

**Forschungsvorhaben
zum Einfluss der
Herstellungsqualität
auf die Sicherheit
von druckführenden
Komponenten**

Forschungsvorhaben zum Einfluss der Herstellungsqualität auf die Sicherheit von druckführenden Komponenten

Abschlussbericht

Stephan Faust
Isabell Fleck
Uwe Jendrich
Rainer Wenke

Januar 2022

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) unter dem Kennzeichen 4718R01315 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMU übereinstimmen.

Deskriptoren

Druckführende Umschließung, Fertigungsbegleitende Prüfung, Fertigungsverfahren, Gießverfahren, Herstellungsfehler, Passive Komponenten, Schweißverfahren, Umformverfahren, Wärmebehandlung

Kurzfassung

In den letzten Jahren sind einige Fälle von Herstellungsfehlern in Komponenten der druckführenden Umschließung von Kernkraftwerken bekannt geworden. Solche Fehler können dazu führen, dass die Anforderungen an die sicherheitstechnische Auslegung nicht mehr eingehalten werden und mit einer Schädigung oder einem Versagen der Komponenten im Betrieb oder bei Störfällen gerechnet werden muss. Daher ist ein Auftreten von Fehlern während der Fertigung zu verhindern. Eine spätere Reparatur oder ein Ersatz fehlerhafter Komponenten im Betrieb ist in der Regel nur unter großem Aufwand möglich.

In dem vorliegenden Forschungsvorhaben wurden von der GRS Fertigungsverfahren von Komponenten der druckführenden Umschließung in Leichtwasserreaktoren untersucht, um mögliche Ursachen für fertigungsbedingte Abweichungen, Maßnahmen zu deren Erkennung und Vermeidung sowie den Umgang mit vorhandenen Abweichungen und deren Bewertung aufzuarbeiten. Hierzu werden verschiedene Fertigungsverfahren für diese Komponenten beschrieben, d. h. Gieß-, Umform-, Schweißverfahren und Wärmebehandlungen. Während der einzelnen Fertigungsschritte können Fehler oder Abweichungen auftreten, die in der Regel durch eine optimierte Prozessführung und die Einhaltung von Vorgaben vermieden oder minimiert werden können. Beispiele für typische Fehler sind Seigerungen, Einschlüsse, Lunker, Risse, Gefügefehler oder geometrische Abweichungen. Weiterhin werden die zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfungen beschrieben, die zwischen den Fertigungsschritten und zur Endabnahme durchgeführt werden, um mögliche Fehler oder Abweichungen frühzeitig aufzufinden. Falls sie nicht toleriert werden können, sollen sie möglichst noch im Rahmen der Fertigung beseitigt werden. Alternativ müssen Halbzeuge bzw. Komponenten verworfen und neu gefertigt werden.

Anschließend werden die Vorgaben zur Fertigung von Komponenten der druckführenden Umschließung in verschiedenen nationalen Regelwerken analysiert, z. B. KTA, ASME, RCC-M, russisches Regelwerk. Um Fehler in den Komponenten zu vermeiden und eine hohe Qualität dieser Komponenten zu gewährleisten, enthalten diese Regelwerke sowohl Anforderungen an die Qualifizierung einzelner Fertigungsverfahren und Prüfmethode als auch an die Durchführung der Fertigung. Schließlich werden anhand einiger prominenter Beispiele die sicherheitstechnischen Auswirkungen von fertigungsbedingten Abweichungen analysiert.

Abstract

Within the last years few cases of manufacturing faults in components of the reactor coolant pressure boundary in nuclear power plants have been reported. Such faults may lead to a situation in which the requirements for the safety-related design are no longer fulfilled and may cause a failure of the components during normal operation or an accident. Therefore, these kinds of faults have to be prevented during manufacturing. Repairing or replacing these components with faults during operation is generally much more challenging.

Within the present research project GRS has investigated manufacturing processes for the fabrication of pressure boundary components in light water reactors to gather information concerning root causes of manufacturing deviations, measures to identify and prevent these deviations as well as evaluation and further handling of existing deviations. To this end, different manufacturing processes like casting, forming, welding and heat treatment that are necessary to fabricate these components have been investigated. During each process step faults can occur which mainly can be prevented or mitigated by an optimised process and by strictly meeting the specifications. Examples of typical faults are segregations, inclusions, cavities, cracks, structure defects or geometrical deviations. Furthermore, different destructive and non-destructive testing techniques are described that are applied between fabrication steps and at the end of manufacturing to find any non-tolerable fault in good time. So, it can preferably be removed during manufacturing. Alternatively, the half-finished or finished products are to be rejected and manufactured once more.

Subsequently, different national codes and standards providing guidance for the manufacture of components of the pressure boundary have been analysed, e. g. KTA, ASME, RCC-M, Russian regulations. To prevent faults and to guarantee the required high quality of components these regulations include qualification requirements of manufacturing and testing methods as well as specific manufacturing requirements. Finally, the consequences of fabrication related faults for the safety of the plant were analysed based on some prominent examples.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	In LWR verwendete Werkstoffe	5
2.1	Generisches Werkstoffkonzept in Anlagen mit DWR	5
2.2	Generisches Werkstoffkonzept in Anlagen mit SWR.....	6
2.3	Werkstoffkonzept in deutschen Anlagen	6
3	Grundlagen zur Herstellung von (Groß-) Komponenten	9
3.1	Gießverfahren.....	9
3.1.1	Sandgießen	10
3.1.2	Kokillengießen	11
3.1.3	Stranggießen von Stahl	12
3.1.4	Schleudergießen.....	13
3.1.5	Fehler (-quellen) beim Gießen	14
3.2	Umformverfahren.....	22
3.2.1	Freiformschmieden	23
3.2.2	Gesenkschmieden	25
3.2.3	Walzen	26
3.2.4	Kümpeln und Biegen	32
3.2.5	Fehler (-quellen) beim Umformen	34
3.3	Schweißverfahren.....	37
3.3.1	Aufbau einer Schweißverbindung	37
3.3.2	Schweißnahtvorbereitung	38
3.3.3	Schmelzschweißverfahren.....	39
3.3.4	Auftragschweißen	40
3.3.5	Geschweißte Stahlrohre	40
3.3.6	Fehler (-quellen) beim Schweißen	40
3.4	Wärmebehandlung von Stählen.....	50
3.4.1	Glühbehandlungen	50
3.4.2	Vergüten.....	54
3.4.3	Fehler (-quellen) bei Wärmebehandlungen.....	55

3.5	Oberflächenbehandlung.....	56
3.5.1	Reinigen und Vorbehandeln	56
3.5.2	Beschichten und Plattieren	57
3.5.3	Fehler (-quellen) bei der Oberflächenbehandlung	58
3.6	Reparaturen fertigungsbedingter Abweichungen	59
4	Fertigungsbegleitende Prüfungen und weitere qualitätssichernde Maßnahmen.....	61
4.1	Arbeits- und Verfahrensqualifikation vor der Fertigung	61
4.2	Überwachung und Dokumentation während der Fertigung	61
4.3	Zerstörungsfreie Prüfungen	63
4.3.1	Oberflächenprüfverfahren	63
4.3.2	Volumenprüfverfahren	69
4.4	Zerstörende Prüfungen	71
4.4.1	Chemische Analysen	71
4.4.2	Metallographische Untersuchungen.....	72
4.4.3	Prüfung der Korrosionsbeständigkeit	73
4.4.4	Zugversuch.....	73
4.4.5	Kerbschlagbiegeversuch.....	74
4.4.6	Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch.....	75
4.4.7	Fallgewichtsversuch nach Pellini	76
4.4.8	Biegeversuch.....	76
4.4.9	Bruchmechanische Werkstoffprüfung	77
4.4.10	Schwingfestigkeitsversuch.....	77
4.5	Prüfumfänge und Prüfzeitpunkte am Beispiel RDB eines DWR	78
4.6	Weitere qualitätssichernde Maßnahmen.....	81
4.6.1	Mehr-Personen-Prinzip und weitere administrative Maßnahmen	81
4.6.2	Dokumentation und Archivierung	83
5	Einschlägige Spezifikationen und regulatorische Anforderungen	85
5.1	Deutsches Regelwerk zur Herstellung von (Groß-) Komponenten	85
5.1.1	Historische Entwicklung.....	85
5.1.2	KTA-Regelwerk zur Herstellung von (Groß-) Komponenten.....	87

5.1.3	Werkstoffherstellung	88
5.1.4	Schweißen.....	89
5.1.5	Umformen.....	90
5.1.6	Wärmebehandlungen	91
5.2	Internationale Regelwerke	91
5.2.1	ASME Regelwerk.....	91
5.2.2	RCC-M	94
5.2.3	Regelwerk für LWR russischer Bauart	96
5.3	Vergleich der verschiedenen Regelwerke	99
6	Fertigungsprozesse ausgewählter Komponenten	103
6.1	Rohrleitungen	103
6.1.1	Hauptkühlmittelleitung	104
6.1.2	Volumenausgleichsleitung	105
6.1.3	Sonstige Rohrleitungen.....	105
6.2	Behälter	105
6.2.1	Reaktordruckbehälter in Druckwasserreaktoren	106
6.2.2	Reaktordruckbehälter in Siedewasserreaktoren.....	107
6.2.3	Stutzen	109
6.2.4	Dampferzeuger.....	110
6.2.5	Druckhalter und Druckhalter-Abblasebehälter.....	112
6.3	Fertigung sonstiger Komponenten	113
6.3.1	Gehäuse der Hauptkühlmittelpumpen.....	114
6.3.2	Armaturengehäuse	114
7	Sicherheitstechnische Auswirkungen fertigungsbedingter Abweichungen auf die Integrität der Komponenten.....	117
7.1	Seigerungen in den Deckel- und Bodenkalotten des RDB für die Anlage Flamanville-3	117
7.2	Seigerungen in Dampferzeugern französischer Anlagen	121
7.3	Befunde im RDB von Beznau-1	123
8	Zusammenfassung	127

	Literaturverzeichnis.....	129
	Abbildungsverzeichnis.....	143
	Tabellenverzeichnis.....	145
	Abkürzungsverzeichnis.....	147
A	Anhang	149

1 Einleitung

In den letzten Jahren sind einige Fälle von Herstellungsfehlern in Komponenten der druckführenden Umschließung von Kernkraftwerken bekannt geworden. Insbesondere betrifft das Reaktordruckbehälter und Dampferzeuger. Vor diesem Hintergrund hat die GRS im Rahmen des Forschungsvorhabens 4718R01315 Fertigungsverfahren von Komponenten der druckführenden Umschließung (DFU) in Anlagen mit DWR (Druckwasserreaktor) und SWR (Siedewasserreaktor), insbesondere für Behälter, große Rohrleitungen, Rohrbögen, Armaturen- und Pumpengehäuse mit der Zielsetzung untersucht, mögliche Ursachen für fertigungsbedingte Abweichungen, Maßnahmen zu deren Erkennung und Vermeidung sowie den Umgang mit vorhandenen Abweichungen und deren Bewertung aufzuarbeiten.

Bei dem komplexen Prozess der Fertigung von druckführenden Großkomponenten entscheiden viele Faktoren über die Qualität des Endproduktes (s. Abb. 1.1). Beginnend beim korrekten Abguss ist der folgende Prozess aus Umformungs-, Schweiß- und Wärmebehandlungsschritten entscheidend für die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs in der künftigen Komponente.

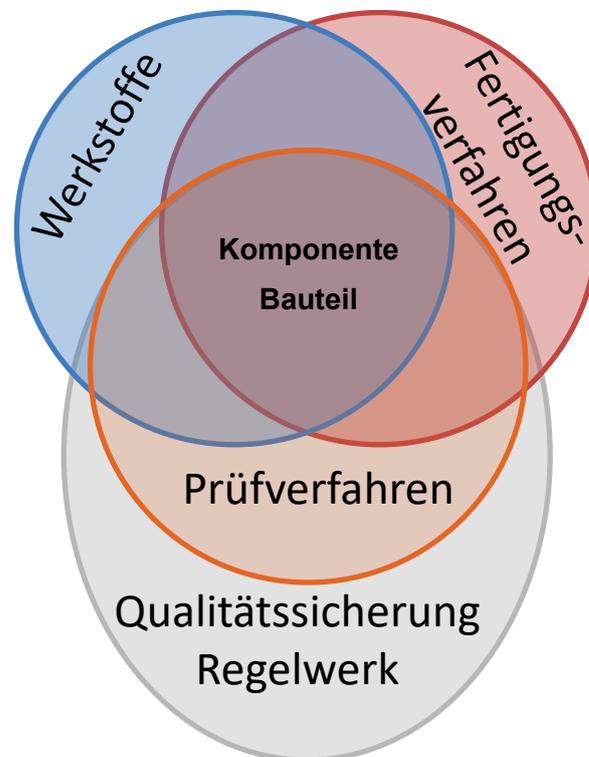


Abb. 1.1 Herstellung von Komponenten – Werkstoffauswahl, verwendete Fertigungsverfahren, vorgesehene Prüfverfahren und Regelwerk sowie weitere Qualitätssicherungsmaßnahmen

Sowohl die Kontrolle der Prozessparameter der verschiedenen Fertigungsschritte als auch die fertigungsbegleitenden und abschließenden Prüfungen sowie die weiteren Qualitätssicherungsmaßnahmen sind dabei von entscheidender Bedeutung.

Diese Maßnahmen sollen sicherstellen, dass das Endprodukt die spezifizierten Eigenschaften aufweist und gar keine oder nur in wenigen Fällen Abweichungen von der geforderten Qualität auftreten. Treten dennoch Abweichungen auf, so ist zu bewerten, ob diese toleriert werden können. Dafür ist die ausreichende Qualität der gefertigten Komponente für den späteren Einsatz bzw. den weiteren Betrieb mit geeigneten Methoden nachzuweisen. Die Bewertung und auch die Prüfmethodik orientieren sich an dem jeweils gültigen Regelwerk bzw. an den Hersteller-Spezifikationen. Anderenfalls sind Maßnahmen zu ergreifen, um die Abweichungen zu beseitigen, sei es durch Reparatur, Nachbehandlung oder auch Verwerfen der betroffenen Bauteile. Beispiele für Abweichungen von der geforderten Herstellungsqualität sind Seigerungen, Einschlüsse und Lunker, die bereits im Gussstück enthalten sind. Aber auch im weiteren Verlauf der Herstellung können herstellungsbedingte Fehler oder Abweichungen auftreten, beispielsweise durch unzureichende Entfernung von Seigerungen, ungünstige Schmiedefolge, falsche Wärmebehandlung oder Schweißfehler.

Die sicherheitstechnischen Anforderungen an druckführende Komponenten ergeben sich aus ihren jeweiligen sicherheitstechnischen Aufgaben in Bezug auf die Abschaltbarkeit der Anlage, den Einschluss radioaktiver Stoffe und eine ausreichende Wärmeabfuhr. Übergeordnete Anforderungen für deutsche Kernkraftwerke finden sich in den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ /SIA 15/. Weitere, detailliertere Anforderungen sind für die meisten Einrichtungen in den KTA-Regeln zu finden. Vor dem Erscheinen der einschlägigen KTA-Regeln waren die Anforderungen für deutsche Anlagen in Werkstoffblättern des VdTÜV sowie in Spezifikationen und Arbeitsvorschriften des Anlagenherstellers Siemens/KWU (Kraftwerk Union AG) festgelegt. Letztere wurden in kurzen Abständen fortgeschrieben und unterscheiden sich daher geringfügig von Anlage zu Anlage. Ihre wesentlichen Anforderungen zur Zeit der Auslegung und Errichtung der Konvoi-Anlagen wurden weitgehend in die KTA-Regeln übernommen.

Daneben spielten bei der Entwicklung des deutschen Regelwerks auch die so genannten „RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren“ eine wichtige Rolle /RSK 79/. Deren Anhang 2, die „Rahmenspezifikation Basissicherheit“ legte für die bis dahin noch weitgehend nach konventionellem Regelwerk ausgelegten Komponenten der Äußeren

Systeme Anforderungen fest, die anschließend auch auf SWR und auch auf die Komponenten der DFU angewandt wurden und den Inhalt der KTA-Regeln maßgeblich beeinflusst haben.

Während der Fertigung kann es zu verschiedenartigen Abweichungen der vorgegebenen Qualität, z. B. durch Seigerungen oder ungenügende Wärmebehandlung, kommen. Zur Sicherstellung der Qualität und frühzeitigen Erkennung von möglichen Abweichungen sind deshalb fertigungsbegleitende Prüfungen nach verschiedenen Fertigungsschritten vorgesehen. Neben zerstörenden Prüfungen mitgefertigter Arbeitsproben (z. B. Zug-, Kerbschlag-, Biege- oder Bruchmechanik-Proben, Proben für metallographische Untersuchungen oder chemische Analysen) kommt deshalb den zerstörungsfreien Prüfungen (z. B. Ultraschall-, Oberflächenriss- oder Härteprüfungen) des Halbzeuges¹ bzw. der gefertigten Komponente entscheidende Bedeutung zu /ELM 12/, /ELM 16/.

In den folgenden Kapiteln sind die Ergebnisse aus den Untersuchungen der GRS, welche im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführt wurden, zusammengefasst. Das grundlegende Werkstoffkonzept in Leichtwasserreaktoren (LWR) insbesondere für deutsche Anlagen wird in Kapitel 2 dargestellt. Der Kenntnisstand zu den Fertigungsverfahren und zu möglichen Fehlerquellen während einzelner Fertigungsschritte ist in Kapitel 3 wiedergegeben. Zugehörige fertigungsbegleitende Prüfungen sind im Kapitel 4 und einschlägige Spezifikationen sowie regulatorische Anforderungen verschiedener nationaler Regelwerke im Kapitel 5 zusammengefasst. Der Einsatz verschiedener Fertigungsverfahren und fertigungsbegleitende Qualitätssicherungsmaßnahmen werden für ausgewählte Komponenten in Kapitel 6 dargestellt. Einzelfälle von Befunden in Komponenten der DFU aus der jüngeren Vergangenheit werden im Kapitel 7 beschrieben.

¹ Halbzeuge sind durch Umformen gefertigte Halbfertigprodukte

2 In LWR verwendete Werkstoffe

Bei der Auswahl der Werkstoffe für Komponenten sind eine ganze Reihe von Faktoren zu berücksichtigen. Angefangen mit der konstruktiven Gestaltung zur Erfüllung der Funktion müssen die mechanischen Belastungen und Temperaturen bei Betrieb und Störfällen sowie die Einwirkungen von Betriebsmitteln berücksichtigt werden, um mögliche Schädigungen der Komponente ausschließen zu können bzw. in zulässigen Grenzen zu halten. Außerdem sind die verfügbaren Herstellungstechnologien, die Transportmöglichkeiten und die spätere Prüfbarkeit im Betrieb zu berücksichtigen. Weltweit führten die für Druck- und Siedewasserreaktoren prinzipiell ähnlichen konstruktiven und betrieblichen Randbedingungen zu grundsätzlich ähnlichen Werkstoffkonzepten, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird. Anschließend werden die speziell in deutschen Anlagen eingesetzten Werkstoffe beschrieben.

2.1 Generisches Werkstoffkonzept in Anlagen mit DWR

Die großen Behälter des Primärkreises in DWR-Anlagen (Reaktordruckbehälter (RDB), Dampferzeuger (primärseitig), Druckhalter) bestehen aus niedrig legiertem, ferritischem Feinkornbaustahl als Grundwerkstoff mit austenitischer Schweißplattierung auf allen Oberflächen, die mit Primärkühlmittel in Kontakt kommen. Die Hauptkühlmittelleitungen wurden von einigen Herstellern in der gleichen Werkstoffkombination, von anderen hingegen komplett aus austenitischem Stahl gefertigt.

Kleinere Rohrleitungen und Behälter, auch die in den nuklearen Hilfsanlagen und sonstigen Primärkühlmittel führenden Systemen, sind meist ganz aus austenitischen Werkstoffen gefertigt. Leitungen und Behälter des Sekundärkreises und weiterer Systeme, die kein Primärkühlmittel führen, sind üblicherweise aus niedrig- oder unlegierten ferritischen Werkstoffen gefertigt. Lediglich bei Kleinleitungen kommen hier auch austenitische Werkstoffe zum Einsatz.

Werkstoffe für Wärmetauscher-Rohre in Kontakt mit Primärkühlmittel sind in der Regel hochlegierte Werkstoffe (austenitische Stähle oder Nickellegierungen für Dampferzeuger-Heizrohre, austenitische Stähle für Nachwärmekühler und Wärmetauscher im Volumenregelsystem). Andere Wärmetauscher-Rohre, z. B. im Kondensator oder Zwischenkühler, werden auch aus Kupferlegierungen bzw. Messing oder Titan gefertigt. In

anderen Fällen kommen auch un- und niedriglegierte Stähle (z. B. in mit Deionat beaufschlagten Kühlern im gesicherten Bereich) und Nickellegierungen (z. B. in Kühlern in Zwischenkühlsystemen) zum Einsatz.

2.2 Generisches Werkstoffkonzept in Anlagen mit SWR

Der RDB in SWR-Anlagen besteht ebenfalls aus einem niedriglegierten, ferritischen Feinkornbaustahl als Grundwerkstoff mit austenitischer Schweißplattierung auf der Innenseite. Wegen des gegenüber DWR größeren Durchmessers des Behälters wurden als Halbzeuge überwiegend Bleche verwendet, es wurden aber auch RDB aus Schmiederingen hergestellt.

Frischdampf- und Speisewasserleitungen sind üblicherweise aus ferritischen Werkstoffen gefertigt. Bei kleineren anschließenden Leitungen kommen auch hier austenitische Werkstoffe zum Einsatz. Werkstoffe für Wärmetauscher-Rohre sind mit denen in DWR-Anlagen (s. Abschnitt 2.1) vergleichbar.

2.3 Werkstoffkonzept in deutschen Anlagen

In deutschen DWR-Anlagen sind sowohl die großen Behälter des Primärkreises (RDB, Dampferzeugermantel und Rohrboden, Druckhalter) als auch die Hauptkühlmittelleitungen aus niedriglegiertem, ferritischem Feinkornbaustahl als Grundwerkstoff mit austenitischer Schweißplattierung auf der Innenseite gefertigt. Entsprechend dem Konzept der Basissicherheit, nach dem möglichst wenige, dafür aber gut qualifizierte Werkstoffe eingesetzt werden sollen, wurde in deutschen Anlagen für diese Komponenten der DFU zunächst fast ausschließlich der Werkstoff 22 NiMoCr 3 7 und später 20 MnMoNi 5 5 eingesetzt. Der „alte“ Werkstoff 22 NiMoCr 3 7 war zwar hinreichend qualifiziert, wurde aber Mitte der 1970er Jahre durch den neueren Werkstoff 20 MnMoNi 5 5 ersetzt. Dieser zeichnet sich durch noch bessere Zähigkeitseigenschaften und eine geringere Neigung zu Rissbildungen beim Schweißen und Wärmebehandeln aus. Der Werkstoff 20 MnMoNi 5 5 hat 1982 in dem erstmals erstellten Anhang A als einziger ferritischer Stahl Eingang in die einschlägige KTA-Regel 3201.1 /KTA 17a/ gefunden. Bei beiden oben genannten Werkstoffen handelt es sich um feinkörnig erschmolzene Vergütungsstähle mit guten Warmfestigkeitseigenschaften.

Wegen der langen Vorlaufzeiten bei der Herstellung der Schmiedeteile für die RDB wurden noch alle RDB außer denen für die Anlagen KKI-2 und GKN-2 aus dem „alten“ Werkstoff hergestellt. Für die im Jahr 2020 im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen Anlagen wurden sie im Zeitraum 1973 bis 1976 bei Japan Steel Works gefertigt /RSK 13/. Bei den Rohrleitungen und anderen Komponenten des Primärkreises fand der Übergang aber schon bei früher errichteten Anlagen statt, sodass hier in den genannten Anlagen überwiegend 20 MnMoNi 5 5 anzutreffen ist /TEN 92/.

Der SWR-RDB hat das gleiche Werkstoffkonzept wie der DWR-RDB. Frischdampf- und Speisewasserleitungen sind hingegen aus dem niedriglegierten ferritischen Stahl 15 Ni-CuMoNb 5 gefertigt und nicht plattiert. Für die austenitischen RDB-Einbauten von SWR wurde ein Niob-stabilisierter austenitischer Stahl mit vermindertem Kohlenstoffgehalt gewählt. Der Werkstoff wurde ebenfalls für nachgerüstete austenitische Rohrleitungen verwendet /ILG 08/.

Für Rohrleitungen und Behältereinbauten kommen die stabilisierten austenitischen Werkstoffe 1.4541 (Ti, AISI 321) und 1.4550 (Nb, AISI 347), insb. für Verbindungselemente auch 1.4571 (Ti, mit Mo-Zusatz, AISI 316 Ti), zum Einsatz.

Als Dampferzeugerheizrohr-Werkstoff wird in deutschen Anlagen X 2 NiCrAlTi 32 20 („Alloy 800 mod.“) eingesetzt, ein hoch legierter austenitischer Stahl mit weniger als 50 % Eisenanteil. Er unterscheidet sich von den oben genannten austenitischen Werkstoffen für Rohrleitungen durch eine noch höhere Korrosionsbeständigkeit und eine höhere Streckgrenze, siehe KTA 3201.1, Anhang A /KTA 17a/.

KTA 3201.1 /KTA 17a/ enthält Anforderungen an Werkstoffe und die durchzuführenden Werkstoffprüfungen. Es werden in Abschnitt 3.2.4.2 „Anforderungen an ferritische Werkstoffe“ und in Abschnitt 3.2.4.3 „Anforderungen an austenitische Werkstoffe“ gestellt. Abschnitt 3.2.4.4 enthält „Anforderungen an Vergütungsstähle für Schrauben, Muttern und Scheiben“.

Die folgende Tab. 2.1 gibt eine Übersicht über die in diesem Bericht verwendeten Werkstoff-Bezeichnungen und eine Kurzbeschreibung.

Tab. 2.1 Werkstoff-Nummer, DIN-Name und Kurzbeschreibung einiger für druckführende Komponenten verwendeter Werkstoffe in deutschen Anlagen

Werkstoff-Nr.	DIN-Name	Kurzbeschreibung
1.4541	X6 CrNiTi 18 10	Ti-stabilisierter Austenit (AISI 321), Rohrleitungen, Behältereinbauten
1.4550	X6 CrNiNb 18 10	Nb-stabilisierter Austenit (AISI 347), Rohrleitungen, Behältereinbauten
1.4571	X6 CrNiMoTi 17 12 2	Ti-stabilisierter Austenit mit Mo (AISI 316 Ti), z. B. Verbindungselemente
1.4876	X 2 NiCrAlTi 32 20	Hoch legierter austenitischer Stahl
1.6310	20 MnMoNi 5 5	Warmfester Vergütungsstahl
1.6368	15 NiCuMoNb 5	Vergütungsstahl
1.6578	20 NiCrMo 14 5	Stahl für Schrauben & Muttern
1.6582	34 CrNiMo 6	Stahl für Schrauben & Muttern
1.6751	22 NiMoCr 3 7	Warmfester Vergütungsstahl
2.4807	NiCr 15 Fe	Nickellegierung „Alloy 600“

3 Grundlagen zur Herstellung von (Groß-) Komponenten

Für die in diesem Vorhaben näher betrachteten Komponenten der DFU wurde zum größten Teil in Blöcken oder im Strang vergossener Stahl verwendet. Für Behälter und Rohre werden aus diesem Rohmaterial üblicherweise geschmiedete oder gezogene Halbzeuge hergestellt. Für RDB wurden für den zylindrischen Bereich neben Schmiederingen teilweise auch Bleche verwendet, für Deckel und Böden der großen Behälter teilweise auch Kumpelteile² oder geschmiedete Platten. Bei Armaturengehäusen kommen neben geschmiedeten Gehäusen auch solche aus Stahlguss zum Einsatz.

Diese Halbzeuge werden in der Regel einer anschließenden Wärmebehandlung zur Optimierung der Werkstoffeigenschaften unterzogen, sofern notwendig noch weiter umgeformt und durch Schweißen miteinander verbunden. Je nach Anforderung wird von innen eine Schweißplattierung aufgetragen. Nach jeder Schweißung folgt meist eine weitere Wärmebehandlung zum Abbau der (schweißbedingten) Eigenspannungen. Die wesentlichen Herstellungsverfahren und Fertigungsschritte für die Komponenten der DFU werden in diesem Kapitel kurz beschrieben und die bisher bekannten Fehlerquellen aufgezeigt. Sofern in diesem Kapitel keine andere Quelle angegeben ist, kann auf /BLE 17/ zurückgegriffen werden.

3.1 Gießverfahren

Der grundlegende Verfahrensschritt, welcher der Fertigung von Rohren, Behältern und sonstigen Komponenten vorausgeht, ist das Gießen. Beim Gießen von Metallschmelzen unterscheidet man grundsätzlich zwischen Gießen in Strang und Block sowie Gießen in Formen. Die Gießverfahren können weiter eingeteilt werden nach dem Werkstoff (Grauguss, Stahlguss oder Nichteisenmetall-Guss) oder auch nach Art der Gießform (Kokillenguss oder Sandformguss). Bezüglich der Krafteinwirkung wird zwischen Einwirkung von Schwerkraft, Druckkraft oder Zentrifugalkraft unterschieden. Des Weiteren wird noch hinsichtlich der Genauigkeit zwischen Normalguss, Feinguss und Präzisionsguss unterschieden. Je nach Verfahren wird ein Bauteil bereits endabmessungsnah gegossen oder aber als Block oder Strang abgegossen und anschließend durch Schmieden oder Walzen weiterverarbeitet.

² Kumpeln: Ziehen von Böden aus Blechen

Um die Schmelze für den Guss herzustellen, ist für die zulässigen Werkstoffe nach Anhang A der KTA 3201.1 /KTA 17a/ das Erschmelzen im Elektrolichtbogenofen vorgeschrieben, ggf. in Verbindung mit dem AOD-Verfahren³, VOD-Verfahren⁴ oder dem Elektro-Schlacke-Umschmelzverfahren (s. Abschnitt 5.1.3). Andernfalls muss die Gleichwertigkeit der verwendeten Verfahren nachgewiesen werden. Sowohl von der dabei hergestellten Schmelze – oder mehreren Schmelzen bei großen Gussstücken – als auch dem Abguss muss eine chemische Analyse durchgeführt werden. Für die Probenahme und Probenvorbereitung gilt DIN EN ISO 14284 „Stahl und Eisen – Entnahme und Vorbereitung von Proben für die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung“.

Im Folgenden wird kurz auf die verschiedenen, üblicherweise eingesetzten Gießverfahren eingegangen.

3.1.1 Sandgießen

Das Sandgießen ist ein weit verbreitetes Verfahren zur Herstellung von Gussteilen aus allen Werkstoffgruppen. Es wird beispielsweise für das Gießen von Pumpengehäusen verwendet. Der größte Teil aller Gussteile aus Eisenwerkstoffen wird mittels verllorener Formen⁵ hergestellt. Auch bei Nichteisen- (NE-) Werkstoffen ist dieses Verfahren gebräuchlich (z. B. Kupferlegierungen). Es ist kostengünstig und relativ einfach umzusetzen. Es lassen sich auch kompliziertere Formen und Hinterschneidungen gießen. Die verlorenen Formen bestehen meist aus speziellen Sanden, die mit Bindemitteln und Verdichtungstechniken zu einer Sandform verarbeitet werden. Diese Form ist meist mehrteilig. Auch Kerne für die Innenraumabformung werden aus solchen Formstoffen hergestellt. Nach dem Abguss und Erstarren des hergestellten Gussteils werden die Formen zerstört und die Kerne entfernt. Es haben sich im Laufe der Zeit verschiedene spezielle Sandgießverfahren entwickelt /BDG 10a/. Abb. 3.1 zeigt eine schematische Darstellung des Formgießens. Ein Speiser, wie in der Abbildung dargestellt, dient dem Ausgleich des Volumendefizits bei der Erstarrung von Gussstücken und somit der Vermeidung der

³ AOD=Argon Oxygen Decarburization, Konverter-Frischverfahren zur Verringerung des Kohlenstoffgehaltes der Schmelze mit einem Argon-Sauerstoff-Gemisch

⁴ VOD=Vacuum Oxidation Decarburization, Konverter-Frischverfahren zur Verringerung des Kohlenstoffgehaltes der Schmelze unter Vakuum mit Sauerstoff

⁵ Eine verlorene Form ist nur einmal verwendbar und wird nach dem Guss zerstört, um das Gussstück zu entnehmen.

Lunkerbildung. Es kann sich dabei prinzipiell um einen offenen oder geschlossenen Raum in der Gießform handeln, der von der Gießströmung mit Schmelze gefüllt wird. Speiser werden vor allem bei dicken, lunkergefährdeten Querschnitten verwendet /BÜH 04/.

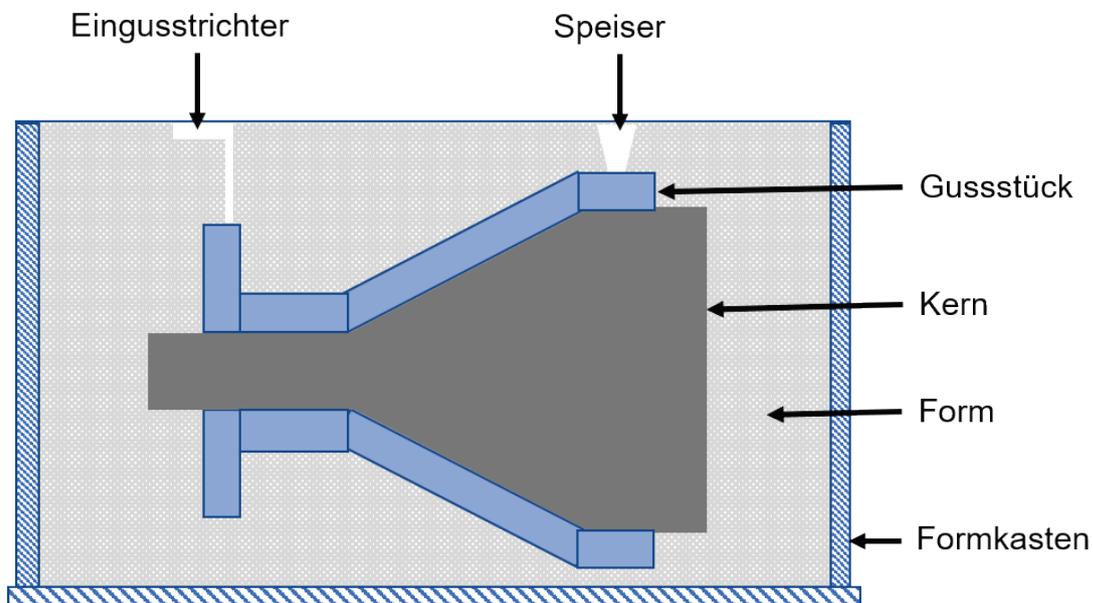


Abb. 3.1 Schematische Darstellung des Formgießens nach /BRO 15a/

3.1.2 Kokillengießen

Beim Kokillengießverfahren wird die Schmelze in eine metallische Dauerform (Kokille) gegossen, die im Gegensatz zur verlorenen Form beim Sandgießen wiederverwendet werden kann. Ebenso sind keramische Dauerformen möglich. Dies ermöglicht die wirtschaftliche Fertigung großer Stückzahlen /BDG 09a/. Da die Form wiederverwendet werden kann, ist das Kokillengießen (z. B. Blockgießen) ein Dauerformverfahren, zu dem auch das Schleudergießen (horizontal und vertikal) und das Stranggießen (horizontal und vertikal) gezählt werden /BDG 09a/. Die Kokillen aus Gusseisen oder Stahl haben eine höhere Wärmeleitfähigkeit als dies bei Sandformen der Fall ist. Dies sorgt für eine schnellere Abkühlung der erstarrenden Schmelze als beim Sandgießen. Dadurch bildet sich ein dichteres, feinkörnigeres Gefüge (Kristallstruktur, Korngröße, Kornausrichtung) mit besseren mechanischen Eigenschaften. Für die Herstellung komplizierterer Geometrien können zusätzlich Sandkerne oder Einlegeteile in der Kokille verwendet werden. Es muss beachtet werden, dass das Gussteil nicht durch eine Behinderung der Schrumpfung oder Schwindung bei der Erstarrung auf die Kokille aufschumpft. Kleine Radien

und scharfe Kanten sind zu vermeiden. Ansonsten kann sich aufgrund der hohen Abkühlgeschwindigkeit an den scharfen Kanten ein Härtegefüge ausbilden. Je nach Größe des Gussteils muss mit unterschiedlich ausgeprägten Seigerungen, Volumenfehlern und Eigenspannungen gerechnet werden (s. Abschnitt 3.1.5.1 bis 3.1.5.3). Normalerweise werden die Gussteile zur Einstellung des gewünschten Gefügezustandes einer zusätzlichen Wärmebehandlung unterzogen. Die bei der Fertigung des RDB (s. Abschnitt 6.2) verwendeten Blöcke wurden unter Vakuum abgegossen (Vakuumblockguss) /LAU 13/, um unter anderem möglichen Schäden durch Wasserstoff (s. Abschnitt 3.1.5.4) und Gasporositäten (s. Abschnitt 3.1.5.6) vorzubeugen.

Gussteile aus Nichteisen-Metallen (z. B. Nickellegierungen) können ebenfalls mit dem Kokillengießverfahren hergestellt werden. Dafür werden auch Verfahren wie das Schleuder-Kokillengießverfahren und das Stranggießverfahren angewendet /BDG 09a/ (in der Quelle wird für weiterführende Informationen auf /HER 03/ verwiesen).

3.1.3 Stranggießen von Stahl

Stranggießanlagen werden bei einem vertikalen bzw. horizontalen Austritt des Gießstrangs in Senkrechthanlagen und Horizontalanlagen eingeteilt. Senkrechthanlagen können auch als Senkrechtabbiege-, Kreisbogenanlagen oder als Anlagen mit progressiver Abbiegung ausgeführt sein, bei denen der Strang in die Horizontale umgelenkt wird (s. Abb. 3.2). Beim Stranggießen von Stahl gelangt die Schmelze zunächst über das sogenannte Schattenrohr unter Luftabschluss aus der Gießpfanne in ein Zwischengefäß (Verteiler oder Tundish genannt). Von dort aus gelangt sie über Tauchausgüsse in wassergekühlte Kokillen aus Kupfer. Die Form eines Strangs ist abhängig von der Form der Kokille, so dass Erzeugnisse mit quadratischem, rechteckigem oder rundem Querschnitt erzeugt werden können. Bevor mit dem Gießen begonnen wird, ist der Auslass der Kokille durch den sogenannten Kaltstrang verschlossen. Der teilerstarrte Strang wird, sobald die Randschale eine ausreichende Dicke aufweist, mit Hilfe dieses Kaltstrangs aus der Kokille gezogen, dann übernehmen angetriebene Rollen diese Funktion. Der gegossene Strang wird ständig mit Luft oder Wasser gekühlt und von Rollen gestützt bis er vollständig erstarrt ist. Durch die intensive Kühlung wird ein gleichmäßiges Erstarrungsgefüge erreicht und ein Aufbrechen der anfangs noch dünnen Randzone verhindert /DEG 09/.

Durch den kontinuierlichen oder quasi-kontinuierlichen Prozess können Volumenfehler (s. Abschnitt 3.1.5.2) vermieden und Seigerungen (s. Abschnitt 3.1.5.1) minimiert werden.

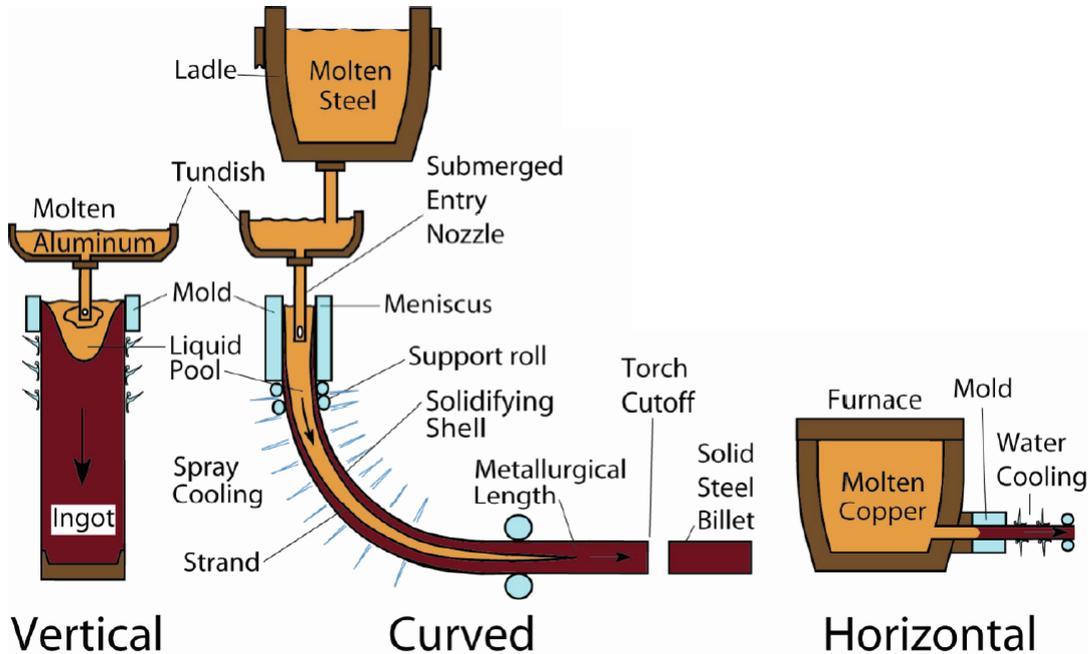


Abb. 3.2 Senkrecht (Vertical), Senkrecht mit Abbiegen (Curved) und Horizontales (Horizontal) Stranggießen /THO 04/

3.1.4 Schleudergießen

Beim Schleudergießen fließt die Metallschmelze unter Einwirkung der Zentrifugalkraft in eine rotierende Form hinein und erstarrt. Bei diesem Verfahren sind keine Kerne notwendig, um ein hohles Gussstück zu erzeugen. Schleudergussstücke zeichnen sich aufgrund der Wirkung der Zentrifugalkraft und der Ausschwemmung nichtmetallischer Einschlüsse und Gase durch eine hohe Gefügedichte aus. Zudem können mit dem Verfahren eine verbesserte Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Festigkeit und Härte erreicht werden. Ein Nachteil ist die Entmischung der Schmelze durch Dichteunterschiede bei den Legierungselementen (s. Abschnitt 3.1.5.1). Durch Schleudergießen können rotationssymmetrische Bauteile, wie z. B. Rohre, hergestellt werden /BRO 15b/.

3.1.5 Fehler (-quellen) beim Gießen

Gerade in großen Gussblöcken, welche die Grundlage für große Komponenten der DFU darstellen, kann es zu Fehlern und Mängeln kommen. Teilweise lassen diese sich durch Schmieden und Wärmebehandlungen wieder beheben. Aus den Gussblöcken werden jedoch auch durch Abtrennen und Lochen schon vor der Weiterverarbeitung Bereiche mit ungünstigen Eigenschaften entfernt. Gemeinsam mit Zunder- und Schmiedeverlusten sowie Abfällen durch die spanende Bearbeitung führt dies zu einem großen Materialverlust /LAU 13/.

3.1.5.1 Seigerung und Segregation

Als Seigerung wird die Entmischung einer Schmelze bei der Erstarrung bezeichnet, welche zu einer örtlichen Anreicherung (positive Seigerung) oder Abreicherung (negative Seigerung) von Elementen führt /BLE 10/.

Abweichungen von der durchschnittlichen chemischen Zusammensetzung der Schmelze über Bereiche, die größer sind als der Dendritenarmabstand⁶, werden Makroseigerungen genannt. Sie entstehen aufgrund der unterschiedlichen Löslichkeiten der Legierungselemente in den festen und flüssigen Phasen zwangsläufig beim Erstarrungsprozess, wodurch Legierungselemente in der flüssigen Phase vor der Erstarrungsfront hergeschoben werden und sich somit in der noch vorhandenen Schmelze anreichern. Sie werden auch als Blockseigerungen bezeichnet. Große Blöcke neigen aufgrund der längeren Erstarrungszeiten stärker zu Makroseigerungen. Unter Mikroseeigerung wird eine Entmischung im Korngrößenmaßstab verstanden, die auch als Kristallseigerung bezeichnet wird. Diese kann unter anderem durch das Wachstum der Kristallite bedingt sein. Die Erstarrungsbedingungen, die Erstarrungsgeschwindigkeit und die Diffusionsfähigkeit der Legierungselemente bestimmen das Ausmaß der Seigerungen /BLE 10/.

Es werden verschiedene Formen der Makroseigerung (Blockseigerung, Schwereseigerung, Hot-Top-Seigerung, A-Seigerung, V-Seigerung, Mittenseigerung, umgekehrte Blockseigerung) unterschieden (s. Abb. 3.3), die im Folgenden erläutert werden /DÄC 18/.

⁶ Dendriten: gerichtet erstarrte Kristallite mit tannenbaumartiger Struktur

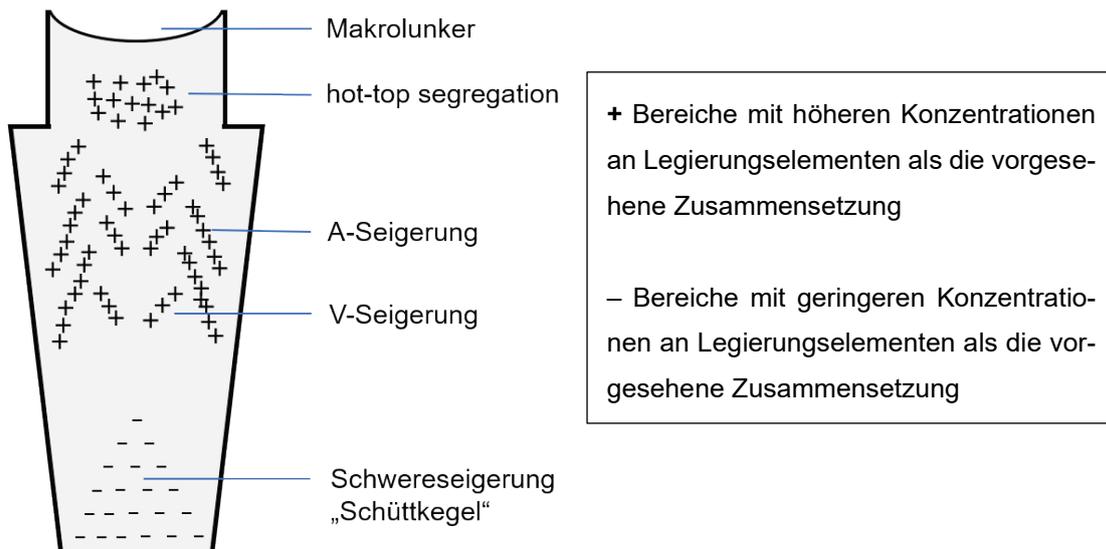


Abb. 3.3 Schematische Darstellung der Makroseigerungen nach /DÄC 18/

Die Schwere-seigerung (engl. negative base segregation) entsteht aufgrund von Dichteunterschieden zwischen verschiedenen Bestandteilen der Schmelze und ist ebenfalls eine Form der Makroseigerung. Frei in der Schmelze gebildete oder abgelöste Kristalle, welche im Vergleich zur Schmelze an Legierungselementen angereichert sind und eine höhere Dichte besitzen, sinken herab. Dies führt beim Blockguss zur Ausbildung des sogenannten „Schüttkegels“ (beim horizontalen Strangguss sinken die Kristalle auf die untere Strangschale herab). Gleichzeitig steigt angereicherte Schmelze auf /BLE 10/, /DÄC 18/. Es wurde in der Vergangenheit häufig diskutiert, welcher von beiden Effekten dominierend ist. Neuere Modelle deuten darauf hin, dass die Sedimentation der Kristalle einen größeren Einfluss hat /DÄC 18/.

Eine positive Seigerung im Kopfbereich des Blocks entsteht immer, da im noch flüssigen Bereich im Inneren des Blocks eine aufwärts gerichtete Strömung angereicherter Schmelze vorliegt. Davon zu unterscheiden, obwohl ebenfalls im Kopfbereich verortet, ist die sogenannte Hot-Top-Seigerung, die durch die Erstarrung der Schmelze im Kopfbereich des Blocks entsteht. Verbesserungen auf dem Gebiet der wärmeisolierenden Hauben, welche den Kopfteil des Blocks schützen (engl. hot-top) und die hauptsächlich zur Reduzierung der Porosität verwendet werden, führten zu einer Reduzierung der positiven Hot-Top Seigerung im Kopfbereich /DÄC 18/.

A-Seigerungen, die auch als Schattenstreifen (engl. ghost lines) bezeichnet werden, finden sich nahe der Schüttkegelbegrenzung. Sie stellen insbesondere eine Anreicherung

an den Begleitelementen Schwefel und Phosphor dar. Verschiedene Mechanismen werden als Ursache für die Bildung dieser Seigerungen angeführt /DÄC 18/, /BLE 10/. Die Entstehung von A-Seigerungen kann unter anderem durch die Blockgeometrie (u. a. Verhältnis Höhe/Durchmesser), die Wahl geeigneter Gießparameter (z. B. Gießtemperatur) und die chemische Zusammensetzung beeinflusst werden /BOG 18/. Die V-Seigerungen sind in der Kernzone des Blocks in Achsnähe bzw. in der Mitte des Strangs beim vertikalen Stranggießen angeordnet, wo das angereicherte Material zum Ende der Erstarrung auch die Mittenseigerung (engl. centreline segregation) bildet /DÄC 18/, /BLE 10/.

Sofern Seigerungen im Randbereich eines Blocks mit erhöhter Konzentration an Legierungselementen auftreten, wird dies als umgekehrte Blockseigerung bezeichnet. Ein Erklärungsansatz für ihre Entstehung ist die Rissbildung infolge der Schwindung der schon kristallisierten Randzone. In diese wird an Legierungselementen angereicherte Restschmelze eingezogen. Unterstützt wird dieser Vorgang durch die Kapillarwirkung und den Druck der Flüssigkeitssäule im Inneren /BLE 10/.

Neben den Makro- und Mikro-seigerungen, die aus der flüssigen Phase entstehen, gibt es Entmischungsvorgänge, die sich nach der Erstarrung ausbilden (Segregation) und eine Form der Mikro-seigerung sind. In Verbindung mit Diffusionsvorgängen kann es hierdurch zur Anreicherung von bestimmten Legierungselementen an Korngrenzen kommen. Der Grund dafür ist, dass Korngrenzen als flächenhafte Gitterfehler Fremdatome bevorzugt aufnehmen. Diese Form der Seigerung, aber auch andere Mikro-seigerungen, sind durch Diffusionsglühungen (s. Abschnitt 3.4.1.1) bei entsprechenden Temperaturen zu beseitigen /BLE 10/.

Die stärksten Seigerungen, nichtmetallischen Einschlüsse und Poren befinden sich beim Blockguss an Kopf und Fuß sowie in der Kernzone des Blocks. Besonders stark neigen die Elemente Kohlenstoff, Schwefel und Phosphor zur Bildung von Seigerungen. Bei der Ausprägung der Seigerungen spielt auch die Größe des Blocks eine Rolle. Kopf und Fuß können vor der weiteren Verarbeitung abgetrennt werden. Bei der Herstellung von nahtlosen Schmiederingen wird nach dem Stauchen und Pressen des Blocks auch Material aus dem Kernbereich ausgelocht (s. Abschnitt 6.2.1) /LAU 13/.

Beim vertikalen Strangguss treten im Wesentlichen nur V-Seigerungen und Mittenseigerungen auf, da andere Makro-seigerungen aufgrund der höheren Abkühlraten oder durch eine optimierte Prozessführung vermieden werden.

Während Mikroseigerungen durch ein Diffusionsglühen entfernt werden können, ist das vollständige Entfernen von Makroseigerungen praktisch nicht möglich. Makroseigerungen führen aufgrund der lokal unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen zu ungleichmäßigen mechanischen Eigenschaften. Daher ist es für Gießereien wichtig, das Auftreten von Makroseigerungen vorauszusagen und diese zu minimieren.

3.1.5.2 Volumenfehler

Volumenfehler entstehen aufgrund der Abnahme des Volumens der betroffenen Werkstoffe durch die Erstarrung und anschließende Abkühlung /BÜH 04/. Der Volumenfehlbetrag, welcher bei der Erstarrung und Abkühlung auftritt, wird als technisches Volumendefizit bezeichnet. Abb. 3.4 zeigt die vier verschiedenen Anteile des technischen Volumendefizits. Es setzt sich zusammen aus dem Makrolunkervolumen, dem Einfallvolumen, der kubischen Schwindung und dem Innendefizit.

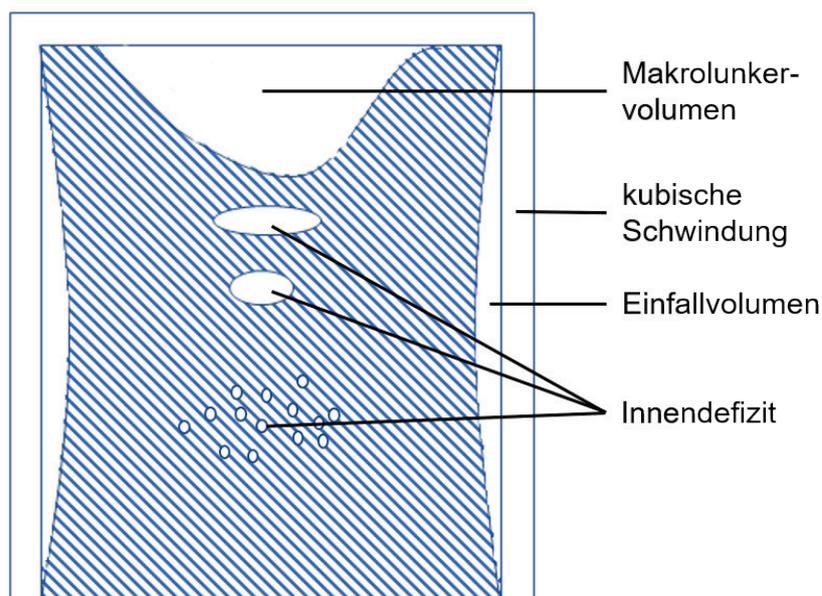


Abb. 3.4 Anteile des technischen Volumendefizits nach /BÜH 04/

Die kubische Schwindung (feste Schwindung) findet bereits bei der Modellherstellung Berücksichtigung. Einfallvolumen und Makrolunker können durch den Einsatz von Speisern beim Sandgießen vermieden oder reduziert werden. Speisungstechnische Maßnahmen werden auch getroffen, um das Innendefizit zu vermeiden. Dieses tritt in Form gut sichtbarer Einzelhohlräume, einer feinverteilten Schwindungsporosität oder allen Zwischenformen auf. Die Aufteilung des Volumendefizits ist abhängig von der Erstarrungsmorphologie. Bei schwammartiger oder breiartiger Erstarrung ist die Randschale

weniger tragfähig und das Speisungsvermögen geringer. Dadurch treten bevorzugt Einfallstellen und Schwindungsporen (Innendefizit) auf, während bei glattwandiger Erstarrung eher mit Makrolunkern zu rechnen ist /BÜH 04/. Im Fall des Stranggusses kann das technische Volumendefizit sehr klein ausfallen, da nur so schnell gegossen und der Gießstrang transportiert werden, wie das Metall erstarrt, und durch die Rollen von außen Druck auf den Gießstrang ausgeübt werden kann /BÜH 04/.

3.1.5.3 Eigenspannungen

Eigenspannungen können verschiedene Ursachen haben. Sie können entstehen, wenn Dehnungen aus Temperaturunterschieden geometrisch behindert werden. Das ist z. B. bei ungleichmäßiger Abkühlung eines Gussteils der Fall. Eigenspannungen können sich ebenso aufgrund von Einschlüssen oder Gitterfehlern im Werkstoff bilden. In einem Temperaturbereich, in dem Dehnungsunterschiede noch durch Relaxation und Kriechen abgebaut werden können, bilden sich keine Eigenspannungen aus. Sobald ein Temperaturbereich erreicht ist, bei dem ausreichend hohe Festigkeitskennwerte vorhanden sind, können sich bei Abkühlung mit entsprechenden Temperaturdifferenzen Eigenspannungen bilden. Die Höhe der entstehenden Eigenspannungen ist abhängig von Faktoren wie Geometrie, Temperaturführung, Ausleertemperatur und Materialkenngrößen (Streckgrenze, Ausdehnungskoeffizient und Elastizitätsmodul). Beim Sandguss spielt zudem die Sandfestigkeit der Form eine Rolle /WAR 11/.

Der Eigenspannungszustand steht zunächst im Gleichgewicht. Ein sichtbarer Schaden am Bauteil tritt häufig erst durch eine äußere Störung, z. B. bei einer mechanischen Bearbeitung, auf. Es kann aber bereits beim Abkühlen ein Versagen auftreten, wenn das Bauteil sehr große Temperaturdehnungen erfährt. Dies ist abhängig von der Geometrie und den Wanddicken. Die Messung der Eigenspannungen findet meistens an der Oberfläche statt. Dort sind die Extremwerte zu erwarten /WAR 11/. Eigenspannungen können durch Spannungsarmglühen (s. Abschnitt 3.4.1.1) verringert werden.

3.1.5.4 Schäden durch Wasserstoff

Beim Abguss treten als Wasserstoffquellen z. B. Feuerfestmaterialien, Luftfeuchtigkeit und Flussmittel auf. Die Wasserstoffaufnahme aus der Luftfeuchtigkeit kann durch spezielle Gießtechnik (engl. Argon Shrouding, Schutzgasatmosphäre aus einem Inertgas beim Befüllen des Tundish aus der Gießpfanne) stark reduziert werden, welche auch

eine Reoxidation (s. Abschnitt 3.1.5.5) der Schmelze verhindern. Bei Feuerfestmaterialien hat sich eine trockene Lagerung bewährt. Um den Wasserstoffeintrag durch das Flussmittel zu verringern, wird dieses direkt in die vorgewärmte Kokille gegeben /GAB 18/. Der Wasserstoffgehalt kann auch in gewissem Umfang durch eine Wasserstoffarmglühung (s. Abschnitt 3.4.1.6) reduziert werden.

Bei unzureichender Entgasung der Schmelze können nach dem Gießen in den Seigerungszonen (s. Abschnitt 3.1.5.1) durch Wasserstoffeinwirkung sogenannte Flockenrisse bzw. Wasserstoffflocken entstehen. Eine umfassende Betrachtung des Einflusses von Wasserstoff auf das Verhalten von Konstruktionswerkstoffen in Kernkraftwerken findet sich im Bericht GRS-578 /FAU 20/.

3.1.5.5 Einschlüsse

Entstehen Einschlüsse als Produkt einer Reaktion in der Schmelze oder während der Erstarrung, so werden sie als endogene Einschlüsse bezeichnet. Werden sie von außen in den Stahl eingetragen, werden sie hingegen als exogene Einschlüsse bezeichnet. Darüber hinaus wird zwischen nichtmetallischen und metallischen Einschlüssen unterschieden, je nachdem, ob diese zweite Phase im Stahl einen metallischen oder einen nichtmetallischen Charakter hat. Endogene nichtmetallische Einschlüsse sind entweder Verbindungen der Stahlbegleiter (Sulfide oder Karbonitride, z. B. MnS, Ti(C,N)) oder Desoxidationsprodukte (Oxide, z. B. Al₂O₃). Die endogenen nichtmetallischen Einschlüsse haben einen besonders großen Einfluss auf die Eigenschaften des Stahls. Exogene Einschlüsse im Stahl sind zumeist auf Feuerfestmaterial (z. B. Al₂O₃) oder mitgerissene Schlacke in der Schmelze zurückzuführen. Relativ selten treten auch exogene metallische Einschlüsse auf, z. B. durch nicht vollständig aufgelöste Legierungszusätze /BLE 10/.

Die Form von Einschlüssen nach der Umformung ist abhängig von ihrer Plastizität im Vergleich zur Plastizität des Stahls. Sind beide nicht genau gleich verformbar, stellen Einschlüsse im Werkstoff eine potenzielle Quelle von Defekten dar. Harte kompakte kristalline Einschlüsse werden nicht verformt, während ausgedehnte dendritisch geformte zerstört und Agglomerate zerstreut werden. Üblicherweise verhalten sich Einschlüsse spröde und zerbrechen unter den umformungsbedingt auftretenden Scherspannungen. Durch besondere Maßnahmen in der Gießpfanne (z. B. Pfannenspülen mit Argon oder Stickstoff, Desoxidation mittels Aluminium oder Kalzium) kann heutzutage ein sehr hoher

Reinheitsgrad (Abwesenheit von nichtmetallischen Einschlüssen) erreicht werden /BLE 10/.

Beim Abgießen im Blockguss kann es durch die Aufnahme von Sauerstoff aus der Umgebungsluft im Inneren des Schiebers, welcher den Ausfluss der Schmelze reguliert, und im Übergang des Schiebers zum Gießtrichter zur Reoxidation kommen. Die Reoxidation ist eine der Quellen für endogene nichtmetallische Einschlüsse. Um diese zu minimieren kann eine Gießstrahlabschirmung verwendet werden. Es wurden spezielle Pfannenschiebersysteme entwickelt, welche den Ausfluss aus der Gießpfanne regulieren, in die Inertgas (Argon) eingeleitet wird /HEL 16/.

3.1.5.6 Gasporosität

Die Ursachen für die Entstehung von Gasporositäten sind vielseitig. Ein Beispiel sind strömungsmechanische Ursachen. So können beispielsweise bei turbulenter Formfüllung Luftblasen eingeschlossen werden. Eine weitere mögliche Ursache liegt im Überschreiten der Löslichkeitsgrenze von Gasen in der Legierung beim Abkühlen und Erstarren. Bei Legierungen, die ein ausgeprägtes Erstarrungsintervall aufweisen, werden hierbei die Gase bevorzugt im Bereich zwischen den Dendritenarmen ausgeschieden. Verfahrens- und formstoffbedingte Ursachen können ebenfalls zur Bildung von Gasporositäten führen. Dazu gehört eine unzureichende Abfuhr von Gießgasen sowie die Gasabgabe von Trennmitteln und Kernen bzw. Formstoff. Sind die Gasporositäten bei ihrer Bildung ganz von der Schmelze umschlossen, so ist ihr Erscheinungsbild annähernd rund mit einem glatten Porenrand /BDG 10b/.

3.1.5.7 Formfüllzeit

Die Formfüllzeit ist abhängig von der Gießtemperatur, Strömungsgeschwindigkeit und Fließvermögen der Schmelze, Geometrie und Abmessung des Gusstückes, Lage und Größe des Gießsystems sowie der Wärmeentzugsgeschwindigkeit, die wiederum abhängig vom Formstoff ist. Durch eine zu kurze Formfüllzeit beim Sandgießen kann es zur Formbeschädigung durch das Ausspülen von Sand kommen. Es besteht zudem eine erhöhte Neigung zu Spannungsrissen und zur Lunkerbildung. Eine zu lange Formfüllzeit hingegen kann zu nicht gefüllten Hohlräumen, Kaltverschweißungen und Sandausdehnungsfehlern führen /BRO 15a/.

3.1.5.8 Formfüllungsvermögen

Als Formfüllungsvermögen bezeichnet man die Eigenschaft eines Gießmetalls, die Konturen der Form wiederzugeben. Ecken und Kanten der Form stellen eine Herausforderung dar, da das Gießmetall nur begrenzt in diese vordringen kann. In der Folge ergeben sich abgerundete Kanten am Gussstück /BÜH 04/. Das vergleichsweise schlechte Formfüllungsvermögen von Stahlguss⁷ ist darauf zurückzuführen, dass ausgehend von der Wand der Form dendritische Mischkristalle senkrecht wachsen. Diese behindern bei dünnen Querschnitten den Durchfluss. Bei der Erstarrung von Stahlguss kommt es zu einer Volumenschrumpfung von 6 – 8 %. Zur Herstellung lunkerfreier Gusstücke (s. Abschnitt 3.1.1) müssen daher viele Speiser zum Nachspeisen eingesetzt werden. Die Gießtemperatur von Stahlguss liegt bei etwa 1.500–1.700 °C. Durch eine langsame Abkühlung, bei der es zur Grobkornbildung kommt, ist die Zähigkeit zunächst gering. Diese kann aber durch anschließendes Normalisieren und Spannungsarmglühen verbessert werden (s. Abschnitte 3.4.1.3 und 3.4.1.6) /WEI 15/.

3.1.5.9 Warmrisse (Heißrisse)

Warmrisse können sich in einem Gusskörper bilden, der schon weitgehend erstarrt ist, in dem aber noch geringe Mengen flüssiger Phase (Restschmelze) vorliegt. Sofern noch Restsauerstoff in der Schmelze vorhanden ist, ist die Oberfläche dieser Risse aufgrund der hohen Temperatur bei der Entstehung meistens oxidiert, wodurch hier eine Materialtrennung vorliegt, die auch in der nachfolgenden Verarbeitung nicht behoben werden kann. Anders als Kalt- oder Spannungsrisse verlaufen sie interkristallin.

Ursächlich für die Warmrissbildung ist die Volumenkontraktion bei der Erstarrung und Abkühlung. Eine Behinderung dieser Kontraktion, beispielsweise durch die Reibung zwischen Gießmetall und Form, führt grundsätzlich zu internen Spannungen und einer Warmrissgefahr. Solange hierbei die Spannungen durch plastische Verformung aufgenommen werden können oder die Festigkeit des erstarrten Materials nicht überschritten wird, ist die Gefahr für die Bildung von Warmrissen gering. Während des Gießens und Erstarrens besteht noch die Möglichkeit, dass Restschmelze in die gedehnten Bereiche nachfließt und die Risse so gefüllt – „ausgeheilt“ – werden.

⁷ In Formen vergossener Stahl, der keine weitere Umformung, z. B. durch Walzen, erfährt.

Warmrisse bilden sich, wenn es aufgrund eines geringen Warmrisswiderstands zu einer Trennung des Kristallverbands kommt. Gefährdet sind insbesondere Stahlguss sowie Temperguss⁸ und verschiedene Schwer- und Leichtmetalllegierungen. Gusseisen hingegen neigt nicht zur Bildung von Warmrissen /BÜH 04/.

Eine geeignete Gussstückgestaltung und Formauslegung trägt durch die Nachspeisung der betroffenen Bereiche zum Ausheilen der Risse bei. Um Warmrisse zu vermeiden, können Legierungen mit einer günstigen Erstarrungsmorphologie gewählt werden. Durch Kornfeinung (Impfen der Schmelze mit Fremdkeimen beim Gießen) wird ein feinkristallines Gemisch aus flüssiger und fester Phase mit besseren Dehnungseigenschaften und besserer Speisung erreicht. Auch eine Erhöhung des äußeren Drucks im Speiser verbessert die Speisung. Der Spannungsaufbau im Gussstück kann durch eine verbesserte Anschnitt- und Speisertechnik verringert werden. Vorteilhaft wirken sich zudem die Verwendung des Sandgussverfahrens mit geringerer Abkühlgeschwindigkeit und nachgiebige Formstoffe bei Kernen aus /BÜH 04/.

3.2 Umformverfahren

Abhängig davon, ob vor einem Umformprozess dem Werkstück Wärme zugeführt wird oder nicht, wird zwischen Warm- und Kaltumformprozessen unterschieden. Dabei wird die Wärme, die während des Umformens durch die Umwandlung der Umformenergie entsteht, nicht berücksichtigt. Eine Halbwarmumformung bedeutet, dass das Werkstück vor der Umformung bis unterhalb der Rekristallisationstemperatur⁹ erwärmt wird. Des Weiteren wird zwischen Blech- und Massivumformverfahren unterschieden. Zu den Massivumformverfahren gehören beispielsweise das Stauchen und das Walzen. Ein Beispiel für ein Blechumformverfahren ist das Tiefziehen. Daneben gibt es Kombinationen aus Massiv- und Blechumformen, z. B. das Biegen /KOP 99/.

Das Warm- und das Kaltumformen bei der Herstellung von Halbzeugen sind in KTA 3201.1 /KTA 17a/ geregelt, während Anforderungen an das Warm- und Kaltumformen bei der Verarbeitung von Halbzeugen und Bauteilen (z. B. durch Drücken, Biegen

⁸ Eisen-Kohlenstoff-Silicium-Gusswerkstoff

⁹ Oberhalb dieser Temperatur bildet sich durch die eingebrachte Wärmeenergie das Kristallgitter neu. Diese Temperatur ist abhängig vom jeweiligen Metall bzw. der jeweiligen Legierung.

oder Pressen) in entsprechenden Abschnitten in KTA 3201.3 /KTA 17b/ zu finden sind (s. Abschnitt 5.1.5).

3.2.1 Freiformschmieden

Unter Freiformen oder Freiformschmieden versteht man ein Druckumformen mit gegeneinander bewegten Werkzeugen, die nicht oder nur teilweise die Form des Werkstücks enthalten /BRO 15c/. Es werden auf diese Art gegossene oder in Umschmelzaggregaten erschmolzene Rohblöcke, aber auch vorgewalzte oder vorgeschmiedete Halbzeuge umgeformt. Es kann eine Vielzahl verschiedener Werkstoffe auf diese Weise verarbeitet werden. Dazu gehören beispielsweise Stahl, Aluminium- und Kupferlegierungen /DEG 09/. Beim Freiformschmieden werden drei wesentliche Unterverfahren unterschieden – das Recken, das Stauchen und das Breiten. Neben der Herstellung des Rohteils ist ein weiteres Ziel des Freiformschmiedens eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch das Durchschmieden /BRO 15c/.

Zunächst wird der zu verarbeitende Block im Schmiedeofen auf Umformtemperatur erwärmt. Diese Erwärmung erfolgt in drei Zeitabschnitten: Vorwärmzeit, Anwärmzeit und Liegezeit/Ausgleichszeit. In der Anwärmzeit wird bereits die Schmiedetemperatur erreicht (zwischen 1.000 °C und 1.250 °C). Die Ausgleichszeit dient zum Temperatúrausgleich zwischen der äußeren und der inneren Zone des Blocks. Die erzielte Werkstückform wird schließlich unter der Einwirkung mechanischer Druckkräfte durch eine gezielte Werkstückbewegung zwischen den einzelnen Werkzeughüben erreicht. Das Stauchen und das Recken stellen die beiden wichtigsten umformtechnischen Verfahrensschritte dar. Beim Stauchen wird der Querschnitt durch die Breitung des Werkstücks vergrößert, beim Recken wird das Material hingegen in Längsrichtung verdrängt und der Querschnitt reduziert. Der Umformprozess erfolgt durch Schmiedehämmer oder Schmiedepressen. Im Vergleich zu Schmiedehämmern bringen Schmiedepressen einen ruhigen und gleichmäßigen Druck auf, was sich günstig auf die Bildung eines homogenen Gefüges auswirkt. Neben den Schmiedepressen und Schmiedehämmern kommen im Bereich der hochlegierten Stahlgüten auch Langschmiedemaschinen und Radialschmiedemaschinen zum Einsatz. Im Anschluss an den Umformprozess wird eine Wärmebehandlung zur Einstellung der mechanischen Eigenschaften des Werkstücks durchgeführt, bevor das Schmiedeteil spanend bearbeitet wird /DEG 09/.

Das industrielle Freiformschmieden findet heute hauptsächlich bei besonders großen Schmiedestücken Anwendung oder wenn aufgrund der Werkstoffeigenschaften oder kleinen Losgrößen andere Umformverfahren nicht genutzt werden können. Neben dem Warmwalzen gehört das Freiformschmieden zur ersten Verarbeitungsstufe zur Herstellung von Halbzeugen /DEG 09/.

3.2.1.1 Große freiformgeschmiedete Schmiederinge

Besondere Anforderungen und auch Herausforderungen bestehen beim Schmieden nahtloser großer Ringe aufgrund des großen Gewichts, weswegen dies von nur wenigen Schmieden weltweit durchgeführt werden kann. Zur Erzielung besonderer Reinheit und Gleichmäßigkeit des Stahles werden die Blöcke, aus denen z. B. Schmiederinge für Teile des RDB geschmiedet werden sollen, im Elektroofen erschmolzen und unter Vakuum in eine Kokille abgegossen (vgl. Abschnitt 3.1.2). Von dem entstandenen Gussblock werden Kopf und Fuß abgetrennt, da diese Bereiche durch die Diffusions- und Konvektionsprozesse während der Abkühlung und Erstarrung noch ausgeprägte Seigerungen (vgl. Abschnitt 3.1.5.1) sowie eine höhere Dichte an nicht-metallischen Einschlüssen enthalten. Beides führt in der Regel zu ungünstigeren mechanischen Eigenschaften und kann die Schweißbarkeit beeinträchtigen /MAI 85/, /SAI 06/.

Der verbliebene Gussblock wird in einer Presse zu einem Rohblock (engl. bloom) gestaucht und in der Mitte gelocht (s. Abb. 3.5). Daran schließt sich der eigentliche Schmiedeprozess an, unterbrochen von mehrfachem Wieder-Aufheizen auf Schmiedetemperatur. Die gelochten Blöcke für die Schmiederinge werden langsam aufgeweitet und durch Stauchen und Recken zu dünnwandigeren Ringen geschmiedet /SAI 06/, /BEN 97/.

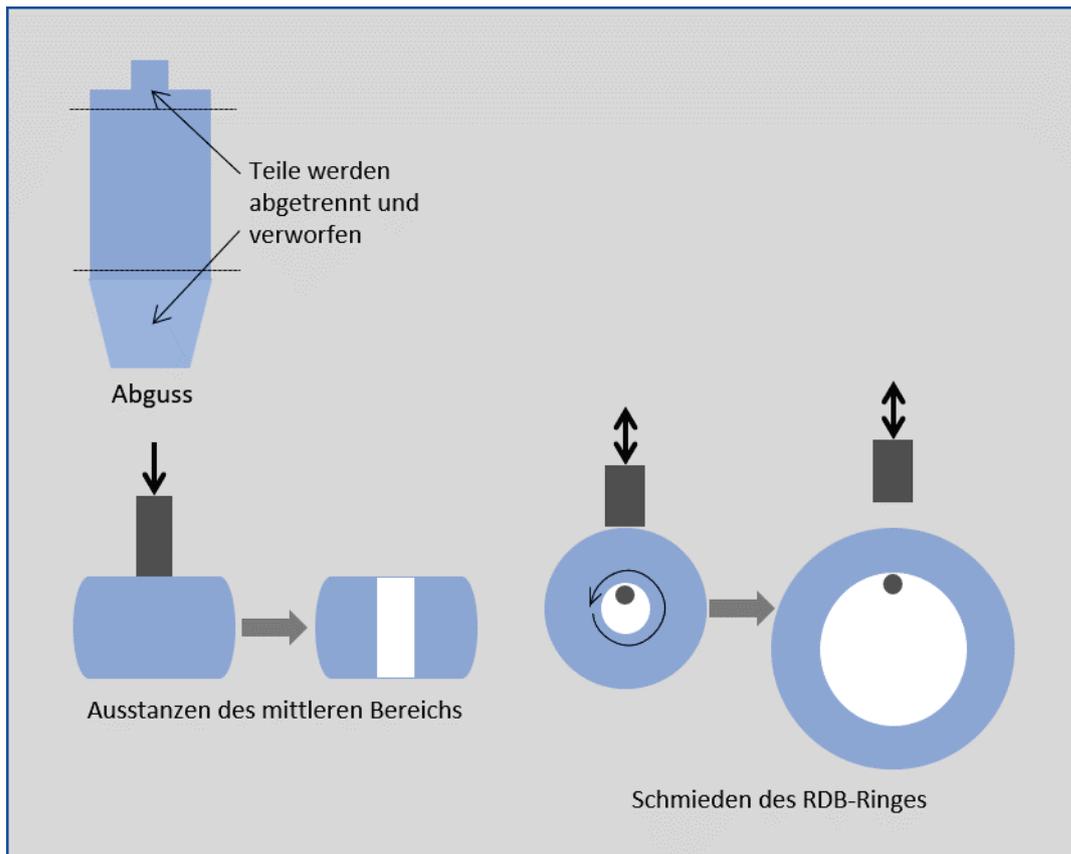


Abb. 3.5 Schemadarstellung der Herstellung eines RDB-Rings

3.2.2 Gesenkschmieden

Das Gesenkschmieden wird dem Druckumformen zugeordnet. Es handelt sich um ein Massivumformverfahren. Beim Gesenkschmieden ist die Werkstückform als Hohlform in die Werkzeughälften vollständig oder fast vollständig eingearbeitet. Die Hälften werden als Ober- und Untergesenk bezeichnet und bestehen aus Werkzeugstahl. In diese Hohlformen wird das zuvor erwärmte Werkstück hineingeschlagen. Es wird unterschieden zwischen dem Gesenkschmieden in seitlich offenen Gesenken, dem Gesenkschmieden mit Grat und dem Gesenkschmieden ohne Grat. Für die Herstellung von Werkstückserien kommen auch Gesenkschmiedepressen zum Einsatz. Mit dem Gesenkschmieden können auch Werkstücke mit komplexen Geometrien reproduzierbar gefertigt werden. Durch Abgraten und Lochen können im Anschluss an die Umformung Grat und Butzen (Innengrat) entfernt werden /HAR 13/.

3.2.3 Walzen

Beim Walzen wird der Werkstoff hauptsächlich auf Druck belastet. Daher wird dieses Verfahren des Umformens der Verfahrensgruppe Druckumformen zugeordnet. Es wird unterschieden zwischen Längswalzen, Querwalzen und Schrägwalzen. Die Walzwerkswalzen werden nach ihrer jeweiligen Aufgabe in Arbeitswalzen und Stützwalzen unterteilt. Die Formgebung erfolgt zwischen den Arbeitswalzen, während die Stützwalzen eine Durchbiegung der Arbeitswalzen verhindern sollen. Die Walzen beeinflussen direkt die Maßgenauigkeit und Oberflächenausbildung des Erzeugnisses, weshalb ihrer Qualität und ihren Verschleißeigenschaften für die Qualität des Erzeugnisses eine große Bedeutung zukommt /DEG 09/.

3.2.3.1 Warmwalzen

Zum Warmwalzen wird das Material zunächst gleichmäßig auf eine bestimmte Temperatur vorgewärmt. Dies geschieht im Ofenbereich des Warmwalzwerks. Anschließend gelangt das Werkstück in die Walzstraße. Zum Warmwalzen gehört auch das normalisierende Walzen mit geregelter Temperaturführung. Durch dieses Verfahren entfällt das Normalisieren (s. Abschnitt 3.4.1). Es werden die gleichen Werkstoffeigenschaften erhalten.

3.2.3.2 Kaltwalzen

Das Kaltwalzen (des zuvor warmgewalzten Werkstückes) wird hauptsächlich zur Herstellung von Flacherzeugnissen, wie beispielsweise nichtrostendem Blech, eingesetzt. Es können aber auch Profilerzeugnisse und Rohre auf diese Art hergestellt werden. Vor dem Kaltwalzen wird durch Beizen oder durch eine mechanische Behandlung (z. B. Strahlentzundern) die Zunderschicht auf dem Band entfernt. Zum anschließenden Walzen werden Zwei-, Vier- oder Vielwalzengerüste verwendet. Auf sogenannten Umkehrgerüsten wird das Werkstück nach einem Stich¹⁰ durch die Umkehr der Walzendrehrichtung direkt weiter verformt. Vielwalzen-Umkehrgerüste finden vor allem bei Stählen mit hoher Verfestigung Anwendung. Hintereinander geschaltete Walzengerüste bilden eine sogenannte Kaltwalztandemstraße. Damit kann ein Werkstück in einem Durchgang auf

¹⁰ Ein Banddurchlauf durch die Walzen.

die gewünschte Endabmessung gebracht werden /DEG 09/. Im Anschluss an das Walzen wird eine Glühbehandlung zur Beseitigung der Kaltverfestigung durchgeführt (Rekristallisationsglühen, s. Abschnitt 3.4.1) /DEG 09/. Durch die Rekristallisation und die dadurch eingestellten Texturen und Gefüge werden die mechanischen Eigenschaften im Wesentlichen bestimmt. Zum Glühen werden Haubenöfen oder kontinuierliche Wärmebehandlungsanlagen verwendet. Daran kann sich ein Nachwalzen (Dressieren) anschließen. Bei diesem wird u. a. der Blechoberfläche eine gewünschte Rauheit aufgeprägt /BLE 12/.

Für die Fertigung von nahtlosen Rohren wurden teilweise spezielle Walzverfahren entwickelt, wie im folgenden Abschnitt 3.2.3.3 dargestellt.

3.2.3.3 Herstellung nahtloser Rohre

Die zentralen Schritte bei allen Verfahren zur Fertigung von gewalzten Nahtlosrohren sind das Lochen, das Strecken und das Fertigwalzen. Die für die Fertigung gewählten Verfahren sind u. a. abhängig von dem gewünschten Rohrdurchmesser, den Rohrqualitäten und den Walzlosgrößen.

Die am weitesten verbreiteten Lochverfahren sind das Schrägwalzlochen /DEG 09/ sowie das Lochen eines Blockes in einer Lochpresse. Beim Schrägwalzlochen ist ein Lochdorn im Spalt zwischen den Walzen so angeordnet, dass der vorgeheizte Rohling von den Walzen im konischen Einlaufteil des Schrägwalzwerks erfasst und in einer schraubenförmigen Bewegung über den Lochdorn gewalzt wird und ein Hohlkörper entsteht (s. Abb. 3.6, Abb. 3.7 und Abb. 3.8). Beim Lochen eines Blockes in einer Lochpresse wird der Rohling in einer Form zu einer sogenannten Hülse bzw. einem Rohrrohling gepresst, d. h. es wird so weit gelocht, dass noch ein Bodenstück verbleibt bzw. der Boden wird ebenfalls durchstoßen.

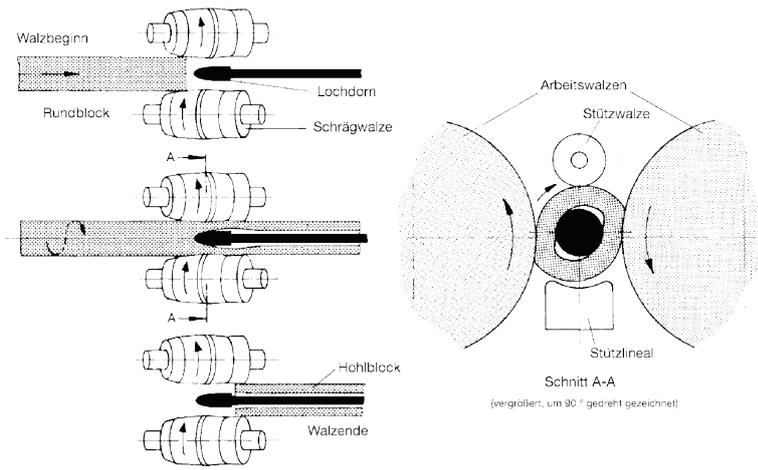


Abb. 3.6 Lochen in einem Mannesmann-Schrägwalzwerk /BRE 19/

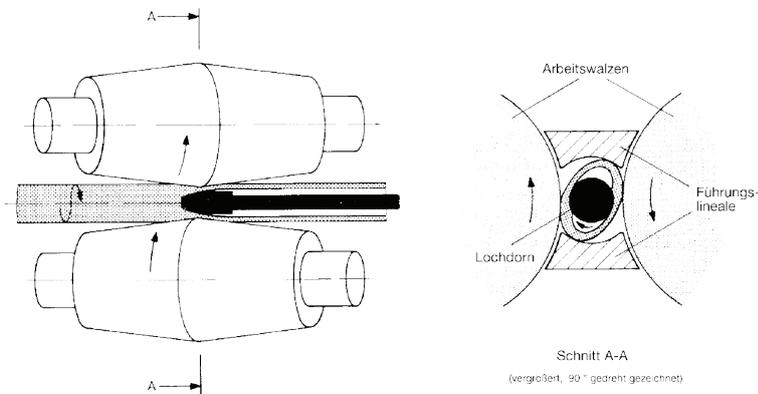


Abb. 3.7 Lochen mit dem Tonnenlochverfahren /BRE 19/

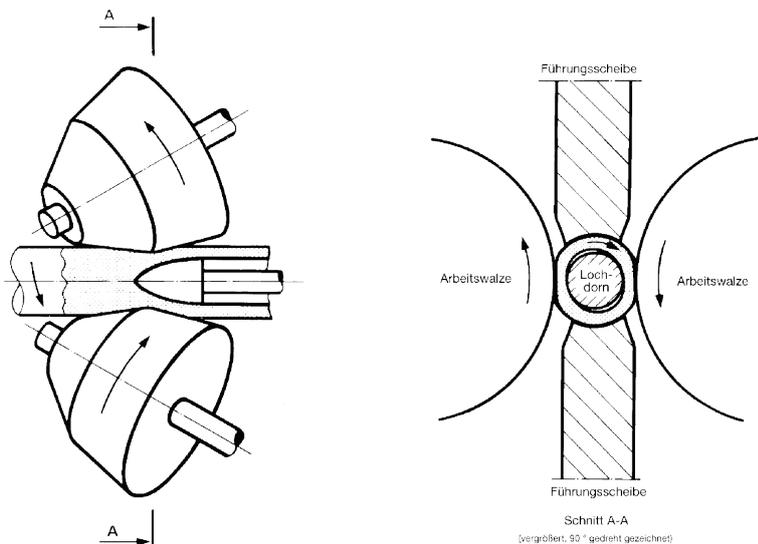


Abb. 3.8 Lochen in einem Kegelschrägwalzwerk /BRE 19/

Bereits am Ende dieses Fertigungsschrittes sind die Oberflächen- und Toleranzeigenschaften des Blocks wichtig. Weitere Anlagen bei diesem Herstellungsprozess sind hier beispielsweise die Blockentzunderung und die Hohlblockinnendeoxidation.

Im Anschluss an das Lochen erfolgt der Prozessschritt Strecken/Aufweiten, wofür verschiedene Längswalz- und Schrägwalzverfahren zur Verfügung stehen. Alle Walzverfahren in diesem Prozessschritt werden als Warmwalzverfahren ausgeführt. Je nach Walzverfahren bestehen unterschiedliche Einsatzbereiche bezüglich der Wanddicke und des Durchmessers von Rohren.

Warmwalzverfahren mit längs angeordneten Walzen (Längswalzverfahren), d. h. die Drehachse der Walzen ist senkrecht zur Rohrachse, sind das Kontiwalzverfahren (kontinuierliches Walzverfahren, das Stopfenwalzverfahren, das Warmpilgerwalzverfahren und das Stoßbankverfahren. Schrägwalzverfahren, d. h. die Drehachse der Walzen ist nahezu parallel zur Rohrachse, sind das Asselwalzverfahren und das Aufweitewalzverfahren.

Im Kontiwalzverfahren durchläuft der Hohlblock mit einem Innenwerkzeug (Dornstange) mehrere hintereinander angeordnete, angetriebene und jeweils um 90° gedrehte 2-Walzen-Gerüste, die zusammen mit dem Innenwerkzeug den Hohlblock auf das gewünschte Maß bringen (s. Abb. 3.9).

Beim Stopfenwalzverfahren wird der Hohlblock mit den Arbeitswalzen über Walzstopfen am Ende einer Dornstange mit einem oder mehreren Stichen gewalzt. Bei mehr als einem Stich (Walzvorgang) wird der Hohlblock nach dem ersten Stich mit den Rückholwalzen zurückgeholt, ein neuer Walzstopfen auf das Ende der Dornstange aufgesetzt und der Walzvorgang wiederholt (s. Abb. 3.10 links).

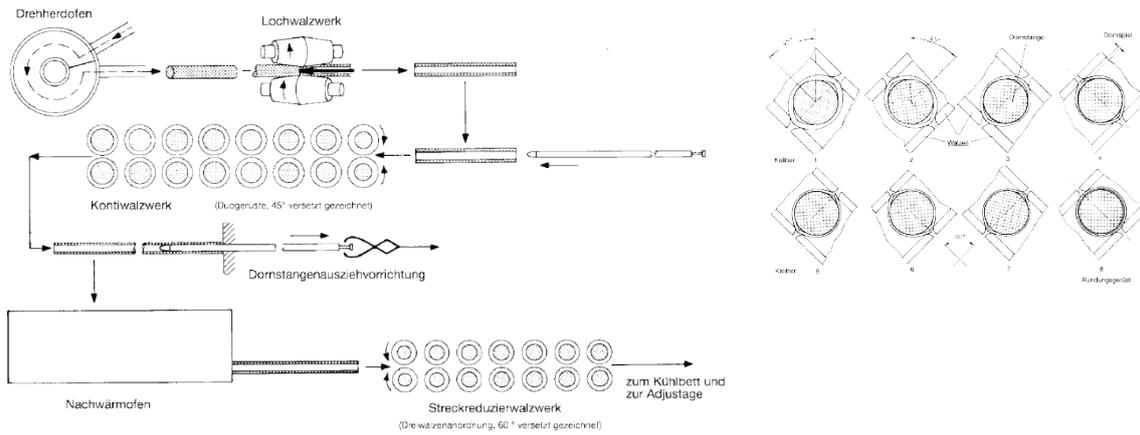


Abb. 3.9 Schema einer Rohrkornwalzstraße (links) und Anordnung der Walzen (rechts) /BRE 19/

Das Warmpilgerwalzverfahren nutzt besonders geformte Pilgerwalzen und einen speziell geformten Dorn als Innenwerkzeug, um in einer wechselnden Vorwärts- und Rückwärtsbewegung von Pilgerwalzen und Hohlblock diesen auf das gewünschte Maß auszuwalzen (s. Abb. 3.10 rechts).

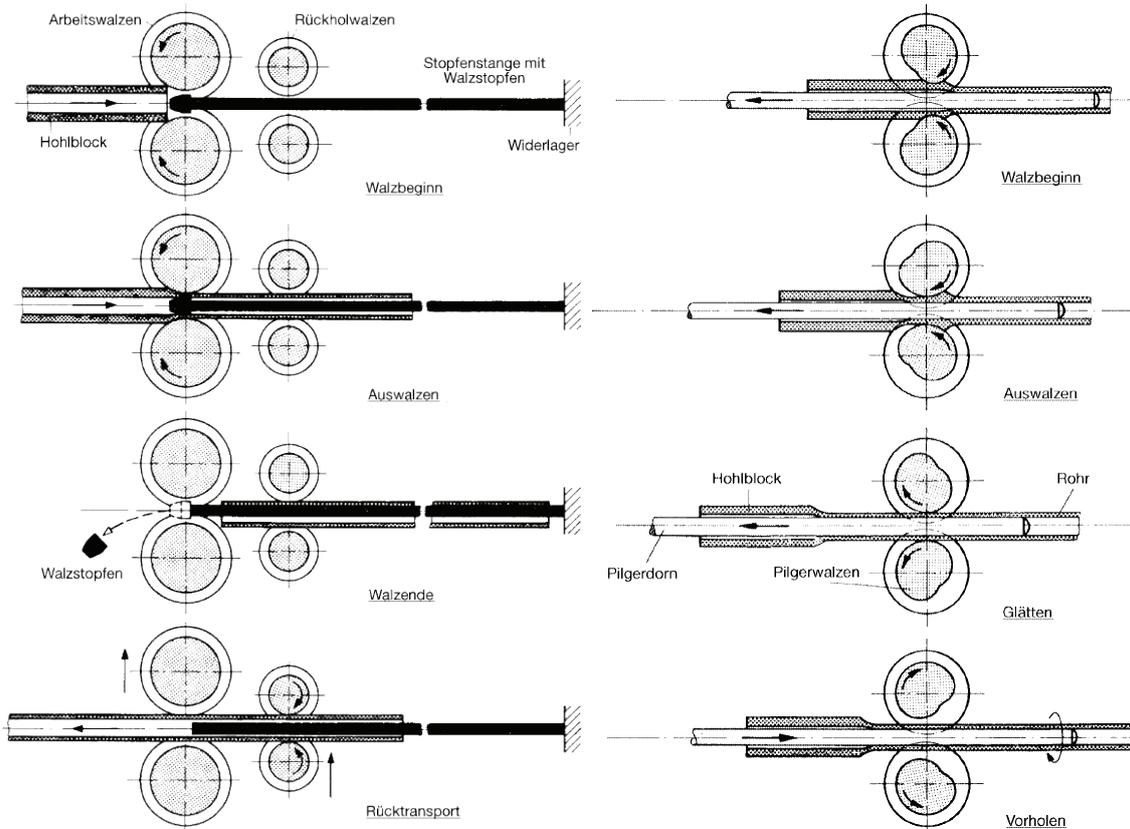


Abb. 3.10 Schema des Stopfenwalzens (links) und des Pilgerwalzens (rechts) /BRE 19/

Beim Stoßbankverfahren wird der Hohlblock zusammen mit einer innen liegenden Dornstange, die den Innendurchmesser bestimmt, durch mehrere hintereinander angeordnete nicht angetriebene Walzgerüste gestoßen.

Beim Asselwalzverfahren sind drei kegelförmige Schrägwalzen um 120° versetzt um das Rohr angeordnet und ein Hohlblock wird mit einem Innenwerkzeug (Dornstange) von den Walzen auf die Endabmessung gewalzt und gleichzeitig vorgetrieben (s. Abb. 3.11).

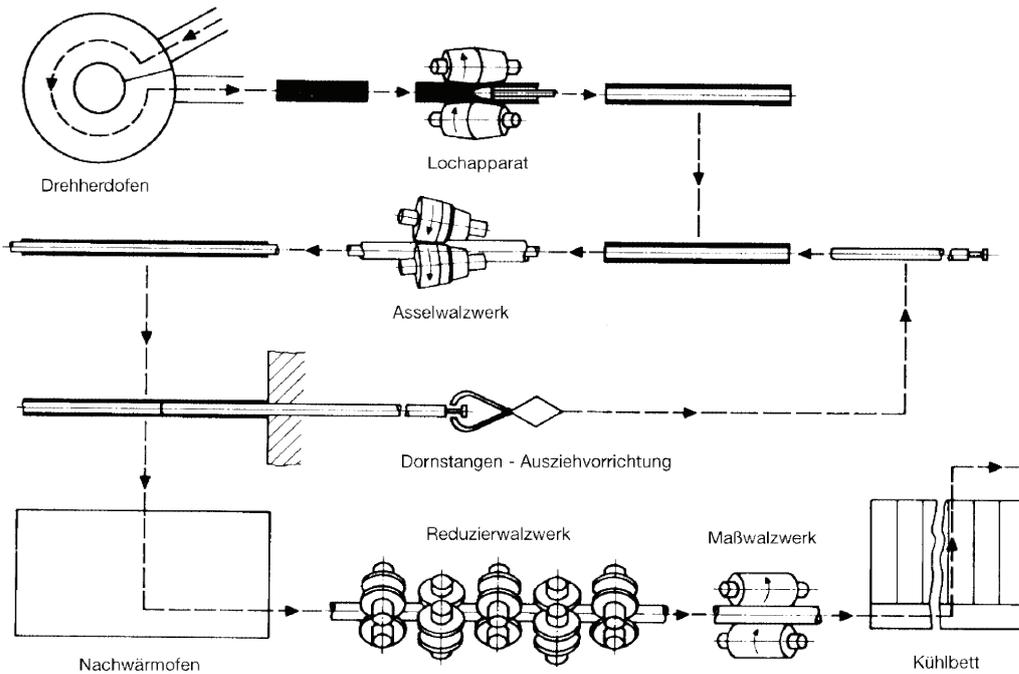


Abb. 3.11 Schema einer Asselwalzstraße /BRE 19/

Vergleichbar mit dem Stopfenwalzverfahren wird beim Aufweitewalzverfahren ein Rohr von kegelförmigen Schrägwalzen über einen Dorn, der größer als der Innendurchmesser des Rohres ist, gewalzt und dabei innen auf die Abmessungen der Dornstange aufgeweitet. Die Außenabmessungen und die Wanddicke des Rohres werden durch die Position der verstellbaren Schrägwalzen festgelegt.

An das Walzen schließt noch die Adjustage an. Dort finden verschiedene Prozesse statt, mit denen Rohre „veredelt“ werden können. Es kommen dabei Anlagen wie Richtmaschinen, Stauchpressen, verschiedene Schneidmaschinen, Rohrkalibrierpressen, eine Rohrvergütereier oder Rohrprüfpressen zum Einsatz. Hohe Toleranzanforderungen an Geradheit und Rundheit können im Richtprozess mit Schrägwalzen-Richtmaschinen erreicht werden. Zu den Bearbeitungsprozessen an Rohrenden gehören Fasen, Stauchen und Gewindeschneiden. Mit Rohrfasenmaschinen werden gerade und gratfreie Rohrenden

erzeugt. Rohre können zur Schweißvorbereitung angefast werden. Die Dichtheitsprüfung kann mit Rohrprüfpresen durchgeführt werden. Dazu werden die Rohre mit Wasser unter hohem Druck geprüft.

Neben den Walzverfahren zur Herstellung nahtloser Rohre existieren auch Schleudergussverfahren (s. Abschnitt 3.1.4) und Ziehverfahren bzw. Zieh-/Pressverfahren. Bei den Zieh-/Pressverfahren ist das Ausgangsmaterial ein Hohlblock, welcher noch nicht die Endabmessungen hat. Dieser wird in einer Ziehbank durch eine Matrize (Ziehring) gezogen, welche einen konischen Einlauf in die runde Öffnung aufweist und eine Abmessung kleiner als der Hohlblock hat. Je nach Prozessgestaltung kann das Ziehen in einem oder mehreren Schritten mit immer enger werdenden Ziehringen bis zur endgültigen Abmessung erfolgen. Varianten dieses Verfahrens sind der Stangenzug, mit einer im Rohr mitgeführten Stange mit der endgültigen Innenabmessung, oder das Ziehen über einen Stopfen im Inneren des Rohres, der sich unmittelbar vor der Matrize befindet und ebenfalls die endgültige Innenabmessung hat. Diese Verfahren sind besonders für kleinere Rohrabmessungen geeignet.

Beispiele für nahtlose Rohre in der druckführenden Umschließung von Kernkraftwerken sind die Hauptkühlmittelleitung (s. Abschnitt 6.1.1) und die Volumenausgleichsleitung (s. Abschnitt 6.1.2).

3.2.4 Kümpeln und Biegen

Zur Herstellung von Druckbehälterböden wurden neben geschmiedeten auch gekümpelte (d. h. gezogene) Böden verwendet. Das Kümpeln kann z. B. mit einer Kümpelpresse durchgeführt werden. Das Ausgangsmaterial ist hier ein entsprechend großes und dickes flaches Blech, welches dann in die gewünschte Form gebracht wird. Je nach Werkstoff wird das Blech kalt oder auch warm umgeformt. Es werden auch kombinierte Biege- und Kümpelpressen verwendet, die neben dem Kümpeln der Böden auch das Biegen der Halbschalen für Druckbehälter beherrschen /SCH 08/.

3.2.4.1 Herstellung von Rohrbögen

Glattrohrbögen können aus nahtlosem Rohr mittels Kalt- oder Warmbiegeverfahren oder aus geschweißtem Rohr hergestellt werden. Es gibt Ausführungen ohne und mit Schenkel (gerade verlaufende Rohrbogenenden).

Beim Kaltbiegeverfahren wird ein Rohr mittels Biegegesenk und Dorn kalt verformt. Dabei ist das Profil des Biegegesenkes dem Außendurchmesser des Rohrs angepasst und der Dorn dem Rohrinne Durchmesser. Ein Nachteil des Verfahrens ist die entstehende Unrundheit (Ovalität) des Querschnitts im Biegebereich. Je nach Material und Durchmesser werden die Bögen nach dem Umformen einer Wärmebehandlung unterzogen /WOS 98/.

Mittels eines Warmbiegeverfahrens, bei dem das Ausgangsrohr fest mit Sand gefüllt und ein Schenkel auf einer Biegeplatte (Stahlplatte großer Dicke) eingespannt wird, können Warmrohrbögen mit Schenkel gefertigt werden. Nachdem der Umformbereich auf Warmformgebungstemperatur gebracht wurde, wird an dem freien Schenkel gezogen, bis der geforderte Biegewinkel erreicht ist. Zur Steuerung von Biegewinkel und Biegeradius sind Begrenzungen auf der Biegeplatte befestigt, mit denen ein Gegendruck ausgeübt wird. Nach diesem Biegevorgang muss der fertige Rohrbogen noch von Zunder und angebackenem Biegesand befreit werden (z. B. durch Sandstrahlen). Es können die gleichen Toleranzen und Biegeradien erzielt werden wie beim Kaltbiegeverfahren. Durch die Füllung des Ausgangsrohrs mit Sand wird die Ovalität begrenzt und eine Bildung von Falten vermieden /WOS 98/.

Ein weiteres Warmbiegeverfahren ermöglicht die Herstellung von Anschweißbögen (ohne Schenkel). Dabei wird ein Rohr, das einen kleineren Außendurchmesser, aber eine größere Wanddicke besitzt als der gewünschte Rohrbogen, auf Warmformgebungstemperatur erwärmt (Gas- oder Induktionserwärmung). Anschließend wird es über einen konischen Dorn geschoben und auf den gewünschten Durchmesser aufgeweitet. Dabei wird auch der vorgesehene Biegeradius erreicht. So gefertigte Bögen haben verfahrensbedingt keine Schenkel. Sie werden auch als „Bitterfelder Bögen“ oder als „Hamburger Bögen“ bezeichnet. Nach dem Biegevorgang werden sie nachgerichtet. Dadurch wird eine Ovalität von unter 4 % erreicht. Es können modifizierte Verfahren eingesetzt werden, um eine begrenzte Wandverdickung während des Biegens zu erzeugen. Wenn erforderlich, kann eine Wandverdickung auch durch ein Auftragschweißen (s. Abschnitt 3.3.4) auf der Innenseite mit anschließendem Beschleifen erreicht werden /WOS 98/.

In einem dritten Warmbiegeverfahren, das für spezielle Zwecke verwendet wird, werden Gesenkbögen mit kleinen Biegeradien hergestellt. Sie werden im Gesenk, bestehend aus zwei symmetrischen Teilen, verpresst. Die Gesenkteile besitzen den geforderten Biegeradius und Außendurchmesser. Ein erwärmtes dickwandiges Ausgangsrohr wird

in die Öffnung zwischen den beiden vorher zusammengebauten Teilen eingebracht und nimmt die Kontur der Form an /WOS 98/.

Insbesondere für den Hochdruckbereich werden auch Induktiv-Rohrbiegemaschinen, welche beim Umformen immer nur einen schmalen Bereich des Rohrquerschnitts aufheizen, für die Herstellung von gekrümmten Rohren verwendet. Es können so Bögen mit Außendurchmessern von bis zu 1.400 mm und Wanddicken von bis zu 100 mm gefertigt werden. Die eingebrachte Wärmemenge ist abhängig von den Bogenabmessungen. Die Wandverschwächung und -verdickung sind durch die Steuerung der Biegegeschwindigkeit und örtlichen Abkühlung beeinflussbar /WOS 98/.

Neben der Herstellung von Rohrbögen durch Umformen werden geschweißte Rohrbögen u. a. aus Blechen hergestellt, die im Gesenk zu Halbschalen warm verpresst werden. Ebenso können Rohrbogen-Halbschalen mit Gießverfahren hergestellt werden (s. Abschnitt 3.1). Im Anschluss werden die Rohrbogen-Halbschalen mit einer Längsnaht verschweißt.

3.2.5 Fehler (-quellen) beim Umformen

Im Fertigungsprozess – beim Schmieden, Verformen und in der Rohrfertigung – können mechanische und metallurgische Kerben entstehen. Diese Fehler im Grundwerkstoff stellen Ausgangspunkte für spätere Schäden dar. Mechanische Kerben sind Trennungen oder Fehlstellen auf der Oberfläche oder im Inneren einer Rohrwandung. Sie treten in vielfältiger Form, als Überlappungen, Dopplungen, Schalen, Ungänzen, Zunderflecke, Walzsplitter, Riefen und Anrisse auf. Gerade Dopplungen, Überlappungen, Ungänzen und Riefen können bei ungünstiger Ausbildung als Rissstarter fungieren. Als metallurgische Kerben werden Unterschiede in den Werkstoffeigenschaften bezeichnet, die so groß sind, dass sie Auslöser für Betriebsschäden sein können. Sie können etwa durch Warmbrüchigkeit, Oberflächen-Aufkohlung bzw. -Entkohlung und Härteunterschiede hervorgerufen werden. Warmbrüchigkeit wird auf Verunreinigungen und nichtmetallische Einschlüsse an den Korngrenzen zurückgeführt. Oberflächenaufkohlungen treten z. B. beim Warmbiegen und Warmrichten von Rohren auf und können zu einer erheblichen Verschlechterung der Schweiß Eigenschaften und des Betriebsverhaltens des betroffenen Werkstoffs führen. Übermäßige Entkohlung der Oberfläche führt zu Kerbempfindlichkeit und Anfälligkeit gegenüber korrosiven Einflüssen. Härteunterschiede können beispielsweise beim Biegen und Walzen z. B. innerhalb einer Rohrwandung auftreten. In

Verbindung mit mechanischen und thermischen Wechselbelastungen können sie zu Risschäden führen /WOS 98/.

3.2.5.1 Fehler bei nahtlosen Rohren

Bei der Herstellung nahtloser Rohre kann es zu Fehlern wie Anrissen, nichtmetallischen Einschlüssen, Schalen an den Innen- und Außenflächen sowie Resten von Dopplungen kommen. Bei Rohren, die im Schleudergussverfahren hergestellt werden, können Gussfehler auftreten. Auch der Einfluss von Wärmebehandlungen muss beachtet werden. Starke Wärmespannungen können in der Rohrherstellung zu Längs- und Querrissen führen /SCH 15a/.

3.2.5.2 Fehler beim Biegen von Blechen

Bei der Herstellung von Biegeteilen aus Blechen können mehrere mögliche Fehler auftreten. Dazu gehören /BRO 15d/:

- Rissbildung
- Faltenbildung
- Aufwölbung an der Biegekante
- Biegewinkelfehler (Rückfederung)

3.2.5.3 Fehler beim Biegen von Rohren

Beim Biegen von Rohren kann es durch fehlerhaftes Biegen zu Querschnittsänderungen kommen. Durch eine Abflachung des Rohres verringern sich Durchflussquerschnitt und Belastbarkeit.

Beim Kaltbiegen von Rohren mit großen Wanddicken und kleinen Biegeradien können große Ovalitäten, übermäßige Wanddickenschwächungen, Beulungen und Falten entstehen. Diese bewirken Spannungserhöhungen im Rohrbogen und können zu Rissen sowie zu Spannungsrisskorrosion führen. Große Ovalitäten, Falten und Beulungen können ebenfalls beim Warmbiegen von Rohren mit großem Durchmesser und geringen Wanddicken entstehen. Bei der Herstellung von Reduzierungen mit großen Durchmesserunterschieden durch Warmhämmern kann eine Rissbildung an der Rohrrinnenseite verursacht werden /WOS 98/.

3.2.5.4 Eigenspannungen

Durch nahezu alle Fertigungsprozesse wird der Eigenspannungszustand eines Bauteils beeinflusst, so auch durch Umformverfahren. Ausschlaggebend sind jedoch die oberflächennahen Bereiche. Eigenspannungen können einen positiven oder negativen Einfluss auf die Bauteileigenschaften haben. Druckeigenspannungen in der Randschicht können den Widerstand gegen Spannungsrisskorrosion erhöhen, die Schwingfestigkeit sowie die Verschleißeigenschaften verbessern /SCH 15b/. Weiterhin können Eigenspannungen auch die Ursache für andere Schädigungsmechanismen wie z. B. Spannungsrisskorrosion sein.

3.2.5.5 Schäden durch Zunder

Durch die Oxidation der Oberfläche, beispielsweise aufgrund der hohen Erwärmungstemperaturen bei der Warmumformung von Stahlwerkstoffen, entsteht eine Zunderschicht. Das Entfernen dieser Schicht (Entzundern) verhindert die Bildung von Oberflächenfehlern am Schmiedebauteil. Das Entzundern kann generell durch Umformen (z. B. Anstauchen¹¹), durch Bürsten oder durch Hochdruck-Wasserstrahlen erfolgen. Eine Entzunderung durch Hochdruck-Wasserstrahlen erfolgt hauptsächlich bei Produkten mit hohem Einsatzgewicht /HER 13/.

3.2.5.6 Fehlerquellen beim Walzen

Beim Walzen haben die Form, Ausbildung und Qualität der Walzen eine große Bedeutung, da die Walzen einen direkten Einfluss auf die Maßgenauigkeit und Oberflächenbildung des Erzeugnisses haben /DEG 09/. Eine Fehlerquelle beim Walzen ist daher der Verschleiß von Arbeitswalzen¹² (thermische Belastung, Abrasion, Oxidation) /REI 06/. Neben dem betrieblichen Verschleiß kann es auch zu anderen Schäden (z. B. Ausbrüchen und Wärmerissen) kommen. Als Gegenmaßnahme werden die Walzen gekühlt /DEG 09/. Sie können bei Bedarf auch ausgebaut und geschliffen werden /REI 06/.

¹¹ Beim Anstauchen wird das Vorprodukt geringfügig verformt und die spröde Zunderschicht platzt ab.

¹² Die Arbeitswalzen stehen direkt mit dem Walzgut in Kontakt. Ihre Durchbiegung soll von den Stützwalzen weitestgehend verhindert werden.

Bei den Kaltumformverfahren (z. B. Kaltwalzen, Kaltbiegen) kommt es zwingendermaßen zu einer Verfestigung des Werkstoffes, welche durch eine passende Wärmebehandlung (s. Abschnitt 3.4.1.4 Rekristallisationsglühen) behoben werden kann /BLE 10/.

3.3 Schweißverfahren

Es existiert eine Vielzahl an Schweißverfahren. Diese lassen sich nach verschiedenen Kriterien einteilen. Dazu gehören der Zweck der Schweißung (z. B. Verbindungsschweißen, Plattieren), die Art des Energieträgers (z. B. Gas, Strom), die Art des Grundwerkstoffes (z. B. Metalle, Kunststoffe), der physikalische Ablauf des Schweißens und der Grad der Mechanisierung (z. B. Handschweißen, automatisches Schweißen). In der Praxis ist es jedoch üblich, die Schweißverfahren nach dem Ablauf einzuteilen. So unterscheidet man zwischen dem Pressschweißen, welches bei Primärkreis-Komponenten für LWR nicht eingesetzt wird, und dem Schmelzschweißen. Im Gegensatz zum Pressschweißen erfolgt das Fügen beim Schmelzschweißen ohne Aufbringung einer Kraft. Die Teilprozesse Umschmelzen von Grundwerkstoff, Aufschmelzen des Grundwerkstoffes, Verbinden sowie Erstarren von Grundwerkstoff und Zusatzwerkstoff laufen beim Schmelzschweißen gleichzeitig ab /BLE 12/.

In KTA 3201.3 /KTA 17b/ sind Anforderungen an Schweißarbeiten von der Vorbereitung bis hin zur Durchführung von Prüfungen enthalten (s. Abschnitt 5.1.4).

3.3.1 Aufbau einer Schweißverbindung

Der Aufbau einer Schweißverbindung besteht aus der Schweißnaht, der Wärmeeinflusszone (WEZ) und dem unbeeinflussten Grundwerkstoff. Als WEZ wird der Bereich bezeichnet, in dem der Grundwerkstoff zwar nicht aufgeschmolzen wurde, in dem es jedoch aufgrund der eingebrachten Energie zu thermischen Gefügeänderungen gekommen ist. In der Schweißnaht sind die Werkstücke am sogenannten Schweißstoß vereinigt. Handelt es sich um eine Pressschweißverbindung, so besteht die Schweißnaht aus dem Grundwerkstoff. Dessen Zusammensetzung kann jedoch aufgrund des Abdampfens von Legierungselementen verändert sein. Bei einer Schmelzschweißverbindung besteht die Naht aus dem Schweißzusatzwerkstoff. In diesem Fall kann die Zusammensetzung durch Auflegieren mit dem Grundwerkstoff abweichen /BLE 12/. Abb. 3.12 zeigt eine schematische Darstellung einer Schweißverbindung. Zu sehen sind

die verschiedenen Lagen der Schweißnaht sowie die daran anschließende Wärmeeinflusszone und der unbeeinflusste Grundwerkstoff.

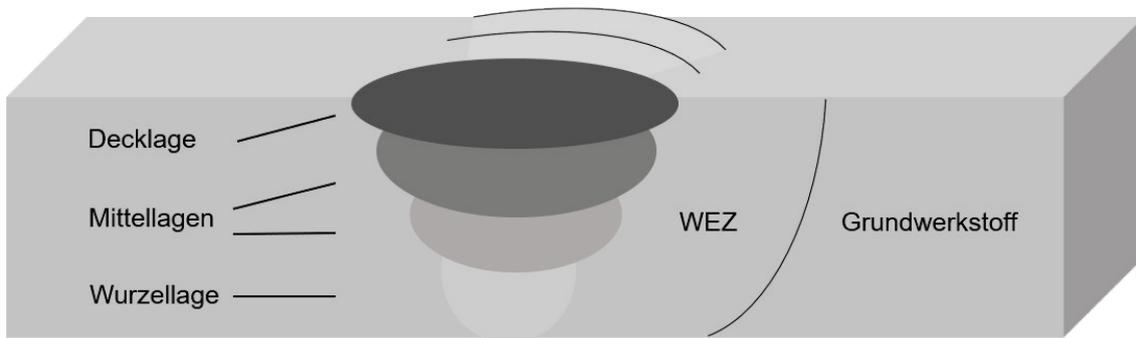


Abb. 3.12 Schematische Darstellung einer Schmelzschweißverbindung nach /BLE 12/

Die WEZ kann in die folgenden unterschiedlichen Zonen unterteilt werden:

- Zone des unvollständigen Schmelzens
- Überhitzungszone (Grobkornzone)
- Normalisierungszone (Feinkornzone)
- Zone des teilweisen Umkristallisierens
- Anlasszone

3.3.2 Schweißnahtvorbereitung

Ein wichtiger Schritt zu Beginn des Schweißens ist die Schweißnahtvorbereitung. Sie soll die Fehlerfreiheit der Fügeteile über den gesamten Querschnitt sicherstellen. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Qualität der Schnittoberflächen des Werkstücks in Hinblick auf Rissfreiheit, Aufhärtung und Reinheit. Es ist auch zu beachten, dass der Öffnungswinkel groß genug ist, sodass auch die Wurzellage (s. Abb. 3.12) mit dem Ansatzpunkt des Schweißlichtbogens am Werkstück sicher erreicht werden kann. Auch die Zugänglichkeit für den Lagenaufbau muss gegeben sein. Insbesondere bei automatisierter oder vollmechanisierter Schweißung müssen geometrische Toleranzen eingehalten werden.

Wurden thermische Trennverfahren genutzt, um die zu schweißenden Halbzeuge herzustellen, muss eine möglicherweise unzulässige Aufhärtung auf und neben den Schnittflächen beachtet werden. Diese können eine Rissbildung begünstigen (z. B. unter schwingender Beanspruchung oder bei Kaltumformung), sofern sie beim Schweißen

nicht mehr aufgeschmolzen werden. Diese Bereiche können entfernt werden, wenn das Werkstück groß genug ist. Alternativ wird eine Vorwärmung beim Trennen durchgeführt, um diesen Effekt zu vermeiden. Übliche Temperaturen für die Vorwärmung liegen zwischen 100 °C und 200 °C. Die vorgegebene Temperatur muss dabei über die gesamte Materialdicke und eine bestimmte Breite beidseitig der Schnittfuge eingehalten werden /REI 17/.

3.3.3 Schmelzschweißverfahren

Dem Schmelzschweißen sind u. a. die Lichtbogenschmelzverfahren zugeordnet /BLE 12/. Zu den Lichtbogenschweißverfahren gehören z. B. das Metall-Schutzgasschweißen (MSG), das Wolfram-Inertgasschweißen (WIG), das Unterpulverschweißen (UP) und das Lichtbogenhandschweißen (E-Hand). Auch die Strahlschweißverfahren zählen zum Schmelzschweißen. Zu diesen gehören u. a. das Laserstrahlschweißen und das Elektronenstrahlschweißen. Beim MSG-Verfahren wird mit einem abschmelzenden Schweißdraht gearbeitet, der maschinell nachgeführt wird. Es wird zwischen Metall-Inert-Gas (MIG) und Metall-Aktiv-Gas (MAG) unterschieden. Durch das verwendete Gas, z. B. Argon, wird die flüssige Schmelze unter dem Lichtbogen vor Oxidation geschützt. Beim MAG-Verfahren verbessert das Aktivgas, beispielsweise Kohlenstoffdioxid, die Wärmeabfuhr und gleichzeitig wird das Schweißgut mit Kohlenstoff angereichert. Beim WIG-Verfahren wird eine nicht abbrennende Elektrode aus Wolfram verwendet. Der Zusatzwerkstoff wird manuell zugeführt und in der Hitze des Lichtbogens aufgeschmolzen. Das Verfahren ist zur Herstellung von Schweißnähten sehr hoher Güte geeignet. Die Abschmelzleistungen und die Schweißgeschwindigkeit sind gering. Beim UP-Verfahren handelt es sich um ein vollmechanisches Schweißverfahren, das industriell zum Schweißen von langen Nähten, beispielsweise bei der Herstellung von Rohren, angewendet wird. Dabei bedeckt eine Schicht aus mineralischem Schweißpulver das Schweißgut. Während des Schweißens wird diese aufgeschmolzen und schwimmt auf dem Schmelzbad. Auch mit diesem Verfahren kann eine hohe Schweißqualität erzielt werden. Eine Variante des Verfahrens ist das Unterpulverauftragsschweißen, bei dem mit Hilfe des zugeführten Pulvers eine Oberflächenbeschichtung erfolgt. Das Lichtbogenhandschweißen wird häufig auf Baustellen eingesetzt, da eine recht einfache Schweißausrüstung benötigt wird. Das Verfahren zeichnet sich zudem durch eine hohe Verfahrenssicherheit aus. Bei dem Verfahren schließt ein Lichtbogen den Stromkreis zwischen Werkstück und Elektrode, wobei die Elektrode abbrennt und ihre Umhüllung die benötigte Schutzatmosphäre liefert (Schutzgas). Die verbleibende Schlacke wird

nach dem Schweißen von der Naht entfernt, denn sie ist nicht überschweißbar. Ein unvollständiges Entfernen führt zu Schlackeeinschlüssen, welche nicht zulässig sind /BLE 12/.

3.3.4 Auftragschweißen

Verschiedene Arten des Auftragschweißens finden sich in KTA 3201.3 /KTA 17b/. Dazu gehören das Schweißpanzern, das Schweißplattieren, das Puffern und das formgebende Schweißen. Beim Schweißpanzern handelt es sich um ein Auftragschweißen von Panzerungen mit einem gegenüber dem Grundwerkstoff artfremden, vorzugsweise verschleißfesteren Auftragwerkstoff. Das Schweißplattieren ist ein Auftragschweißen von Plattierungen mit einem gegenüber dem Grundwerkstoff artfremden, vorzugsweise chemisch beständigeren Auftragwerkstoff. Beim Puffern handelt es sich um ein Auftragschweißen von Pufferschichten (Zwischenschicht zwischen der eigentlichen Schweißnaht und dem Grundwerkstoff), wodurch eine beanspruchungsgerechte Verbindung zwischen artfremden Werkstoffen erzielt werden soll. Das formgebende Schweißen ist ein Auftragschweißen zur Herstellung der endgültigen Form eines Werkstücks. Dabei ist der Auftragwerkstoff nicht artfremd gegenüber dem Grundwerkstoff.

3.3.5 Geschweißte Stahlrohre

Bei der Fertigung längsnahtgeschweißter Rohre wird zunächst ein Blech oder Band zu einem Schlitzrohr eingeformt. Dies kann über Pressen, kontinuierlich oder auf einer 3-Walzen-Biegemaschine erfolgen. Im Anschluss wird es zum Rohr verschweißt und ggf. durch Streckreduzieren auf die gewünschten Abmessungen gebracht. Es können sich die Vorgänge Richten und Ablängen anschließen /DEG 09/. Ein bewährtes Verfahren zum Schweißen ist hier das Unterpulver-Schweißverfahren (s. Abschnitt 3.3.3). In der DFU noch in Betrieb befindlicher deutscher Kernkraftwerke wurden keine längsnahtgeschweißten Rohre verwendet.

3.3.6 Fehler (-quellen) beim Schweißen

Bei der Herstellung von Schweißnähten können Unregelmäßigkeiten auftreten, die bei der Überschreitung vorgegebener Toleranzen in Qualität oder Quantität als Schweiß-

nahtfehler (auch Schweißfehler) bezeichnet werden. Diese sind aus der Betriebserfahrung hinlänglich bekannt und zählen neben Korrosion und Ermüdung zu den drei Hauptursachen für Risse und Leckagen an Rohrleitungen des Reaktorkühlkreislaufs und damit verbundenen Leitungen. Zu einem großen Teil handelt es sich um Schweißfehler, aber auch um Fehler im Zusammenhang mit Abweichungen von der Herstellungsdocumentation bei der Wärmebehandlung im Anschluss an das Schweißen /BAL 14/. Schweißfehler können in verschiedensten Formen mit unterschiedlichen Ursachen auftreten. Der Werkstoff wird durch den Schweißprozess einer starken thermisch-mechanischen Beeinflussung unterworfen, wodurch es zu starken Veränderungen des Gefüges und der Werkstoffeigenschaften im Bereich der Schweißnaht kommt /LAN 92/. Dabei können im Gefüge einer Schweißnaht zahlreiche Änderungen (Unregelmäßigkeiten) auftreten, wie sie teilweise auch schon von den Gießverfahren bekannt sind, ohne dass es zu einem sichtbaren Schweißfehler kommt. Dazu gehören im Schweißgut z. B. die Bildung eines inhomogenen Gefüges, Seigerungen, Ausscheidungsvorgänge, Zwangslösung von Begleitelementen und in der Wärmeeinflusszone z. B. Kornwachstum, Phasenumwandlungen und Festigkeitsänderungen.

Bei der Prozessführung sind mehrere Parameter zu beachten und anzupassen, wie z. B. Schweißleistung, Schweißgeschwindigkeit, Lichtbogenlänge, Schutzgasabdeckung und Zusatzwerkstoff, um ein optimales Ergebnis zu erzielen /REI 17/. Dementsprechend gibt es hier unterschiedliche Fehlerquellen durch Abweichungen von den Parametern.

Es kann beim Schweißen grundsätzlich zwischen prozessbedingten und werkstoffverursachten Fehlern unterschieden werden. Die prozessbedingten Fehler lassen sich wiederum in äußere Nahtfehler, wie Einbrandkerben, Kantenversatz, Spritzer und Zündstellen sowie innere Nahtfehler wie Bindefehler, Schlackeeinschlüsse und Poren unterteilen. Zu den werkstoffverursachten Schweißfehlern gehören Heißrisse und Kaltrisse. Zu den Heißrissen zählen Wiederaufschmelzungsrisse, Erstarrungsrisse und Risse durch Zähigkeitsabfall. Zu den Kaltrissen zählen Wasserstoffrisse, Aufhärtungsrisse, Lamellenrisse und Ausscheidungsrisse /BRE 13/. Zu den Ursachen für Risse in Schweißverbindungen können auch Konstruktionsfehler zählen /LAN 92/.

Kalt- und Härterisse in der Wärmeeinflusszone können auch prozessbedingt sein, wenn eine ungenügend durchgeführte oder unterlassene Vorwärmung beim Schweißen vorliegt. Durch das Vorwärmen wird die kritische Abkühlgeschwindigkeit herabgesetzt und somit, insbesondere bei niedriglegierten Stählen, eine Rissbildung vermieden.

Formfehler wie schroffe Nahtübergänge, Wurzelkerben und starke Nahtüberhöhungen stellen konstruktive Steifigkeitssprünge dar und bewirken Änderungen des Kraftflusses. Aufgrund hoher Form- und Kerbwirkungszahlen führen sie zu Spannungsspitzen an diesen Stellen /LAN 92/.

Geometrische Unregelmäßigkeiten in Schweißnähten können bereits mit Hilfe einer Sichtprüfung erkannt werden. Dazu gehören z. B. Über- und Untermaß der Nahtlänge oder -dicke, Einbrandkerben und Wurzelfehler. Zur Oberfläche hin offene Risse in der Wärmeeinflusszone oder im Schweißgut können mit einer Farbeindringprüfung erkannt werden. Es können auch oberflächennahe geschlossene Risse auftreten, die mittels Magnetpulverprüfung festgestellt werden können /REI 17/.

Zur Vorbeugung von Problemen bei der Schweißnahtherstellung gibt es entsprechende Festlegungen in Abschnitt 5.5 der KTA 3201.3 /KTA 17b/. Dies beinhaltet z. B. die Aufbewahrung von Stabelektroden in geeigneten Warmhaltevorrichtungen, das Vorgehen bei Abweichungen von den im Geltungsbereich der Verfahrensprüfung festgelegten Schweißbedingungen (dazu gehören auch Änderungen der Wärmebehandlung), die Einhaltung des vorgegebenen Temperaturbereiches, die Überwachung der Schweißdaten, den Umgang mit Zündstellen, die Ausführung von Heftschweißungen und Vorgaben für Anschweißteile an die DFU. Bei der Herstellung austenitischer Schweißnähte soll eine möglichst geringe Wärmeeinbringung erfolgen. Ein Wasserstoffarmglühen soll, wenn erforderlich, aus der Schweißwärme heraus vorgenommen werden. Die Messung der Vorwärmtemperatur und der Zwischenlagentemperatur muss an festgelegten Punkten erfolgen. Während der Schweißarbeiten sind Schweißprotokolle zu führen. In Tab. 3.1 ist eine Übersicht mit Beispielen für Schweißfehler und mögliche Ursachen wiedergegebenen.

Tab. 3.1 Beispiele für Schweißfehler und deren Ursachen /SCH 15b/, /DVS 18/, /HUS 11/, /BLE 12/, /REI 17/

Unregelmäßigkeit/ Fehler	Mögliche Ursachen	Unregelmäßigkeit/ Fehler	Mögliche Ursachen
Heißrisse	<ul style="list-style-type: none"> – Niedrig schmelzende Substanzen an den Korngrenzen – Erstarrungsrisse: Zugbeanspruchung auf Restschmelzen – Wiederaufschmelzungsrisse: Zugbeanspruchung auf geseigerte Zonen mit geringem Schmelzpunkt – Risse durch Zähigkeitsabfall: Zugbeanspruchung auf versprödete Zonen 	Kaltrisse	<ul style="list-style-type: none"> – Wasserstoff (z. B. durch Verwendung nicht getrockneter Elektroden) – Reinheitsgrad – Ausscheidungen – Alterungsprozesse – Lamellenrisse: Gefügezeitigkeit nach dem Walzen – Aufhärtungsrisse: Bildung von Martensit durch schnelle Abkühlung
Weitere Risse	<ul style="list-style-type: none"> – Ungeeigneter Schweißzusatz – Feuchtigkeit in Schutzgas, Pulver oder umhüllten Stabelektroden – Grundwerkstoff nur bedingt oder nicht schweißgeeignet unter vorliegenden Bedingungen (z. B. zu hoher Gehalt an S, C oder P) – Schrumpfbehinderung – Überhitzung – Bei Unterbrechung geschweißter Querschnitt zu klein – Nichtbeachten der Umgebungstemperatur – Zu hohe Abkühlgeschwindigkeit – Eigenspannungen 	Feste Einschlüsse (Schlacken, Oxide, Flussmittel)	<ul style="list-style-type: none"> – Zu geringe Stromstärke – Unzureichende Zwischenlagen-Reinigung – Unzureichende Spülwirkung des Umhüllungstyps von Stabelektroden oder Schweißpulvertyp – Zu große Überwölbung der zuvor geschweißten Raupe – Reaktion der Schweißstabspitze oder des Drahtelektrodenendes mit Luftsauerstoff

Unregelmäßigkeit/ Fehler	Mögliche Ursachen	Unregelmäßigkeit/ Fehler	Mögliche Ursachen
Lunker	<ul style="list-style-type: none"> – Zu hohe Schrumpfkkräfte – Verunreinigter Grundwerkstoff – Zu hohe Abkühlgeschwindigkeit 	Gaseinschlüsse	<ul style="list-style-type: none"> – Verschmutzungen im Schweißbereich – Unzureichende Abdeckung des Schmelzbads mit Schutzgas
Poren	<ul style="list-style-type: none"> – Schweißzusatz oder Schweißhilfsstoffe unsauber – Schweißzusatz ungeeignet – Falsche Schutzgaszusammensetzung oder Schutzgasmenge – Schutzgasglocke durch Zugluft beeinträchtigt – Defekte oder unsaubere Schutzgasdüse des Brenners – Lichtbogen zu lang – Abstand zwischen Werkstück und Brennerdüse zu groß – Schweißgut überhitzt 	Schweißspritzer	<ul style="list-style-type: none"> – Falsches Gas – Falscher Schweißzusatz – Falsches Verfahren – Falsche Schweißparameter (z. B. zu langer Lichtbogen) – Magnetische Blaswirkung
Poröse Bindung	<ul style="list-style-type: none"> – Keine ausreichende Abdeckung mit Schutzgas – Verunreinigte oder feuchte Schweißstelle – Störend beschichtete Schweißstelle 	Bindefehler	<ul style="list-style-type: none"> – Schlechte oder falsche Nahtvorbereitung, Brennerneigung oder -anstellung nicht richtig – Nicht angepasste Abschmelzleistung und Schweißgeschwindigkeit – Nicht ausreichende Stromstärke – Blaswirkung
Decklagenunterwölbung	<ul style="list-style-type: none"> – Zu große Lichtbogenlänge – Falscher Nahtaufbau – Zu große Schutzgasmenge – Zu hohe Stromstärke – Zu große Schweißgeschwindigkeit 	Zu große Nahtüberhöhung	<ul style="list-style-type: none"> – Falscher Nahtaufbau – Zu geringe Schweißgeschwindigkeit – Falsche Raupenfolge in der Decklage – Zu geringe Spannung beim MSG- und UP-Schweißen

Unregelmäßigkeit/ Fehler	Mögliche Ursachen	Unregelmäßigkeit/ Fehler	Mögliche Ursachen
Ungenügende Durchschweißung	<ul style="list-style-type: none"> – Zu geringe Wärmeeinbringung – Falsche Brenneranstellung 	Nicht erfasste Wurzel	<ul style="list-style-type: none"> – Nahtvorbereitung falsch oder schlecht – Nicht angepasste Stromstärke – Beim Lage-/Gegenlage-Schweißen Versatz der beiden Schweißbäder
Wurzeldurchschweißfehler	<ul style="list-style-type: none"> – Brennerneigung oder -anstellung nicht richtig – Nicht angepasste Abschmelzleistung und Schweißgeschwindigkeit – Nicht ausreichende Stromstärke – Blaswirkung – Zu große Lichtbogenlänge 	Wurzelbindefehler	<ul style="list-style-type: none"> – Schlechte oder falsche Nahtvorbereitung, Brennerneigung oder -anstellung nicht richtig – Nicht angepasste Abschmelzleistung und Schweißgeschwindigkeit – Nicht ausreichende Stromstärke – Blaswirkung – Zu große Lichtbogenlänge
Wurzelrückfall	<ul style="list-style-type: none"> – Zu hohe Schweißgeschwindigkeit – Zu geringer Stegabstand – Heftstelle mit Wurzelrückfall nicht aufgeschmolzen – Schweißzusatz nicht durchgedrückt 	Zu große Wurzelüberhöhung	<ul style="list-style-type: none"> – Zu großer Stegabstand – Zu hohe Stromstärke – Zu geringe Schweißgeschwindigkeit in der Wurzelraupe – Zu großer Schweißeinsetz beim Gas-schmelzschweißen – Schweißstabklasse ungeeignet
Nahtversatz	<ul style="list-style-type: none"> – Falsch eingestellte oder durchgeführte Führung beim Schweißen 	Kantenversatz	<ul style="list-style-type: none"> – Unzureichendes oder falsches Einspannen der Werkstücke – Mangelhafte Heftung der Werkstücke
Lagenversatz	<ul style="list-style-type: none"> – Falsch eingestellter oder durchgeführter Versatz zwischen den Lagen 	Winkerversatz	<ul style="list-style-type: none"> – Unzureichendes oder falsches Einspannen der Werkstücke – Mangelhafte Heftung der Werkstücke

Unregelmäßigkeit/ Fehler	Mögliche Ursachen	Unregelmäßigkeit/ Fehler	Mögliche Ursachen
Schweißverzug	<ul style="list-style-type: none"> – Ungenügende Vorwärmung – Unzureichendes Verspannen 	Ungleichmäßiger Schweißspalt	<ul style="list-style-type: none"> – Schlechte oder falsche Nahtvorbereitung – Unzureichendes oder falsches Einspannen der Werkstücke – Mangelhafte Heftung der Werkstücke
Eigenspannungen	<ul style="list-style-type: none"> – Schrumpfungsbehinderung – Phasenumwandlung 	Wasserstoffversprödung	<ul style="list-style-type: none"> – Falsch gelagerte Schweißelektroden – Ungünstige Umgebungsbedingungen (Luftfeuchtigkeit) – Verunreinigte oder feuchte Schweißstelle
Einbrandkerben	<ul style="list-style-type: none"> – Zu große Lichtbogenlänge – Zu hohe Stromstärke – Einseitige Lichtbogenführung 	Schmelzstelle (Zündstelle)	<ul style="list-style-type: none"> – Kontaktieren der Elektrode mit der Werkstückoberfläche – Lichtbogenüberschläge aufgrund von unzureichend kontaktiertem Masseanschluss

Im Folgenden werden einige Schweißfehler ausführlicher behandelt.

3.3.6.1 Risse aufgrund von Schrumpfung und Eigenspannungen

Können die durch eine Schweißung miteinander verbundenen Teile der bei der Abkühlung stattfindenden Schrumpfung nicht folgen, so geraten sie unter hohe Zugspannungen. Im Extremfall kann dies zum Aufreißen führen. Die Höhe der Spannungen ist abhängig von den Schweißparametern, der Steifigkeit der Konstruktion und der Nahtgeometrie. Die Spannungen sind insbesondere bei unsymmetrischen Nähten, beispielsweise bei der häufig anzutreffenden V-Naht, unsymmetrisch zur Blechdicke. So können sich zusätzlich Spannungen über die Blechdicke ausbilden, denn die Umwandlungen laufen nicht gleichzeitig über den Querschnitt ab /BLE 12/.

3.3.6.2 Heißrisse

Bei der Abkühlung der Schweißnaht können am Übergang flüssig-fest Materialtrennungen auftreten, die als Heißrisse bezeichnet werden. Sie verlaufen entlang der Korngrenzen, also interkristallin (interdendritisch). Häufig können sie mit niedrig schmelzenden Substanzen an den Korngrenzen in Verbindung gebracht werden. Es wird zwischen Erstarrungsrisse und Wiederaufschmelzungsrisse unterschieden. Erstarrungsrisse treten im Schweißgut aufgrund von Zugbeanspruchung auf die Restschmelze auf, während Wiederaufschmelzungsrisse im Schweißgut von Mehrlagenschweißungen oder in der WEZ des Grundwerkstoffs zu finden sind und sich aufgrund von Zugbeanspruchung auf geseigerte Zonen mit geringem Schmelzpunkt ausbilden. Das Auftreten von Heißrisse kann durch kleine und flache Schmelzbäder sowie die Begrenzung von Schwefel- und Phosphorgehalten im Stahl vermieden werden /REI 17/, /BRE 13/. Zu den Arten von Heißrisse gehören auch Risse durch Zähigkeitsabfall (auch: Verformbarkeitsabfall). Diese entstehen aufgrund von Zugbeanspruchung auf versprödete Zonen und liegen in der WEZ oder unmittelbar daneben /BRE 13/, /HUS 11/.

3.3.6.3 Kaltrisse

Im erkalteten Zustand der Schweißnaht auftretende Werkstofftrennungen werden als Kaltrisse bezeichnet /REI 17/. Sie können aber auch bereits während der letzten Phase

der Abkühlung entstehen. Das Auftreten von Kaltrissen kann verschiedene Ursachen haben. Sie können beispielsweise durch Wasserstoff verursacht werden („Wasserstoffrisse“), der z. B. aus bei der Lagerung von Schweißelektroden aufgenommenen Feuchtigkeit stammt (s. auch „Forschungen zum Wasserstoffeinfluss auf das Verhalten von Konstruktionswerkstoffen in Kernkraftwerken – GRS-578“ /FAU 20/). Daher werden die Elektroden üblicherweise gemäß den Herstellerangaben getrocknet. Um die Kaltrissbildung zu vermeiden, kann das Werkstück direkt nach dem Schweißen bei ca. 250 °C gegläut werden. So kann der aufgenommene Wasserstoff wieder entweichen. Bei Schweißkonstruktionen, die unter hohen Spannungen stehen, kann als zusätzliche Maßnahme die Verwendung von Stabelektroden vermieden werden, deren Umhüllungsbestandteile viel Wasser enthalten oder während des Schweißens Wasserstoff freisetzen /BLE 12/, /BRE 13/.

Ausscheidungen und Alterungsprozesse können ebenfalls zur Kaltrissbildung führen. Diese können auch während einer Anlassbehandlung auftreten. Infolgedessen können beim Erwärmen zum Spannungsarmglühen Risse auftreten. Eine Verbesserung bezüglich der Kaltrissempfindlichkeit ergibt sich bspw. durch einen niedrigeren Schwefelgehalt (höherer Reinheitsgrad) und durch eine Verringerung der maximalen Härte in der Wärmeeinflusszone (Vorwärmung) /BLE 12/.

Lamellenrisse treten bei Blechen aufgrund der Gefügezeitigkeit nach dem Walzen auf und verlaufen parallel zur Oberfläche im Grundwerkstoff oder in der WEZ. Aufhärtungsrisse bilden sich infolge einer schnellen Abkühlung und der damit verbundenen Aufhärtung (Bildung von Martensit) und reduzierten Verformbarkeit. Kerbwirkungen und Eigenspannungen begünstigen ihre Entstehung /BRE 13/.

3.3.6.4 Feste Einschlüsse und Gaseinschlüsse

Wie bereits in Abschnitt 3.3 am Beispiel des Lichtbogenhandschweißens erwähnt, können sich bei unzureichendem Entfernen der Schlacke Schlackeeinschlüsse bilden, die einen großen Einfluss auf die Qualität der Schweißnaht haben /BLE 12/. Daher ist auch eine ausreichende Zwischenlagenreinigung zu beachten. Weitere Ursachen für feste Einschlüsse, neben Schlacken auch Oxide und Flussmittel, sind eine zu geringe Stromstärke, eine unzureichende Spülwirkung des Umhüllungstyps von Stabelektroden oder Schweißpulvertyp, eine zu große Überwölbung der zuvor geschweißten Raupe und eine Reaktion der Schweißstabspitze oder des Drahtelektrodenendes mit Luftsauerstoff

/DVS 18/. Auch Gaseinschlüsse (Poren) können in Schweißverbindungen auftreten. Die Ursache dafür sind meistens Verschmutzungen im Schweißbereich (z. B. durch Öle) oder eine unzureichende Abdeckung des Schmelzbads mit Schutzgas /REI 17/.

3.3.6.5 Wurzelfehler

Eine ungünstige Wahl bei den einzelnen Prozessparametern der verschiedenen Schweißverfahren kann zu unterschiedlichen Wurzelfehlern führen.

Eine nicht angepasste Stromstärke, ein Versatz der beiden Schweißbäder beim Lage-/Gegenlage-Schweißen oder eine zu hohe Schweißspannung kann bei bestimmten Prozessführungen ebenso wie eine schlechte oder falsche Nahtvorbereitung zu einer nicht erfassten Wurzel führen /DVS 18/.

Bei ungünstiger Wahl des Stegabstandes oder der Schweißgeschwindigkeit kann es zu einer zu großen Wurzelüberhöhung (Stegabstand zu groß oder Schweißgeschwindigkeit zu gering) oder einem Wurzelrückfall (Stegabstand zu gering oder Schweißgeschwindigkeit zu groß) kommen.

Weitere Ursachen für eine zu große Wurzelüberhöhung können eine zu hohe Stromstärke oder eine ungeeignete Schweißstabklasse sein. Ein Wurzelrückfall kann neben den oben genannten Ursachen auch aus einer zu großen Wärmeeinbringung der ersten Fülllage (in Schweißposition PE – Überkopf-Schweißen), einer nicht aufgeschmolzenen Heftstelle mit Wurzelrückfall oder einem nicht „durchgedrückten“ Schweißzusatz resultieren /DVS 18/.

3.3.6.6 Eigenspannungen

Aufgrund von Schrumpfungsbehinderung und Phasenumwandlungen können beim Schweißen Eigenspannungen auftreten. Eine Schrumpfungsbehinderung entsteht entweder quer zur Naht durch eine Behinderung der Querkontraktion oder längs der Naht durch kalt gebliebene Werkstückbereiche. Es handelt sich dabei um eine thermisch-mechanische Entstehung von Eigenspannungen. Durch Austenitisierung und Rückumwandlung des Austenits beim Abkühlen kann es ebenfalls zu Eigenspannungen kommen. Dieser Vorgang wird als metallurgische Eigenspannungsentstehung bezeichnet /SCH 15b/.

3.4 Wärmebehandlung von Stählen

Der folgende Abschnitt ist auf die Wärmebehandlung von Stählen fokussiert, da der größte Teil der DFU in KKW daraus besteht. Andere Werkstoffe wie Gusseisenwerkstoffe und Nickellegierungen können ebenfalls wärmebehandelt werden, um ihre Gefügeeigenschaften zu beeinflussen. Wärmebehandlungen werden im Anschluss an die Bearbeitung oder auch als Zwischenschritt durchgeführt, um den Werkstoffzustand den Anforderungen anzupassen, die an den Werkstoff gestellt werden. Es werden dadurch z. B. die Härte, Festigkeit und Zähigkeit gezielt beeinflusst.

Durch eine kontinuierliche Überwachung der Prozessparameter (Online-Monitoring) mittels einer ausreichenden Anzahl und sinnvollen Positionierung von unterschiedlichen Temperatur-Messstellen (Instrumentierung) kann die Wärmebehandlung geeignet charakterisiert und gesteuert sowie Wärmebehandlungsfehler vermieden werden /THO 11/.

Für Komponenten des Primärkreises kommen im Wesentlichen das Spannungsarmglühen, das Vergüten, das Normalglühen, das Wasserstoffarmglühen und das Lösungsglühen zur Anwendung.

Wärmebehandlungen können auch in Kombination mit Warmumform-Verfahren (z. B. Walzen, Schmieden) durchgeführt werden. Hierbei hat die eingebrachte Energie einen zusätzlichen Einfluss auf die Diffusion und die Keimbildung¹³ bei der Phasenumwandlung. Neben der Einsparung von Energie durch die Ausnutzung der Wärme aus der Warmumformung ist ein weiterer Vorteil dieser Verfahren die Festigkeitssteigerung bei gleichzeitiger Erhaltung einer hohen Zähigkeit durch eine besonders feinkörnige Gefügebildung /WEI 15/.

3.4.1 Glühbehandlungen

Verschiedene Glühbehandlungen mit unterschiedlichen Temperaturbereichen und Haltezeiten können während der Fertigung notwendig sein, um die gewünschten Werkstoffeigenschaften einzustellen.

¹³ Ferritkristalle bilden sich zunächst auf den Korngrenzen des Austenits und wachsen von dort aus weiter.

3.4.1.1 Diffusionsglühen

Das Diffusionsglühen dient der Beseitigung örtlicher Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung infolge von Seigerungen (s. Abschnitt 3.1.5.1) und der Beseitigung von Gefügeinhomogenitäten. Eine Heterogenität des Gefüges kann sich auf die Anordnung, Form oder Abmessung der Gefügebestandteile beziehen. Bei diesem Wärmebehandlungsverfahren wird bewusst eine hohe Temperatur (oft zwischen 1.050 – 1.250 °C) – auch bis knapp unterhalb der Soliduslinie¹⁴ – gewählt, um eine gute Diffusion der Elemente zu gewährleisten. Da bei Diffusionsvorgängen auch die Zeit eine wichtige Rolle spielt, sind die Haltezeiten in Abhängigkeit von der Wandstärke recht lang (bis zu 50 Stunden) /BRÜ 18a/, /BLE 10/. Mit der Glühbehandlung kann nur die Kristallseigerung, nicht jedoch die Blockseigerung (s. Abschnitt 3.1.5.1) entfernt werden, da hierfür die notwendigen Diffusionswege zu lang sind. Im Allgemeinen wird aufgrund der während des Diffusionsglühens auftretenden Kornvergrößerung anschließend ein Normalglühen durchgeführt /BRÜ 18a/.

3.4.1.2 Lösungsglühen

Das Lösungsglühen wird häufig bei austenitischen Werkstoffen angewendet, um Ausscheidungen (z. B. Chromkarbide) im Gefüge, die sich z. B. durch die hohen Temperaturen beim Schweißen gebildet haben, wieder aufzulösen. Dadurch wird die Korrosionsbeständigkeit wieder verbessert. Die eingestellte Temperatur liegt je nach Werkstoff etwa bei 1.000 – 1.100 °C. Die Haltezeiten sind ausreichend kurz zu wählen, um eine Grobkornbildung zu vermeiden (im Allgemeinen etwa 5 – 10 min). Aus diesem Grund wird auch die Temperatur möglichst niedrig eingestellt. Bei Erreichen der Glühtemperatur sind die Lösungs- und Rekristallisationsprozesse schon fast abgeschlossen, da sie bereits unter 1.000 °C beginnen. Im Anschluss an die Glühung wird der Werkstoff üblicherweise schnell abgekühlt, um eine erneute Ausscheidung von Chromkarbiden zu verhindern. Der Temperaturbereich von 950 – 450 °C muss dabei schnell durchlaufen werden /SCH 18/.

¹⁴ Bei Temperaturen unterhalb der Soliduslinie (in einem Phasendiagramm) ist die Erstarrung eines Werkstoffs vollständig abgeschlossen.

3.4.1.3 Normalglühen

Das Normalglühen (auch Normalisieren) dient der Einstellung eines gleichmäßigen, feinkörnigen Gefüges mit guten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften. Unabhängig von den Ursachen kann dadurch das unerwünschte Ausgangsgefüge z. B. von Schweißverbindungen, Halbzeugen (z. B. Grobbleche¹⁵) oder großen Schmiedestücken auf diese Weise behandelt werden /BRÜ 18a/.

Die Behandlung besteht aus Austenitisieren und nachfolgendem Abkühlen an ruhender Luft /BLE 10/. Die Temperaturen sind bei diesem Verfahren niedriger als beim Diffusions- oder Lösungsglühen und die Haltezeiten werden nicht länger als nötig gewählt. Temperatur und Haltezeit dürfen nicht zu hoch sein, um eine Grobkornbildung zu vermeiden. Bei modernen Walzstraßen kann das Normalglühen teilweise schon durch ein „Walzen mit geregelter Temperaturführung“ ersetzt werden /BRÜ 18a/.

3.4.1.4 Rekristallisationsglühen

Das Rekristallisationsglühen wird nach einer vorangegangenen Kaltverformung eingesetzt, um die dabei erfolgte Kornstreckung und Verfestigung zu beseitigen. Die gewählte Rekristallisationstemperatur ist abhängig von der Legierungszusammensetzung und dem Verformungsgrad. Sie liegt unterhalb der Umwandlung des Gefüges, d. h. bei hochlegierten Stählen üblicherweise zwischen 600 °C und 800 °C und bei unlegierten Stählen zwischen 450 °C und 600 °C /BRÜ 18a/, /BLE 10/. Mit dem Rekristallisationsglühen kann bei richtiger Einhaltung der Parameter Temperatur und Glühdauer ein sehr feines, gleichmäßiges Gefüge eingestellt werden. Mit diesem Verfahren kann auch bei hochlegierten austenitischen und ferritischen Stählen die Korngröße verringert werden /BRÜ 18a/. Die Festigkeit des Werkstoffs nimmt durch die Behandlung ab, während die Verformbarkeit verbessert wird. Metallphysikalisch betrachtet erfolgt eine Umordnung und Beseitigung von Versetzungen /BLE 10/.

¹⁵ Flacherzeugnisse mit einer Dicke größer 3 mm

3.4.1.5 Weichglühen

Das Weichglühen wird bei kohlenstoffreicheren Stählen, wie z. B. Vergütungs- oder Federstählen, zur Vorbereitung auf eine spanende Verarbeitung oder zur Verbesserung der Umformbarkeit genutzt. Deren Gefüge ist nach dem Schmieden oder Normalisieren schlechter kaltumformbar oder zerspanbar. Ursächlich dafür sind ein perlitisches Gefüge, lamellar ausgebildete Karbide und ggf. ein grob ausgebildetes Korngrenzenkarbidnetz. Im optimal weichgeglühten Zustand liegen hingegen feine und globular eingeformte Karbidteilchen homogen verteilt in einer ferritischen Matrix vor. Daher wird auch die Bezeichnung „Glühen auf kugeligen Zementit“ für das Weichglühen verwendet /BLE 10/. Die Glüh Temperatur liegt bei dieser Wärmebehandlung bei etwa 720 °C. Die Haltezeit beträgt mehrere Stunden. Der Werkstoff wird anschließend langsam abgekühlt. Bei Stählen mit einem Kohlenstoffgehalt unterhalb von 4 % wird statt dieses Verfahrens das Grobkornglühen verwendet /BRÜ 18a/.

3.4.1.6 Spannungsarmglühen

Das Spannungsarmglühen wird zum gezielten Abbau innerer Spannungen (Eigenspannungen) genutzt, die bei ungleichmäßigem Abkühlen oder Erwärmen (z. B. nach dem Gießen oder Schweißen) sowie durch Kaltverformung (z. B. Kaltwalzen, mechanische Bearbeitung) entstehen, um die Gefahr von Bauteilverzug oder gar Rissbildung mit sprödem Versagen zu reduzieren /BLE 10/. Die Eigenspannungen unterscheiden sich in Höhe und Ausrichtung abhängig von Faktoren wie Konstruktion, Geometrie und Verfahrensbedingungen.

Das Spannungsarmglühen besteht aus dem Erwärmen und dem Halten bei einer ausreichend hohen Temperatur (550 – 620 °C in Abhängigkeit vom Werkstoff) und anschließendem zweckentsprechendem Abkühlen des Bauteils. Eine wesentliche Veränderung des Gefüges soll dabei vermieden werden. Der Spannungsabbau erfolgt durch eine plastische Deformation im Mikrobereich (Versetzungsbewegungen). Um dies zu erreichen, muss die Streckgrenze des Werkstoffs unter den Betrag der Spannungen gesenkt werden /BLE 10/. Ein vollständiger Abbau ist jedoch nicht realisierbar, da die Absenkung der Elastizitätsgrenze limitiert ist. Für den Erfolg der Spannungsarmglühung sind Faktoren wie Glüh Temperatur, Haltezeit und chemische Zusammensetzung des Werkstoffes zu beachten. Die Aufheizzeit wird entsprechend der Geometrie des Gussteils gewählt. Bau-

teile komplizierterer Geometrien werden langsamer aufgeheizt. Wird die Abkühlgeschwindigkeit zu hoch gewählt, besteht die Gefahr der Bildung von Wärmespannungen. Die Temperaturführung muss entsprechend der Legierungszusammensetzung des vorliegenden Werkstoffs so gewählt werden, dass keine Veränderungen im Gefüge auftreten.

3.4.1.7 Wasserstoffarmglühen

Ein Wasserstoffarmglühen (auch Dehydrieren, DIN EN 10 052) wird z. B. bei gebeizten, geschweißten oder elektrolytisch beschichteten Stählen durchgeführt, die anfällig für Wasserstoffrisse sind. Bei dem Verfahren wird das Werkstück für mehrere Stunden bei 200 °C bis 300 °C gehalten. Bestenfalls erfolgt das Wasserstoffarmglühen direkt im Anschluss an das Schweißen. Es sollte jedoch spätestens nach 24 Stunden durchgeführt werden. Dadurch kann der eingelagerte Wasserstoff aus dem Werkstück austreten. Es ist jedoch nicht möglich, eine bereits vorliegende wasserstoffinduzierte Rissbildung rückgängig zu machen. Aufgrund der niedrigen Temperaturen treten im Stahl keine Gefügeänderungen auf /BLE 17/.

3.4.2 Vergüten

Als Vergüten eines Werkstoffes wird ein kombiniertes Wärmebehandlungsverfahren aus Härten und anschließendem Anlassen (ca. 500 °C bis 600 °C) bezeichnet. Es erfolgen dabei Diffusionsvorgänge, infolge derer ein stabileres und weniger sprödes Gefüge entsteht. Dadurch werden Zugfestigkeit, Streckgrenze und die Zähigkeitseigenschaften verändert. Während Zugfestigkeit und Streckgrenze mit zunehmender Anlasstemperatur abnehmen, nehmen Bruchdehnung, Brucheinschnürung und Kerbschlagarbeit zu /BLE 10/. Unterschieden wird je nach Abschreckmittel zwischen Öl-, Wasser- oder Luftvergüten /BRÜ 18a/. Abhängig vom jeweiligen Legierungsgehalt, besitzen Stähle eine unterschiedliche Anlassbeständigkeit. Darunter versteht man die Fähigkeit, Eigenschaften wie eine hohe Härte, Festigkeit und Zähigkeit auch bei hohen Anlasstemperaturen beizubehalten /BLE 10/.

3.4.3 Fehler (-quellen) bei Wärmebehandlungen

Die Wärmebehandlung spielt bei der Herstellung und Eigenschaftsbildung von Werkstoffen eine zentrale Rolle. Die Nichteinhaltung von Vorgaben aus Herstellerspezifikationen und Werkstoffnormen hinsichtlich Temperaturführung oder Einstellung des Umgebungsmediums während des Erwärmens, Haltens und Abkühlens führt immer wieder zu Schäden an Bauteilen /THO 11/. Ein Beispiel für eine Beeinträchtigung der Werkstoffeigenschaften durch eine Wärmebehandlung, die bei der falschen Temperatur durchgeführt wird, ist die Erhöhung der Empfindlichkeit eines Bauteils gegen interkristalline Spannungsrisskorrosion bei bestimmten Werkstoffen (vgl. WL 1984/07 /WLN 84/). Häufig können Mängel und Fehler an wärmebehandelten Bauteilen jedoch auf mehrere Ursachen zurückgeführt werden. Neben der Wärmebehandlung selbst kann die Ursache z. B. auch im Werkstoff, in der Gestalt des Werkstücks oder in dessen Bearbeitung liegen /LIE 05/.

Beim Wasserstoffarmglühen (s. Abschnitt 3.4.1.6) kann eine nicht ausreichende Temperatur oder Auslagerungszeit zum Austreiben des Wasserstoffs die Ursache für Schäden am Bauteil sein, da ein zu hoher Anteil an Wasserstoff im Werkstoff verbleibt.

Durch eine Wärmenachbehandlung nach dem Schweißen wird auf die durch das Schweißen eingebrachten negativen Veränderungen des Gefügestandes eingewirkt. Eine solche Wärmebehandlung kann aus Spannungsarmglühen, Normalglühen, Anlassen oder Vergüten bestehen (s. Abschnitt 3.4). Werden durch ungenügende oder unterlassene Wärmebehandlung die erzielten Eigenschaften nicht erreicht, kann es je nach Beanspruchungsbedingungen zu Risschäden kommen /WOS 98/.

Wärmebehandlungen müssen entsprechend den Vorgaben in dem Abschnitt 3.2.3 der KTA 3201.1 /KTA 17a/ und dem Abschnitt 7 der KTA 3201.3 /KTA 17b/ protokolliert und vorab in Wärmebehandlungsplänen festgeschrieben werden. Da der vorliegende Werkstoff ausschlaggebend für die Wahl der Parameter bei der Wärmebehandlung ist, sind entsprechende Vorgaben für die verschiedenen Werkstoffe in den Werkstoffkennwerten des Anhangs A der KTA 3201.1 zu finden. Diese müssen zusammen mit den Vorgaben zur Wärmebehandlung für die entstehenden Bauteile beachtet werden.

3.4.3.1 Fehler beim Diffusionsglühen

Beim Diffusionsglühen, welches bei Temperaturen unterhalb der Schmelztemperatur und für längere Zeit erfolgt, kann es zur Grobkornbildung, Entkohlung und Verzunderung kommen. Die beiden letztgenannten Mechanismen führen zu Materialverlusten. Sie können durch Glühen unter Schutzgasatmosphäre verhindert werden. Aufgrund der Grobkornbildung, die zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führt, schließt sich dem Diffusionsglühen eine weitere Wärmebehandlung (z. B. Normalglühen) an /BLE 10/.

3.5 Oberflächenbehandlung

Allgemeine Anforderungen an Oberflächen werden in KTA 3201.1 /KTA 17a/, Abschnitt 3.3.8.2 gegeben, z. B. Oberflächengüte von Stahlguss, Nachweis der Einhaltung der Anforderungen an die Oberfläche. KTA 3201.3 /KTA 17b/ beinhaltet zudem Anforderungen an die Bearbeitung von Schweißnähten, z. B. durch Beschleifen, die aus Gründen der Prüfbarkeit notwendig ist. Beim Bearbeiten der Oberflächen muss darauf geachtet werden, dass der Wärmeeintrag in das Bauteil gering ist, ein Eintrag unzulässiger Verunreinigungen, z. B. von Schleifwerkzeugen, vermieden wird und dass im oberflächennahen Bereich die Kaltverformung und die Aufhärtung gering sind.

3.5.1 Reinigen und Vorbehandeln

Eines der grundlegenden Verfahren zur Oberflächenvorbehandlung ist das Beizen. Es findet beispielsweise nach Wärmebehandlungen zum Entfernen der Zunderschicht (Oxidschicht) Anwendung, kann jedoch auch z. B. nach dem Schweißen oder einer längeren Lagerung des Materials durchgeführt werden. Es werden dabei Korrosionsprodukte von der Oberfläche chemisch entfernt – häufig mit Salpeter- oder Schwefelsäure. Manche Verunreinigungen machen ergänzende Entfettungsprozesse nötig. Neben diesem nasschemischen Verfahren existieren mechanische Verfahren zur Oberflächenvorbehandlung wie Bürsten oder Strahlen sowie spanende Verfahren wie Schleifen oder Drehen /DUM 14/.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Reinigung der Innenoberflächen von Rohren im Anschluss an die Fertigung (s. Abschnitt 6.1), um spätere Schäden durch Verunreinigungen oder Fremdkörper zu vermeiden. Dazu gehören mechanische Verfahren – wie

das Molchen (bei nicht-begehbaren Leitungen), Ausfegen oder Saugen – aber auch chemische Verfahren (Beizen, Entfetten). Eine weitere Möglichkeit ist das Reinigen mittels Spülen oder Ausblasen /WOS 98/. Eine häufig angewandte Möglichkeit zum Reinigen und Glätten von Oberflächen ist das Strahlen /BRÜ 18b/. Das Strahlen wird ebenfalls zur Entfernung von Zunder genutzt.

3.5.2 Beschichten und Plattieren

Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, um durch nichtmetallische Beschichtungen einen passiven Korrosionsschutz zu erreichen. Für den Transport oder zur kurzzeitigen Lagerung kann die Oberfläche von metallischen Werkstoffen mit organischen Beschichtungen wie Ölen, Wachsen oder Lacken versehen werden, welche Inhibitoren enthalten. Für einen dauerhaften Schutz gegenüber Wasser oder der Atmosphäre werden häufig Beschichtungssysteme verwendet, die aus Grund- und Deckschichten bestehen. In den Grundschichten sind Korrosionsschutzpigmente enthalten, welche dazu dienen, Korrosionsreaktionen langfristig zu unterbinden. In den Deckschichten sind verschiedenste Pigmente, wie Farbpigmente, Schuppenpigmente und Stabilisatoren enthalten. Der Nachteil organischer Beschichtungen ist eine gewisse Durchlässigkeit für korrosive Stoffe und z. T. auch Ionen /BLE 12/.

Der Grundwerkstoff kann auch durch Metallschichten geschützt werden, die galvanisch oder schmelzflüssig aufgebracht werden. Ein häufig anzutreffender metallischer Überzug ist Zink, welches entweder galvanisch oder im Schmelztauchverfahren aufgebracht wird /BLE 12/. Ein oft angewendetes Verfahren ist das Feuerverzinken. Dafür erfolgt zunächst eine Vorbehandlung, bei der die Oberfläche entfettet, gespült und in Beizbädern von Rost und Zunder befreit wird. Daran schließt ein Spülbad an, um die Beizflüssigkeit zu entfernen. Im nächsten Schritt wird mit einem Flussmittelbad ein feiner Film aufgetragen, der die Reaktion zwischen der Oberfläche und der Zinkschmelze unterstützen soll. Im Anschluss daran wird der Stahl üblicherweise in einem Trockenofen getrocknet. Schließlich wird der Stahl durch das Tauchen in eine Zinkschmelze (ca. 440 – 460 °C) mit Zink überzogen. Das geschieht in kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Verfahren /INS 09/. Durch die Bildung schwerlöslicher Korrosionsprodukte sorgt Zink für eine deutliche Verringerung der Korrosionsgeschwindigkeit. Zudem besitzt es eine kathodische Schutzwirkung, d. h. es schützt als Lösungsanode (oft auch Opferanode genannt) bei

Verletzung der Schicht freiliegendes Grundmaterial. Über der Zinkschicht kann eine zusätzliche organische Beschichtung aufgebracht werden, um den Schutz noch zu verbessern /BLE 12/.

In der druckführenden Umschließung deutscher KKW ist der Einsatz verzinkter Bauteile (z. B. Schrauben) nicht vorgesehen.

Mittels verschiedener Verfahren können metallische Plattierungen aufgebracht werden. Zu den Verfahren gehören das Walzplattieren, das Schweißplattieren (siehe auch Abschnitt 3.3.4) und das Explosionsplattieren (auch Sprengplattieren genannt). Die aufgetragenen Schichten sind relativ dick und werden durch erhöhten Druck und/oder erhöhte Temperatur hergestellt. Unter normaler Beanspruchung ist die Verbindung nicht trennbar. Durch einen solchen Verbundwerkstoff können die Vorteile beider Werkstoffe genutzt werden. Die Schichten können zudem porenfrei aufgebracht werden /DEG 09/.

3.5.3 Fehler (-quellen) bei der Oberflächenbehandlung

Durch die Bearbeitung eines Metalls werden die Struktur und das Gefüge der Oberfläche nachhaltig verändert. Bei einer spanenden Bearbeitung sind neben der Formgebung auch nachteilige Änderungen zu beachten. Diese sind die Verfestigung, welche Eigenspannungen hervorruft, anisotropes Verhalten aufgrund von Texturbildung sowie eine Veränderung des Oberflächenprofils, wodurch sich z. B. Verschleißigenschaften oder die Haftung von Beschichtungen ändern /BRÜ 18b/.

Die Oberflächenbeschaffenheit hat einen großen Einfluss auf die Ermüdung. Eine Randoxidation oder eine Randentkohlung wirken sich ebenso nachteilig aus wie die verschiedenen Arten von Kerben, die an der Oberfläche auftreten können. Proben mit rauen Oberflächen verhalten sich ähnlich wie gekerbte (s. Abschnitt 4.4.10).

Eine weitere Fehlerquelle stellt atomarer Wasserstoff dar, der beim Beizen gebildet wird. Dieser kann durch den Werkstoff diffundieren und an Gefügeinhomogenitäten, wie z. B. Ausscheidungen, zu Wasserstoff-Molekülen rekombinieren. In dieser Form kann der Wasserstoff nicht weiter durch den Werkstoff diffundieren. Nach der Drucktheorie führt dies durch den Aufbau eines sehr hohen Drucks zu einer Begünstigung von lokalen Rissbildungen im Werkstoff /LOI 14/, welche Ausgangspunkt für makroskopische Risse sein können. Zu diesem Schädigungsmechanismus s. auch GRS-578 /FAU 20/.

3.6 Reparaturen fertigungsbedingter Abweichungen

Bestimmte Herstellungsfehler können durch eine Nachbesserung oder Reparatur (Standardreparatur oder Einzelreparatur) gemäß Abschnitt 5.6.1 bzw. 5.6.2 in KTA 3201.3 /KTA 17b/ beseitigt werden. Üblicherweise handelt es sich dabei um Schweißfehler.

Nachbesserungen dürfen im Gegensatz zu Reparaturen unter bestimmten Voraussetzungen ohne Reparaturplan und Dokumentationsnachweis ausgeführt werden. Dies gilt, wenn an einer Schweißung Nacharbeiten durchgeführt werden, die im Bereich gültiger Verfahrensprüfungen liegen, ohne dass die Wärmeführung unterbrochen wird. Dies gilt auch für Nacharbeiten an einer Schweißung, die ohne Schweißarbeiten ausgeführt werden. Zu den möglichen Nachbesserungen gehört die Beseitigung von z. B. Zündstellen, Ansatzfehlern, Einbrandkerben, Spannungsrissen im Bereich von Heftschweißungen und Vergütungsraupenfehlern sowie unmittelbar beim Schweißen festgestellter Kupfereinschlüsse (Abschnitt 5.6.1 in KTA 3201.3).

Bei Reparaturen ist zuvor abzuwägen, ob diese gegenüber dem Belassen des Fehlers Vor- oder Nachteile für die Integrität oder die Funktion des betroffenen Bauteils bringen. Die Abweichung und eventuelle Reparatur muss in gleichem Umfang wie eine Erstfertigung belegt und dokumentiert werden. Falls die Abweichung belassen wird, ist die Zulässigkeit zu begründen. Nach Standardreparaturplänen dürfen Fehler wie z. B. Poren, Porenketten, Porennester, Schlauchporen, Schlackeneinschlüsse, Schlackenzeilen, Haftungsfehler, Bindefehler, vereinzelte Risse, Warmrisse und Endkraterrisse beseitigt werden. Die Durchführung einer Standardreparatur wird vom Sachverständigen freigegeben. Für die Behebung von Fehlern wie z. B. Materialverwechslungen (Schweißzusätze), Kupfereinschlüsse im Schweißgut (UP-Schweißen), die nach Abschluss der Schweißarbeiten festgestellt werden oder Risse nach der Wärmebehandlung oder dem Umformen, müssen Einzelreparaturpläne erstellt und vom Sachverständigen geprüft werden (Abschnitt 5.6.2 in KTA 3201.3).

Die Fehlerquellen bei Reparaturschweißungen sind dieselben wie bei Schweißungen während der Herstellung. Diese werden bereits ausführlich in Abschnitt 3.3.5 behandelt. Bei Wärmebehandlungen, die aufgrund von Reparaturen durchgeführt werden, kann es je nach Verfahren zu den in Abschnitt 3.4.3 beschriebenen Fehlern kommen.

In der Regel werden Reparaturen vor der letzten erforderlichen Wärmebehandlung durchgeführt.

4 Fertigungsbegleitende Prüfungen und weitere qualitätssichernde Maßnahmen

Verschiedene fertigungsbegleitende Prüfungen (zerstörungsfreie und zerstörende) und weitere Maßnahmen werden genutzt, um die geforderte Qualität sicherzustellen. Diese umfassen die Arbeits- und Verfahrensqualifikation vor der Fertigung, die Überwachung und Dokumentation während der Fertigung, zerstörende und zerstörungsfreie Prüfung während der Fertigung sowie bei Fertigstellung und Einbau des Bauteils als auch weitere qualitätssichernde Maßnahmen wie z. B. die Anwendung des Mehr-Personen-Prinzips und die Archivierung der Dokumentation, welche im Folgenden diskutiert werden.

4.1 Arbeits- und Verfahrensqualifikation vor der Fertigung

Vor Aufnahme der Fertigung muss der Hersteller seine Eignung nachweisen. Dazu zählt, dass er geeignete Einrichtungen zur Herstellung, zur Prüfung, zum Transport und zur Handhabung der gefertigten Komponente besitzt. Zudem muss er nachweisen, dass er über geeignetes Fachpersonal für die Herstellung (z. B. qualifizierte Schweißer), Aufsicht (Schweißaufsicht und Prüfaufsicht) und Prüfungen (Werkstoffprüfung, zerstörungsfreie Prüfung) verfügt und dass die Unabhängigkeit der Prüfungen gewährleistet ist (unabhängige Qualitätsstelle, anerkannter Werksachverständiger) /HOL 97/. Ein entsprechender Nachweis ist 24 Monate gültig und kann unter bestimmten Umständen verlängert werden (KTA 3201.3 /KTA 17b/).

Die Qualifizierung der vorgesehenen Fertigungsverfahren (z. B. Schweißverfahren) geschieht durch Verfahrensprüfungen. Die Bedingungen für die Verfahrens- und Arbeitsprüfungen sind nach KTA 3201.3 mit dem Sachverständigen festzulegen. Mit der Fertigung darf erst nach erfolgreicher Arbeits- und Verfahrensqualifikation begonnen werden.

4.2 Überwachung und Dokumentation während der Fertigung

Im Rahmen der Herstellungsüberwachung, wie sie auch in der neuesten Fassung von KTA 3201.3 /KTA 17b/ gefordert wird, werden Komponenten durch den Sachverständigen auf Übereinstimmung mit den vorgeprüften Unterlagen geprüft. Dazu gehört die Prüfung der Herstellungsvoraussetzungen und die Prüfung während der Herstellung. Es dürfen bei der Herstellung nur vom Sachverständigen begutachtete Werkstoffe und Schweißzusätze zum Einsatz kommen. Der Sachverständige prüft auch Angaben über

Erfahrungen mit den vorgesehenen Werkstoffen und Ergebnisse aus laufend durchgeführten Prüfungen zur Beurteilung der Fertigungsqualität. Die vorgesehenen Fertigungsverfahren (z. B. Schweißen, Umformen) müssen über Verfahrensprüfungen qualifiziert sein. Der Sachverständige prüft die Unterlagen (u. a. Schweißstellenlisten, Prüfpläne, Schweißpläne, Wärmebehandlungspläne, Werkstoffprüf- und Probenentnahmepläne, Prüfberichte) und die Erfüllung der Voraussetzungen sowie das Vorliegen ausreichender Erfahrung im Herstellerwerk /HOL 97/.

Während der Herstellung sind folgende Prüftätigkeiten vorgesehen und werden dementsprechend auch durchgeführt /HOL 97/:

- Überwachung der Wärmebehandlungen
- Überwachung der mechanisch-technologischen Prüfungen
- Durchführung von oder Teilnahme an zerstörungsfreien Prüfungen
- Besichtigung und Messkontrollen
- Kontrolle aller Prüfergebnisse, auch die des Herstellers
- Prüfung der vom Hersteller zusammengestellten Dokumentation
- Endstempelung der Teile nach erfolgreichem Abschluss aller Prüfungen
- Ausstellen eines Abnahmeprüfzeugnisses

Bei der Herstellungsüberwachung an Komponenten im Herstellerwerk werden von den Sachverständigen folgende Prüfungen und Kontrollen durchgeführt:

- Eingangskontrollen von Erzeugnisformen oder Bauteilen
- Chargenprüfungen von Schweißzusätzen
- Überwachung von Umformvorgängen
- Schweißüberwachung
- Überwachung von Wärmebehandlungen
- Zerstörungsfreie Prüfungen
- Arbeitsprüfungen für Schweißarbeiten
- Prüfung von Mitlaufproben
- Besichtigung von Maßkontrollen
- Teilbauprüfungen

Bei der abschließenden Bauprüfung überprüft der Sachverständige alle Nachweise auf Vollständigkeit und Zuordenbarkeit, die spezifizierten Kennzeichnung der Komponente, die Vollständigkeit der Herstellungsunterlagen und die bei der Vorprüfung festgelegten

sicherheitstechnisch bedeutsamen Maße. Bei positivem Ergebnis wird die Komponente durch den Sachverständigen mit seinem Prüfstempel gekennzeichnet und er stellt eine Bau- und Druckprüfbescheinigung aus.

Die Herstellungsüberwachung im Kraftwerk entspricht im Wesentlichen der im Herstellerwerk. Sind Abweichungen von den Sollvorgaben vorhanden, entscheidet der Sachverständige im Rahmen der begleitenden Kontrolle. Es sind eventuell Nachbesserungen oder Reparaturen (s. Abschnitt 3.6) möglich. Für Abweichungen, welche durch Nachprüfungen oder Nacharbeiten beseitigt werden können (sog. Nachbesserungen), muss kein besonderer Bericht erstellt werden. Dies sind z. B.:

- Ansatzfehler beim Schweißen,
- Oberflächenanzeigen mit geringen Tiefenausdehnungen oder
- geringfügiges Abweichen von festgelegten Wärmebehandlungsparametern.

Abweichungen, die nach Standardreparaturplänen oder nach Plänen aufgrund bestehender verfahrenstechnischer Absicherung behoben werden können, werden vom Sachverständigen in einem Abweichungsbericht erfasst. Für Einzelreparaturen sind entsprechende Reparaturpläne zu erstellen und vom Sachverständigen zu prüfen. Zudem ist die Ausführung zu dokumentieren.

4.3 Zerörungsfreie Prüfungen

Für die Durchführung von zerstörungsfreien Prüfungen (ZfP) müssen die Oberflächen der Halbzeuge oder Bauteile geeignet sein oder bearbeitet werden, um ungenaue Prüfungen z. B. aufgrund von Kanten oder der Rauigkeit der Oberfläche auszuschließen. Der Abschnitt 3.3.8.2 in KTA 3201.1 /KTA 17a/ und der Abschnitt 12.2.3 in KTA 3201.3 /KTA 17b/ enthalten entsprechende Anforderungen an Oberflächen für die einzelnen Prüfverfahren.

4.3.1 Oberflächenprüfverfahren

Durch verschiedene Oberflächenprüfverfahren (z. B. Sichtprüfung, Farbeindringprüfung, Magnetpulverprüfung, Wirbelstromprüfung) können je nach Verfahren Oberflächenfehler unterschiedlicher Ausdehnung erkannt werden oder spezifische Werkstoffeigenschaften (z. B. Härte, Schwefelgehalt) überprüft und sichergestellt werden.

4.3.1.1 Sichtprüfung

Die Sichtprüfung eignet sich in erster Linie zur Erkennung von großflächigen Oberflächenfehlern, aber auch zur Prüfung der Schweißnahtgeometrie. Rissartige Fehler können in der Regel nur erkannt werden, wenn diese eine ausreichend große Rissöffnung an der Oberfläche aufweisen und/oder Sekundärererscheinungen wie Ablagerungen vorhanden sind /WAI 97/. Weitere Voraussetzungen sind Zugänglichkeit und Sauberkeit des Prüfbereichs. Das Fehlernachweisvermögen verbessert sich durch die Nutzung von Hilfsmitteln wie Lupe, Spiegel, Endoskop, Videokamera etc. Eine Risstiefenbestimmung ist mittels Sichtprüfung nicht möglich /ELM 12/.

Nach KTA 3201.3 /KTA 17b/ ist eine Sichtprüfung im Rahmen der Schweißüberwachung vor, während und nach dem Schweißen gemäß DIN EN ISO 17637 (2011-05) durchzuführen.

4.3.1.2 Farbeindringprüfung

Die Farbeindringprüfung ist eine Methode zur Anzeige von zur Oberfläche hin offenen Rissen in beliebigen Werkstoffen. Die Prüfung ist geeignet, um Oberflächenrisse mit einer Breite im μm -Bereich und einer Risslänge ab ca. 1 mm anzuzeigen. Bei rauen und/oder porösen Oberflächen kann es zu Fehlanzeigen kommen. Eine Aussage über die Risttiefe, etwa über die Farbintensität, ist nicht möglich. Bei der Anwendung der Farbeindringprüfung müssen die Prüfflächen sauber und zugänglich sein. Zudem dürfen Oberflächen keine Beschichtungen wie z. B. Lackierungen aufweisen /ELM 12/.

Vor der Prüfung erfolgen ein Reinigen und Entfetten der Oberfläche. Es folgt das Aufbringen eines Eindringmittels mit sehr niedriger Viskosität. Nach einer Wartezeit wird die Oberfläche abgewischt und es wird ein Entwickler aufgebracht, welcher das Eindringmittel aus den Rissen heraussaugt und sie auf diese Weise makroskopisch sichtbar macht /BLE 11/.

4.3.1.3 Magnetpulverprüfung

Die Magnetpulverprüfung ist wie die Farbeindringprüfung ein Oberflächenprüfverfahren und eignet sich zur Erkennung von Fehlstellen an oder dicht unter der Oberfläche des Prüfobjekts wie Rissen, Lunker und Einschlüsse. Der Fehlernachweis erfolgt durch

Sichtbarmachen der durch einen Fehler verursachten magnetischen Streufelder mittels feiner ferromagnetischer Eisenpartikel. Da hierzu eine Magnetisierung des Prüfobjekts erforderlich ist, ist die Anwendung der Magnetpulverprüfung auf ferromagnetische Werkstoffe beschränkt. In diesem Anwendungsbereich stellt sie das einfachste und sicherste Verfahren zur Risserkennung dar und ist der Farbeindringprüfung an Anzeigengenauigkeit weit überlegen. Die Nachweisempfindlichkeit von Fehlern unterhalb der Oberfläche nimmt mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche ab. Oberflächenrisse sind nachweisbar, wenn deren Breite klein gegenüber der Länge und Tiefe ist, wobei für ausreichende Ergebnisse zusätzlich das Verhältnis Fehlertiefe zu Fehlerbreite > 5 und die Rissbreite zwischen $0,1 \mu\text{m}$ und $1 \mu\text{m}$ sein sollte. Die minimale Risstiefe für eine ausreichende Nachweisempfindlichkeit liegt im Bereich von $50 \mu\text{m}$ /PEL 10/. Eine Bestimmung der Risstiefe ist mit der Magnetpulverprüfung nicht möglich.

Verwandt mit der Magnetpulverprüfung ist die sogenannte Magnetische Streuflussprüfung, bei der das Streufeld einer Fehlstelle mit Hilfe geeigneter Sonden (Hall-Sonden, SQUID-Sonden, GMR-Sonden) quantitativ gemessen wird. Der Vorteil gegenüber der Magnetpulverprüfung liegt darin, dass das gemessene Signal in direkter Beziehung zur Fehlergeometrie steht, wodurch Aussagen über die Fehlerabmessungen möglich sind /KRE 11/, /PEL 10/.

Im Anhang C der KTA 3201.1 /KTA 17a/ bzw. Anhang E der KTA 3201.3 /KTA 17b/ sind die Vorgaben für die Durchführung einer Magnetpulver- oder Farbeindringprüfung zu finden.

4.3.1.4 Wirbelstromprüfung

Die Anwendung der Wirbelstromprüfung ist auf elektrisch leitfähige Werkstoffe beschränkt. Das wichtigste Einsatzgebiet der Wirbelstromprüfung im Bereich der Kerntechnik ist die Prüfung von Dampferzeugerheizrohren. Aufgrund der relativ dünnen Heizrohrwandungen handelt es sich hierbei um eine Volumenprüfung. Es gibt verschiedene Wirbelstromprüfverfahren, die sich hinsichtlich der Prüfgeschwindigkeit und der Sensitivität stark unterscheiden. Eine Zusammenfassung des Kenntnisstands hinsichtlich Erkennung und Charakterisierung von Dampferzeugerheizrohrschäden ist in /REC 09/ zu finden. Neuere Betriebserfahrung zeigt jedoch, dass Wirbelstromprüfungen an Stellen, an denen große Störsignale auftreten (z. B. im Rohrbodenbereich der Dampferzeuger),

insbesondere rissartige Fehler je nach eingesetztem Verfahren nicht immer auffinden können /WLN 19/.

Die Wirbelstromprüfung von dickwandigen Komponenten ist den Oberflächenprüfverfahren zuzurechnen. Dies hängt mit der relativ geringen Eindringtiefe des Wirbelstromfeldes bezogen auf die Bauteildicke zusammen. Oberflächennahe Risse können unabhängig von ihrer Orientierung sicher aufgefunden werden, eine Tiefenbestimmung ist jedoch schwierig /ELM 12/.

Die Wirbelstromprüfung kann anstelle anderer Verfahren für die Prüfung von Schweißnähten verwendet werden, wenn die Eignung nachgewiesen wird.

4.3.1.5 Härteprüfung

Zur Härteprüfung werden verschiedene Verfahren verwendet (z. B. die Härteprüfung nach Vickers oder Rockwell). Grundsätzlich ist es möglich, die Härte durch Eindringen eines Prüfkörpers unter statischer oder dynamischer Belastung zu bestimmen. Weitere Möglichkeiten sind das Ritzen der Oberfläche oder eine Bestimmung über den Rückprall infolge des elastischen Verhaltens des Prüfstücks. Bei der Angabe von Härtewerten muss immer auch das verwendete Verfahren angegeben werden, da das Eindringvermögen des bei dem jeweiligen Verfahren genutzten Prüfkörpers, neben der Art und Größe der Belastung, von dessen Gestalt und Eigenhärte abhängig ist. Aufgrund einer Härtemessung kann auch eine Aussage über die Festigkeit eines Werkstoffs gemacht werden. Der gemessene Wert ist jedoch nur für eine bestimmte Stelle der geprüften Oberfläche charakteristisch /BLE 11/.

Härteprüfungen müssen sowohl für Halbzeuge gemäß KTA 3201.1 /KTA 17a/ als auch im Rahmen der Arbeitsprüfung nach Abschnitt 11 und der Fertigungsüberwachung und Bauprüfung nach Abschnitt 10 in KTA 3201.3 /KTA 17b/ durchgeführt werden.

Abschnitt 9.2.2.5 „Härteprüfung“ in KTA 3201.3 beschreibt für ferritische Stumpfnähte, wie der Härteverlauf HV 5¹⁶ über Grundwerkstoff-Schweißgut-Grundwerkstoff aufzunehmen ist. Es sind Beispiele für die Lage von Härtereihen gegeben sowie der Abstand der Messpunkte bei einer Härteprüfung über die WEZ.

In Abschnitt 9.4.3.6 „Härteprüfung“ ist für Schweißplattierungen aus austenitischen Stählen und Nickellegierungen festgelegt, dass die Härte (HV 5) über die Plattierungsdicke einschließlich der Übergangszone zu prüfen ist. Es werden auch Angaben zu den zulässigen maximalen Härtewerten gemacht. Die Vorgaben gelten auch bei simulierten Reparaturschweißungen für den Härteverlauf (HV 5) im Übergangsbereich.

4.3.1.6 Schwefelabdruck

Der Schwefelabdruck (oft auch *Schwefelabdruck nach Baumann* oder *Baumannabdruck* genannt) stellt ein schnelles Verfahren zur Ermittlung von Schwefelseigerungen und des Schwefelgehaltes an Bauteiloberflächen dar. Salz- oder schwefelsaures Foto- bzw. Silberpapier wird dabei auf eine Schliifffläche gepresst. Die Säure lässt den im Metall enthaltenen Schwefel als Schwefelwasserstoff entweichen, der dann mit einer Ortsauflösung auf dem Fotopapier Silbersulfid bildet.

Ein Schwefelabdruck muss an mit dem Sachverständigen festgelegten Stellen einer Bauteiloberfläche durchgeführt werden, bevor diese plattiert wird (s. Abschnitt 10.3.2.4 in KTA 3201.1 /KTA 17a/).

4.3.1.7 Verwechslungsprüfung

Die Verwechslungsprüfung (auch PMI: Positive Materialidentifizierung genannt) kann mit einem spektrometrischen Verfahren (z. B. Röntgenfluoreszenzanalyse oder optischer Emissionsspektrometrie, KTA 3201.1 /KTA 17a/) durchgeführt werden. Diese zerstörungsfreie Prüftechnik erlaubt die Identifizierung von Werkstoffen. Während die Werkstoffzusammensetzung anhand der metallischen Elemente und deren Verhältnis untereinander gut bestimmbar ist, ist die Aussagekraft bezüglich des Kohlenstoffgehaltes

¹⁶ HV 5 ist ein Härtekurzzeichen und kennzeichnet die Prüfkraft bei der Härteprüfung nach Vickers.

schwierig. Eine spektrometrische Untersuchung kann regelmäßig beim Wareneingang angewandt werden, um Werkstoffverwechslungen zu verhindern.

4.3.1.8 Maßprüfung

Mit einer Maßprüfung wird überprüft, ob das gefertigte Bauteil bzw. Halbzeug innerhalb der vorgegebenen Toleranzen mit den in den genehmigten Vorprüfunterlagen geforderten Maßen übereinstimmt. Die Maßprüfung ist gemäß KTA 3201.1 /KTA 17a/ Bestandteil der Abnahmeprüfung und der Fertigungsüberwachung und Bauprüfung gemäß KTA 3201.3 /KTA 17b/, welche eine Prüfung der Schweißfugenflanken und zu plattierender Bereiche vor dem Schweißen bzw. Plattieren einschließt. Die tatsächlich gefertigten Maße sind dabei zu dokumentieren. Für die Maßprüfung können manuelle oder automatisierte Verfahren zur Anwendung kommen.

4.3.1.9 Bauteil-Metallographie

Unter Bauteil-Metallographie versteht man eine sog. Replica-Technik, bei der vor Ort ein Abdruck von metallischen Bauteiloberflächen entnommen und anschließend vor Ort oder in einem Labor weiter untersucht wird. Es handelt sich um ein Oberflächenprüfverfahren. Die zu untersuchende Stelle wird dabei zuerst gereinigt, geschliffen und angeätzt, um das Gefüge sichtbar zu machen, bevor mit einem Polymer-Film der Abdruck als Negativ abgenommen wird. Negativ bedeutet in diesem Fall, dass Risse als Erhebungen, Erhebungen durch z. B. Carbid-Einschlüsse auf dem Film als Vertiefungen abgebildet werden. Zur Verbesserung des Kontrastes kann der Film zusätzlich mit Gold beschichtet werden.

Vorteile des Verfahrens sind die Vor-Ort-Durchführbarkeit, das hohe Auflösungsvermögen (bis $< 1 \mu\text{m}$), sowie die Tatsache, dass der Film zur Dokumentation und Archivierung genutzt werden kann. Ein Nachteil ist hingegen, dass nur relativ kleine Abdrücke (bis rd. 1 cm Durchmesser) genommen werden können /HSR 88/.

4.3.2 Volumenprüfverfahren

Durch Volumenprüfverfahren (Durchstrahlungsprüfung, Ultraschallprüfung) können Abweichungen im Volumen von Werkstücken erkannt werden, ohne das Werkstück zu zerstören.

4.3.2.1 Durchstrahlungsprüfung

Die Durchstrahlungsprüfung kann bei allen Werkstoffen unabhängig von der Gefügestruktur angewendet werden. Die maximal durchstrahlbare Bauteildicke ist dabei werkstoffabhängig. Die Durchstrahlungsprüfung eignet sich insbesondere für die Erkennung von voluminösen Fehlern, da damit Dichteschwankungen im Prüfobjekt detektiert werden. Der Nachweis von flächigen Fehlern gelingt nur, wenn die Durchstrahlung senkrecht zur Ausbreitungsebene erfolgt /WAI 97/. Bereits bei geringen Abweichungen von einer senkrechten Durchstrahlungsrichtung können Risse übersehen werden. Bei verästelten und krumm verlaufenden Rissen werden nur Rissanteile erfasst, die eine günstige Orientierung zur Durchstrahlungsrichtung haben. Eine Risstiefenbestimmung gelingt allenfalls mit der Röntgencomputertomographie. Mit den üblichen Durchstrahlungstechniken wie Radiographie und Radioskopie ist dies nicht möglich.

Bei der Radiographie wird das zu untersuchende Bauteil zwischen einer Röntgen- oder Gamma-Strahlenquelle und einem Film oder Bildwandler angeordnet. Durch die Intensitätsänderung der Strahlung wird das Schattenbild eines Innenfehlers auf dem Röntgenfilm abgebildet. Aufgrund der geringeren Absorption zeichnen sich Risse und Poren auf dem Film heller ab, während Einschlüsse dunkler dargestellt werden, da diese eine höhere Dichte als der Grundwerkstoff besitzen. Anstelle des Films kann auch ein digitaler Bildwandler eingesetzt werden /BLE 10/. Die digitale Lösung hat mehrere Vorteile: So entfällt z. B. die lange Entwicklungsdauer und sowohl Kontrast als auch Helligkeit des Bildes können nachträglich bearbeitet werden, um Fehler besser sichtbar zu machen. In der Praxis wird diese Variante für die Prüfung bislang jedoch seltener verwendet. Der klassische Röntgenfilm hat seine Vorteile insbesondere in der besseren Archivierbarkeit sowie der höheren Robustheit, was z. B. auf Baustellen relevant sein kann. Das Verfahren ist auch für die Erkennung oberflächennaher Fehler geeignet.

4.3.2.2 Ultraschallprüfung

Die Ultraschallprüfung stellt das wichtigste ZfP-Werkzeug in der Kerntechnik dar. Das Verfahren eignet sich sowohl zum Nachweis von Oberflächen- als auch von Volumenfehlern in nahezu allen Werkstoffen. Die Empfindlichkeit fortschrittlicher Ultraschalltechniken ist dabei selbst bei sehr kleinen Rissabmessungen sehr hoch. Der wesentliche Vorteil der Ultraschallprüfung gegenüber reinen Oberflächenprüfverfahren liegt darin, dass von der Außenoberfläche der Komponenten auf Fehler, die von der Innenoberfläche ausgehen, geprüft werden kann. Eine Risserkennung und Charakterisierung mittels Ultraschallprüfung ist sehr gut möglich, falls der Werkstoff eine homogene Gefügestruktur aufweist, bei der die Körner akustisch isotrop und im Vergleich zur Ultraschallwellenlänge hinreichend klein sind. Dies trifft insbesondere auf ferritische Stähle und Schweißungen zu. Dies trifft aber auch auf austenitische Grundwerkstoffbereiche zu, in denen die Körner zwar anisotrop sind, jedoch keine Vorzugsrichtung aufweisen, weshalb sich die mikroskopische Anisotropie makroskopisch nicht auswirkt.

Im Bereich von austenitischen Schweißungen ergeben sich jedoch größere Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Fehlerlage und -größe, da bei der Schweißung große Kristallite (sogenannte Stängelkristallite oder Dendriten) entstehen, die in Abhängigkeit von den Abkühlbedingungen eine Vorzugsrichtung aufweisen. Vergleichbare Schwierigkeiten ergeben sich auch bei Mischschweißnähten mit Schweißzusätzen aus Nickellegerungen. Die Ultraschallprüfbarkeit wird in diesem Fall zusätzlich durch die üblicherweise vorhandene Pufferungsschweißung auf der ferritischen Seite der Schweißnaht erschwert, die zu einer Erhöhung des anisotropen Prüfvolumens führt. Hinzu kommt eine unterschiedliche Ausrichtung der Dendriten im Schweißgut, der Pufferung und Plattierung der ferritischen Seite. Aufgrund dieser Herausforderungen war und ist die Ultraschallprüfung von austenitischen Schweißnähten und Mischschweißnähten Gegenstand zahlreicher Forschungsvorhaben. Zwei Weiterentwicklungen der Ultraschall-Prüftechnik sind:

- GEDCM (Gradient Elastic Constants Descent-Methode):
Die Kornstruktur wird aus Anpassung elastischer Parameter ermittelt.
- RT-SAFT (Ray-Tracing Synthetische Apertur Fokus Technik):
Die Kornstruktur wird aus Messungen der Partikelgeschwindigkeiten ermittelt.

Beide Verfahren führen zu einer – je nach örtlicher Gegebenheit – deutlichen Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses und ermöglichen somit eine deutlich bessere Fehlererkennung /JÜN 19/.

4.3.2.3 Druckprüfung

Eine Druckprüfung (Erstprüfung) am Ende der Fertigung der Bauteile und deren Montage zu einem System dient zur integralen Überprüfung der Fertigungsqualität und wird im Rahmen der Abnahmeprüfung durchgeführt (KTA 3201.3 /KTA 17b/). Damit soll ein Versagen im Betrieb aufgrund von Materialfehlern oder fehlerhaften Schweißnähten vor der Inbetriebnahme ausgeschlossen werden. An Dampferzeugerheizrohren und nahtlosen pressplattierten Verbundrohren wird nach Abschnitt 18.7 bzw. Abschnitt 19.7 in KTA 3201.1 /KTA 17a/ eine Wasserdruckprüfung während der Fertigung durchgeführt. Für die Druckprüfung wird die Komponente üblicherweise mit Wasser gefüllt und der Prüfdruck mittels eines kleinen Gaspolsters aus unlöslichem Inertgas aufgeprägt (sog. Hydrostatische Druckprüfung). Druckrampen, Haltezeiten und zulässiger Druckverlust über der Zeit werden dabei je nach Anwendung spezifiziert. Da durch den hohen Druck möglicherweise Bauteile oder Schweißnähte Schaden genommen haben könnten, werden nach einer Druckprüfung repräsentative Stellen der Komponente erneut zerstörungsfrei geprüft. Die Prüftemperatur ist bei ferritischen Bauteilen mit einem hinreichenden Abstand (üblicherweise mind. 33 K) zur Sprödbruchübergangstemperatur zu wählen.

4.4 Zerstörende Prüfungen

Neben zerstörungsfreien (s. Abschnitt 4.3) kommen auch zerstörende Verfahren zur Anwendung. Diese werden üblicherweise an mitgefertigten Arbeitsproben oder an abgetrennten Stücken der Gussstücke oder Halbzeuge durchgeführt.

4.4.1 Chemische Analysen

Für die Prozessoptimierung und Qualitätsüberwachung ist es wichtig, die Elementzusammensetzung der Schmelze bzw. des Produkts zu kennen. In KTA 3201.1 /KTA 17a/, Abschnitt 3.3.7.1 sind Anforderungen an chemische Analysen enthalten. In den verschiedenen Abschnitten zum Prüfumfang für die unterschiedlichen Erzeugnisformen,

z. B. Abschnitte 4.3.2 oder 26.5.2 der KTA 3201.1 sind chemische Analysen sowohl der Schmelze (Schmelzenanalyse) als auch am Erzeugnis (Stückanalyse) vorgeschrieben. Gemäß KTA 3201.3 /KTA 17b/ sind weiterhin einerseits im Rahmen der Verfahrensprüfung für Schweißverfahren chemische Analysen als auch im Rahmen der Arbeitsprüfung chemische Analysen für Schweißplattierungen über die gesamte Plattierungsdicke sowie für formgebende Schweißungen und Schweißnähte an festgelegten Positionen gefordert.

Es werden verschiedene Verfahren zur Elementbestimmung in z. B. Roheisen, Stählen und Nichteisenwerkstoffen verwendet. Dazu gehören die optische Emissionsspektrometrie (OES), die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), die Verbrennungsanalytik (Infrarot und Wärmeleitung), die Atomabsorptionsspektrometrie (AAS), die Photometrie und die Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie (XPS). Je nach Auswerteverfahren kommen Tiegel, Löffel oder Sonden für die Probenahme in der Schmelze zur Anwendung bzw. es werden Proben aus dem Erzeugnis entnommen.

4.4.2 Metallographische Untersuchungen

Mit Hilfe einer Gefüge-Untersuchung können Fehler festgestellt und Rückschlüsse auf die Ursachen innerhalb der Fertigungskette gezogen werden. Auch Abweichungen in Festigkeit und Zähigkeit sind über das Gefüge nachweisbar. Dazu werden Proben an definierten Prüfpositionen entnommen, präpariert und unter dem Mikroskop betrachtet. Das mikroskopische Bild kann bei einem geschmiedeten oder gewalzten Produkt zudem Aufschluss darüber geben, wann ein Fehler entstanden ist /BUD 11/.

4.4.2.1 Deltaferritgehalt

Bei austenitischen Stählen kann u. a. der Deltaferritgehalt metallographisch bestimmt werden. Die Bestimmung des Deltaferritgehaltes muss nach KTA 3201.3 /KTA 17b/ z. B. für Plattierungen aus austenitischen Stählen durchgeführt werden. Der Deltaferritgehalt im Schweißgut soll dabei etwa 4 – 10 % betragen, während ein zusammenhängendes Netzwerk von Deltaferrit nicht zulässig ist.

4.4.2.2 Korngröße

KTA 3201.3 enthält im Abschnitt 9 „Verfahrensprüfungen“, Abschnitt 9.1.2 Anforderungen an die Bestimmung der Korngröße (bei ferritischen Werkstoffen: Sekundärkorngröße) von Probenstücken aus Grundwerkstoff. Ebenso muss an Proben des Grundwerkstoffs als auch von Schweißnähten die Korngröße gemäß Anhang B in KTA 3201.3 bestimmt werden und daraus der Grobkornanteil ermittelt werden.

4.4.3 Prüfung der Korrosionsbeständigkeit

Nach KTA 3201.1 /KTA 17a/ ist für nichtrostende austenitische Stähle die Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion im sensibilisierend geglühten Zustand (650 °C, 30 min) nach DIN EN ISO 3651-2 Verfahren A nachzuweisen. Für Nickellegierungen ist ASTM A262 Methode B heranzuziehen.

4.4.4 Zugversuch

Mit dem Zugversuch kann das Werkstoffverhalten bei einer stoßfrei aufgebracht und stetig anwachsenden Zugbeanspruchung, die über den gesamten Querschnitt gleichmäßig verteilt ist, ermittelt werden. Für den Versuch wird ein Probestab aus dem zu prüfenden Werkstoff in einer Zugprüfmaschine unter der aufgebracht Zugspannung zunächst elastisch und dann plastisch verformt. Ab einer bestimmten Dehnung wird eine plastische Instabilität erreicht. Von diesem Punkt an verformt sich nur noch ein kleiner Bereich der Probe weiter. Bei einer bestimmten Dehnung bricht die Probe schließlich. Diese Dehnung ist charakteristisch für den Werkstoff und dessen Zustand. Der Zugversuch wird meistens unter niedrigen Verformungsgeschwindigkeiten durchgeführt. Aus den ermittelten Spannung-Dehnung-Kurven können einige Kenngrößen ermittelt werden (z. B. Streckgrenze, Zugfestigkeit) /BLE 11/.

KTA 3201.3 /KTA 17b/, Abschnitt 9 bezieht im Hinblick auf Zugversuche die in Tab. 4.1 aufgeführten Normen mit ein.

Tab. 4.1 Übersicht über ISO-Normen und weitere Prüfanforderungen zusammen mit ihren deutschen Entsprechungen für den Zugversuch

ISO-Norm zum Zugversuch	Deutsche Norm
Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Querzugversuch (ISO 4136:2012)	DIN EN ISO 4136 (2013-02)
Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Längszugversuch an Schweißgut in Schmelzschweißverbindungen (ISO 5178:2001);	DIN EN ISO 5178 (2011-05)
Metallische Werkstoffe – Zugversuch Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2016);	DIN EN ISO 6892-1 (2017-02)
Metallische Werkstoffe – Zugversuch Teil 2: Prüfverfahren bei erhöhter Temperatur (ISO 6892-2:2011);	DIN EN ISO 6892-2 (2011-05)
Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben	DIN 50125 (2016-12)

4.4.5 Kerbschlagbiegeversuch

Mit dem Kerbschlagbiegeversuch werden die Zähigkeitseigenschaften eines Werkstoffs ermittelt. In vielen Regelwerken gibt es Anforderungen an eine Mindestkerbschlagzähigkeit. Der Versuch eignet sich allerdings nur zur Bestimmung qualitativer Kennwerte, denn die ermittelten Werte sind geometrieabhängig und somit nicht unmittelbar auf Bauteile desselben Werkstoffs übertragbar. Es ist jedoch der Vergleich verschiedener Werkstoffe möglich. Bei dem gebräuchlichen Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy (DIN EN ISO 148-1) wird eine in der Mitte gekerbte Probe auf zwei Auflager und gegen ein Widerlager gelegt. Anschließend wird sie mit einem einzigen Schlag eines Pendelhammers durchgeschlagen. Die verbrauchte Schlagarbeit wird in Joule gemessen. Bezugnehmend auf die Fläche am Kerb wird sie auch als Kerbschlagzähigkeit bezeichnet und wird in J/cm^2 angegeben. Sie ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit des Werkstoffs gegen schlagartige Beanspruchung. Es werden verschiedene Probenformen verwendet, die nach der Form der Kerbe (Rundkerbe oder Spitzkerbe) als Charpy-U- und Charpy-V-Proben bezeichnet werden /BLE 11/.

Bei Metallen mit kubisch-raumzentriertem Gitter (ferritische Stähle) und einigen mit hexagonalem Gitter (z. B. Titan) findet zu tieferen Temperaturen hin ein Übergang vom Gleit- zum Spaltbruch statt. Bei kubisch-flächenzentrierten Metallen (austenitische Stähle) tritt hingegen kein Spaltbruch auf. Bei welcher Temperatur dieser Wechsel im Bruchmechanismus stattfindet, wird durch innere und äußere Einflussgrößen bestimmt.

Zu den inneren gehören z. B. Legierungszusammensetzung, Versetzungsdichte und Korngröße. Zu den äußeren Einflussgrößen gehören die Temperatur, der Spannungszustand und die Belastungsgeschwindigkeit /BLE 11/.

In KTA 3201.1 /KTA 17a/ werden Kerbschlagprüfungen nach DIN EN ISO 148-1 (Metallische Werkstoffe – Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy – Teil 1: Prüfverfahren) gefordert. In derselben KTA ist auch die Aufnahme von Schlagenergie-Temperaturkurven geregelt. Ebenso sind dort auch Vorgaben für Prüftemperaturen und Anzahl der Proben zu finden. Bei ferritischen Werkstoffen müssen zusätzlich die seitliche Breitung und der Anteil an matter Bruchfläche (der Zähbruchanteil) gemäß DIN EN ISO 148-1 ermittelt werden.

Für Schweißgut bzw. Schweißverbindungen wird nach KTA 3201.3 /KTA 17b/ auch DIN EN ISO 9016 (Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Kerbschlagbiegeversuch – Probenlage, Kerbrichtung und Beurteilung) herangezogen, bspw. an:

- Verbindungsschweißungen aus ferritischen Stählen
- Arbeitsprüfungen für Stumpfnähte zwischen ferritischen Rohren und Rohren aus austenitischen Stählen
- Arbeitsprüfungen für Verbindungsschweißungen an ferritischen Stählen
- Verfahrensprüfungen für Stumpfnähte aus ferritischen Stählen
- Verfahrensprüfungen für Schweißverbindungen austenitischer Stähle bis 50 mm Wanddicke
- Verfahrensprüfungen für formgebende Schweißungen

4.4.6 Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch

Die beim Kerbschlagbiegeversuch ermittelten Werte für die Kerbschlagarbeit lassen sich nicht unmittelbar mit den Eigenschaften des Werkstoffs wie Festigkeit und Verformungsfähigkeit verknüpfen. Selbst bei gleichen Kerbschlagarbeiten kann das Verformungsverhalten zweier Werkstoffproben aus verschiedenen Stählen unterschiedlich sein. Um die Aussagefähigkeit des Versuchs zu verbessern, können mit dem Einsatz bestimmter Messtechnik Kraft und Durchbiegung während der Versuchsdurchführung gemessen werden. In dem durch einen solchen instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch ermittelten Schlagkraft-Durchbiegungs-Diagramm lassen sich die Kenngrößen Rissinitiierung,

stabiles Risswachstum, Instabilität, Spaltbruch, Rissstopp und stabiler Restbruch erkennen. Die Auswertung eines instrumentierten Kerbschlagbiegeversuchs wird jedoch durch die hohen Belastungsgeschwindigkeiten erschwert. Der Versuch eignet sich aufgrund dieser schlagartigen Beanspruchung für die Bestimmung der dynamischen Bruchzähigkeit. Zusätzlich zum Spitzkerb wird in der Probe ein Ermüdungsanriss eingeschwungen /BLE 11/.

4.4.7 Fallgewichtsversuch nach Pellini

Mit Hilfe von Fallgewichtsversuchen wird die Fähigkeit eines Werkstoffs untersucht, einen laufenden Riss zu stoppen. Mit dem Fallversuch nach Pellini wird die höchste Temperatur bestimmt, bei der ein Riss im Werkstoff sich unter einer Beanspruchung unterhalb der Fließgrenze¹⁷ spröde ausbreiten kann. Die niedrigste Temperatur, bei welcher der Riss noch in der Probenplatte aufgefangen wird, bezeichnet man als Übergangstemperatur NDT (*Nil-Ductility-Temperature*). Als Probe wird eine Platte mit der Blechdicke des zu beurteilenden Bauteils verwendet. Sie wird von einem herabfallenden Gewicht durchgebogen. Es wird ermittelt, ob eine Durchbiegung von 5 ° genügt, um die Probe zu brechen. Die Zugseite einer solchen Platte trägt eine spröde, quer gekerbte Schweißraupe. An dieser wird der Sprödbbruch ausgelöst. Der Fallgewichtsversuch nach W.S. Pellini ist in der technischen Regel SEP 1325 (1982-12) genormt /BLE 11/, /KTA 17b/.

4.4.8 Biegeversuch

Der Biegeversuch wird zur Bestimmung der Biegefestigkeit, der Biegeelastizitätsgrenze, des Bruchbildes und der plastischen Verformungsarbeit genutzt. Darüber hinaus dient er zur Beurteilung von Schweißnähten. Gemessen wird die Durchbiegung der Probe in Abhängigkeit von der aufgetragenen Prüfkraft. Für den Versuch wird ein Probenstab auf zwei Auflagern gelegt. Die Belastung der Probe erfolgt entweder durch eine in der Mitte aufgetragene Einzellast oder zwei gleich große, symmetrisch zur Mitte aufgetragene Einzelkräfte von Oben /BLE 11/.

¹⁷ Belastungen oberhalb der Fließgrenze führen zu einer bleibenden plastischen Verformung des Werkstoffs.

4.4.9 Bruchmechanische Werkstoffprüfung

Mit Hilfe der bruchmechanischen Sicherheitsanalyse können fertigungsbedingte Fehler wie Schweißfehler sowie betriebsbedingte Fehler wie Schwingrisse bewertet werden. Es werden dazu die Bauteilbelastung einer rissbehafteten Konstruktion mittels bruchmechanischer Kenngrößen beschrieben und auch bruchmechanische Werkstoffkenngrößen an zuvor angerissenen Laborproben ermittelt. Es wird zwischen der linear-elastischen und der elastisch-plastischen Bruchmechanik unterschieden. Erstere ist anwendbar, wenn sich das Bauteil bzw. die Probe makroskopisch linear-elastisch verhält und die plastische Zone vor der Risspitze klein ist im Verhältnis zu den restlichen Abmessungen. Die Kenngröße dieses Konzepts wird als Spannungsintensitätsfaktor K bezeichnet. In vielen Fällen tritt ein Versagen von Stählen erst nach größeren plastischen Verformungen und nach stabilem Risswachstum auf. Dann findet das Konzept der elastisch-plastischen Bruchmechanik Anwendung. Die ermittelten Kenngrößen sind hierbei die Rissspitzenöffnung CTOD (δ) und das J-Integral /BLE 11/.

In der Bruchmechanik werden die Bedingungen ermittelt, unter denen sich ein bereits vorhandener Defekt spröde, also ohne Verformungen, ausbreitet. Es werden dazu Spannungsverteilungen im Bereich einer Risspitze mit Hilfe von Elastizitätstheoretischen Methoden berechnet.

4.4.10 Schwingfestigkeitsversuch

Häufig spielt das Werkstoffverhalten bei zyklisch wechselnden Beanspruchungen eine große Rolle. Solche Beanspruchungen können dazu führen, dass der Werkstoff eine Schädigung, z. B. einen Anriss oder einen Bruch aufweist, obwohl die Spannungsmaxima die im Zugversuch ermittelte Streckgrenze nicht erreichen. Die Ursache ist eine Zerrüttung des Werkstoffgefüges, wodurch eine irreversible Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften erreicht wird (Ermüdung). Einen großen Einfluss auf die Ermüdung hat die Oberflächenbeschaffenheit. Beispielsweise reduzieren eine Randoxidation oder eine Randentkohlung aufgrund der damit verbundenen abgesenkten Festigkeit die Biegefestigkeit und erleichtern dadurch die Bildung von Anrissen. Auch die verschiedenen Arten von Kerben, die an der Oberfläche auftreten können (Formkerben, Werkstoffkerben, Belastungskerb) haben aufgrund der örtlichen Beanspruchungserhöhung eine negative Auswirkung. Proben mit rauen Oberflächen verhalten sich ähnlich wie gekerbte /BLE 11/.

In einem Dauerschwingversuch bei periodischer Beanspruchung der Probe mit konstanter Amplitude können verschiedene Festigkeitskennwerte ermittelt werden. Dazu gehören die Dauerschwingfestigkeit (auch Dauerfestigkeit), die Zeitschwingfestigkeit (auch Zeitfestigkeit), die Wechselfestigkeit und die Schwellfestigkeit. Es werden unterschiedliche Beanspruchungsbereiche unterschieden (Druckschwellbeanspruchung, Wechselbeanspruchung und Zugschwellbeanspruchung). Der Schwingfestigkeitsversuch kann als Einstufen-, Mehrstufen- oder Betriebsfestigkeitsversuch durchgeführt werden. Beim Einstufenversuch (Wöhler-Versuch) bleibt die Beanspruchungsamplitude konstant, im Mehrstufenversuch wird sie nach einer vorgegebenen Stufenfolge geändert. Im Betriebsfestigkeitsversuch hingegen durchläuft sie einen betriebsähnlichen Ablauf. Die im Betriebsfestigkeitsversuch bestimmte Ermüdungsfestigkeit wird als Betriebsschwingfestigkeit oder Betriebsfestigkeit bezeichnet /BLE 11/.

4.5 Prüfumfänge und Prüfzeitpunkte am Beispiel RDB eines DWR

Beginnend bei der Herstellung der Gussstücke erfolgt die gesamte Fertigung nach vorher erstellten und geprüften Unterlagen. Zentrale Fertigungsunterlage ist der Fertigungs- und Prüffolgeplan mit Verweis auf erforderliche Unterlagen (z. B Zeichnungen, Schweißpläne, Wärmebehandlungspläne, Prüfanweisungen), aus dem alle Fertigungs- und Prüfschritte ersichtlich sind. Dieser Plan bildet auch die Grundlage für die Dokumentation, aus der der tatsächliche Fertigungsablauf sowie die Ergebnisse der Prüfungen und Kontrollen zu entnehmen sind. Über jeden Prüfvorgang wird ein Protokoll angefertigt /KKE 78/.

Die sachgemäße Fertigung wird durch die begleitende Fertigungsüberwachung sichergestellt. Dabei wird auch auf ausreichende Kennzeichnung aller Teile geachtet, um eine eindeutige Rückverfolgbarkeit gewährleisten und Verwechslungen ausschließen zu können /KKE 78/.

An den Schmiedeteilen werden zwei zerstörungsfreie Prüfungen durchgeführt, davon eine erste durch den Hersteller vor dem Vergüten. Nur die Schmiedeteile, die bei dieser Volumenprüfung keine Auffälligkeiten aufweisen, werden weiterverarbeitet. Die Abnahmeprüfung für die Halbzeuge erfolgt nach dem Vergüten durch den Hersteller unter Beteiligung von Vertretern des Bestellers (damals in Deutschland Siemens/KWU) und den von der Aufsichtsbehörde zugezogenen Sachverständigen (entspricht im Prinzip einem 3-Personen-Prinzip) /MPA 12/, /RSK 13/.

Die mechanischen Eigenschaften werden anhand von Härteprüfungen und zerstörenden Prüfungen an Proben ermittelt. Außerdem werden chemische Analysen zur Überprüfung der Homogenität durchgeführt. Die Proben werden aus Überlängen der Schmiederinge entnommen, die von den Ringen abgetrennt werden. Bei den großen Abmessungen für die Ringe der RDB sind zur Überprüfung der Homogenität der Eigenschaften Proben an Kopf und Fuß an drei um 120° versetzten Orten zu entnehmen. Diese gesamte Vorgehensweise war schon in der ersten Fassung von KTA 3201.1 von 1979 in Anlehnung an die Prüfanweisungen von Siemens/KWU zur Zeit der Fertigung festgelegt worden, siehe /KTA 79/.

Vor der Fertigung werden für alle eingesetzten Schweißverfahren und Werkstoffpaarungen umfangreiche Verfahrensprüfungen unter Original-Arbeitsbedingungen (gleiche Geometrien, Zwischenprüfungen, Wärmebehandlungen usw.) durchgeführt. Dadurch können bereits vor Beginn der Arbeiten am RDB selbst alle Schweißparameter, Arbeits- und Prüfbedingungen ermittelt werden, die zu einwandfreien Schweißnähten führen. Eine umfangreiche Dokumentation gewährleistet eine jederzeitige Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Zusätzlich werden vor dem Einsatz alle Chargen der verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe geprüft /KKE 78/.

Da eine zerstörende Prüfung der Schweißnähte selbst nicht möglich ist, werden im Zuge der Fertigung Arbeitsproben in Verlängerung der Schweißnähte mitgeschweißt, an denen die Güte der Schweißverbindungen überprüft wird. Bei Rundnähten werden diese Arbeitsproben separat mit den gleichen Werkstoffen und Schweißparametern geschweißt. Der Prüfumfang ist ähnlich dem bei den Verfahrensprüfungen, jedoch ist die Probenanzahl reduziert. In Bezug auf die mechanischen Eigenschaften entspricht der Prüfumfang dem am Grundwerkstoff (vgl. KTA 3201.1 Abschnitt 3.2.2.1 und KTA 3201.3 Abschnitt 3.2.2.3).

Auch die zerstörungsfreien Prüfungen der Schweißnähte erfolgen in ähnlichem Umfang wie an den Halbzeugen. Jede Naht wird zu 100 % mit Ultraschall und zu 100 % mittels Oberflächenrissprüfung geprüft. Zur möglichst frühzeitigen Erkennung von Schweißfehlern finden bei größeren Schweißnähten aus vielen Lagen immer wieder Zwischenlagenprüfungen statt. Zusätzlich kann eine Durchstrahlungsprüfung mit Röntgenstrahlung vorgesehen werden. Die Prüfempfindlichkeit bei der Ultraschallprüfung ist in der Spezifikation so festgelegt, dass die zu registrierenden Anzeigen deutlich unter der je-

weiligen Zulässigkeitsgrenze liegen. Durch Verwendung von Prüfköpfen mit verschiedenen Winkeleinstrahlungen wird gewährleistet, dass alle Bereiche der Schweißnaht voll erfasst werden /KKE 78/.

Die austenitische Schweißplattierung, obwohl bei der Auslegung als nicht tragend gewertet, wird ebenfalls nach einem genehmigten Schweißplan unter den gleichen Voraussetzungen wie bei der Verbindungsschweißung hergestellt. Die Qualität der Schweißplattierung wird mit Ultraschallprüfungen auf Bindung untersucht, die Plattierungsoberfläche lagenweise mit Farbeindringprüfung auf Fehlerfreiheit der Oberfläche. Stichprobenartig wird mittels Ultraschallprüfung auf Unterplattierungsrisse geprüft.

Ähnlich wie bei der Verbindungsschweißung wird eine Arbeitsprobe geschweißt und zerstörend geprüft (chemisch, technologisch, Korrosionsrissprüfung). Diese Prüfungen dienen der Kontrolle der Güte der Schweißplattierung hinsichtlich ihrer Zusammensetzung, ihrer Korrosionsbeständigkeit, ihrer Rissfreiheit, ihrer einwandfreien Bindung zum Grundwerkstoff. Außerdem werden die Rissfreiheit und die mechanischen Eigenschaften des durch die Schweißwärme beeinflussten Grundwerkstoffs (Wärmeeinflusszone) überprüft. Nach Beendigung aller Schweißarbeiten erfolgt eine letzte Spannungsarmglühung. Mit der darauffolgenden Endbearbeitung ist die Fertigung des RDB abgeschlossen. Zur Herstellung gehören jedoch noch die Abnahmeprüfungen bestehend aus zerstörungsfreien Prüfungen und Druckprüfung.

Nach der letzten Wärmebehandlung wird an jeder Schweißnaht eine Abnahmeprüfung mit Ultraschall durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Ultraschallprüfung bilden die Grundlage für die Erstellung des Ultraschall-Atlas zum Vergleich mit den Ergebnissen der wiederkehrenden Prüfungen. Im Anschluss daran erfolgt eine Wasserdruckprüfung mit dem 1,3-fachen Auslegungsdruck. Prüftemperatur und Ablauf der Druckprüfung werden in einem Druckprüfungsplan vorher festgelegt. Die Wassertemperatur wird dabei mit genügend großem Abstand (mindestens 33 K, üblicherweise bei ca. 60 °C) zur Sprödbruchübergangstemperatur des ferritischen Grundwerkstoffes eingestellt, um einen Sprödbruch mit Sicherheit auszuschließen. Während der Druckprobe werden umfangreiche Spannungs-Dehnungsmessungen u. a. an Übergangsstellen und Stutzen vorgenommen. Nach der Druckprüfung werden die Schweißnähte nochmals einer Oberflächenrissprüfung und einer Ultraschallprüfung unterzogen. Die Abnahmeprüfungen und die Prüfung nach der Wasserdruckprüfung werden unabhängig vom Hersteller durch Sachverständige der Überwachungsbehörde und des Auftraggebers durchgeführt (dies entspricht einem Drei-Personen-Prinzip) /KKE 78/.

4.6 Weitere qualitätssichernde Maßnahmen

Neben den in den Abschnitten 4.3 und 4.4 vorgestellten „technischen“ Maßnahmen zur Überprüfung der gefertigten Qualität gibt es verschiedene organisatorische bzw. administrative Maßnahmen, die dazu beitragen, dass die gefertigte Qualität überprüfbar gewährleistet ist.

Die Prozesse der Materialwirtschaft, wie sie in KTA 1402 /KTA 17c/ definiert sind, stellen sicher, dass die Qualitätsanforderungen von Herstellerlieferungen eingehalten werden. Hierzu sind unter anderem die Unterlagen mit den einzuhaltenden Spezifikationen zu dokumentieren (Abschnitt 5.10 (3)). Bei der Ausführung der Arbeiten ist zusätzlich sicherzustellen, dass alle an die Lieferung und Materialien gestellten Anforderungen erfüllt werden (Abschnitt 5.10 (5)). Zudem liegt es in der Verantwortung der Anlagenleitung, Eigenpersonal mit entsprechender Qualifikation bereitzustellen, um die Eignung von Produkten eines Herstellers beurteilen zu können (Abschnitt 4.2.5.1 (2)). Des Weiteren sollen wirksame und definierte Strukturen die Kommunikation zwischen Hersteller und der Anlage sicherstellen (Abschnitt 5.14 (6)). Zusätzlich sind auch die Prozesse der Instandhaltung betroffen, da diese die qualitätsgesicherte Sicherstellung von Änderungsarbeiten sicherstellen.

In diesen Bereich fallen auch geeignete Eingangskontrollen von Produkten bzw. Halbzeugen. Erforderlichenfalls sind dabei z. B. Verwechslungsprüfungen durchzuführen, um sicherzustellen, dass tatsächlich der spezifizierte Werkstoff zum Einsatz kommt. Letztverantwortlich ist dabei für deutsche Anlagen stets der Anlagenbetreiber.

4.6.1 Mehr-Personen-Prinzip und weitere administrative Maßnahmen

Am bekanntesten ist das Zwei-Personen-Prinzip. Dies bedeutet, dass die entsprechenden Tätigkeiten und Prozesse von einer zweiten Person überwacht werden. Das kann z. B. dadurch erreicht werden, dass bei den Fertigungs- und Prüfschritten eine zweite Person anwesend ist und die Tätigkeiten überwacht oder durch eine unabhängige Prüfung im Anschluss das Ergebnis bestätigt. Das Zwei-Personen-Prinzip ist nur dann in vollem Umfang über die gesamte Fertigungskette wirksam, wenn es von entsprechenden weiteren Maßnahmen begleitet wird.

Ein wesentlicher Bestandteil dieser weiterführenden Maßnahmen ist die administrative Integration qualitätssichernder Maßnahmen wie das Zwei-Personen-Prinzip in die Prozesse bzw. das Managementsystem des Herstellers. Das beinhaltet ebenfalls eine klare Regelung von Aufsichts- und Verantwortungsfunktionen. Dazu gehört auch, dass das Qualitätsmanagement als Organisationseinheit unabhängig ist von der Fertigung. So lässt sich auch bereits innerhalb des Herstellerbetriebes eine gewisse unabhängige Kontrolle gewährleisten. Die Existenz eines vergleichbaren (Qualitäts-) Managementsystems ist auch bei entsprechenden Zulieferbetrieben Voraussetzung für eine erfolgreiche Akkreditierung und wird von Seiten des Herstellers regelmäßig überprüft.

Einen weiteren wichtigen Beitrag liefern die hinzugezogenen unabhängigen Sachverständigen, die während des kompletten Fertigungsprozesses beginnend von der Planung bis hin zur Abnahme der Komponente den Prozess begleitend überwachen. Neben der Prüfung bzw. Begutachtung eingereicherter Unterlagen vorlaufend zur Fertigung (z. B. Fertigungs- und Prüffolgepläne) überwachen sie die Fertigungsschritte und die zugehörigen Prüfungen durch den Hersteller bzw. führen teilweise auch selbst unabhängige Prüfungen durch.

Gerade bei der Fertigung der (Groß-) Komponenten der DFU für deutsche Anlagen kam das Mehr-Personen-Prinzip zum Einsatz. Neben der Fertigungsüberwachung bzw. den Prüfungen durch Hersteller und Sachverständigen führte auch der Besteller der Anlage (in Deutschland also üblicherweise Siemens/KWU) regelmäßig eigene, unabhängige Kontrollen durch.

Während des gesamten Herstellungsprozesses spielt das Stempeln als administrative Kontrolle eine wichtige Rolle. Persönliche Stempel bzw. personengruppenzugeordnete Stempel sowie eine klare Regelung, wer unter welchen Umständen stempeln darf, sollen sicherstellen, dass die Fertigung nach Vorgabe verläuft und dokumentiert wird. Neben dem Stempeln der Fertigungsdokumentation kommt dem Stempeln der Bauteile und Halbzeuge eine wichtige Rolle zu. Durch die Stempelung kann die Identität eindeutig gewährleistet werden, was die Gefahr von Verwechslungen erheblich reduziert. Entsprechende Vorgaben zum Stempeln, insbesondere auch zum Umstempeln bzw. zur Übertragung von Stempeln sind in KTA 3201.1 /KTA 17a/ und KTA 3201.3 /KTA 17b/ enthalten.

4.6.2 Dokumentation und Archivierung

Die adäquate Dokumentation vor, während und nach der Fertigung spielt eine wichtige Rolle im Fertigungsprozess. Neben der Erstellung detaillierter Fertigungs-, Schweiß- und Prüffolgepläne inkl. Prüfung durch Behörde bzw. Sachverständigen vor der Fertigung ist auch eine präzise Dokumentation des tatsächlichen Ablaufs während der Fertigung unerlässlich, um beim Auftreten fertigungsbedingter Abweichungen bewerten zu können, wie damit am besten umgegangen werden kann.

Eine klare Dokumentation des Fertigungsprozesses erlaubt eine bessere Nachvollziehbarkeit des Ist-Zustandes im späteren Betrieb. Dazu ist eine geeignete Archivierung der Unterlagen und ggf. mitgefertigter Arbeitsproben notwendig. Üblicherweise werden durch das Regelwerk (insb. KTA 1404 /KTA 13/) oder die Aufsichtsbehörde entsprechende Vorgaben zu Archivierungsumfang und -dauer gemacht. Daneben liegt es aber auch oftmals im Interesse der Betreiber, Archivierungsumfang und -dauer zu erhöhen, um bei einem späteren Ereignis auf entsprechende Unterlagen bzw. Material zurückgreifen zu können.

5 Einschlägige Spezifikationen und regulatorische Anforderungen

Mit den im deutschen Regelwerk und in internationalen Regelwerken getroffenen Spezifikationen und den Anforderungen bezüglich der Fertigung von Komponenten der DFU soll eine hohe Qualität dieser Komponenten gewährleistet werden, indem Herstellungsfehler vermieden oder deren rechtzeitige Erkennung bei der Herstellung sichergestellt werden. In dem folgenden Kapitel werden diese Spezifikationen und Anforderungen in den verschiedenen Regelwerken analysiert.

5.1 Deutsches Regelwerk zur Herstellung von (Groß-) Komponenten

Für die Herstellung von Komponenten der DFU in den ersten in Deutschland gebauten Kernkraftwerken war noch kein kerntechnisches Regelwerk vorhanden, weswegen besondere Herstellerspezifikationen hierfür entwickelt wurden. Zusammen mit RSK-Leitlinien wurden diese als Grundlage für die Entwicklung des Regelwerks KTA herangezogen.

5.1.1 Historische Entwicklung

Wie die Auswertung der Betriebserfahrung in /ELM 16/ zeigt, war Ende der 1970er Jahre eine große Anzahl meldepflichtiger Ereignisse zu Auslegungs- und Herstellungsfehlern an druckführenden Komponenten zu verzeichnen. Um dem entgegenzuwirken, wurde parallel zur Weiterentwicklung der Herstellerspezifikationen ab Ende der 1970er Jahre das Kerntechnische Regelwerk aufgestellt mit dem Ziel, einerseits die gefertigte Qualität zu erhöhen und zu standardisieren (z. B. durch Vereinheitlichung der eingesetzten Werkstoffe und deren Herstellung/Verarbeitung), andererseits durch umfangreiche Qualitätssicherung und umfangreiche Dokumentationspflichten dies auch nachvollziehen und reproduzieren zu können. Nicht zuletzt führte die Einführung des einvernehmlich akzeptierten KTA-Regelwerks auch zu einer Vereinfachung und Reduktion des Aufwands für die Begutachtung.

Da die ersten in West-Deutschland errichteten Kernkraftwerke in Lizenz gebaute Anlagen amerikanischen Designs (Westinghouse, General Electric) waren, bildeten entsprechende Vorgaben aus dem amerikanischen Regelwerk die Grundlage der Herstellerspezifikationen. Gleichzeitig mussten deutsche Regelungen, wie z. B. AD-Merkblätter, UVV

(Unfallverhütungsvorschrift) Druckbehälter und die Technischen Regeln Dampfkessel, berücksichtigt bzw. die Verträglichkeit mit diesen sichergestellt werden, da an die DFU anschließende Systeme u. U. nach konventionellem Regelwerk konstruiert sein konnten. So wurde für Komponenten der DFU zunächst fast ausschließlich der Werkstoff 22 NiMoCr 3 7 auf der Basis von Spezifikationen eingesetzt, welcher im Rahmen der Weiterentwicklung dieser Spezifikationen durch einen neueren Werkstoff 20 MnMoNi 5 5 mit verbesserten Eigenschaften ersetzt wurde. Ebenso wurde als Werkstoff für Dampferzeuger-Heizrohre zunächst Alloy 600 und später nur noch Alloy 800 eingesetzt. In beiden Fällen fand nur der neuere Werkstoff Eingang in KTA 3201.1.

Beispiele für solche Spezifikationen, wie sie z. B. beim Austausch der Dampferzeuger im Kernkraftwerk Obrigheim (KWO) auf Grund der langen Vorlaufzeiten bei der Fertigung von großen Komponenten noch angewandt wurden, sind:

- Siemens-Spezifikation RE-L 682 b
Zerstörende Prüfungen von Proben für Verbindungsschweißungen an Reaktorkomponenten aus Feinkornbaustählen
- Siemens-Spezifikation RE-L 734 a
Austenitische Auftragsschweißungen an Primärkomponenten für Kernkraftwerke
- KWU-Spezifikation RE-L 818 f
Inconel-Auftragsschweißung unter besonderer Berücksichtigung von Dampferzeuger-Rohrböden

Eine wichtige Rolle bei der Entwicklung des Regelwerks spielten auch die so genannten „RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren“ (aktuelle Fassung: /RSK 96/, damaliger Stand 1979). In diesen Leitlinien stellte die RSK grundlegende sicherheitstechnische Anforderungen zusammen, die sie ihren Beratungen und Stellungnahmen zugrunde legt. Die Genehmigungsbehörden der Bundesländer legten die RSK-Leitlinien bei den Anlagen, deren Genehmigungen zum Standort und Sicherheitskonzept nach Inkrafttreten der RSK-Leitlinien anstanden, als wesentlichen Teil der Beurteilungsgrundlage im Rahmen des untergesetzlichen Regelwerks zu Grunde und machten sie somit durch den Genehmigungsbescheid für den Betreiber verbindlich. Insbesondere der Anhang 2 zu Kapitel 4.2, die „Rahmenspezifikation Basissicherheit“ /RSK 79/ legte für die bis dahin noch weitgehend nach konventionellem Regelwerk ausgelegten Komponenten der Äußeren Systeme Anforderungen fest, die anschließend auch auf SWR und auch auf die druckführenden Komponenten der DFU angewandt wurden und den Inhalt der KTA-Regeln

maßgeblich beeinflussten. Diese Rahmenspezifikation forderte unter anderem die abgesicherte Anwendung optimierter Herstellungs- und Prüftechnologien mit Bevorzugung bestimmter Erzeugnisformen (z. B. geschmiedete Ringe für Behälter, nahtlose Rohre und Bögen mit geraden Anschuhenden) sowie enge Toleranzen zur Erzielung eines geringen Versatzes im Schweißnahtbereich. Zudem wird der Einsatz von Werkstoffen mit hochwertigen Eigenschaften bezüglich chemischer Zusammensetzung, Bruchzähigkeit, Verarbeitbarkeit und Prüfbarkeit gefordert /ELM 13/, /ELM 16/. Damit sollte ein katastrophales Versagen der Komponenten aufgrund von Fehlern bei der Herstellung praktisch ausgeschlossen werden.

Herstellerspezifikationen von Siemens/KWU, wie sie für die Konvoi-Anlagen erstellt wurden, wurden mit als Grundlage für die Entwicklung des Regelwerkes herangezogen. Die meisten Großkomponenten (insbesondere RDB, aber auch Dampferzeuger o. ä.) wurden jedoch vor Erstellung des Regelwerkes gefertigt.

5.1.2 KTA-Regelwerk zur Herstellung von (Groß-) Komponenten

Im deutschen Regelwerk sind umfassende Anforderungen an die Herstellung und Herstellungsqualität von (Groß-)Komponenten festgehalten. In den übergeordneten „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ /SIA 15/ werden in Nr. 2.1 (13) unter anderem hohe Anforderungen an die Qualität und Zuverlässigkeit der Auslegung, Fertigung und Errichtung, in Nr. 3.1 (2) zusätzlich die Verwendung qualifizierter Werkstoffe sowie die Sicherstellung und Erhalt der Qualitätsmerkmale bei der Fertigung gefordert. In Nr. 3.4 (1) wird unter anderem die Grundsatzforderung gestellt, dass die Druckführende Umschließung so beschaffen sein muss, dass das Auftreten von rasch fortschreitenden Rissen und von spröden Brüchen nicht zu unterstellen ist. In den weiteren Absätzen von Nr. 3.4 werden zudem weitere, generische Anforderungen an die DFU (und die Äußeren Systeme) gestellt.

Diese allgemeinen Anforderungen werden in sicherheitstechnischen Regeln des kerntechnischen Ausschusses (KTA) weiter konkretisiert. Wesentliche Grundlage für die Auslegung und Herstellung der (Groß-) Komponenten der DFU sind dabei die Regeln der Reihe KTA 3201 „Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren“, die aus vier Teilen besteht:

- KTA 3201.1 Werkstoffe und Erzeugnisformen /KTA 17a/
- KTA 3201.2 Auslegung, Konstruktion und Berechnung /KTA 17d/

- KTA 3201.3 Herstellung /KTA 17b/
- KTA 3201.4 Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung /KTA 17e/

Die Regelreihe dient zur Konkretisierung von Maßnahmen zur Erfüllung dieser Forderungen im Rahmen ihres Anwendungsbereichs (DFU bei DWR und SWR).

Unterstützend kommen folgende KTA-Regeln zur Anwendung

- Regelreihe KTA 1408 Qualitätssicherung von Schweißzusätzen und -hilfsstoffen für druck- und aktivitätsführende Komponenten in Kernkraftwerken, mit
KTA 1408.1 Eignungsprüfung /KTA 17f/
KTA 1408.2 Herstellung /KTA 17g/
KTA 1408.3 Verarbeitung /KTA 17h/
- KTA 3203 Überwachung des Bestrahlungsverhaltens von Werkstoffen der Reaktor-druckbehälter von Leichtwasserreaktoren /KTA 17i/
- KTA 3206 Nachweise zum Bruchausschluss für druckführende Komponenten in Kernkraftwerken /KTA 14/

Im Zusammenhang mit der Qualitätssicherung sind darüber hinaus KTA 1401 „Allgemeine Anforderungen an die Qualitätssicherung“ /KTA 17j/, KTA 1402 „Integriertes Managementsystem zum sicheren Betrieb von Kernkraftwerken“ /KTA 17c/ und KTA 1404 „Dokumentation beim Bau und Betrieb von Kernkraftwerken“ /KTA 13/ zu beachten.

Auf die jeweils relevanten Regeln und Abschnitte wird in den Kapiteln 3 und 4 dieses Berichtes – wo passend – eingegangen.

5.1.3 Werkstoffherstellung

Die Vorgaben an die Herstellung sind in KTA 3201.1 /KTA 17a/ in Form allgemeiner Grundsätze und Festlegungen sowie mit spezifischen Angaben für die unterschiedlichen Erzeugnisformen (z. B. geschmiedete Platten, geschmiedete Armaturengehäuse, Armaturengehäuse aus austenitischem Stahlguss, nahtlose Hohlteile, nahtlose Rohre) vorgeschrieben. Dies beinhaltet u. a. zulässige Werkstoffe, deren chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften, die im Einzelnen in dem Anhang A mit den Werkstoffkenndaten beschrieben werden, als auch die Probenentnahmeorte bei den spezifischen Erzeugnisformen und den Prüfumfang inklusive chemischer Analysen. Für

die Herstellung der Schmelze ist für die zulässigen Werkstoffe nach Anhang A das Er-schmelzen im Elektrolichtbogenofen vorgeschrieben. Vorgaben bezüglich des Gießver-fahrens werden nicht gemacht.

5.1.4 Schweißen

In Anhang A der KTA 3201.1 /KTA 17a/ werden für die einzelnen zugelassenen Werk-stoffe die Schweißverfahren aufgeführt, deren Anwendung als begutachtet gilt. Ebenso werden hier Vorgaben zum Vorwärmen, zu Zwischenlagertemperaturen und zu einer eventuell nachfolgenden Wärmebehandlung gemacht. Dadurch wird den spezifischen Eigenschaften der verschiedenen Werkstoffe Rechnung getragen. Je nach Werkstoff kann eines oder mehrere der folgenden Schweißverfahren genutzt werden:

- Verbindungs- und Auftragschweißen
 - Metall-Lichtbogenschweißen,
 - Unterpulverschweißen,
 - Schutzgasschweißen mit oder ohne Schweißzusätze (WIG, MIG),
 - Plasmaschweißen,
 - Elektronenstrahlschweißen,

- Plattierungsschweißen
 - Metall-Lichtbogenschweißen,
 - Unterpulver-Bandschweißen,
 - Unterpulver-Drahtverfahren,
 - Plasma-Plattierungen,
 - MIG-Plattierungen,
 - WIG-Plattierungen.

Die Anforderungen an den Hersteller, die Schweißüberwachung, die Schweißaufsicht, Schweißer und Bediener vollmechanischer Schweißanlagen sowie an die Prüfaufsicht und Prüfer für zerstörungsfreie Prüfungen sind in Abschnitt 3 in KTA 3201.3 /KTA 17b/ festgelegt. Abschnitt 8 enthält zudem Anforderungen an die Schweißzusätze. Die Vor-gaben zur Verfahrensprüfung für Schweißverfahren und Arbeitsprüfung für Schweißun-gen sind in den Abschnitten 9 und 11 /KTA 17b/ festgelegt. Mit den Verfahrensprüfungen werden Festlegungen für Panzerungen, Plattierungen, Verbindungs-, Auftrag- und form-gebende Schweißungen sowie unterschiedliche Schweißverbindungen (Stumpfstoß,

T-Stoß, Rohreinschweißung) und Schweißnähte (Kehlnaht, Dichtnaht) gemacht. Die Festlegungen beinhalten Angaben zur Probenentnahme, den notwendigen zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfungen sowie der notwendigen Dokumentation. Die Arbeitsprüfungen werden an Probenstücken unter Beteiligung des Sachverständigen durchgeführt, wobei die Prüfstücke und die Bedingungen, denen der vorgesehenen Bauteilschweißung entsprechen. In Abschnitt 12 wird besonders auf zerstörungsfreie Prüfungen an Schweißnähten (Ultraschallprüfung und Durchstrahlungsprüfung) eingegangen.

5.1.5 Umformen

In Anhang A der KTA 3201.1 /KTA 17a/ werden Vorgaben für die einzelnen zugelassenen Werkstoffe bezüglich des Kalt- und Warmumformens gemacht. Dies beinhaltet die notwendige Warmumformtemperatur, u. U. in Abhängigkeit von dem Halbzeug, inwiefern eine Wärmebehandlung nach dem Umformen noch durchgeführt werden muss sowie Werte für das Maß der Verformung durch Kaltumformen (Umformgrad), bei deren Erreichen oder Überschreiten eine nachfolgende Wärmebehandlung notwendig wird.

Im Abschnitt 6.4 in KTA 3201.3 /KTA 17b/ sind die notwendigen Prüfungen wiedergegeben, welche nach dem Umformen verschiedener Halbzeuge durchgeführt werden müssen. Für Umformverfahren zum Umformen von Rohren muss ein Eignungsnachweis durchgeführt werden, bevor eine Fertigung begonnen werden kann. Des Weiteren sind bei umgeformten Rohren entsprechende Toleranzen bezüglich Unrundheit und Wanddicke einzuhalten.

Bei ferritischen Bauteilen muss die Temperatur beim Warmumformen oberhalb der höchstzulässigen Temperatur für das Spannungsarmglühen des Werkstoffs gehalten werden. Bei Bauteilen aus austenitischen Stählen darf eine Temperatur von 400 °C nicht unterschritten werden. Vor dem Warmumformen müssen die Halbzeuge nach KTA 3201.1 wärmebehandelt und geprüft worden sein. Bei der Warmumformung geschweißter Bauteile muss nachgewiesen sein, dass die Schweißguteigenschaften gemäß den Anforderungen an das Bauteil erhalten bleiben. Ist dies nicht der Fall, so muss das umgeformte Schweißgut entfernt und das Bauteil neu geschweißt werden (KTA 3201.3).

5.1.6 Wärmebehandlungen

Wärmebehandlungen müssen entsprechend den Vorgaben des Anhangs A in KTA 3201.1 /KTA 17a/ durchgeführt werden. Die dabei einzuhaltenden Temperaturbereiche werden für die verschiedenen zugelassenen Werkstoffe in Abhängigkeit von dem Wärmebehandlungsverfahren vorgegeben.

Der zu erfassende Bereich beim örtlichen Spannungsarmglühen, z. B. für Verbindungsschweißungen, die auf der Baustelle gefertigt wurden, ist im Abschnitt 7.2.3 in KTA 3201.3 /KTA 17b/ geregelt. Wärmebehandlungen müssen protokolliert und in Wärmebehandlungsplänen dokumentiert werden (u. a. Art der Wärmebehandlung, Wärmebehandlungseinrichtung, Temperaturmessstellen, Zeit-Temperatur-Verlauf, Abkühlungsart, Kühlmittel).

5.2 Internationale Regelwerke

Die vorgesehenen Spezifikationen und die Anforderungen bezüglich der Fertigung von Komponenten der DFU, wie sie im ASME (American Society of Mechanical Engineers) Regelwerk, dem RCC-M (Règles de Conception et de Construction des Matériels Mécaniques des Îlots Nucléaires) und russischem Regelwerk festgelegt sind, werden in den folgenden Abschnitten analysiert.

5.2.1 ASME Regelwerk

Komponenten für den kerntechnischen Bereich werden in vielen Ländern nach dem US-amerikanischen ASME Boiler & Pressure Vessel Code (ASME BPVC) entworfen, hergestellt, betrieben und geprüft. Der ASME BPVC ist in insgesamt zwölf „Bände“ (Sections) aufgeteilt wie in Abb. 5.1 dargestellt (z. B. Band II – Werkstoffe, Band III – Nuklear, Band V – Zerstörungsfreie Prüfungen und Tests, Band IX - Schweißen).

ASME Boiler & Pressure Vessel

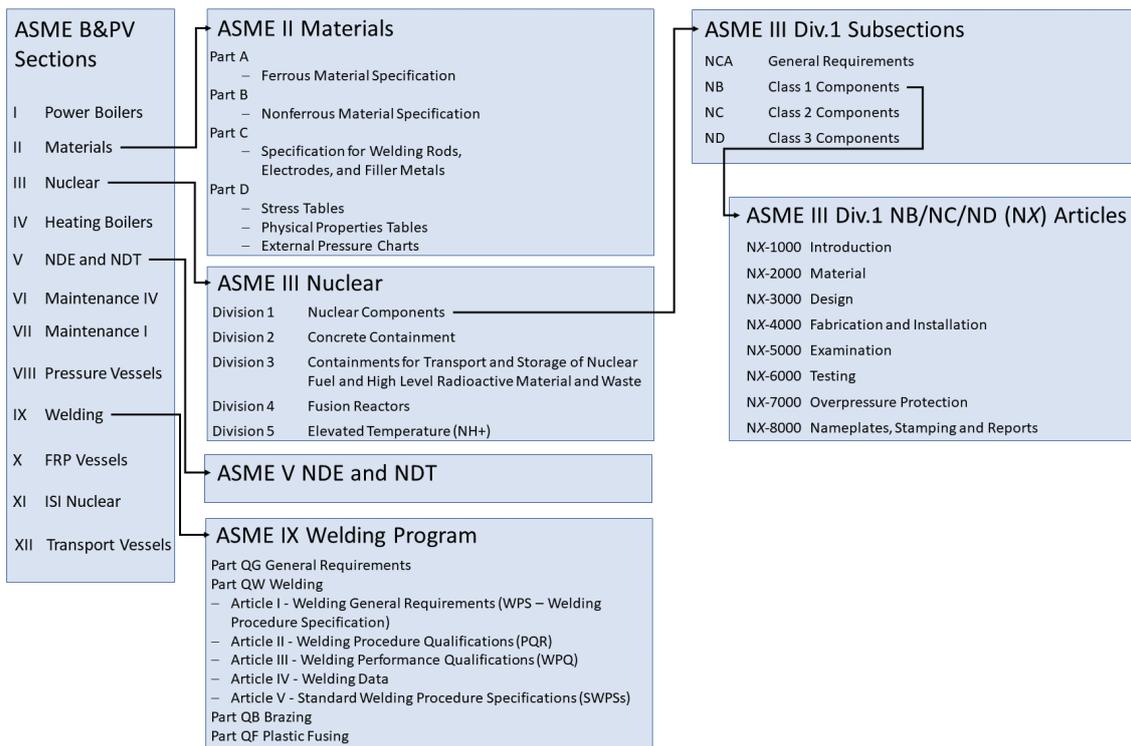


Abb. 5.1 Bände und Abschnitte im ASME BPVC zur Herstellung von Komponenten der DFU ¹⁸

Der Band III, welcher explizit druckführende Komponenten in der Kerntechnik behandelt, ist wiederum weiter unterteilt in verschiedene Kapitel (Divisions), die u. a. die Anforderungen an Komponenten in Kernkraftwerken (Division 1), Beton-Containments (Division 2), Transport- und Lagerbehälter (Division 3) und Fusionsreaktoren (Division 4) enthalten. Die Anforderungen an Komponenten der DFU, welche nach dem ASME Code als „Class 1“ Komponenten klassifiziert sind, werden in Band III in Division 1 im Unterkapitel (Subsection) NB beschrieben. Weitere Unterkapitel in der Division 1 von Band III befassen sich z. B. mit Class 2 (Subsection NC)¹⁹ oder Class 3 (Subsection ND)²⁰ Komponenten und Stützkonstruktionen (Subsection NF). Eine Übersicht über die hier relevante Struktur des ASME BPVC ist ebenfalls in Abb. 5.1 zu finden.

¹⁸ NDE: Non-destructive examination: Wiederkehrende Zerstörungsfreie Prüfung;
NDT: Non-destructive testing: Zerstörungsfreie Prüfung

¹⁹ „Class 2“ Komponenten entsprechen denjenigen, welche nach KTA 3211 als druck- und aktivitätsführende Komponenten außerhalb des Primärkreises erfasst werden.

²⁰ „Class 3“ Komponenten sind all diejenigen Komponenten, die nicht als „Class 1“ oder „Class 2“ identifiziert wurden, für die aber noch erhöhte Anforderungen gegenüber konventioneller Auslegung bestehen.

Die Festlegungen zu den zulässigen Werkstoffen, welche eingesetzt werden können, sind in Band III Division 1 im Abschnitt NB-2000 vorgegeben und verweisen auf zwei Tabellen in Band II. Hiervon darf abgewichen werden, z. B. wenn ein Bauteil keine druckhaltende Funktion ausübt oder die Auslegung für Anschlüsse von Messleitungen und für Ventile mit kleinen Nennweiten (≤ 25 mm) vorgenommen wird. Durch den Verweis auf diese beiden Tabellen werden sowohl Festlegungen bezüglich der Werkstoffe als auch der dazu gehörenden vorgesehenen Erzeugnisformen (Schmiedeteile, Gussteile, gewalzte Werkstücke, Rohre, etc.) getroffen.

Ebenso sind in Band II die Anforderungen an die Verfahren für die Herstellung von Halbzeugen aus bestimmten Werkstoffen, an die chemische Zusammensetzung, an die Wärmebehandlung, an durchzuführende Prüfungen bei der Fertigung von Halbzeugen und an die Reparaturmöglichkeiten bei Fehlern festgelegt. Je nachdem, welche Erzeugnisform hergestellt wird, müssen an Proben, die aus demselben Vormaterial bestehen, in unterschiedlichem Umfang zerstörende Untersuchungen durchgeführt werden (z. B. Zugversuche, Härteprüfungen, Kerbschlagbiegeversuche, Korrosionsversuche, Korngrößenbestimmung), um die mechanischen Eigenschaften zu bestimmen. Wenn die mechanische Bearbeitung des Halbzeugs und alle vorgesehenen Wärmebehandlungen abgeschlossen sind, werden Farbeindringprüfungen oder Magnetpulverprüfungen der äußeren und inneren Oberflächen durchgeführt. Falls innere Oberflächen nicht zugänglich sind, ist stattdessen eine Ultraschallprüfung vorgesehen.

Umform- und Trennverfahren sowie Montage und Ausrichtarbeiten werden in Band III Division 1 im Abschnitt NB-4200 behandelt. Umformverfahren müssen qualifiziert werden, bevor sie für die Fertigung verwendet werden. Ausnahmen hiervon sind erlaubt und werden angegeben. Im selben Abschnitt werden Vorgaben bezüglich erlaubter geometrischer Abweichungen und einzuhaltender geometrischer Toleranzen für bestimmte Halbzeuge (z. B. Behältermantel, Behälterboden, Rohrbögen) gemacht. Ebenso werden Vorgaben für das Ausrichten der Halbzeuge oder Komponenten in Vorbereitung für das nachfolgende Schweißen gemacht und die Art der Schweißnaht für das Schweißen von Behältern und anderen Komponenten vorgeschrieben.

Ergänzungen bezüglich der notwendigen Qualifikation für Schweißungen, welche in Band IX festgelegt sind, werden im Abschnitt NB-4300 behandelt. Die Durchführung der Schweißung und entsprechende Vorgaben inklusive der Reparatur von Schweißungen sind im Abschnitt NB-4400 festgelegt.

Die Wärmebehandlung von Schweißnähten inklusive der Vorwärmung und von umgeformten Erzeugnissen wird im Abschnitt NB-4600 behandelt. Diese muss in Abhängigkeit von der Grundwerkstoffgruppe, der die jeweilige Schweißnaht zugeordnet ist, durchgeführt werden. Die verschiedenen Grundwerkstoffgruppen werden in Band IX im Zusammenhang mit der Qualifizierung der Schweißverfahren definiert. Die Wärmebehandlung wird dokumentiert. Ausnahmen von einer Wärmenachbehandlung werden ebenfalls aufgeführt.

Die Prüfung der Schweißungen und Prüfzeitpunkte (während der Fertigung, nach Wärmebehandlungen, Abnahmeprüfung) sind in den Abschnitten NB-5100 und NB-5200 festgelegt. Je nach Art der Schweißnaht werden Durchstrahlungs-, Ultraschall-, Magnetpulver-, Farbeindring- oder Wirbelstromprüfungen durchgeführt. Die zugehörigen Akzeptanzkriterien für die verschiedenen Prüfverfahren sind in Abschnitt NB-5300 festgelegt. Die Durchführung der Prüfung und Qualifizierung der Prüfverfahren muss entsprechend Band V erfolgen. In Band V ist auch festgelegt, in welchem Umfang die Prüfungen dokumentiert werden.

5.2.2 RCC-M

Regeln zur Auslegung und Konstruktion von Kernkraftwerken enthält auch das französische RCC-Regelwerk, welches in insgesamt sechs Teile (RCC-M mechanische Komponenten, RCC-E elektrische Komponenten und Schutzsysteme, RCC-C Brennelemente, RCC-CW Bauwerke, RCC-F Brandschutz, RCC-MR mechanische Komponenten in Forschungs-, flüssigmetall-gekühlten und Fusionsreaktoren) aufgeteilt ist. Im Teil RCC-M, der in Anlehnung an den älteren ASME-Code entwickelt wurde, sind die Anforderungen für mechanische Komponenten in Kernkraftwerken enthalten. Ebenso wie im ASME-Code werden Komponenten der DFU als „Class 1/Niveau 1“ Komponenten klassifiziert. Die Gliederung des RCC-M und Abschnitte, welche insbesondere relevant für die Fertigung von Komponenten und Großkomponenten in der DFU sind, sieht wie folgt aus:

I. Komponenten im Kontrollbereich (Tome I – Matériels des Îlots Nucléaires)

- Volume A – Allgemeine Anforderungen
- Volume B – „Class 1/Niveau 1“ Komponenten
 - B 1000 – Allgemeine Anforderungen
 - B 2000 – Werkstoffe
 - B 3000 – Design

- B 4000 – Fertigung und Kontrollen
- B 5000 – Druckprüfung
- B 6000 – Druckabsicherung
- „Class 2 / Niveau 2“ Komponenten, „Class 3/Niveau 3“ Komponenten, ...
- Volume Z – Technische Anhänge
- II. Werkstoffe (Tome II – Matériaux)
- III. Prüfmethoden (Tome III – Méthodes de Contrôle)
- IV. Schweißen (Tome IV – Soudage)
- V. Fertigung (Tome V – Fabrication)
 - F 1000 – Einführung
 - F 2000 – Kennzeichnung
 - F 3000 – Trennen und Reparaturen ohne Schweißarbeiten
 - F 4000 – Fertigung und geometrische Toleranzen
 - F 5000 – Oberflächenbehandlung
 - F 6000 – Vermeidung von Verunreinigungen in Systemen und Komponenten
 - F 7000 – Mechanische Schraubverbindungen
 - F 8000 – Wärmebehandlung
- VI. Neue Regulierungen zur Erprobung (Tome VI – Règles en Phase Probatoire (RPP))

Die generellen Anforderungen an die Fertigung von „Class 1“ Komponenten und die Kontrollen sind im Volumen B des Abschnitts I vom RCC-M festgehalten. Für die einzelnen „Class 1“ Komponenten werden zulässige Werkstoffe aufgelistet und Festlegungen getroffen bezüglich des Widerstands gegen interkristalline Korrosion und des Cobalt-Gehaltes. Die Festlegungen zum Schweißen und zur Fertigung referenzieren die zugehörigen Abschnitte IV und V des RCC-M.

Für die Werkstoffe im Abschnitt II des RCC-M, welche hier nach Legierung und Einsatzzweck (Komponente, Erzeugnisform, Betriebsbedingung) aufgelistet sind, werden u. a. Vorgaben bezüglich chemischer Zusammensetzung, zulässiger Wärmebehandlungsparameter, notwendiger mechanischer Prüfungen und vorgesehener Oberflächen- und Volumenprüfungen gemacht. Die Kriterien für zulässige Abweichungen (z. B. Einschlüsse, Poren) in Halbzeugen, welche im Rahmen der Prüfungen entdeckt werden, und die Möglichkeiten von Reparaturen und des Vorgehens dabei werden ebenfalls festgelegt.

Die Spezifikationen für die verschiedenen Prüfverfahren, u. a. mechanische Prüfungen (zerstörende Prüfverfahren), chemische Analysen, Korrosionsverhalten, zerstörungsfreie Verfahren (u. a. Ultraschall- und Durchstrahlungsprüfung), sind im Abschnitt III des RCC-M festgehalten. Die Spezifikationen beziehen sich auf die Proben, Versuchsdurchführung und Besonderheiten bei bestimmten Erzeugnisformen sowie die Dokumentation der Prüfungen. Ebenso werden die notwendige Qualifikation des Prüfpersonals und die Qualität von Prüfmaterialien (z. B. Filme für Durchstrahlungsprüfungen) festgelegt.

Im Abschnitt IV des RCC-M sind die Vorgaben und Festlegungen für das Schweißen zu finden. Hier werden die notwendige Qualifikation des Herstellers sowie des Schweißpersonals und die Qualifikation der verschiedenen Schweißverfahren (insbesondere zum Schweißen austenitischer Stähle und von Nickellegierungen) festgelegt. Ebenso werden die Prüfverfahren und der Prüfumfang für Schweißnähte vorgegeben und Akzeptanzkriterien für Abweichungen aufgeführt.

Die Anforderungen an Fertigungsverfahren – bis auf das Schweißen – sind im Abschnitt V des RCC-M festgehalten und umfassen die Kennzeichnung der Halbzeuge oder Komponenten, Trennverfahren und Vorbereitungen fürs Schweißen, geometrische Toleranzen, Behandlung von Oberflächen (u. a. Verchromen, Nitrieren, Anstriche), Vermeidung von Verunreinigungen, mechanische Schraubverbindungen und Wärmebehandlung. Die Vorgaben sind unabhängig vom Werkstoff und der Erzeugnisform.

5.2.3 Regelwerk für LWR russischer Bauart

Das russische Regelwerk, welches die Grundlage für LWR russischer Bauart bildet, kann in mehrere hierarchische Ebenen gegliedert werden. Die Auslegungsanforderungen an Komponenten im Primärkreis sind in den oberen Ebenen dieser Hierarchie, den Gesetzen und Beschlüssen der Russischen Föderation sowie technische Normen, u. a. föderale Gesetze und in den Normen und Vorschriften von Behörden, festgelegt.

Im Zusammenhang mit dem Fukushima-Ereignis und einer Harmonisierung mit den IAEA-Standards ist eine Aktualisierung bestehender sowie Ausarbeitung neuer Föderaler Normen und Regeln auf dem Gebiet der Kernenergie für den Zeitraum von 2014 bis 2023 vorgesehen.

Die Normen und Regeln, einschließlich derjenigen zur Fertigung von Komponenten der DFU, sind nicht wie der ASME BPVC oder der RCC-M in einem geschlossenen Regelwerk angelegt, sondern setzen sich aus Dokumenten der verschiedenen hierarchischen Ebenen zusammen. Festlegungen für „Class 1“, „Class 2“ und „Class 3“ Komponenten für Kernkraftwerke sind in NP 089-15 „Rules for Design and safe Operation of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Installations“ (НП 089-15 „Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок“) zu finden und gelten sowohl für Leichtwasserreaktoren als auch für graphitmoderierete Reaktoren, flüssigmetall-gekühlte Reaktoren und Forschungsreaktoren. Ebenso wie im ASME-Code sind hier Komponenten der DFU als „Class 1“ Komponenten klassifiziert. NP-089-15 ist wie folgt strukturiert:

1. Zielsetzung
2. Auslegung und Design
3. Werkstoffe
4. Herstellung und Zusammenbau
5. Druckprüfungen
6. Ventile, Steuer- und Reaktorschutzeinrichtungen
7. Technische Prüfungen
8. Betrieb

Im Abschnitt III mit Vorgaben zu Werkstoffen wird bezüglich der Qualität und der Eigenschaften von Werkstoffen auf das Dekret Nr. 669 der Regierung der Russischen Föderation vom 12.07.2016 „Provisions for standardization of products (works, services) subject to the requirements related to safety assurance in nuclear energy use as well as processes and other standardization objects associated with such products“ verwiesen. Davon abweichende Werkstoffe können verwendet werden; diese müssen dann aber gemäß Anhang 2 in NP 089-15 geprüft und die Werkstoffeigenschaften umfangreich erfasst und dokumentiert werden.

Im Abschnitt 4 werden generelle Vorgaben bezüglich der Eingangskontrollen für Halbzeuge und Bauteile, einer ausreichenden Kennzeichnung derselben und der begleitende Dokumentationsunterlagen gemacht. Im Weiteren werden grundsätzliche Vorgaben zu Trennverfahren und anschließenden Prüfungen von Schnitt- bzw. Trennflächen an Halbzeugen, zur Kalt- und Warmumformung und zur Prüfung von Schweißnähten (Durchstrahlungsprüfung) festgelegt. Ebenso werden geometrische Toleranzen, die bei der

Fertigung einzuhalten sind, vorgeschrieben. Schließlich werden noch Spezifikationen für die Wärmebehandlung und der Umfang der notwendigen Dokumentation festgelegt.

Die Kennwerte für Werkstoffe von Behältern und druckführenden Rohrleitungen sind in STO 00220227-006-2010 „Vessels, devices and high-pressure pipeline parts forgings. General technical requirements“ (СТО 00220227-006-2010 „Поковки деталей сосудов, аппаратов и трубопроводов високого давления Общие технические требования“) festgehalten und decken Komponenten mit Betriebstemperaturen zwischen -40 °C und 420 °C sowie Betriebsdrücken zwischen 10 MPa und 130 MPa ab.

Regelungen für Schweißnähte und Plattierungen in Kernkraftwerken, insbesondere zu notwendigen Qualifikationen, Qualitätssicherung, Anfertigung von Kontrollproben, Kontrollen beim Schweißen und bei Wärmebehandlungen, Prüfungen und zur Dokumentation werden in PNAE G-7-010-89 „Equipment and Piping of Nuclear Power Installations. Weld Joints and Weld Overlays. Rules of inspection“ (ПНАЭ Г-7-003-87 „Правила и нормы в атомной энергетике оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля“) festgelegt. Auch dieser Standard gilt nicht nur für Kernkraftwerke inklusive flüssigmetall-gekühlter, sondern u. a. auch für Forschungsreaktoren. Er ist folgendermaßen aufgebaut:

1. Allgemeines
2. Kategorien von Schweißnähten
3. Zulassung zum Schweißen und Plattieren
4. Zertifizierte Gutachter
5. Anforderungen an Prüfstellen
6. Qualitätskontrollen für Schweiß- und Plattierungswerkstoffe
7. Prüfung von Einrichtungen für das Schweißen und zur Wärmebehandlung
8. Prozessüberwachung
9. Zerstörungsfreie Prüfverfahren und Prüfumfang
10. Zerstörende Prüfungen
11. Prüfergebnisse und Akzeptanzkriterien
12. Prüfung von Aus- und Nachbesserungen
13. Dokumentation
14. Abweichungen von den Anforderungen

Schweißnähte werden abhängig von der Sicherheitskategorie der Komponente und den später vorgesehenen Betriebsbedingungen in Abschnitt 2 kategorisiert (I, II, IIa, IIb, IIIa,

IIIb und IIIc für wassergekühlte Reaktoren). Die Anforderungen an die Zulassung zum Schweißen, an zertifizierte Gutachter sowie Prüfstellen werden in den Abschnitten 3 bis 5 festgeschrieben. Vorgaben an die Qualitätskontrolle von Schweißzusatzwerkstoffen, die Inspektion von Einrichtungen für das Schweißen und zur Wärmebehandlung sowie eine Überwachung des Schweißens und der Wärmebehandlung sind in den Abschnitten 6 bis 8 zu finden.

Die zerstörungsfreien Prüfverfahren, u. a. Sicht-, Farbeindring-, Magnetpulver-, Durchstrahlungs- oder Ultraschallprüfungen, zur Prüfung von Schweißnähten und die zerstörenden Prüfungen, u. a. chemische Analyse, Zugversuche oder Biegeversuche, für zugehörige Schweißproben werden in den Abschnitten 9 und 10 beschrieben. Schweißnähte an „Class 1“ Komponenten müssen immer zerstörungsfrei und geschweißte Begleitproben zerstörend geprüft werden.

Für die verschiedenen zerstörungsfreien Prüfverfahren, u. a. Durchstrahlungsprüfung, Ultraschallprüfung, werden im Abschnitt 11 Akzeptanzkriterien für Abweichungen angegeben. Je nach Schweißnahtkategorie kommen hier unterschiedliche Akzeptanzkriterien zur Anwendung. Die Ergebnisse der Untersuchungen bezüglich der Akzeptanzkriterien, der zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfungen, der Prozessüberwachung, der Inspektion der Einrichtungen und der Qualitätsprüfungen müssen gemäß Abschnitt 13 festgehalten und dokumentiert werden. Die mechanischen Eigenschaften sowie die chemische Zusammensetzung der Schweißzusatzwerkstoffe sind in Anhängen wiedergegeben.

5.3 Vergleich der verschiedenen Regelwerke

In allen Regelwerken werden umfangreiche Vorgaben für die Fertigung von Komponenten der DFU gemacht, welche Werkstoffvorgaben, Qualifizierungen von Verfahren und Prüfungen bei verschiedenen Fertigungsschritten vorsehen.

Die verschiedenen Regelwerke (KTA, ASME BPVC, RCC-M, russisches Regelwerk) sind auf die in den jeweiligen Ländern gebauten Kernkraftwerke zugeschnitten, d. h. die Vorgaben sind ausgerichtet auf das spezifische Design der Anlagen und Komponenten und der verwendeten Werkstoffe.

Ein Vergleich des russischen Regelwerks mit ASME BPVC, KTA und RCC-M wurde in /BUC 03/ vorgenommen. Für die Herstellung von Komponenten sind in den verschiedenen Regelwerken unterschiedliche spezifische Werkstoffe vorgesehen, was dementsprechend zu geringfügigen Unterschieden führt. Der Vergleich der Regelwerke bezüglich der Fertigung von Komponenten wurde in /BUC 03/ zwischen dem russischen Regelwerk und dem RCC-M vorgenommen. Die Vorgaben für Fertigungsverfahren sind in diesen beiden Regelwerken vergleichbar, d. h. es bestehen ähnliche Anforderungen z. B. zu chemischen Analysen, mechanischen Eigenschaften und Volumenprüfung. Auch im Falle von Schweißungen an „Class 1“ Komponenten und den vorgesehenen Prüfungen werden ähnliche Anforderungen an die Qualifikation von Schweißverfahren und Schweißer gestellt. Der Umfang der Prüfungen, welche vor und während des Schweißens durchgeführt werden müssen, unterscheidet sich hier geringfügig (s. Abb. 5.2, „surface examination during welding“).

Item	WVER practice	RCC-M practice
Methods	Surface: Liquid penetrant or Magnetic particle Volumetric: Radiography +Ultrasonic (Ultrasonic only in special cases for austenitic stainless steel)	Surface: Liquid penetrant or Magnetic particle Volumetric: Radiography +Ultrasonic (Ultrasonic only in special cases for austenitic stainless steel)
Scope	Visual: 100% Surface: as specified in control charts Volumetric: 100%	Surface: 100% Volumetric: 100%
Surface examination	Prior to welding: Buttered preparations During welding: Not required, run-by-run visual examination if volumetric examination impossible. After Welding: All accessible weld surfaces	Prior to welding: All preparations During welding: Prior to back filling double sided welds, after penetration pass for single sided welds, every 2 or 3 passes if volumetric examination impossible After Welding: All accessible weld surfaces
Volumetric examination	After welding	After welding
Examination techniques	GOST 18422-80: penetrant GOST 21105-75: magnetic particle GOST 7512-82 : radiography GOST 14782-86: ultrasonic	MC4000: penetrant MC5000: magnetic particle MC 3000: radiography MC 2000: ultrasonic
Acceptance criteria	Visual and Surface: Volumetric:	Surface: Volumetric:

Abb. 5.2 Anforderungen an die Prüfung von „Class 1“ Schweißnähte nach russischem Regelwerk und RCC-M (Tabelle 4 aus /BUC 03/)

In KTA und im ASME BPVC bestehen ähnlich umfangreiche Anforderungen an die Prüfung von Schweißnähten. Jedoch wird ein detaillierter Vergleich der Regelwerke hier dadurch erschwert, das neben der Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe für die Kategorisierung bzw. Charakterisierung bestimmter Schweißnähte unterschiedliche Methoden oder Kriterien angewandt werden, welche auf das Design bestimmter Reaktortypen zugeschnitten sind.

6 Fertigungsprozesse ausgewählter Komponenten

Für ausgewählte Rohrleitungen, Behälter, Gehäuse und Stutzen der DFU in DWR und SWR wird im Folgenden aufgezeigt, welche Fertigungsverfahren zu deren Herstellung zum Einsatz kamen.

6.1 Rohrleitungen

Rohrleitungen können sich je nach Einsatzort aus geraden Abschnitten, Rohrbögen für gekrümmte Abschnitte, geschmiedeten Formstücken mit integrierten Stutzen, Stutzen und zusätzlichen Armaturengehäusen zusammensetzen. Die Herstellungsverfahren für diese verschiedenen Abschnitte einer Rohrleitung sind:

- Walzverfahren für nahtlose gerade Rohrabschnitte (s. Abschnitt 3.2.3.3),
- Schweißverfahren für längsnahtgeschweißte gerade Rohrabschnitte (s. Abschnitt 3.3.5),
- Biegeverfahren für nahtlose Rohrbögen (s. Abschnitt 3.2.4.1),
- Schweißverfahren für längsnahtgeschweißte Rohrbögen aus gegossenen (s. Abschnitt 3.1) oder gesenkgeschmiedeten (s. Abschnitt 3.2.2) Halbschalen,
- Gieß- oder Schmiedeverfahren für Armaturengehäuse (3.1 bzw. 3.2.1 und 3.2.2).

Das Trennen von Rohren kann durch mechanische Verfahren (z. B. Sägen, Wasserstrahlschneiden) oder thermische Verfahren (z. B. Schweißbrenner, Laserstrahl) erfolgen. Das Reinigen und Vorbehandeln der einzelnen Segmente einer Rohrleitung erfolgt durch verschiedene Verfahren (s. Abschnitt 3.5.1), bevor, falls nötig, eine Beschichtung (s. Abschnitt 3.5.2) zum Schutz des Grundwerkstoffes aufgetragen wird. Die einzelnen Segmente werden durch verschiedene Schmelzschweißverfahren (s. Abschnitt 3.3.3) zusammengefügt.

Die geraden Rohrleitungsabschnitte und Rohrbögen in der DFU noch laufender deutscher Anlagen wurden nahtlos hergestellt.

6.1.1 Hauptkühlmitteleitung

Die Hauptkühlmitteleitungen (HKML) wurden aus einem niedriglegierten, ferritischen Feinkornbaustahl als Grundwerkstoff mit austenitischer Schweißplattierung gefertigt. In älteren, inzwischen abgeschalteten Anlagen wurde der Stahl 22 NiMoCr 3 7 verwendet, während in neueren Anlagen der Stahl 20 MnMoNi 5 5 zum Einsatz kommt.

Die Hauptkühlmitteleitungen setzen sich aus nahtlosen Geradrohren und nahtlosen Rohrbögen sowie je nach Loop aus geschmiedeten Formstücken mit integrierten Stützen zusammen, welche auf der Innenseite vor dem Zusammenfügen mit einer austenitischen Legierung (vergleichbar mit 1.4550) schweißplattiert wurden. Die Plattierung wurde mittels einer Einlagen-Bandplattierung in Umfangsrichtung bei Geradrohren bzw. mittels eines UP-Verfahrens in Längsrichtung bei Rohrbögen aufgebracht. Vor dem Plattieren wird das jeweilige Bauteil erwärmt und im Anschluss an das Plattieren erfolgt eine Wärmebehandlung (Spannungsarmglühung, 580–600 °C) /IAEA 03/.

Sämtliche Schweißnähte zum Zusammenfügen der HKML wurden nur von außen geschweißt. Dazu wurde die Wurzelschweißung als Lichtbogenhandschweißung (E-Hand) und die Füll- und Decklagen als UP-Schweißung ausgeführt. In anderen Fällen wurde die Wurzelschweißung mit dem WIG-Verfahren und die Füll- und Decklagen mittels Lichtbogenhandschweißung durchgeführt (s. Abschnitt 3.3). Die Schweißnähte wurden mindestens zweilagig mittels Handschweißung plattiert, um so eine durchgängige einheitliche Plattierung auf der Innenseite der HKML zu gewährleisten. Die Wurzelschweißung wurde hierbei mit einer oder zwei Lagen aus Reineisen durchgeführt, um die ferritischen Füll- und Decklagen von der austenitischen Plattierung zu trennen (Cardotechnik) /ILG 08/.

Stützen der Hauptkühlmitteleitungen größer DN50 (z. B. Volumenausgleichsleitung, Volumenregelsystem, Not- und Nachkühlsystem) sind als aufgesetzte Stützen aus 20 MnMoNi 5 5 oder als angeschmiedete Stützen mit innenliegender austenitischer Handplattierung ausgeführt. Zum Anschluss der austenitischen Anschlussleitung sind an die ferritischen Stützen austenitische Vorschuhenden angeschweißt. Kleinere Stützen wurden aus dem austenitischen Werkstoff 1.4550 gefertigt und durch Bohrungen in der Wand der Rohrleitung gesteckt. Auf die Innenseite der Bohrung innerhalb des Rohres wurde eine Pufferlage aufgeschweißt und anschließend der Stützen mittels austenitischer Schweißung in das HKML-Rohr eingeschweißt. Nach dem Schweißen der Stützen erfolgte eine Spannungsarmglühung.

6.1.2 Volumenausgleichsleitung

Die Volumenausgleichsleitung aller noch in Betrieb befindlichen sowie der meisten älteren deutschen Anlagen ist aus dem austenitischen Werkstoff 1.4550 ausgeführt.

Die geraden Rohrleitungsabschnitte und die Rohrbögen sind alle nahtlos. Für die Rundnähte zwischen diesen Abschnitten kamen die WIG-Handschiweißung und die E-Handschiweißung zum Einsatz.

6.1.3 Sonstige Rohrleitungen

Für die Anschlussleitungen des nuklearen Nachwärmeabfuhrsystems wurde ebenfalls der austenitische Werkstoff 1.4550 verwendet. Für die Abschnitte wurden nahtlose Rohre sowie nahtlose Bögen verwendet. Für die Verbindungsschiweißungen kamen WIG- und E-Handschiweißungen zum Einsatz.

6.2 Behälter

Druckbehälter setzen sich in der Regel aus einer unteren und oberen Kalotte bzw. einem Deckel im Falle eines RDBs, einem oder mehreren Mantelringen, einem Rohrboden im Falle eines Dampferzeugers, Stutzen und Flanschen sowie je nach Einsatzgebiet aus weiteren Einbauten zusammen. Die einzelnen Herstellungsverfahren hierfür sind:

- Verfahren für die Herstellung großer nahtloser Ringe (s. Abschnitt 3.2.1.1),
- Biegeverfahren (s. Abschnitt 3.2.4) und Schweißverfahren (s. Abschnitt 3.3.3) für die Herstellung längsnahtgeschweißter Ringe,
- Kumpeln von Kalotten (s. Abschnitt 3.2.4),
- Freiformschmieden von Rohrböden (s. Abschnitt 3.2.1).

Die Fertigung von Behältern wird im Folgenden anhand der Beispiele Reaktordruckbehälter (RDB), Dampferzeuger (DE), Druckhalter und Druckhalter-Abblasebehälter dargestellt.

6.2.1 Reaktordruckbehälter in Druckwasserreaktoren

Für die beiden zuletzt gefertigten RDB der Anlagen GKN-2 und KKI-2 wurde der vergütete Feinkornstahl 20 MnMoNi 5 5 verwendet. Für die RDB aller anderen Anlagen wurde der Werkstoff 22 NiMoCr 3 7 eingesetzt (siehe auch Abschnitt 2.3) /JEN 03/. Der RDB wird aus geschmiedeten nahtlosen Ringen (Deckelflansch, Stutzenring/Mantelflanschring, Mantelringe und Bodentorus) und Kalotten hergestellt (schematische Übersicht in Abb. 6.1). Aus Abb. 6.1 geht hervor, dass in der neuen Konstruktion (Konvoi) die Anzahl der nötigen Rundschweißnähte deutlich reduziert wurde im Vergleich zu früheren Konstruktionen.

Für die Deckel- und Bodenkaltten wird ein Gussblock zu einer flachen Platte geschmiedet (oder zu einem Blech gewalzt) und anschließend in Form gepresst oder gekümpelt (s. Abschnitt 3.2.4) /SAI 06/, /BEN 97/. Die Schmiederinge und Kalotten werden nach Beendigung der Formgebung vergütet (s. Abschnitt 3.4.2), d. h. Glühung bei etwa 900 °C (Austenitisieren), Abschrecken in Wasser und nachfolgende Anlassglühung bei etwa 650 °C, wodurch die erforderlichen mechanischen Werkstoffeigenschaften erreicht werden, siehe auch /KTA 17a/, Anhang A1.

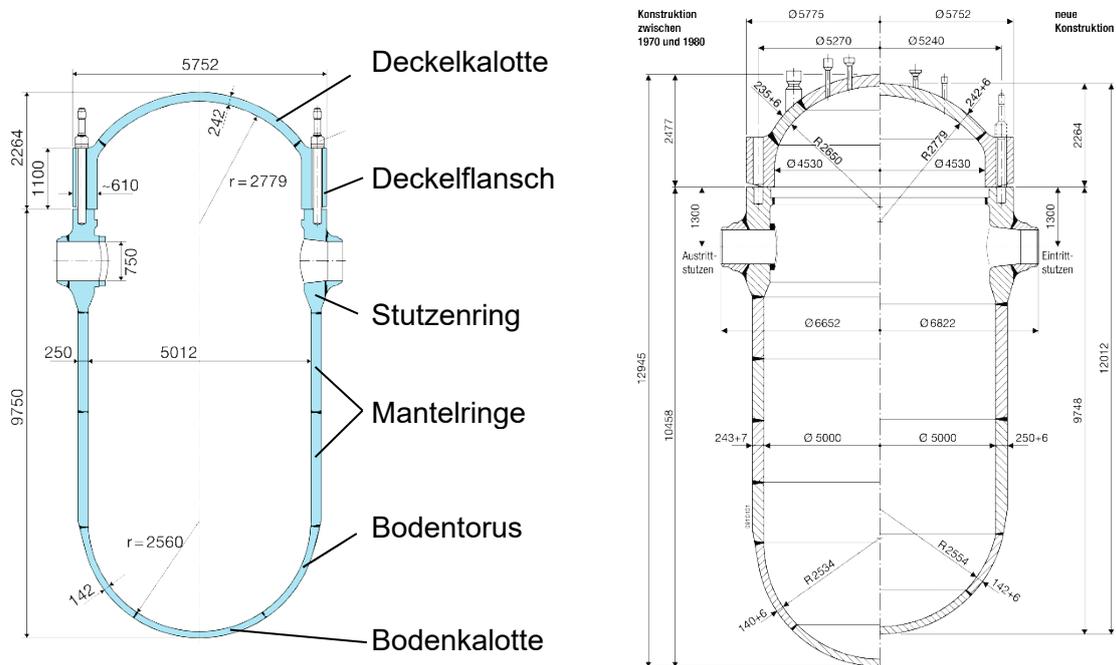


Abb. 6.1 Reaktordruckbehälter einer Konvoi-Anlage; schematische Übersicht über die Schmiederinge und Kalotten mit Lage der Schweißnähte und Vergleich mit älterer Konstruktion

Nach der Vergütung werden die Schmiedeteile mechanisch bearbeitet. In der Deckelkalotte werden anschließend die Stutzenlöcher ausgestanzt. Die übrigen Teile des RDB werden mechanisch durch Abdrehen auf das Endmaß gebracht und vor Beginn jeglicher Schweißarbeiten einer Oberflächenrissprüfung unterzogen. Die einzelnen, fertig bearbeiteten RDB-Halbzeuge werden dann zunächst von innen schweißplattiert. Dabei werden die Schweißnahtbereiche ausgelassen, da diese erst nach dem Zusammenschweißen der Einzelteile überplattiert werden. Nach jeder Schweißung erfolgt eine Wärmebehandlung /MPA 12/, /RSK 13/. Die Stutzen für die Kühlmittleitungen sind bei Konvoi-Anlagen angeschweißt.

Die RDB von KKP-2 sowie der Konvoi-Anlagen KKI-2, KKE, und GKN-2 besitzen, so wie alle früher gefertigten RDB, jeweils eine Rundnaht auf Höhe des Reaktorkerns. Die Herstellung aus einem Schuss wurde aufgrund der „basissicheren“ Ausführung der Schweißnähte und des großen Wasserspalts zwischen Kern und RDB-Wand als nicht erforderlich angesehen /LAU 13/.

6.2.2 Reaktordruckbehälter in Siedewasserreaktoren

Für alle RDB der 2020 noch im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen SWR kam der Werkstoff 22 NiMoCr 3 7 zum Einsatz. Die Herstellung des Werkstoffs und der Halbzeuge sowie auch die weiteren Fertigungsschritte entsprechen weitgehend der oben für DWR beschriebenen. Der gesamte RDB eines SWR der Baulinie 72 (s. Abb. 6.2) besteht aus Deckelkalotte (geschmiedetes Blech), Deckelzonenring (sechs geschmiedete Bleche), Deckelflanschring, Mantelflanschring, Mantelringe, Bodenverstärkungsring und Bodenkalotte (vier geschmiedete Bleche) /KRB 13/. Bis auf den Deckelzonenring handelt es sich bei den anderen um nahtlose geschmiedete Ringe. Nur in bereits abgeschalteten älteren Anlagen kamen bei den Mantelringen auch längsnahtgeschweißte Ringe zum Einsatz.

Die gesamte innere Oberfläche des RDB ist mit einer Schweißplattierung aus austenitischem CrNi-Stahl versehen. Aufgrund des im Vergleich zum DWR hohen Sauerstoffgehalts im Reaktorkühlmittel ist es beim SWR besonders wichtig, dass deren oberste Schicht von mind. 2 mm Dicke beständig gegen interkristalline Spannungsrisskorrosion ist. Die Temperatur für die Spannungsarmglühung nach dem Plattieren ist so gewählt, dass eine unzulässige Sensibilisierung der Plattierung gegen Spannungsrisskorrosion vermieden wird.

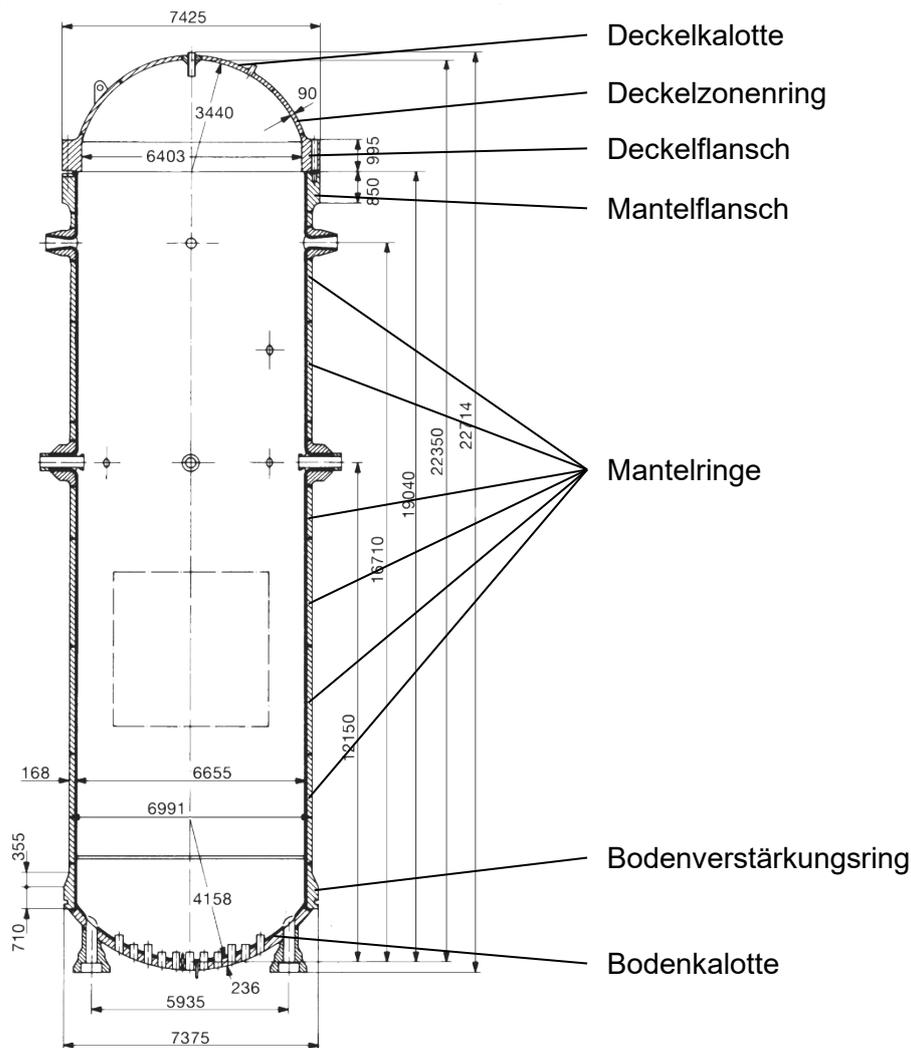


Abb. 6.2 Reaktordruckbehälter einer SWR-Anlage Baulinie 72; schematische Übersicht über die Schmiederinge, Flansche und Kalotten mit Lage der Schweißnähte

Die Frischdampf- und Speisewasserstutzen sowie die Pumpenstutzen werden als Schmiedeteile gefertigt, wobei die größeren hohlgeschmiedet werden, und in die Behälterwand ein- bzw. im Falle der Pumpenstutzen an die Bodenkalotte angeschweißt. Die austenitischen Steuerstabantriebs- und Instrumentierungsstutzen werden geschmiedet oder aus nahtlos gezogenen Rohren hergestellt und ebenfalls an die Bodenkalotte angeschweißt.

Da das RDB-Unterteil wegen seiner Größe und Masse nicht als Ganzes zur Baustelle transportiert werden kann, müssen die vorgefertigten Einzelteile durch Montagenähte auf der Baustelle zusammengeschweißt werden. Nach einer Zwischen-Spannungsarm-

Glühung und der Zwischenprüfung erfolgt das Plattieren der vor Ort gefertigten Rundnähte, mit denen die Einzelteile zusammengefügt wurden. Danach wird abschließend spannungsarmgeglüht und komplett zerstörungsfrei geprüft. Parallel dazu werden die Steuerstabantriebsgehäuserohre eingebaut, mit den Steuerstabstützen verschweißt und ebenfalls zerstörungsfrei geprüft.

Für die Qualität des fertigen RDB ist die Prüfung aller Fertigungsschritte eine wichtige Voraussetzung, angefangen von der Werkstatterprobung über die Zwischenprüfung bis zur zerstörungsfreien Prüfung des gefertigten RDB. Neben Prüfungen zur Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften werden alle Bleche und Schmiedeteile einer 100 %-Ultraschall-Prüfung unterzogen /KKI 75/.

6.2.3 Stutzen

Am Beispiel eines SWR wird im Folgenden erläutert, wie die Stutzen am RDB gefertigt wurden. Große Stutzen wurden geschmiedet und bestehen aus dem Grundwerkstoff des RDB. Ihre innere Oberfläche ist mit einer Schweißplattierung versehen. Die Stutzen sind mittels einer voll durchgeschweißten Naht mit der Behälterwand verbunden. Die Stutzen, durch die im Betrieb oder bei den instationären Vorgängen Medien fließen, die nicht die Reaktortemperatur haben, sind innen mit einem Wärmeschutzrohr versehen /KKI 75/.

Bei den kleinen Stutzen für die Druck- und Wasserstandsmessungen und Instrumentierung, war aufgrund der geringen Nennweite (NW 50) kein Schweißplattieren möglich. Daher wurden diese Stutzen aus austenitischem 18/8 Cr-Ni-Stahl hergestellt. Sie wurden durch die Druckbehälterwand hindurchgesteckt und dann von innen mit der Plattierung verschweißt. Auch die Stutzen für die Steuerstabdurchführungen wurden aus austenitischem 18/8 Cr-Ni-Stahl gefertigt. Sie wurden mittels einer voll durchgeschweißten Naht stumpf auf die Plattierung des Druckbehälterbodens aufgeschweißt. In diese Stutzen wurden die Gehäuse der Steuerstabantriebe eingeschweißt. Um Wärmespannungen infolge verschiedener Ausdehnungskoeffizienten zu vermeiden, wurden sie aus dem gleichen Material gefertigt wie die Stutzen. Die Gehäuserohre für die Steuerstabantriebe wurden mit einer Stumpfnah in die Stutzen eingeschweißt. Auch die Stutzen für die Kühlmittel-Umwälzpumpen sind aus dem Grundwerkstoff des Druckbehälters geschmiedet. Sie sind mit einer vlldurchgeschweißten Naht von außen auf den Druckbehälterboden aufgesetzt. Auf den Stutzenkopf werden die außerhalb des Reaktordruckbehälters

liegenden Baugruppen der Axialpumpen angeflanscht. Die Pumpenstutzen sind von innen mit einem 18/8 Cr-Ni-Stahl ausgekleidet /KKI 75/.

6.2.4 Dampferzeuger

Die folgenden Ausführungen sind /TÜV 84/ und /KKE 78/ entnommen.

Die Dampferzeuger in den Konvoi-Anlagen sind stehende U-Rohrbündel-Wärmetauscher ohne Speisewasser-Vorwärmkammer. Eine schematische Übersicht inklusive Lage der Schweißnähte ist in Abb. 6.3 zu finden. Der Dampferzeuger besteht aus unterer Kalotte, Bodentorus, Primärkammer-Trennblech, Rohrboden, Mantelringe, obere Kalotte, Stutzen, Flansche, Rohrbündel sowie weiteren Einbauten auf der Sekundärseite.

Die drucktragende Wandung der Primär- und der Sekundärseite des Dampferzeugers (ohne Stutzen kleiner Nennweite) inklusive des Rohrbodens ist aus dem ferritischen Werkstoff 20 MnMoNi 5 5 gefertigt. Die mit Primärkühlmittel beaufschlagten Bereiche auf der Primärseite mit Ausnahme des Rohrbodens (d. h. Bodentorus, untere Kalotte und Kühlmittelstutzen) sind zweilagig mit austenitischem Werkstoff vergleichbar 1.4550 schweißplattiert. Die Primärseite des Rohrbodens ist dreilagig mit nickelbasislegierten Schweißzusatzwerkstoffen vergleichbar 2.4807 (ähnlich Alloy 600) schweißplattiert, um die Verschweißung der Heizrohre und bis zu zwei Reparaturen während der Fertigung zu ermöglichen. Das Primärkammer-Trennblech ist aus dem austenitischen Werkstoff 1.4550 gefertigt. Die Mantelringe und der Bodentorus sind nahtlose Schmiederinge. Die Dampferzeuger-Heizrohre des U-Rohrbündels bestehen aus dem Werkstoff 1.4558 (ähnlich Incoloy 800 nach ASME) und sind als nahtlose Rohre gefertigt. Die Rundnähte, mit denen die einzelnen Teile der drucktragenden Wandung verschweißt werden, wurden zur Minimierung der Spannung in die ungestörten zylindrischen Bereiche bzw. in den ungestörten konischen Bereich verlegt. Der Speisewasser- und der Notspeisestutzen, der Dampfaustrittsstutzen und der Flansch des Mannlochs im Bereich des Dampf-raums des Dampferzeugers sind eingeschweißt, ebenso wie die Flansche der Handlöcher.

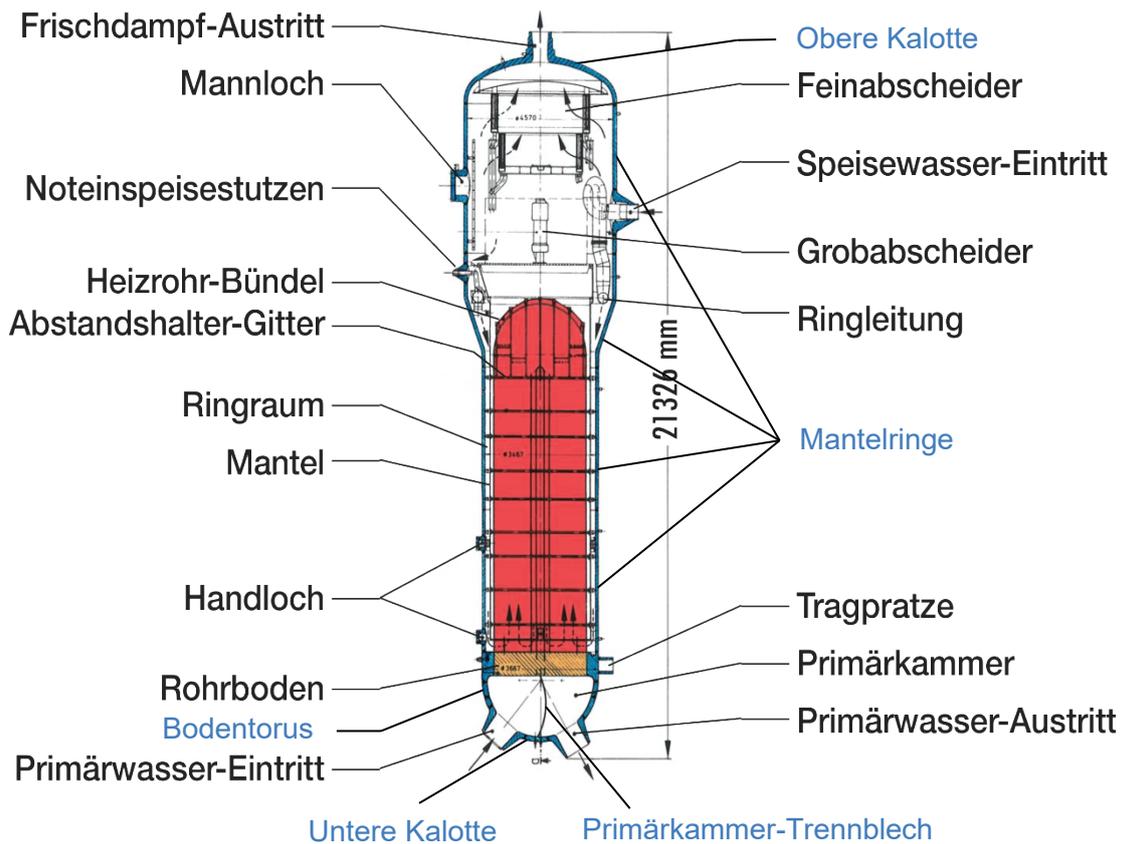


Abb. 6.3 Schemazeichnung eines (Konvoi-) Dampferzeugers ohne Vorwärmkammer mit eingezeichneten Schweißnähten

Die Dampferzeuger-Heizrohre sind auf der Primärseite des Heizrohrbodens eingeschweißt und werden danach an der oberen und unteren Stirnseite des Rohrbodens fest eingewalzt (s. Abb. 6.4). Dabei kann jede Verbindung (sowohl Einwalzung als auch die Schweißnaht) für sich die maximal möglichen Belastungen ertragen. Durch die Einwalzung wird außerdem der Fertigungsspalt zwischen Rohren und Rohrboden verschlossen, um Korrosion in diesem Spalt zu verhindern. Die Dampferzeuger-Heizrohre werden auf der Sekundärseite in Rohrhaltergittern aus austenitischen Stäben gehalten.

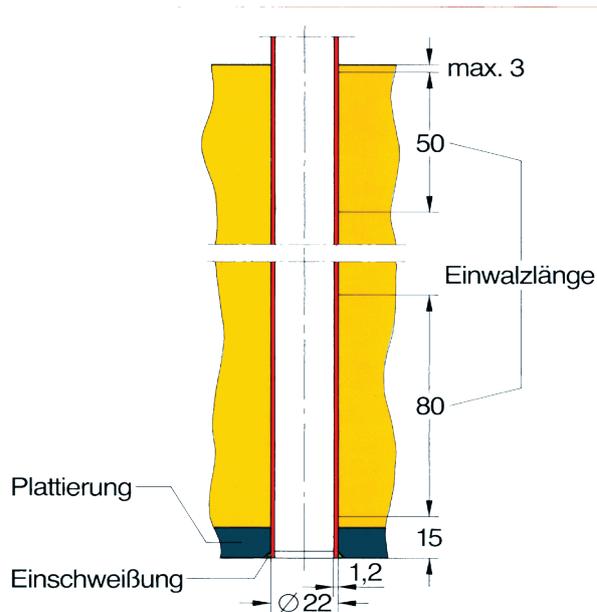


Abb. 6.4 Einschweißung und Einwalzung eines DE-Heizrohres in den Rohrboden

Der Dampferzeuger besitzt verschiedene Stutzen kleinerer Nennweite für Abschlämmung und Instrumentierung. Diese sind aus geschmiedetem und mechanisch bearbeitetem Stabstahl aus dem Werkstoff 15 Mo 3 gefertigt. Als Schraubenwerkstoff für die Schrauben der Hand- und Mannlochdeckel kommt der Stahl 1.6578, für die Muttern und Dehnhülsen der Stahl 1.6582 zum Einsatz. Aus Transportgründen werden die Dampferzeuger in jeweils vier Teilen (ein Primär- und drei Sekundärteile) auf die Baustelle geliefert. Dort werden die drei benötigten Rundnähte im Sekundärteil geschweißt und die erforderlichen Wärmebehandlungen durchgeführt.

Qualitätssicherung vor, während und nach der Herstellung inkl. der durchzuführenden Prüfungen sind vergleichbar denen am RDB. Während der Druckprobe werden zur Kontrolle der Ergebnisse der Berechnungen Dehnungsmessungen durchgeführt.

6.2.5 Druckhalter und Druckhalter-Abblasebehälter

Der Druckhalter besteht aus zwei Mantelringen (KBR: Druckhalter mit drei Mantelringen), oberer und unterer Kalotte in Form von Halbkugelböden sowie verschiedenen Stutzen.

Bei den noch in Betrieb befindlichen Anlagen besteht der zylindrische Teil des Druckhalters aus nahtlosen Schmiederingen, welche aus den Werkstoffen 20 MnMoNi 5 5 oder

22 NiMoCr 3 7 gefertigt wurden. Nur bei älteren bereits abgeschalteten Anlagen wurden längsnahtgeschweißte Ringe verwendet /BMU 13/.

Die obere und untere Kalotte wurden aus Blechen des gleichen Feinkornbaustahls wie die Mantelringe warm gepresst. Sofern hierfür keine vergüteten Bleche verwendet wurden, folgte noch eine Vergütung der Bauteile. Je nach Anlage wurden noch Stutzen angeschmiedet (Sprühstutzen, Sicherheitsventil- und Abblaseventilstutzen, Mannlochstutzen) oder bereits innen plattierte Stutzen eingeschweißt (Sprühstutzen, Sicherheitsventil- und Abblaseventilstutzen). Im Fall der eingeschweißten Stutzen erfolgte nach einer Spannungsarmglühung die Plattierung der Böden, gefolgt von einer weiteren Spannungsarmglühung. Im Fall der angeschmiedeten Stutzen wurde die innere Oberfläche plattiert und anschließend spannungsarm gegläht. Im Anschluss wurden die Böden mit dem zylindrischen Teil verschweißt und alle noch freien inneren Stellen schweißplattiert. Zuletzt erfolgte noch eine abschließende Spannungsarmglühung.

Der Stutzen für die Volumenausgleichsleitung ist in den unteren Mantelring eingeschweißt. Ebenso ist in einigen Anlagen der Mannlochstutzen im oberen Ring eingeschweißt, sofern er nicht in die obere Kalotte integriert ist. Weitere kleinere Stutzen (Messstutzen, Entwässerungstutzen, Impulsleitungstutzen) wurden durch Bohrungen gesteckt und eingeschweißt. Gleiches gilt für die Heizstäbe in der unteren Kalotte.

Der Druckhalter-Abblasebehälter ist ein stehender zylindrischer Behälter, der oben und unten mit Kalotten in Form von Korbbogenböden verschlossen ist. Durch den oberen Boden wird das Zuführungsrohr (Dom) für den Abblasedampf eingeführt. Der zylindrische Teil und die beiden Kalotten sind aus walzplattierten Blechen (Plattierungswerkstoff 1.4541) aus dem Feinkornbaustahl WStE 47 gefertigt. Das Zuführungsrohr und die Einbauten sind ebenfalls aus 1.4541 gefertigt.

6.3 Fertigung sonstiger Komponenten

Neben den Rohrleitungen und dem Reaktordruckbehälter sind in der DFU noch Armaturengehäuse und in DWR die Gehäuse der Hauptkühlmittelpumpen als passive Komponenten zu finden. Die Fertigung dieser Komponenten wird im Folgenden dargestellt.

6.3.1 Gehäuse der Hauptkühlmittelpumpen

Anforderungen an Pumpengehäuse werden in KTA 3201.2 /KTA 17d/, Abschnitt 5.3.3 präzisiert. Gehäuse von Hauptkühlmittelpumpen (HKMP) gibt es in geschmiedeter oder gegossener Form. In Vorkonvoi- und Konvoi-Anlagen wurden geschmiedete Gehäuse mit komplexer Geometrie verwendet. Geschmiedete Gehäuse werden nicht vollständig durch Schmieden hergestellt, sondern aus Schmiedeblocken mechanisch herausgearbeitet. Die Saug- und Druckstutzen sind bei diesen an den Gehäusedruckkörper angeschmiedet /ILG 08/. Für geschmiedete Pumpengehäuse wurde ferritischer Stahl (20 MnMoNi 5 5 oder 22 NiMoCr 3 7) und für gegossene Pumpengehäuse der ferritische Stahlguss GS18 NiMoCr 3 7 oder GS18 NiMoCr 3 8 verwendet. Die mit Primärkühlmittel in Berührung kommenden Oberflächen sind mit einem austenitischen Werkstoff schweißplattiert. Anforderungen an die ferritischen Werkstoffe für Hauptkühlmittelpumpen-Gehäuse sind in KTA 3201.1 /KTA 17a/ geregelt. Diese enthält auch Werkstoffkenn- daten zu den oben genannten Stählen 20 MnMoNi 5 5 und GS18 NiMoCr 3 7.

Der Gusswerkstoff GS18 NiMoCr 3 7 für gegossene Pumpengehäuse wurde im Elektro- ofen erschmolzen. Nach dem Abguss wurde die Oberfläche mechanisch bearbeitet. Es folgten eine Luft- und danach eine Wasservergütung. Zum Anschluss der Hauptkühlmit- telleitungen sind an den Kühlmittlein- und -austrittsstutzen Schmiederinge aus 22 NiMoCr 3 7 vorgeschweißt. Die Innenoberflächen wurden anschließend dreilagig handplattiert.

6.3.2 Armaturengehäuse

Auch bei den Armaturengehäusen finden sich gegossene und geschmiedete Varianten. Allgemeine Anforderungen sind in KTA 3201.2 /KTA 17d/, Abschnitt 5.2.4 zu finden. In den 1970er Jahren wurden oftmals gegossene Gehäuse durch geschmiedete ausge- tauscht, da sich deren Prüfung als zuverlässiger herausgestellt hatte /BAB 03/. Ge- schmiedete Gehäuse können durch Freiformschmieden (s. Abschnitt 3.2.1) oder Ge- senkschmieden (s. Abschnitt 3.2.2) hergestellt werden /KTA 17a/. Durch das Umformen beim Schmiedevorgang wird die Qualität des Werkstoffs verbessert, Fehlstellen wie Lun- ker werden beseitigt /BAB 03/. KTA 3201.1 enthält Anforderungen an die Prüfung ge- gossener Armaturengehäuse aus austenitischem Stahlguss und geschmiedeter Arma- turengehäuse aus vergütetem Stahl. Fertigungs- und Konstruktionsschweißungen

geschmiedeter Armaturengehäuse müssen im Allgemeinen erneut vergütet werden. Fertigungsschweißungen an Armaturengehäusen aus austenitischem Stahlguss werden im Allgemeinen lösungsgeglüht und abgeschreckt /KTA 17a/.

7 Sicherheitstechnische Auswirkungen fertigungsbedingter Abweichungen auf die Integrität der Komponenten

Fertigungsbedingte Abweichungen an Komponenten der DFU traten in deutschen und internationalen Anlagen nur selten auf. Die bestehenden Regelungen und Anforderungen zur Fertigung dieser Komponenten garantieren in der Regel die notwendige Qualität dieser Komponenten. Dennoch wurden vereinzelt fertigungsbedingte Abweichungen und Fehler auch an einigen laufenden (Doel-3, Tihange-2, Beznau-1) und neu erstellten Anlagen (Flamanville-3) festgestellt, die im folgenden Abschnitt untersucht werden.

7.1 Seigerungen in den Deckel- und Bodenkalotten des RDB für die Anlage Flamanville-3

Ein bekanntes Beispiel für fertigungsbedingte Abweichungen sind die Befunde an den EPR-Deckel- und Bodenkalotten des EPR in Flamanville (Frankreich), die Ende 2014 festgestellt wurden /ASN 17/. Es handelt sich dabei um Makroseigerungen, die vor allem eine inhomogene Verteilung des Kohlenstoffs verursachen (siehe Abschnitt 3.1.5.1). Die Deckel- und Bodenkalotten wurden 2006/07 in der französischen Schmiede Creusot Forge gefertigt, die heute zu Framatome (damals Areva) gehört. Der Fertigungsprozess für die Deckel- und Bodenkalotten für Flamanville-3 entspricht grundsätzlich der traditionellen französischen Fertigung dieser Teile. Die Kalotten für den EPR haben jedoch einen größeren Durchmesser als die der Vorgängeranlagen vom Typ N4. Die Deckelkalotte ist zudem deutlich dicker, da sie mehr Durchführungen enthält. Die Bodenkalotte enthält hingegen keine Durchführungen mehr und ist daher dünnwandiger. Beide Kalotten wurden dennoch ausgehend von gleich großen Gussblöcken gefertigt, deren Gewicht deutlich über dem früher gefertigter Kalotten lag. Für die Kalotten wird der Stahl zunächst in einer großen Form als Block abgegossen, bevor er zu einer Scheibe gepresst und anschließend geschmiedet wird, siehe Abb. 7.1.

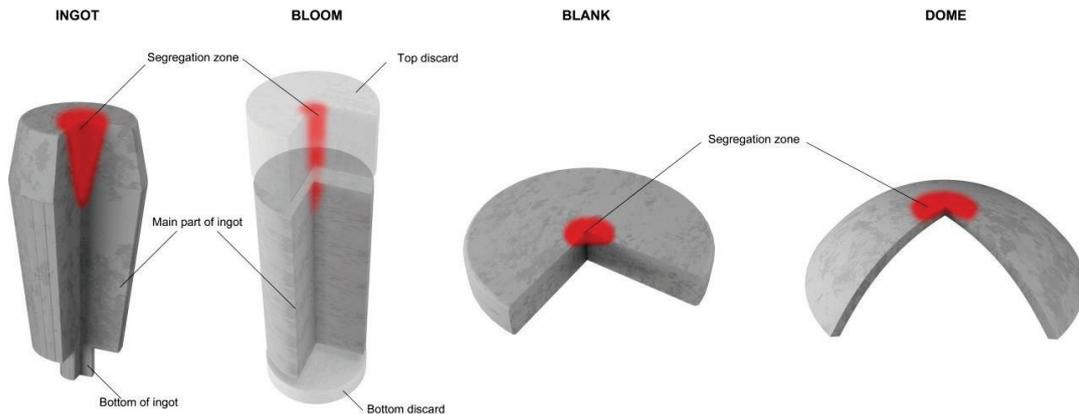


Abb. 7.1 Verbleib des Bereichs positiver Seigerung im Gussblock (rot) bei der Herstellung der RDB-Kalotten für den EPR von Flamanville-3 (aus /ASN 17/ in englischer Übersetzung)

In den Gussblöcken kommt es beim Erstarren aus der Schmelze immer zur Anreicherung von Kohlenstoff und Begleitelementen im oberen Bereich (siehe rot eingefärbte „segregation zone“ in Abb. 7.1). Mit zunehmender Größe der Blöcke treten diese Seigerungen verstärkt auf. Bei der Herstellung von Kalotten können diese Seigerungen in der Mitte des Gussblocks auch nicht, wie bei Mantelringen üblich, ausgelocht werden. Daher müsste der Bereich mit ausgeprägten Seigerungen abgeschlagen und verworfen werden („top discard“) und der verbliebene Teil durch Schmieden und eventuell zusätzliches Stauchen möglichst homogen verteilt werden. Beides ist im Falle dieser RDB Kalotten offensichtlich nicht in ausreichendem Maße geschehen, so dass ein Bereich mit deutlich erhöhtem Kohlenstoffgehalt im Zentrum der Kalotten verblieben ist. Wie nachfolgende Untersuchungen zeigten (s. u. Punkte 1 bis 4) ist der Kohlenstoffgehalt im Bereich der Seigerung auf der Außenseite am höchsten (gemessen wurden bis etwa 0,3 %, rote Messpunkte 1 bis 5 in den Positionen 0 bis 50 mm in Abb. 7.2), nimmt innerhalb der Wanddicke mit zunehmender Tiefe ab und erreicht erst in größerer Tiefe (bei etwa $\frac{1}{2}$ bis $\frac{3}{4}$ T) den höchsten nach Spezifikation zulässigen Wert von $c_{\max} = 0,22$ %. Höhere Kohlenstoffgehalte führen einerseits zu einer erhöhten Festigkeit, andererseits aber zu einer geringeren Zähigkeit des Werkstoffs. Abb. 7.2 zeigt die Korrelation zwischen Kohlenstoffgehalt und Schlagenergie bei 0 °C als Maß für die Zähigkeit für eine zerstörend geprüfte Deckelkalotte. Nach gültigem Regelwerk ESPN /ESP 05/ muss dieser Wert überall ≥ 60 J sein.

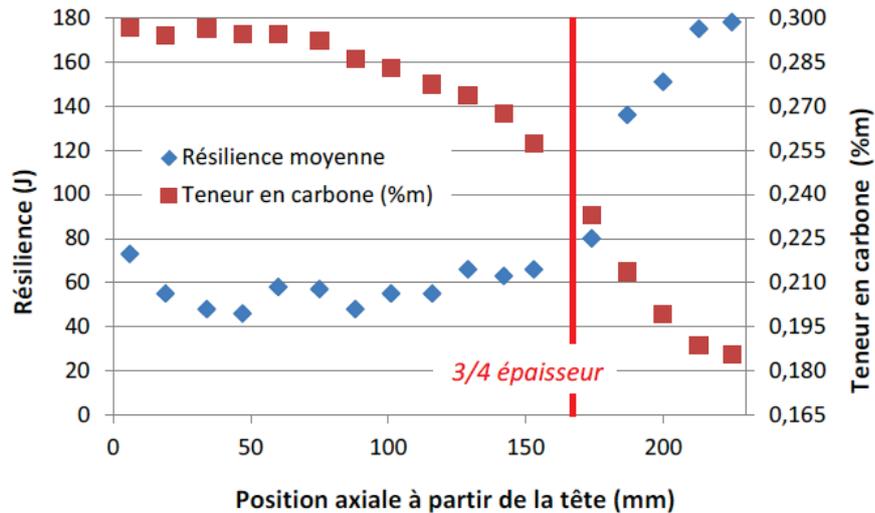


Abb. 7.2 Die Korrelation von Schlagenergie („Resilience“) und Kohlenstoffgehalt („Teneur en carbone“) aus einem Tiefenprofil durch die Wand im Zentrum einer zerstörend geprüften Deckelkalotte (UA S) (aus /ASN 17/)

Die axiale Position „0“ entspricht der äußeren Oberfläche.

In den Schlagenergie-Kurven in Abhängigkeit von der Temperatur spiegelt sich die niedrigere Zähigkeit in einer Verschiebung des Spröde-Duktil-Übergangs zu höheren Temperaturen und einer niedrigeren Hochlage, siehe Abb. 7.3.

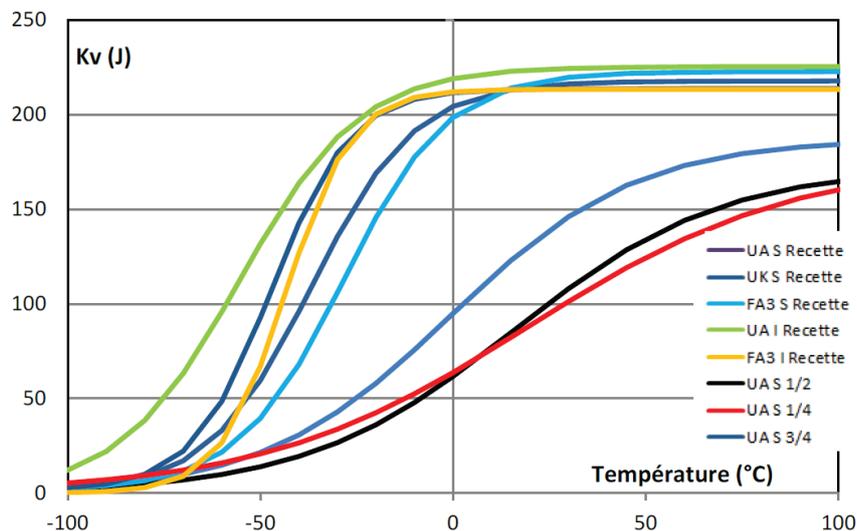


Abb. 7.3 Schlagenergie in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt an Proben aus den Deckelkalotten UA S, UK S und der Bodenkalotte UA I (aus /ASN 17/)

Die Proben wurden an dem von RCC-M für die Abnahmeprüfung vorgesehenen Ort am Rand („Recette“) bzw. aus der Mitte der Kalotten in verschiedener Tiefe ($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}T$) von der äußeren Oberfläche entnommen.

Diese ausgeprägte Seigerungszone wurde vom Hersteller nicht erkannt, da er die Qualifizierung des Herstellungsprozesses nach dem bisher üblichen Verfahren nach dem Industriecode RCC-M durchgeführt hatte und sich dabei auf die Erfahrung mit der Herstellung vergleichbarer, jedoch deutlich kleinerer Teile berief. Für die Abnahmeprüfung sieht RCC-M für derartige Teile eine Probenentnahme am Rand der Kalotten vor und damit aus einem nicht (oder sogar negativ) geseigerten Bereich, siehe Abb. 7.1 und Abb. 7.3. Da die französische Aufsichtsbehörde ASN mit diesem Vorgehen das neue Regelwerk für druckführende Komponenten ESPN /ESP 05/ als nicht erfüllt ansah und die Gefahr der Seigerungen erkannte, forderte sie einen nachträglichen Nachweis der vom Regelwerk geforderten mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Zähigkeit. Der Hersteller hat daraufhin einen detaillierten Nachweis geführt, der folgende Schritte umfasst:

1. Umfangreiche zerstörende Untersuchungen, bei denen über 1.500 Proben aus drei bei Creusot Forge nach dem gleichen Verfahren hergestellten Kalotten geprüft wurden. Dabei handelt es sich um die Deckelkalotten UA S, UK S und die Bodenkalotte UA I, die jeweils für Anlagen in den USA (UA) und in Großbritannien (UK) angefertigt worden waren. Diese zeigten ein für diesen Stahltyp „normales“ Verhalten der Proben, bei erhöhtem Kohlenstoffgehalt jedoch eine deutlich abgesenkte Zähigkeit (siehe Abb. 7.2 und Abb. 7.3). Aufgrund der Ähnlichkeit der Herstellungsparameter werden diese Ergebnisse als repräsentativ für die Kalotten von Flamanville-3 angesehen und es wurden daraus Werte für die Zähigkeit und die Spröde-Duktil-Übergangstemperatur RT_{NDT} ermittelt, die für die Kalotten von Flamanville-3 als konservativ angesehen werden. Außerdem wurde thermische Alterung aufgrund möglicher Segregation erhöhter Phosphorgehalte in den Seigerungsbereichen durch eine Erhöhung der RT_{NDT} pauschal berücksichtigt.
2. Durch thermohydraulische und thermomechanische Rechnungen wurden die ungünstigsten Beanspruchungen der Kalotten bei betrieblichen und störfallbedingten Transienten bestimmt.
3. Durch zerstörungsfreie Untersuchungen an den Kalotten von Flamanville-3 wurde die Größe der möglicherweise vorhandenen Risse eingegrenzt. Daraus ergeben sich zu postulierende Rissgrößen verschiedener Risslagen (z. B. außen an der Oberfläche, in der Wand, innen unter der Plattierung, jeweils mit verschiedenen Orten und Orientierungen).

4. Anhand von bruchmechanischen Berechnungen werden die ungünstigsten Beanspruchungen der postulierten Risse bestimmt. Diese müssen ausreichende (nach Möglichkeit die vom Regelwerk vorgegebenen) Sicherheitsabstände von der Beanspruchbarkeit des Werkstoffs aufweisen, um Rissfortschritt bzw. Bruch ausschließen zu können. Dabei wurden die nach Punkt 1 ermittelten Werte für die Erhöhung der RT_{NDT} berücksichtigt.

Auf der Basis dieser Untersuchungen hat ASN dem Einsatz der bereits verbauten RDB-Kalotten in Flamanville-3 zugestimmt. Allerdings wird EDF aufgefordert, sogleich einen neuen RDB-Deckel zu bestellen, der dann bis 2024 gegen den alten ausgetauscht werden kann. Hintergrund ist die eingeschränkte Prüfbarkeit des Deckels außerhalb der Seigerungszone. Diese Einschränkung bei Wiederkehrenden Prüfungen erscheint ASN für einen RDB-Deckel mit nicht regelwerkskonformen Eigenschaften, für den aber Bruchausschluss in Anspruch genommen wird, nicht akzeptabel. Für die Bodenkalotte ist dagegen eine vollständige Prüfung nach zehn Jahren Betrieb vorgesehen. Außerdem stehen Ergebnisse von Langzeituntersuchungen zur thermischen Alterung des Werkstoffs mit erhöhtem Kohlenstoffgehalt noch aus. Diese sollen „beschleunigt“ bei Temperaturen oberhalb der Betriebstemperatur durchgeführt werden, dauern aber dennoch über zehn Jahre /ASN 18/.

7.2 Seigerungen in Dampferzeugern französischer Anlagen

Im Rahmen der Untersuchungen zu den Seigerungen in den EPR-RDB-Deckel- und Bodenkalotten (s. o.) wurden im Jahr 2016 weitere, bereits gelieferte Schmiedestücke entdeckt, die aufgrund des Herstellungsprozesses ausgeprägte Seigerungszone („Anomalien“ genannt) aufweisen könnten und Teile von Komponenten in französischen Anlagen sind. Dieses sind Dampferzeuger-Bodenkalotten, -Rohrböden und -Dome, sowie RDB-Deckel, bei denen Flansch und Deckel in einem Stück geschmiedet wurden /ASN 16a/. Während für die meisten betroffenen Komponenten gezeigt werden konnte, dass die durch die „Anomalien“ veränderten Werkstoffeigenschaften keine Auswirkungen auf die Sicherheit haben, werden diejenigen an den Dampferzeuger-Bodenkalotten als sicherheitstechnisch relevant angesehen. Davon sind 46 Dampferzeuger in 18 Reaktorblöcken betroffen. Bei der Bewertung ist wiederum nach den beiden Herstellern Creusot Forge (CF) und Japan Casting and Forging Corporation (JCFC) zu unterscheiden, bei den Kalotten von JCFC zusätzlich noch nach der Größe des Abgusses von 90 t oder 120 t. An letzteren ergaben Messungen in den Anlagen Tricastin-1 und -3 maximale

Kohlenstoffkonzentrationen bis 0,39 %. Bei diesen Schmiedeteilen könnte ggf. eine deutlich abgesenkte oder örtlich sehr inhomogene Zähigkeit vorliegen /IRSN 16a/.

Nach Bekanntwerden dieser Erkenntnisse veranlasste ASN im Jahr 2016, dass bei sieben Reaktorblöcken die Dampferzeugerkalotten während der jährlichen Revision überprüft werden²¹. Bei weiteren fünf Blöcken seien diese Überprüfungen im Laufe der folgenden drei Monate vorzusehen²². Bei diesen Überprüfungen werden zerstörungsfreie Prüfungen der Kalotten durchgeführt sowie der Kohlenstoffgehalt an den äußeren Oberflächen bestimmt. Auf der Basis der seinerzeit durchgeführten Messungen wurde ein maximaler Kohlenstoffgehalt von 0,39 % an der Außenseite und 0,26 % an der Innenseite angenommen /ASN 16b/, /IRSN 16b/.

Für eine Korrelation der Zähigkeit mit dem Kohlenstoffgehalt wurde bereits eine noch nicht im Betrieb befindliche Kalotte zerstörend geprüft, weitere sollen folgen. Solange keine belastbare Datenbasis vorliegt, werden für eine bruchmechanische Bewertung sehr konservative Annahmen für die Zähigkeit in der Seigerungszone gemacht: Eine Verschiebung der Spröde-Duktil-Übergangstemperatur RT_{NDT} von 180 °C auf der Außenseite und 70 °C auf der Innenseite und eine Schlagenergie in der Tieflage von 20 MPa \sqrt{m} /IRSN 16b/.

Außerdem wurden die für eine mögliche Rissinitiierung ungünstigsten Transienten ausgewählt (kalte und heiße „Thermoschocks“) und die daraus resultierenden Beanspruchungen der zu postulierenden Risse modelliert. Größe und Lage der zu postulierenden Risse sind auf der Basis der durchgeführten zerstörungsfreien Prüfungen zu rechtfertigen. Für einige besonders ungünstige Transienten sind betriebliche Maßnahmen umzusetzen, um diese Transienten nach Möglichkeit zu vermeiden /IRSN 16b/.

Damit konnte für die 900 MW-Anlagen der Nachweis erbracht werden, dass sich schnell ausbreitende Brüche ausgeschlossen werden können. Für die ebenfalls betroffenen 1.450 MW-Anlagen lagen seinerzeit noch keine ausreichenden Nachweise vor /ASN 16b/, /IRSN 16b/. Darüber hinaus untersucht ASN mögliche Verbesserungen der Qualitätssicherung und Überwachung, um solche „Anomalien“ in Zukunft zu vermeiden.

²¹ Dabei handelt es sich um die Blöcke Tricastin-1 und -3, Bugey-4, Dampierre-3, Gravelines-2, Saint-Laurent-des-Eaux-B1 und Civaux-2.

²² Es handelt sich dabei um die Blöcke Civaux-1, Fessenheim-1, Gravelines-4 sowie Tricastin-2 und -4.

7.3 Befunde im RDB von Beznau-1

Im August des Jahres 2012 informierte die belgische Aufsichtsbehörde FANC die ausländischen Aufsichtsbehörden, dass im belgischen Kernkraftwerk Doel-3 zahlreiche Befunde im Grundmaterial der Reaktordruckbehälter festgestellt wurden /ENSI 18a/. Als Ursache für diese Anzeigen im RDB von Doel-3 werden Wasserstoff-Flockenrisse verantwortlich gemacht. Daraufhin forderte das ENSI Informationen zur Herstellung der RDB von Mühleberg, Leibstadt, Beznau-1 und -2 sowie Gösgen an. Der RDB der Anlage Mühleberg besteht im Wesentlichen aus Bauteilen, die vom gleichen Hersteller (Rotterdamsche Droogdok Maatschappij) geschmiedet wurden. Das Kernkraftwerk Mühleberg führte noch während der Jahresrevision eine Ultraschallprüfung am RDB nach den Vorgaben des ENSI durch. Es ergaben sich dabei keine Hinweise auf Befunde wie im KKW Doel-3. Der RDB des KKW Leibstadt unterscheidet sich bezüglich Hersteller und Herstellungsprozess von den belgischen Reaktoren. Für die zylindrischen Mantelringe, den gewölbten Boden und für den Deckel wurden gewalzte Bleche anstatt geschmiedeter Teile verwendet. Da Bleche weniger zu Wasserstoff-Flockenrisen neigen als Schmiedeteile, wurden die Untersuchungen der Befunde von Doel-3 und Tihange-2 für diese Anlage als weniger bedeutend angesehen /ENSI 15a/, /ENSI 18a/.

Als Reaktion auf die Befunde und auf WENRA-Empfehlungen hin forderte das ENSI Axpo als Betreiber auf, repräsentative Ultraschallprüfungen an den Schmiederingen der RDB von Beznau-1 und -2 sowie von Gösgen durchzuführen. Dies sollte im Zusammenhang mit den nächsten anstehenden wiederkehrenden Prüfungen der Schweißnähte erfolgen /ENSI 18a/. In der Jahresrevision im Jahr 2015 im KKW Gösgen wurde daraufhin neben der alle zehn Jahre durchgeführten umfassenden Ultraschallprüfung der RDB-Innenseite die geforderte spezifische Prüfung durchgeführt. Es wurden keine relevanten Anzeigen gefunden. ENSI erteilte Gösgen nach Abschluss der Revision die Genehmigung zum Wiederauffahren /ENSI 15b/.

Im Rahmen der Jahresrevision 2015 wurde auch der RDB von Beznau-2 untersucht. Bei der Prüfung wurden in den drei wichtigsten Schmiederingen insgesamt 77 Anzeigen festgestellt. 34 Einzelanzeigen konnten im Schmiedering C nachgewiesen werden. Dieser ist den höchsten Belastungen ausgesetzt. Die festgestellten Anzeigen sind meist punktförmig, ohne erkennbare Ausdehnung. Daneben finden sich auch etwas größere Einzelanzeigen. Alle gefundenen Anzeigen im Grundmaterial erwiesen sich als zulässig gemäß den geltenden Akzeptanzkriterien der American Society of Mechanical Engineers

(ASME). Die Axpo konnte nachweisen, dass der RDB die Sicherheitsanforderungen erfüllt. Die Prüfergebnisse wurden vom Schweizerischen Verein für technische Inspektionen (SVTI) kontrolliert. Dieser bestätigte die Bewertung der beauftragten Prüffirma. Eigene bruchmechanische Bewertungen des ENSI konnten ebenfalls bestätigen, dass die Anzeigen auch unter konservativen Annahmen zulässig sind. Das ENSI erteilte Beznau-2 im Dezember 2015 die Freigabe zum Wiederanfahren /ENSI 15c/ /ENSI 18a/.

Bei den Ultraschallprüfungen am RDB von Beznau-1 wurden, ebenfalls in der Jahresrevision 2015, zahlreiche (knapp 1.000) bewertungspflichtige Anzeigen festgestellt. Das ENSI forderte eine Bewertung dieser Befunde /ENSI 18a/. Die Abklärung der Befunde sollte die drei Schritte „Untersuchen“, „Charakterisieren“ und „Bewerten“ umfassen. Der erste Schritt beinhaltet eine detaillierte Auswertung der Ultraschallergebnisse als Voraussetzung für eine bruchmechanische und sicherheitstechnische Bewertung der Anzeigen. Insbesondere ein Ausmessen hinsichtlich Größe und Lage der gefundenen Anzeigen ist dafür erforderlich. Der zweite Schritt beinhaltet eine Charakterisierung von Art und Ursache der Befunde. Im dritten Schritt sollte geprüft werden, wie der RDB durch die Befunde geschwächt wird und ob die Anforderungen des Regelwerks weiterhin erfüllt sind /ENSI 15a/.

Im November 2015 reichte Axpo einen Projektplan zur Bewertung der Befunde in Beznau-1 beim ENSI ein. Das ENSI ernannte ein internationales Expertengremium²³ (International Review Panel (IRP)), welches auch in die Prüfung dieses Plans sowie der Analysen und Bewertung durch die Axpo einbezogen werden sollte. In dem Projektplan sollten Schritte und Methodik zur Charakterisierung und Bewertung der Befunde aufgezeigt werden. Insbesondere sollte durch das ENSI beurteilt werden, ob die ausgewählte Methode ausreichen würde, um eine verlässliche Aussage über die Integrität des RDB zu machen /ENSI 15d/.

Im Frühjahr 2016 konnte von Axpo im Rahmen von verfeinerten Ultraschallprüfungen aufgezeigt werden, dass es sich bei den Einschlüssen im RDB des Kernkraftwerks Beznau-1 (KKB 1) um Aluminiumoxid-Einschlüsse bzw. in einigen Bereichen um Ansammlungen solcher Einschlüsse handelt. Diese Erkenntnisse konnten durch Materialuntersuchungen an einer Replika des Rings C (dieser enthält die meisten Unregelmäßigkeiten)

²³ International anerkannte Experten mit vertieftem Wissen u. a. in den Bereichen Integritätsnachweise von Reaktordruckbehältern, Materialuntersuchungen, Herstellung von großen Schmiedestücken und zerstörungsfreie Prüfmethoden

bestätigt werden und validierten laut Axpo die These, dass die Unregelmäßigkeiten herstellungsbedingt und nicht betriebsinduziert sind. Die Replika wurde gemäß den in den 1960er Jahren geltenden, dokumentierten Herstellungsbedingungen angefertigt. Sie entspricht in der chemischen Zusammensetzung und den mechanischen Eigenschaften weitgehend dem originalen Ring C. Der RDB wurde in den 1960er Jahren in der Schmiede Creusot Forge hergestellt. Gemäß den damals gültigen Richtlinien für die Fertigung wurde im Gießprozess Aluminium zur Bindung des Sauerstoffs zugegeben. An mehreren hundert Materialproben aus dieser Replika wurden zerstörende Festigkeitsversuche (Zug- und Sprödbbruchfestigkeit) durchgeführt. Durch Materialprüfungen und metallographische Analysen wurde gezeigt, dass die Aluminiumoxid-Einschlüsse sich nicht negativ auf die Materialeigenschaften des RDB auswirken. Dies wurde aufgrund theoretischer Überlegungen auch für die Empfindlichkeit gegenüber Neutronenverstrahlung angenommen. In einem weiteren Schritt wurden Integritätstests und -berechnungen gemäß gültiger nationaler Bestimmungen (ENSI-Richtlinien) und internationaler Vorschriften (ASME-Code) durchgeführt. Damit wurde nachgewiesen, dass die Einschlüsse die Festigkeit des RDB nicht beeinträchtigen /AXP 18a/, /AXP 18b/.

Nachdem Axpo die Unterlagen zur Charakterisierung und Bewertung der Befunde im Grundmaterial des RDB von Beznau-1 eingereicht hatte, begannen das ENSI sowie die Expertengruppe mit der Prüfung. Daraufhin forderte das ENSI zusätzliche Proben /ENSI 18a/. Im Dezember 2017 reichte Axpo den ergänzten Sicherheitsnachweis beim ENSI ein /ENSI 18a/. Im Jahr 2018 akzeptierte das ENSI den Nachweis der Sicherheit des RDB von Beznau-1 durch Axpo. Es kam zu dem Schluss, dass die nichtmetallischen Einschlüsse keine Auswirkung auf die Sicherheit des RDB haben, und sah keine weiteren Gründe gegen eine Wiederinbetriebnahme der Anlage /ENSI 18b/, /ENSI 18a/.

8 Zusammenfassung

Das Zusammenspiel zwischen Werkstoffauswahl, geeigneten Fertigungsverfahren, vorgesehenen Prüfverfahren und weiteren Qualitätssicherungsmaßnahmen bestimmt, inwiefern die notwendige Qualität bei der Herstellung von Komponenten der DFU sichergestellt werden kann und den Vorgaben im Regelwerk genügt. Um dies zu erreichen, müssen alle Fertigungsschritte und anzuwendenden Prüfverfahren qualifiziert werden, bevor sie angewandt werden dürfen. Ebenso müssen die Hersteller und das ausführende Personal über entsprechende Qualifikationen verfügen.

Das Ausgangsmaterial für die herzustellenden Komponenten sind Gussstücke, die durch unterschiedliche Gießverfahren (Sandgießen, Kokillengießen, Stranggießen, Schleudergießen) hergestellt und dann weiterverarbeitet werden können. Dieser Fertigungsschritt wird durch Prüfungen, insbesondere chemische Analysen – sowohl der Schmelze als auch des Gussstücks – begleitet. Ebenso werden hier Proben für zerstörende Prüfungen oder mitlaufende Proben für die weiteren Fertigungsschritte entnommen.

Je nach Komponente erfolgt eine Weiterverarbeitung mit unterschiedlichen Umformverfahren (Freiformschmieden, Gesenkschmieden, Walzen, Kumpeln, Biegen) bis hin zur gewünschten Endform des Halbzeugs (z. B. Mantelschüsse, Kalotten, Stutzen) oder der Komponente (z. B. Gehäuse, Rohre, Rohrbogen). Das Umformen kann als Warmumformen oder Kaltumformen durchgeführt werden.

Für das Fügen der Bauteile stehen verschiedene Schweißverfahren zur Verfügung. Die Vorbereitung, Durchführung und Prüfung von Schweißungen darf nur nach vorher festgelegten Schweißplänen erfolgen. Während des Schweißens und nach Fertigstellung der Schweißnaht oder Plattierung erfolgen ausführliche Prüfungen, um eine optimal gefertigte Schweißverbindung oder Plattierung sicherzustellen.

Unterschiedliche Wärmebehandlungen werden durchgeführt, um die gewünschten Werkstoffeigenschaften einzustellen. Ein Diffusionsglühen oder das Wasserstoffarmglühen an den Gussstücken kann bereits vor den nachfolgenden Umform- oder Schweißprozessen notwendig sein, um ein homogeneres Gefüge im Werkstoff zu erzeugen und die Entstehung von Fehlern durch noch vorhandenen Wasserstoff zu vermeiden. Andere Wärmebehandlungsschritte erfolgen nach dem Umformen oder dem Schweißen (z. B. Spannungsarmglühung, Vergüten). Alle Wärmebehandlungen erfolgen nach vorher festgelegten Plänen und werden protokolliert.

In der gesamten Fertigungskette können unterschiedliche Fehler oder Abweichungen auftreten, die in der Regel durch eine optimierte Prozessführung und die Einhaltung von Vorgaben vermieden oder minimiert werden können. So können moderne Gießsysteme den Eintrag von Wasserstoff oder Sauerstoff in die Schmelze und damit das Auftreten von Einschlüssen oder Gasporositäten minimieren. Andere bekannte Abweichungen wie Makroseigerungen in großen Gussblöcken können z. B. nur durch die Entfernung von bestimmten Bereichen beseitigt werden. Mögliche Fehler bei den Umformprozessen betreffen in der Regel die Oberfläche der Halbzeuge und Komponenten und können durch eine Nachbearbeitung beseitigt werden oder werden z. B. im Rahmen einer Oberflächenbehandlung als Vorbereitung für das Schweißen oder Plattieren entfernt. Verschiedenartige Schweißfehler können sowohl an der Oberfläche einer Schweißlage als auch im Schweißgut auftreten. Durch geeignete Prüfungen können diese noch während der Fertigung entdeckt und beseitigt werden.

Im KTA-Regelwerk (Deutschland), dem ASME Code (USA), dem RCC-M Code (Frankreich) und dem russischen Regelwerk sind die für Komponenten der DFU zulässigen Werkstoffe beschrieben. Enthalten sind jeweils jene Werkstoffe, die in den das jeweilige Regelwerk anwendenden Anlagen üblicherweise zum Einsatz kommen. Umform-, Schweiß- und Wärmebehandlungsverfahren müssen gemäß dem anzuwendenden Regelwerk qualifiziert werden, bevor sie bei der Fertigung angewandt werden dürfen. Ebenso werden für die Prüfverfahren, mit denen die Qualität der Halbzeuge, Schweißnähte und Komponenten überprüft und sichergestellt wird, umfangreiche Festlegungen getroffen.

Als Beispiele für fertigungsbedingte Abweichungen aus der jüngeren Vergangenheit wurden Einzelfälle von Befunden in Komponenten der DFU beschrieben, die auf Seigerungszone und Einschlüsse zurückzuführen sind. Eine Bewertung dieser Befunde gemäß Regelwerk war nicht möglich, da hier der Umfang an Fehlern oder Abweichungen und deren räumliche Verteilung nicht mehr durch das Regelwerk abgedeckt war. Die notwendigen Bauteileigenschaften mussten dementsprechend u. a. durch zusätzliche zerstörungsfreie Prüfungen, die Herstellung und zerstörende Prüfungen von repräsentativen Bauteilen sowie neue Berechnungen nachgewiesen und sichergestellt werden.

Literaturverzeichnis

- /ASN 16a/ Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) (Hrsg.): Liste des irrégularités détectées au sein de Creusot Forge. 22. September 2016.
- /ASN 16b/ Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN): Décision no CODEP-CLG-2016-02945 du 18 juillet 2016 du Président de l'Autorité de sûreté nucléaire suspendant le certificat d'épreuve du générateur de vapeur n° 335 fabriqué par AREVA NP, und begleitende Informationen. Juli 2016.
- /ASN 17/ ASN, IRSN: Analyse des conséquences de l'anomalie des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville sur leur aptitude au service, Rapport au Groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires, Version publique. Rapport ASN référencé CODEP-DEP-2017-019368, 15. Juni 2017.
- /ASN 18/ Décision n° 2018-DC-0643 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 9 octobre 2018 autorisant la mise en service et l'utilisation de la cuve du réacteur EPR de la centrale nucléaire de Flamanville (INB no 167) zuletzt geändert 9. Oktober 2018.
- /AXP 18a/ Axpo: KKB 1: ENSI bestätigt Sicherheitsnachweis - Wiederinbetriebnahme Ende März vorgesehen. März 2018.
- /AXP 18b/ Axpo: Sicherheitsbericht Kernkraftwerk Beznau, Reaktordruckbehälter Block 1, Beschreibung des Sicherheitsnachweises. März 2018.
- /BAB 03/ Babst, S., Heinsohn, H., Jendrich, U., Jungclaus, D., Köberlein, K., Kotthoff, K., Kreuser, A., Liemersdorf, H., Michel, F., Pfeffer, W., Reck, H., Rittig, D., Röwekamp, M., Schulz, H., et al.: Zur Sicherheit des Betriebs der Kernkraftwerke in Deutschland. Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 3. Aufl.: Köln, 2003.
- /BAL 14/ Ballesteros, A., Sanda, R., Peinador, M., Zerger, B., Negri, P., Wenke, R.: Analysis of events related to cracks and leaks in the reactor coolant pressure boundary. Nuclear Engineering and Design, Bd. 275, S. 163–167, 2014.

- /BDG 09a/ Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (Hrsg.): Der Kokillenguss von Gusseisen - ein Verfahren für Bauteile mit speziellen Eigenschaften. Online, erreichbar unter <https://www.guss.de/prozess/was-ist-giessen/giessverfahren/kokillengiessen-gusseisen>, abgerufen am 31. Januar 2022.
- /BDG 09b/ Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (Hrsg.): Lost-Foam-Verfahren - Vollformgießverfahren für die Serienfertigung von hochkomplexen Gussteilen. Online, erreichbar unter <https://www.guss.de/prozess/was-ist-giessen/giessverfahren/lost-foam-verfahren>, abgerufen am 31. Januar 2022.
- /BDG 09c/ Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (Hrsg.): Niederdruck-Sandgießen - ein wirtschaftliches Verfahren für kleine und mittlere Seriegussteile sowie Prototypen. Online, erreichbar unter <https://www.guss.de/prozess/was-ist-giessen/giessverfahren/niederdruck-sandgiessen>, abgerufen am 31. Januar 2022.
- /BDG 09d/ Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (Hrsg.): Druckgießen - Serienverfahren für hochkomplexe dünnwandige Leichtmetallgussteile. Online, erreichbar unter <https://www.guss.de/prozess/was-ist-giessen/giessverfahren/niederdruck-sandgiessen>, abgerufen am 31. Januar 2022.
- /BDG 09e/ Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (Hrsg.): Niederdruck-Kokillengießen - ein Herstellungsverfahren für Leichtmetallgussteile mit besonders hohen Anforderungen an Festigkeit, Dehnung, Druckdichtheit und Schweißbarkeit. Online, erreichbar unter <https://www.guss.de/prozess/was-ist-giessen/giessverfahren/niederdruck-kokillengiessen>, abgerufen am 31. Januar 2022.
- /BDG 10a/ Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (Hrsg.): Sandgießen - universelles und preiswertes Herstellungsverfahren für Gussteile aus allen Werkstoffgruppen. Online, erreichbar unter <https://www.guss.de/prozess/was-ist-giessen/giessverfahren/sandgiessen>, abgerufen am 31. Januar 2018.

- /BDG 10b/ Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie: Volumendefizite von Gussstücken aus Aluminium-, Magnesium- und Zinkgusslegierungen, BDG-Richtlinie P 202, VDG-Merkblatt. Stand September 2010.
- /BEN 97/ Benhamou, C., Poitrault, I., Pisseloup, J., Bocquet, P.: Improving Knowledge of the Metallurgical Features of Large Forgings by Optimizing the Experimental Test Program, 13th International Forgemasters Meeting. Korea Pusan, Oktober 1997.
- /BLE 10/ Bleck, W.: Werkstoffkunde Stahl für Studium und Praxis. 3. Aufl., Illustrationen, Diagramme, ISBN 3896538209, Mainz: Aachen, 2010.
- /BLE 11/ Bleck, W.: Werkstoffprüfung in Studium und Praxis. 15. Aufl., 353 S., ISBN 3896535633, Verlagshaus Mainz: Aachen, 2011.
- /BLE 12/ Bleck, W.: Spezielle Werkstoffkunde der Stähle für Studium und Praxis. Institut für Eisenhüttenkunde der Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen, 2. Aufl., 591 Seiten, ISBN 3810700606, Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag, 2012.
- /BLE 17/ Bleck, W., Moeller, E.: Handbuch Stahl, Auswahl, Verarbeitung, Anwendung. ISBN 9783446449619, Carl Hanser Verlag: München, 2017.
- /BMU 13/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg.): Übereinkommen über nukleare Sicherheit, Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland für die Sechste Überprüfungstagung im März/April 2014. 26. Juni 2013.
- /BOG 18/ Bogdan, O.: Optimization of ingot geometry, casting technology and chemical composition of a 20 tons 42CrMo4 ingot to minimize A-segregation and increase material homogeneity. In: Jernkontoret (Hrsg.): Full Proceedings Book. ICRF Ingot Casting Rolling Forging, 3rd International Conference, Stockholm, Schweden, 16. - 19. Oktober 2018, S. 92–106, 2018.
- /BRE 13/ Bretschneider, J.: Vorlesung Schadensanalyse, Schweißen und Schweißnahtfehler. Präsentation, Fraunhofer IWS Dresden: TU Dresden, 4. Dezember 2013.

- /BRE 19/ Breising, K.-H., Sommer, B.: Herstellverfahren für Stahlrohre. Hrsg.: Mannesmannröhren-Werke AG: Wirtschaftsvereinigung Stahlrohre e.V., Online, erreichbar unter https://www.wv-stahlrohre.de/wp-content/uploads/2019/10/Stahlrohre_Herstellverfahren.pdf, abgerufen am 31. Januar 2022.
- /BRO 15a/ Brosius, A.: Fertigungstechnik I - Urformtechnik, Einführung. Hrsg.: Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Fertigungstechnik, Professur Formgebende Fertigungsverfahren: Dresden, erreichbar unter, abgerufen am 21. September 2018.
- /BRO 15b/ Brosius, A.: Fertigungstechnik I - Urformen, Urformverfahren. Hrsg.: Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Fertigungstechnik, Professur Formgebende Fertigungsverfahren: Dresden, erreichbar unter, abgerufen am 21. September 2018.
- /BRO 15c/ Brosius, A.: Fertigungstechnik I - Umformtechnik, Massivumformung. Hrsg.: Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Fertigungstechnik, Professur Formgebende Fertigungsverfahren, 2015.
- /BRO 15d/ Brosius, A.: Fertigungstechnik II - Umformtechnik Biegen. Hrsg.: Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Fertigungstechnik, Professur Formgebende Fertigungsverfahren: Dresden, 27. November 2015.
- /BRÜ 18a/ Brüttsch / Rügger AG: Beeinflussung des Gefüges durch Wärmebehandlungen. Technische Schriftenreihe, Bd. 05: Regensburg, Online, erreichbar unter <https://www.brr.ch/de/downloads/broschueren/>, abgerufen am 31. Januar 2022.
- /BRÜ 18b/ Brückner, F.: Vorlesung Fertigungstechnik I. Hrsg.: Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik / Institut für Laser- und Oberflächentechnik: Dresden, Online, erreichbar unter https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/if/lot/ressourcen/dateien/studium/lehrveranstaltungen/download_vorlesungen_ft1/18_ft1_01_Einfuehrung_brueck.pdf, abgerufen am 31. Januar 2022.

- /BUC 03/ Buckthorpe, D., Tashkinov, A., Brynda, J., Davies, L. M., Cueto-Felgeueroso, C., Detroux, P., Bieniussa, K., Guinovart, J.: Review and Comparison of WWER and LWR Codes and Standards. Transaction of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT17), 17. - 22. August 2003, 2003.
- /BUD 11/ Buderus Edelstahl GmbH: Stahl - der Alleskönner, der viele Prüfungen bestehen muss, Qualitätssicherung bei Buderus Edelstahl. Hrsg.: Analytik News, Stand 04.02.2011, Online, erreichbar unter <https://analytik.news/fachartikel/2011/7.html>, abgerufen am 31. Januar 2022.
- /BÜH 04/ Bührig-Polaczek, A.: Werkstoffverarbeitung Metalle, Basisfach. Hrsg.: RWTH Aachen, Gießerei-Institut, 1. Aufl., 2004.
- /DÄC 18/ Däcker, C.-Å.: A review of modern literature concerning macrosegregation in ingot casting. In: Jernkontoret (Hrsg.): Full Proceedings Book. ICRF Ingot Casting Rolling Forging, 3rd International Conference, Stockholm, Schweden, 16. - 19. Oktober 2018, S. 330–341, 2018.
- /DEG 09/ Degner, M.: Stahlfibel. 184 Seiten, 1 Faltbl., ISBN 9783514007413, Verl. Stahleisen: Düsseldorf, 2009.
- /DUM 14/ Dumrau, A.: Beizen - komplexes Thema kurz dargestellt. WOMag, Nr. 6, DOI 10.7395/2014/Dumrau2, 2014.
- /DVS 18/ DVS Media GmbH: Schweißnaht-Unregelmäßigkeiten. Hrsg.: Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.: Düsseldorf, Stand vom 3. Mai 2018, Online, erreichbar unter <https://www.dvs-home.de/presse-medien/download/44>, abgerufen am 31. Januar 2022.
- /ELM 12/ Elmas, M., Jendrich, U., Michel, F., Reck, H., Wenke, R.: Weiterentwicklung der Anforderungen an die rechtzeitige Erkennung und Beherrschung des korrosionsgestützten Risswachstums an sicherheitstechnisch bedeutsamen druckführenden Komponenten. Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3673, 163 S., Juli 2012.

- /ELM 13/ Elmas, M., Jendrich, U., Michel, F., Reck, H., Schimpfke, T., Walter, M., Wenke, R.: Untersuchungen zur Wirksamkeit von Maßnahmen zur Sicherstellung der Integrität druckführender Komponenten in deutschen Kernkraftwerken. Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3700, 145 S., 2013.
- /ELM 16/ Elmas, M., Faust, S., Fleck, I., Jendrich, U., Michel, F., Wenke, R.: Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von Brennelementen und mechanischen Einrichtungen in Kernkraftwerken. Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-442, 169 Seiten, ISBN 978-3-946607-24-3: Köln, Oktober 2016.
- /ENSI 15a/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Weitere Untersuchungen am Reaktordruckbehälter von Beznau 1 notwendig. 16. Juli 2015.
- /ENSI 15b/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Kernkraftwerk Gösgen darf nach Revision wieder anfahren. 6. Juli 2015.
- /ENSI 15c/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): ENSI erteilt Beznau 2 Freigabe zum Wiederanfahren. 23. Dezember 2015.
- /ENSI 15d/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): ENSI prüft Projektplan der Axpo für die Beurteilung des Reaktordruckbehälters von Beznau 1. 30. November 2015.
- /ENSI 18a/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Von den Befunden in Belgien bis zum Sicherheitsnachweis von Beznau 1: Die Chronologie. März 2018.
- /ENSI 18b/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): ENSI Review of the Axpo Power AG Safety Case for the Reactor Pressure Vessel of the Beznau NPP Unit 1. Revision 1, Mai 2018.
- /ESP 05/ Arrêté du 12 décembre 2005 relatif aux équipements sous pression nucléaires (Verordnung über die druckführenden kerntechnischen Komponenten) (ESPN) zuletzt geändert Dezember 2005.

- /FAU 20/ Faust, S., Fleck, I., Jendrich, U.: Forschungen zum Wasserstoffeinfluss auf das Verhalten von Konstruktionswerkstoffen in Kernkraftwerken, Abschlussbericht zum Vorhaben 4717R01339. GRS, Bd. 578, ISBN 978-3-947685-64-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Juli 2020.
- /GAB 18/ Gabrielsson, B., Connolly, B., Lubinski, S., Cowden, S., Yang, H.: Hydrogen control of large bottom poured forging ingots at Ellwood Quality Steels. In: Jernkontoret (Hrsg.): Full Proceedings Book. ICRF Ingot Casting Rolling Forging, 3rd International Conference, Stockholm, Schweden, 16. - 19. Oktober 2018, 2018.
- /HAR 13/ Hardtmann, A.: Gesenkschmieden, Werkzeuge der Umform- und Zerteiltechnik. Hrsg.: Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Fertigungstechnik, Professur Formgebende Fertigungsverfahren, 2013.
- /HEL 16/ Hellermann, R., Hippenstiel, F., Hofmann, N., Schönbrenner, W., Seitz, P.: Gasdichtes Schiebersystem reduziert Sauerstoffaufnahme beim Gießen von Stahl, Gas-tight slide gate valve reduces reoxidation during steel casting. Stahl und Eisen, Nr. 5, S. 63–67, 2016.
- /HER 03/ Herfurth, K., Ketscher, N., Köhler, M.: Giessereitechnik kompakt, Werkstoffe, Verfahren, Anwendungen. 200 Seiten, ISBN 3872601482, Gieserei-Verl.: Düsseldorf, 2003.
- /HER 13/ Herbertz, R., Hermanns, H., Labs, R., Volz, H. U. (Hrsg.): Massivumformung kurz und bündig. Deutsche Massivumformung, 161 S., ISBN 9783928726320, Industrieverband Massivumformung e.V.: Hagen, 2013.
- /HOL 97/ Holm, D.: Das Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren kerntechnischer Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland, GRS-A-2455. Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Mai 1997.
- /HSR 88/ Hochschule Regensburg (Hrsg.): Gefügeuntersuchungen (Replica-Technik). Online, erreichbar unter <https://hps.hs-regensburg.de/heh39273/aufsaeetze/replica.pdf>, abgerufen am 31. Januar 2022.

- /HUS 11/ Husemann, J.: In-Situ Messungen der thermisch induzierten Dehnungen beim Schweißen. Präsentation, Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik, RWTH Aachen, Wissenschaftliche Tagung Jugend forscht und schweißt: Duisburg, 1. Dezember 2011.
- /IAEA 03/ IAEA Engineering Safety Section: Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety, Primary piping in PWRs Rapport au Groupe permanent d'experts pour les ... IAEA-TECDOC, Bd. 1361, 235 S., ISBN 92-0-108003-4, IAEA: Vienna, Juli 2003.
- /ILG 08/ Ilg, U., König, G., Erve, M.: Das Werkstoffkonzept in deutschen Leichtwasserreaktoren - Beitrag zur Anlagensicherheit, Wirtschaftlichkeit und Schadensvorsorge. atw, Bd. 53, Nr. 12, S. 766–780, 2008.
- /INS 09/ Institut Feuerverzinken GmbH: Korrosionsschutz durch Feuerverzinken (Stückverzinken), Merkblatt 329. Hrsg.: Stahl-Informations-Zentrum: Düsseldorf, ISSN 0175-2006, 2009.
- /IRSN 16a/ Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN): Parc nucléaire d'EDF en fonctionnement : Anomalies et irrégularités constatées lors des investigations consécutives à l'anomalie concernant les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, Note d'information. Oktober 2016.
- /IRSN 16b/ Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN): Ségrégation du carbone des fonds primaires de générateurs de vapeur. Maintien en service des fonds de fabrication Japan Casting and Forging Corporation, IRSN Assessment 2016-00369. November 2016.
- /JEN 03/ Jendrich, U., Tricot, N.: Neutron fluence at the reactor pressure vessel wall - a comparison of French and German procedures and strategies in PWRs, IRSN-Bericht IRSN/DES 546. Januar 2003.
- /JÜN 19/ Jüngert, A.: Forschungsschwerpunkte ZfP. Präsentation, Materialprüfanstalt (MPA): Stuttgart, 13. März 2019.

- /KEK 94/ Kecke, H. J., Kleinschmidt, P.: Industrie-Rohrleitungsarmaturen. VDI-Buch, ISBN 978-3-642-51879-9, DOI 10.1007/978-3-642-51878-2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1994.
- /KKE 78/ Kernkraftwerke Lippe-Ems GmbH: Sicherheitsbericht Kernkraftwerk Emsland mit Druckwasserreaktor, elektrische Leistung 1300 MW. Hrsg.: Kraftwerk Union AG, 1978.
- /KKI 75/ Kernkraftwerk Isar GmbH: Sicherheitsbericht Kernkraftwerk ISAR (KKI) mit Siedewasserreaktor 2575 MWth. Hrsg.: Kraftwerk Union AG, 1975.
- /KOP 99/ Kopp, R., Wiegels, H.: Einführung in die Umformtechnik. 2. Aufl., VI, 323 Seiten, ISBN 3860738216, Mainz: Aachen, 1999.
- /KRB 13/ Kernkraftwerk Gundremmingen, Blöcke B und C: Stellungnahme zur vorläufigen IRS-Meldung Nr. 8244 „Ultraschallanzeigen am Reaktordruckbehälter des belgischen Kernkraftwerks Doel, Block 3 (Doel-3)“. Hrsg.: Kernkraftwerk Gundremmingen GmbH: Gundremmingen, 28. Mai 2013.
- /KRE 11/ Kreuzbruck, M., Böhm, R., Kitze, J., Prager, J., Brekow, G., Neubauer, A., Pelkner, M.: Progress in Defect Sizing NDT Methods for the inspection of Power-Plant Components, 37. MPA Seminar 2011. Hrsg.: MPA Universität Stuttgart, 2011.
- /KTA 79/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 3201.1 Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 1: Werkstoffe und Erzeugnisformen. Fassung 1979-02, Februar 1979.
- /KTA 13/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 1404 Dokumentation beim Bau und Betrieb von Kernkraftwerken. Fassung 2013-11, November 2013.
- /KTA 14/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 3206 Nachweise zum Bruchabschluss für druckführende Komponenten in Kernkraftwerken. Fassung 2014-11, November 2014.

- /KTA 17a/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 3201.1 Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 1: Werkstoffe und Erzeugnisformen. Fassung 2017-11, November 2017.
- /KTA 17b/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 3201.3 Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 3: Herstellung. Fassung 2017-11, 166 S., November 2017.
- /KTA 17c/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 1402 Integriertes Managementsystem zum sicheren Betrieb von Kernkraftwerken. Fassung 2017-11, November 2017.
- /KTA 17d/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 3201.2 Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung. Fassung 2017-11, November 2017.
- /KTA 17e/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 3201.4 Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung. Fassung 2016-11, November 2017.
- /KTA 17f/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 1408.1 Qualitätssicherung von Schweißzusätzen und -hilfsstoffen für druck- und aktivitätsführende Komponenten in Kernkraftwerken, Teil 1: Eignungsprüfung. Fassung 2017-11, November 2017.
- /KTA 17g/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 1408.2 Qualitätssicherung von Schweißzusätzen und -hilfsstoffen für druck- und aktivitätsführende Komponenten in Kernkraftwerken, Teil 2: Herstellung. Fassung 2017-11, November 2017.
- /KTA 17h/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 1408.3 Qualitätssicherung von Schweißzusätzen und -hilfsstoffen für druck- und aktivitätsführende Komponenten in Kernkraftwerken, Teil 3: Verarbeitung. Fassung 2017-11, November 2017.

- /KTA 17i/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 3203 Überwachung des Bestrahlungsverhaltens von Werkstoffen der Reaktordruckbehälter von Leichtwasserreaktoren. Fassung 2017-11, November 2017.
- /KTA 17j/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 1401 Allgemeine Anforderungen an die Qualitätssicherung. Fassung 2017-11, November 2017.
- /LAN 92/ Lange, G. (Hrsg.): Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle, Lehrinhalt und Vortragstexte eines Fortbildungsseminars der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde e.V. in Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Verband für die Materialprüfung der Technik und dem Deutschen Verband für Materialprüfung. Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, Schweizerischer Verband für die Materialprüfungen der Technik, Fortbildungsseminars der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde e.V. in Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Verband für die Materialprüfung der Technik und dem Deutschen Verband für Materialprüfung, 3. Aufl., 543 S., ISBN 3883550701, DGM Informationsgesellschaft: Oberursel, 1992.
- /LAU 13/ Laufs, P.: Reaktorsicherheit für Leistungskernkraftwerke, Die Entwicklung im politischen und technischen Umfeld der Bundesrepublik Deutschland. 35 S., ISBN 9783642306549, DOI 10.1007/978-3-642-30655-6, Springer: Berlin, Heidelberg, 2013.
- /LIE 05/ Liedtke, D. Dr.-Ing.: Wärmebehandlung von Stahl, Härten, Anlassen, Vergüten, Bainitisieren, Merkblatt 450. Hrsg.: Wirtschaftsvereinigung Stahl: Düsseldorf, 2005.
- /LOI 14/ Loidl, M.: Entwicklung einer Prüfmethodik zur Charakterisierung höchstfester Karosseriestähle hinsichtlich des Risikos zur Wasserstoff induzierten Rissbildung, Dissertation, Universität Stuttgart. 2014.
- /MAI 85/ Maidorn, C., Blind, D.: Solidification and segregation in heavy forging ingots. Nuclear Engineering and Design, Bd. 84, Nr. 2, S. 285–296, DOI 10.1016/0029-5493(85)90199-2, 1985.

- /MPA 12/ MPA Universität Stuttgart: Unterstützung bei der Beantwortung der Fragestellungen zu den Befunden in der kerntechnischen Anlage Doel-3 und der möglichen Übertragbarkeit auf deutsche Anlagen, Technischer Bericht, GRS-Auftrag – Vertrag 3612R01321 - 820408 - UA 3138. Dezember 2012.
- /PEL 10/ Pelkner, M., Reimund, V., Blome, M., Thomas, H.-M., Kreutzbruck, M.: 3D-GMR-Messung an Referenzbauteilen und Rekonstruktion der Rissparameter, DGZfP-Jahrestagung 2010. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., 2010.
- /REC 09/ Reck, H., Jendrich, U., Michel, F., Rodriguez, J.: SR 2583 Bewertung des Potentials für unentdeckten Schadensfortschritt an druckführenden Komponenten, Abschlussbericht. Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3460, 143 S., April 2009.
- /REI 06/ Reip, T.: Thermomechanische Schädigung von Arbeitswalzen in Warmbreitbandstraßen. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München: München, 29. November 2006.
- /REI 17/ Reisgen, U., Stein, L.: Schweißen unlegierter und niedriglegierter Bau-
stähle, Merkblatt 381. Hrsg.: Wirtschaftsvereinigung Stahl: Düsseldorf, ISSN 0175-2006, 2017.
- /RSK 79/ Reaktor-Sicherheitskommission (RSK): „Rahmenspezifikation Basissicherheit“ - Anhänge zu Kapitel 4.2 der 2. Ausgabe der RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren vom 24.1.1979, 1) Auflistung der Systeme und Komponenten, auf die die Rahmenspezifikation Basissicherheit von druckführenden Komponenten anzuwenden ist 2) „Basissicherheit von druckführenden Komponenten“, Bundesanzeiger Nr. 167. 6. September 1979.
- /RSK 96/ Reaktor-Sicherheitskommission (RSK): RSK-Leitlinien, Stand 15.11.1996. erreichbar unter <http://www.rskonline.de/sites/default/files/reports/rskll-dwr1996.pdf>, abgerufen am 31. Januar 2022.

- /RSK 13/ Reaktor-Sicherheitskommission (RSK): Ultraschallanzeigen am Reaktor-druckbehälter des belgischen Kernkraftwerks Doel, Block 3 (Doel-3), Stellungnahme, Anlage zum Ergebnisprotokoll der 454. Sitzung der RSK. 17. Januar 2013.
- /SAI 06/ SAILLET, S., RUPA, N., BENHAMOU, C.: Impact of Large Forging Macro-segregations on the RPV Surveillance Program. Fontevraud 6, 2006.
- /SCH 08/ Scholz, N., Stein, U.: Biege- und Kumpelpresse für Dickblech nutzt Material optimal. MM Maschinenmarkt, Bd. 41, S. 66, 2008.
- /SCH 15a/ Schiebold, K.: Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Ultraschallprüfung. 8 S., ISBN 9783662447000, DOI 10.1007/978-3-662-44700-0, Springer Vieweg: Berlin, 2015.
- /SCH 15b/ Schulze, V.: Fertigungsbedingte Eigenspannungen und deren Auswirkungen. Vortrag Werkstoffwoche 14.-17.9.2015 Dresden.
- /SCH 18/ Schiebold, K.: Zerstörende und Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, Werkstoff- und Wärmebehandlungstechnik. 156166 S., ISBN 9783662578339, DOI 10.1007/978-3-662-57834-6, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2018.
- /SIA 15/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke, vom 22. November 2012, Neufassung vom 3. März 2015 (BANz AT 30.03.2015 B2). RS-Handbuch, erreichbar unter https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/rsh/3-bmub/3_0_1.html.
- /TEN 92/ Tenckhoff, E., Erve, M.: Materials for Nuclear Power Plants in Western Countries. atomwirtschaft, Bd. 37, Nr. 4, S. 185–192, 1992.
- /THO 04/ Thomas, B. G.: Continuous Casting (matallurgy). McGraw-Hill Yearbook of Science and Technology, 2004.

- /THO 11/ Thomas, A., Seliger, P., Reuter, A.: Schäden durch fehlerhafte Wärmebehandlung, Fallbeispiele: Glühversuch an einem Wärmetauscher und Scheibenbruch einer hochfesten Schraubenverbindung. Siempelkamp Prüf- und Gutachter-Gesellschaft mbH: VDI-Jahrestagung Schadensanalyse, Würzburg, 2011.
- /TÜV 84/ TÜV Bayern: Gutachten über die Sicherheit des 1300 MWe-Kernkraftwerkes Isar 2, Standort Essenbach, für das atomrechtliche Genehmigungsverfahren, 2. Teilerrichtung, Band 1. 1984.
- /WAI 97/ Waidele, H.: 3. Technischer Bericht: Zerstörungsfreie Prüfung von austenitischen Schweißnähten und Plattierungen, Erarbeitung von Unterlagen im Hinblick auf die Ergänzung und Weiterentwicklung des Kerntechnischen Regelwerkes, BMU-Vorhaben SR2228. Hrsg.: MPA Universität Stuttgart, 1997.
- /WAR 11/ Warnke, E.: Mit Eigenspannungen leben: Entstehung, Auswirkungen, Messung, Berechnung und Vermeidung von Eigenspannungen, Ausblick. In Konstruieren und Gießen, Bd. 33, ISSN 0341-6615, 2008.
- /WEI 15/ Weissbach, W., Dahms, M., Jaroschek, C.: Werkstoffkunde, Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. 19. Aufl., 1 Online-Ressource, ISBN 9783658039196, Springer Fachmedien Wiesbaden: Wiesbaden, 2015.
- /WLN 84/ Weiterleitungsnachricht: Risse an Schrauben der Brennelementkastenbefestigung. Hrsg.: Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, WL 1984/07, 14. Mai 1984.
- /WLN 19/ Weiterleitungsnachricht: Anzeigen bei Wirbelstromprüfungen von Dampferzeugerheizrohren, Ergänzung zur Weiterleitungsnachricht 2018/06. Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, WLN 2018/06a, 12. November 2019.
- /WOS 98/ Wossog, G. (Hrsg.): Handbuch Rohrleitungsbau, Planung, Herstellung, Errichtung. Bd. 1, 660 S., ISBN 380272710X, Vulkan: Essen, 1998.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Herstellung von Komponenten – Werkstoffauswahl, verwendete Fertigungsverfahren, vorgesehene Prüfverfahren und Regelwerk sowie weitere Qualitätssicherungsmaßnahmen	1
Abb. 3.1	Schematische Darstellung des Formgießens nach /BRO 15a/	11
Abb. 3.2	Senkrechtes (Vertical), Senkrechtes mit Abbiegen (Curved) und Horizontales (Horizontal) Stranggießen /THO 04/	13
Abb. 3.3	Schematische Darstellung der Makroseigerungen nach /DÄC 18/	15
Abb. 3.4	Anteile des technischen Volumendefizits nach /BÜH 04/	17
Abb. 3.5	Schemadarstellung der Herstellung eines RDB-Rings	25
Abb. 3.6	Lochen in einem Mannesmann-Schrägwalzwerk /BRE 19/	28
Abb. 3.7	Lochen mit dem Tonnenlochverfahren /BRE 19/	28
Abb. 3.8	Lochen in einem Kegelschrägwalzwerk /BRE 19/	28
Abb. 3.9	Schema einer Rohrkontinentalwalzstraße (links) und Anordnung der Walzen (rechts) /BRE 19/	30
Abb. 3.10	Schema des Stopfenwalzens (links) und des Pilgerwalzens (rechts) /BRE 19/	30
Abb. 3.11	Schema einer Asselwalzstraße /BRE 19/	31
Abb. 3.12	Schematische Darstellung einer Schmelzschweißverbindung nach /BLE 12/	38
Abb. 5.1	Bänder und Abschnitte im ASME BPVC zur Herstellung von Komponenten der DFU	92

Abb. 5.2	Anforderungen an die Prüfung von „Class 1“ Schweißnähte nach russischem Regelwerk und RCC-M (Tabelle 4 aus /BUC 03/)	100
Abb. 6.1	Reaktordruckbehälter einer Konvoi-Anlage; schematische Übersicht über die Schmiederinge und Kalotten mit Lage der Schweißnähte und Vergleich mit älterer Konstruktion	106
Abb. 6.2	Reaktordruckbehälter einer SWR-Anlage Baulinie 72; schematische Übersicht über die Schmiederinge, Flansche und Kalotten mit Lage der Schweißnähte	108
Abb. 6.3	Schemazeichnung eines (Konvoi-) Dampferzeugers ohne Vorwärmkammer mit eingezeichneten Schweißnähten.....	111
Abb. 6.4	Einschweißung und Einwalzung eines DE-Heizrohres in den Rohrboden	112
Abb. 7.1	Verbleib des Bereichs positiver Seigerung im Gussblock (rot) bei der Herstellung der RDB-Kalotten für den EPR von Flamanville-3 (aus /ASN 17/ in englischer Übersetzung)	118
Abb. 7.2	Die Korrelation von Schlagenergie („Resilience“) und Kohlenstoffgehalt („Teneur en carbon“) aus einem Tiefenprofil durch die Wand im Zentrum einer zerstörend geprüften Deckelkalotte (UA S) (aus /ASN 17/)	119
Abb. 7.3	Schlagenergie in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt an Proben aus den Deckelkalotten UA S, UK S und der Bodenkalotte UA I (aus /ASN 17/)	119

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Werkstoff-Nummer, DIN-Name und Kurzbeschreibung einiger für druckführende Komponenten verwendeter Werkstoffe in deutschen Anlagen	8
Tab. 3.1	Beispiele für Schweißfehler und deren Ursachen /SCH 15b/, /DVS 18/, /HUS 11/, /BLE 12/, /REI 17/.....	43
Tab. 4.1	Übersicht über ISO-Normen und weitere Prüfanforderungen zusammen mit ihren deutschen Entsprechungen für den Zugversuch	74

Abkürzungsverzeichnis

AAS	Atomabsorptionsspektrometrie
AOD	Argon Oxygen Decarburization
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BPVC	Boiler & Pressure Vessel Code
CF	Creusot Forge
CTOD	Crack Tip Opening Displacement
DE	Dampferzeuger
DFU	Druckführende Umschließung
DWR	Druckwasserreaktor
E-Hand	Lichtbogenhandschweißen
FANC	Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle Belgische Aufsichtsbehörde
GEDCM	Gradient Elastic Constants Descent-Methode
GMR	Giant Magnetoresistance
JCFC	Japan Casting and Forging Corporation
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
KWU	Kraftwerk Union AG
LWR	Leichtwasserreaktor
MAG	Metall-Aktiv-Gas
MIG	Metall-Inert-Gas
MSG	Metall-Schutzgasschweißen
NDE	Non-destructive examination: Wiederkehrende Zerstörungsfreie Prüfung;
NDT	Non-destructive testing: Zerstörungsfreie Prüfung
NE	Nichteisen
OES	Optische Emissionsspektrometrie
PMI	Positive Materialidentifizierung
RCC-M	Règles de Conception et de Construction des Matériels Mécaniques des Îlots Nucléaires
RDB	Reaktordruckbehälter
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
RPP	Règles en Phase Probatoire
RSK	Reaktorsicherheitskommission
RT-SAFT	Ray-Tracing Synthetische Apertur Fokus Technik
SQUID	Superconducting Quantum Interference Device
SVTI	Schweizerischen Verein für technische Inspektionen

SWR	Siedewasserreaktor
UP	Unterpulverschweißen
VOD	Vacuum Oxidation Decarburization
WEZ	Wärmeeinflusszone
WIG	Wolfram-Inertgasschweißen
XPS	Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung

A Anhang

A.1 Weitere Herstellungsverfahren

Im Folgenden werden weitere Gieß- und Umformverfahren sowie Wärmebehandlungen aufgeführt.

A.1.1 Lost-Foam-Verfahren

Das **Lost-Foam-Verfahren** ist ein Verfahren zur Serienfertigung hochkomplexer Gussteile. Damit können jedoch auch Prototypen wirtschaftlich gefertigt werden. Es handelt sich um ein Vollformgießverfahren, bei dem einmal verwendbare Schaumstoffmodelle genutzt werden. Diese werden, eingebettet in binderfreien Formstoff, durch Vibration verdichtet und bleiben im Formkasten. Es werden in Formen geschäumte Modelle oder geschnittenes und verklebtes Plattenmaterial verwendet. Das Modell wird beim Abguss thermisch zersetzt und die Schmelze breitet sich in den frei werdenden Hohlraum aus. Aufgrund der einteiligen Form und weil üblicherweise Hinterschneidungen, Innenkerne oder andere Formteile selten nötig sind, erhält man mit diesem Verfahren gratfreie Gussteile, die geringe Toleranzen aufweisen /BDG 09b/ (in der Quelle wird für weiterführende Informationen auf /HER 03/ verwiesen).

A.1.2 Niederdruck-Sandgießen

Das **Niederdruck-Sandgießen** ist besonders zur flexiblen Fertigung kleinerer Serien von Leichtmetallgussteilen geeignet. Es basiert auf einem steigenden, über den Druck regelbaren Gießen, wodurch eine wesentlich ruhigere Formfüllung im Vergleich zum Sandgießen erfolgt. Durch eine gezielte Auslegung der Erstarrung können anwendungsspezifische Eigenschaften im Gussteil eingestellt werden und es können höhere Festigkeitseigenschaften sowie ein feineres Gefüge erreicht werden. Ein weiterer Vorteil ist die Durchführung des Gießprozesses in einem abgeschlossenen System, wodurch die Schmelze von der Umgebungsluft abgeschirmt wird /BDG 09c/.

A.1.3 Druckgießen

Das Druckgießverfahren findet bei der Herstellung von Gussteilen aus Aluminium-, Magnesium- und Zinklegierungen in großen Stückzahlen Anwendung. Bei diesem Verfahren

wird die Schmelze zuerst in die Gießkammer einer Druckgießmaschine gefüllt und anschließend mit einem Kolben durch einen oder mehrere Kanäle (sogenannte Anschnitte) in den Formhohlraum gepresst. Dabei werden hohe Drücke von 150 bar bis hin zu 1.200 bar erzeugt. Die Strömungsgeschwindigkeiten der Schmelze liegen zwischen 10 m/s und 150 m/s und die Formfüllzeiten zwischen 50 ms und 200 ms. Mit diesem Verfahren können auch große Gussteile mit geringen Wanddicken und komplizierten Geometrien hergestellt werden /BDG 09d/ (in der Quelle wird für weiterführende Informationen auf /HER 03/ verwiesen).

A.1.4 Niederdruck-Kokillengießen

Das Niederdruck-Kokillengießen ist eine Variante des Kokillengießens für die Herstellung von Leichtmetallgussteilen (Aluminium- und Magnesium (-legierungen)), bei der die Schmelze durch Gasdruckbeaufschlagung des Warmhalteofens über eine Verteilerbox oder ein Steigrohr in die Kokille eingebracht wird. Der Gasdruck wird nach dem Beginn der Randschalenerstarrung zur Dichtspeisung erhöht, wobei der Speisungsdruck im Vergleich zum Schwerkraftguss etwa vierzigmal höher ist. Gegenüber dem Schwerkraftguss wird mit dem Niederdruckguss eine sauberere Schmelze erreicht, denn sie wird stets unterhalb der schwimmenden Schlackeschicht entnommen. Die Formfüllung ist dabei besonders turbulenzarm. Die hohe Druckspeisung sorgt zudem für besonders gute Gefügeeigenschaften (feinkörnig, oxid- und porenarm) /BDG 09e/ (in der Quelle wird für weiterführende Informationen auf /HER 03/ verwiesen).

A.1.5 Grundsätzliches zum Schmieden von Armaturengehäusen

Es werden im Wesentlichen die Schmiedemethoden Massivschmieden, Hohlschmieden sowie Schalenschmieden und -verschweißen unterschieden. Insbesondere Ventile \leq DN 300 für kerntechnische Anlagen wurden durch Massivschmieden hergestellt. Das Hohlschmieden wird vorrangig für Schiebergehäuse bis DN 300 und PN 100 verwendet. Anschlussflansche und Einschweißstutzen werden anschließend mittels Rundnaht angeschweißt. Gehäuse für Kleinarmaturen (\leq DN 50) können durch Gesenkschmieden (s. Abschnitt 3.2.2) hergestellt werden. Hochdruckgehäuse können ebenfalls im Gesenk geschmiedet und anschließend mechanisch nachbearbeitet oder im Freiformverfahren hergestellt werden. Eine weitere Methode ist das Verschweißen geschmiedeter Halbschalen. Vor dem Zusammenfügen werden die beiden Halbschalen bearbeitet (Sitzflächen gepanzert, gedreht sowie geschliffen) /KEK 94/.

A.1.6 Grobkornglühen

Durch ein Grobkornglühen wird die spanende Bearbeitung weicher Stähle erleichtert. Die Glühtemperaturen bei diesem Verfahren liegen etwa zwischen 1.050 °C und 1.300 °C, wobei nach einer langen Haltedauer eine langsame Abkühlung erfolgt. Damit wird ein grobes ferritisch-perlitisches Gefüge erreicht /BLE 10/.

A.1.7 Härteverfahren

Es existieren zahlreiche Wärmebehandlungsverfahren, bei denen die Lebensdauer von Werkzeugen und Werkstücken über eine Modifikation der Randschicht erreicht wird. Diese können unterteilt werden in Verfahren, bei denen die chemische Zusammensetzung der Oberfläche nicht verändert wird (Randschichthärten) und Verfahren, bei denen sie verändert wird (Thermochemische Diffusionsbehandlung). Das Ziel ist in beiden Fällen eine Verfestigung der Oberfläche /BLE 12/. Mit einer Oberflächenhärtung wird eine erhöhte Sprödigkeit und Bruchempfindlichkeit vermieden, die als Nebeneffekt der durchgehenden Härte auftritt. Gleichzeitig wird ein höherer Widerstand gegen Reibung, Verschleiß und Druckbelastung in der Randschicht erreicht. Das Härten der Randschicht beugt aufgrund der bei der während der martensitischen Umwandlung entstehenden Druckeigenstressungen in gewissem Maße auch der Entstehung von Ermüdungsanrissen vor. Der Werkstoff im Kern des Bauteils bleibt dabei zäh. Aufgrund der geringen Dicke der gehärteten Randschicht von etwa 0,1 bis 2 mm treten verhältnismäßig geringe Härtespannungen auf. Die Härtung kann sogar auf eine bestimmte Stelle des Bauteils begrenzt werden /BRÜ 18a/.

Die Verfahren zur Randschichtverfestigung werden auch unterteilt in Verfahren mit thermochemischer Einwirkung (z. B. Einsatzhärten, Nitrieren, Borieren, Karbonitrieren), Verfahren mit thermischer Einwirkung (z. B. Flammhärten, Induktionshärten), Verfahren mit mechanischer Einwirkung (z. B. Kugelstrahlen, Wasserstrahlen) und Verfahren mit thermomechanischer Einwirkung (z. B. Reibhärten).

Mit dem Einsatzhärten kann eine besonders hohe Randhärte bei gleichzeitig besonders hoher Kernzähigkeit erreicht werden. Es gehört zu den Verfahren mit thermochemischer Einwirkung und hat in der Praxis eine sehr hohe Bedeutung. Dabei wird die Randschicht aufgekohlt und anschließend gehärtet. Zum Einsetzen werden feste, flüssige oder gas-

förmige Aufkohlungsmittel (z. B. Anthrazit, Methan) verwendet. Der angestrebte Kohlenstoffgehalt in der Randschicht liegt bei 0,6 bis 0,8 %, um die maximale Härte zu erreichen. Die Temperatur liegt bei etwa 900 °C und damit bei diesem Kohlenstoffgehalt im Gebiet des Austenits im Eisen-Kohlenstoff-Phasendiagramm. Wird anschließend direkt von der hohen Einsatztemperatur abgeschreckt, so erhält man ein grobkörniges Gefüge im Kern und grobkörnigen Martensit in der Randschicht. Um diesen Effekt zu verhindern, können legierte, feinkörnige Einsatzstähle verwendet werden oder es wird eine andere Art der Härtung gewählt. Bei dem Verfahren der Einfachhärtung wird das Bauteil nach dem Aufkohlen zunächst an der Luft abgekühlt und anschließend im Randbereich auf eine Härtetemperatur von etwa 750 °C aufgeheizt. Dann wird es abgeschreckt. Der Kern kann zum Erreichen eines noch feineren Gefüges vor dem Randschicht härten normalisiert werden (Kernrückfeinen). Ein weiteres Verfahren ist das Doppelhärten. Dieses ist noch aufwändiger und wird kaum noch angewandt. Zur Vermeidung von Härtespannungen erfolgt, unabhängig vom gewählten Verfahren, am Ende eine Anlassbehandlung, bei der das gehärtete Bauteil auf etwa 150 °C erwärmt wird /BRÜ 18a/.

Beim Nitrieren wird dem Werkstoff Stickstoff zugeführt. Dies erfolgt durch Diffusion bei etwa 550 °C. Man unterscheidet zwischen dem Badnitrieren, bei dem der Werkstoff für mehrere Stunden in einer Salzschieme verweilt, und dem Gasnitrieren in Ammoniakgas oder Stickstoff. Das Nitrierhärten kommt bei Nitrierstählen zum Einsatz, denn die Bildung von Eisennitriden muss vermieden werden, da diese zu einer erhöhten Sprödigkeit führen. Diese Nitrierstähle enthalten nitridbildende Legierungselemente (Al, Cr, Mo, V). Feinkörnige Aluminium- und Chrom-Nitride hingegen haben einen positiven Effekt und führen durch Ausscheidungshärtung zu einem Anstieg der Härte. Bei diesem Verfahren entfällt das Abschrecken, sodass auch keine Härtespannungen auftreten. Ein wesentlicher Vorteil des Nitrierhärtens ist, dass es am fertig bearbeiteten Bauteil durchgeführt werden kann. Zudem ist die Randschicht im Vergleich zum Einsatzhärten dünner und härter und die Härte bleibt auch bei höheren Betriebstemperaturen erhalten. Daneben existiert noch das Borieren, bei dem Bor bei Temperaturen von 800 °C bis 1.000 °C in die Oberfläche eingebracht wird. Es bilden sich Eisenboride, die eine noch höhere Härte und Temperaturbeständigkeit besitzen /BRÜ 18a/.

Das Karbonitrieren kombiniert die Wirkung von Kohlenstoff und Stickstoff. Dabei kommt ein Gasgemisch oder ein Salzbad zur Anwendung. Im Gegensatz zum Nitrierhärten wird

der Werkstoff wie beim Einsatzhärten anschließend abgeschreckt. Durch die im Vergleich zum Einsatzhärten niedrigere Härtetemperatur und ein milderes Abschreckmittel entstehen jedoch geringere Härtespannungen /BRÜ 18a/.

Das Flammhärten und das Induktionhärten werden üblicherweise bei der Serienfertigung auf Härtemaschinen durchgeführt. Aufheizvorrichtung und Brausen zum Abschrecken sind dabei der Form der Stahlteile angepasst. Beim Tauchhärten wird das Bauteil in eine Metallschmelze eingetaucht (z. B. Bronze). So können auch komplizierte und unterschiedlich geformte Bauteile im selben Bad gehärtet werden /BRÜ 18a/

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

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

Forschungszentrum
Boltzmannstraße 14
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

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

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

www.grs.de