



RESSORTFORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

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

Los 2:
Forschungsnähere Themen –
Bericht zu Arbeitspaket 2

Vorhaben 4717Ro1371

AUFTRAGNEHMER:IN
TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG

Dr. Daniel Bour
Andreas Köstler
Ralf Trieglaff



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

Los 2: Forschungsnähere Themen – Bericht zu Arbeitspaket 2

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-011/21

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2021090628439

Berlin, August 2021

Impressum

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

RESSORTFORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Auftragnehmer:in
TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG

Dr. Daniel Bour
Andreas Köstler
Ralf Trieglaff

030 184321-0
www.base.bund.de

Stand: August 2021

Forschungsbericht

an das

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)

„Zentrale Untersuchungen und Auswertung zu aktuellen Fragestellungen im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken im Leistungsbetrieb – Los 2: Forschungsnähere Themen“

FKZ: 4717R01371

AP 2: Beschreibung der Anforderungen an zusätzliche Nachweise nach Reparaturen von Rohrleitungen

30.04.2020

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung der Auftraggeberin übereinstimmen.

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht beinhaltet die Darstellung der durchgeführten Untersuchungen und deren Ergebnisse für das **Arbeitspaket 2** dieses Forschungsvorhabens hinsichtlich der Beschreibung der Anforderungen an zusätzliche Nachweise nach Reparaturen von Rohrleitungen.

Im ersten Schritt wird der aktuelle nationale Kenntnisstand anhand von Herstellerspezifikationen und kerntechnischem Regelwerk bezüglich für ohne Druckprüfung eingesetzte oder veränderte Bauteile dargestellt. Ein möglicher Verzicht auf die Druckprüfung und dann ggf. durchzuführende Ersatzmaßnahmen oder -prüfungen sind im deutschen kerntechnischen Regeln nicht geregelt. In den Rohrleitungsspezifikationen sind Regelungen zu den grundsätzlich durchzuführenden Druckprüfungen enthalten. Im Falle von nicht durchzuführenden oder durchführbaren Druckprüfungen finden sich in diesen Spezifikationen Festlegungen für diesbezügliche Ersatzmaßnahmen.

Es wurde eine Recherche durchgeführt, um für deutsche Kernkraftwerke konkrete Beispiele herauszuarbeiten, bei denen mittels Schweißen Reparatur- oder Austauschmaßnahmen an bestehenden Komponenten oder Rohrleitungen durchgeführt wurden, von der Durchführung einer Druckprüfung jedoch aus verschiedenen Gründen abgesehen wurde. Es wird deutlich, dass tatsächlich realisierten Umfänge und Arten von Ersatzmaßnahmen variieren. Vor dem Hintergrund, dass die Spezifikationen z. T. Handlungsspielräume bei der Festlegung der durchzuführenden Ersatzmaßnahmen gestatten, spielen sowohl die örtlichen Gegebenheiten hinsichtlich der Bauteilgeometrien, Werkstoffe und Betriebsbedingungen, der sicherheitstechnischen Bedeutung der betreffenden Komponenten oder Systeme als auch individuelle Erfahrungen und Beurteilungen der bei der Vorprüfung der Herstellungs-/Reparaturunterlagen beteiligten Vertreter der Betreiber und Sachverständigenorganisationen eine Rolle.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde rechnerisch analysiert, ob und in welcher Weise eine Wasserdruckprüfung tatsächlich zur Reduzierung von Schweiß Eigenspannungen führt. Zu diesem Zweck wurden Belastungszustände mit und ohne Druckprüfung simuliert und miteinander verglichen. Dabei wurden zwei unterschiedliche Fälle einer Rohrschweißung betrachtet. Im Fall 1 - „durchgehende, mehrlagige Schweißnaht“ wird auf Eigenspannungsprofile aus der Literatur zurückgegriffen. Im Fall 2 - „Reparaturnaht“ werden eigenständige elastisch-plastische FEM-Simulationen für verschiedene Rohrgeometrien und Belastungszustände vorgenommen.

Für die Berechnung der Schweiß eigenspannungen einer Reparaturnaht wurden rotations-symmetrische FEM-Modelle einer Rohrleitung mit Umfangsnaht erstellt. Die Schweißnaht wurde vereinfacht als zwei- oder mehrlagige Schweißnaht modelliert, wobei die unteren (inneren) Lagen als vorhanden angenommen und lediglich die obere (äußere) Lage als neu aufgebraute Schweißlage simuliert wird. Als Belastungen wurden symmetrische Temperatur- und Druckbelastungen aufgeprägt. Lokal wirkende Rohrleitungskräfte wurden nicht berücksichtigt. Um eine gewisse Variationsbreite zu erzeugen, wurden verschiedene Rohrgeometrien mit unterschiedlichen Werkstoffen und Betriebsbelastungen modelliert. Bei der

Auswahl wurde jeweils Bezug auf reale Bauteilgeometrien genommen. Die Belastungen wurden entsprechend den Betriebsbedingungen in den Kraftwerksanlagen definiert.

Zur Bewertung des Einflusses der Druckprüfung wurden für ausgewählte Fälle zusätzlich bruchmechanische Analysen zur Bestimmung der kritischen Risstiefe und des zyklischen Risswachstums (Ermüdungsrisswachstum) durchgeführt.

Im Ergebnis unserer Untersuchungen stellen wir fest, dass die Schweißeigenstressprofile für austenitische und ferritische Schweißnähte gleichen Aufbaus grundsätzlich als vergleichbar eingeschätzt werden können. Es ergeben sich auch keine grundlegend anderen Schlussfolgerungen hinsichtlich der Auswirkungen von Eigenspannungsumlagerungen, nur Unterschiede im Detail. So sind für Austenit Druckprüfungen zum Umbau von Schweißeigenstressungen sind nur bei Betriebstemperaturen unterhalb 200°C zielführend und bei Betriebstemperaturen oberhalb 200°C sind die Betriebsbelastungen abdeckend bzgl. des Eigenspannungsumbaus. Für Ferrit bewirkt die Druckprüfung geringe Effekte im Umbau von Eigenspannungen und die gleiche Wirkung kann durch die Betriebsbelastung bei höheren Temperaturen erreicht werden.

Für die Betrachtung der möglichen Auswirkungen einer Druckprüfung im Rahmen bruchmechanischer Bewertungen ist der Umstand entscheidend, dass eine Druckprüfung bei Raumtemperatur im Gegensatz zu einer Wärmebehandlung am Ende des Schweißvorgangs keinen Abbau, sondern lediglich eine Umlagerung der Eigenspannungen bewirkt: Spannungsspitzen werden durch das lokale Fließen abgebaut, die Vergleichmäßigung des Eigenspannungsprofils führt aber gleichzeitig zum Abbau von Druckeigenstressungen.

Das so geänderte Gesamtspannungsprofil über der Wanddicke, d. h. entlang des potentiellen Risswachstumspfades, führt trotz des Abbaus von Spannungsspitzen nicht notwendigerweise zu einer Verlangsamung des möglichen Ermüdungsrisswachstums und größeren kritischen Rissgrößen im Vergleich zum Eigenspannungsprofil ohne Druckprüfung.

Der Effekt einer Druckprüfung auf das mögliche Wachstum vorhandener Schweißnahtrisse und das Erreichen kritischer Rissgrößen ist i.a. vernachlässigbar gering, kann aber sogar ungünstig sein. Ein nennenswerter Nutzen einer Druckprüfung für bruchmechanische Bewertungen ist nicht ableitbar. Dies gilt sowohl für Fertigungsnähte als auch für Reparaturnähte.

Aus den durchgeführten Analysen, sowohl zum Stand der Anwendung der Druckprüfung nach Instandhaltungsarbeiten in den deutschen Kernkraftwerken als auch aus den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten rechnerischen Analysen, lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass die wesentlichen Ziele einer Druckprüfung durch die für ferritische, höherfeste Stähle gemäß Regelwerk nach dem Schweißen geforderten Spannungsarmglühungen sowie durch geeignete Ersatzmaßnahmen kompensiert werden können bzw. durch das Einwirken der betrieblichen Bedingungen erreicht werden.

Im Fazit stellen wir fest, dass die Durchführung einer Druckprüfung zum Abschluss von Errichtungs- oder Instandhaltungsmaßnahmen an drucktragenden Komponenten in Kernkraftwerken im Hinblick auf die Zielstellung, nämlich ein integraler Nachweis der Integrität und Dichtheit zu sein, durch Maßnahmen bei der Fertigung (Wärmebehandlung) sowie der begleitenden Kontrolle und ZfP ersetzbar ist. Im Hinblick auf den Eigenspannungszustand und Spannungsspitzen in den geschweißten Bauteilbereichen können die betrieblichen Beanspruchungen mindestens denselben Effekt wie eine bei Raumtemperatur durchgeführte Druckprüfung ergeben.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2	
1	Abkürzungsverzeichnis	7
2	Einleitung	8
3	Grundlagen, Zielstellung und Vorgehensweise	9
3.1	Grundlagen für die Druckprüfung in deutschen Kernkraftwerken	9
3.2	RSK-Stellungnahme aus der 455. Sitzung am 21.02.2013	11
3.3	Zielstellung von Druckprüfungen und Ableitung der Zielstellung des Forschungsvorhabens	13
3.4	Vorgehensweise	14
4	Aufarbeitung des aktuellen nationalen Kenntnisstandes anhand von Herstellerspezifikationen und kerntechnischem Regelwerk bezüglich für ohne Druckprüfung eingesetzte oder veränderte Bauteile	15
4.1	Kerntechnisches Regelwerk	15
4.2	Kerntechnische Spezifikationen	16
4.2.1	KONVOI-Spezifikationen	17
4.2.2	BRAPUL-Spezifikationen	19
4.2.3	Spezifikation KKK-WBPV	19
5	Darstellung konkreter, für ohne Druckprüfung in deutschen KKW eingesetzte oder veränderte Bauteile umgesetzter Vorgehensweisen zum Nachweis der Integrität	21
5.1	Rohrleitungsschweißungen	22
5.2	Behälterschweißung	24
5.3	Armaturensanierung	24
6	Darstellung der Auswirkung einer Wasserdruckprüfung auf eine geschweißte Rohrleitungskomponente im Hinblick auf deren Betriebsverhalten und Vergleich mit einer entsprechenden Komponente ohne Wasserdruckprüfung	26
6.1	Schweißeigenspannungen	26
6.1.1	Mehrlagige, durchgehende Schweißnaht	26
6.1.2	Reparaturnaht	28
6.1.2.1	Vorgehen	28

6.1.2.2	Modellbeschreibung und Berechnungsfälle	29
6.2	Bruchmechanisches Bewertungsmodell	32
6.2.1	Rissmodelle	32
6.2.2	Bruchmechanische Werkstoffkennwerte	32
6.3	Berechnungsergebnisse	34
6.3.1	Berechnungsfall Nr. 1 – Austenit, 1.4550, DN80	34
6.3.1.1	Mehrlagige, durchgehende Schweißnaht	34
6.3.1.2	Reparaturnaht	39
6.3.1.2.1	Spannungsanalyse	39
6.3.1.2.2	Bruchmechanische Bewertung	42
6.3.2	Berechnungsfall Nr. 2 – Ferrit, 1.6310, DN80	45
6.3.2.1	Mehrlagige, durchgehende Schweißnaht	46
6.3.2.2	Reparaturnaht	49
6.3.2.2.1	Spannungsanalyse	49
6.3.2.2.2	Bruchmechanische Bewertung	52
6.3.3	Berechnungsfall Nr. 3 – Ferrit, 1.6210, DN700	54
6.3.4	Berechnungsfall Nr. 4 – Austenit, 1.4550, DN300	56
6.3.5	Berechnungsfall Nr. 5 – Austenit, 1.4550, DN80	57
6.4	Fazit aus den bruchmechanischen Betrachtungen	59
7	Zusammenfassende Bewertung im Hinblick auf die deutschen Kernkraftwerke	60
8	Unterlagen	62

1 Abkürzungsverzeichnis

ASME	American Society of Mechanical Engineers
B	Betreiber
BfE	Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit
BMU	Bundesumweltministerium
D_i	lichter Innendurchmesser
DFU	druckführende Umschließung des Reaktorkühlmittels
DGRL	Druckgeräterichtlinie
DN	Nennweite
DP	Druckprüfung
DruckBehV	Druckbehälterverordnung
DWR	Druckwasserreaktor
FAD	Failure Assessment Diagram
FDBR	Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e.V.
H	Hersteller
K	Kunde/Betreiber
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
MPA	Materialprüfanstalt
MT	Magnetpulverprüfung
PG	Prüfgruppe
PT	Eindringprüfung
R_e	Streckgrenze
R_m	Zugfestigkeit
RSK	Reaktor-Sicherheitskommission
RT	Durchstrahlungsprüfung
SH	Sachverständiger beim Hersteller
SB	Sachverständiger der Behörde
t	Wanddicke
TRB	Technische Regeln Druckbehälter
UT	Ultraschallprüfung
VGB	Verein der Großkraftwerksbetreiber
VT	Sichtprüfung
WB	Wärmebehandlung

2 Einleitung

Mit dem Vertrag vom 16.08.2018 unter dem Aktenzeichen 4717R01371 hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG mit der Umsetzung des Forschungsvorhabens des nachfolgend genannten Themas beauftragt:

„Zentrale Untersuchungen und Auswertung zu aktuellen Fragestellungen im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken im Leistungsbetrieb – Los 2: Forschungsnähere Themen“.

Ziel dieses Vorhabens ist, den aktuellen Kenntnisstand zu ausgewählten Themenbereichen für Kernkraftwerkskomponenten (Brennelemente, Rohrleitungen nach Reparatur) aufzuarbeiten und nach Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) zu bewerten sowie Arbeiten zur Verwendung von K_e -Faktoren im Rahmen der Nachweisführung bei Ermüdungsanalysen durchzuführen. Dabei gliedert sich das Vorhaben in folgende drei Arbeitspakete (AP).

- AP 1: Materialanforderungen an Brennelemente
- AP 2: Beschreibung der Anforderungen an zusätzliche Nachweise nach Reparaturen von Rohrleitungen
- AP 3: Kenntnisstand und Ermittlung von realistischen K_e -Faktoren

Der vorliegende Bericht beinhaltet die Darstellung der durchgeführten Untersuchungen und deren Ergebnisse für das **AP 2** (Beschreibung der Anforderungen an zusätzliche Nachweise nach Reparaturen von Rohrleitungen). Entsprechend der Ausschreibung bestehen zum AP 2 die folgenden Anforderungen:

Gemäß den sicherheitstechnischen Regeln KTA 3201.3 und KTA 3211.3 ist im Rahmen der Herstellung von druckführenden Komponenten des Primärkreises und von druck- und aktivitätsführenden Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren die erste Druckprüfung an der Komponente nach erfolgreichem Abschluss aller im Zuge der Herstellung vorgesehenen Prüfungen und Kontrollen durchzuführen. Diese erste Druckprüfung (Festigkeitsprüfung) erfolgt als Wasserdruckprüfung, wobei die Höhe des Prüfdrucks nach KTA 3201.2 bzw. KTA 3211.2 festzulegen ist. Dabei ist die erste Druckprüfung bei Komponenten gefertigt aus Walz- und Schmiedestählen mit dem 1,3-fachen Auslegungsdruck und bei Komponenten gefertigt aus Stahlguss mit dem 1,5-fachen Auslegungsdruck als Prüfdruck durchzuführen. Die Prüftemperatur ist nach Sprödbruchkriterien festzulegen.

Nach Reparaturen wird, falls eine Erstdruckprüfung nicht möglich ist, in Ausnahmefällen auf die Druckprüfung verzichtet. Die Voraussetzungen für die Reparaturen und den Verzicht auf die Druckprüfung sind im Rahmen dieses Vorhabens zu ermitteln.

Das Arbeitspaket AP 2 enthält folgenden Untersuchungsumfang:

1. Aufarbeitung des aktuellen nationalen Kenntnisstandes anhand von Herstellerspezifikationen und kerntechnischem Regelwerk bezüglich für ohne Druckprüfung eingesetzte oder veränderte Bauteile zu erbringende Nachweise,
2. Darstellung konkreter, für ohne Druckprüfung in deutschen KKW eingesetzte oder veränderte Bauteile umgesetzter Vorgehensweisen zum Nachweis der Integrität und
3. Darstellung der Auswirkung einer Wasserdruckprüfung auf eine geschweißte Rohrleitungskomponente im Hinblick auf deren Betriebsverhalten und der Vergleich mit einer entsprechenden Komponente ohne Wasserdruckprüfung

3 Grundlagen, Zielstellung und Vorgehensweise

3.1 Grundlagen für die Druckprüfung in deutschen Kernkraftwerken

In der aktuell gültigen Druckgeräterichtlinie (DGRL) 2014/68/EG der Europäischen Union /U 1/ wird in Anhang I, Abschnitt 3.2.2 gefordert, dass die Abnahme der Druckgeräte eine Druckfestigkeitsprüfung einschließt, die normalerweise in Form eines hydrostatischen Druckversuches durchgeführt wird. Der Druck soll mindestens dem höheren der folgenden Werte entsprechen:

- dem 1,25-fachen der Höchstbelastung des Druckgerätes im Betrieb unter Berücksichtigung des höchstzulässigen Drucks und der höchstzulässigen Temperatur oder
- dem 1,43-fachen Wert des höchstzulässigen Drucks.

In deutschen Kernkraftwerken sind diese Regelungen nicht in allen Systembereichen maßgeblich. Abgeleitet aus früheren Festlegungen des konventionellen Regelwerkes (DruckbehV /U 39/ bzw. in den zugehörigen Technischen Regeln zur DruckbehV – z. B. TRB 522 /U 33/), in dem niedrigere Prüfdrücke festgelegt waren als in der gültigen DGRL, wurde für die druckführende Umschließung des Reaktorkühlmittels und die äußeren Systeme ein speziell für die Anforderungen der Kerntechnik abgestimmtes Regelwerk (Sicherheitstechnische Regeln des Kerntechnischen Ausschusses – z. B. KTA 3201.3 /U 2/ und KTA 3211.3 /U 3/ - siehe Abschnitt 4.1) entwickelt. Dieses enthält abweichend von den o. g. Anforderungen, die aus der aktuell gültigen DGRL resultieren, z. T. weiterhin andere Vorgaben an die anzuwendenden Prüfdrücke und Prüfandbedingungen.

Gemäß /U 38/ führte die Einführung der DGRL und die dadurch anzusetzenden höheren Prüfdrücke bei in den Geltungsbereich der DGRL fallenden Druckgeräten dazu, dass die in den KTA-Regeln KTA 3201.3 /U 2/ und KTA 3211.3 /U 3/ festgelegte Vorgehensweise überdacht wurde. Die dazu im Arbeitsgremium der KTA 3201.2 /U 27/ durchgeführte Beratung

fürte jedoch zu dem Ergebnis, die zur Höhe des Prüfdruckes bei der erstmaligen Druckprüfung enthaltenen Anforderungen unverändert zu belassen, da die im KTA-Regelwerk festgelegte Höhe des Prüfdrucks in Verbindung mit

- den eingeschränkt zugelassenen Werkstoffen mit hoher Zähigkeit,
- den hohen Anforderungen an die Herstellungsüberwachung und -prüfung,
- dem reduzierten Beanspruchungsniveau (Berücksichtigung von R_m) und
- den umfangreichen wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen

Bestandteil des in sich geschlossenen Regelwerkes ist und eine Erhöhung des Prüfdruckes keinen zusätzlichen Sicherheitsgewinn erwarten lässt.

Neben den Vorgaben, Druckprüfungen an neugefertigten Komponenten oder Systemteilen durchzuführen, werden im kerntechnischen Regelwerk /U 2/ und /U 3/ (siehe Abschnitt 4.1) zusätzlich auch Festlegungen zu weiteren Bauprüfungen (z. B. Sichtprüfungen sowie zerstörungsfreie Oberflächen- und Volumenprüfungen) festgeschrieben. Die Gesamtheit aller Bauprüfungen dient dem Nachweis der Qualität und Integrität der Komponenten und Systemteile bei Betriebs- und Prüfbedingungen und ggf. auch bei zu berücksichtigenden Sonderbelastungen (z. B. aus EVA/EVI).

Die genauen Festlegungen, für welche Komponenten oder Systembereiche welche der o. g. Vorgaben hinsichtlich der Druckprüfungen und den zusätzlichen Bauprüfungen zu berücksichtigen sind, sind auf Basis des kerntechnischen bzw. konventionellen Regelwerkes in kerntechnischen Spezifikationen (siehe Abschnitt 4.2) festgeschrieben.

Zum Teil enthalten diese Spezifikationen auch Regelungen zum Vorgehen, dass Druckprüfungen nicht möglich sind bzw. in begründeten Fällen nicht durchgeführt werden sollen. Diese Festlegungen basieren ebenfalls auf bestehenden Regelungen im konventionellen Regelwerk.

In der Druckgeräterichtlinie /U 1/ findet sich die folgende Festlegung für den Entfall der Druckprüfung:

„Ist der Druckversuch nachteilig oder nicht durchführbar, so können andere Prüfungen, die sich als wirksam erwiesen haben, durchgeführt werden. Für andere Prüfungen als den hydrostatischen Druckversuch sind zuvor zusätzliche Maßnahmen, wie zerstörungsfreie Prüfungen oder andere gleichwertige Verfahren anzuwenden.“

Druckprüfungen können nachteilig oder nicht durchführbar sein z. B. für Anschlussschweißnähte, wenn die erforderliche Absperrung zu Bereichen mit anderen Anforderungen (Werkstoffe, Geometrie, Temperatur) mit einem angemessenen Aufwand nicht möglich ist oder weil die Druckräume zu groß sind.

Im Merkblatt 21 des Fachverbandes Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e.V. (FDBR) /U 4/ sind weitere allgemeine Begründungen für einen Verzicht auf eine hydrostatische Druckfestigkeitsprüfung aufgeführt:

- *Nachträgliche Verunreinigung des Systems bei Demontage von temporären Druckprüfverschlüssen durch spanende Bearbeitung oder durch nachfolgende Schweißarbeiten.*
- *Erforderliche Verstärkung der Stahl- oder Betonkonstruktion aufgrund von Wasserlastauslegung, die für den Betrieb nicht erforderlich wäre.*
- *Systeme können sensibel gegenüber einem Prüfmedium oder dessen Rückständen reagieren oder Maßnahmen zur Trocknung oder Konservierung können nicht ausreichend durchgeführt bzw. sichergestellt werden.*
- *Vermeidung einer zusätzlichen Wärmebehandlung nach Trennung temporärer Verschlüsse und Neuschweißung für Werkstoffe, die nur eine begrenzte Gesamtwärmebehandlungsdauer zulassen.*
- *Eine Mindesttemperatur für das Druckprüfmedium bei warmfesten Stählen kann in Hinblick auf Mindestzähigkeitsanforderungen nicht sicher eingehalten werden.*

Besonders nach Reparaturen wird in manchen Fällen auf eine Druckprüfung des reparierten Bereiches verzichtet, weil der Aufwand für die Druckbeaufschlagung dieses Bereiches zu groß ist.

3.2 RSK-Stellungnahme aus der 455. Sitzung am 21.02.2013

Die Reaktorsicherheitskommission (RSK) wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) um eine Stellungnahme zur Notwendigkeit von Druck- und Dichtheitsprüfungen von Rohrleitungen nach Reparaturen gebeten. Nach Ansicht des BMU lassen die der RSK vorgestellten Reparaturkonzepte von Rohrleitungen und Anschlussstutzen der Druckführenden Umschließung (DFU) einen Ermessensspielraum der Betreiber hinsichtlich der Notwendigkeit einer Druck- und Dichtheitsprüfung zu. Das BMU bat die RSK, fachlich zu ermitteln, ob eine Ultraschallprüfung (UT) die Druckprüfung bei Änderungs- bzw. Instandsetzungsmaßnahmen, bei denen eine Wärmebehandlung, eine Reparaturschweißung oder eine Wiederherstellung eines Bauteils vorgenommen wurde, nach dem Stand von Wissenschaft und Technik ersetzen kann. Dabei sollte auch geprüft werden, ob bestehende Reparaturkonzepte mit den konventionellen sowie kerntechnischen Regelwerken in Einklang stehen, und ob das kerntechnische Regelwerk in diesem Punkt konkretisiert werden muss.

Im Laufe der Beratungen des RSK-Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE wurde der Beratungsauftrag in Abstimmung mit dem BMU erweitert. Zusätzlich zu den im schriftlichen Beratungsauftrag genannten Notwendigkeiten von Druck- und Dichtheitsprüfungen von Rohrleitungen nach Reparaturen wurde eine Stellungnahme zu den allgemeinen Bedingungen, wie z. B. den bei der Druckprüfung anzusetzenden Prüfdruck im Vergleich zum konventionellen Regelwerk, erbeten.

Im Ergebnis der Beratungen wird von der RSK in der Stellungnahme aus der 455. Sitzung am 21.02.2013 /U 7/ festgehalten, dass die Erstdruckprüfung mit den dabei erforderlichen ergänzenden zerstörungsfreien Prüfungen in der gemäß dem kerntechnischen Regelwerk

vorgesehenen Form und bei dem geforderten Prüfdruck weiterhin die Anforderungen an Ziel und Zweck dieser Prüfung erfüllt.

Eine Druckprüfung nach einer Reparatur, wie im Regelwerk gefordert, hat den Charakter einer Erstdruckprüfung. Im Fall von Reparaturen muss sichergestellt werden, dass die Komponenten den geforderten Qualitätszustand haben, wie er z. B. durch die Anforderungen der Basissicherheit gekennzeichnet wird. Hierbei ist die Ausführung bei Schweißreparaturen (Wärmeeinbringung) an denjenigen Komponenten, an die die Anforderungen der Basissicherheit zu stellen sind, von besonderer Bedeutung.

Daher kommt die RSK zu folgendem Beratungsergebnis:

- Wenn auf die Druckprüfung nach Reparaturen verzichtet werden soll, z. B., weil die erforderliche Absperrung zu Bereichen mit anderen Anforderungen (Werkstoffe, Geometrie, Temperatur) mit einem angemessenen Aufwand nicht möglich ist oder weil die Druckräume zu groß sind, ist sicherzustellen, dass die Ziele der Erstdruckprüfung dennoch erfüllt werden. Die Fehlerfreiheit kann dabei durch zwei diversitäre, nach dem KTA-Regelwerk qualifizierte zerstörungsfreie Prüfverfahren bestätigt werden. Dies kann z. B. durch den Einsatz von Prüfverfahren erreicht werden, die auf unterschiedlichen physikalischen Wechselwirkungsmechanismen mit dem Werkstoff beruhen.
- Da der Abbau von Eigenspannungen und Spannungsspitzen durch Einbringen von Druckeigenspannungen durch die zerstörungsfreien Prüfverfahren nicht erreicht werden können, ist in diesen Fällen bei ferritischen Werkstoffen eine Wärmebehandlung zum Abbau von Schweißspannungen erforderlich. Bei austenitischen Werkstoffen kann aufgrund der hohen Zähigkeit ggfs. auf eine Wärmebehandlung verzichtet werden.
- Durch eine kontinuierliche Überwachung des Lagenaufbaus mit ZfP-Verfahren (z. B. magnetische Streuflussprüfung, Eindringprüfung) bei der Schweißnahtfertigung ist eine fehlerbehaftete Fertigung nicht zu unterstellen.
- Einzelne neue oder reparierte Komponenten, die nach der Schweißnahtausführung nicht mehr druckgeprüft werden können, sind vorher einer Druckprüfung zu unterziehen.
- Es wird darauf hingewiesen, dass diese Anforderungen bislang noch nicht im kerntechnischen Regelwerk enthalten sind und empfohlen, diese oben genannten qualitätssichernden Maßnahmen zur Überprüfung der Integrität der reparierten Komponente durch einen erhöhten Einsatz von zerstörungsfreien Prüfmethoden und von diversitären Prüfverfahren in das kerntechnische Regelwerk (KTA-Regeln für die Herstellung druckführender Komponenten) aufzunehmen.

3.3 Zielstellung von Druckprüfungen und Ableitung der Zielstellung des Forschungsvorhabens

Folgende grundlegende Zielstellungen werden entsprechend /U 7/ mit Druckprüfungen verfolgt:

- Erkennung von Schädigungen und Identifikation von fehlerhaften Bauteilbereichen und Auslese von schadhafte Bauteilen,
- Abbau von Spannungsspitzen durch Einbringen von Druckeigenspannungen (plastisches Verformen),
- Abbau von Eigenspannungen aus der Herstellung, insbesondere von Schweißeigenspannungen, und
- Überprüfen und Feststellung der Dichtheit des Bauteils oder Systems.

Druckprüfungen nach durchgeführten Reparaturen haben den Charakter von Erstdruckprüfungen.

Folgende Ziele einer Druckprüfung können durch den ausschließlichen Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren nicht erreicht werden:

- Abbau von Spannungsspitzen durch Einbringen von Druckeigenspannungen (plastisches Verformen) und
- Abbau von Eigenspannungen aus der Herstellung, insbesondere von Schweißeigenspannungen.

Diese Zielstellungen der Druckprüfung können prinzipiell durch Wärmebehandlungen erreicht und kompensiert werden.

Zielstellung dieses Forschungsvorhabens ist es, unter Berücksichtigung der Festlegungen im nationalen kerntechnischen Regelwerk bzw. in den kerntechnischen Spezifikationen zur Gesamtheit aller durchzuführenden Bauprüfungen herauszuarbeiten, inwiefern bei nicht durchgeführten Druckprüfungen ein sicherheitstechnisches Defizit im Hinblick auf die Integrität oder Beanspruchbarkeit der Komponente oder des Systems besteht und wie dieses quantifiziert werden kann.

3.4 Vorgehensweise

In diesem Forschungsbericht wird in Abschnitt 4 der aktuelle nationale Kenntnisstand anhand von kerntechnischem Regelwerk und den z. T. daraus abgeleiteten Herstellerspezifikationen bezüglich für ohne Druckprüfung eingesetzte oder veränderte Bauteile zu erbringende Nachweise aufgearbeitet. Entsprechend der Festlegung im ersten Projektgespräch am 13.11.2018 wurden neben den entsprechenden Festlegungen für Komponenten/Systeme der druckführenden Umschließung des Reaktorkühlmittels und der äußeren Systeme auch die Festlegungen für andere Komponenten/Systeme (außerhalb des KTA-Regelwerkes) in den Kernkraftwerken aufgearbeitet, da diesen sowohl während der Leistungsbedriebs- und Nachbetriebsphase als auch beim Rückbau ebenfalls eine sicherheitstechnische Bedeutung hinsichtlich der Einhaltung der Schutzziele „Nachwärmeabfuhr“ und „Aktivitätseinschluss“ zukommen kann.

In Abschnitt 5 erfolgt die Darstellung konkreter, für ohne Druckprüfung in deutschen KKW eingesetzte oder veränderte Bauteile umgesetzter Vorgehensweisen zum Nachweis der Integrität, wobei die jeweils zu Grunde liegenden Spezifikationen und die realisierten Ersatzmaßnahmen angeführt werden.

In Abschnitt 6 werden die Auswirkung einer Wasserdruckprüfung auf eine geschweißte Rohrleitungskomponente im Hinblick auf deren Betriebsverhalten und der Vergleich mit einer entsprechenden Komponente ohne Wasserdruckprüfung rechnerisch analysiert und ausgewertet. Für die Analysen in Abschnitt 6 wurde gemäß der Druckgeräterichtlinie abdeckend der 1,43-fache Wert des Auslegungsdruckes angenommen.

In Abschnitt 7 erfolgt dann eine zusammenfassende Bewertung im Hinblick auf die deutschen Kernkraftwerke.

4 Aufarbeitung des aktuellen nationalen Kenntnisstandes anhand von Herstellerspezifikationen und kerntechnischem Regelwerk bezüglich für ohne Druckprüfung eingesetzte oder veränderte Bauteile

4.1 Kerntechnisches Regelwerk

Folgende Anforderungen der „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (SiAnf)“ /U 5/ betreffen druckführende Anlagenteile:

- a) die Anforderungen Nr. 3.1 (1) und Nr. 3.1 (2) aus dem dortigen Abschnitt 3.1 „Übergeordnete Anforderungen“,
- b) die Anforderungen Nr. 3.4 (1) und 3.4 (3) aus dem dortigen Abschnitt 3.4 „Anforderungen an die Druckführende Umschließung und die drucktragende Wandung von Komponenten der Äußeren Systeme“.

Diese Anforderungen sind in den Interpretationen zu den Sicherheitsanforderungen (Interpretation I-2) /U 6/ „Anforderungen an die Ausführung der Druckführenden Umschließung, der Äußeren Systeme sowie des Sicherheitsbehälters“ präzisiert:

Gemäß Interpretation 2.4.3 (3) sind alle Komponenten zum Abschluss der Herstellung einer Druckprüfung mit einem definierten Prüfdruck oberhalb des Auslegungsdrucks zu unterziehen (Erstdruckprüfung). Nach der Druckprüfung sind zerstörungsfreie Prüfungen in repräsentativem Umfang durchzuführen.

Diese Sicherheitsanforderungen sind im KTA-Regelwerk umgesetzt. Gemäß den kerntechnischen Regeln KTA 3201.3 /U 2/ und KTA 3211.3 /U 3/ ist im Rahmen der Herstellung von druckführenden Komponenten des Primärkreises und von Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren an der Komponente nach erfolgreichem Abschluss aller im Zuge der Herstellung vorgesehenen Prüfungen und Kontrollen eine erste Druckprüfung durchzuführen. Diese erste Druckprüfung (Festigkeitsprüfung) erfolgt als Wasserdruckprüfung mit dem 1,3-fachen Auslegungsdruck, bei Stahlguss mit dem 1,5-fachen Auslegungsdruck. Wiederkehrende Druckprüfungen müssen so durchgeführt werden, dass eine vergleichbare sicherheitstechnische Aussage wie bei der Erstdruckprüfung erzielt wird.

Ein möglicher Verzicht auf die Druckprüfung und dann ggf. durchzuführende Ersatzmaßnahmen oder -prüfungen sind in den o. g. kerntechnischen Regeln nicht geregelt.

Im Hinblick auf die im Abschnitt 3.2 wiedergegebene Feststellung der RSK, dass bei ferritischen Werkstoffen eine Wärmebehandlung zum Abbau von Schweißspannungen erforderlich ist, ist festzustellen, dass in den o. g. Regeln bereits geeignete Festlegungen enthalten sind, die diese Wärmebehandlungen fordern.

KTA 3201.3 /U 2/

In Abschnitt 7.2.1 dieser KTA ist für die Wärmebehandlung von Schweißverbindungen ferritischer Bauteile die folgende Regelung enthalten:

(1) Bauteile aus vergüteten oder normalgeglühten Erzeugnisformen sollen nach Durchführung von Verbindungsschweißungen einer Wärmebehandlung nach KTA 3201.1 unterzogen werden. Hiervon darf nur abgewichen werden, wenn dies durch entsprechende Untersuchungen belegt ist.

(2) Das abschließende Spannungsarmglühen ist vor der Druckprüfung durchzuführen.

KTA 3211.3 /U 3/

In Abschnitt 7.2.2 dieser KTA ist für die Wärmebehandlung von Schweißverbindungen ferritischer Bauteile die folgende Regelung enthalten:

(1) Werden vergütete oder normalgeglühte Bauteile geschweißt, sind diese grundsätzlich einer Wärmebehandlung zu unterziehen, wenn dies nach Tabelle 7-1 vorgesehen ist.

Von dieser Forderung darf nur abgewichen werden, wenn dies durch entsprechende Untersuchungen belegt ist. Für die Wärmebehandlung von Schweißverbindungen unterschiedlicher Stähle gilt grundsätzlich Tabelle 7-1.

(2) Ferritische, einseitig geschweißte Nähte mit Mediumberührung sind unabhängig von einer Wanddicke nach Tabelle 7-1 grundsätzlich einer Spannungsarmglühung zu unterziehen.

Diese Spannungsarmglühung darf entfallen:

a) bei Werkstoffen mit $R_{p0,2RT}$ gleich oder kleiner als 300 N/mm²,

b) bei Werkstoffen mit $R_{p0,2RT}$ größer als 300 N/mm² und gleich oder kleiner als 370 N/mm² bei Beaufschlagung mit Medium des Komponentenkühlsystems oder

c) mit besonderer Zustimmung des Sachverständigen.

4.2 Kerntechnische Spezifikationen

Alle in deutschen Kernkraftwerken installierten druckführenden Komponenten oder Systeme, die eine sicherheitstechnischen Bedeutung, z. B. im Hinblick auf Nachwärmeabfuhr, Störfallbeherrschung, Aktivitätseinschluss etc. haben, wurden entsprechenden Sicherheitsklassifizierungen zugeordnet. Hinsichtlich der Nomenklatur und Abgrenzung unterscheiden sich diese Klassen je nach Anlage und Errichtungszeitraum nur geringfügig (z. B. Klasse K1, Anforderungsstufe AS 1, Prüfklasse PK 1 für Komponenten/Systeme, die der druckführenden Umschließung angehören).

Ebenfalls in Abhängigkeit vom Betreiber, dem Errichtungszeitraum oder dem Reaktortyp wurden im Laufe der Jahrzehnte in Deutschland verschiedene Spezifikationen entwickelt

und fortgeschrieben, in denen in Abhängigkeit von den o. g. sicherheitstechnischen Klassifizierungen abgestufte Anforderungen an die in den deutschen Kernkraftwerken installierten druckführenden Komponenten oder Systeme hinsichtlich Herstellung und Prüfung festgeschrieben wurden. Die Tabelle 1 gibt einen vereinfachten Überblick zu den wichtigsten für Rohrleitungen geltenden kerntechnischen Spezifikationen in Deutschland.

Spezifikationsreihe	Klassifizierung					
	1 (DFU)	2 (Äußere Systeme)		3	4	5
		B / BS / BSH (mit Anforderungen an die Basissicherheit)	2			
WBPV	KKK-WBPV					
BRAPUL	KS D 1042-IS	KS D 2041-IS	IS 1501 IS 1501/50 (für ≤ DN50)			
KONVOI	KS D 1041/50 *) KS D 1042/50 KS D 7041/50 (für ≤ DN25)	KS D 2041/50 KS D 2042/50 *) KS D 2043/50 *) KS D 7041/50 (für ≤ DN50)	KS D 3041/50 KS D 3044/50 (für K4b) *) KS D 7041/50 (für ≤ DN50)	-		

*) Diese Spezifikationen enthalten keine individuellen Regelungen zu Druckprüfungen oder deren Entfall. Hierzu wird auf andere Spezifikationen verwiesen.

Tabelle 1 Zusammenstellung von in Deutschland angewendeten kerntechnischen Spezifikationen für Rohrleitungsherstellung und -verlegung

Aus dem im Abschnitt 4.1 genannten kerntechnischen Regelwerk (KTA 3201.3 /U 2/ und 3211.3 /U 3/) wurden die entsprechenden Anforderungen (u. a. für die Druckprüfungen) in all diejenigen Spezifikationen übernommen, die Regelungen für Rohrleitungen (> DN50) der druckführenden Umschließung sowie für Rohrleitungen mit Anforderungen an die Basissicherheit in den äußeren Systemen enthalten.

4.2.1 KONVOI-Spezifikationen

Die KONVOI-Spezifikationen wurden für die Errichtung der Konvoi-Kernkraftwerke KKE, GKN-2 und KKI-2 entwickelt und bis zum heutigen Zeitpunkt regelmäßig aktualisiert. Vor diesem Hintergrund haben auch zahlreiche Betreiber anderer Kernkraftwerke mittlerweile diese Spezifikationen übernommen und führen Neufertigungen bzw. Reparaturen nach diesen Spezifikationen aus. Somit gelten diese Spezifikationen fast in allen deutschen Kernkraftwerken.

In allen in der Tabelle genannten Rohrleitungsspezifikationen sind Regelungen zu den grundsätzlich durchzuführenden Druckprüfungen enthalten. Im Falle von nicht durchzuführenden oder durchführbaren Druckprüfungen finden sich in den nachfolgend genannten Spezifikationen Festlegungen für diesbezügliche Ersatzmaßnahmen:

KS D 2041/50, Rev. F „Rohrleitungen K2“ /U 8/

(Mitgeltend auch für KS D 1042, Rev. D „Rohrleitungen K1 (> DN25)“ /U 35/)

sowie gleichlautend in

KS D 3041/50, Rev. E „Rohrleitungen K3 / K4a“ /U 9/

Für diese Schweißnähte (die keiner Druckprüfung unterzogen werden) ist eine schriftliche Begründung für den Entfall der Druckprüfung erforderlich. Sie sind in den Isometrien sichtbar zu kennzeichnen. Vor Beginn der Schweißarbeiten ist von K und von SB eine Zustimmung notwendig.

Wenn auf die Druckprüfung verzichtet werden soll, z. B., weil die erforderliche Absperrung zu Bereichen mit anderen Anforderungen (Werkstoffe, Geometrie, Temperatur) mit einem angemessenen Aufwand nicht möglich ist oder weil die Druckräume zu groß sind, ist sicherzustellen, dass die Ziele der Druckprüfung dennoch erfüllt werden.

Die Fehlerfreiheit des Nahtvolumens kann dabei durch zwei diversitäre zerstörungsfreie Prüfverfahren bestätigt werden. Dies kann z. B. durch den Einsatz von Prüfverfahren erreicht werden, die auf unterschiedlichen physikalischen Wechselwirkungsmechanismen mit dem Werkstoff beruhen.

KS D 7041/50, Rev. E „Kleinrohrleitungen K1 ≤ DN25, K2 bis K4 ≤ DN50“

In der Spezifikation für Kleinrohrleitungen KS D 7041/50 /U 10/ findet sich folgende detailliertere Festlegung:

Für diese Schweißnähte (die keiner Druckprüfung unterzogen werden) ist eine formlose schriftliche Begründung für den Entfall der Druckprüfung erforderlich. Sie sind in den Isometrien sichtbar zu kennzeichnen. Vor Beginn der Schweißarbeiten ist in Gruppe A und B sowie in Gruppe C mit Funktionsfähigkeitsnachweis eine Zustimmung von SB notwendig.

Grundsätzlich sind die in Tabelle 8.8.4-1 genannten Prüfungen durchzuführen. Abweichungen sind mit K und in Gruppe A und B sowie in Gruppe C mit Funktionsfähigkeitsnachweis mit SB abzustimmen.

Fertigungsstatus und Prüfverfahren	Gruppen A, B und C mit Funktionsfähigkeitsnachweis	Gruppe C ohne Funktionsfähigkeitsnachweis
Kontrolle der Nahtvorbereitung	H, SH	H
Schweißüberwachung		H, K
Besichtigung der fertigen Naht		
PT der fertigen Naht		
RT der fertigen Naht	H, K, SH	

Tabelle 2 Prüfungen an Schweißnähten, die keiner Druckprüfung unterzogen werden (Tabelle 8.8.4-1 aus der KS D 7041/50 /U 10/)

4.2.2 BRAPUL-Spezifikationen

Die BRAPUL-Spezifikationen gelten in den Kernkraftwerken KBR und KKV.

Für die Anforderungsstufe AS 1 enthält die Spezifikation KS D 1042-IS /U 36/ in Abschnitt R 8.11.5 (6) folgende Festlegung:

Für Prüfungen an Schweißnähten, die keiner Druckprüfung unterzogen werden, ist eine Begründung erforderlich, die im Rahmen der Vorprüfung vorzulegen ist. In diesem Fall sind Zusatzmaßnahmen festzulegen und mit B und SB abzustimmen.

Für die Anforderungsstufe AS BS enthält die Spezifikation KS D 2041-IS /U 37/ in Abschnitt R 8.11.5 keine individuelle Regelung. Sie verweist auf die diesbezügliche Regelung der KONVOI-Spezifikation KS D 2041/50 /U 8/ (siehe Abschnitt 4.2.1).

Für die Anforderungsstufen AS 2 bis AS 4 enthält die Spezifikationen IS 1501 /U 11/ in Abschnitt R7931 (6) folgende Festlegung:

Wenn aus betrieblichen Gründen bei der Anschlussnaht oder nach Instandsetzungsmaßnahmen keine Druckprüfung erfolgen kann, sind mit H, B, SH und SB Ersatzmaßnahmen wie ein erhöhter ZfP-Umfang und Dichtheitsprüfung bei Betriebsbedingungen in den Vorprüfunterlagen festzulegen.

4.2.3 Spezifikation KKK-WBPV

Gemäß der Spezifikation KKK-WBPV /U 12/, die in den Kernkraftwerken KKK und KKB zur Anwendung kommt, sind Ersatzmaßnahmen für den Entfall der Druckprüfung gemäß Kapitel II (Rohrleitungen), Abschnitt 5.5 im Rahmen der Vorprüfung zu regeln. In der Tabelle 3 aus dieser Spezifikation sind die entsprechenden Sonderregelungen zusammengestellt.

Lfd. Nr.	Prüfbereich ¹⁾	Entfall der im Bauprüfblatt geforderten Druckprüfung	Ersatzmaßnahmen für den Entfall	Bemerkungen
1	Abblaseleitungen von Sicherheitsventilen. Entlüftungen und Entleerungen mit offenem Ende in den Prüfklassen 3 und 4 im Bereich der „PK 2 bis PK 5“.	Ja	Bei Abblaseleitungen von Sicherheitsventilen: Durchstrahlungsprüfung von 50 % der Rundnähte (RN).	Eintragung im Bauprüffolgeplan: „Druckprüfung entfällt, erhöhter Umfang der zerstörungsfreien Prüfungen“.
2	Im Anforderungsfall drucklose Rohrleitungen zwischen jeweils letzter Absperrung und Kondensator, Entspanner, Aktivsammeltank in den Prüfklassen 3 und 4 im Bereich der „PK 2 bis PK 5“.	Ja	Durchstrahlungsprüfung von 50 % der RN. Bei Stutzennähten (StN) Oberflächenprüfung anstelle einer Durchstrahlungsprüfung.	
3	Wasserführende Rohrleitungen der Prüfklassen 3 und 4 im Bereich der „PK 2 bis PK 5“ ohne Aktivitätsinventar. Auslegungstemperatur ≤ 65 °C und Auslegungsüberdruck ≤ 16 bar.	Ja, wenn - weit verzweigte, untereinander nicht absperrbare Leitungen nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand zu befüllen und zu entlüften sind, oder - kein Befüllanschluss vorhanden ist.	Der Umfang der zerstörungsfreien Prüfungen bei RN und StN ist zu verdoppeln und eine Dichtheitskontrolle bei Betriebsdruck ist vorzunehmen.	Eintragung im Bauprüffolgeplan: „Druckprüfung entfällt, erhöhter Umfang der zerstörungsfreien Prüfungen und Dichtheitskontrolle bei Betriebsdruck“.
4	Schließnähte („Garantienähte“)	Ja	100 % Volumenprüfung und 100 % Oberflächenprüfung außen	-

1) Für vergleichbare Systeme der Prüfklasse 5 ist in Abstimmung mit dem Betreiber diese Sonderregelung sinngemäß anzuwenden.

Tabelle 3 Sonderregelung für den Entfall von Druckprüfungen (Tabelle 5-1 aus /U 12/)

5 Darstellung konkreter, für ohne Druckprüfung in deutschen KKW eingesetzte oder veränderte Bauteile umgesetzter Vorgehensweisen zum Nachweis der Integrität

Es wurde eine Recherche durchgeführt, um für deutsche Kernkraftwerke konkrete Beispiele herauszuarbeiten, bei denen mittels Schweißen Reparatur- oder Austauschmaßnahmen an bestehenden Komponenten oder Rohrleitungen durchgeführt wurden, von der Durchführung einer Druckprüfung jedoch aus verschiedenen Gründen abgesehen wurde. Hierbei wurden Maßnahmen berücksichtigt, die in den letzten 25 Jahren in den Kraftwerken durchgeführt wurden. Allen diesen Maßnahmen war gemein, dass gemäß den jeweils gültigen Ausgaben der anzuwendenden Spezifikationen Druckprüfungen grundsätzlich als Teil der abschließenden Bauprüfungen vorzusehen waren.

Für diese Beispiele liegen die jeweiligen Dokumentationen der durchgeführten Arbeiten vor. Aus diesen wurden die jeweiligen Daten der betreffenden Komponente, die anzuwendende Spezifikation und die durchgeführten Ersatzmaßnahmen und -prüfungen entnommen und im Folgenden dargestellt. Die Angaben sind für diesen Bericht anonymisiert. Es wird auf Grundlage der vorliegenden Unterlagen bestätigt, dass die aufgeführten Beispiele repräsentativ für alle vier Energieversorgungsunternehmen Deutschlands, die Kernkraftwerke betreiben haben oder weiterhin noch betreiben, sind.

Bei der Recherche ergaben sich verschiedene Beispiele aus unterschiedlichen Bereichen der Anlagentechnik. Die überwiegende Mehrzahl an Neuschweißungen oder Schweißreparaturen ergab sich im Bereich von Rohrleitungsrundnähten. Diese sind im Abschnitt 5.1 zusammenfassend dargestellt. Ein weiteres Beispiel spiegelt Schweißarbeiten an einem Wärmetauscher im Zuge einer wiederkehrenden Prüfung wieder (siehe Abschnitt 5.2). In einem dritten Fall wird von umfänglichen Sanierungsmaßnahmen an Armaturen berichtet (siehe Abschnitt 5.3).

5.1 Rohrleitungsschweißungen

KKW	System	Naht-art	Werkstoff	Abmessung	Betriebsdaten	Regelwerk	Ersatzprüfung/Ersatzmaßnahmen	Grund für die Reparatur
5	Nukleares Not- und Nachkühl-system	Rohr rund-naht	1.4550	DN250 24 mm Wd.	175 bar 350 °C	KS D 1042/50	RT der Wurzel und der zugehörigen Stützlagen, zusätzliche PT beim weiteren Auffüllen der Naht, Durchführung der RT mit einer erhöhten Zahl von Teilaufnahmen	Einschweißen einer neuen Formstückes in eine bestehende Rohrleitung
2	Messleitung an Hauptkühlmit-telleitung	Rohr rund-naht	1.4550	DN15 3,2 mm Wd.	175 bar 350 °C	KS D 7041/50 Gruppe A	Erweiterte Prüfbeteiligungen vor und während des Schweißens sowie bei VT und RT der Schweißnaht durch SB und K	Neuschweißung im Rahmen einer Reparatur
3	Zusatzborier-system	Rohr rund-naht	1.4550	DN25 4 mm Wd.	175 bar 350 °C	KS D 7041/50 Gruppe A	Erweiterte Prüfbeteiligungen vor und während des Schweißens sowie bei VT und RT der Schweißnaht durch SB und K	Einschweißen einer neuen Armatur in eine bestehende Rohrleitung
2	Nukleares Not- und Nachkühl-system	Rohr rund-naht	1.4550	DN250 11 mm Wd.	50 bar 200 °C	KS D 2041/50 PG: A2	erweiterte RT (Durchstrahlung senkrecht und in Flankenrichtung) VT Wurzelseite	partielle Reparatur wegen Schweißfehler
2	Notspeisesystem	Rohr rund-naht	1.4550	DN200 6,3 mm Wd.	1 bar 30 °C	KS D 3041/50 PG: B2	Aufgrund der geringen Auslegungsdrukkes keine Ersatzmaßnahme festgelegt	Neueinschweißung eines T-Stückes in bestehende Rohrleitung
1	Behandlung und Lagerung radioakt. Abwässer	Rohr rund-naht	1.4550	DN100 4,0 mm Wd.	12 bar 100 °C	IS 1501 AS 3	Erweiterte Prüfbeteiligungen vor und während des Schweißens sowie bei VT und RT der Schweißnaht durch SB und K, zusätzliche Dichtheitsprüfung	Austausch eines Rohrstücks

Tabelle 4 Beispiele für Reparaturen an Rohrleitungen aus austenitischen Werkstoffen

KKW	System	Naht-art	Werkstoff	Abmes-sung	Betriebsdaten		Regel-werk	Ersatzprüfung/Ersatzmaßnah-men	Grund für die Repa-ratur
2	Zwischen-überhitzer-Kondensat-kühlung	Rohr-rund-naht	1.6210	DN550 35 mm Wd.	89 bar	214 °C	KS D 2041/50 PG: A1	Zusätzliche UT bei 1/3 gefüll-ter Schweißnaht und an ferti-ger Schweißnaht vor WB	Anschweißen einer bestehenden Rohr-leitung an einen neuen Wärmetau-scher Dampferzeu-ger-Abschlämmsys-tem
2	Speisewas-sersystem	Roh-rund-naht	1.6210	DN150 12,5 mm Wd.	71 bar	218 °C	KS D 2041/50 PG: A1	Zusätzliche PT der Schweiß-kanten und UT vor WB und RT nach Wärmebehandlung	Reparatur einer Naht mit Herstellungsfeh-ler
2	Dampferzeu-ger-Ab-schlämmsys-tem	Rohr-rund-naht	1.6210/ 1.6310	DN80 10 mm Wd	71,5 bar	287 °C	KS D 2041/50 PG: A2	Neben MT und RT zusätzliche UT-Prüfung der Stutzennaht	Neuschweißung im Rahmen einer Systeme-mänderung
2	Hochdruck-Anzapfsystem	Rohr-rund-naht	1.7380	DN600 14,2 mm Wd.	11,8 bar	205 °C	KS D 2041/50 PG: A2	Zusätzliche UT und RT an fer-tiger Schweißnaht vor Wärme-behandlung	Einschweißen einer neuen Armatur in eine bestehende Rohrleitung
1	Frisch-dampfsystem	Rohr-rund-naht	1.5415/ C22.8	DN25 3,6mm Wd.	87,3 bar	305 °C	IS 1501/50 AS 2	Erweiterte Prüfbeteiligungen vor und während des Schwei-ßens sowie bei VT und RT der Schweißnaht durch SB und K, zusätzliche Dichtheitsprüfung	Austausch einer Ar-matur
4	Nebenkühl-wassersystem für ges. Zwi-schenkühl-systeme	Roh-rund-naht	15 Mo 3/ St 35.8 III	DN150 4,5 mm Wd.	4 bar	20 °C	KS D 2041/50 PG: A3	Zusätzliche Prüfbeteiligung durch K	Neuschweißung ei-ner Reduzierung

Tabelle 5 Beispiele für Reparaturen an Rohrleitungen aus ferritischen Werkstoffen

In den Tabellen 4 und 5 sind für fünf verschiedene deutsche Kernkraftwerke im Leistungsbetrieb Beispiele für Instandsetzungs- oder Austauschmaßnahmen an Rohrleitungen zusammengestellt und den jeweils anzuwendenden kerntechnischen Spezifikationen zugeordnet. Es wird deutlich, dass die für die individuell unterschiedlichen Arbeiten – auch vor dem Hintergrund, dass die Spezifikationen z. T. Handlungsspielräume bei der Festlegung der durchzuführenden Ersatzmaßnahmen gestatten – tatsächlich realisierten Umfänge und Arten von Ersatzmaßnahmen variieren. Hierbei spielen sowohl die örtlichen Gegebenheiten hinsichtlich der Bauteilgeometrien, Werkstoffe und Betriebsbedingungen, der sicherheitstechnischen Bedeutung der betreffenden Komponenten oder Systeme als auch individuelle Erfahrungen und Beurteilungen der bei der Vorprüfung der Herstellungs-/Reparaturunterlagen beteiligten Vertreter der Betreiber und Sachverständigenorganisationen eine Rolle.

5.2 Behälterschweißung

In einem Kernkraftwerk sollten im Jahr 2018 zum Zweck einer wiederkehrenden Prüfung (mantelseitige innere Besichtigung entsprechend Druckgeräterichtlinie) die entsprechenden Klöpperböden herausgetrennt werden. Bei dem Wärmetauscher handelt es sich um einen Duplexvorwärmer im Niederdruck-Anzapfsystem im Bereich der Turbine. Er ist der Anforderungsstufe 4 zugeordnet und die Arbeiten wurden gemäß Spezifikation IS 1801 /U 34/ durchgeführt. Es wurden Bauteile aus den ferritischen, unlegierten Stählen P275NH und W StE 255 verschweißt. Die zu verschweißende Wanddicke betrug 10 mm bei einer Abmessung von DN600.

Da der Mantelraum des Duplexvorwärmers unabsperbar mit den Turbinen verbunden ist, wurde von der Durchführung einer Druckprüfung abgesehen. In der anzuwendenden Spezifikation IS 1801 /U 34/ ist für die in diesem Fall zu wählende Vorgehensweise die gleiche Festlegung getroffen, die auch in der Rohrleitungsspezifikation IS 1501 /U 11/ verankert ist (siehe Abschnitt 4.2.2). In einem Prüffolgeplan wurde daher ein erhöhter Prüfumfang für die zerstörungsfeien Prüfungen und die durchzuführenden Überwachungsmaßnahmen festgelegt. Die Prüfbeteiligung bei der Bestätigung der anforderungsgerechten Ausführung der Schweißnahtvorbereitung und der Schweißüberwachung wurde erhöht. Zudem wurden an den Wurzelschweißungen gezielte Sichtprüfungen (VT) und eine Oberflächenprüfung (PT) durchgeführt. Im Rahmen der Bauprüfung wurden die Schweißnähte dann anstelle einer stichprobenweisen Prüfung zu 100 % einer Oberflächenprüfung (MT) und einer Ultraschallprüfung (UT) unterzogen.

5.3 Armaturensanierung

Im einer kerntechnischen Anlage wurden im Jahre 2007 in austenitischen Armaturen (aus dem nichtrostenden Stahl 1.4550) der Prüfklasse PK 2 BSH (mit Anforderungen an die Basisicherheit) mit sog. Bredtschneider-Verschluss Schäden aufgrund von chloridinduzierter Korrosion (Lochkorrosion und Spannungsrisskorrosion) im Wesentlichen im Bereich der Dichtungspartie aber auch in Segmentringnuten sowie an Absaugebohrungen festgestellt.

Der Sanierungsumfang ergab sich aus der jeweiligen Befundsituation und der sicherheitstechnischen Bewertung der jeweiligen Komponente. Die Sanierung der Armaturen, die nicht komplett ausgetauscht wurden, erfolgte durch Ausdrehen mit anschließender Erneuerung der Oberflächen durch umlaufende formgebende Auftragschweißungen. Zur Wiederherstellung der erforderlichen Maße und Konturen wurde der Bereich der Auftragschweißungen durch Abdrehen endbearbeitet. Alternativ erfolgte ein lokales Ausmulden der befundbehafteten Stellen mit Auftragschweißung oder der Austausch des Armaturenoberteils.

Alle geschraubten Absaugestutzen der Armaturen mit Bredtschneider-Verschluss und Leckageabsaugung wurden unabhängig von der jeweils dort festgestellten Befundsituation ebenfalls saniert (Heraustrennen, Befundbeseitigung, Auftragschweißung, Einbau des neuen Absaugestutzens und Verschweißen).

Alle Arbeiten wurden entsprechend der anzuwendenden Spezifikation KKK-WBPV /U 12/, die auch für Armaturen gilt, durchgeführt.

War nach den Sanierungsmaßnahmen keine Druckprüfung möglich, so wurde bei den Armaturen ohne wirksame Absperrmöglichkeit zum RDB eine Dichtheitsprüfung bei Betriebsdruck vorgesehen. Diese wurde jeweils durch die nachfolgend genannten ZfP-Maßnahmen ergänzt:

Überschweißen herstellungsbedingter zulässiger Volumenfehler im Zuge der umlaufenden formgebenden Schweißung:

- gezielte Durchstrahlungsprüfung (RT) der Mulde vor dem Schweißen
- 100 % Eindringprüfung (PT) sowie gezielte Durchstrahlungsprüfung (RT) nach dem Schweißen der zweiten Lage in der Mulde

Aufschweißen eines neuen Gehäusekopfes:

- 100 % Eindringprüfung (PT) von außen und von innen
- 100 % Durchstrahlungsprüfung (RT)

Umlaufende formgebende Schweißung des Deckeldichtungsbereichs und der Segmentringnut:

- 100 % Eindringprüfung (PT) nach dem Schweißen der ersten Lage und nach der Endbearbeitung
- 100 % mechanisierte Sichtprüfung nach dem Schweißen jeder Raupe der ersten und zweiten Lage sowie jeder an die Flanken angrenzenden Raupe
- 100 % Ultraschallprüfung (UT) des Schweißguts auf Bindung an den Grundwerkstoff
- 100 % Durchstrahlungsprüfung (RT)

6 Darstellung der Auswirkung einer Wasserdruckprüfung auf eine geschweißte Rohrleitungskomponente im Hinblick auf deren Betriebsverhalten und Vergleich mit einer entsprechenden Komponente ohne Wasserdruckprüfung

In diesem Abschnitt wird rechnerisch analysiert, ob und in welcher Weise eine Wasserdruckprüfung – wie es als Ziel einer Druckprüfung u. a. im Abschnitt 3.3 genannt ist – tatsächlich zur Reduzierung von Schweißeigenstressungen führt. Zu diesem Zweck wurden Belastungszustände mit und ohne Druckprüfung simuliert und miteinander verglichen. Dabei wurden zwei unterschiedliche Fälle einer Rohrschweißung betrachtet:

- Fall 1 - „durchgehende, mehrlagige Schweißnaht“: Es wird auf Eigenspannungsprofile aus der Literatur /U 13/ zurückgegriffen.
- Fall 2 - „Reparaturnaht“: Es werden eigenständige elastisch-plastische FEM-Simulationen für verschiedene Rohrgeometrien und Belastungszustände vorgenommen (Tabelle 7).

Zur Bewertung des Einflusses der Druckprüfung wurden für ausgewählte Fälle zusätzlich bruchmechanische Analysen zur Bestimmung der kritischen Risstiefe und des zyklischen Risswachstums (Ermüdungsrisswachstum) durchgeführt.

6.1 Schweißeigenstressungen

6.1.1 Mehrlagige, durchgehende Schweißnaht

Die bruchmechanischen industriellen Standard- und Regelwerke /U 13/ bis /U 15/ enthalten Kataloge von Schweißeigenstressprofilen über der geschweißten Wanddicke für standardisierte Bauteilgeometrien und typische Schweißnahtformen, teilweise weiter unterteilt hinsichtlich des Wärmeeintrags beim Schweißvorgang. Für kerntechnische Anwendungen enthält nach unserer Recherche nur das Schwedische Regelwerk /U 16/ einen derartigen Katalog, u. a. mit Verweisen auf /U 13/ und /U 14/.

Grundsätzlich wird in /U 16/, wiederum mit Verweis auf /U 13/, festgehalten, dass für Schweißverbindungen von austenitischen und ferritischen Stählen die gleichen Schweißeigenstressprofile angesetzt werden können, sofern keine detaillierten Informationen vorhanden sind.

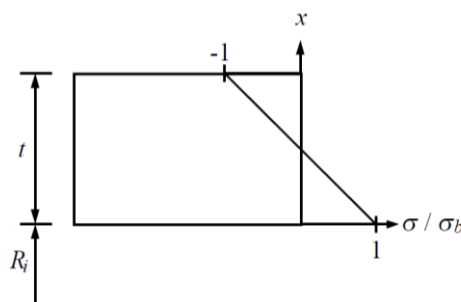


Abbildung 1 Schweißeigenstressungen senkrecht zur Schweißrichtung in einer Rundstumpnaht in einem zylindrischen Rohr, aus /U 17/

Für das Berechnungsmodell einer Rundstumpfnah in einem geraden Rohr wurde den nachfolgend dargestellten bruchmechanischen Berechnungen eine sehr einfache, aber repräsentative und konservative Schweißeigenstressverteilung aus der vorangegangenen Revision /U 17/ des aktuellen Schwedischen kerntechnischen Regelwerks /U 16/ zugrunde gelegt, siehe Abbildung 1. Da in den bruchmechanischen Berechnungen Umfangsrisse in der Rundnaht angenommen und bewertet werden, sind als senkrecht auf die Rissebene wirkende Spannungen die Schweißeigenstresssenkrecht zur Schweißrichtung, d. h. die Axialspannungen in der Rohrwandung zu betrachten.

Dieses einfache lineare Eigenstressprofil gemäß Abbildung 1 ist nach /U 17/ für Wanddicken $t \leq 30$ mm anwendbar, wenn auch mit wanddickenabhängiger Amplitudenhöhe σ_b , wie aus Tabelle 6 aus /U 17/ hervorgeht. S_r entspricht hierbei der 0,2 %-Dehngrenze bei ferritischen Schweißverbindungen und der 1,0 %-Dehngrenze bei austenitischen Schweißungen.

Transverse stress [MPa]	
t [mm]	Weld centerline and HAZ
$t \leq 7$	$1.219 S_r [1 - 2(x/t)]$
$7 < t \leq 25$	$(1.5884 - 0.05284t) S_r [1 - 2(x/t)]$
$25 < t \leq 30$	$0.2674 S_r [1 - 2(x/t)]$

Tabelle 6 Schweißeigenstresshöhe (Axialspannungen, senkrecht zur Schweißrichtung) in einer Rundstumpfnah in einem zylindrischen Rohr, aus /U 17/

Die neueren und detaillierteren Berechnungen von abdeckenden Schweißeigenstressprofilen zeigen, dass dieser einfache Ansatz der Eigenstresssenkrecht zum Schweißvorgang weiterhin als Näherungslösung angesetzt werden kann, vgl. Abbildung 2 aus /U 16/ und den Eigenstresssenkrecht katalog aus /U 14/.

Eine Umlagerung der Eigenstresssenkrecht infolge der Überschreitung der Dehngrenze und Einsetzen lokalen Fließens kann für ein lineares Spannungsprofil gemäß Abbildung 1 in einem zylindrischen Rohr auf Basis der im Forschungsbericht /U 18/ veröffentlichten Ergebnisse analytisch berechnet werden.

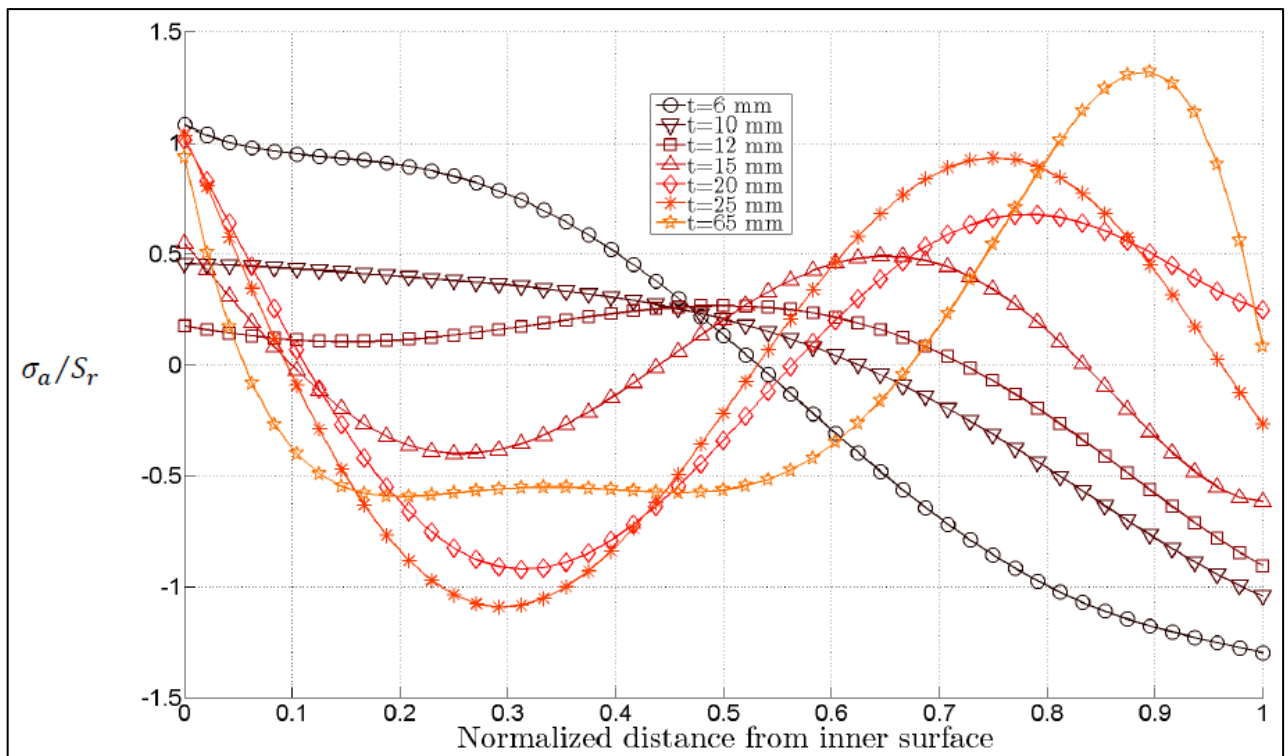


Abbildung 2 Schweißzugspannungen senkrecht zur Schweißrichtung in einer Rundstumpfnah in einem zylindrischen Rohr mit der Wanddicke $6 \text{ mm} \leq t \leq 65 \text{ mm}$, aus /U 16/

6.1.2 Reparturnaht

Ergänzend zur Fachliteratur werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse der Berechnung von Schweißzugspannungen an Reparturnähten vorgestellt.

6.1.2.1 Vorgehen

Für die Berechnung der Schweißzugspannungen einer Reparturnaht wurden rotations-symmetrische FEM-Modelle /U 19/ einer Rohrleitung mit Umfangsnaht erstellt. Die Schweißnaht wurde vereinfacht als zwei- oder mehrlagige Schweißnaht modelliert, wobei die unteren (inneren) Lagen als vorhanden angenommen und lediglich die obere (äußere) Lage als neu aufgebraute Schweißlage simuliert wird.

Als Belastungen wurden symmetrische Temperatur- und Druckbelastungen aufgeprägt. Lokal wirkende Rohrleitungskräfte wurden nicht berücksichtigt.

6.1.2.2 Modellbeschreibung und Berechnungsfälle

Um eine gewisse Variationsbreite zu erzeugen, wurden verschiedene Rohrgeometrien mit unterschiedlichen Werkstoffen und Betriebsbelastungen modelliert (Tabelle 7). Bei der Auswahl wurde jeweils Bezug auf reale Bauteilgeometrien genommen. Die Belastungen wurden entsprechend den Betriebsbedingungen in den Kraftwerksanlagen definiert.

Berechnungsfall	Abmessung			Werkstoff	Auslegung		Betrieb	Beispiel	
	DN	D _i [mm]	t [mm]		Druck [bar]	Temp. [°C]	Temp. [°C]	Komponente	Klassifizierung
1	80	68,9	10	1.4550	160,5	296	-	-	-
2	80	68,9	10	1.6310	160,5	296	-	-	-
3	700	680	23,5	1.6210	89	305	285	Frischdampfleitung (LBA / RA)	2 / B
4	300	301,5	11,2	1.4550	50	200	50	Nachkühlleitung (JNA / TH)	2 / B
5	80	72,9	8,0	1.4550	175	362	310	Druckhalter-Sprühleitung (JEF / YP)	1

Tabelle 7 Abmessungen und Belastungen

Rohrleitung und Schweißnaht sind in allen Untersuchungsvarianten als rotationssymmetrisches Halbmodell aufgebaut, s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Die Symmetriebedingung in der Mitte der Schweißnaht sorgt für eine Modellspiegelung. Die Pfeile in Abbildung 3, links symbolisieren die Aufprägung des Innendruckes.

Die Detailansicht der Schweißnaht in der Mitte von Abbildung 3 zeigt eine stark idealisierte Temperaturverteilung zum Zeitpunkt der Schweißung mit 1000 °C in der Schweißnaht und Raumtemperatur (RT) von 20 °C in der vorhandenen, unteren Schweißlage und dem umgebenden Rohrmaterial. Die nach dem Abkühlen entstehende Spannungsverteilung (maximale Hauptspannung in der Schweißnaht) ist in Abbildung 3 rechts dargestellt. Diese Spannungsverteilung ist wie folgt zu interpretieren:

- Beim Abkühlen schrumpft die neu aufgetragene Schweißlage. Diese Kontraktion wird von dem umgebenden Material behindert.
- In der Folge bilden sich in der neu aufgetragenen Schweißlage im Kontaktbereich zum Rohrmaterial Zugspannungen aus (rot – positive Spannungswerte). In der vorhandenen Schweißlage entstehen Druckspannungen (blau – negative Spannungswerte).

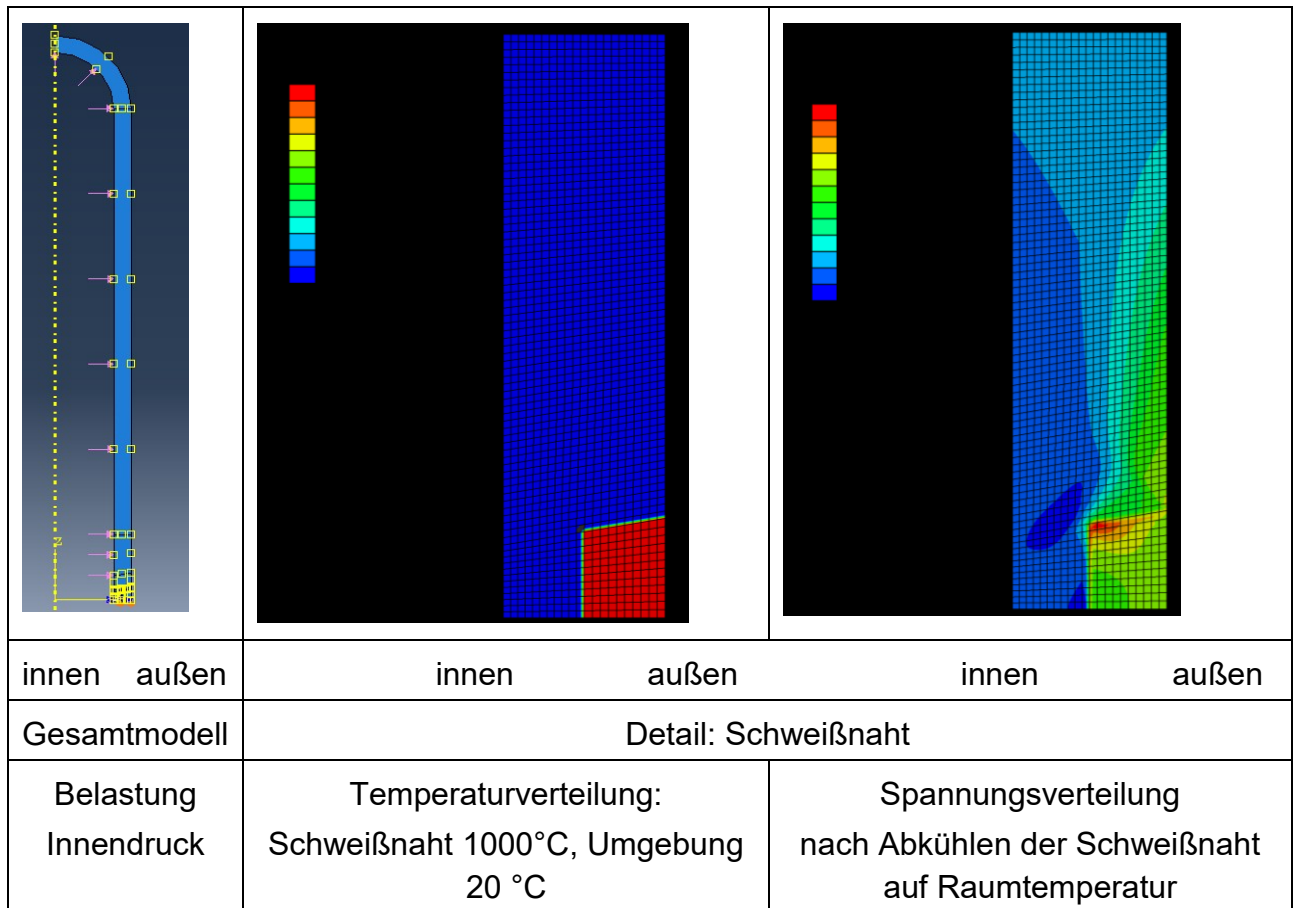


Abbildung 3 Modellaufbau am Beispiel der Berechnungsfälle Nr. 1 und 2

Die Berechnungen erfolgten mit dem FEM-Programm ABAQUS /U 19/. Zur Erfassung der Eigenspannungen wurden elastisch-plastische Analysen durchgeführt. Es wurde ein bilineares Werkstoffmodell mit 40 % plastischer Dehnung für den austenitischen Werkstoff und 16 % bzw. 22 % plastischer Dehnung für die ferritischen Werkstoffe im Modell implementiert. Für die Berechnung wurden Elemente mit quadratischem Elementansatz verwendet.

In Tabelle 8 ist dargestellt, welche Rechenschritte im Modell ausgeführt und welche Prüf- und Betriebszustände dabei simuliert wurden.

Rechenschritte	Beschreibung
Schweißen	<ul style="list-style-type: none"> • Berechnung der Schweißsimulation, Nahttemperatur bei 1000 °C
Ende Montage	<ul style="list-style-type: none"> • Zustand nach dem Schweißen (Ende der Montage) • Schweißnaht ist auf Umgebungstemperatur (RT = 20 °C) abgekühlt • Eigenspannungszustand hat sich ausgebildet
Druckprüfung	<ul style="list-style-type: none"> • Beaufschlagung mit Innendruck bei Raumtemperatur (RT)
Entlastung	<ul style="list-style-type: none"> • Eigenspannungszustand nach der Druckprüfung • Bauteil drucklos bei RT
Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Bauteil unter Betriebsbedingung bei Betriebstemperatur und Betriebsdruck
Abfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Eigenspannungszustand nach Abfahren der Anlage • Entlastungszustand, drucklos bei RT

Tabelle 8 ausgeführte Rechenschritte, simulierte Zustände

Entsprechend dem realen Anlagenbetrieb erfolgt nach jeder Belastung ein Entlastungsschritt (siehe Tabelle 9). Die sich in der Entlastung einstellenden Spannungsverläufe bilden die Grundlage für den nachfolgenden Vergleich und die Bewertung der Folgen.

Rechen- schritte	Schwei- ßen	Ende Montage	Druck- prüfung	Entlas- tung	Betrieb	Entlas- tung
Temperatur [°C] in Schweißnaht (SN)	1000	20	20	20	296	20
Temperatur [°C] (Grundwerkstoff – außerhalb der SN)	20	20	20	20	296	20
Innendruck [bar]	0	0	229	0	160,5	0

Tabelle 9 Belastungszustände am Beispiel der Berechnungsfälle 1 und 2

6.2 Bruchmechanisches Bewertungsmodell

6.2.1 Rissmodelle

Um die Effekte von Eigenspannungsumlagerungen auf ein mögliches Ermüdungsrisswachstum und das Versagen (Bauteilbruch) von Rissen in der Rundschweißnaht rechnerisch erfassen zu können, analysierten wir wanddurchdringende und im Falle der Reparaturaht auch umlaufende Umfangsrisse in der Schweißnahtebene. Da im Ergebnis der Spannungsberechnungen für die Reparaturaht an der Rohrwand Druckspannungen auftreten (siehe nachfolgende Abschnitt), die nicht zu einer Rissausbreitung führen können, haben wir die umlaufenden Risse an der Rohraußenwand angenommen. Abbildung 4 zeigt die angesetzten Rissmodellgeometrien.

Die bruchmechanischen Berechnungen führten wir mit dem Bruchmechanik-Analyseprogramm IWM VERB /U 20/ aus, für die bruchmechanische Versagensbewertung unter Zugrundelegung kerntechnischer Sicherheitsfaktoren (ASME-Code) zogen wir das Bruchmechanik-Analyseprogramm ProSACC /U 21/ hinzu.

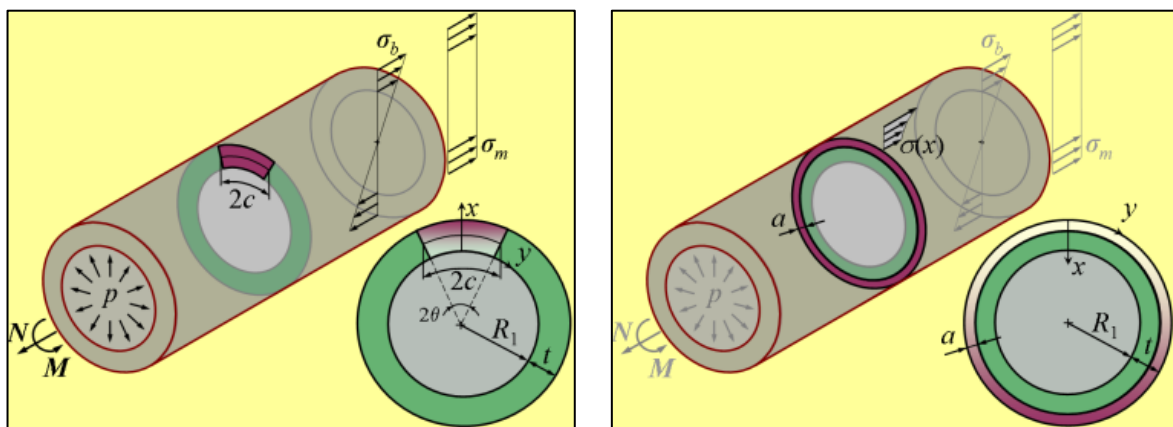


Abbildung 4 Rissmodellgeometrien, aus /U 20/
links: wanddurchdringender Umfangsriß (Durchriss),
rechts: außen umlaufender Umfangsriß

6.2.2 Bruchmechanische Werkstoffkennwerte

Die bruchmechanische Versagensbewertung erfolgte in Form der Berechnung einer kritischen Rissgröße, die bei Beanspruchung durch die Überlagerung der jeweiligen Betriebsbelastung (Betriebsdruck bei Betriebstemperatur) mit den Schweißeigenspannungen gemäß Failure Assessment Diagram (FAD) zum rechnerischen Bauteilbruch führt.

Wir führten vergleichende Berechnungen unter Anwendung des FAD nach der SINTAP/FITNET-Prozedur auf Basis der Rev. 4 des R6-Standards /U 24/ sowie unter Anwendung des FAD nach ASME-Code, Section XI /U 23/, Appendix H mit den Sicherheitsfaktoren für kerntechnische Anwendungen gemäß ASME-Code, Section XI /U 23/, KTA 3206 /U 25/ sowie SSM-Report 2018:18 /U 16/ durch.

Die für die Versagensbewertung erforderlichen Werkstoffkennwerte der Bruchzähigkeit K_{Ic} bei Betriebstemperatur entnehmen wir für den austenitischen Werkstoff 1.4550 einschließlich des Schweißguts dem MPA/VGB-Untersuchungsbericht /U 26/. Für die ferritischen Werkstoffe verwendeten wir bei Betriebstemperatur den K_{Ic} -Hochlagenwert $240 \text{ MPa m}^{1/2}$ gemäß /U 23/ und KTA 3201.2 /U 27/.

In den Ermüdungsrisswachstumsberechnungen verwendeten wir die Risswachstumsraten gemäß ASME-Code, Section XI /U 23/, Appendix A für ferritische Stähle in Leichtwasserreaktor-Mediumumgebung (s. Abbildung 5) bzw. gemäß /U 23/, Appendix C, ergänzt um die Untersuchungsergebnisse aus NUREG CR-6176 /U 28/ für austenitische Stähle in Leichtwasserreaktor-Mediumumgebung (s. Abbildung 6).

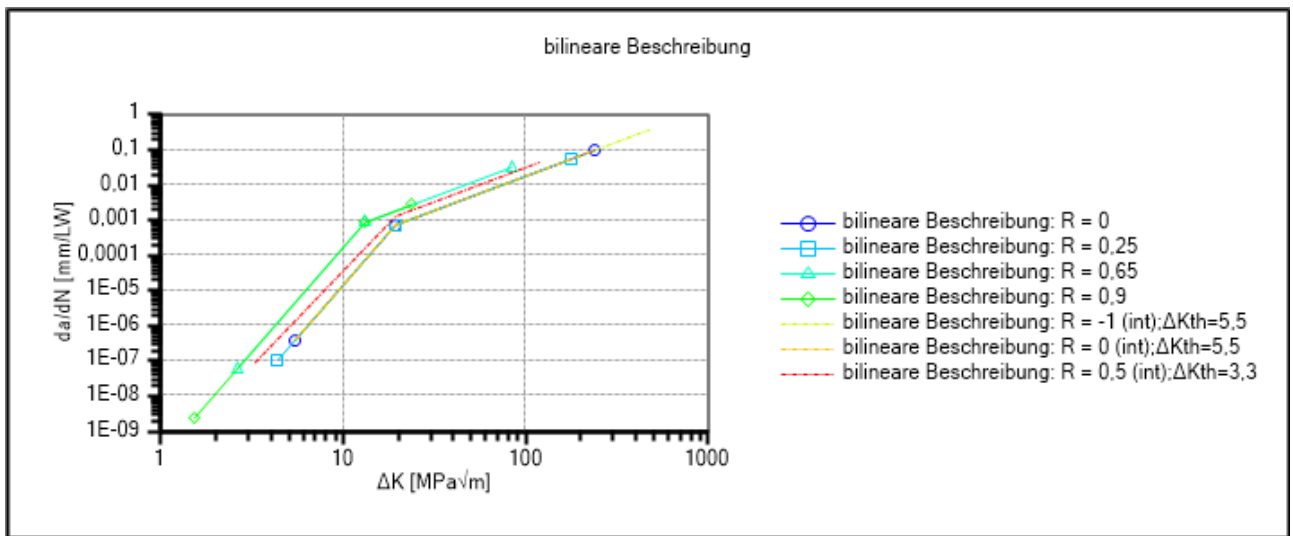


Abbildung 5 Ermüdungsrisswachstumsrate gemäß ASME-Code, Section XI /U 23/, Appendix A für ferritische Stähle in Leichtwasserreaktor-Mediumumgebung

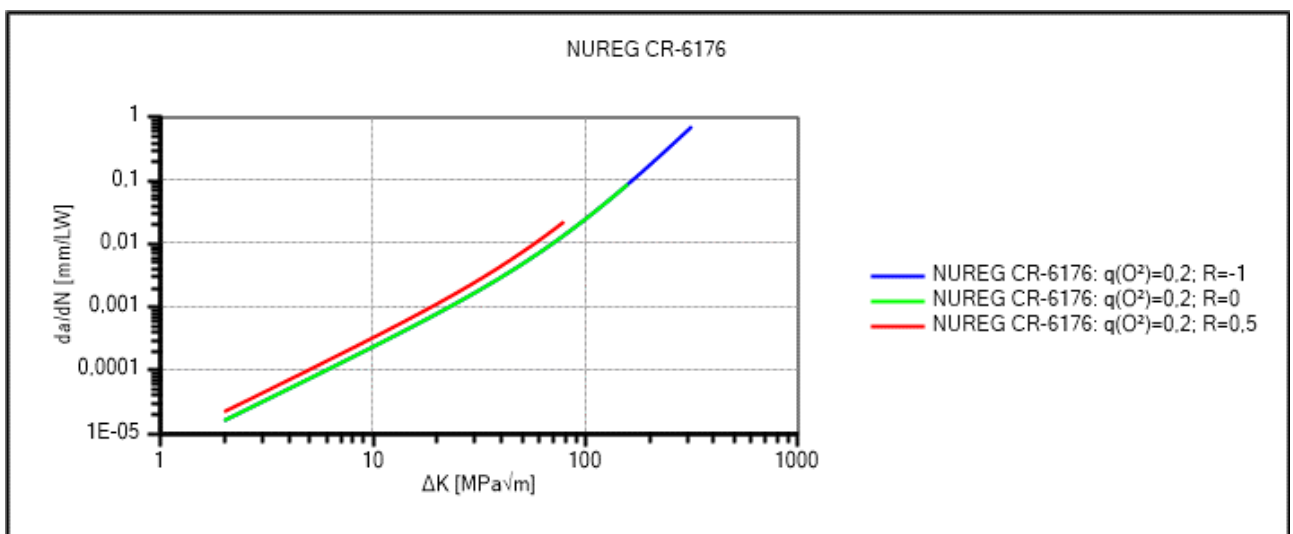


Abbildung 6 Ermüdungsrisswachstumsrate gemäß ASME-Code, Section XI /U 23/, Appendix C und NUREG CR-6176 /U 28/ für austenitische Stähle in Leichtwasserreaktor-Mediumumgebung

6.3 Berechnungsergebnisse

6.3.1 Berechnungsfall Nr. 1 – Austenit, 1.4550, DN80

6.3.1.1 Mehrlagige, durchgehende Schweißnaht

Abbildung 7 zeigt das abdeckende axiale Eigenspannungsprofil entsprechend der analytischen Näherung aus /U 17/ für den Berechnungsfall 1 (austenitisches Rohr) nach Fertigung der Rundnaht.

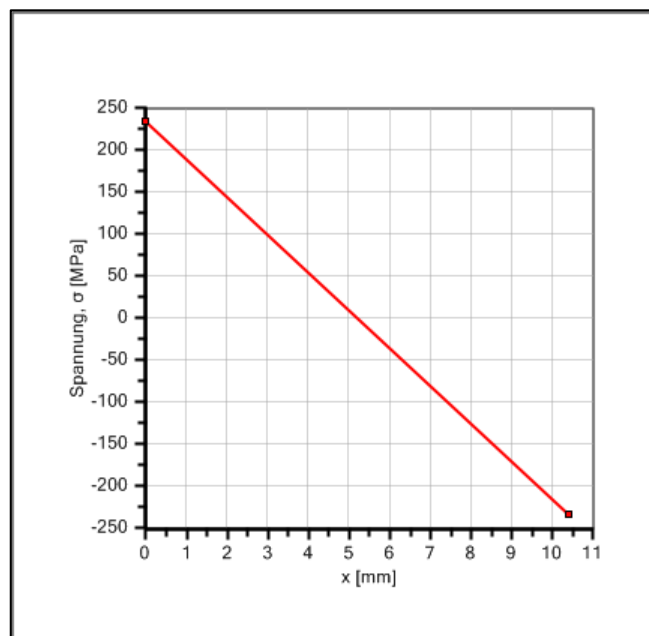


Abbildung 7 Berechnungsfall 1 (1.4550, DN80, $t = 10$ mm), Schweißeigenstressen senkrecht zur Schweißrichtung (Axialspannungen) in der Rundstumpfnaht im austenitischen Rohr

Abbildung 8 zeigt die gemäß /U 18/ berechnete Spannungsumlagerung der Schweißeigenstressen infolge der Druckprüfung mit 229 bar. Der darauffolgende Leistungsbetrieb mit 160,5 bar bewirkt rechnerisch keine weitere Spannungsumlagerung mehr.

Abbildung 9 zeigt die gemäß /U 18/ berechnete Spannungsumlagerung der Schweißeigenstressen infolge des Leistungsbetriebs mit 160,5 bar ohne vorausgegangene Druckprüfung.

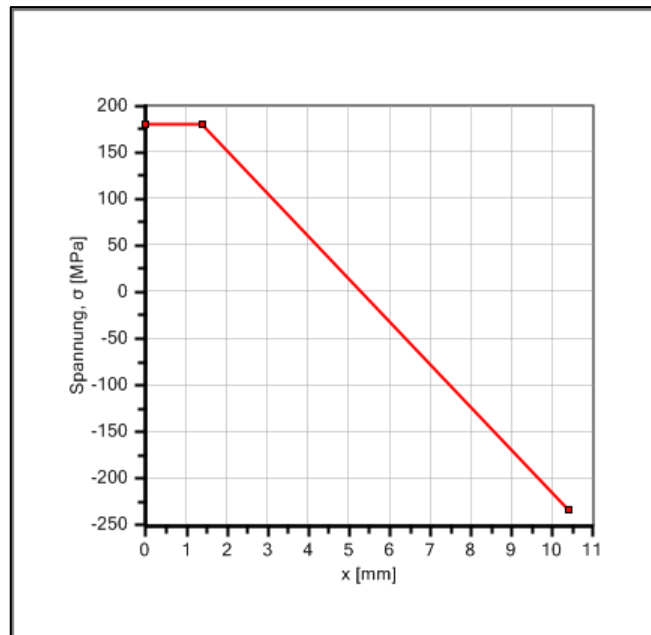


Abbildung 8 Berechnungsfall 1 (1.4550, DN80, t = 10 mm), Spannungsumlagerung der Eigenspannungen senkrecht zur Schweißrichtung in der Rundstumpfnah infolge der Druckprüfung mit 229 bar

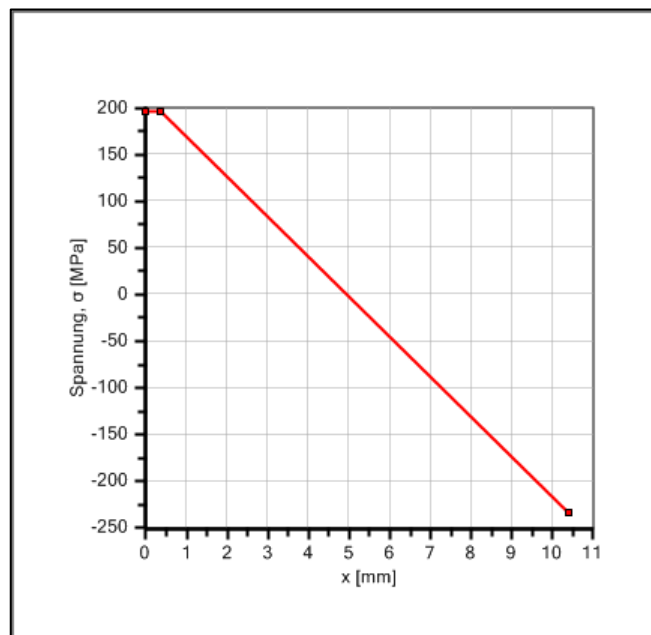


Abbildung 9 Berechnungsfall 1 (1.4550, DN80, t = 10 mm), Spannungsumlagerung der Eigenspannungen senkrecht zur Schweißrichtung in der Rundstumpfnah infolge des Leistungsbetriebs mit 160,5 bar

Der Vergleich der Spannungsumlagerungen in Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigt einen geringen Unterschied. Dieser Unterschied führt bei der Überlagerung mit den Spannungen aus dem Betriebsdruck von 160,5 bar zu ebenfalls geringen Unterschieden in der Berechnung der kritischen Risslängen für den untersuchten Durchriss, siehe Tabelle 10.

Die angegebenen Werte in Tabelle 9, Spalten 2 und 3 stellen die Berechnungswerte ohne Anwendung von Strukturfaktoren bzw. Partiellen Sicherheitsfaktoren gemäß den Regelwerken dar. In der Spalte 4 sind die kritischen halben Risslängen bei Anwendung der Strukturfaktoren (Sicherheitsfaktoren) nach ASME-Code, Sect. XI /U 23/, Appendix H für die Betriebsstufe Level A angegeben.

kritische halbe Risslänge [mm]	FAD nach SINTAP/FITNET /U 22/	FAD nach ASME XI, App. H, Austenit /U 23/	FAD nach ASME XI, App. H, Austenit /U 23/ mit Sicherheitsfaktor
ohne Druckprüfung	57,88	53,17	32,16
mit Druckprüfung	58,52	53,70	32,55

Tabelle 10 Berechnungsfall 1 (1.4550, DN80, t = 10 mm), kritische Risslänge für einen angenommenen Durchriss

Abbildung 10 zeigt exemplarisch das Failure Assessment Diagram nach ASME-Code, Section XI /U 23/, Appendix H im Ergebnis der Berechnung mit IWM VERB /U 20/ für einen Durchriss im austenitischen Rohr bei Beanspruchung durch den Leistungsbetrieb mit 160,5 bar und Schweißeigenstress nach erfolgter Druckprüfung mit 229 bar. Dabei wurden die Strukturfaktoren (Sicherheitsfaktoren) für Betriebsstufe Level A gemäß ASME-Code, Section XI /U 23/, Appendix H zugrunde gelegt.

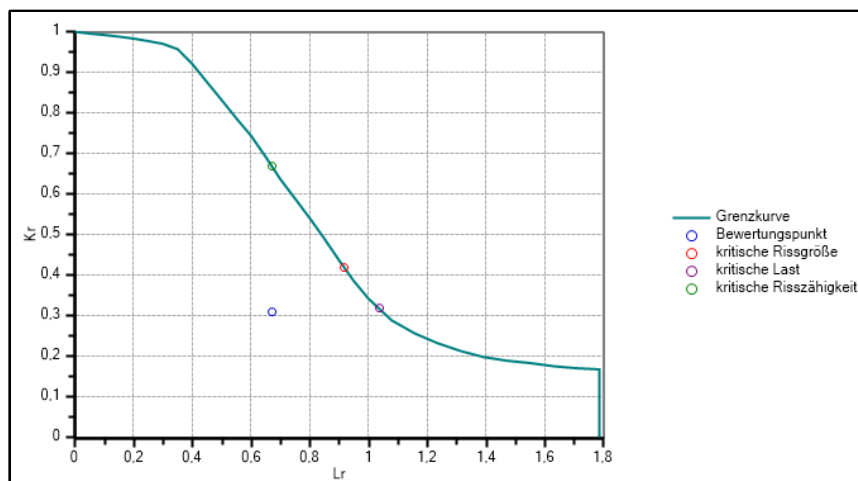


Abbildung 10 Berechnungsfall 1 (1.4550, DN80, t = 10 mm), Failure Assessment Diagram nach ASME-Code, Section XI /U 23/, Appendix H für einen Durchriss bei Beanspruchung durch Leistungsbetrieb mit 160,5 bar und Schweißeigenstress nach Druckprüfung mit 229 bar, Sicherheitsfaktoren für Level A

Insgesamt hat die Druckprüfung im Berechnungsfall 1 einen sehr geringen positiven Effekt auf die kritischen Rissgrößen.

Zur Erläuterung des Failure Assessment Diagram (FAD) sei an dieser Stelle aus der kompakten Darstellung in VdTÜV Merkblatt MB DAMP 468 /U 39/ zitiert, die sich inhaltlich gleichlautend u.a. in KTA 3206 /U 25/ wiederfindet. Aus KTA 3206 /U 25/ wurde auch die schematische FAD-Darstellung in der nachfolgenden Abbildung entnommen:

... zur Ermittlung der kritischen Risstiefe ist das Versagens-Bewertungsdiagramm FAD (Failure Assessment Diagram) heranzuziehen. Es umfasst – ausgehend von den Grenzfällen des Versagens durch spröden Bruch (auf Grundlage des Spannungsintensitätsfaktor-Konzepts) bzw. plastischen Kollaps (Erreichen der plastischen Grenzlast) – auch den dazwischenliegenden elastisch-plastischen Bereich und liefert diesbezüglich eine ganzheitliche Betrachtungsweise.

Das FAD enthält eine durch die normierten Parameter K_r und L_r definierte Grenzkurve $K_r = f(L_r)$ für die Bewertung des rissbehafteten Bauteils. Die Grenzkurve grenzt den „sicheren“ Bereich ein, in dem kein Versagen des Bauteils mit Riss möglich ist, siehe Abbildung. Die Parameter K_r und L_r sind wie folgt definiert:

$K_r = K / K_C$ - der auf die Risszähigkeit K_C bezogene linear-elastische Spannungsintensitätsfaktor K

$L_r = F / F_e$ - Plastifizierungsgrad, d. h. die auf die plastische Grenzlast F_e des rissbehafteten Bauteils bezogene Belastung F

Für die Geometrie- und Beanspruchungsbedingungen und bekannten Werkstoffkennwerte (Festigkeitskennwerte und Risszähigkeit) des rissbehafteten Bauteils werden die Koordinaten $[K_r, L_r]$ eines Zustandspunktes bzw. einer Reihe von Zustandspunkten berechnet und mit der Grenzkurve verglichen. Je nach Lage der Zustandspunkte im FAD ergibt sich rechnerisch für das Bauteil der Zustand „sicher (integer)“ bzw. „unsicher“, vgl. Abbildung.

Die kritische Risstiefe ist erreicht, wenn der Zustandspunkt auf der Grenzkurve liegt /U 40/.

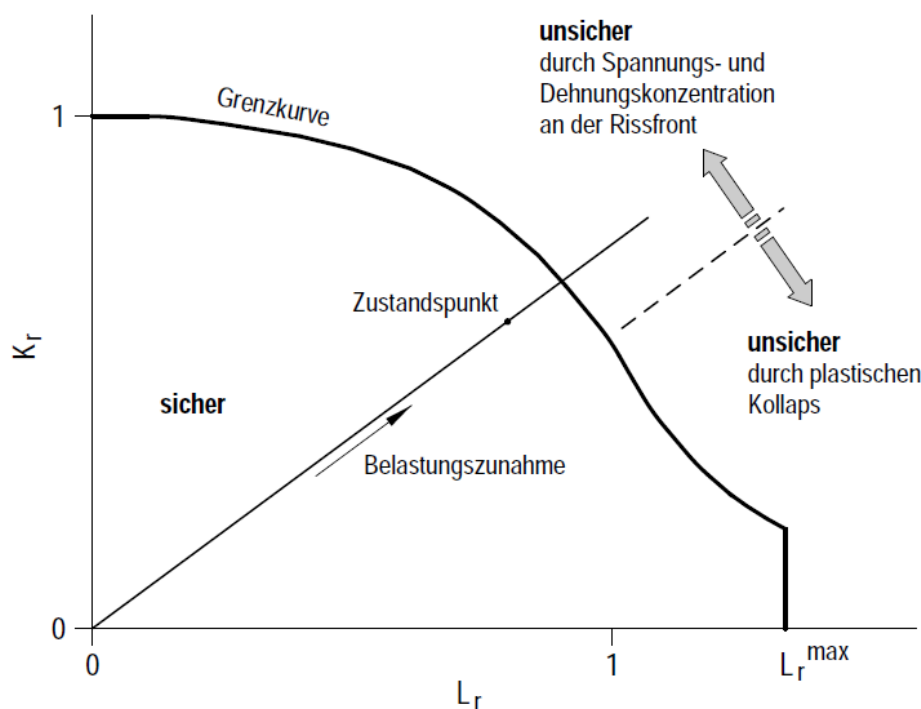


Abbildung 11 Failure Assessment Diagram FAD (schematisch), aus /U 25/

Einen gleichfalls sehr geringen positiven Effekt hat die Druckprüfung auf das rechnerische Ermüdungsrisswachstum eines angenommenen Durchrisses der Ausgangsrisslänge 40 mm (halbe Risslänge 20 mm): Die Anzahl der zulässigen Betriebslastwechsel bis zum Erreichen einer halben Risslänge von 32 mm (siehe Tabelle 10, Spalte 4) beträgt ohne vorherige Druckprüfung 36020 und vergrößert sich bei vorhergehender Durchführung einer Druckprüfung nur gering auf 36200, vgl. Abbildung 12 und Abbildung 13.

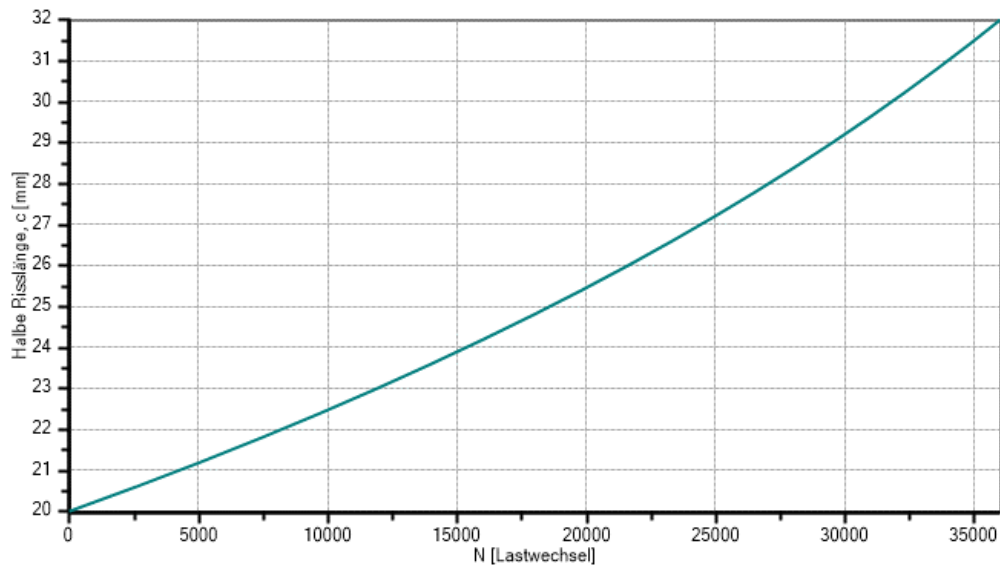


Abbildung 12 Berechnungsfall 1 (1.4550, DN80, t = 10 mm), Ermüdungsrisswachstum bis zur halben Risslänge $c = 32$ mm für einen Durchriss bei Wechselbeanspruchung durch Leistungsbetrieb mit 160,5 bar und Schweißzugspannungen ohne Druckprüfung

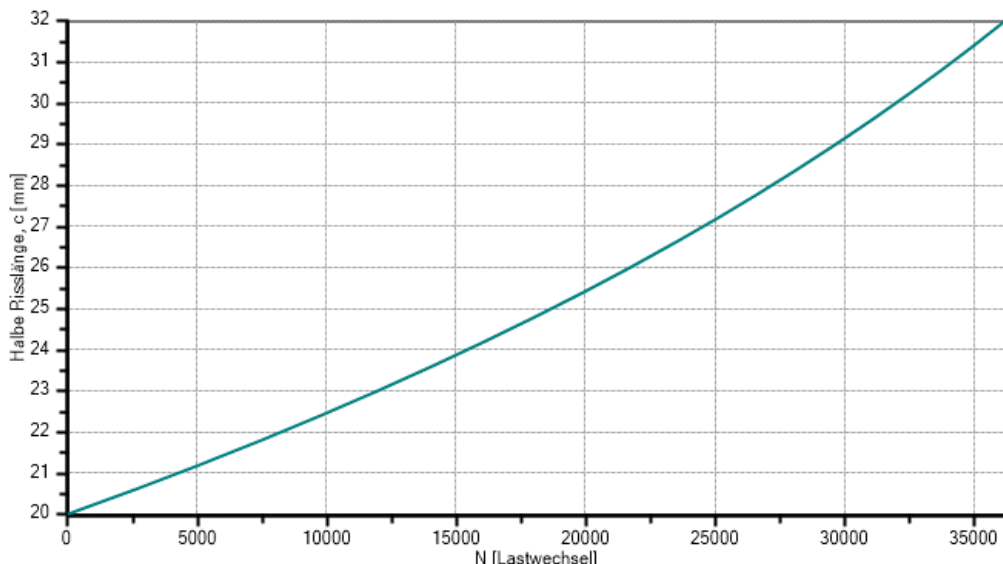


Abbildung 13 Berechnungsfall 1 (1.4550, DN80, t = 10 mm), Ermüdungsrisswachstum bis zur halben Risslänge $c = 32$ mm für einen Durchriss bei Wechselbeanspruchung durch Leistungsbetrieb mit 160,5 bar und Schweißzugspannungen nach vorheriger Druckprüfung

6.3.1.2 Reparaturaht

Für die nachfolgende Ergebnisbewertung wurden die Axialspannungen entlang eines Auswertepfades, beginnend auf der Rohrinneiseite in Schweißnahthöhe, ausgewertet und graphisch dargestellt. Der rote Kurvenverlauf in den nachfolgenden Abbildungen stellt den Eigenspannungsverlauf über der Wand im Ausgangszustand nach Erkalten der Schweißlage dar. Als blaue Kurve ist die Druckprüfung und als grüne Kurve die Belastung im Leistungsbetrieb dargestellt. Die Entlastungsphasen sind jeweils gestrichelt ausgeführt – sie stellen die durch die Belastungen geänderten reinen Eigenspannungsverläufe dar.

6.3.1.2.1 Spannungsanalyse

Durch die in der Druckprüfung aufgeprägten Belastungen wird eine Reduzierung und Vergleichmäßigung des Spannungsverlaufes erreicht. In Abbildung 14 ist für die dargestellten Axialspannungen (Grundlage der späteren bruchmechanischen Betrachtungen) erkennbar, dass diese Effekte bei der Druckprüfung im Vergleich zu den Belastungen beim Betrieb sogar geringer ausfallen. Als Ursache ist hier zu sehen, dass die Druckprüfung im „kalten Zustand“ bei Raumtemperatur (RT) vorgenommen wird. Der höhere Druck während der Druckprüfung (Faktor 1,43) wird von dem Effekt der niedrigeren Festigkeitskennwerte bei Betriebstemperatur deutlich überkompensiert. Für die Simulation wurde abdeckend der aus dem konventionellen Regelwerk abgeleitete Faktor 1,43 gewählt (siehe auch Abschnitte 3.1 und 3.4). Bei einem gemäß kerntechnischem Regelwerk zu wählenden Faktor von 1,3 wäre der Effekt der Druckprüfung noch geringer.

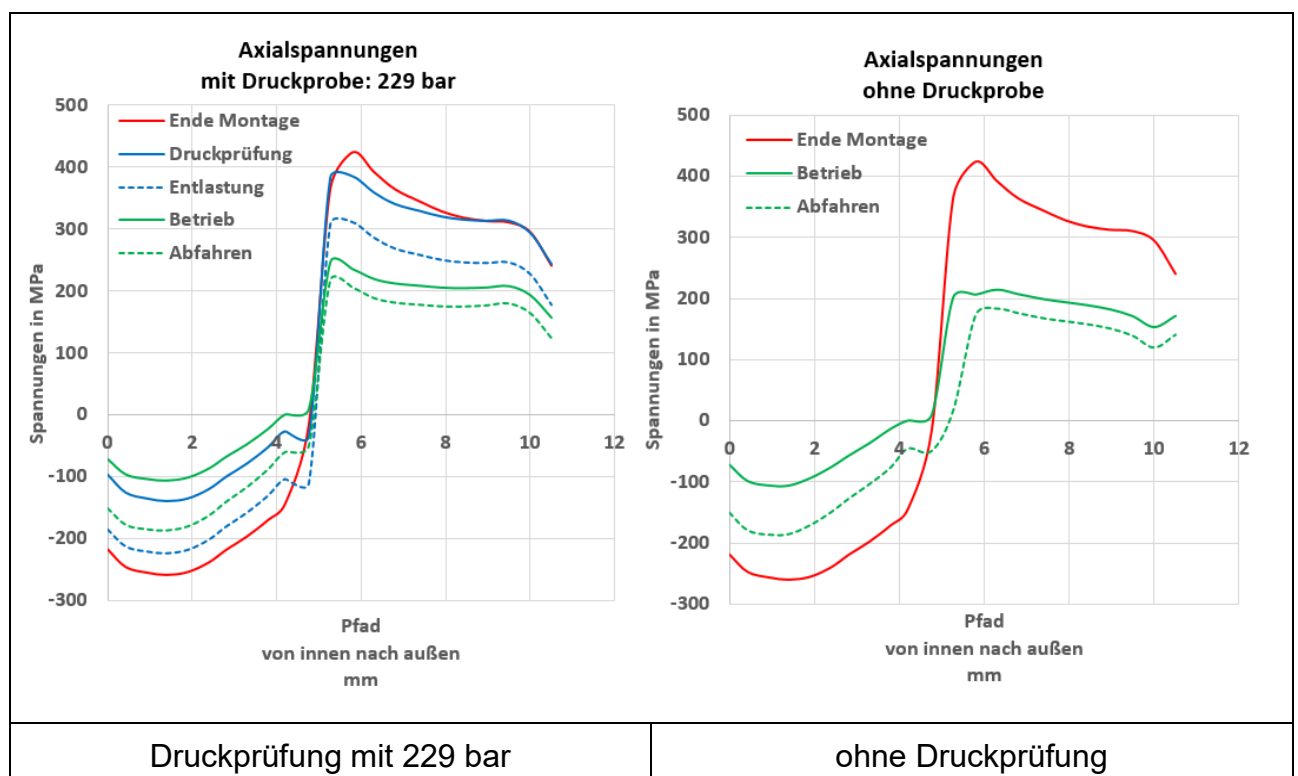


Abbildung 14 Berechnungsfall 1 (1.4550, DN80, t = 10 mm), Axialspannungen, Vergleich: mit und ohne Druckprüfung 229 bar

Die Festigkeitskennwerte bei Raumtemperatur liegen im Fall des hier betrachteten austenitischen Werkstoffes um den Faktor 1,5 über den Werten bei der Betriebstemperatur von 300 °C. Es kann abgeschätzt werden, dass erst bei Betriebstemperaturen unter 200 °C die Druckprüfung eine größere Wirkung entfaltet als die Belastung durch den Leistungsbetrieb. Hieraus lässt sich ableiten, dass eine Druckprüfung unter den hier dargestellten Bedingungen (Betriebstemperatur 300 °C) praktisch wirkungslos im Hinblick auf eine Reduzierung der Eigenspannungen ist.

Im Weiteren wurde untersucht, wie sich hypothetisch höhere Prüfdrücke – deutlich über dem 1,43-fachen des Betriebsdruckes – auf die Eigenspannungen in der Schweißnaht auswirken. Mit diesen Berechnungen soll untersucht werden, ob der Prüfdruck für übliche sicherheitstechnisch wichtige kerntechnische Komponenten einen erheblichen Beitrag zum Abbau von Eigenspannungen in einer Reparaturschweißnaht liefern kann.

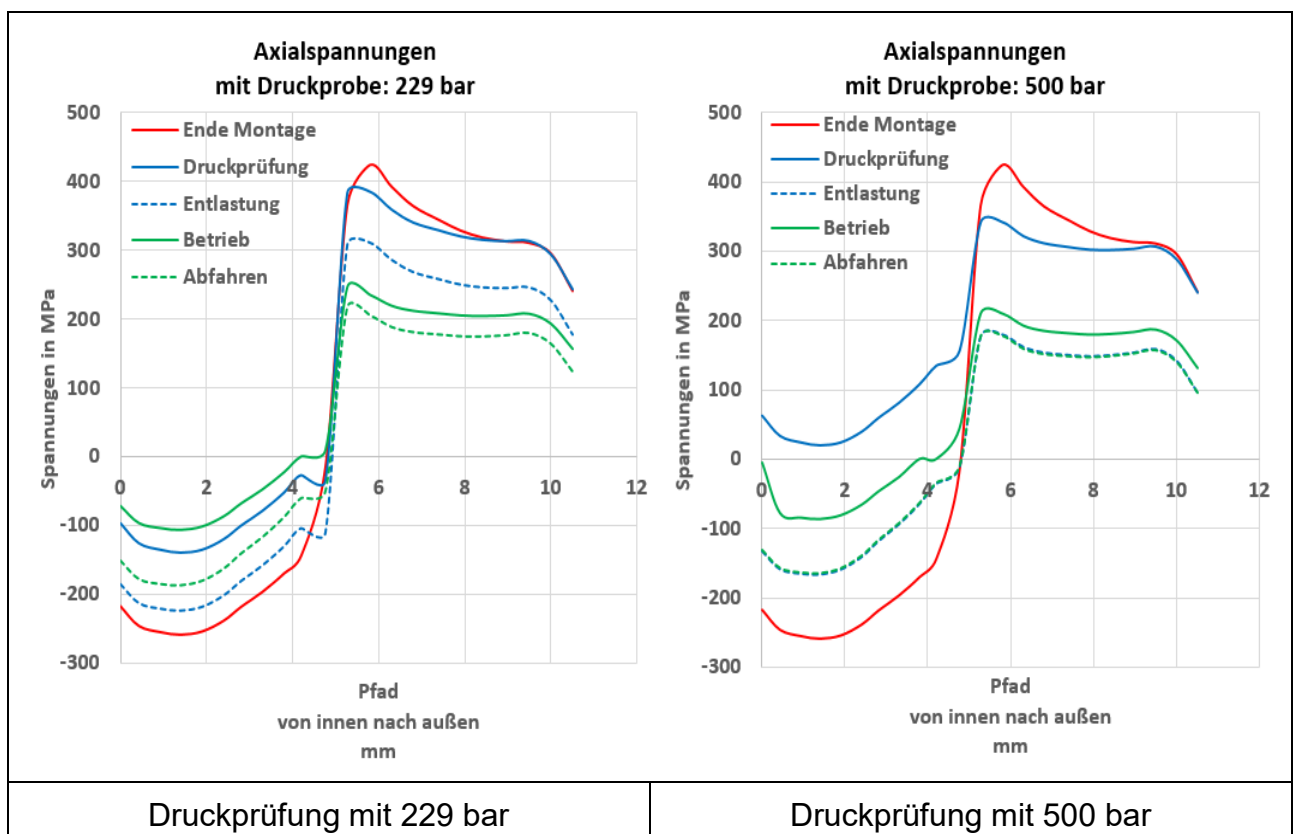


Abbildung 15 Berechnungsfall 1 (1.4550, DN80, t = 10 mm), Axialspannungen, Vergleich: Druckprüfung 229 bar und Druckprüfung 500 bar

Abbildung 15 zeigt, dass auch die Auswirkungen eines ca. 3-fachen Betriebsdruckes gegenüber dem Standardprüfdruck vernachlässigbar sind. Erst ein hypothetischer Prüfdruck von 1000 bar (6,25-facher Betriebsdruck) würde zu einem deutlichen Abbau der Eigenspannungsspitzen, siehe Abbildung 16 und Abbildung 17, führen. Damit wird für kerntechnische Komponenten beispielhaft gezeigt, dass eine drastische Erhöhung des Prüfdrucks kein geeignetes Mittel zum Abbau der Eigenspannungen in Schweißnähten ist. Prüfdrücke dieser Größenordnung widersprechen jeglichen Dimensionierungsregeln von Druckgeräten („Durchplastifizieren des gesamten Querschnittes“). Aus Abbildung 17 wird deutlich, dass

die Druckprüfung bei Raumtemperatur im Gegensatz zu einer Wärmebehandlung am Ende des Schweißvorgangs keinen Abbau, sondern lediglich eine Umlagerung der Eigenspannungen bewirkt: Spannungsspitzen werden durch das lokale Fließen abgebaut, die Vergleichmäßigung des Eigenspannungsprofils führt aber gleichzeitig zum Abbau von Druckeigenspannungen, was insbesondere im Hinblick auf ein mögliches Risswachstum nicht vorteilhaft ist, wie im Folgenden gezeigt wird.

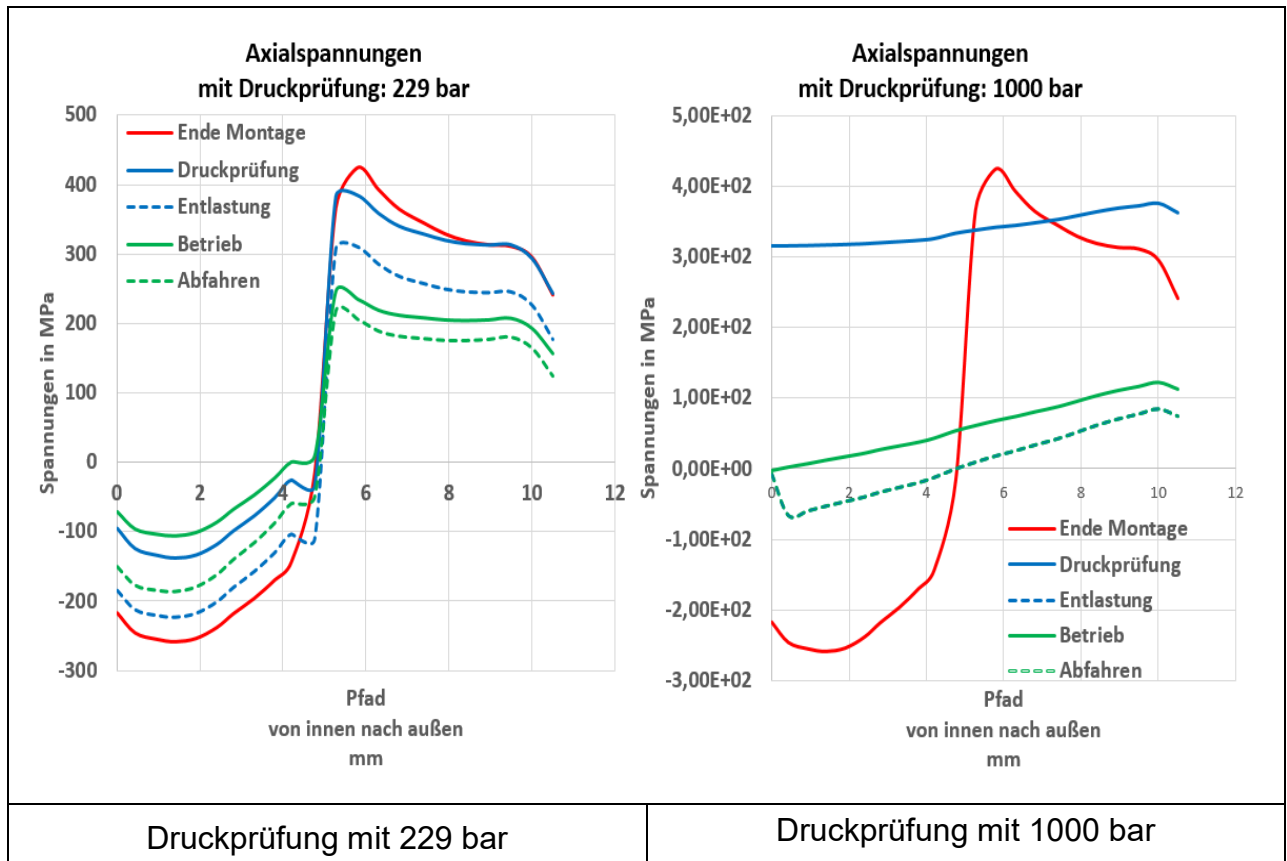


Abbildung 16 Berechnungsfall 1 (1.4550, DN80, t = 10 mm), Axialstärkungen, Vergleich: Druckprüfung 229 bar und Druckprüfung 1.000 bar

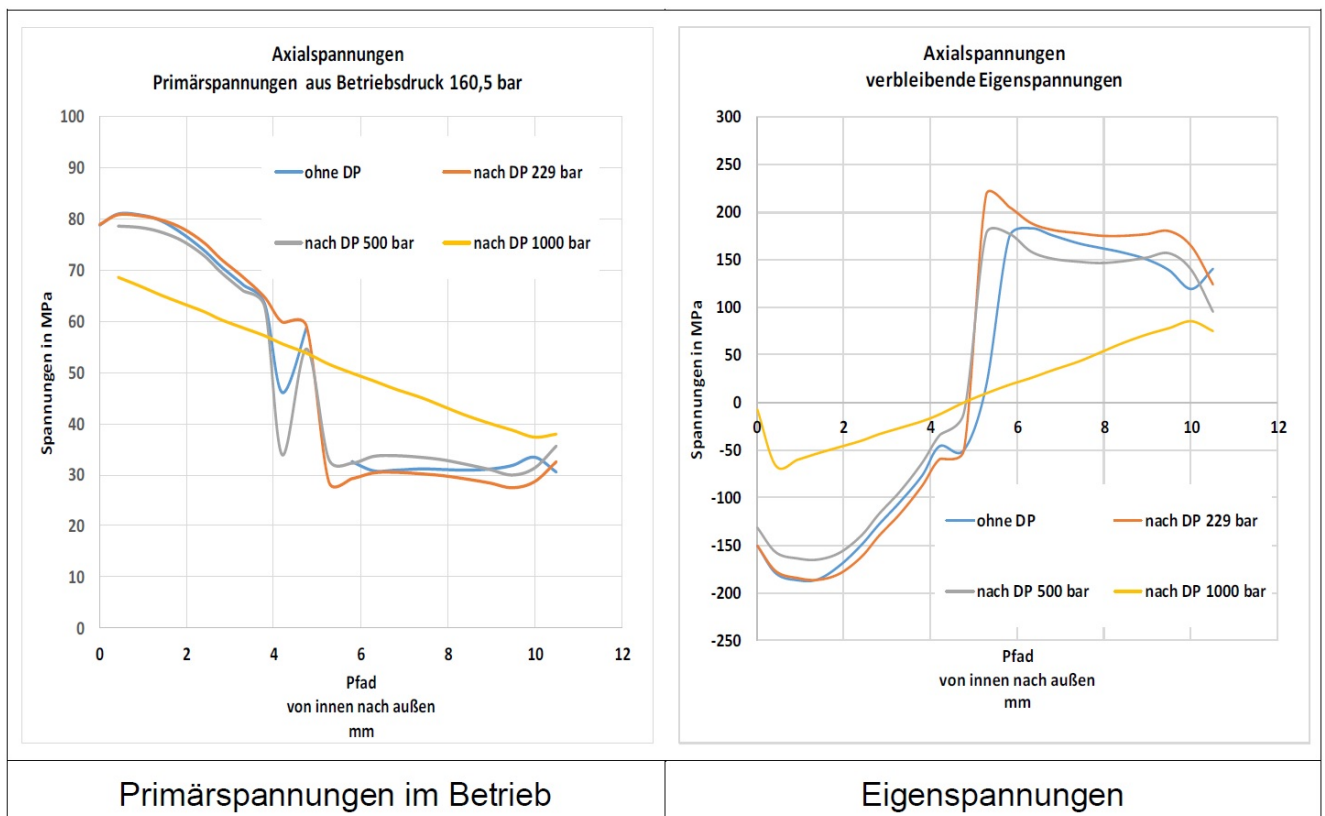


Abbildung 17 Berechnungsfall 1 (1.4550, DN80, t = 10 mm), Axialspannungen, Vergleich: Primärspannungen aus Betriebsdruck 160,5 bar und verbleibende Eigenspannungen (Lastschritt Abfahren)

6.3.1.2.2 Bruchmechanische Bewertung

Im Rahmen der bruchmechanischen Bewertung wurde wiederum rechnerisch untersucht, wie sich die unterschiedlichen Eigenspannungsverläufe auf die kritische Rissgröße und das Ermüdungsrisswachstum von angenommenen Rissen auswirken.

Tabelle 11 enthält die Berechnungswerte der kritischen Rissgrößen für einen angenommenen Durchriss bzw. einen angenommenen umlaufenden Außenriss in Schweißnahthöhe. Aufgeführt sind die Berechnungswerte gemäß den Regelwerken SINTAP/FITNET /U 22/ und ASME-Code, Section IX /U 23/ , Appendix H ohne Anwendung von Struktur Faktoren bzw. Partiellen Sicherheitsfaktoren.

Durchriss		
kritische halbe Risslänge [mm]	FAD nach SINTAP/FITNET /U 22/	FAD nach ASME XI, App. H, Austenit /U 23/
ohne Druckprüfung	40,8	34,3
mit Druckprüfung 229 bar	39,6	32,3
mit Druckprüfung 500 bar	39,7	32,7
mit Druckprüfung 1.000 bar	39,7	34,8
Umlaufender Außenriss		
kritische Risstiefe [mm]	FAD nach SINTAP/FITNET /U 22/	FAD nach ASME XI, App. H, Austenit /U 23/
ohne Druckprüfung	7,0	4,1
mit Druckprüfung 229 bar	5,2	3,8
mit Druckprüfung 500 bar	6,8	4,2
mit Druckprüfung 1.000 bar	7,1	6,9

Tabelle 11 Berechnungsfall 1 (1.4550, DN80, t = 10 mm), Reparaturaht im austenitischen Rohr (DN80, t = 10 mm): Kritische Risslänge für einen angenommenen Durchriss und einen umlaufenden Umfangsriss außen

Die Unterschiede selbst, die durch die Druckprüfung mit verschiedenen Druckhöhen oder den Entfall der Druckprüfung rechnerisch entstehen, sind nicht nur sehr gering, sondern auch von uneinheitlicher Tendenz hinsichtlich der Wirkung auf die berechneten kritischen Rissgrößen.

Einen gleichfalls sehr geringen und uneinheitlichen Effekt hat die Druckprüfung auf das rechnerische Ermüdungsrisswachstum sowohl eines angenommenen Durchrisses als auch eines umlaufenden Außenrisses.

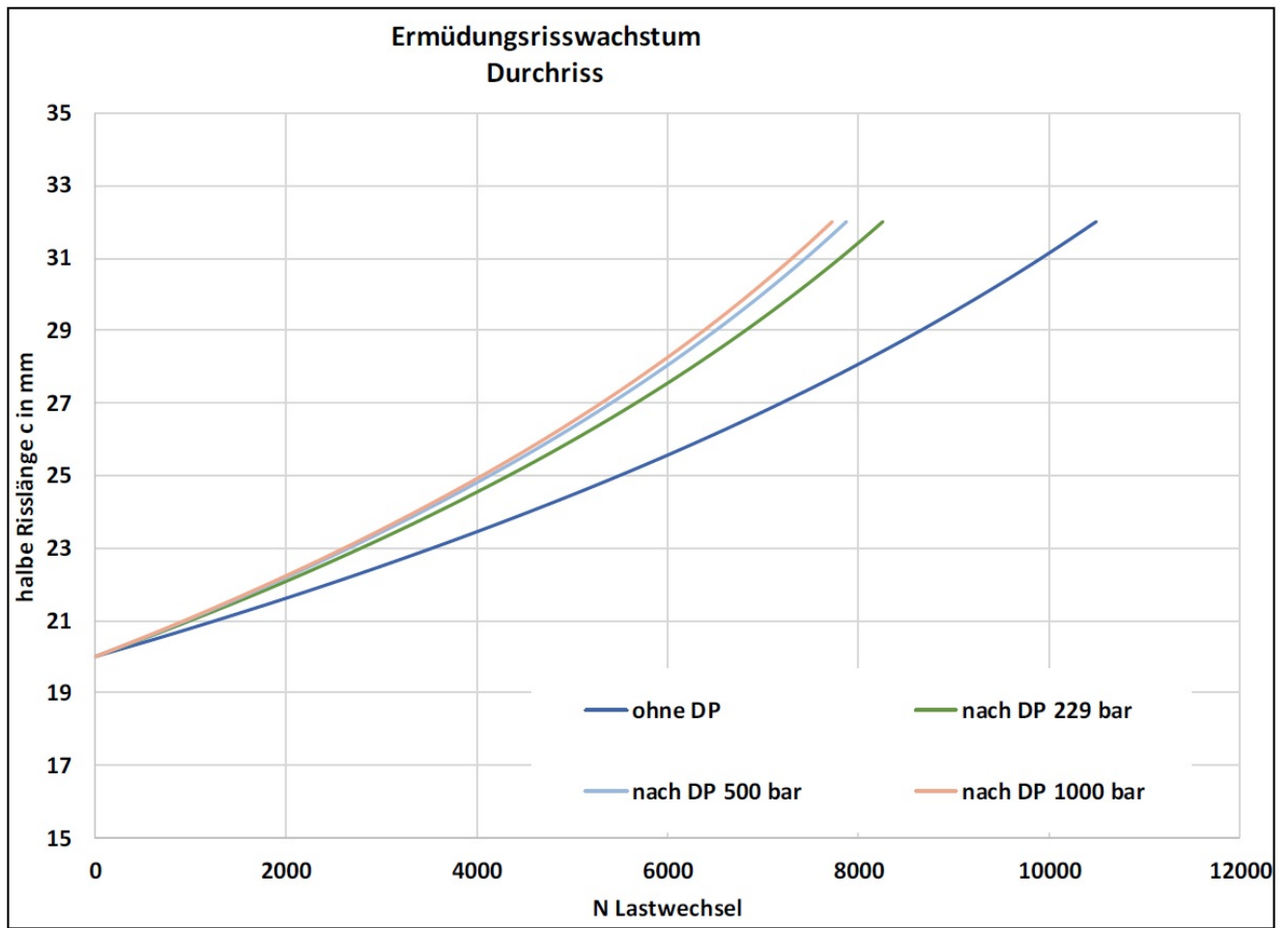


Abbildung 18 Berechnungsfall 1 (1.4550, DN80, $t = 10$ mm), Ermüdungsrisswachstum bis zur halben Risslänge $c = 32$ mm für einen Durchriss in der Reparaturaht bei Wechselbeanspruchung durch Leistungsbetrieb und Schweißspannungen ohne Druckprüfung bzw. mit Druckprüfung in unterschiedlicher Höhe

Abbildung 18 enthält die Berechnungsergebnisse eines Ermüdungsrisswachstums für einen Durchriss in der Reparaturaht bis zur halben Risslänge $c = 32$ mm im Berechnungsfall 1 bei Wechselbeanspruchung zwischen Leistungsbetrieb und reinen Schweißspannungen ohne Druckprüfung bzw. mit Druckprüfung in unterschiedlicher Höhe.

Abbildung 19 zeigt das rechnerische Ermüdungsrisswachstum bis zum Wanddurchriss für einen äußeren umlaufenden Umfangsriss in der Reparaturaht im Berechnungsfall 1 bei Beanspruchung durch Leistungsbetrieb und Schweißspannungen ohne Druckprüfung bzw. mit Druckprüfung in unterschiedlicher Höhe.

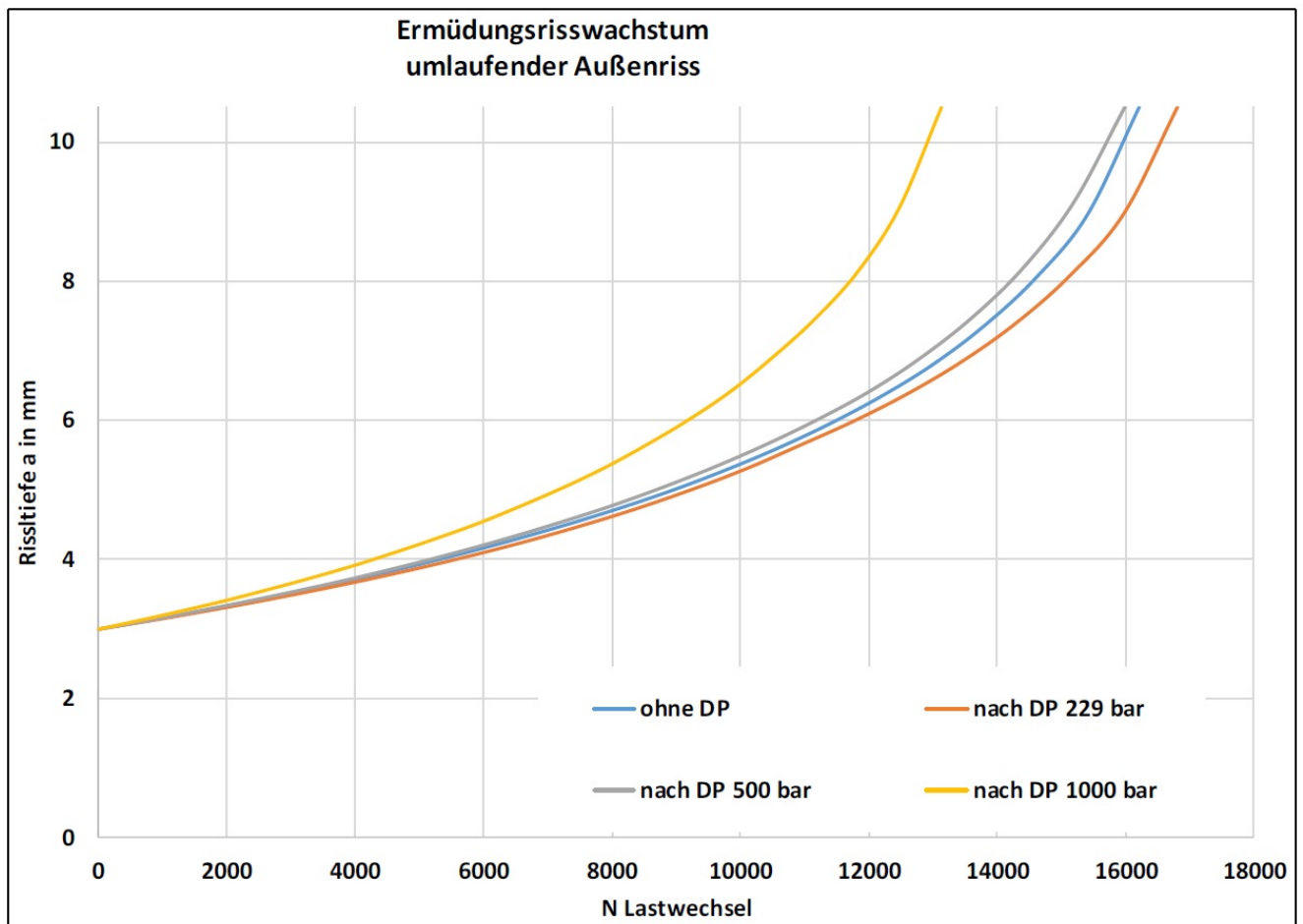


Abbildung 19 Berechnungsfall 1 (1.4550, DN80, t = 10 mm), Ermüdungsrisswachstum bis zum Wanddurchriss für einen äußeren umlaufenden Umfangsriss in der Reparaturnaht bei Wechselbeanspruchung durch Leistungsbetrieb und Schweißeigenstressungen ohne Druckprüfung bzw. mit Druckprüfung in unterschiedlicher Höhe

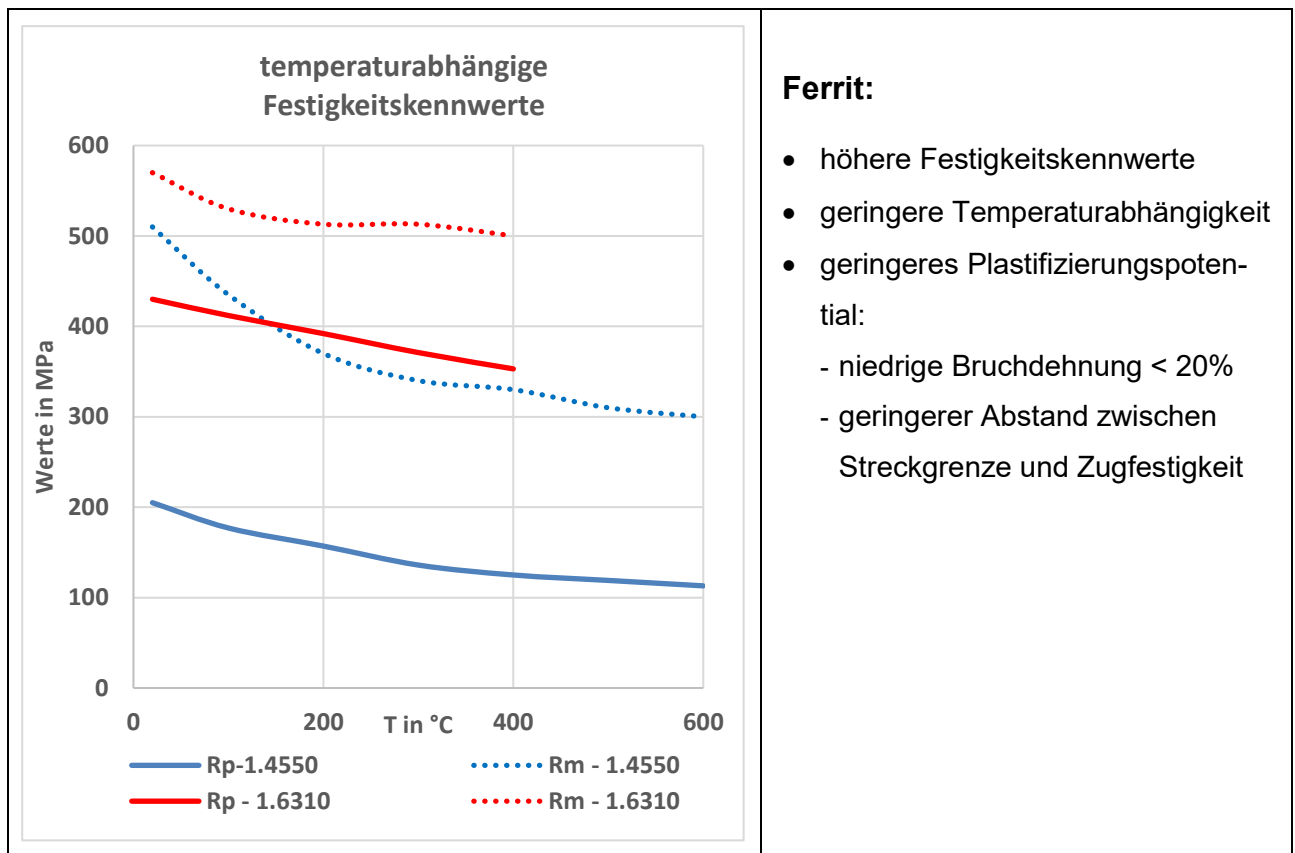
Erkennbar ist aus Abbildung 18 und Abbildung 19 neben dem uneinheitlichen Effekt des unterschiedlichen Prüfdrucks der Druckprüfungen vor allem, dass die Druckprüfung sich auch nachteilig, d. h. beschleunigend auf ein mögliches betriebliches Ermüdungsrisswachstum auswirken kann. Dies ist auf den bereits weiter oben genannten Umstand zurückzuführen, dass die Druckprüfung bei Raumtemperatur im Gegensatz zu einer Wärmebehandlung am Ende des Schweißvorgangs keinen Abbau, sondern lediglich eine Umlagerung der Eigenspannungen über der Wanddicke bewirkt.

6.3.2 Berechnungsfall Nr. 2 – Ferrit, 1.6310, DN80

Aus Gründen der Vergleichbarkeit bzgl. der Interpretation der Ergebnisse wurden die geometrischen Randbedingungen im Modell nicht verändert.

Der austenitische Werkstoff 1.4550 wurde in der Berechnung durch den im Reaktorbau in der druckführenden Umschließung des Reaktorkühlmittels und in den äußeren Systemen häufig verwendeten ferritischen Stahl 20 MnMoNi 5-5 (1.6310) ersetzt. Der ferritische Werkstoff unterscheidet sich gegenüber dem in Abschnitt 6.3.1 untersuchten austenitischen Stahl

grundsätzlich in seinen Plastizitätseigenschaften, s. Abbildung 20. Demnach beginnen Plastifizierungen in einem austenitischen Werkstoff früher und nehmen mit steigenden Temperaturen deutlich zu.



Ferrit:

- höhere Festigkeitskennwerte
- geringere Temperaturabhängigkeit
- geringeres Plastifizierungspotential:
 - niedrige Bruchdehnung < 20%
 - geringerer Abstand zwischen Streckgrenze und Zugfestigkeit

Abbildung 20 Vergleich der Festigkeitskennwerte Austenit, 1.4550 – Ferrit, 1.6310 (/U 29/ - /U 31/)

6.3.2.1 Mehrlagige, durchgehende Schweißnaht

Abbildung 21 zeigt das gemäß /U 17/ analytisch berechneten Eigenspannungsprofil für das ferritische Rohr nach Fertigung der Rundnaht sowie die hieraus nach /U 18/ berechneten Spannungumlagerungen infolge der Druckprüfung mit 229 bar und nach einem Betriebszyklus mit 160,5 bar ohne vorausgegangene Druckprüfung.

Wie schon für das austenitische Rohr in Abschnitt 6.3.1.1 festgestellt, zeigt der Vergleich der Spannungumlagerungen nur geringe Unterschiede in den verbleibenden Eigenspannungsprofilen.

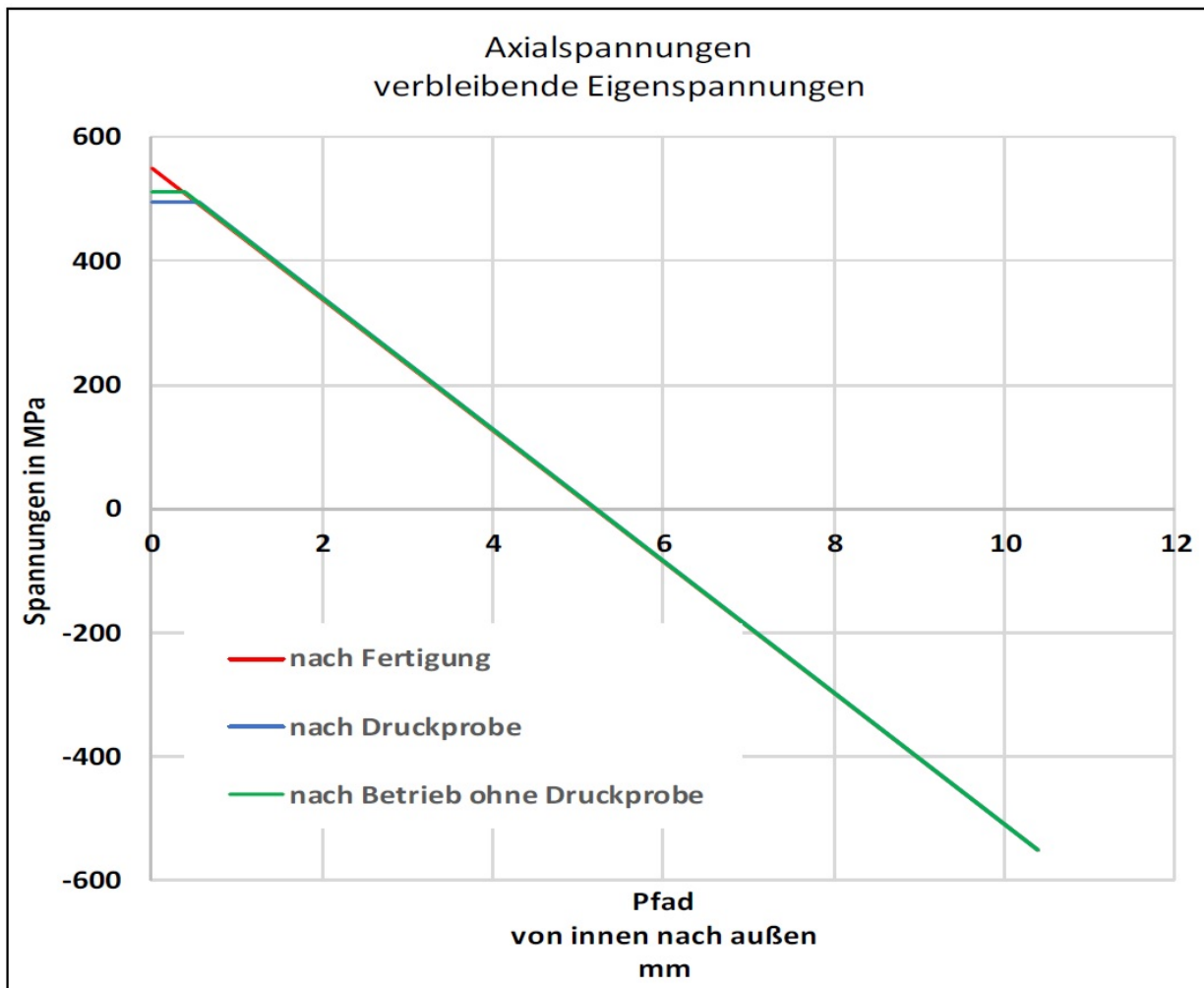


Abbildung 21 Berechnungsfall 2 (1.6310, DN80, t = 10 mm), analytische Eigenspannungsprofile in der Rundstumpfnah nach Fertigung, nach Druckprüfung und nach Betrieb ohne Druckprüfung

Diese Unterschiede im Eigenspannungsprofil führen bei der Überlagerung mit den Spannungen aus dem Betriebsdruck von 160,5 bar zu ebenfalls geringen Unterschieden in der Berechnung der kritischen Risslängen für den untersuchten Durchriss, siehe Tabelle 12.

Die angegebenen Werte in Tabelle 12 Spalte 2 und 3 stellen wieder die Berechnungswerte ohne Anwendung von Struktur Faktoren bzw. Partiellen Sicherheitsfaktoren gemäß den Regelwerken dar. In der Spalte 4 sind die kritischen halben Risslängen bei Anwendung der Struktur Faktoren (Sicherheitsfaktoren) nach ASME-Code, Sect. XI, Appendix H /U 23/ für Betriebsstufe Level A angegeben.

kritische halbe Risslänge [mm]	FAD nach SINTAP/FITNET /U 22/	FAD nach ASME XI, App. H, Ferrit /U 23/	FAD nach ASME XI, App. H, Ferrit /U 23/ mit Sicherheitsfaktor
ohne Druckprüfung	54,26	53,78	43,90
mit Druckprüfung	55,55	54,96	44,61

Tabelle 12 Berechnungsfall 2 (1.6310, DN80, t = 10 mm), kritische Risslänge für einen angenommenen Durchriss

Abbildung 22 zeigt exemplarisch das Failure Assessment Diagram nach ASME-Code, Section XI /U 23/, Appendix H im Ergebnis der Berechnung mit IWM VERB /U 20/ für einen Durchriss im ferritischen Rohr bei Beanspruchung durch den Leistungsbetrieb mit 160,5 bar und Schweißzugspannungen nach erfolgter Druckprüfung mit 229 bar. Dabei wurden die Strukturkoeffizienten (Sicherheitsfaktoren) für Betriebsstufe Level A gemäß ASME-Code, Section XI /U 23/, Appendix H zugrunde gelegt.

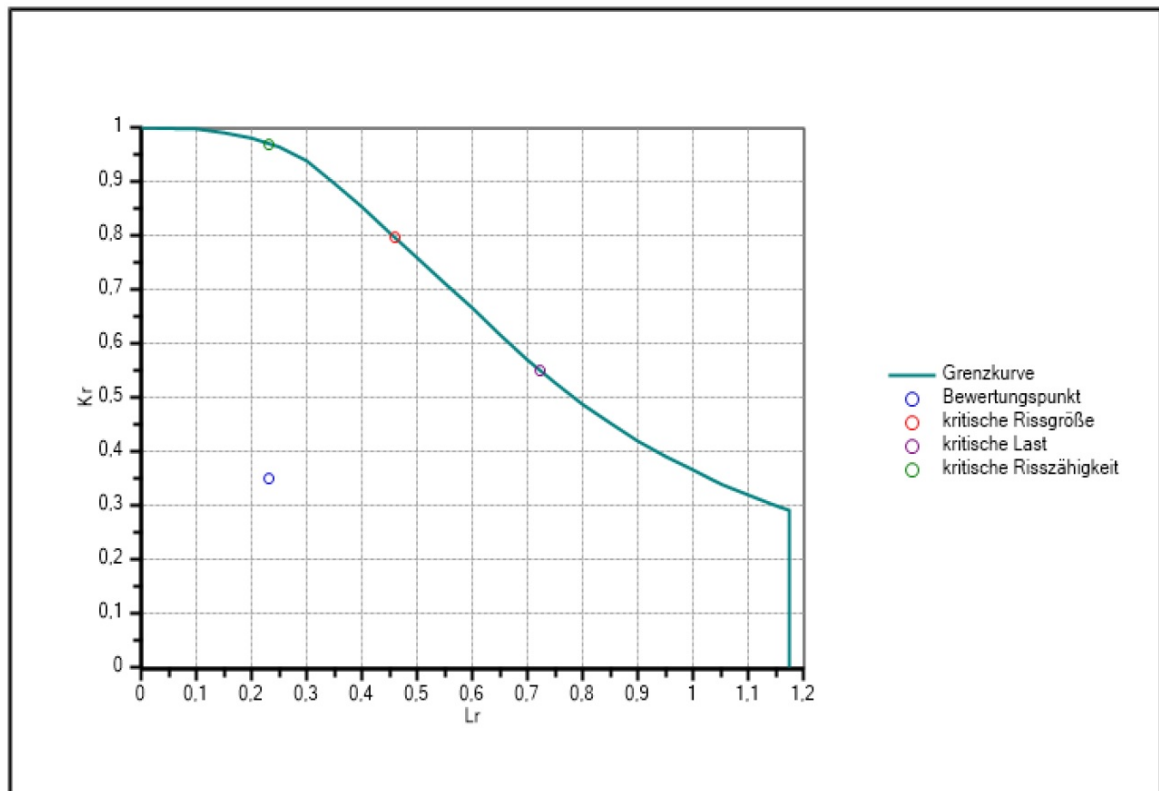


Abbildung 22 Berechnungsfall 2 (1.6310, DN80, t = 10 mm), FAD nach ASME-Code, Section XI /U 23/, Appendix H, für einen Durchriss bei Beanspruchung durch Leistungsbetrieb mit 160,5 bar und Schweißzugspannungen nach Druckprüfung mit 229 bar, Sicherheitsfaktoren für Level A

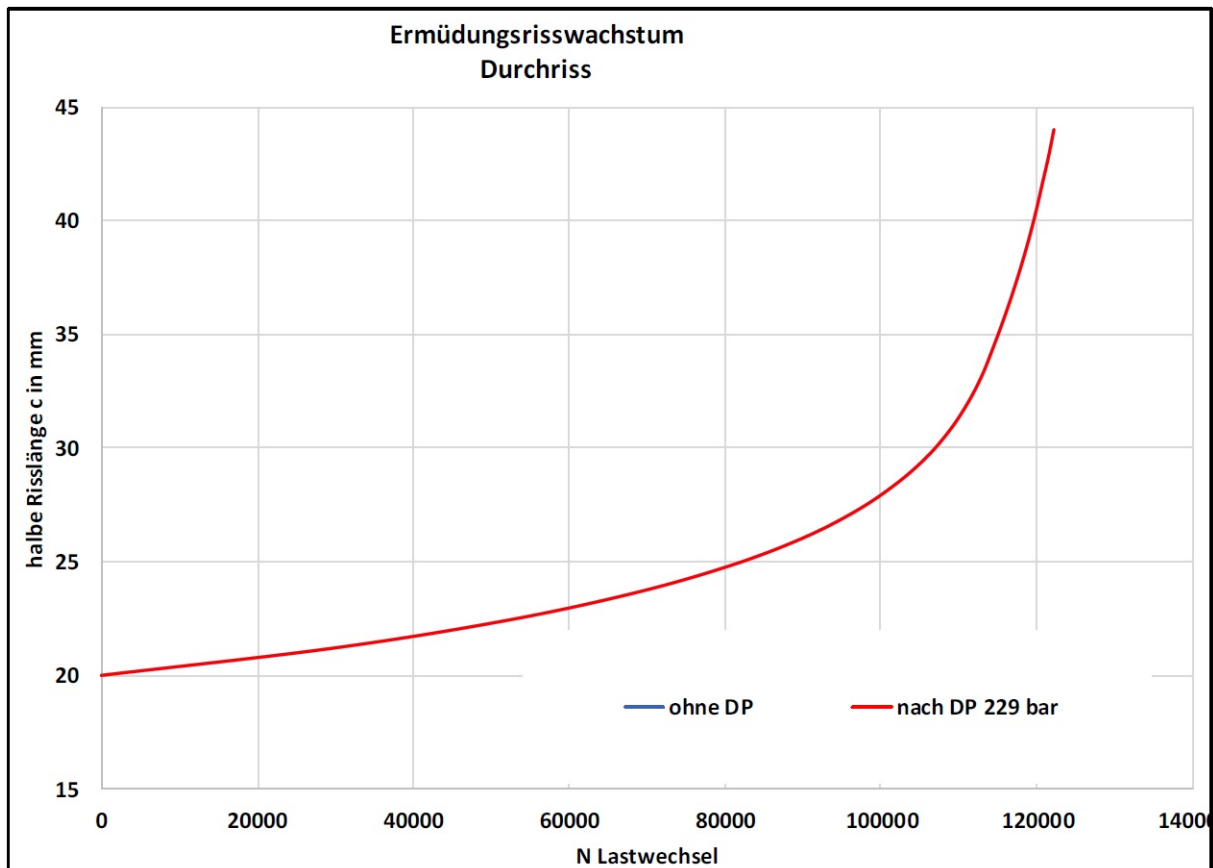


Abbildung 23 Berechnungsfall 2 (1.6310, DN80, $t = 10$ mm), Ermüdungsrisswachstum bis zur halben Risslänge $c = 44$ mm (Tab. 12, Spalte 4) für einen Durchriss in der Stumpfnahnt bei Wechselbeanspruchung durch Leistungsbetrieb und Schweißeigenstressungen ohne bzw. mit Druckprüfung

Abbildung 23 zeigt das berechnete Ermüdungsrisswachstum bis zur halben Risslänge $c = 44$ mm für den angenommenen Durchriss in der Stumpfnahnt im Berechnungsfall 2 bei Wechselbeanspruchung durch Leistungsbetrieb und den unterschiedlichen Schweißeigenstressungen mit oder ohne vorangegangene Druckprüfung. Die berechneten Risswachstumskurven infolge der unterschiedlichen Schweißeigenstressungen liegen de facto übereinander.

6.3.2.2 Reparaturen

6.3.2.2.1 Spannungsanalyse

Die Berechnungen zeigen, dass die Druckprüfung mit 229 bar lediglich zu einer geringfügigen Umlagerung der Eigenstressungen führt. Der gleiche Effekt wird allerdings auch durch den normalen Leistungsbetrieb (160,5 bar bei 296 °C) erreicht, s. Abbildung 24. Damit wird auch für den ferritischen Werkstoff nochmals deutlich, dass der Aufwand einer Wasserdruckprüfung zur Umlagerung der Schweißeigenstressungen nicht im Verhältnis zum Ergebnis steht.

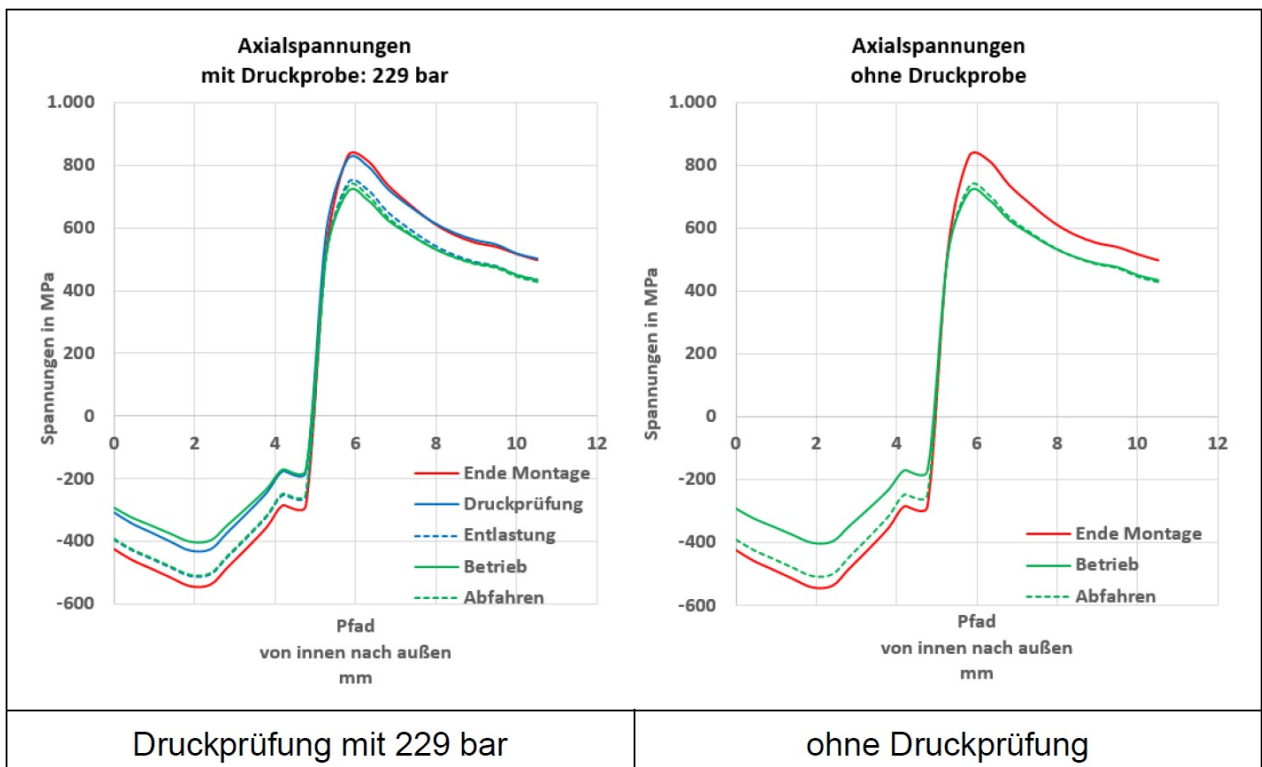


Abbildung 24 Berechnungsfall 2 (1.6310, DN80, t = 10 mm), Axialspannungen, Vergleich: mit und ohne Druckprüfung 229 bar

Der Vergleich des Eigenspannungsumbaus durch die Druckprüfung mit 229 bar für beide untersuchte Werkstoffe in Abbildung 25 macht deutlich, dass die Umlagerungseffekte beim austenitischen Stahl deutlich ausgeprägter sind. In beiden Fällen bewirkt jedoch der Anlagenbetrieb den gleichen bzw. einen höheren Spannungsumbau als die Druckprüfung mit 229 bar.

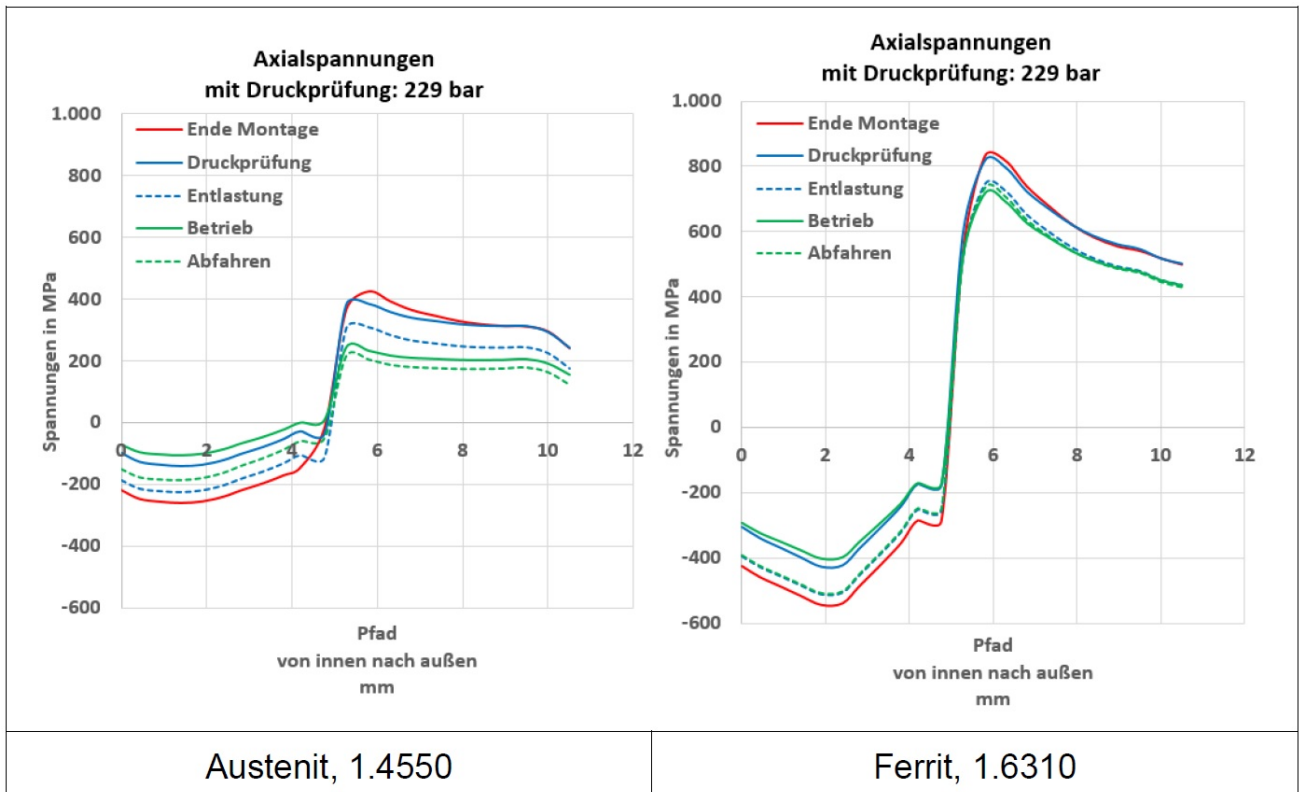


Abbildung 25 Vergleich der Eigenspannungsumlagerung durch eine Druckprüfung mit 229 bar bei unterschiedlichen Werkstoffen

Abbildung 26 zeigt den analogen Vergleich für beide Werkstoffe bei einer Druckprüfung mit erhöhtem Prüfdruck von 1.000 bar. Bei beiden Werkstoffen bewirkt der erhöhte Prüfdruck bei Raumtemperatur zumindest eine deutlichere Spannungsumlagerung als der Betriebsdruck bei Betriebstemperatur ohne vorangegangene Druckprüfung.

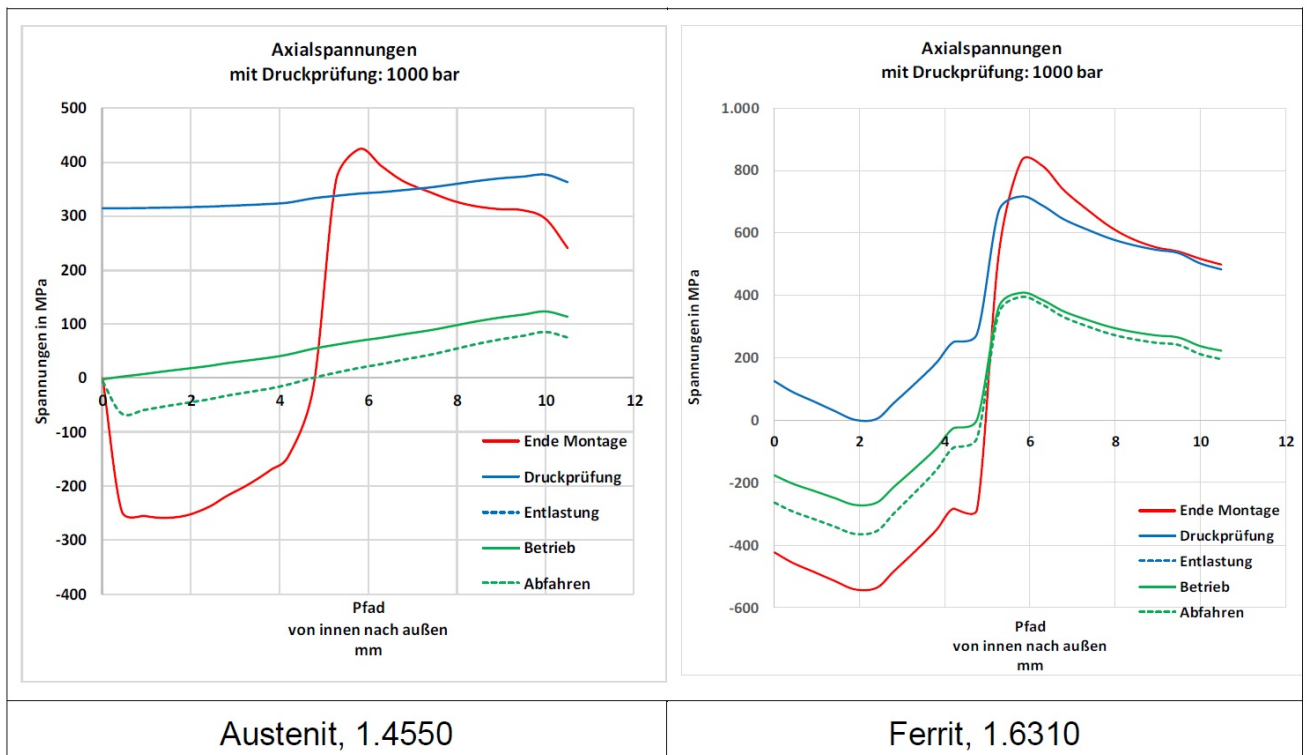


Abbildung 26 Vergleich der Eigenspannungsumlagerung durch eine Druckprüfung mit 1.000 bar bei unterschiedlichen Werkstoffen

6.3.2.2.2 Bruchmechanische Bewertung

Wie für die Reparaturaht im austenitischen Rohr wurde wiederum rechnerisch untersucht, wie sich die unterschiedlichen Eigenspannungsverläufe auf die kritische Rissgröße und das Ermüdungsrisswachstum von angenommenen Rissen auswirken.

Tabelle 13 enthält die Berechnungswerte der kritischen Rissgrößen für einen angenommenen Durchriss bzw. einen umlaufenden Außenriss in Schweißnahhöhe. Aufgeführt sind in Spalte 2 und 3 die Berechnungswerte gemäß den Regelwerken SINTAP/FITNET /U 22/ und ASME-Code, Section IX /U 23/, Appendix H ohne Anwendung von Strukturfaktoren bzw. Partiellen Sicherheitsfaktoren. Die Berechnungswerte unter Anwendung der Strukturfaktoren (Sicherheitsfaktoren) nach ASME-Code, Section IX /U 23/, Appendix H sind in Spalte 4 beigefügt.

Die Unterschiede selbst, die durch die Druckprüfung mit verschiedenen Druckhöhen oder den Entfall der Druckprüfung rechnerisch entstehen, sind wieder von uneinheitlicher Tendenz hinsichtlich der Auswirkung auf die berechneten kritischen Rissgrößen.

Durchriss			
kritische halbe Risslänge [mm]	FAD nach SINTAP/FITNET /U 22/	FAD nach ASME XI, App. H, Ferrit /U 23/	FAD nach ASME XI, App. H, Ferrit /U 23/ mit Sicherheitsfaktor
ohne DP	49,6	46,5	27,0
mit DP bei 229 bar	49,6	46,5	26,9
mit DP bei 1.000 bar	60,1	54,2	29,9
Umlaufender Außenriss			
kritische Risstiefe [mm]	FAD nach SINTAP/FITNET /U 22/	FAD nach ASME XI, App. H, Ferrit /U 23/	FAD nach ASME XI, App. H, Ferrit /U 23/ mit Sicherheitsfaktor
ohne DP	9,1	9,1	6,8
mit DP bei 229 bar	9,1	9,1	6,8
mit DP bei 1.000 bar	8,9	8,9	6,4

Tabelle 13 Berechnungsfall 2 (1.6310, DN80, t = 10 mm), Reparaturaht im ferritischen Rohr: Kritische Risslänge für einen Durchriss und einen umlaufenden Umfangsriss außen

Aus Tabelle 13 ist ablesbar, dass die regelkonforme Druckprüfung (DP) mit 229 bar keinen Effekt auf die kritischen Rissgrößen hat, während eine erhöhte Druckprüfung mit 1000 bar

für das Risspostulat eines Durchrisses einen positiven Effekt hinsichtlich einer größeren kritischen Risslänge hätte, für einen angenommenen umlaufenden Außenriss hingegen eine kleinere kritische Risstiefe bedeuten würde.

Eine klarere, jedoch negative Tendenz lässt sich in Auswertung der nachfolgend dargestellten Ermüdungsrisswachstumsberechnungen für die Reparaturaht im ferritischen Rohr feststellen.

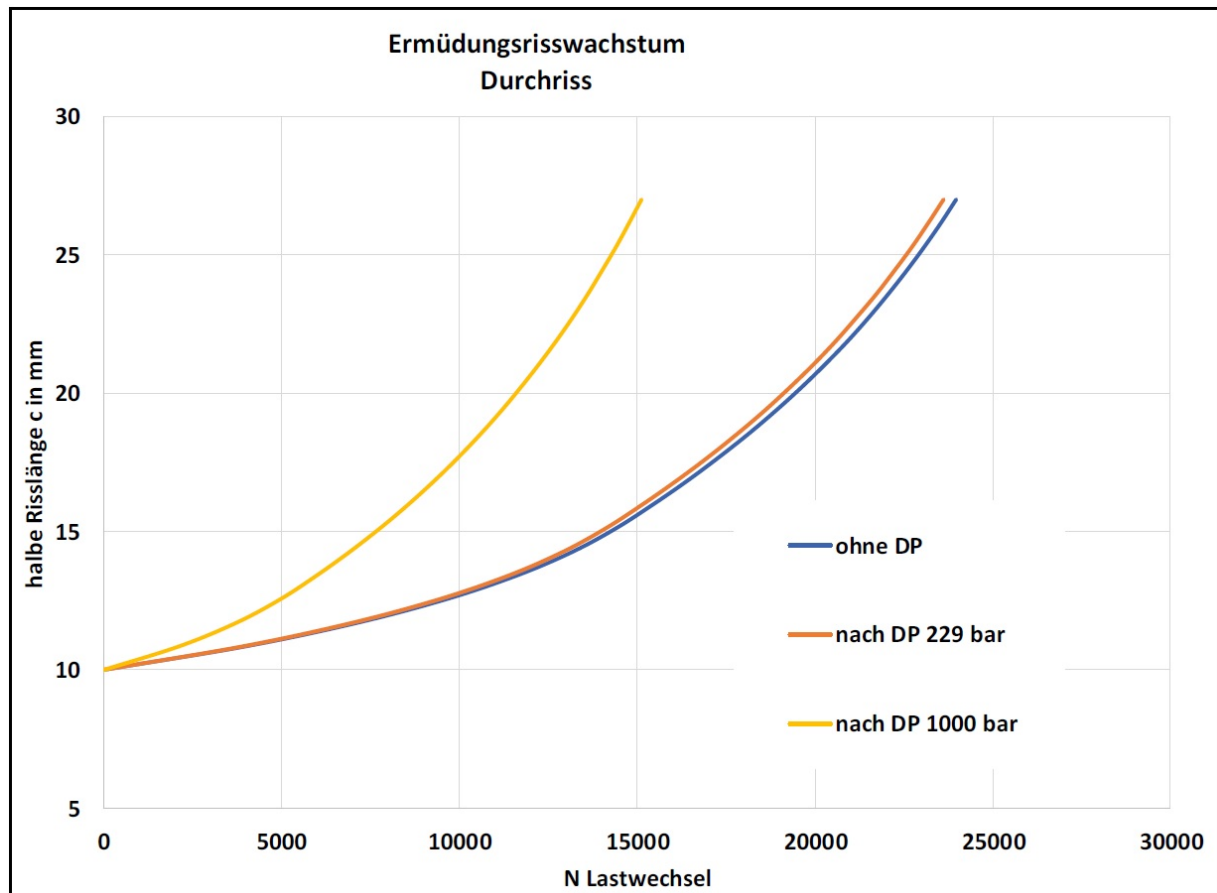


Abbildung 27 Berechnungsfall 2 (1.6310, DN80, t = 10 mm), Ermüdungsrisswachstum bis zur halben Risslänge $c = 27$ mm (Tab. 13, Spalte 4) für einen Durchriss in der Reparaturaht bei Wechselbeanspruchung durch Leistungsbetrieb und Schweißelastizitäten ohne Druckprüfung bzw. mit Druckprüfung in unterschiedlicher Höhe

Abbildung 27 enthält die Berechnungsergebnisse eines Ermüdungsrisswachstums bis zur halben Risslänge von 27 mm für einen Durchriss in der Reparaturaht im Berechnungsfall 2 bei Wechselbeanspruchung durch Leistungsbetrieb und Schweißelastizitäten ohne Druckprüfung bzw. mit Druckprüfung in unterschiedlicher Höhe (229 bar und 1000 bar).

Abbildung 28 zeigt das rechnerische Ermüdungsrisswachstum bis zum Wanddurchriss für einen außen umlaufenden Umfangriss in der Reparaturaht im Berechnungsfall 2 bei Wechselbeanspruchung durch den Leistungsbetrieb und Schweißelastizitäten ohne Druckprüfung bzw. mit Druckprüfung in unterschiedlicher Höhe.

Erkennbar ist aus der Abbildung 27 und der Abbildung 28, dass die Druckprüfung sich unabhängig von der angenommenen Risskonfiguration nachteilig, d. h. beschleunigend auf ein mögliches betriebliches Ermüdungsrisswachstum auswirken kann. Dies ist wiederum auf den erwähnten Umstand zurückzuführen, dass eine Druckprüfung bei Raumtemperatur im Gegensatz zu einer Wärmebehandlung am Ende des Schweißvorgangs keinen Abbau, sondern lediglich eine Umlagerung der Eigenspannungen über der Wanddicke bewirkt.

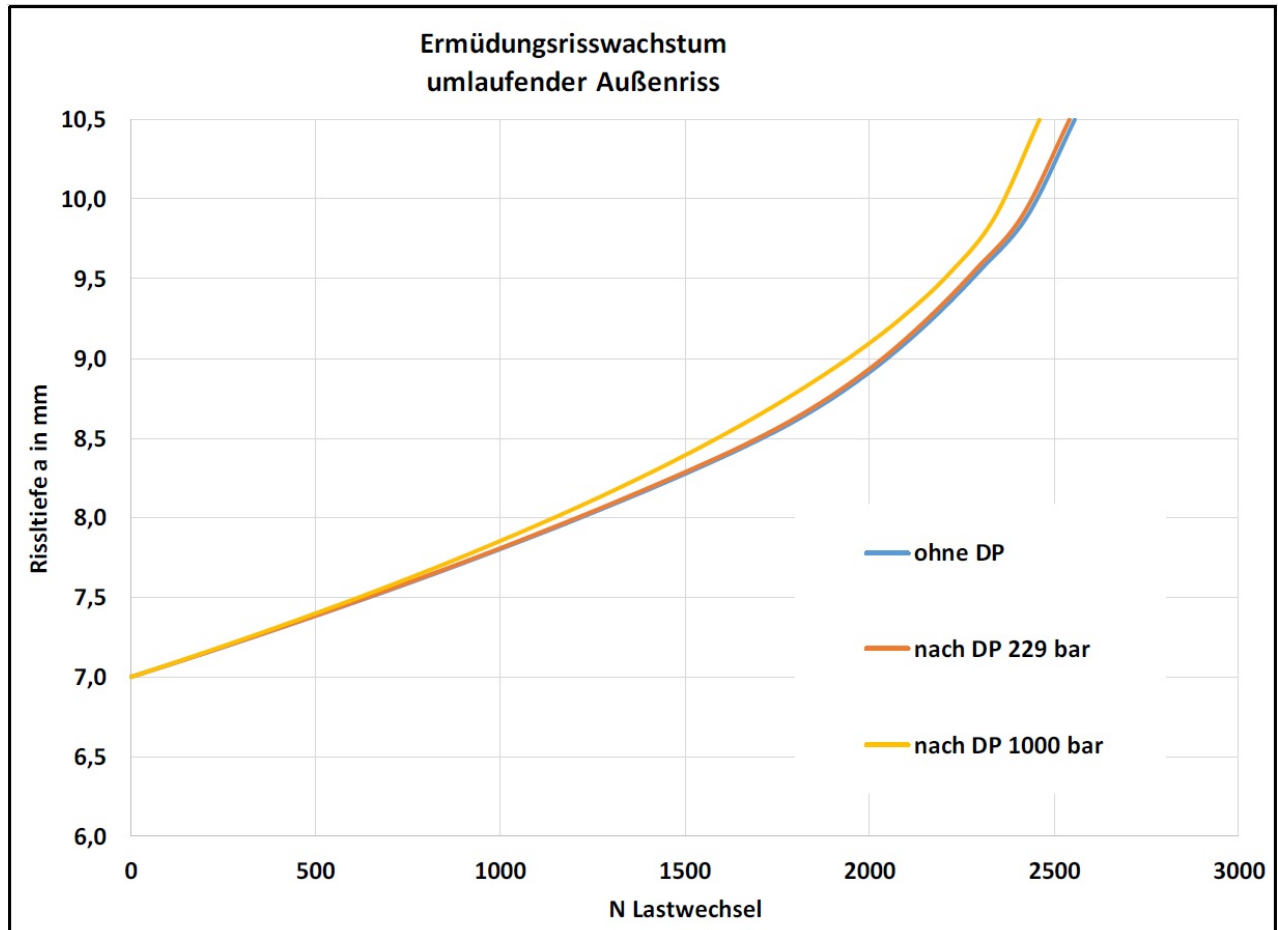


Abbildung 28 Berechnungsfall 2 (1.6310, DN80, $t = 10$ mm), Ermüdungsrisswachstum bis zum Wanddurchriss für einen äußeren umlaufenden Umfangsriss in der Reparaturnaht bei Wechselbeanspruchung durch Leistungsbetrieb und Schweißeigenspannungen ohne Druckprüfung bzw. mit Druckprüfung in unterschiedlicher Höhe

6.3.3 Berechnungsfall Nr. 3 – Ferrit, 1.6210, DN700

Im Berechnungsfall 3 wurde eine Reparaturschweißung in einem ferritischen Rohr großer Nennweite (siehe Abb. 29) simuliert, die hinsichtlich Abmessung und Werkstoff einer Frischdampfleitung in einem deutschen Kernkraftwerk mit 1300 MW DWR entspricht.

Der Vergleich der Spannungsverläufe nach Abfahren (grüne gestrichelte Linie in Abbildung 30), d. h. nach Durchlaufen von mindestens einem Betriebszyklus mit oder ohne vorangegangene Druckprüfung, zeigt eine weitestgehende Übereinstimmung. In Auswertung der vorangegangenen bruchmechanischen Berechnungen für die Berechnungsfälle 1 und 2 lässt sich hieraus schlussfolgern, dass aus der Druckprüfung kein nennenswerter Nutzen

hinsichtlich größerer kritischer Rissgrößen oder eines verlangsamten Ermüdungsrisswachstums erwartet werden kann.

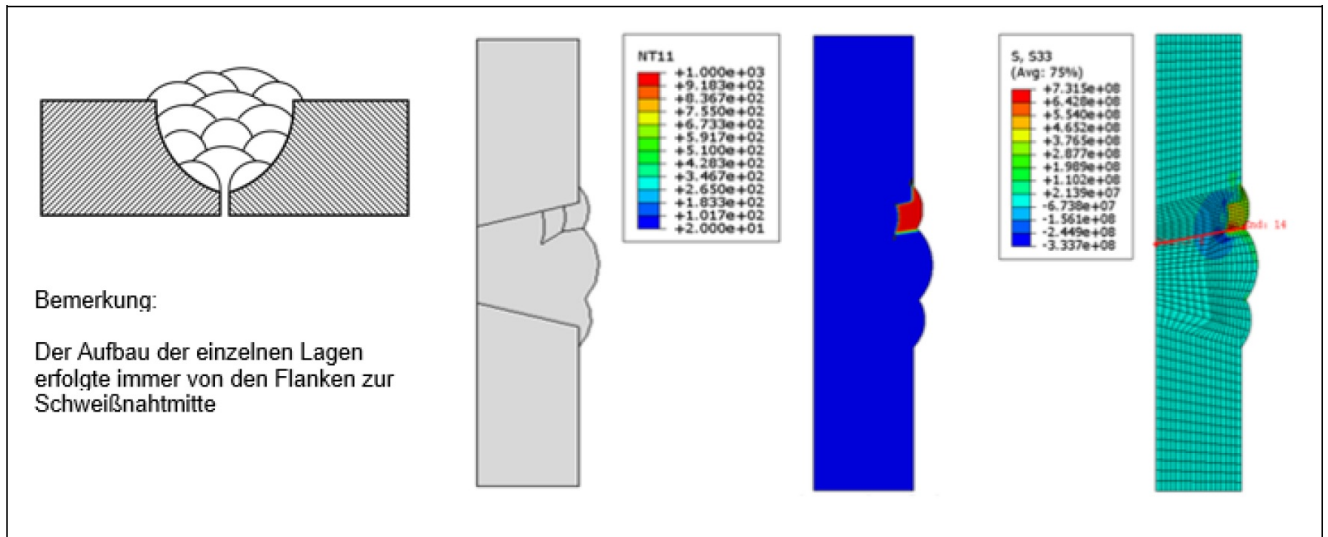


Abbildung 29 Berechnungsfall 3 (1.6210, DN700, t = 23,5 mm), Modellaufbau /U 2/, Reparaturnaht, Auswertepfad

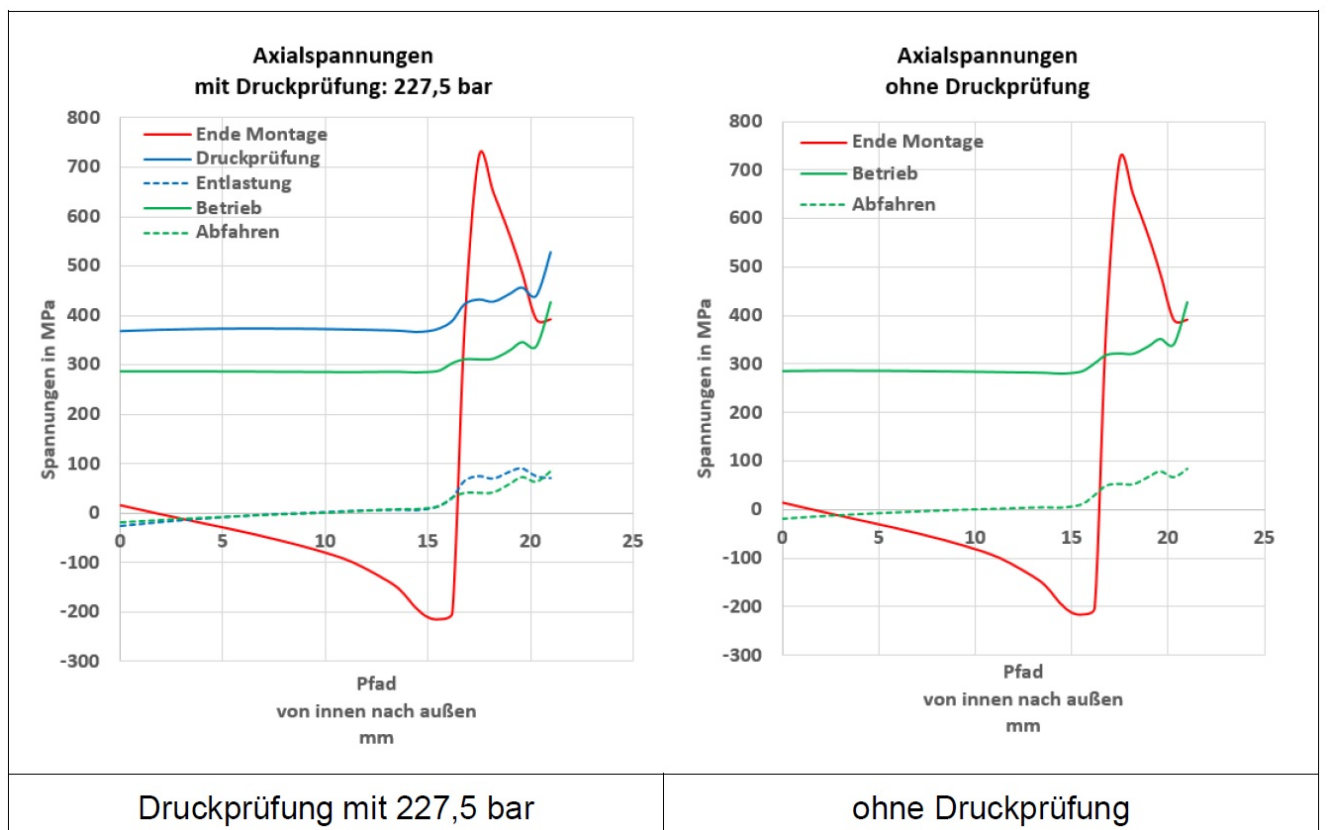


Abbildung 30 Berechnungsfall 3 (1.6210, DN700, t = 23,5 mm), Axialspannungen, Vergleich: mit und ohne Druckprüfung 227,5 bar

6.3.4 Berechnungsfall Nr. 4 – Austenit, 1.4550, DN300

Im Berechnungsfall 4 wurde eine Reparaturschweißung in einem austenitischen Rohr mittlerer Nennweite (siehe Abbildung 31) simuliert, welches hinsichtlich Abmessung und Werkstoff einer Rohrleitung im Not- und Nachkühlsystem in einem deutschen Kernkraftwerk mit 1300 MW DWR entspricht.

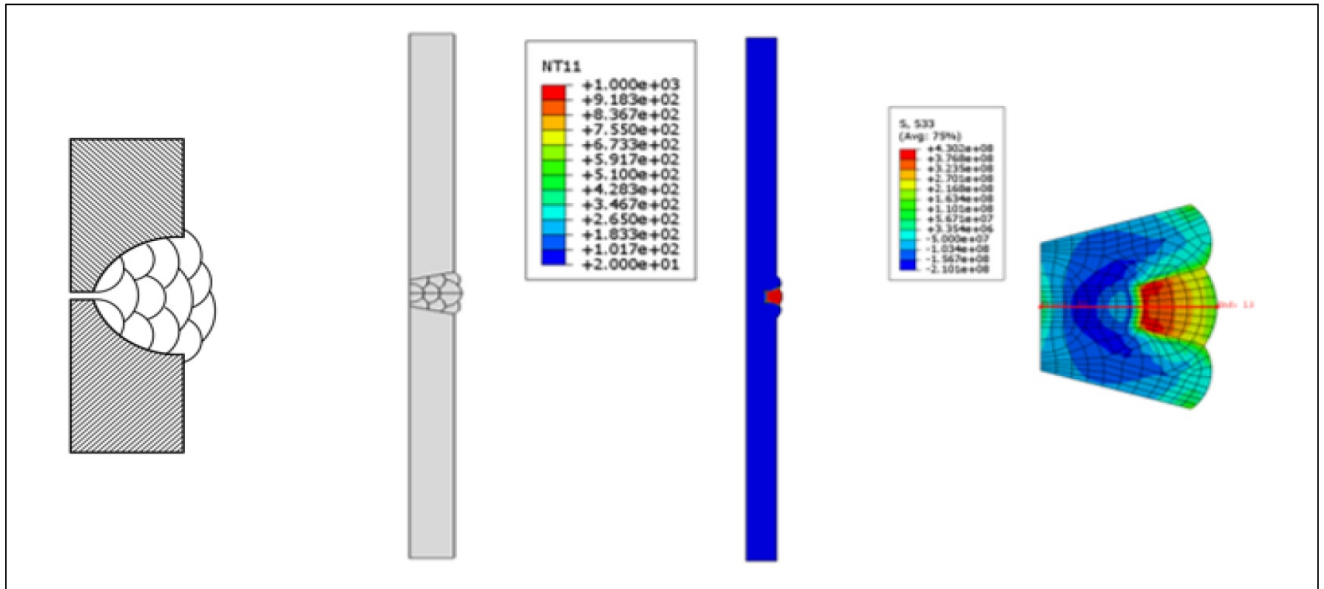


Abbildung 31 Berechnungsfall 4 (1.4550, DN300, t = 11,2 mm), Modellaufbau /U 2/, Reparaturnaht, Auswertepfad

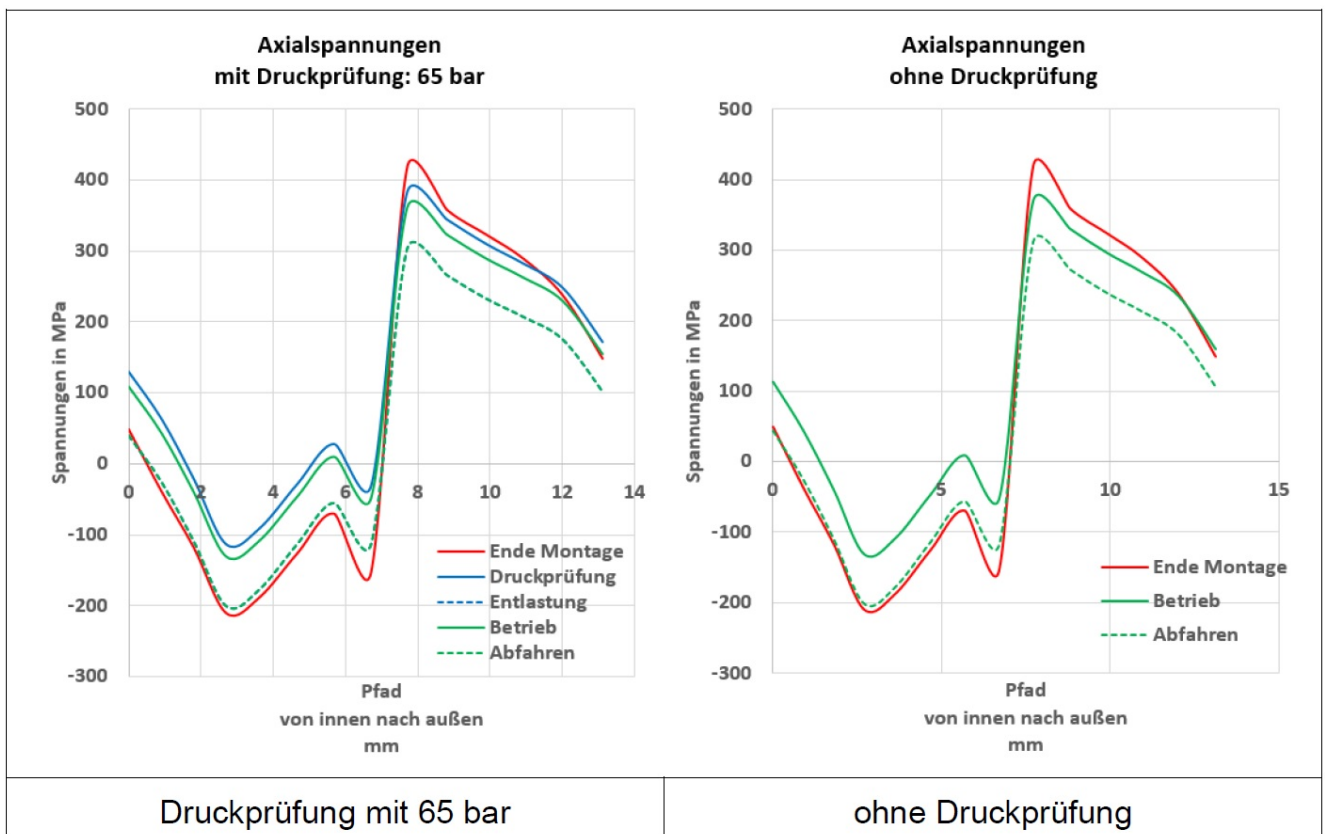


Abbildung 32 Berechnungsfall 4 (1.4550, DN300, t = 11,2 mm), Axialspannungen, Vergleich: mit und ohne Druckprüfung 65 bar

Eine Druckprüfung mit dem 1,3-fachen des Betriebsdruckes liefert keine besseren Ergebnisse bzgl. eines Eigenspannungsumbaus als der nachfolgende Leistungsbetrieb, s. Abbildung 32.

Eine Steigerung des Prüfdruckes auf den 1,5-fachen Wert des Betriebsdruckes (75 bar) zeigt ein leicht besseres Ergebnis der Druckprüfung im Vergleich zum Leistungsbetrieb hinsichtlich des Abbaus der Eigenspannungsspitzen (siehe Abbildung 33). Erst wenn Prüfdrücke deutlich über dem 1,5-fachen Wert des Betriebsdruckes aufgebracht werden, ist eine signifikante Eigenspannungsumlagerung festzustellen.

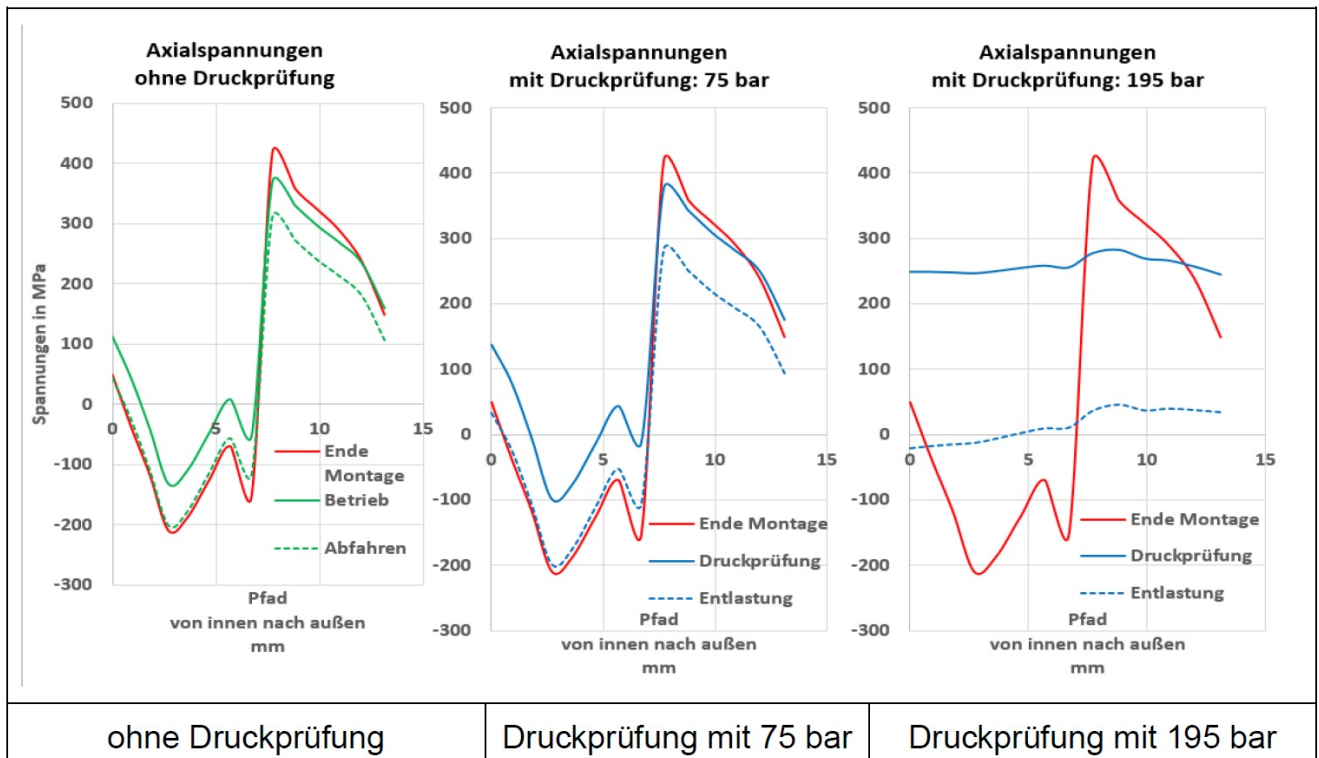


Abbildung 33 Berechnungsfall 4 (1.4550, DN300, $t = 11,2$ mm), Axialspannungen, Vergleich: mit und ohne Druckprüfung 75 bar und 195 bar

Die Spannungsumlagerungen infolge der Druckprüfungen mit unterschiedlichen Druckhöhen für die Reparaturaht im Austenitrohr DN300 entsprechen in ihrer Charakteristik denen des im Berechnungsfall 1 untersuchten Austenitrohres DN80. Die im Abschnitt 6.3.1.2 getroffenen Aussagen hinsichtlich der uneinheitlichen, nicht notwendigerweise positiven Auswirkungen der Druckprüfungen auf die bruchmechanischen Parameter kritische Rissgrößen und Ermüdungsrisswachstumscharakteristika treffen auch für die hier untersuchte größere Nennweite zu.

6.3.5 Berechnungsfall Nr. 5 – Austenit, 1.4550, DN80

Im Berechnungsfall 5 wurde ein realitätsnaher Schweißlagenaufbau bei hohen Betriebsparametern an einer Rohrleitung (siehe Abbildung 34) simuliert, die hinsichtlich Abmessung und Werkstoff einer Druckhalter-Sprühleitung in einem deutschen Kernkraftwerk mit 1300 MW DWR entspricht.

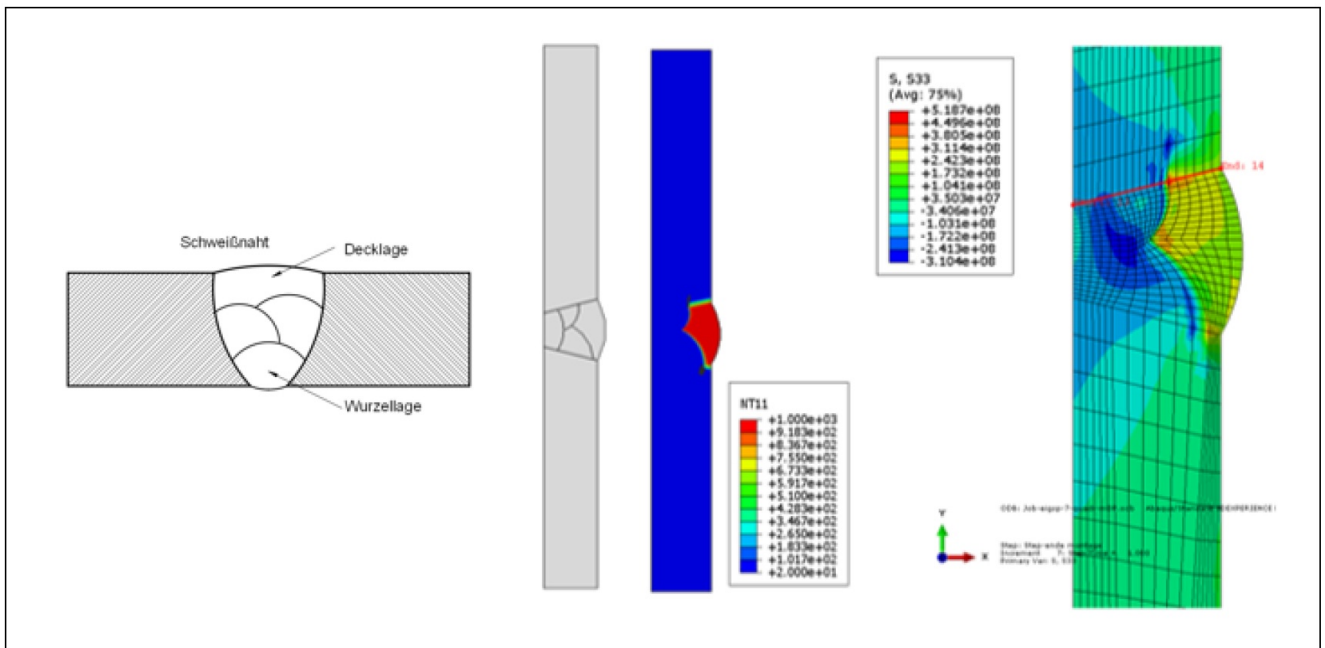


Abbildung 34 Berechnungsfall 5 (1.4550, DN80, t = 8,0 mm), Modellaufbau /U 32/, Reparaturnaht, Auswertepfad

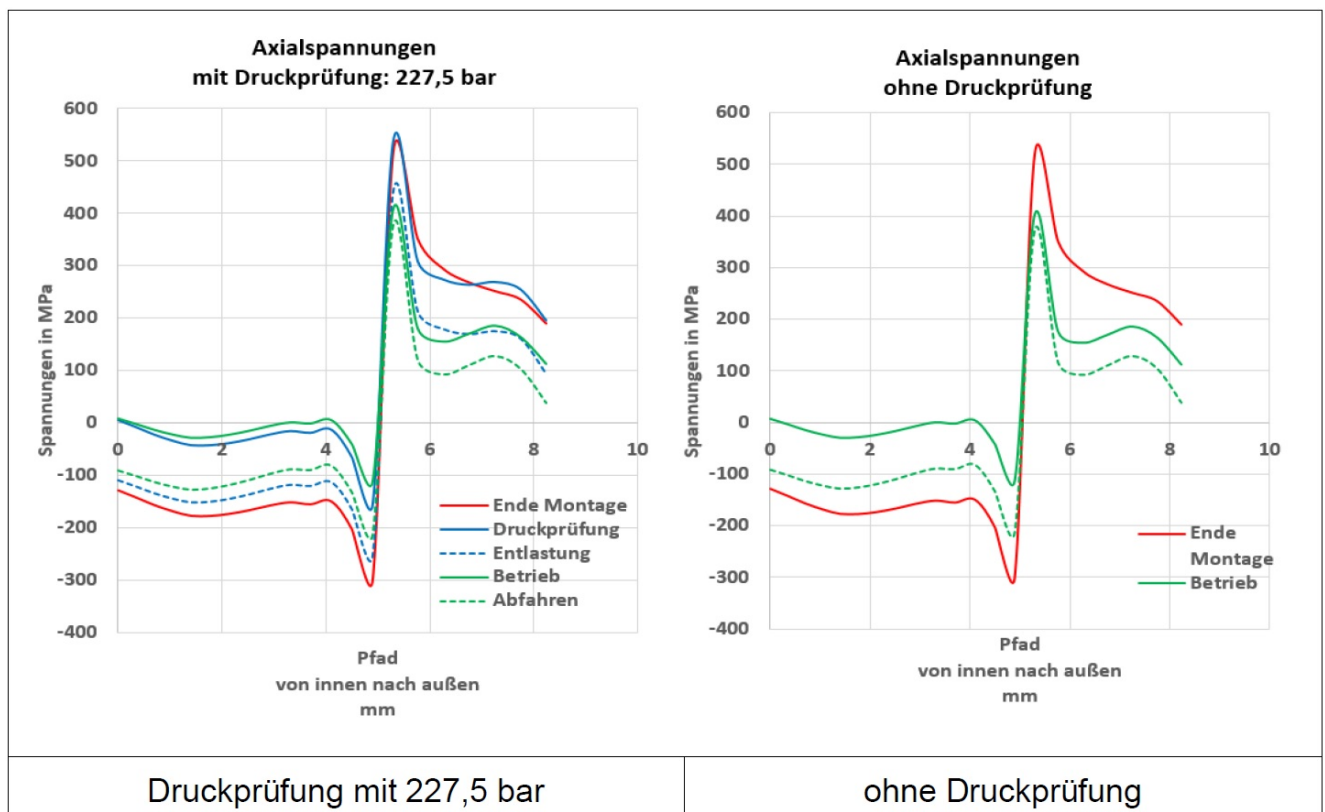


Abbildung 35 Berechnungsfall 5 (1.4550, DN80, t = 8,0 mm), Axialspannungen, Vergleich: mit und ohne Druckprüfung 227,5 bar

Auch in diesem Berechnungsfall zeigen die Ergebnisse der Spannungsberechnungen, dass die Betriebsbelastungen, d. h. bereits ein einziger Belastungszyklus, die Spannungsumlagerungen infolge der Druckprüfung überkompensieren. Die Druckprüfung erbringt auch in diesem Fall keine positiven Effekte hinsichtlich eines möglichen verlangsamten Wachstums und größerer kritischer Größen bei der Annahme von Rissen in der Schweißnaht.

6.4 Fazit aus den bruchmechanischen Betrachtungen

Da die Schweißeigenstressprofile für austenitische und ferritische Schweißnähte gleichen Aufbaus grundsätzlich als vergleichbar eingeschätzt werden, ergeben sich auch keine grundlegend anderen Schlussfolgerungen hinsichtlich der Auswirkungen von Eigenstressumlagerungen, nur Unterschiede im Detail:

Austenit

- Druckprüfungen zum Umbau von Schweißeigenstressungen sind nur bei Betriebstemperaturen unterhalb 200°C zielführend.
- Bei Betriebstemperaturen oberhalb 200°C sind die Betriebsbelastungen abdeckend bzgl. des Eigenstressumbaus.

Ferrit

- Die Druckprüfung bewirkt geringe Effekte im Umbau von Eigenstressungen.
- Die gleiche Wirkung wird i.a. durch die Betriebsbelastung bei höheren Temperaturen erreicht.

Für die Betrachtung der möglichen Auswirkungen einer Druckprüfung im Rahmen bruchmechanischer Bewertungen ist der Umstand entscheidend, dass eine Druckprüfung bei Raumtemperatur im Gegensatz zu einer Wärmebehandlung am Ende des Schweißvorgangs keinen Abbau, sondern lediglich eine Umlagerung der Eigenstressungen bewirkt: Spannungsspitzen werden durch das lokale Fließen abgebaut, die Vergleichmäßigung des Eigenstressprofils führt aber gleichzeitig zum Abbau von Druckeigenstressungen.

Das so geänderte Gesamtstressprofil über der Wanddicke, d. h. entlang des potentiellen Risswachstumspfad, führt trotz des Abbaus von Spannungsspitzen nicht notwendigerweise zu einer Verlangsamung des möglichen Ermüdungsrisswachstums und größeren kritischen Rissgrößen im Vergleich zum Eigenstressprofil ohne Druckprüfung.

Der Effekt einer Druckprüfung auf das mögliche Wachstum vorhandener Schweißnahtrisse und das Erreichen kritischer Rissgrößen ist i.a. vernachlässigbar gering, kann aber sogar ungünstig sein. Ein nennenswerter Nutzen einer Druckprüfung für bruchmechanische Bewertungen ist nicht ableitbar. Dies gilt sowohl für Fertigungsnähte als auch für Reparaturnähte.

7 Zusammenfassende Bewertung im Hinblick auf die deutschen Kernkraftwerke

Die Durchführung von Druckprüfungen nach erfolgten Reparaturen, Austauschmaßnahmen oder der Neuerrichtung von drucktragenden Anlagenteilen ist in den einschlägigen Vorschriften für drucktragende Bauteile und Komponenten als abschließender Nachweis für die Integrität der Bauteile und deren Verbindungen vorgesehen. Dies wurde im Allgemeinen in der kerntechnischen Praxis auch derart umgesetzt. Jedoch ist in den aktuell gültigen Regelwerken ein Ersatz der Druckprüfung durch andere Prüfmethode oder Maßnahmen nicht ausdrücklich ausgeschlossen

Aus den durchgeführten Analysen, sowohl zum Stand der Anwendung der Druckprüfung nach Instandhaltungsarbeiten in den deutschen Kernkraftwerken als auch aus den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten rechnerischen Analysen, lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass die wesentlichen Ziele einer Druckprüfung durch die für ferritische, höherfeste Stähle gemäß Regelwerk nach dem Schweißen geforderten Spannungsarmglühungen sowie durch geeignete Ersatzmaßnahmen kompensiert werden können bzw. durch das Einwirken der betrieblichen Bedingungen erreicht werden.

Zielstellungen			
Integritätsnachweis Erkennen von Schäden und Fehlern	Nachweis der Dichtigkeit	Abbau von Schweißspannungen	Abbau von Spannungsspitzen
▼	▼	▼	▼
ZfP-Maßnahmen	Monitoring, Begehung	Wärmebehandlung nach dem Schweißen, Betriebsbelastung	Wärmebehandlung nach dem Schweißen, Betriebsbelastung

1. Integraler Integritätsnachweis

Ausgehend von den Zielstellungen der Druckprüfung besteht die Möglichkeit, mit einem umfassenden Prüfkonzept bestehend aus Fertigungsüberwachung, ZfP-Maßnahmen während und nach der Errichtung sowie WKP-Maßnahmen im Betrieb einen mindestens gleichwertigen Ersatz für den mit der Durchführung einer Druckprüfung beabsichtigten integralen **Integritätsnachweis** bereitzustellen.

2. Nachweis der Dichtigkeit

Für eine Überprüfung der Dichtigkeit erweisen sich Monitoring-Konzepte grundsätzlich als bessere Option gegenüber einer Druckprüfung. Zudem kann mit einer Online-Überwachung die Dichtigkeit im Vergleich zur einmaligen Druckprüfung über die gesamte Betriebszeit überwacht werden.

3. Abbau von Schweißeigenstressen und Spannungsspitzen

Im Abschnitt 3.3 hatten wir dargestellt, dass folgende Ziele einer Druckprüfung durch den ausschließlichen Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren nicht erreicht werden können:

- Abbau von Spannungsspitzen durch Einbringen von Druckeigenstressen (plastisches Verformen) und
- Abbau von Eigenstressen aus der Herstellung, insbesondere von Schweißeigenstressen.

Aus den im Abschnitt 6 dargestellten Ergebnissen wird deutlich, dass die betrieblichen Beanspruchungen (hoher Betriebsdruck und zum Teil hohe Temperaturen) in geschweißten Rohrleitungsbauteilen bezüglich der Schweißeigenstressen und Spannungsspitzen im Schweißgefüge bzw. im angrenzenden Grundwerkstoff mindestens den gleichen Effekt wie eine bei Raumtemperatur durchgeführte Druckprüfung bewirken können.

Fazit:

Die Durchführung einer Druckprüfung zum Abschluss von Errichtungs- oder Instandhaltungsmaßnahmen an drucktragenden Komponenten in Kernkraftwerken ist im Hinblick auf die Zielstellung, nämlich ein integraler Nachweis der Integrität und Dichtheit zu sein, durch Maßnahmen bei der Fertigung (Wärmebehandlung) sowie der begleitenden Kontrolle und ZfP ersetzbar. Im Hinblick auf den Eigenstressenzustand und Spannungsspitzen in den geschweißten Bauteilbereichen können die betrieblichen Beanspruchungen mindestens denselben Effekt wie eine bei Raumtemperatur durchgeführte Druckprüfung ergeben.

8 Unterlagen

- /U 1/ RICHTLINIE 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt
- /U 2/ KTA 3201.3, Fassung 2017/11
Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren
Teil 3: Herstellung
- /U 3/ KTA 3211.3, Fassung 2017/11
Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises
Teil 3: Herstellung
- /U 4/ FDBR Merkblatt 21 (2012-02-22)
Anforderungsgerechtes Prüfkonzept für den Nachweis der Druckfestigkeit von Rohrleitungen zur Erfüllung der Richtlinie 97/23/EG
- /U 5/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
Änderung und Neufassung der Bekanntmachung zu den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ vom 3. März 2015
- /U 6/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Bekanntmachung der Interpretationen zu den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 22. November 2012
Vom 29. November 2013
- /U 7/ <http://www.rskonline.de/de/meeting455>
- /U 8/ AREVA GmbH
Spezifikation KS D 2041/50
Rohrleitungen K2
Rev. F vom 09.02.2015
- /U 9/ AREVA GmbH
Spezifikation KS D 3041/50
Rohrleitungen K3 / K4a
Rev. E vom 03.07.2017
- /U 10/ AREVA GmbH
Spezifikation KS D 7041/50
Kleinrohrleitungen K1 ≤ DN25, K2 bis K4 ≤ DN50
Rev. E vom 09.01.2017

- /U 11/ E.ON Kernkraft
Spezifikation IS 1501
Spezifikation für Rohrleitungen
Rev. 2
- /U 12/ Kernkraftwerk Krümmel GmbH & Co. KG
Spezifikation KKK-WBPV
Werkstoff- und Bauprüfvorschrift
Rev. 10
- /U 13/ British Standard BS 7910:2013
Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures
- /U 14/ API 579-1/ASME FFS-1, June, 2016
Fitness-for-Service
- /U 15/ FKM-Richtlinie
Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile,
4. Ausgabe, 2018
- /U 16/ SSM Report 2018:18
Procedure for Safety Assessment of Components with Defects – Handbook Edition 5
- /U 17/ SSM Report 2008:01
A combined deterministic and probabilistic procedure for safety assessment of components with cracks — Handbook
- /U 18/ Brickstad, B., Josefson, L.:
"A Parametric Study of Residual Stresses in Multipass Butt-Welded Stainless Steel Pipes", SAQ/FoU-Report 96/01, SAQ Kontroll AB, Stockholm, Sweden
- /U 19/ FEM-Code ABAQUS, Abaqus 2019, SIMULIA™ von Dassault Systèmes®
- /U 20/ IWM VERB, Ver. 8.1, IWM Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg, 2015
- /U 21/ ProSACC Version 1.0 rev. 9, INSPECTA Technology
- /U 22/ FITNET Fitness For Service (FFS) Procedure
Revision MK8, Geesthacht, Jan. 2008
- /U 23/ ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section XI
Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components
- /U 24/ R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, Revision 4,
British Energy Generation, 2001

- /U 25/ KTA 3206, Fassung 11/2014 mit Berichtigung 11/2015
Nachweise zum Bruchausschluss für druckführende Komponenten in Kernkraftwerken
- /U 26/ MPA/VGB Forschungsvorhaben 6.1: Bauteilversuche mit Analytik.
VGB Nr. 11/93, Abschlussbericht 07/1997
- /U 27/ KTA 3201.2, Fassung 2017/11
Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren
Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung
- /U 28/ NUREG/CR-6176
Review of Environmental Effects on Fatigue Crack Growth of Austenitic Stainless Steels
ANL-94/1, Argonne, IL, 1994
- /U 29/ Werkstoffdaten Austenit, 1.4550: DIMY-Datenbank, KTA 3201.1
- /U 30/ Werkstoffdaten Ferrit, 1.6310: KWU Arbeitsbericht R213/85/135 vom 04.07.1985
- /U 31/ SEW 310, Physikalische Eigenschaften von Stählen
- /U 32/ Lexikon der Pharma-Technologie, ECV Editio Cantor Verlag, 2013
- /U 33/ Technische Regeln Druckbehälter
TRB 522 - Prüfungen durch den Hersteller-Druckprüfung
Ausgabe September 1983
(BArbBl. 9/1983 S. 88; 2/1989 S. 110; 5/1993 S. 49; 6/1997 S. 47; 3/2000 S. 66 aufgehoben)
- /U 34/ E.ON Kernkraft
Spezifikation IS 1801
Spezifikation für Apparate und Behälter
Rev. 1, 2011
- /U 35/ AREVA NP GmbH
Spezifikation KS D 1042
Rohrleitungen K1 (> DN25)
Rev. D vom 06.06.2008
- /U 36/ E.ON Kernkraft
Spezifikation KS D 1042-IS
Transferspezifikation für Rohrleitungen > DN25 im Geltungsbereich der RSK-LL (DWR), Kapitel 4.1 "Druckführende Umschließung des Reaktorkühlmittels",
Rev. 1, 2009

- /U 37/ PreussenElektra
Spezifikation KS D 2041-IS
Transferspezifikation für Rohrleitungen im Geltungsbereich der "Rahmenspezifikation Basissicherheit" der RSK-LL (DWR) Kapitel 4.2,
Revision 3, 2018
- /U 38/ MPA Stuttgart
BMU SR2501, Arbeitspaket 4.1
„Anmerkungen zur Höhe des Prüfdruckes bei wiederkehrenden Druckprüfungen und zum Nutzen der Druckprüfung“
X. Schuler
74. Sitzung des RSK-Ausschusses DKW
21.06.2007
- /U 39/ Verordnung über Druckbehälter, Druckgasbehälter und Füllanlagen (Druckbehälterverordnung - DruckbehV)
vom 21. April 1989 (BGBl. I S. 843)
zuletzt geändert 29. Oktober 2001 (BGBl. I S. 2856)
- /U 40/ VdTÜV-Merkblatt MB DAMP 468
Richtlinie für die Anwendung der bruchmechanisch basierten Schadenstoleranzanalyse bei druckführenden Komponenten zur Integritätsbewertung und Festlegung von Prüfintervallen, VdTÜV, 2019-08-15

