen, genannt.

Die Betrachtung der Prüfumfänge und Prüfintervalle im Hinblick auf die Erdbebenlasten ergab, dass aufgrund der großen Reserven, die die Rohrleitungssysteme für Erdbebenlasten aufweisen, keine Anpassung der Prüfumfänge und Prüfintervalle notwendig ist. Durch die durchgeführten Prüfungen ist der einwandfreie Zustand der Rohrleitungssysteme ausreichend gewährleistet.

In einer Stellungnahme der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) vom 11.12.2019 wurden die Rohrleitungssysteme der Zwischenkühl- und Nebenkühlwassersysteme ebenfalls betrachtet [1]. Hier sind genauere Bewertungen der Sicherheitsreserven im Hinblick auf Erdbebenlasten zu finden. Die RSK kommt ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die Prüfumfänge und Prüfintervalle der tatsächlich in deutschen Kernkraftwerken durchgeführten wiederkehrenden Prüfungen keine Anpassung benötigen. Es wird empfohlen, die Systeme künftig in die KTA-Regel 3211.4 miteinzuschließen.

Abstract

The overall objective of the project is to take a closer look to regular nondestructive inspections of piping systems belonging to the residual heat removal of German nuclear power plants. The German nuclear safety standards (KTA) do not apply to the service water piping systems and therefore nondestructive inspections are planned and performed specifically for each nuclear power plant.

The first part of the project deals with the state of knowledge. A literature review was carried out and information was gathered from plant operators. The most common materials of the service water piping systems are ferritic steels and the main damage mechanism is corrosion.

The next chapter presents different nondestructive testing techniques that are able to detect corrosion damages in steel piping. Some techniques from oil and gas pipeline inspection and from sewer inspections were discussed as well.

In the following plant operators provided information about their regular inspections of the service water piping system. Within the project, we compared these inspections with the standards and the state of the art presented in the previous chapters. The inspections are mainly done in accordance with the valid standards. For some parts there are additional solutions for certain components.

In case of earthquakes the applied inspections and the inspection intervals are sufficient, as the safety margins of the piping system are designed for higher earthquake intensities, which was already discussed in the results from the EU stress tests 2011. The applied inspections guarantee the proper condition sufficiently, that a failure in the piping system is unlikely.

The German Reactor Safety Commission (RSK) also published a statement on the same topic in December 2019 [1]. The safety margins for earthquake loads and the specific materials of the service water piping system are discussed in this statement. The RSK concludes that the applied inspections and inspection intervals are sufficient and do not need to be adapted. The RSK recommends to include these piping systems in the KTA rule 3211.4.

Abkürzungen

ACCA	Alternating current coating attenuation survey
ASME	American Society of Mechanical Engineers
DWR	Druckwasserreaktor
EMS	Europäische makroseismische Skala
EVA	Einwirkungen von außen
GGG	Duktiles Gusseisen
GKN	Gemeinschaftskernkraftwerk Neckarwestheim
GPR	Geo-Radar (ground penetrating radar)
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit GmbH
IAEA	International Atomic Energy Agency
KBR	Kernkraftwerk Brokdorf
KKE	Kernkraftwerk Emsland
KKI	Kernkraftwerk Isar
KKP	Kernkraftwerk Philippsburg
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
KRB	Kernkraftwerk Gundremmingen
KWG	Kernkraftwerk Grohnde
MTM	Magnetische Tomographie
NWA	Nachwärmeabfuhr
PGA	Bodenbeschleunigung (peak ground acceleration)
RSK	Reaktor-Sicherheitskommission
RT	Durchstrahlungsprüfung (radiographic testing)
SWR	Siedewasserreaktor
WKP	Wiederkehrende Prüfung
W&T	Wissenschaft und Technik
UT	Ultraschallprüfung (ultrasonic testing)
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung
ZUNA	Zusätzliche Nachwärmeabfuhr- und Einspeisesystem KRB

1 Einleitende Bemerkungen

1.1 Ausgangssituation

Bei den Reaktorunfällen im japanischen Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi kam es zum Ausfall der Nachwärmeabfuhr (NWA). Deshalb rückten die Nachwärmeabfuhrsysteme deutscher Kernkraftwerke in den Untersuchungsfokus. Diese Rohrleitungssysteme sind entsprechend verschiedener Rohrleitungsspezifikationen ausgelegt, die nur eingeschränkt dem Basissicherheitskonzept und dem Regelwerk des kerntechnischen Ausschusses (KTA) entsprechen. Die Unterschiede in den Auslegungen sind bereits von der MPA untersucht [2] und von der RSK in einer Stellungnahme [1] diskutiert worden.

Für die wiederkehrenden Prüfungen (WKP) dieser Rohrleitungssysteme liefert das KTA-Regelwerk keine Vorschriften. Die Prüfungen und Vorschriften werden gemäß KTA-Regelwerk anlagenspezifisch geregelt.

Zeitgleich mit der MPA Universität Stuttgart wurden die Fragestellungen ebenfalls in der RSK diskutiert und im Dezember 2019 eine Stellungnahme hierzu veröffentlicht. Die Ergebnisse der RSK decken sich weitgehend mit den im Vorhaben erarbeiteten. Der Fokus liegt im Folgenden darauf, das Thema aus dem Blickwinkel der zerstörungsfreien Prüfung zu beleuchten.

1.2 Zielsetzung

Das Gesamtziel des Vorhabens ist die Bewertung der wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen, die in deutschen Kernkraftwerken am Zwischenkühl- und Nebenkühlwassersystem durchgeführt werden. Hierfür werden Regelwerke, Spezifikationen und Informationen von Betreibern der Kernkraftwerke verwendet und die Ergebnisse in einem Bericht zusammengestellt. Außerdem wird dargestellt, welche Prüfverfahren zielführend und sinnvoll sind. Zusätzlich wird betrachtet, wie ähnliche Fragestellungen in anderen Industriezweigen behandelt werden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Arbeitspaket AP 3 des Vorhabens gliedert sich wie folgt in vier Arbeitspunkte

AP 3.1 Aufarbeiten des Kenntnisstands

Im ersten Schritt erfolgt die Aufarbeitung des Kenntnisstands anhand von Herstellerspezifikationen und aktueller Regelwerke. Hierbei müssen anlagenspezifische Ausführungen der Nachkühlkette berücksichtigt werden, sofern die erforderlichen Unterlagen vorliegen. Bezüglich der erforderlichen anlagenspezifischen Informationen über verwendete Werkstoffe,

Verbindungsformen und Bauausführung dieser Rohrleitungssysteme werden Anlagenbetreiber und Hersteller kontaktiert. Die betreffenden Rohrleitungssysteme liegen innerhalb der einzelnen Kraftwerke in großer Vielfalt bezüglich der Werkstoffe, Wandstärken und Rohrgeometrien vor. Dazu kommen konstruktive Unterschiede zwischen den einzelnen Kraftwerken.

AP 3.2 Prüfmöglichkeiten und Prüfvorschriften

Im nächsten Schritt wird zusammengestellt, welche Prüfvorschriften für die Rohrleitungen der Nachkühlkette vorliegen und welche Prüfungen vor und während des Betriebs in den Kraftwerken tatsächlich stattgefunden haben. Zusätzlich zur großen Varianz in den Konstruktionen, können Zugänglichkeit und Prüfbarkeit der Rohrleitungen stark eingeschränkt sein, wenn Rohrleitungen erdverlegt sind oder Beschichtungen aufgebracht sind. Dadurch entsteht eine große Bandbreite an Prüfproblemen, die eine große Anzahl unterschiedlicher Prüfvorschriften für unterschiedliche Rohrleitungsabschnitte mit sich bringt. Einige Prüfprobleme sind zudem voraussichtlich noch nicht in geeigneten Prüfvorschriften erfasst.

Zur Bewertung der vorhandenen Prüfvorschriften im Hinblick auf den aktuellen Stand der Technik, werden Prüfvorschriften aus anderen Bereichen kerntechnischer Anlagen und der aktuellen Reaktorsicherheitsforschung sowie aus Industriezweigen mit ähnlichen Prüfaufgaben und Werkstoffen (z.B. erdverlegte Fernwärmeleitungen, Rohrleitungsprüfung in der chemischen Industrie) zur Rate gezogen.

AP 3.3 Analyse und Bewertung ausgewählter, repräsentativer Rohrleitungssystem

Aus den vorhandenen Daten von DWR- und SWR-Anlagen werden repräsentative Anlagen ausgewählt, für die die entsprechend notwendigen Unterlagen vorliegen. Auslegung, Herstellung und Prüfung dieser Rohrleitungssysteme werden im Hinblick auf eventuell auftretende Erdbebenereignisse detailliert ausgewertet und bewertet. Die zu erwartenden Auswirkungen seismischer Ereignissen werden für Deutschland bisher eher gering eingeschätzt. Allerdings muss sichergestellt sein, dass die Systeme der Nachkühlkette im Falle eines Erdbebens zuverlässig funktionieren. Deshalb wird in diesem AP insbesondere bewertet inwiefern die anlagenspezifischen Anforderungen an die Auslegung, Prüfvorschriften und Prüfintervalle den Anforderungen nach aktuellem Stand von W&T gerecht werden.

AP 3.4 Zusammenfassende Bewertung und Berichterstellung

Im Rahmen von AP 3.4 werden alle während der Projektlaufzeit ermittelten Informationen zusammengestellt, einer abschließenden Bewertung unterzogen und in Berichtsform detailliert dokumentiert.

2 Projektdurchführung

2.1 Aufarbeitung des aktuellen Kenntnisstandes

Kernkraftwerke in Deutschland

In Deutschland sind aktuell noch fünf Kernkraftwerke in Betrieb (siehe Tabelle 1), die bis spätestens Ende 2022 in den Nachbetrieb überführt werden [3]. Das Kernkraftwerk Philippsburg 2 (KKP2) ging Ende 2019 vom Netz und befand sich zu Projektbeginn noch im Leistungsbetrieb.

Tabelle 1: Übersicht über laufende Kernkraftwerke in Deutschland

Name	Reaktortyp	Betreiber	Bauweise	Laufzeit bis
Brokdorf (KBR)	DWR	PreussenElektra	Vorkonvoi	Ende 2021
Grohnde (KWG)	DWR	PreussenElektra	Vorkonvoi	Ende 2021
Gundremmingen C (KRB)	SWR	RWE	SWR 72	Ende 2021
Emsland (KKE)	DWR	RWE	Konvoi	Ende 2022
Neckarwestheim 2 (GKN)	DWR	EnBW	Konvoi	Ende 2022
Isar 2 (KKI)	DWR	PreussenElektra	Konvoi	Ende 2022

Die Kernkraftwerke Gundremmingen B (SWR 72), Brunsbüttel (SWR 69), Krümmel (SWR 69) und Philippsburg 2 (Vorkonvoi) befinden sich im Nachbetrieb. Die restlichen Kernkraftwerke sind bereits stillgelegt [4]. Die noch laufenden Kernkraftwerke sind fast ausschließlich Druckwasserreaktoren (DWR) des Bautyps Konvoi oder Vorkonvoi, die nach den Grundsätzen der Basissicherheit [5] für Kernkraftwerke ausgelegt und hergestellt wurden. Gundremmingen ist der einzige Standort, an dem noch ein Siedewasserreaktor betrieben wird.

Nachwärmeabfuhrsysteme deutscher Kernkraftwerke

Die Aufgabe der Kühlsysteme in Kernkraftwerken ist es, die Kühlung der Brennelemente in allen Betriebszuständen des Kernkraftwerks zu gewährleisten.

Das Nachwärmeabfuhrsystem (NWA) gehört somit zu den sicherheitstechnisch relevanten Systemen. Die Aufgabe der NWA ist die Wärmeabfuhr in den folgenden Fällen:

Bestimmungsgemäßer Betrieb: Wärmeabfuhr, wenn die Wärmeabfuhr zur Hauptsenke unterbrochen ist oder bei Flut- und Ablassvorgängen bei der Brennelementehandhabung

Störfall: Wärmeabfuhr aus Reaktorkern, Kondensationskammer/sekundäre Wärmeabfuhr, Wärmeabfuhr aus dem Sicherheitsbehälter

Einwirkungen von außen (EVA) und Notstandsfälle: mindestens zehn Stunden die Wärme aus den bereits genannten Bereichen abführen

Zu einer Schnellabschaltung des Reaktors kommt es, wenn z.B. wenn der Hauptkühlkreislauf durch eine Leckage, unterbrochen ist. In dem Fall werden die Steuerstäbe automatisch in den Reaktorkern eingebracht. Dadurch sinkt die produzierte Wärme innerhalb von 10 Sekunden auf 5% der im Betrieb erzeugten Wärme und entspricht der Wärme, die im Nachzerfall entsteht. Die Nachwärmeabfuhr beginnt sofort, indem die Wärme über den Zwischenkühlkreis an das Nebenkühlwassersystem abgegeben wird.

Komponenten des Nachwärmeabfuhrsystems

Das NWA beinhaltet alle Systeme, die die Wärme nach Reaktorabschaltung aus dem Reaktorkühlmittel und aus dem Sicherheitsbehälter in die Wärmesenke abführen, wenn die betriebliche Hauptwärmesenke nicht genutzt werden kann. Nicht beinhaltet sind Systeme, die die Nachwärme aus dem Brennelementelagerbecken abführen. Die Komponenten der NWA sind überwiegend den äußeren Systemen zugeordnet. Einige Komponenten gehören außerdem zur druckführenden Umschließung.

Das NWA wird oft gemeinsam mit dem Notkühlsystem genannt, da es im Notkühlfall ebenfalls die Aufgabe der Wärmeabfuhr leistet. Das Notkühlsystem beinhaltet die Noteinspeisung, die an die Hauptkühlmittelleitung anschließt und im Sicherheitsbehälter untergebracht ist. Die Komponenten des Notkühlsystems sind nicht Teil der Betrachtung, da die Auslegung und die wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen vollständig dem Basissicherheitskonzept entsprechen und über das KTA-Regelwerk geregelt sind.

Die Zwischenkühlkreise und Nebenkühlwassersysteme dagegen sind in jedem Kernkraftwerk anlagenspezifisch gestaltet, lassen sich aber bezüglich ihrer Werkstoffe und Prüfmöglichkeiten gut miteinander vergleichen.

In den Konvoi-Anlagen wird die nukleare Nachwärmeabfuhr mit JN bezeichnet, der Zwischenkühlkreis mit KAA und das Nebenkühlwassersystem mit PE. Für Vorkonvoi-Anlagen und Siedewasserreaktoren der Baureihe SWR sind die Bezeichnungen für das Nachwärmeabfuhrsystem TH, den Zwischenkühlkreis TF und das nukleare Nebenkühlwassersystem VE. Die nukleare Nachwärmeabfuhr (JN/TH) gibt über einen Zwischenkühlkreis (KAA/VK) die Wärme an das Nebenkühlwassersystem (PE/VE) ab. Die Auslegung und die wiederkehrenden Prüfungen der Systeme JN/TH sind bereits in den KTA-Regeln 3211.1 bis 3211.4 [6–9] für druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises geregelt und sind nicht Teil dieser Betrachtung.

Das Auslegung der Zwischenkühlsysteme und Nebenkühlwassersysteme erfolgte jedoch nicht entsprechend der Basissicherheit und der KTA 3211. Die Unterschiede in den jeweiligen Auslegungen und Rohrleitungsspezifikationen für diese Rohrleitungssysteme wurden durch die MPA im Auftrag der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) bereits betrachtet und in einem Bericht zusammengefasst [2].

Werkstoffe und Fehlstellen

Die Rohrleitungssysteme des Zwischen- und Nebenkühlkreises bestehen hauptsächlich aus ferritischen Rohrleitungen [10]. Im Nebenwasserkühlkreis kommen außerdem teilweise erdverlegte Rohrleitungen aus duktilem Gusseisen (GGG) und Spannbetonrohre zum Einsatz. Erdverlegte Rohrleitungen dürfen ihre Integrität durch Korrosion oder setzungsbedingten Belastungen nicht verlieren und ihre Lage muss dokumentiert sein [11].

Zum Schutz gegen Korrosion werden Stahlrohrleitungen innen mit unterschiedlichen Beschichtungen versehen. Hier sind Epoxidharz-Beschichtungen, Gummierungen oder Zementmörtelauskleidungen üblich [10]. Diese Beschichtungen erschweren üblicherweise an Stahl eingesetzte zerstörungsfreie Prüfungen. Von außen sind die Rohrleitungen ebenfalls über Schutzanstriche gegen Korrosion geschützt. Bei erdverlegten Rohrleitungen kommt häufig Bitumen oder Mörtel als Korrosionsschutz zum Einsatz.

In einem GRS Bericht [10] sind die Komponenten des Nebenkühlwassersystem beschrieben und die Schadensfälle der Jahre 1997-2009, die das Nebenkühlwassersystem betreffen, ausgewertet worden. Alle meldepflichtigen Schadensfälle in deutschen kerntechnischen Anlagen werden von der GRS in einer internen Datenbank dokumentiert, was eine systematische Auswertung ermöglicht. Meldepflichtige Ereignisse der druckführenden Komponenten sind außerdem in der GRS-Datenbank KOMPASS erfasst.

Die Auswertung der Daten der Schadensfälle an den Rohrleitungssystemen der Nebenkühlwassersysteme hat ergeben, dass die häufigste Schadensursache Korrosion ist. Die Korrosion tritt bei allen Rohrdurchmessern gleichermaßen auf und betrifft demnach auch sicherheitstechnisch relevante Rohrleitungen. Häufig ist die Korrosion eine Folge vorangegangener Beschädigung der Korrosionsschutzschicht durch mechanische Einwirkungen oder durch Fehler in der Herstellung. Die Korrosion führte in der Regel zu einer lokalen Wanddickenminderung und in einigen Fällen zu Leckagen. Die Schädigungen wurden bei regelmäßigen Anlagenbegehungen und bei WKP (Druckprüfungen, Wanddickenmessungen) rechtzeitig detektiert.

2.2 Prüfvorschriften und Prüfmöglichkeiten

Prüfvorschriften

Vorgaben der Sicherheitsanforderungen für Kernkraftwerke

Die Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke [12] haben zum Ziel, Mensch und Umwelt vor den schädlichen Auswirkungen ionisierender Strahlung zu schützen und zwar während der Planung, der Errichtung und des Betriebs kerntechnischer Anlagen. Die Komponenten der NWA gehören überwiegend zu den äußeren Systemen eines Kernkraftwerks und sind grundsätzlich in den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke [12] in Abschnitt 3.4 erfasst.

Die in Abschnitt 3.4 der Sicherheitsanforderungen definierten Anforderungen für drucktragende Komponenten beinhalten neben der Auswahl hochwertiger Werkstoffe und konservativer Begrenzung von Spannungen auch die Verwendung optimierter Herstellungs- und Prüftechnologien. Wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfungen bilden einen Teil dieser Prüfungen.

In der Interpretation zu den Sicherheitsanforderungen [11] werden die durchzuführenden Prüfungen genauer beschrieben. Die Konstruktion der drucktragenden Komponenten muss ausreichend Möglichkeiten für die Durchführung zerstörungsfreier Prüfungen (ZfP) bieten (Abschnitt 2.3.3 in [11]). Die zerstörungsfreie Herstellungsprüfung findet nach der letzten Wärmebehandlung statt. Die Registriergrenzen der verwendeten Verfahren sind so zu wählen, dass alle der Auslegung entsprechend sicherheitstechnisch relevanten Fehlstellen erfasst werden. Im Anschluss an die Druckprüfung nach Herstellung ist die ZfP zu wiederholen (Abschnitt 2.4 in [11]).

Die WKP umfassen neben der ZfP noch Druck- und Dichtheitsprüfungen. Die ZfP soll an im Hinblick auf Belastung und möglichen Schädigungsmechanismen repräsentativen Stellen durchgeführt werden. Zusätzlich werden Prüfungen an zufällig ausgewählten Stellen, an Stellen hoher Beanspruchung und an aus früheren Prüfungen bekannten auffälligen Bereichen durchgeführt. Werden Fehlstellen gefunden und belassen, wird deren Entwicklung in regelmäßigen Abständen verfolgt. Die jeweiligen Prüfintervalle werden aufgrund von Erfahrungswerten für die jeweilige Anlage festgelegt.

Die verwendete Prüftechnik muss in der Lage sein, Fehlstellen zu finden und deren Orientierung im Bezug zur Komponente darzustellen. Für jedes Prüfverfahren werden unterschiedliche Bewertungsgrenzen definiert. Mechanisierten Prüfverfahren sind aufgrund der Reproduzierbarkeit und der Reduzierung der Strahlungsexposition von Personen zu bevorzugen.

Der Umgang mit Befunden ist ebenfalls in den Interpretationen der Sicherheitsanforderungen [11] beschrieben. Von einem Befund spricht man, sobald die definierte Registriergrenze für das gewählte Verfahren überschritten ist. Bei erstmaligem Befund sind weitere Untersuchungen zur Bestimmung von Lage und Größe der Fehlstelle durchzuführen. Auch sollen Fehlertyp und Schädigungsmechanismus ermittelt werden. Im nächsten Schritt muss geklärt werden, ob die Integrität durch die Fehlstelle beeinträchtigt ist und ob eine systematische Fehlerursache vorliegt. Hierfür werden an baugleichen Komponenten ebenfalls Prüfungen durchgeführt.

Fehlstellen, die die Auslegung beeinträchtigen, dürfen ebenso wie betriebsbedingte Fehlstellen nicht belassen werden. Fehlstellen, die dennoch belassen werden, müssen bewertet und regelmäßig überprüft werden.

KTA-Regelwerk

In der KTA-Regel 3301 [13] sind die Anforderungen an das Nachwärmeabfuhrsystem für Druckwasser- und Siedewasserreaktoren beschrieben. In Abschnitt 5.2.3 werden wiederkehrende Prüfungen als Mittel gegen Ausfälle gemeinsamer Ursache genannt. In Abschnitt 9.2.2. ist festgelegt, dass die Komponenten der Nachwärmeabfuhr so zu konstruieren sind, dass sie entsprechend der KTA 3211.4 geprüft werden können.

1 Anwendungsbereich

(1) Diese Regel ist anzuwenden auf wiederkehrende Prüfungen der drucktragenden Wandungen von nicht zur druckführenden Umschließung des Reaktorkühlmittels gehörenden druck- und aktivitätsführenden Systemen und Komponenten von Leichtwasserreaktoren, die eine spezifisch reaktorsicherheitstechnische Bedeutung besitzen. Diese ist gegeben, wenn eines der nachfolgenden Kriterien erfüllt ist:

a) Das Anlagenteil ist bei der Beherrschung von Störfällen notwendig hinsichtlich Abschaltung, Aufrechterhaltung langfristiger Unterkritikalität und hinsichtlich Nachwärmeabfuhr.

Anforderungen an Komponenten in Systemen, die nur mittelbar der Nachwärmeabfuhr dienen - dies sind die nicht aktivitätsführenden Zwischenkühlwassersysteme und Nebenkühlwassersysteme - sind anlagenspezifisch unter Berücksichtigung der Mehrfachauslegung (z. B. Redundanz, Diversität) festzulegen.

Abbildung 1: Ausschnitt aus KTA 3211.4

Die KTA 3211 [6–9] beschreibt die Werkstoffe sowie die Auslegung, Herstellung und Prüfung der druck- und aktivitätsführenden Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises. In der KTA 3211.4 sind die zerstörungsfreien Prüfungen im Rahmen wiederkehrender Prüfungen beschrieben. In Abschnitt 1 Punkt (1) ist für Komponenten der Zwischen- und Nebenkühlwassersysteme eine anlagenspezifische Festlegung definiert (vgl. Abbildung 1). Die in der Praxis anlagenspezifisch definierten wiederkehrenden Prüfungen entsprechen den Anforderungen der Regel KTA 3211.4.

Zerstörungsfreie Prüfungen nach KTA 3211.4

Die WKP nach KTA 3211.4 beinhalten neben den zerstörungsfreien Prüfungen der inneren und äußeren Oberflächen und der Prüfung des Allgemeinzustands (Begehung) noch Druck- und Funktionsprüfungen, die nicht Teil dieser Betrachtung sind.

In der KTA 3211.4 ist beschrieben, welche Prüfverfahren und Prüfintervalle für die unterschiedlichen Komponenten der äußeren Systeme angewandt werden sollen. Es kommen Verfahren zum Einsatz, mit denen betriebsbedingte Schädigungen rechtzeitig erkannt werden. Grundsätzlich sind alle gängigen Verfahren zur Oberflächenrissprüfung und Volumenprüfung zulässig. Die Spezifikationen für die unterschiedlichen Komponenten sind für die jeweiligen Verfahren beschrieben.

Prüfart	Prüfverfahren	Fehlerorientierung	Prüfumfang ¹⁾	Prüfintervall ¹⁾
Prüfung der Oberflächen ²⁾	MT oder PT oder UT oder RT oder ET	I und q	Schweißnähte an Geradrohren, Biegungen und Krümmern oder höherbeanspruchte Stellen \geq DN 150 ^{3) 4)} 15 % aller Rohrleitungsnähte, die nach folgenden Kriterien festzulegen sind: - Anschlussnähte an Behältern, Armaturen, Durchführungen, (Teil-) Festpunkte - Verbindungsnahte von T-Stücken und Krümmern - Betriebliche Beanspruchung - Werkstoffpaarungen - Fertigungsqualität bezüglich Nahtoberfläche Ein Teil der Nähte soll von Prüfintervall zu Prüfintervall wechseln. Es ist jeweils die äußere und innere Oberfläche zu prüfen.	8 Jahre ⁵⁾
Prüfung der Oberflächen	VT gezielt ⁶⁾	Alle	Äußere Oberfläche an Rohrleitungen > DN 50. Der Prüfumfang ist anlagenbezogen festzulegen.	
Prüfung auf Wanddickenabtrag	UT oder RT ⁷⁾	p	Art, Umfang und Intervall der Prüfungen sind anlagenbezogen in einer Prüfanweisung festzulegen, siehe Abschnitte 4.3, 5.2.1.1 (5) bis (7).	
Prüfung der Oberflächen	Kleinleitungen (DN \leq 50), siehe 5.2.1.4 (3)			
Abkürzungen für Prüfverfahren sind in Tabelle 2-1 erläutert. I : Längsfehler q : Querfehler p : Fehler parallel zur Oberfläche				
¹⁾ Werden eingeschränkte Bruch- und Leckannahmen in Anspruch genommen, sind die wiederkehrenden Prüfungen wie folgt durchzuführen: Der Prüfumfang ist je nach Beanspruchung und der im Rahmen des Integritätskonzepts nach KTA 3201.4 Abschnitt 3 getroffenen Maßnahmen anlagenbezogen festzulegen. Dabei muss der Prüfumfang mindestens dem von Rohrleitungen entsprechen, für die eingeschränkte Leck- und Bruchannahmen nicht in Anspruch genommen werden. ²⁾ Im Falle der Erfüllung des Kriteriums für den Normalbetrieb: Betriebsdruck \leq 2,0 MPa und Betriebstemperatur < 100 °C sind wiederkehrende Prüfungen der Oberflächen (außer VT gezielt) nicht erforderlich. ³⁾ Für die an Rohrleitungen der Abmessungen 50 < DN < 150 durchzuführenden wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen sind anlagenbezogen Festlegungen zu treffen. ⁴⁾ Für Frischdampf und Speisewasser führende Leitungen gilt: DWR: Frischdampfsystem vom Dampferzeuger bis vor Turbinenschnellschlussventil und Speisewassersystem von der Hauptspeisepumpe bis vor Dampferzeuger sowie Dampferzeugerabschlammensystem > DN 50 von den Dampferzeugern bis zur äußeren Absperrarmatur am Sicherheitsbehälter SWR: Frischdampfsystem von äußerer Sicherheitsbehälter-Iso-Armatur bis vor Turbinenschnellschlussventil und Speisewassersystem von der Hauptspeisepumpe bis vor äußere Sicherheitsbehälter-Iso-Armatur ⁵⁾ 10 Jahre für den Prüfumfang an DWR: Frischdampfsystem nach der äußeren Absperrarmatur am Sicherheitsbehälter bis vor Turbinenschnellschlussventil und Speisewassersystem von der Hauptspeisepumpe bis vor äußere Absperrarmatur am Sicherheitsbehälter SWR: Frischdampfsystem von Reaktorgebäude-Austritt bis vor Turbinenschnellschlussventil und Speisewassersystem von der Hauptspeisepumpe bis Reaktorgebäude-Eintritt ⁶⁾ Gegebenenfalls andere Prüfverfahren, siehe Abschnitt 5.2.1.4 (2). ⁷⁾ Gegebenenfalls andere Prüfverfahren, siehe Abschnitt 4.3.1 (3).				

Abbildung 2: Tabelle 5-3 aus KTA 3211.4

Für ferritische und austenitische Rohrleitungen und deren Schweißnähte gelten die in KTA 3211.4 in den Tabellen 5-3 (Abbildung 2) und 5-4 (Abbildung 3) dargestellten Prüfungen und Intervalle. Für die hier betrachteten Rohrleitungssysteme sind die Prüfungen der Oberflächen von Schweißnähten und die Prüfungen auf Wanddickenabtrag relevant. Für die Oberflächenprüfungen ist ein Prüfintervall von 8 Jahren festgelegt, wobei nach der halben Zeit ein repräsentativer Anteil bereits geprüft sein muss. In den Fußnoten ist ergänzend erläutert, dass die Prüfungen der Oberflächen bei Rohrleitungen, die bei weniger als 100 °C und mit Drücken unter 2,0 MPa betrieben werden, auf eine Sichtprüfung zu beschränken sind. Der Prüfumfang ist anlagenbezogen festzulegen. Die Prüfung auf Wanddickenabtrag ist ebenfalls anlagenbezogen festzulegen. Das empfohlene Prüfverfahren ist Ultraschall (UT), allerdings sind auch Durchstrahlungsprüfungen (RT) zugelassen. Bei austenitischen Rohrleitungen entfällt die Prüfung auf Wanddickenabtrag.

Prüfart	Prüfverfahren	Fehlerorientierung	Prüfumfang	Prüfintervall		
Prüfung der Oberflächen ¹⁾	PT oder UT oder RT oder ET	I	DWR	SWR	8 Jahre	
			Schweißnähte an Geradrohren, Biegungen und Krümmern oder höherbeanspruchte Stellen \geq DN 150 in folgendem Umfang ²⁾			
				heiß (\geq 200 °C)		kalt ($<$ 200 °C)
			10 %	20 %		10 %
			Schweißnähte an Geradrohren, Biegungen und Krümmern oder höherbeanspruchte Stellen $50 < DN < 150$ in folgendem Umfang ²⁾			
	heiß (\geq 200 °C)	kalt ($<$ 200 °C)				
5 %	10 %	5 %				
			Die zu prüfenden Schweißnähte sind nach folgenden Kriterien festzulegen: <ul style="list-style-type: none"> - Betriebliche Beanspruchung - Anschlussnähte an T-Stücke, Festpunkte, Reduzierungen, Armaturen, Behälter Es ist jeweils die äußere und innere Oberfläche zu prüfen. Ein Teil der Nähte soll von Prüfintervall zu Prüfintervall wechseln.			
Prüfung der Oberflächen	VT gezielt	Alle	Äußere Oberfläche an Rohrleitungen $>$ DN 50 Der Prüfumfang ist anlagenbezogen festzulegen.			
Kleinleitungen (DN \leq 50), siehe 5.2.1.4 (3)						
Abkürzungen für Prüfverfahren sind in Tabelle 2-1 erläutert. I : Längsfehler						
¹⁾ Bei DWR-Anlagen sind im Falle der Erfüllung der Kriterien für den Normalbetrieb a) Betriebsdruck \leq 2,0 MPa und Betriebstemperatur $<$ 100 °C oder b) zeitliche Beanspruchung \leq 2 % der Betriebsdauer der Anlage oder c) primäre Membranspannung $<$ 50 N/mm ² wiederkehrende Prüfungen der Oberflächen (außer VT gezielt) nicht erforderlich. ²⁾ DWR: - Not- und Nachkühlsystem zwischen 1. und 2. Absperrarmatur am Primärkreis und angrenzend bis zum Druckspeicher - Volumenausgleichs- und -regelsystem - Notspeise- und Notstandsspeisesystem vom Dampferzeuger bis zur äußeren Absperrarmatur am Sicherheitsbehälter SWR: - Nachkühlsystem, Hochdruckeinspeisesystem, Notnachkühlsystem, Nachspeisesystem - Kernflutsystem - Reaktorwasserreinigungssystem - Schnellabschaltssystem						

Abbildung 3: Tabelle 5-4 aus KTA 3211.4

Prüfmöglichkeiten

Prüfmöglichkeiten für Stahlrohrleitungen

Wie in Abschnitt 2.1.4 erläutert, ist der häufigste Schädigungsmechanismus in den Rohrleitungen der Zwischen- und Nebenkühlwassersysteme Korrosion. Um Korrosion zu entdecken, eignen sich grundsätzlich verschiedene Prüfverfahren, die im Folgenden erläutert werden.

Sichtprüfung

Zunächst ist eine Sichtprüfung [14] aller sichtbaren Oberflächen ein sinnvolles Mittel zur Detektion von Korrosionsschäden, da die Korrosion oft an mangelhaften Beschichtungen beginnt. Mithilfe der Sichtprüfung können Beschichtungsschäden frühzeitig detektiert werden. Auch wenn eine Sichtprüfung zunächst simpel klingt, ist dafür dennoch ein gewisses

Maß an Erfahrung notwendig. Insbesondere bei der indirekten Inspektion über Videosysteme oder Endoskope verliert die Sichtprüfung ihren trivialen Charakter. Es muss hierfür geschultes Personal eingesetzt werden, das sich sowohl mit den Verfahren der Sichtprüfung als auch mit den verwendeten Werkstoffen auskennt, um Inhomogenitäten zu entdecken.

Ultraschall-Wanddickenmessung (UT-WD)

Die Ultraschallwanddickenmessung [15] ist in der Regel das Mittel der Wahl, um Wanddickenabtrag infolge von Korrosion zu bestimmen. Das Verfahren wird folgendermaßen durchgeführt: ein Ultraschallwandler wird auf der Oberfläche des Rohrs mit einem Koppelmittel angekoppelt und sendet eine Ultraschallwelle ins Material. Die Ultraschallwelle wird an der Rückwand des Materials reflektiert und vom selben Prüfkopf wieder empfangen (Abbildung 4). Aus der Laufzeit t der Welle kann bei bekannter Schallgeschwindigkeit v im Material die Wanddicke über die Formel $d = \frac{1}{2} v \cdot t$ berechnet werden. In der Regel geben digitale Prüfgeräte nach einer Justierung mithilfe bekannter Wandstärken, direkt die Werte für die Wanddicken aus.

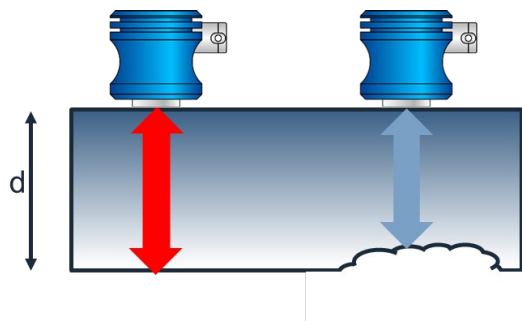


Abbildung 4: Messprinzip der Wanddickenmessung mit Ultraschall

Eine Ultraschallwanddickenmessung erfolgt entweder von der Außenseite oder der Innenseite des Rohrs. Die Messung liefert einen punktuellen Wert und wird in der Regel an mehreren Punkten oder an Rastern in kritischen Bereichen durchgeführt. Die Ankopplfläche sollte für die Prüfung glatt und sauber sein. Beschichtungen und Anstriche können die Prüfungen behindern, so dass die Ankopplflächen in der Regel vor der Prüfung entschichtet werden müssen. Aufgrund des Aufwands für die Entschichtung und für die an die Prüfung anschließende Neubeschichtung und dem punktuellen Charakter der Messung, werden Wanddickenmessungen an repräsentativen Stellen durchgeführt. Für ein umfangreicheres Bild können stattdessen mechanisierte Ultraschallprüfungen durchgeführt werden.

Durchstrahlungsprüfung (RT)

Bei der Durchstrahlungsprüfung werden Röntgenstrahlen verwendet, um Dichte- oder Dickenunterschiede von Material sichtbar zu machen. Hierfür wird eine Röntgenquelle und ein Röntgenfilm oder ein digitales Speichermedium benötigt. Rohrleitungen werden in einer tangentialen Projektion auf dem Film abgebildet [16]. Die Röntgenquelle wird um einen Wert x gegenüber der Rohrachse verschoben und eine Aufnahme entsprechend der in Abbildung 5 dargestellten Anordnung gemacht. Die Wanddicke wird aus dem Schwärzungsprofil auf dem Film, der Rohrgeometrie und der Durchstrahlungsanordnung berechnet.

Das Verfahren ist vor allem bei flächiger Korrosion eine sinnvolle Methode. Muldenkorrosion wird als lokaler Schwärzungsunterschied ebenfalls detektiert und kann eingeschränkt, anhand von Schwärzungsunterschieden quantifiziert werden.

Ein Vorteil der Durchstrahlungsprüfung ist, dass Beschichtungen und sogar Isolierungen vor der Prüfung nicht zwingend entfernt werden müssen. Ein entscheidender Nachteil der Prüftechnik ist der gesundheitsgefährdende Charakter der eingesetzten Röntgen- oder Gammastrahlung. Die Energien, die für die Prüfung an metallischen Rohrleitungen verwendet werden, bedürfen einer Vielzahl von Maßnahmen zum Strahlenschutz. In der Regel muss der Prüfbereich weiträumig abgesperrt werden. Die Aufenthaltsdauer im Kontrollbereich muss so kurz wie möglich gehalten werden und der Abstand zur Strahlenquelle möglichst groß gewählt werden. Diese Maßnahmen führen dazu, dass derartige Aufnahmen nicht im Normalbetrieb und nur eingeschränkt im Revisionsbetrieb erzeugt werden können. Durchstrahlungsprüfungen werden deshalb oft zu Randzeiten oder nachts durchgeführt.

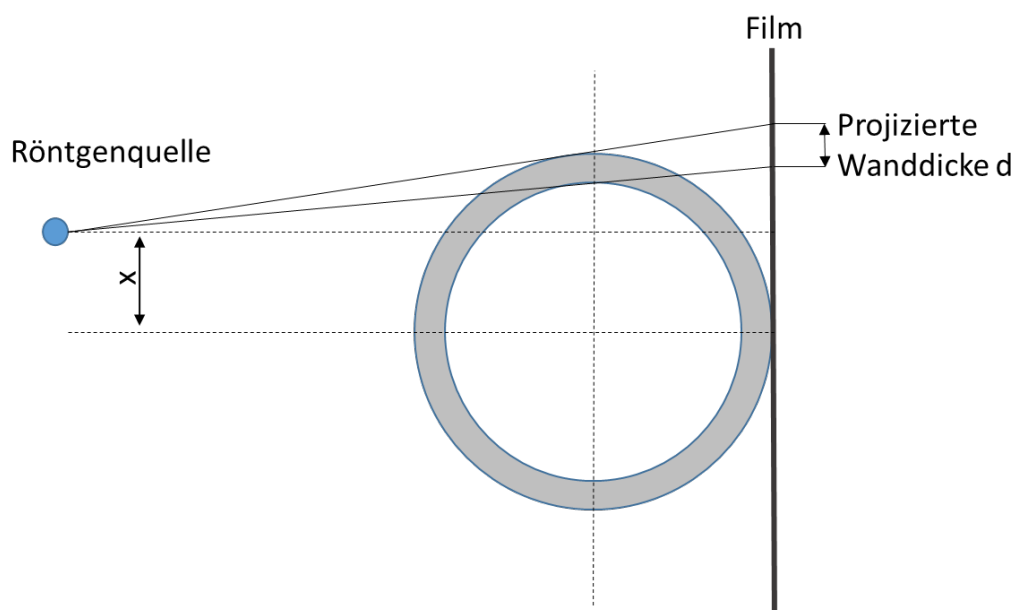


Abbildung 5: Messprinzip tangentialer Durchstrahlung

Alle der drei genannten Verfahren finden für die Korrosionsdetektion in den Rohrleitungen kerntechnischer Anlagen Anwendung, sind über entsprechende Normen geregelt und im KTA-Regelwerk berücksichtigt.

Neben den genannten Verfahren, werden zur Korrosionsdetektion in anderen Industriezweigen weitere Prüfverfahren eingesetzt. In der Prüfung von Gas- und Ölpipelines kommen z.B. automatisierte Prüfsysteme (Molche) zum Einsatz, die kilometerlange Pipelines mit zerstörungsfreien Prüfverfahren auf Risse und Wanddickenabtrag überprüfen [17], [18]. Neben der bereits genannten Ultraschallprüfung kommen hier vor allem Wirbelstromverfahren zum Einsatz, die sensitiv auf Risse an den Innenoberflächen reagieren. Ebenfalls üblich ist die magnetische Streuflussmessung (Magnetic Flux Leakage, MFL), die Risse und Wanddickenabtrag durch Unterschiede im magnetischen Verhalten der Werkstoffe erkennt. Wanddickenänderungen können außerdem über die Vermessung der Rohrinneoberfläche gefunden werden. Das passiert entweder über Tastsensoren oder über eine Abtastung mit einem Laserscanner.

Die verschiedenen Prüfverfahren sind durch bestimmte Randbedingungen eingeschränkt, so dass nicht jedes Prüfverfahren überall einsetzbar ist. Wie bereits erwähnt, sind für die Ultraschallwanddickenmessungen Korrosionsschutzbeschichtungen zu entfernen. Bei der Durchstrahlungsprüfung müssen Maßnahmen zum Strahlenschutz getroffen werden. Wirbelstromverfahren und magnetische Streuflussmessung sind ebenfalls nur auf sehr dünnen Beschichtungen oder der blanken Metalloberfläche möglich. Deshalb kommen automatisierte Systeme zur Korrosionsprüfung, die in der Pipelineprüfung eingesetzt werden, für die Prüfung der hier betrachteten wasserführenden Rohrleitungen nur eingeschränkt infrage. Die Korrosionsschutzbeschichtungen sind hier in der Regel zu massiv. Eine großflächige Entfernung der Beschichtungen vor allem an den Innenseiten ist in der Regel nicht möglich.

Prüfmöglichkeiten für Spezialfälle wie erdverlegte Rohrleitungen und Spannbetonrohre

Erdverlegte Rohrleitungen finden in Kernkraftwerken weltweit Anwendung [19]. Sie sind entweder in einem Rohrkanal verlegt oder liegen direkt im Erdreich. Die meisten der unterirdisch verlegten Rohrleitungen transportieren Wasser. In einem IAEA-Bericht [20] sind verschiedene Schadensmechanismen aufgeführt. Flächige Korrosion, Muldenkorrosion und Korrosion durch Mikroorganismen sind hier, wie schon im GRS-Bericht [10] beschrieben, die gängigsten Schadensmechanismen. Dazu kommen Verformungen und Setzungen durch Erdbewegungen. Zur Detektion der Schädigungen sind die bereits genannten Ver-

fahren sinnvoll. Einen Spezialfall bilden erdverlegte Spannbetonrohre, für die andere Schadensmechanismen relevant sind und auf die am Ende dieses Abschnitts gesondert eingegangen wird.

Bei der Prüfung erdverlegter Rohrleitungen unterscheidet man zwischen direkten Verfahren und indirekten Verfahren. Die direkten Verfahren entsprechen den in Abschnitt 2.2.2.1 bereits beschriebenen ZfP-Verfahren. Diese sind anwendbar, sofern die Rohroberflächen teilweise zugänglich sind. Ist der Rohrkanal zugänglich, können die genannten Verfahren in der Regel problemlos angewandt werden. Bei Aufgrabungen können ZfP-Verfahren von der Rohraußenseite angewandt werden. Neben der Sichtprüfung spielt hier die Ultraschallwanddickenmessung eine große Rolle. Sind die Rohrleitungen von innen begehbar, können die Verfahren von der Innenseite durchgeführt werden. Bei kleineren Rohrdurchmessern können mechanisierte Verfahren eingesetzt werden. Beispiele hierfür sind Rohrleitungsmolche oder Kameratragende Fahrzeuge, die verschiedene Prüfmöglichkeiten vorhalten. Neben Sichtprüfungen ist es hier sinnvoll die Rohrgeometrie und die Oberfläche über Laserscansysteme zu erfassen. Setzungen, Verformungen und der Abtrag oder die Anlagerung von Material können so detektiert werden. Derartige Prüfverfahren werden z.B. in der Pipelineprüfung oder in der Kanalüberwachung eingesetzt [21].

Die indirekten Verfahren werden von der Erdoberfläche aus durchgeführt und sind in der Lage Beschichtungsschäden und Leckagen aufzuspüren. Die Beprobung des Erdreichs und des Grundwassers gibt grundsätzliche Hinweise darüber, ob eine korrosive Umgebung besteht, so dass gegebenenfalls bereits im Vorfeld Maßnahmen ergriffen werden können.

Mithilfe von Geo-Radar (ground penetrating radar GPR) können Rohrleitungen im Boden detektiert werden. Das Verfahren verwendet Antennen, um elektromagnetische Wellen in den Boden zu senden. Das Messprinzip ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Radar-Antenne wird über den Boden bewegt und sendet elektromagnetische Pulse in den Untergrund. Die Radarwellen werden an Änderungen der elektrischen und magnetischen Leitfähigkeit im Boden reflektiert und von der Antenne aufgenommen. So entsteht ein Radargramm. Mit dem Verfahren können Hohlräume, metallische Strukturen und Wassereintrag registriert werden. Das Verfahren wird angewandt, um Leckagen von Rohrleitungen zu detektieren oder um Bewehrungsstähle in Stahlbetonstrukturen zu orten.

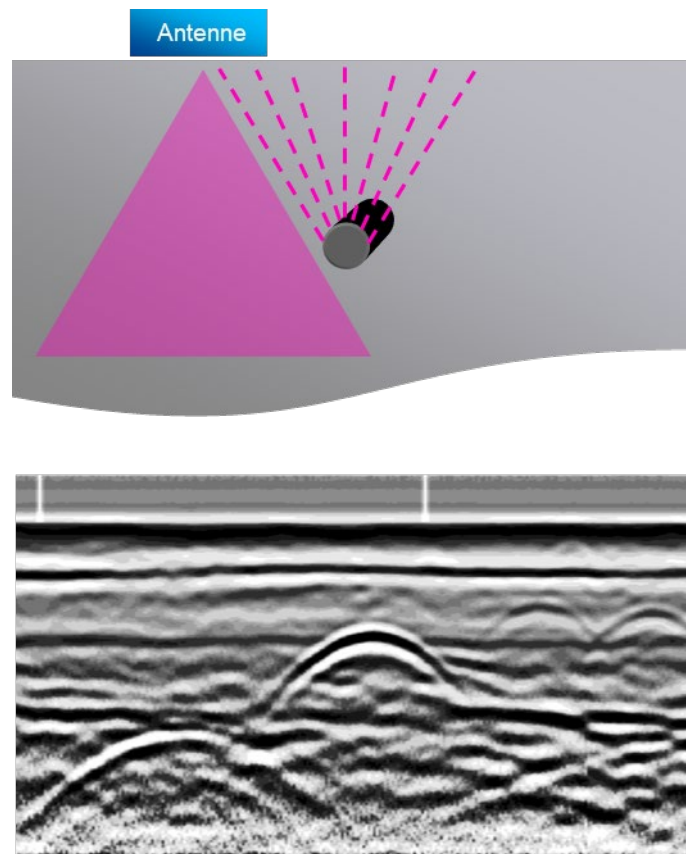


Abbildung 6: Messprinzip des Georadar zur Ortung von Rohrleitungen

Die Messung von Spannungsgradienten im Boden wird verwendet, um lokale Beschichtungsschäden an den Rohrleitungen zu detektieren. Hierfür wird die Rohrleitung stromdurchflutet und an der Erdoberfläche gemessen, wie sich Spannungsgradienten verteilen. Beschädigungen in den Beschichtungen führen zu Änderung der Spannungsverteilung. Für die Untersuchungen können Gleichstrom und Wechselstrom verwendet werden.

Eine weitere Möglichkeit ist die Messung von Magnetfeldern, die bei einer wechselstromdurchfluteten Rohrleitung entstehen (ACCA) [20]. Die Änderung im Magnetfeld deutet auf Beschichtungsschäden hin. Eine passive Methode ist die magnetische Tomographie [22] (MTM) von Rohrleitungen. Hier werden hochempfindliche Magnetometer eingesetzt, die Änderungen der magnetischen Eigenschaften des Rohrwerkstoffs anzeigen. Die magnetischen Eigenschaften ändern sich z.B. bei Verformung oder durch Materialabtrag infolge Korrosion.

Infrarot-Thermographiekameras können helfen Feuchtigkeit durch eine Rohrleitungslackage im Boden aufzuspüren. Durch den Eintrag von Wasser ändern sich die thermischen Eigenschaften des Bodens im Bereich der Feuchtigkeit. Die Thermographie bildet die Änderungen des Wärmeflusses ab [23].

Ebenfalls zu den indirekten Proben gehören Dichtheitsprüfungen, die im Rahmen der Druckprüfungen durchgeführt werden [24]. Leckagen können außerdem akustisch über die Überwachung von Schallemissionen registriert werden. Eine Überwachung des Strömungsverhaltens kann ebenfalls zur Leckagedetektion verwendet werden.

Für die Prüfungen von **Spannbetonrohren** gibt es keine standardisierten Verfahren. Die Prüfbarkeit von Beton mit den oben beschriebenen Methoden ist gegenüber Stahl deutlich schlechter bzw. gar nicht möglich. Allerdings sind die Schadensmechanismen im Beton ebenfalls andere. Typische Schadensbilder sind Abplatzungen aufgrund von Salzwasserkristallisation oder Frost. Ein Sulfatangriff kann außerdem den Beton schädigen und zu Abplatzungen führen. Abrasion durch Partikel, die im Wasser mitgeführt werden, kann die Betonüberdeckung über den Spannstählen reduzieren und zum Korrosionsangriff am Spannstahl führen. Laut IAEA-Bericht [20] ist zur Detektion dieser Schädigungen die Sichtprüfung das Mittel der Wahl. Diese wird in der Regel über Kamerabefahrungen durchgeführt. Weitere Prüftechniken aus der Kanalprüfung werden bei Bedarf eingesetzt. Die in der Literatur genannten Verfahren für die Prüfungen von Spannbetonrohren im Kanalbau sind Geo-Radar und Impakt-Echo. Beide Verfahren werden beispielsweise für die Prüfung von Tunnelinnenschalen verwendet oder für die Prüfung dickwandiger Betonbauteile. Für die Prüfungen von Rohrleitungen sind sie bedingt geeignet und kommen für die Prüfung von Abwasserkanälen zum Einsatz [21].

2.3 Analyse und Bewertung ausgewählter, repräsentativer Rohrleitungssysteme

Im Folgenden werden die Prüfungen der Rohrleitungssysteme, die in den Kernkraftwerken Neckarwestheim 2 (GKN2) und Philippsburg 2 (KKP2) durchgeführt werden, vorgestellt. Außerdem wurden Informationen beim Kernkraftwerk Gundremmingen (KRB) angefragt. Bis zum Zeitpunkt der Berichtserstellung lagen hierzu jedoch keine Informationen vor. Mit der Betrachtung der Kraftwerke GKN2 und KKP2 sind somit die beiden in Deutschland gebräuchlichen Anlagentypen Konvoi und Vorkonvoi für Druckwasserreaktoren abgedeckt. Es ist anzumerken, dass beide betrachteten Kraftwerke von der EnBW betrieben werden.

In allen deutschen Kernkraftwerken sind die Systeme der Nachwärmeabfuhr 4-fach redundant. In den Vorkonvoi und Konvoi-Anlagen wurde die Redundanz bereits bei Planung und Bau berücksichtigt. Für andere Kernkraftwerke wurde die Redundanz nachträglich geschaffen, z.B. im Kernkraftwerk Gundremmingen über das ZUNA-System.

GKN2

Das Nebenkühlwassersystem im GKN2 wurde, mit Ausnahme der Spannbetonrohre, gemäß Konvoi-Spezifikation K3 für einen Druck von 6 bar (0,6 MPa) und für eine Temperatur

von 60°C ausgelegt. Für das Zwischenkühlsystem ist bei Konvoi-Anlagen ein Auslegungsdruck von 14 bar (1,4 MPa) festgelegt. Druck und Temperatur im Betrieb sind gegenüber den Auslegungsgrößen deutlich geringer.

Die Rohrleitungssysteme in GKN2 bestehen im erdverlegten Bereich aus Spannbetonrohren. Alle anderen Rohrleitungen sind Stahlrohre mit Innenbeschichtung. Für das Kraftwerk GKN wurde lt. Betreiber ein Überwachungs-, Prüf- und Instandhaltungskonzept entwickelt, dass in der RSK-DKW vorgestellt wurden [25]. In diesem sind wiederkehrende Prüfungen zur Sicherstellung der Funktion der Anlage, wiederkehrenden vorbeugende Maßnahmen zur Sicherstellung der Anlagenverfügbarkeit und zusätzliche Maßnahmen zur Überwachung und Instandhaltung erfasst. Die Intervalle der wiederkehrenden Prüfungen umfassen je nach Maßnahme Monate bis mehrere Jahre. Ein wesentlicher Teil sind Funktionsprüfungen der einzelnen Komponenten der Nachwärmeabfuhr, die nicht Teil dieser Betrachtung sind. Die zerstörungsfreien Prüfungen gehören zu den wiederkehrenden vorbeugenden Instandhaltungsmaßnahmen.

Alle 4 Jahre werden die Rohrleitungssysteme und Rohrkanäle visuell inspiziert und Rohrleitungsabschnitte kontrolliert. Ultraschallmessungen zur Überprüfung des Wanddickenabtrags finden an ausgewählten repräsentativen Bereichen statt. An den Zwischenkühlern und den anschließenden Rohrleitungen bis zur Grenzarmatur werden innere Prüfungen alle 4 Jahre und Druckprüfungen alle 8 Jahre durchgeführt.

Im Rahmen zusätzlicher Prüfmaßnahmen werden ebenfalls zerstörungsfreie Prüfungen durchgeführt. Im Rahmen der regelmäßigen (i.d.R. täglichen) Begehungen der Anlagen, werden Korrosionsstellen und Leckagen frühzeitig detektiert. Die Rohrleitungen werden jährlich einer visuellen Inspektion auf Korrosion unterzogen. Der Rohrkanal wird alle 4 Jahre inspiziert und stichprobenhaft werden Wanddickenmessungen mit Ultraschall durchgeführt. Die erdverlegten Rohrleitungen aus Spannbeton werden visuell von innen geprüft. Das erfolgt über Rohrleitungsmanipulatoren. Diese bieten neben der visuellen Prüfung oft weiterführende Prüfmöglichkeiten (vgl. Abschnitt 2.2.2.2). Die Prüfintervalle werden anlagenspezifisch aus bisherigen Erfahrungen festgelegt.

In GKN2 wurde außerdem das Nebenkühlwassersystem sukzessiv saniert. Es wurden umfangreiche Prüfungen und Begutachtungen durchgeführt. Schadhafte Rohrleitungen wurden ausgetauscht und Beschichtungen erneuert, sowie Korrosionsursachen untersucht.

KKP 2

Im KKP2 sind als Anlage der Vorkonvoi-Baureihe die Forderungen der Basissicherheit im Wesentlichen umgesetzt, jedoch gelten diese nur eingeschränkt für die Neben- und Zwischenkühlwasserkreisläufe [2]. Der Auslegungsdruck für das Zwischenkühlwasser beträgt 10 bar (1,0 MPa), für das Nebenkühlwassersystem gelten wie bei den Konvoi-Anlagen 6 bar (0,6 MPa).

Die Nebenkühlwassersysteme und Zwischenkühlwassersysteme des KKP sind ebenfalls fast ausschließlich aus ferritischen Rohren. Im Zwischenkühlwassersystem sind in geringem Maße austenitische Rohrleitungen verbaut. Im Bereich des Nebenkühlwassersystems existieren außerdem erdverlegte Rohrleitungen aus duktilem Gusseisen mit Mörtelbeschichtung innen und außen.

Das KKP2 ist Ende 2019 aus dem Leistungsbetrieb ausgeschieden und befindet sich aktuell im Nachbetrieb und im Rückbau.

Die Angaben zu den Prüfungen beruhen auf den Aussagen des zuständigen Ingenieurs beim KKP2. Für das KKP2 existierte ein Prüf- und Instandhaltungskonzept, das die Rohrleitungssysteme der Nachwärmeabfuhr einschloss. Im Betrieb fanden regelmäßig jährlich Prüfungen an den Rohrleitungssystemen im freigeschalteten Bereich statt. Regelmäßigen Anlagenbegehungen fanden täglich statt. Beschichtungsschäden, Korrosion und Leckagen konnten so frühzeitig erkannt werden. Begehungen in den Sperrbereichen fanden im Rahmen der Revisionen alle 4 Jahre, entsprechend der KTA 3211.4, statt. Dabei wurden außerdem Sichtprüfungen an den Innenseiten der Rohrleitungssysteme durchgeführt. Ziel war zunächst die Feststellung Allgemeinzustands. Zusätzlich wurde gezielt nach Hinweisen auf Korrosion, Ablagerungen oder Schädigungen gesucht. Anhand der Ergebnisse der Prüfungen wurden gegebenenfalls weiterführende oder zusätzliche Untersuchungen eingeleitet. Hierbei wurden Ultraschallwanddickenmessungen und Röntgen-Projektionsaufnahmen als Mittel genannt. Vorkommnisse wurden außerdem im Betriebsführungssystem vermerkt, behoben und mit den zuständigen Behörden ausgewertet.

An Kleinleitungen (\leq DN50) wurde außerdem ein Stutzenprüfprogramm an Entleerungen und Entlüftungen der Hauptleitungen durchgeführt. Die inneren Beschichtungen auf den Stuzennähten wurden gezielt inspiziert. Neben Sichtprüfungen und Ultraschallwanddickenmessungen kamen hierfür auch Durchstrahlungsprüfungen zum Einsatz.

2.4 Vergleichende Bewertung

Vergleich der Prüfungen in GKN2 und KKP2 mit dem KTA-Regelwerk

Die Vorgaben in der KTA 3211.4 für ferritische und austenitische Rohrleitungen der äußeren Systeme sind in Abschnitt 2.2.1 erläutert. Das KTA-Regelwerk gibt für Rohrleitungen, die bei einem Druck von weniger als 2 MPa betrieben werden, eine visuelle Überprüfung alle acht Jahre vor. Dies trifft für die Rohrleitungssysteme des Zwischenkühl- und Nebenkühlwassersystems zu, die maximal bis zu einem Druck von 1,4 MPa ausgelegt sind und bei deutlich geringeren Drücken betrieben werden.

Tabelle 2: Vergleich der Prüfungen am Zwischen- und Nebenkühlwassersystem im GKN2 und KKP2 mit dem KTA-Regelwerk

Art	Prüfungen in GKN2	Prüfungen in KKP2	KTA 3211.4
Stahlrohrleitungen	VT außen jährlich VT innen bei Revisionen alle 4 Jahre UT-Wanddickenmessung alle 4 Jahre, wenn notwendig Anwendung weiterer Verfahren: Wirbelstromprüfung, Durchstrahlung	VT außen jährlich VT innen bei Revisionen alle 4 Jahre UT-Wanddickenmessung an relevanten Stellen alle 4 Jahre Erhöhung des Prüfumfangs bei Bedarf	VT und UT alle 8 Jahre, nach Ablauf der halben Zeit muss ein repräsentativer Anteil geprüft sein. (KTA3111.4)
Rohrkanal	VT und UT Wanddicke 4 Jahre	k. A.	Keine Vorgaben
Erdverlegte Stahlleitungen	VT innen (Kamerabefahrung) alle 4 Jahre UT-WD, wenn notwendig	VT innen bei Revisionen alle 4 Jahre UT-WD nach Bedarf	VT und UT alle 8 Jahre, nach Ablauf der halben Zeit muss ein repräsentativer Anteil geprüft sein. (KTA3111.4)
Erdverlegte Spannbetonleitungen	VT innen (Kamerabefahrung), alle 4 Jahre	Nicht vorhanden	Keine Vorgaben
Gebäudedurchführung	VT innen	k.A.	Keine Vorgaben
Kleinleitungen < DN50	k.A.	VT/UT/RT an inneren Stutzennähten	Anlagenspezifisch geregelt

Zusätzlich soll der Wanddickenabtrag durch Korrosion in ferritischen Rohrleitungen entweder über eine Ultraschallwanddickenmessung oder mithilfe von Durchstrahlungsaufnahmen

ermittelt werden. Ein repräsentativer Anteil der Prüfungen soll nach vier Jahren durchgeführt sein.

In Tabelle 2 sind die durchgeführten Prüfungen der betrachteten Kraftwerke mit den Vorgaben der KTA 3211.4 verglichen. Es ist zu sehen, dass die Prüfungen in den Kraftwerken über die Forderungen der KTA 3211.4 hinausgehen, z.B. dadurch, dass Sichtprüfungen bei Anlagenbegehungen regelmäßig jährlich stattfinden. Revisionen, bei denen umfangreichere Prüfungen durchgeführt werden, finden alle 4 Jahre statt. Die Auswahl der jeweiligen Prüfverfahren ist in der KTA 3211.4 nicht vorgegeben. Für einzelne Bereiche sind in der KTA 3211.4 anlagenspezifische Lösungen gefordert, die in den jeweiligen Prüf- und Instandhaltungsplänen der Anlagen umgesetzt sind.

Bewertung der Erdbebensicherheit aus den EU-Stresstests

Im Nachgang an die Reaktorunfälle im japanischen Kraftwerk Fukushima Dai-ichi wurden die europäischen Kernkraftwerke einem Stresstest unterzogen und die Sicherheit in den Kernkraftwerken überprüft. Ein Thema, das hier speziell untersucht wurde, war die Auslegung gegen Erdbebenereignisse.

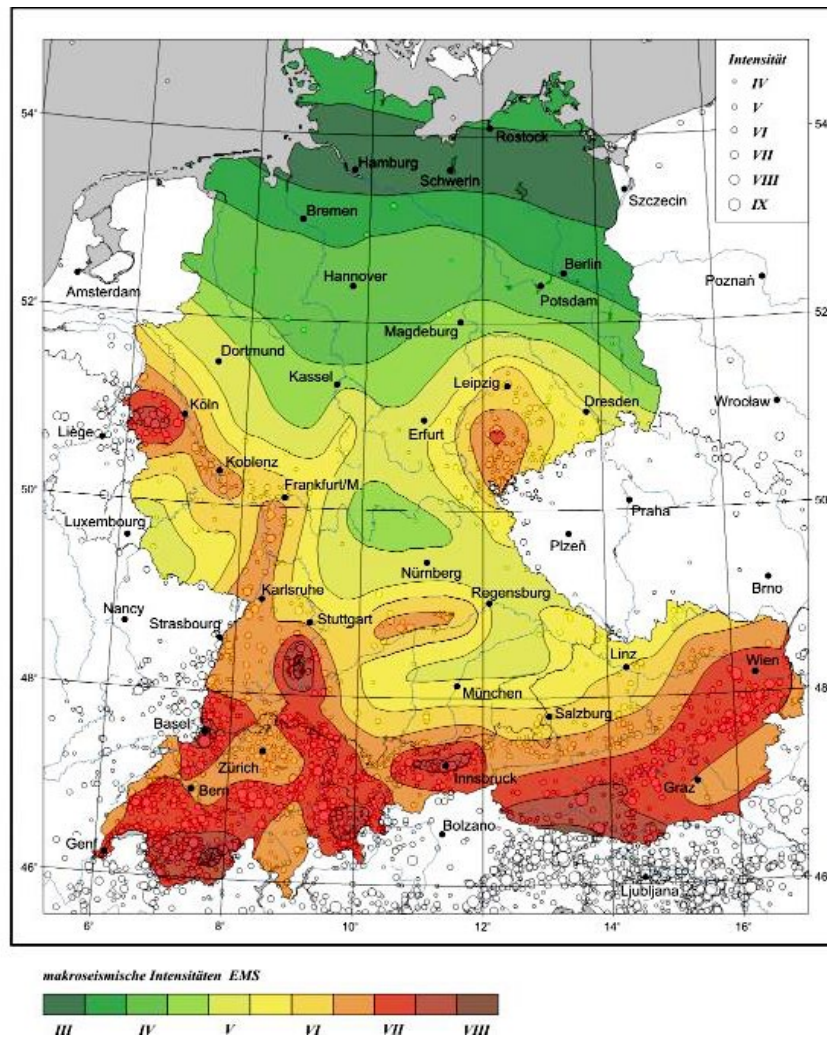


Abbildung 7: Erdbebenrisiko in Deutschland (Quelle: Grünthal et al. [26])

In Abbildung 7 ist das Erdbebenrisiko für die DACH-Staaten dargestellt. Die Erdbebengefährdung ist auf der Europäischen Makroseismischen Skala (EMS) angegeben [26], die in Tabelle 3 beschrieben ist. Die EMS bezieht sich nicht auf physikalische Messgrößen des Erdbebens, wie gemessene Amplitude oder berechnete Erdbebenherdfläche, sondern auf die Auswirkung des Erdbebens auf Menschen, Gegenstände und Gebäude.

Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, ist das Erdbebenrisiko für Deutschland insgesamt gering. Selbst in den am stärksten gefährdeten Gebieten, kommt es selten zu gravierenden Schäden an Gebäuden. Das ist darauf zurück zu führen, dass Deutschland in allen Richtungen weit entfernt zu tektonischen Plattengrenzen liegt. Es gibt wenig gering tektonisch aktive Gebiete: der Oberrheingraben, die Eifel, die Schwäbische Alb und das Vogtland. Hier sind vereinzelt maximale Intensitäten von bis zu VII zu erwarten. Heute verwendet man als Maß

für die Erdbebengefährdung außerdem die maximale Bodenbeschleunigung (peak ground acceleration PGA).

Tabelle 3: Europäische Makroseismische Skala

EMS Intensität	Definition	Beschreibung der maximalen Wirkung
I	Nicht fühlbar	Nicht fühlbar. Keine Schäden
II	Kaum wahrnehmbar	Vereinzelt wahrgenommen. Keine Schäden.
III	Schwach	Von wenigen wahrgenommen. Keine Schäden.
IV	deutlich	In Innenräumen häufig wahrgenommen. Geschirr und Fenster klirren. Keine Schäden.
V	stark	Von den meisten wahrgenommen. Hängende Gegenstände schwingen. Leichte Beschädigungen an Gebäuden.
VI	Leichte Gebäudeschäden	Von den meisten wahrgenommen. Gegenstände fallen herab. Gebäude in schlechtem Zustand werden beschädigt.
VII	Gebäudeschäden	Menschen erschrecken sich und flüchten ins Freie. Einrichtung verschiebt sich. Einige Gebäude werden beschädigt.
VIII	Schwere Gebäudeschäden	Menschen verlieren das Gleichgewicht. Einrichtung fällt um. Viele Gebäude werden beschädigt.
IX	zerstörend	Allgemeine Panik. Viele Gebäude werden beschädigt. Tragende Strukturen stürzen teilweise ein.
X	Sehr zerstörend	Viele Häuser werden schwerbeschädigt oder zerstört.
XI	Verwüstend	Die meisten Gebäude werden zerstört.
XII	Vollständig verwüstend	Nahezu alle Konstruktionen werden zerstört

In den EU-Stresstests [27–33] wurde überprüft, ob die deutschen Kernkraftwerke gegenüber den jeweiligen Bemessungserdbeben (KTA 2201.1 [34]) noch Reserven in der Auslegung aufweisen. Die Bemessungserdbeben wurden für jeden Standort separat ermittelt auf Basis eines Bemessungserdbebens in bestimmter Entfernung. Die Kernkraftwerke wurden gemäß des jeweiligen Erdbebenrisikos für den Standort für Bemessungsintensitäten zwischen VI und VIII ausgelegt (vgl. Tabelle 4). Die historisch ermittelten Standortintensitäten

liegen unterhalb den Bemessungsintensitäten. Die Überschreitungshäufigkeiten für die Bemessungserdbeben liegen deutlich unter den in der KTA geforderten $10^{-5}/a$. Die Komponenten der Nachwärmeabfuhr sind bei allen Kernkraftwerken, die sich noch im Leistungsbetrieb befinden, für das jeweilige Bemessungserdbeben ausgelegt.

Tabelle 4: Erdbebenauslegung der Kernkraftwerke laut EU-Stresstest

Kernkraftwerk	Rohrleitungsspezifikation	Standortintensität I_{MSK}	Bemessungsintensität I_{MSK}	Maximale Horizontalbeschleunigung	Überschreitungshäufigkeit
KBR	RE-L 3398	5,5	6	1,2 m/s ²	$7,3 \cdot 10^{-6}/a$
KWG	RE L 3196	6,5	7	1,6 m/s ²	$3,9 \cdot 10^{-6}/a$
KRB	RE-L1508	6	7	1,0 m/s ²	$3,0 \cdot 10^{-6}/a$
KKE	KS-D 3041/3042	6	7	1,2 m/s ²	$1 \cdot 10^{-6}/a$
GKN	KSD 3041	7	8	1,7 m/s ²	$1 \cdot 10^{-6}/a$
KKI	KSD 3041	6,25	7,25	2,3 m/s ²	$1,1 \cdot 10^{-5}/a$
KKP	RE_L 3195	6,25	7,5	2,1 m/s ²	$\leq 10^{-5}/a$

Für das KRB wurden die Rohrleitungssysteme der Nachwärmeabfuhr im Bericht des Stresstests weitergehend betrachtet. Es wurde erläutert, dass gegenüber den zu erwartenden Spannungen im Falle des Bemessungserdbebens noch erhebliche Reserven im Werkstoff St37 vorhanden sind. Eine Spannungserhöhung um den Faktor 10, was einer Intensitätsstufe von IX entspräche, können die Rohrleitungen ohne Schäden verkraften. Die Versagenswahrscheinlichkeit für die Rohrleitungssysteme beträgt bei einer Intensität von VIII lediglich $3 \cdot 10^{-4}$.

Wie in der RSK-Stellungnahme vom 11.12.2019 [1] und dem MPA-Bericht [2] erläutert, werden in den verschiedenen Kraftwerken der unterschiedlichen Baureihen nicht die gleichen Rohrleitungsspezifikationen verwendet. Die verwendeten Spezifikationen für die einzelnen Kraftwerke sind Tabelle 4 zu entnehmen. In der RSK-Stellungnahme [1] werden die Unterschiede bezüglich den Auslegungen und Reserven im Hinblick auf Erdbebenlasten detailliert erläutert. In der RSK-Stellungnahme wird ebenfalls angemerkt, dass die Herstellungsprüfungen der Komponenten in den verwendeten Spezifikationen sich im Umfang von den Anforderungen des KTA-Regelwerks unterscheiden. Die Prüfungen sind in den an der MPA vorliegenden Spezifikationen RE-L 1508 [35], RE-L 3195 [36] und KS D 3041/50 [37] nicht ausreichend beschrieben. Hier wird auf Werkstoffprüfblätter (WPD), Arbeitsvorschriften (AVS) und Bau-Prüfblätter (BPB) verwiesen, die nicht vorlagen.

Es ist nun also zu diskutieren, ob zwischen den wiederkehrenden Prüfungen Schädigungen am Rohrleitungssystem entstehen könnten, die bei der Einwirkung von Erdbebenlasten zum Versagen der Komponenten führen. Wie in Abschnitt 2.3 erläutert, werden in den betrachteten Kernkraftwerken wiederkehrende Prüfungen durchgeführt, deren Umfang und Frequenz weitgehend dem Vorgehen im KTA-Regelwerk entsprechen. Zusätzlich werden in engeren Zeitintervallen Sichtprüfungen bei Anlagenbegehungen durchgeführt. Die Prüfintervalle sind so festgelegt, dass zwischen zwei Prüfzeitpunkten keine Schädigungen auftreten, die die strukturelle Integrität der Komponente und somit den sicheren Betrieb beeinträchtigen. Die betrachteten Rohrleitungssysteme sind entsprechend ihrer Auslegung gegen Erdbebenlasten gerüstet. Die WKP gewährleistet in ausreichendem Maße, dass die Rohrleitungen sich während des Betriebs in einwandfreiem Zustand befinden. Demnach ist eine Erhöhung von Prüfumfang und Prüffrequenz im Hinblick auf mögliche Erdbebenszenarien nicht notwendig.

3 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Im Vorhaben wurden die Prüfmöglichkeiten für die Rohrleitungssysteme der nuklearen Nachwärmeabfuhr mit dem Fokus auf den wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen betrachtet.

Die KTA-Regel 3211.4 legt fest, dass Anforderungen an Komponenten in Systemen, die nur mittelbar der Nachwärmeabfuhr dienen - dies sind die nicht aktivitätsführenden Zwischenkühlwassersysteme und Nebenkühlwassersysteme - anlagenspezifisch unter Berücksichtigung der Mehrfachauslegung (z. B. Redundanz, Diversität) festzulegen sind. Die zu beantwortende Frage war, ob die Prüfungen, die in den deutschen Kernkraftwerken durchgeführt werden, ausreichend sind und dem Stand von W&T entsprechen. Es ist anzumerken, dass die RSK sich zeitgleich mit der gleichen Thematik beschäftigt hat und dazu eine umfangreiche Stellungnahme veröffentlicht hat [1].

Zunächst wurde der aktuelle Kenntnisstand aufgearbeitet. Das ist in Abschnitt 2.1 zusammengefasst. Die relevanten Werkstoffe für die Rohrleitungen der Nachwärmeabfuhr sind ferritische Stähle. Teilweise kommen duktile Gusseisenrohre (GGG) oder Spannbetonrohre als erdverlegte Rohrleitungen zum Einsatz. Der häufigste Schadensmechanismus sind Korrosionsschäden. Diese sind oft auf Beschichtungsschäden zurückzuführen.

Es wurden Prüfverfahren zur Detektion von Korrosion beschrieben und speziell auf die Problematik der erdverlegten Rohrleitungen eingegangen. Mithilfe der Sichtprüfung kann Korrosion sehr gut und früh erkannt werden. Ist die Rohrleitung nicht von der Innenseite zugänglich, kann Wanddickenabtrag zuverlässig über Ultraschallwanddickenmessungen detektiert werden. Die Prüfungen werden punktuell oder flächig auf einem Messraster durchgeführt. Es ist jedoch nicht möglich die Rohrleitungen zu 100 Prozent mit der Ultraschallwanddickenmessung zu prüfen. Die Verwendung von Durchstrahlungsprüfungen ist ebenfalls möglich.

Wie bereits erwähnt, sind die Rohrleitungssysteme der NWA aus der KTA 3211.4 ausgeschlossen. Die Oberflächen entsprechender Rohrleitungen der äußeren Systeme, die in KTA 3211.4 enthalten sind, sollen alle 8 Jahre einer Sichtprüfung unterzogen werden. Weiterführende ZfP-Untersuchungen sind nur notwendig, wenn bei der Sichtprüfung verdächtige Bereiche identifiziert wurden. Wanddickenprüfungen auf Materialabtrag sind anlagenbezogen festzulegen und an ausgewählten Bereichen durchzuführen.

Im nächsten Schritt wurden bei Betreibern Daten zu den Prüfungen an den Rohrleitungssystemen der NWA angefragt. Es konnten Daten aus den Kraftwerken GKN2 und KKP2

betrachtet werden. Für diese beiden Kernkraftwerke konnte gezeigt werden, dass die anlagenbezogen durchgeführten Prüfungen an den betrachteten Rohrleitungssystemen im Wesentlichen den Vorgaben der KTA 3211.4 genügen. Im Rahmen der alle vier Jahre stattfindenden Revisionen, werden die Rohrleitungen von innen und außen einer Sichtprüfung unterzogen. Teilweise kommen hier kameragestützte Verfahren zum Einsatz. Verdächtige Bereiche werden mit weiterführender Prüftechnik genauer untersucht. Darüber hinaus finden jährlich Anlagenbegehungen statt, im deren Rahmen alle sichtbaren Bereiche inspiziert werden. Hierbei können Korrosion und Leckagen frühzeitig festgestellt werden. Im Rahmen der Revisionen finden zudem weiterführende Prüfungen in Bereichen statt, die sich in der Vergangenheit als kritisch gezeigt haben. Auch hier genügen die Prüfungen dem KTA-Regelwerk, das beispielsweise für Kleinleitungen < DN50 und Wanddickenprüfungen ohnehin anlagenbezogene Prüfvorgaben verlangt.

Für erdverlegte Rohrleitungen wurden Prüfverfahren aus anderen Industriefeldern, wie der Pipelineprüfung und der Kanalprüfung erläutert. Aufgrund der massiven Korrosionsschutzbeschichtungen der Rohre und der verwendeten speziellen Werkstoffe, sind auch hier Sichtprüfungen das Mittel der Wahl. In unzugänglichen Bereichen kommen hier automatisierte Prüfsysteme mit Kameras und erweiterter Prüftechnik zum Einsatz.

Der internationale Vergleich mit dem ASME-Code [38] und Prüfvorschriften in der Schweiz [39] zeigt, dass hier ähnliche Prüfintervalle und Prüfvorgaben für die Rohrleitungssysteme der NWA gelten. Hier sind Sichtprüfungen alle 10 Jahre vorgegeben, wobei ebenfalls ein Teil der Prüfungen bereits nach kürzerer Zeit durchgeführt sein muss. Im Grundmaterial werden zusätzlich Wanddickenmessungen eingesetzt. Hier gelten die gleichen Prüfintervalle.

Die im KTA-Regelwerk geforderten sowie die in den Kernkraftwerken anlagenspezifisch festgelegten zerstörungsfreien Prüfungen sind für die zu erwartenden Schädigungen sinnvoll gewählt und werden in angemessener Weise ausgeführt. Es ist dennoch sinnvoll und relativ einfach umsetzbar, die Rohrleitungssysteme der Nachwärmeabfuhr in der KTA 3211.4 mit einzuschließen.

Im letzten Abschnitt sollte ermittelt werden, ob die Prüfintervalle und Prüfvorgaben im Hinblick auf Erdbebenlasten angepasst werden sollten. Die Erdbebenbemessung der deutschen Kernkraftwerke wurde im Rahmen der EU-Stresstests 2014 bewertet. Alle Anlagen besitzen zum Bemessungserdbeben noch Reserven von mehr als einer Intensitätsstufe. In der RSK-Stellungnahme [1] wurden speziell die Rohrleitungssysteme der NWA betrachtet. Das Erdbebenrisiko in Deutschland ist insgesamt als gering einzustufen. Eine Anpassung

des Prüfumfanges oder der Prüfintervalle hat im Hinblick auf die Erdbebensicherheit keine Auswirkungen. Großflächige Wanddickenminderungen, die im Falle eines Erdbebens zum Versagen der Rohrleitungen führen könnten, werden durch die wiederkehrenden Prüfungen frühzeitig entdeckt und sind somit ausgeschlossen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die zerstörungsfreien Prüfungen an den Rohrleitungssystemen der Zwischenkühl- und Nebenkühlwassersysteme auf dem aktuellen Stand von W&T stattfinden. Die Auswahl der Prüfverfahren ist vernünftig und zielführend. Die Prüfintervalle sind mit internationalen Vorschriften vergleichbar und in der Regel etwas konservativer. Die Prüfungen decken sich außerdem zum Großteil mit den Vorgaben im KTA-Regelwerk, so dass eine Ausweitung der KTA 3211.4 auf diese Systeme problemlos möglich ist.

4 Literatur

- [1] RSK, „Stellungnahme - Zwischen- und Nebenkühlwassersystem“, RSK Stellungnahme, 11. Dez. 2019.
- [2] K.-H. Herter und X. Schuler, „Vergleich wesentlicher Kriterien zwischen der Auslegung von Systemen nach Klassifizierung K2/A3 und nach Klassifizierung K3: GRS-Auftrag – Vertrag 3612R01320 – 820407 – UA 3290“, MPA Universität Stuttgart, 2015.
- [3] BMU, *Kernkraftwerke in Deutschland*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmu.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/nukleare-sicherheit/aufsicht-ueber-kernkraftwerke/kernkraftwerke-in-deutschland/> (Zugriff am: 16. Oktober 2020).
- [4] BMU, *Sicherheit in der Kerntechnik Ein Informationsportal von Bund und Ländern*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nuklearesicherheit.de/kerntechnische-anlagen/> (Zugriff am: 16. Oktober 2020).
- [5] RSK, „Rahmenspezifikation Basissicherheit von druckführenden Komponenten: 2. Anhang zu den RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren“, *BANz*, Jg. 167, 1979.
- [6] *Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises: Teil 1: Werkstoffe*, 3211.1, Kerntechnischer Ausschuss, Nov. 2017.
- [7] *Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des: Primärkreises Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung*, 3211.2, Kerntechnischer Ausschuss, Nov. 2013.
- [8] *Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises: Teil 3: Herstellung*, KTA 3211.3, Kerntechnischer Ausschuss, Nov. 2017.
- [9] *Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises: Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung*, KTA 3211.4, Kerntechnischer Ausschuss, Nov. 2017.
- [10] M. Elmas, H. Reck und D. von der Cron, „Betriebserfahrung mit Komponenten der sicherheitstechnisch wichtigen Nebenkühlwassersysteme in deutschen Anlagen mit DWR und SWR: Bericht zum FE-Vorhaben 3609R01320“, 2012.
- [11] BMU, Hg., „Interpretationen zu den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 22. November 2012“, 3. März 2015.
- [12] BMU, Hg., „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“, 3. März 2015.
- [13] *Nachwärmeabfuhrsysteme von Leichtwasserreaktoren*, KTA 3301, Kerntechnischer Ausschuss, Nov. 2015.
- [14] *Zerstörungsfreie Prüfung - Sichtprüfung - Allgemeine Grundlagen*, DIN EN 13018, DIN, Jun. 2016.
- [15] *Zerstörungsfreie Prüfung – Dickenmessung mit Ultraschall*, EN ISO 16809, DIN, 2019.
- [16] *Zerstörungsfreie Prüfung – Durchstrahlungsprüfung auf Korrosion und Ablagerungen in Rohren mit Röntgen- und Gammastrahlen – Teil 1: Tangentiale Durchstrahlungsprüfung*, EN ISO 20769-1, DIN, 2018.
- [17] K. Hesselbarth, *Gashochdruckleitungen: Sicherheit und Qualität ; ausgewählte aktualisierte Beiträge aus den Iro-Workshops 1990 - 1999*. Vulkan-Verlag, 2001. [Online]. Verfügbar unter: <https://books.google.de/books?id=rkru5BDgs9oC>
- [18] H. Willems, F. Niese, B. Jaskolla, T. S. Sickinger und O. A. Barbian, „Ein neues Prüfsystem für die Korrosionsprüfung von Gaspipelines mit kombinierter Ultraschall-, Wirbelstrom- und Streuflussmessung“ in *Jahrestagung 2010*, Erfurt, 2010.
- [19] NEA/CSNI, „Operating Experience Insights into Below Ground Piping: A Topical Report by the NEA Component Operational Experience, Degradation and Ageing Programme“ JT03432381, 24. Mai 2018.
- [20] IAEA, Hg., „Buried and underground piping and tank ageing management for nuclear power plants“, Vienna, IAEA Nuclear Energy Series NP-T-3.20, 2018.

- [21] A. Redmann und B. Bosseler, „Kanal- und Baugrunderkundung im nicht begehbaren Bereich: Voruntersuchungen“, IKT, Gelsenkirchen, 2007.
- [22] Transkor, *Magnetic Tomography Method (MT): Non-contact inspection of pipeline condition*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.elemancs.com/pubs/transkor_mtm.pdf (Zugriff am: 23. Oktober 2020).
- [23] P. M. Bach und J. K. Kodikara, „Reliability of Infrared Thermography in Detecting Leaks in Buried Water Reticulation Pipes“, *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing*, Jg. 10, Nr. 9, S. 4210–4224, 2017, doi: 10.1109/JSTARS.2017.2708817.
- [24] *Zerstörungsfreie Prüfung – Dichtheitsprüfung – Prüfgasverfahren*, EN ISO 20485, DIN, 2018.
- [25] EnBW Kernkraftwerk GmbH, „Ü*berwachungs-/Prüf- und Instandhaltungskonzept PE-System: GKN II“, 15. März 2013.
- [26] G. Grünthal, D. Mayer-Rosa und W. A. Lenhardt, „Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten - Deutschland, Österreich, Schweiz“ (de), *Bautechnik*, Jg. 75, Nr. 10, S. 753–767, 1998, doi: 10.1002/bate.199805380.
- [27] EnBW Kernkraftwerk GmbH, Hg., „Sicherheitsüberprüfung europäischer Kernkraftwerke vor dem Hintergrund des schweren Erdbebens und Tsunamis in Japan am 11. März 2011 (Europäischer Stresstest): Standortbericht des Betreibers für den Standort Neckarwestheim“.
- [28] EnBW Kernkraftwerk GmbH, Hg., „Sicherheitsüberprüfung europäischer Kernkraftwerke vor dem Hintergrund des schweren Erdbebens und Tsunamis in Japan am 11. März 2011 (Europäischer Stresstest): Standortbericht des Betreibers für den Standort Philippsburg“ 301/2011/10.
- [29] EON Kernkraft, Hg., „Abschlussbericht für den Europäischen Stresstest: Kernkraftwerk Grohnde“.
- [30] EON Kernkraft, Hg., „Abschlussbericht für den Europäischen Stresstest: Kernkraftwerk Brokdorf“.
- [31] EON Kernkraft, Hg., „Abschlussbericht für den Europäischen Stresstest: Kernkraftwerk Isar 2“.
- [32] KRB II Gundremmingen, Hg., „Abschlussbericht zum Stresstest europäischer Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan)“, 24. Okt. 2011.
- [33] Kernkraftwerke Lippe-Ems GmbH, Hg., „Risiko- und Sicherheitsbewertung europäischer Kernkraftwerke (EU Stresstest)“, 31. Okt. 2011.
- [34] *Auslegung von Kraftwerken gegen seismische Einwirkungen: Teil 1: Grundsätze*, 2201.1, Kerntechnischer Ausschuss, Nov. 2011.
- [35] *Spezifikationen für Rohrleitungen Kernkraftwerke Gundremmingen II, Block B und C*, RE-L 1508 Index c, Aug. 1977.
- [36] *Spezifikationen für Rohrleitungen im Geltungsbereich der "Rahmenspezifikation Basissicherheit von druckführenden Komponenten" (RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren, Kapitel 4.2 "Äußere Systeme")*, Kernkraftwerk Philippsburg (KKP), RE-L 3185, Mrz. 1980.
- [37] *Spezifikationen Rohrleitungen K3/K4, DWR 1300 MW*, KS D 3041/50, Feb. 1983.
- [38] *BPVC Section XI - Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components*, ASME, 2019.
- [39] *Festlegung NE-14: Wiederholungsprüfungen von nuklear abnahmepflichtigen mechanischen Komponenten der Sicherheitsklassen 1 bis 4*, Nuklearinspektorat, Jan. 2005.

