



Diplomarbeit

Analytischer Zulässigkeitsnachweis für kriechbeanspruchte Behälter – Simulation des Verformungsverhaltens

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.Ing. oder DI)
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften
von

Florian NEUGEBAUER, BSc

Mat.Nr.: 01053407

unter der Leitung von
Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Rauscher
Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik, E307
Getreidemarkt 9, 1060 Wien, Österreich

Unterschrift

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung
Diplomarbeit
nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde.

Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, Februar, 2019

Unterschrift

Danksagung

Der Abschluss eines Studiums bietet die Gelegenheit, einen Moment innezuhalten und die bisherigen Erfahrungen und Erlebnisse zu rekapitulieren. Dabei ist es wichtig, den vielen großartigen Menschen, die einen unterstützt und begleitet haben, zu danken.

Selbstverständlich gebührt ein großer Dank meinen Eltern, Thomas und Marianne, die mir unheimlich viel mit auf den Weg gegeben haben und mich immer unterstützt haben. In guten und schlechten Zeiten habt ihr an mich geglaubt; danke dafür!

Von ganzem Herzen möchte ich auch meinem Bruder Matthias danken. Ob beim gemeinsamen Sport, bei Kinobesuchen oder einfach beim Relaxen – mit dir war es immer lustig und unkompliziert. Als Mensch von Heiterkeit und Freude hast du für so manche ausgelassene Stunde gesorgt.

Dankbar bin ich auch gegenüber Professor Franz Rauscher für die kompetente und fachkundige Betreuung meiner Arbeit. Die gemeinsame Arbeit war oft von interessantem Austausch geprägt und auch die Zusammenarbeit im Rahmen der Konstruktionsübung war sehr bereichernd.

Für jede Wanderung sind Wegbegleiter wesentlich, um die Erfahrungen auszutauschen und einander bei Schwierigkeiten zu unterstützen und aufzubauen. Ganz großen Dank an meine lieben Freunde und Kollegen Lukas, Thomas, Benjamin, Paul, Lukas und Raphael für die häufigen Mittagessen, das gemütliche Bier nach der Arbeit oder die gemeinsamen Lernerfahrungen für die verschiedensten Prüfungen.

Jeder Student kennt sie, die Wohngemeinschaft. Als erster Schritt in die eigene Bleibe werden in ihr Erfahrungen der Gemeinschaft und Selbstständigkeit gemacht, die später im Leben wertvolle Erinnerungen werden. Hiermit einen großen Dank an Sebastian, dem kein dummer Spaß zu blöd war und der – trotz gelegentlicher Meinungsverschiedenheiten – immer für spannende und anregende Diskussionen zu begeistern war.

Genauso möchte ich mich auch ganz herzlich bei meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Konstruktionswissenschaften und technische Logistik bedanken, mit denen immer ein fachlicher Austausch möglich war oder auch eine Partie Tischfußball zur Auflockerung.

Zuallerletzt darf natürlich der Dank an die Technische Universität Wien, ihr Professorenkollegium sowie die übrigen Lehrkräfte nicht fehlen. Trotz immer geringerer finanzieller Ressourcen wird mit enormen Kraftanstrengungen und großer Motivation versucht, für die Studierenden ein förderndes Lernumfeld zu schaffen und die Qualität in der Lehre zu verbessern. Auch den engagierten Kollegen der Fachschaft soll hier für ihre stetigen Anstrengungen gedankt werden.

Abstract

In Anhang B der europäischen Norm EN 13445-3 wird der Analytische Zulässigkeitsnachweis – Direktes Verfahren beschrieben. Damit kann mit einfachen Finite-Elemente-Berechnungen die Zulässigkeit einer Struktur nachgewiesen werden. Für Probleme im Zeitstandbereich erfolgte eine Erweiterung um Kriechnachweise in Abschnitt B.9. Ziel dieser Arbeit war die Durchführung eines Analytischen Zulässigkeitsnachweises – Direktes Verfahren für eine Beispielgeometrie mit besonderem Interesse für die Kriechnachweise. Die darin verwendeten Methoden wurden diskutiert und die ermittelten Ergebnisse wurden mit Simulationen basierend auf dem Kriechgesetz nach Norton verglichen.

Annex B of the European standard EN 13445-3 describes the Design by Analysis – The Direct Route. It enables the calculation engineer to verify the admissibility of a structure by relatively simple finite-element calculations. In Chapter B.9. the standard has been expanded to cover problems in the creep range. The aim of this work was the implementation of Design by Analysis – The Direct Route for an example geometry with special interest in the creep analysis. Certain aspects regarding the admissibility for creep were especially discussed and the results were compared to simulations using Norton's law.

Keywords: Design-by-Analysis, Analytischer Zulässigkeitsnachweis, Direct Route, Kriechnachweise, Kriechgesetz nach Norton, Creep, Design for Creep, Norton-Bailey Law, ANSYS® Mechanical™

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	II
Abstract	III
Abkürzungsverzeichnis	VI
Nomenklatur	VII
1 Einführung.....	1
2 Theoretische Erläuterungen.....	2
2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen	2
2.2 Werkstoffauswahl.....	5
2.3 Ermüdung	7
2.4 Kriechen und Kriechgesetze.....	9
2.5 Interaktion von Kriechen und Ermüdung	11
2.6 Analytischer Zulässigkeitsnachweis – Direktes Verfahren	12
2.6.1 Nachweise außerhalb des Zeitstandbereiches.....	13
2.6.1.1 Tragfähigkeitsnachweis (TN).....	13
2.6.1.2 Einspielnachweis (EN).....	15
2.6.1.3 Stabilitätsnachweis (SN)	15
2.6.1.4 Ermüdungsnachweis (ZEN)	16
2.6.1.5 Standsicherheitsnachweis (SE).....	17
2.6.2 Kriechnachweise.....	17
2.6.2.1 Kriechfestigkeitsnachweis (KFN)	17
2.6.2.2 Kriechdehnungsnachweis (KDN).....	18
2.6.2.3 Kriechermüdung und zyklische Ermüdung (KEN)	22
2.7 Betrachtung von Schweißnähten	22
2.8 Verwendete Software	23
3 Erstellung eines Berechnungsmodells.....	24
3.1 Festlegung des auftretenden Einwirkungen und Lastfälle.....	24
3.2 Geometrie	26
3.3 Werkstoffkennwerte und Analyseinstellungen (Preprocessing)	28
4 Nachweise des analytischen Zulässigkeitsnachweises – Direktes Verfahren	32
4.1 Nachweise außerhalb des Zeitstandbereiches.....	32
4.1.1 Tragfähigkeitsnachweis (TN).....	32
4.1.2 Einspielnachweis (EN)	35
4.1.3 Stabilitätsnachweis (SN)	37
4.1.4 Ermüdungsnachweis (ZEN)	38
4.1.5 Standsicherheitsnachweis (SE).....	39

4.2	Kriechnachweise	39
4.2.1	Kriechfestigkeitsnachweis (KFN)	40
4.2.1.1	Kriechfestigkeitsnachweis für den Betriebslastfall	40
4.2.1.2	Kriechfestigkeitsnachweis für den Grenzlastfall	42
4.2.2	Kriechdehnungsnachweis (KDN).....	44
4.2.2.1	Kriechdehnungsnachweis für den Betriebslastfall	44
4.2.2.2	Kriechdehnungsnachweis für den Einspritzlastfall	48
4.2.2.3	Kriechdehnungsnachweis für den Grenzlastfall	52
4.2.2.4	Kriechdehnungsnachweis für den Entlastungslastfall	54
5	Simulation des Kriechverhaltens mit dem Norton-Gesetz	55
5.1	Werkstoffparameter und Berechnungsmodell	55
5.2	Stationäres Kriechen.....	56
5.3	Kriechen mit Einspritzungen	58
6	Zusammenfassung	62
6.1	Vergleich der Ergebnisse.....	62
6.2	Juristische Einschränkungen	63
6.3	Einschränkungen der Simulation.....	63
7	Anhang	64
7.1	Literaturverzeichnis.....	64
7.2	Abbildungsverzeichnis	67
7.3	Tabellenverzeichnis.....	69
7.4	Material	70

Abkürzungsverzeichnis

EN	... Einspielnachweis
EN (+ Nummer)	... Europäische Norm
KDN	... Kriechdehnnachweis
KEN	... Ermüdungsnachweis: Kriechermüdung und Zyklische Ermüdung
KFN	... Kriechfestigkeitsnachweis
SE	... Nachweis des statischen Gleichgewichts
SN	... Stabilitätsnachweis
TN	... Tragfähigkeitsnachweis
ZEN	... Ermüdungsnachweis

Wichtige Indizes

<i>all</i>	... zulässiger Wert (allowable)
<i>calc</i>	... Berechnungswert (calculation)
<i>c</i>	... Berechnungswert (calculation)
<i>d</i>	... Auslegungswert (design)
<i>max</i>	... maximal zulässiger Wert (maximum)
<i>min</i>	... minimal zulässiger Wert (minimum)

Nomenklatur

A, A'	... Materialkoeffizient für das Norton-Bailey-Potenzgesetz
$A_d, A_d^{(k)}$	... Bemessungswert der Einwirkungen im Auslegungsfall für einen Lastfall k
$A_e, A_e^{(k)}$	... elastische Grenzeinwirkung für einen Lastfall k
$A_u, A_u^{(k)}$	... (dehnungsbegrenzte) Grenzeinwirkung für einen Lastfall k
d_a	... Außendurchmesser (hier: des Stutzenrohres)
d_i	... Innendurchmesser (hier: des Stutzenrohres)
D_d	... Ermüdungsmaß für zyklische Einwirkungen
D_c	... Kriechermüdungsmaß
k	... Zählvariable für die verschiedenen Lastfälle
K	... konstanter Parameter zur einfacheren Ermittlung des Norton-Gesetzes
m, m'	... Koeffizient für die Zeitabhängigkeit im Norton-Bailey-Potenzgesetz
n, n'	... Norton-Koeffizient der Spannung für das Norton-Bailey-Potenzgesetz
n_{eq}	... Anzahl der äquivalenten Druckzyklen über die volle Schwingbreite
n_i	... Anzahl der Druckzyklen bei einer Druckdifferenz ΔP_i
N, N_B	... Lastspielzahl bis zum Bruch bei der Ermüdungsberechnung
p_c	... Berechnungsdruck
p_{c_max}	... maximaler Berechnungsdruck
p_{d_max}	... maximaler Auslegungsdruck
p_i	... Innendruck
P	... tatsächlich wirkende Last
P_{inf}	... Unterer Grenzwert für den Druck
P_u	... Traglast bei linear-elastisch ideal-plastischem Werkstoffverhalten
P_{max}	... Maximaler Druck für den gesamten Behälter
P_{sup}	... Oberer Grenzwert für den Druck
R_{eH}	... Streckgrenze bei Raumtemperatur
$R_{m/20}$	... Zugfestigkeit bei Raumtemperatur
$R_{p0,2/T}$	... 0,2%-Dehngrenze bei der spezifizierten Temperatur T
$R_{m/t/T}$	... Zeitstandfestigkeit mit der Lebensdauer t bei einer Temperatur T
$R_{p1,0/t/T}$	... 1%-Zeitdehngrenze mit einer Standzeit t bei einer Temperatur T
RM	... Charakteristischer Wert des maßgebenden Festigkeitskennwerts

RM_d	... Bemessungswert der Fließgrenze für einen Werkstoff
t	... allgemeine Zeitvariable (zB. Lebensdauer, Zeitschritt bei der Lastaufbringung)
t_A	... zweitlängste Lebensdauer, für die eine Zeitstandfestigkeit gegeben ist
t_B	... längste Lebensdauer, für die eine Zeitstandfestigkeit gegeben ist
$t_{R,f_{Fi},T_i,ex}$	... Extrapolierte Lebensdauer für eine fiktive Berechnungsspannung f_{Fi}
$t_{R,T_i,max}$	... maximale Zeit, für die das Extrapolationsverfahren nach EN 13445-3 Kap. 19 gilt
T_{inf}	... Unterer Grenzwert für die Temperatur
T_{sup}	... Oberer Grenzwert für die Temperatur
γ_R	... Koeffizient für die Extrapolation der zulässigen Lebensdauer
γ_P	... Teilsicherheitsbeiwert für den Druck
γ_R	... Teilsicherheitsbeiwert für den Werkstoffkennwert (Ausnahme: SN)
γ_T	... Teilsicherheitsbeiwert für die Temperatur
ε_0	... zeitunabhängige Anfangsdehnung
ε_{cr}	... Kriechdehnung
$\dot{\varepsilon}_{cr}$	... Kriechgeschwindigkeit, Kriechrate
$\dot{\varepsilon}_t$	... mittlere Kriechrate bei 1% Dehnung bei einer Belastungsdauer von t Stunden
σ	... allgemeine Spannung
σ_0	... Bezugsspannung für das Norton-Bailey-Potenzgesetz
σ_{ij}	... allgemeine Spannungsverteilung
$\sigma_{ij creep}$	... Spannungsverteilung im stationären Kriechlastfall
$\sigma_{ij elastic}$	... Spannungsverteilung bei einem linearelastischen Werkstoffmodell
$\sigma_{ij limit}$	... Spannungsverteilung bei der (dehnungsbegrenzten) Grenzwirkung A_u
$\sigma_{ij res}$	... anfängliche Spannungsverteilung im entlasteten Zustand (residual)
$\sigma_{längs}$	... Längsspannung im Stutzenrohr
$\sigma_{ref}, \sigma_{ref}^{(k)}$	... Referenzspannung für einen Lastfall k
σ_y	... Fließgrenze
χ	... Faktor zur Berücksichtigung von Spannungskonzentrationen
ΔP_i	... Druckdifferenz für einen Lastfall i – geringer als der volle Druck
$\Delta t^{(k)}$	... Intervalldauer eines Lastfalls k mit Temperaturen im Zeitstandbereich
$\Delta t_{all}, \Delta t_{all}^{(k)}$	... Zulässige Standzeit für einen Lastfall k
$\Delta \sigma$	... Spannungsschwingbreite für die Ermüdungsberechnung

1 Einführung

Historisch betrachtet ist der Apparatebau als Ingenieurwissenschaft bei Auslegungsverfahren von einfachen Berechnungsformeln ausgegangen, die die grundlegenden Parameter des konstruktiven Problems beschreiben. Mit der Zeit wurden diese Methoden durch die Verwendung von Kennfeldern und adaptierbaren Parametern immer weiter verbessert. Damit wurden einerseits in manchen Fällen Genauigkeiten erreicht, die mit dem zugrundeliegenden theoretischen Konzept nicht vereinbar sind; andererseits sind diese Verfahren auf bestimmte Geometrien und Ausführungen beschränkt. So ergeben sich zum Beispiel Probleme, wenn die festgelegten Fertigungstoleranzen nicht eingehalten werden.^[1]

Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von großen Rechenleistungen durch Computer wurden alternativ dazu Berechnungsverfahren entwickelt, die ein Finite-Elemente-Modell der Konstruktion verwenden, um mit Hilfe von Simulationen Aussagen über die Versagensformen zu treffen. Mit Hilfe dieser neueren Methoden ist die Bearbeitung von komplexen Strukturen und Geometrien deutlich einfacher geworden. Insbesondere lassen sich die kritischen Stellen der Konstruktion einfacher identifizieren sowie die effektiven Sicherheitsmargen ermitteln.^[1]

Als juristische Referenz für diese neuen Methoden wurde in Europa für unbefeuerte Druckgeräte der Anhang B der Europäischen Norm EN 13445-3 veröffentlicht. Dieser Anhang mit dem Titel „Analytischer Zulässigkeitsnachweis – Direktes Verfahren“ erläutert die Details für die verschiedenen Nachweise, die mit positivem Ausgang durchgeführt werden müssen, um die Zulässigkeit einer Struktur zu gewährleisten. In den 2000er Jahren wurde der Anhang um ein zusätzliches Kapitel mit „Kriechnachweisen“ erweitert. Damit können mit dieser Methode auch Probleme im Zeitstandbereich betrachtet werden.^[2]

Fragestellungen im Zeitstandbereich – auch als Kriechprobleme bezeichnet – haben in der Ingenieurwissenschaft schon eine lange Geschichte. Ausgehend von der Kraftwerkstechnik wurden im 20. Jahrhundert neue Werkstoffe entwickelt, die für hohe Temperaturen und große Spannungen geeignet waren. Damit konnte ein Betrieb bei höheren Prozesstemperaturen und größeren Prozessdrücken verwirklicht werden. Auch bei unbefeuerten Druckgeräten konnte so für geeignete Verfahren der Wirkungsgrad verbessert werden.^[3]

Wesentliche Voraussetzung für einen verbreiteten Einsatz der neuen Werkstoffe war die Verfügbarkeit von verlässlichen Werkstoffkennwerten. Verschiedene internationale Forschungsinitiativen nahmen sich dieses Themas an. In Europa war – insbesondere mit Blick auf die Normierung – das europäische gemeinschaftliche Kriechkomitee (engl. European Creep Collaborative Committee – ECC) von Bedeutung. Dieses führte eine strenge Evaluierung von Zeitstandwerkstoffdaten ein, um aus wenigen gemessenen Daten verlässliche Aussagen für unterschiedliche Betriebsbedingungen zu erhalten.^[3, 4]

Grundlegende Fortschritte ermöglichte auch die Weiterentwicklung der theoretischen Methoden und Konzepte. In den 70er Jahren wurde im Vereinigten Königreich die Methode der Referenzspannungen entwickelt, um Konstruktionsprobleme im Hochtemperaturbereich einfacher lösen zu können. Diese Methode der Referenzspannungen kommt auch im Anhang B der EN 13445-3 zur Anwendung, womit sowohl die globale Belastungssituation als auch lokale Spannungskonzentrationen berücksichtigt werden.^[5]

Gegenstand dieser Arbeit ist die Durchführung eines analytischen Zulässigkeitsnachweises – Direktes Verfahren nach EN 13445-3 Anhang B für ein fiktives Anwendungsbeispiel im Zeitstandbereich. Im Rahmen dessen werden die ermittelten Ergebnisse präsentiert und die auftretenden Probleme werden erläutert sowie Verbesserungsvorschläge zur Beseitigung der Schwierigkeiten angeführt. Anschließend wurde ein Vergleich mit Simulationen basierend auf dem Norton'schen Kriechgesetz durchgeführt, um die Grenzen des Zulässigkeitsnachweises zu evaluieren.

2 Theoretische Erläuterungen

2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die Berechnung und Auslegung von Druckgeräten erfolgt weltweit nach verschiedenen Regelwerken (siehe Tabelle 1). Während sich die Zulässigkeitskriterien in diesen verschiedenen Normen historisch bedingt unterscheiden, blieb das grundlegende zu Anwendung kommende Konzept lange Zeit im Wesentlichen dasselbe. Die Auslegung erfolgte nach Berechnungsformeln und Diagrammen, womit eine relativ einfache Anwendung möglich ist.^[1, 6]

Aufgrund der zunehmenden Verfügbarkeit von hohen Rechenleistungen konnten in letzter Zeit fortschrittliche Methoden entwickelt werden, die auch für komplexere Probleme detaillierte Analysen ermöglichten. Diese Verfahren basieren auf der Finite-Elemente-Methode und lassen die Betrachtung von verschiedenen Lastkombinationen zu.^[1]

Tabelle 1 – Ausgewählte Regelwerke zur Auslegung von Druckgeräten^[6]

Land	Rechtsvorschrift
U.S.A.	ASME Section VIII division 1 / division 2
Europäische Union	EN 13445
Deutschland	AD 2000
Frankreich	CODAP 2005
U.K.	PD 5500

Mit der Druckgeräterichtlinie der Europäischen Union wurde im europäischen Rechtsgebiet die Grundlage dafür geschaffen, einen einheitlichen rechtlichen Rahmen für diese modernen Methoden zu ermöglichen. Für unbefeuerte Druckgeräte wurde anschließend mit der Ausarbeitung der Europäischen Norm EN 13445 durch das Europäische Komitee für Normung (CEN) versucht, eine Vereinheitlichung der Standards herbeizuführen. Dabei wurden die bewährten alten Methoden und Regelwerke nicht verboten; es wurden jedoch festgelegte Rahmenbedingungen geschaffen, unter denen alternativ die Anwendung der modernen Verfahren zulässig ist.^[1]

Grundsätzlich beinhaltet die Norm „EN 13445 Unbefeuerte Druckbehälter“ in 10 verschiedenen Teilen besondere Bestimmungen zur Konstruktion, Herstellung, Inspektion und Prüfung von unbefeuerten Druckbehältern. Während für einige Werkstoffe eigene Teile existieren, gelten die Teile 2 bis 5 ausschließlich für Stahl und Stahlguss.^[7]

Der zweite Teil regelt die zulässigen Stähle, für welche die Norm gültig ist. Im dritten Teil der Norm, „Konstruktion von unbefeuerten Druckbehältern“, werden Regelungen für die Konstruktion und Berechnung von Behältern und Behälterteilen festgelegt. Mit Anforderungen an die Herstellung von unbefeuerten Druckbehältern und Druckbehälterteilen beschäftigt sich Teil 4. Im für Stähle abschließenden Teil 5 wiederum werden Maßnahmen bei der Inspektion und Prüfung eines Druckbehälters behandelt.^[2, 7, 8]

Genauere Betrachtung des dritten Teiles ergibt, dass die Auslegung nach EN 13445-3:2015 mit drei verschiedenen zulässigen Konstruktions- und Berechnungsverfahren erfolgen kann (siehe auch Abbildung 1). Im Hauptteil der Norm wird die Auslegung nach Berechnungsverfahren (DBF, engl: Design by formulae) für vielfältige Ausführungsformen im Detail beschrieben. Alternativ oder zusätzlich sind die Auslegung durch einen analytischen Zulässigkeitsnachweis (vormals Auslegung nach Analyseverfahren, engl: Design by analysis, DBA) sowie die Auslegung durch experimentelle Verfahren zulässig. Der analytische Zulässigkeitsnachweis wird zusätzlich unterteilt in den analytischen Zulässigkeitsnachweis – Direktes Verfahren (Vorgehen nach EN 13445-3:2015 Anhang B) sowie den analytischen Zulässigkeitsnachweis – Verfahren der Spannungskategorien (Vorgehen nach EN 13445-3:2015 Anhang C).^[2]

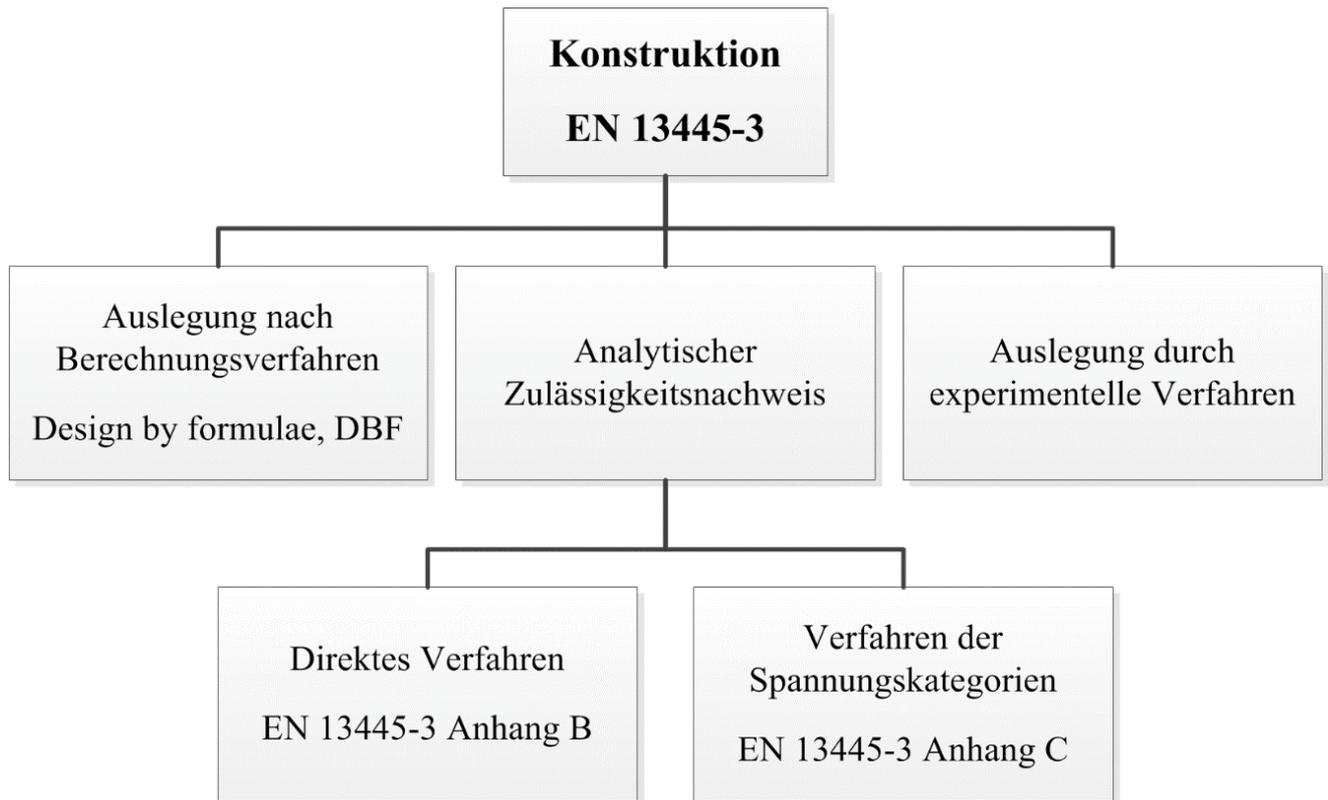


Abbildung 1 – Berechnungsverfahren nach EN 13445-3^[2]

Im Rahmen dieser Arbeit wollen wir einen genaueren Blick auf den analytischen Zulässigkeitsnachweis – Direktes Verfahren nach Anhang B der EN 13445-3:2015 werfen. Ein möglicher Anwendungsfall für den analytischen Zulässigkeitsnachweis wäre, den Nachweis als Alternative zur Auslegung nach Formeln zu verwenden. Andererseits kann damit ergänzend gearbeitet werden. So kann in jenen Fällen, die von der Auslegung nach Formeln nicht erfasst werden, die eine Überlagerung von Umgebungseinwirkungen erfordern oder in denen die angegebenen Fertigungstoleranzen nicht erreicht wurden, eine Zulässigkeit nachgewiesen werden.^[2]

Dabei muss hinzugefügt werden, dass für die Anwendung dieses Nachweises einige Einschränkungen zu berücksichtigen sind. Für einen Betrieb unterhalb des Zeitstandbereiches müssen folgende Punkte beachtet werden.^[2]

- Es müssen Werkstoffe mit ausreichender Duktilität verwendet werden.
Bei einer Verwendung von Werkstoffen nach EN 13445-2 gilt diese Forderung als erfüllt.
- Das Verfahren ist nur für Behälter oder Behälterteile der Prüfgruppe 1 zulässig.
Diese Forderung bedeutet, dass bei der Fertigung des Bauteiles alle bestimmenden Schweißnähte zu 100% zerstörungsfrei geprüft werden müssen. Auch für die anderen Schweißnähte werden sehr hohe Anforderungen bezüglich Prüfumfang gestellt. Vorteilhaft ist im Gegenzug die Verwendung eines Schweißnahtfaktors von 1, sodass die zu berücksichtigenden Sicherheiten verkleinert werden und somit geringere Wanddicken verwendet werden können.^[9]

Soll der Behälter im Zeitstandbereich betrieben werden, müssen zusätzlich die folgenden Forderungen berücksichtigt werden:^[2]

- Es müssen Werkstoffe mit ausreichend hoher Duktilität auch im Zeitstandbereich verwendet werden.

Wenn harmonisierte Normen verwendet werden, gilt diese Bedingung als erfüllt, falls in der jeweiligen Norm Werkstoffkennwerte bei den entsprechenden Temperaturen angeführt sind.

- Für jeden Lastfall mit Betrieb im Zeitstandbereich darf die spezifizierte Betriebszeit im Zeitstandbereich nicht weniger als 10.000 Stunden betragen.
- Alle kriechkritischen Bereiche müssen für Untersuchungen und zerstörungsfreie Prüfungen während des Betriebs zugänglich sein. Zusätzlich müssen entsprechende Anleitungen für die zweckmäßige Wartung und Inspektion erstellt und in die Betriebsanleitung aufgenommen werden.
- Für die Schweißnahtprüfung ist nur die Prüfgruppe 1c nach EN 13445-5 Anhang F zulässig. Damit werden besonders hohe Anforderungen in Bezug auf den Prüfumfang gestellt.

Welche Nachweise sind nun nach dem direkten Verfahren durchzuführen? Für Berechnungstemperaturen unterhalb des Zeitstandbereiches sind ein Tragfähigkeitsnachweis, ein Einspielnachweis, ein Stabilitätsnachweis, ein Ermüdungsnachweis sowie ein Nachweis des statischen Gleichgewichts durchzuführen. Falls sich die Berechnungstemperaturen im Zeitstandbereich befinden, müssen zusätzlich noch ein Kriechfestigkeitsnachweis, ein Kriechdehnungsnachweis sowie ein Ermüdungsnachweis: Kriechermüdung und Zyklische Ermüdung durchgeführt werden. Eine übersichtliche Darstellung erfolgt in Abbildung 2.^[2]

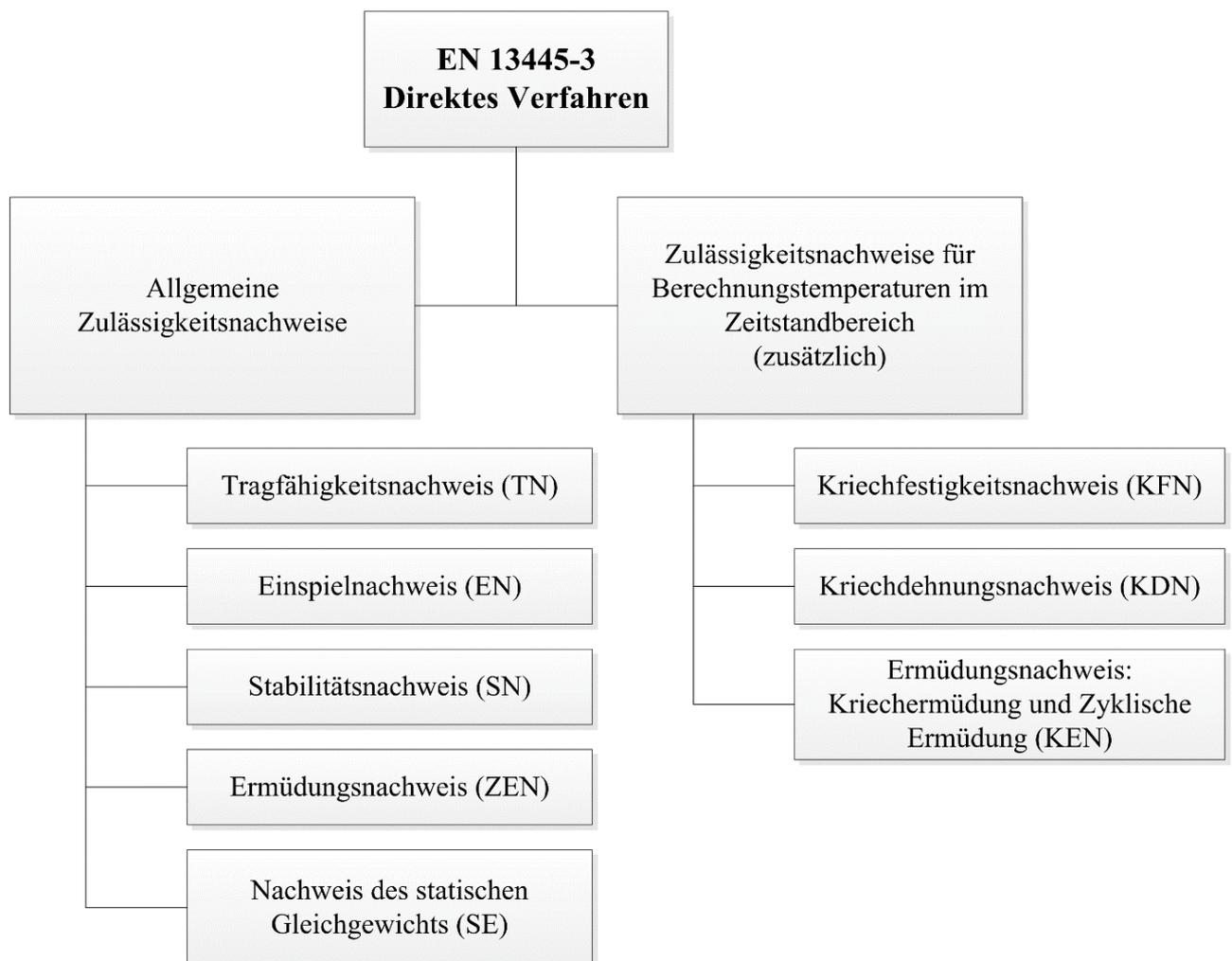


Abbildung 2 – Nachweise des Analytischen Zulässigkeitsnachweises nach EN 13445-3^[2]

2.2 Werkstoffauswahl

Die Werkstoffauswahl ist eine wesentliche Aufgabe der Konstrukteure. Sie ist eng verknüpft mit anderen Konstruktionskriterien wie Funktion, Beanspruchung, Gestalt sowie der Fertigung, der Sicherheit und den entstehenden Kosten. Im Apparatebau beeinflusst die Wahl des passenden Werkstoffes die gesamte Planungsphase, weshalb die Entscheidung üblicherweise recht früh im Konstruktionsprozess getroffen wird.^[10, 11]

Aus rechtlicher Sicht ist die Berechnung und Auslegung von Druckbehältern nach EN 13445-3 grundsätzlich nur zulässig, wenn die Behälter aus Werkstoffen mit ausreichender Duktilität (bei Umgebungsbedingungen) gefertigt werden. Für Behälter aus Stahl ist, falls keine aufwendigen Nachweise über die Zulässigkeit eines Werkstoffes vorgenommen werden sollen, die Verwendung von Werkstoffen nach EN 13445-2 die empfohlene Vorgehensweise. In diesen Teil der Norm wurden gegenwärtig nur Stähle mit ausreichender Duktilität aufgenommen.^[2, 8]

Bei einer Auslegung im Zeitstandbereich nach EN 13445-3 wird zusätzlich ausreichende Duktilität im Zeitstandbereich gefordert. Auch hier kann für den Werkstoff Stahl mit den Werkstoffen in EN 13445-2 gearbeitet werden, sofern in der Werkstoffnorm zeitabhängige Werkstoffeigenschaften gegeben sind. Dann wurde zusätzlich auf ausreichende Duktilität im Zeitstandbereich geachtet, womit die hohen Anforderungen an den Werkstoff erfüllt sind.^[2, 8]

Für die tatsächliche Auswahl des Werkstoffes existieren verschiedenste Kriterien. Eine Auflistung der möglichen Anforderungen würde hier den Rahmen sprengen. Wesentlichen Einfluss besitzen auch die Werkstoffeigenschaften, wozu u.a. folgende Punkte gezählt werden:^[11]

- Festigkeitseigenschaften
- Die chemische Zusammensetzung
- Die physikalischen Eigenschaften (Elastizitätsmodul, Wärmeausdehnungskoeffizient, etc.)
- Korrosionsbeständigkeit
- Erosionsbeständigkeit
- Verfügbarkeit
- Preis

Als Grundlage für die Auswahl werden in der Regel Werkstoffnormen verwendet. Abhängig vom Herstellverfahren des Bauteils sowie besonderen Eigenschaften kommen dabei unterschiedliche Werkstoffnormen zur Anwendung. In Bezug auf die besonderen Werkstoffeigenschaften ist u.a. von Bedeutung, ob der Werkstoff ferritisch oder austenitisch ist, ob er besondere Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen aufweist oder ob bestimmte Legierungselemente in wesentlichen Mengen vorhanden sind. Bezüglich der Produktform wird z.B. zwischen Blech und Band, nahtlosen Rohren, geschweißten Rohren und Schmiedestücken unterschieden.^[8]

In den Werkstoffnormen finden sich Tabellen zur Charakterisierung der Werkstoffe, die die jeweilige Norm behandelt. Die angeführten mechanischen Eigenschaften umfassen in der Regel gewisse Festigkeitskennwerte bei Raumtemperatur sowie bei erhöhten Temperaturen und Angaben zu Bruchdehnung und Kerbschlagarbeit. Zusätzliche Werkstoffkennwerte wie Zeitstandfestigkeiten und Zeitdehngrenzen sind oft in informativen Anhängen der Werkstoffnormen tabelliert.^[12]

Als Kurzzeitfestigkeitswerte sind insbesondere die Kennwerte für Streckgrenze R_{eH} , Zugfestigkeit R_m und die 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ von Bedeutung, welche in Abbildung 3 graphisch veranschaulicht werden. Zusätzlich ist auch die Bruchdehnung A als Anhaltswert für die Zähigkeit dargestellt. Diese Werte werden üblicherweise durch Messung in einem Zugversuch bei Raumtemperatur nach DIN EN ISO 6892-1 bestimmt. Bei den Zahlenwerten der Werkstoffnormen handelt es sich im Normalfall um Mindestwerte oder es wird ein definierter Messbereich angegeben.^[12, 13]

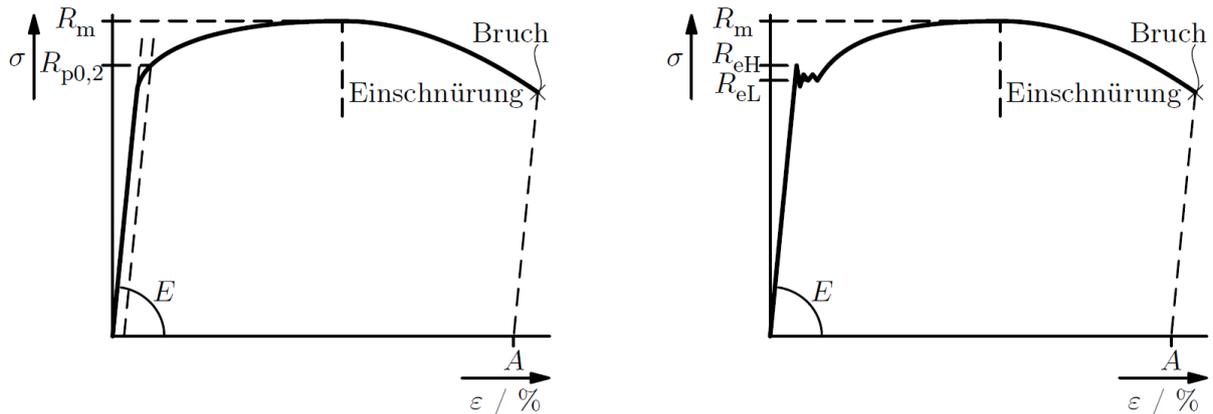


Abbildung 3 – Werkstoffkennwerte für ein Metall ohne (links) / mit (rechts) ausgeprägter Streckgrenze^[13]

Häufig verwendete Werkstoffkennwerte im Zeitstandbereich sind die Zeitstandfestigkeiten sowie die 1%-Zeitdehngrenzen. Bei den Zeitstandkennwerten in den Werkstoffnormen handelt es sich dabei um Mittelwerte, für die ein Streubereich von $\pm 20\%$ angenommen wurde.^[2, 12]

Zeitstandfestigkeiten $R_{m/t/T}$ geben die Spannung an, bei der eine Probe bei einer festgelegten Temperatur T nach einer vorgegebenen Zeit t versagt. Bei der Temperatur T handelt es sich dabei um die Versuchstemperatur. Als Zeitintervalle werden üblicherweise 10.000 Stunden, 100.000 Stunden und gelegentlich auch 200.000 Stunden verwendet.^[13]

Bei Zeitdehngrenzen $R_{p(\epsilon)/t/T}$ wird ebenfalls eine Spannung bestimmt. Allerdings wird jene Spannung angegeben, die bei definierter Temperatur T und definierter Belastungsdauer t zu einer gewünschten Dehnung ϵ (zumeist 0,2% oder 1%) führt.^[13]

Für den Konstruktionsingenieur bietet die Arbeit mit Werkstoffnormen den Vorteil, dass er sich auf eine große Zahl an validierten Werkstoffkennwerten verlassen kann. Gerade bei der Auslegung für den Zeitstandbereich treten jedoch Probleme auf. Aus juristischer Sicht problematisch ist, dass die Werkstoffkennwerte im Zeitstandbereich üblicherweise in einem Anhang erwähnt werden, der als „informativ“ gekennzeichnet ist. Dabei handelt es sich oft um extrapolierte Werte; zusätzliche Messungen wiederum sind arbeitsintensiv und teuer. Lange Messdauern wie 100.000 Stunden und mehr sind auch logistisch nur selten möglich.^[12, 14]

Dazu kommt die Problematik, dass nicht für alle Werkstoffkennwerte gute Datengrundlagen existieren. Insbesondere für Zeitdehngrenzen sind in der europäischen Union noch keine einheitlichen Ermittlungsprozeduren festgelegt, die verlässliche Kennwerte ermöglichen. Manche Werkstoffnormen wie die EN 10028-2 führen zwar Werte im informativen Anhang an; andere wie die EN 10216-2 jedoch beinhalten überhaupt keine Werte für Zeitdehngrenzen.^[4, 12, 14]

Bei der Bestellung von Werkstoffen nach EN 13445-2 müssen begleitende Prüfdokumente nach EN 10204 mitgeliefert werden. Damit soll sichergestellt werden, dass die gelieferten Erzeugnisse den Anforderungen der Bestellung entsprechen. Für die Auslegung nach dem Analytischen Zulässigkeitsnachweis – Direktes Verfahren müssen Stähle mit einem spezifischen Abnahmeprüfzeugnis (Abnahmeprüfzeugnis 3.1 oder 3.2) verwendet werden.^[8]

In der Folge sollen beobachtete Phänomene bei Werkstoffen besprochen werden, die langfristig die Integrität des Behälters beeinträchtigen können und daher bei Konstruktion, Berechnung und Werkstoffauswahl eine wesentliche Rolle spielen können. Dabei hängt die tatsächliche Bedeutung immer von den Betriebsbedingungen des Druckbehälters ab.

2.3 Ermüdung

Kommt es bei einem unter Spannung stehenden Werkstoff zu häufigen Spannungswechseln, so ist es notwendig, einen weiteren Schädigungsmechanismus zu betrachten, der Ermüdung genannt wird. Dabei kommt es durch die Spannungswechsel zu einer Schädigung im Inneren des Werkstoffes, die zumeist ohne äußere Formänderung auftritt. Die Ermüdung kann mit Verfestigung und Endfestigung verbunden sein und in letzter Konsequenz zum Bruch führen – bei Spannungen, die weit unterhalb der statischen Festigkeit liegen.^[15, 16]

Ermüdung ist an sich ein nicht entkoppelbares Vielparameterproblem. Denn die Ermüdungsfestigkeit einer Konstruktion hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab, zu denen u.a. die Lastspielzahl N , die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$, die Mittelspannung σ_m , der Oberflächenzustand, die Temperatur und verschiedene Werkstoffeigenschaften gehören. Das hat zur Folge, dass eine exakte quantitative Vorhersage kaum möglich ist. Mit der Einhaltung gewisser Regeln für Auslegung und Konstruktion metallischer Bauteile kann die Ermüdungsfestigkeit verbessert werden, wobei das Erfahrungswissen bei einer spezifischen Problemstellung besonders viel Gewicht hat. Für detaillierte Informationen wird auf die einschlägige Literatur verwiesen.^[16]

Experimentell wird die Problematik der Ermüdung in der Materialwissenschaft durch den Schwingfestigkeitsversuch nach August Wöhler behandelt. Dabei werden ungekerbte, gekerbte oder bauteilähnliche Probestäbe mit periodisch wechselnden Lastamplituden konstanter Größe beaufschlagt und der Versuch anschließend bis zum Bruch der Probe fortgesetzt. Nach der Durchführung mehrerer Versuche bei unterschiedlichen Spannungsamplituden kann in einem Diagramm für jeden Versuch die Spannungsamplitude $\Delta\sigma$ über der Lastspielzahl bis zum Versagen N aufgetragen werden. Werden die resultierenden Punkte miteinander verbunden, so ergibt sich die Wöhler-Linie (siehe Abbildung 4).^[16]

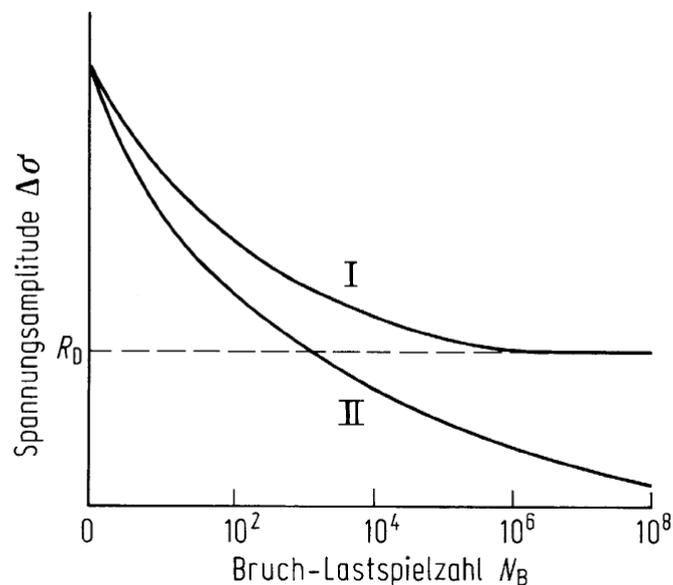


Abbildung 4 – Schematische Darstellung (doppeltlinear) von Wöhler-Linien mit (I) / ohne (II) Dauerschwingfestigkeit^[15]

Die Darstellung der Wöhler-Linie in einem doppeltlogarithmischen Diagramm (siehe Abbildung 5) ermöglicht die Abgrenzung von drei Bereichen: Kurzzeitfestigkeit, Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit. Bei Spannungen unterhalb der Dauerfestigkeit tritt bis zur Grenzwahrschwingzahl $N_D = 2 \times 10^6$ (auch andere Werte möglich) kein Bruch auf. Je nach Werkstoff kommt es danach zu tatsächlicher Dauerfestigkeit (bei unlegierten Stählen) oder zu einem weiteren stetigen Schwingfestigkeitsabfall. Im Bereich der Zeitfestigkeit nimmt die Schwingfestigkeit mit abnehmenden Schwingspielzahlen stark zu. Zuletzt folgt der Bereich der Kurzzeitfestigkeit, wobei der Übergang zwischen Zeitfestigkeit und Kurzzeitfestigkeit im Bereich von $N = 10^2 - 10^4$ Schwingspielen stattfindet.^[16]

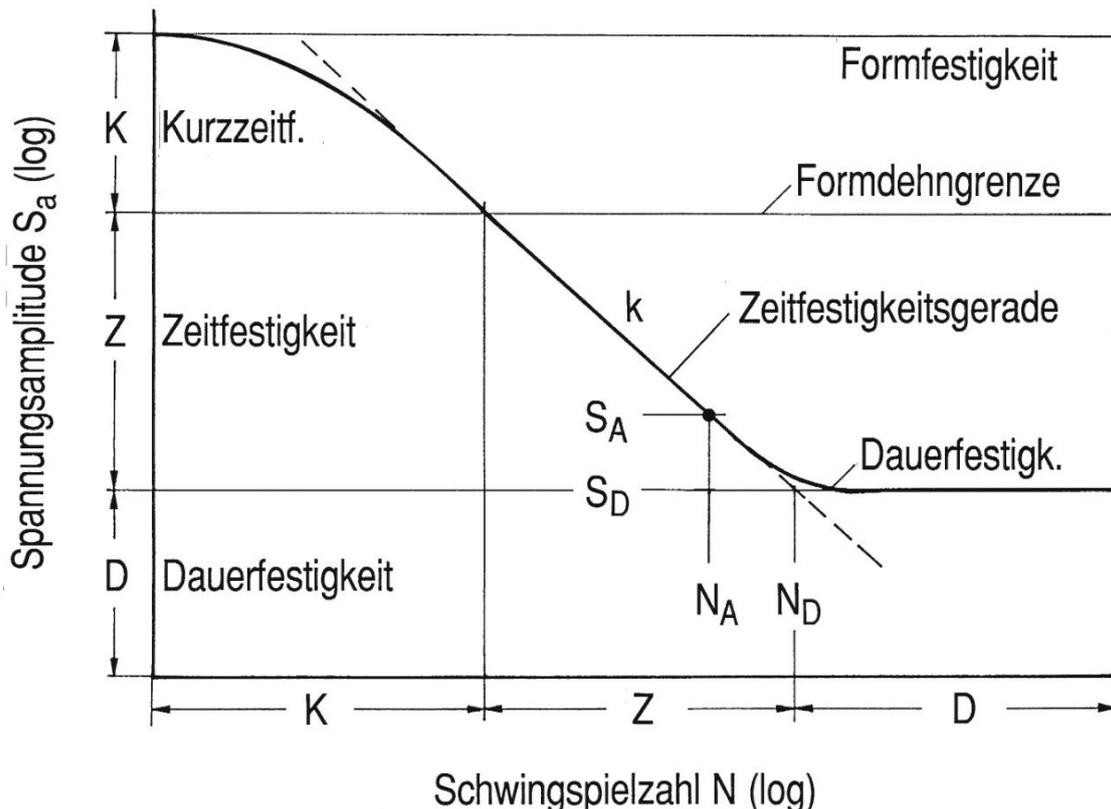


Abbildung 5 – Wöhler-Linie in doppeltlogarithmischer Darstellung^[17]

Die Behandlung von Ermüdung in der Norm EN 13445-3 erfolgt in den Kapiteln 17 und 18. Dort werden Regeln und Methoden zur Ermittlung der zulässigen Anzahl von Belastungszyklen angeführt. Die Berechnung erfolgt nur für bestimmte Stellen des Behälters, die vom durchführenden Berechnungsingenieur als besonders kritisch identifiziert wurden.^[2]

Für jedes Detail werden nach vorgegebenen Regeln Spannungsschwingbreite, Vergleichsspannungsschwingbreite und Wechselfestigkeit bestimmt. Dabei können über Korrekturfaktoren für Mittelspannungseinfluss, Wanddicke, Temperatur und Kerbwirkung verschiedene Betriebsbedingungen berücksichtigt werden. Zuletzt erfolgt ein Vergleich mit Berechnungsermüdungskurven (ähnlich zu Abbildung 5), wobei zwischen ungeschweißten und geschweißten Bereichen unterschieden wird.^[2]

Diese Differenzierung erfolgt aufgrund der Kerbwirkung, einer lokalen Beanspruchungserhöhung aufgrund von Kerben, die für die Ermüdung besonders relevant ist. Die Kerbwirkung kann die Dauerfestigkeit deutlich herabsetzen oder im Bereich der Kurzzeitfestigkeit bei manchen Werkstoffen Sprödbrüche verursachen. Bei den erwähnten Schweißverbindungen stellt oft die Schichtung der Wärmeeinflusszone aufgrund der inhomogenen Fließgrenze eine Kerbe dar.^[16]

Während die Hauptursache für Spannungswechsel im Apparatebau meist der Druck darstellt, kann auch die Temperatur einen Einfluss auf die Ermüdung haben. So kann eine inhomogene Temperaturverteilung bei behinderten Wärmedehnungen zu lokalen Zug- und Druckspannungen führen. Kommt es nun zu häufig wechselnden Temperaturen, so ergibt sich eine Temperaturwechselbeanspruchung, die zu thermische Ermüdung führen kann. Im Extremfall kommt es zu einem abrupten Temperaturwechsel, der auch Thermoschock genannt wird. Dann spielt die sogenannte Thermoschockermüdung gegebenenfalls eine Rolle.^[16]

In der Norm EN 13445-3 wird eine Analyse der Ermüdung ab 500 äquivalenten Druckzyklen über die volle Schwingbreite verlangt. Während die Vorgehensweise bei mehr als 500 äquivalenten Druckzyklen in Kapitel 2.6.1.4 erläutert wird, wird der Bereich bis zu diesen 500 äquivalenten Druckzyklen als Kurzzeitfestigkeit betrachtet.^[2]

2.4 Kriechen und Kriechgesetze

In vielen technischen Anwendungsfällen wie Atomkraftwerken, fossilen Kraftwerken oder Prozessen in der chemischen Industrie werden Druckgeräte bei hohen Temperaturen betrieben. Dabei kann bei diesen Temperaturen das Phänomen auftreten, dass ein unter Spannung stehendes Material mit der Zeit zunehmend plastisch verformt wird. Dieses Verhalten, bei dem der Werkstoff langsam weiter „fließt“, wird gemeinhin „Kriechen“ genannt.^[18, 19]

Kriechen beschreibt die zeitabhängige plastische Verformung von unter Spannung stehendem Material. Dieses Verhalten tritt bei Metallen ab Temperaturen von etwa 30-40% der Schmelztemperatur (in Kelvin) auf, da die thermisch aktivierten Platzwechselvorgänge zunehmen. Auf atomarer Ebene kommt abhängig von Temperatur und Spannung ein anderer Verformungsmechanismus zum Tragen: Dabei wird zwischen Versetzungsgleiten, Versetzungskriechen und Diffusionskriechen differenziert. Für Details sei auf die Literatur verwiesen. Zusammengefasst hängt die Verformung aus makroskopischer Sicht vom Werkstoff, von der Spannung, von der Temperatur und von der Dauer der Belastung ab.^[15, 20]

Abhängig vom Belastungszyklus existieren verschiedene Versagensformen, die bei der Auslegung berücksichtigt werden müssen. Der stationäre Betrieb im Kriechbereich resultiert in einer langsam zunehmenden Schädigung, die schlussendlich zu einem Kriechbruch führen kann. Kriechzyklen mit wechselnden Belastungen begünstigen die Kriechermüdung. Schließlich kann auch Kriechbeulen zu einem Strukturversagen führen, wenn aufgrund der Geometrie entsprechende Belastungen auftreten.^[20]

Um technische Anwendungen im Kriechbereich zu realisieren, ist es zielführend, das Kriechverhalten eines Werkstoffes zu ermitteln. Nach der üblichen Vorgehensweise wird dabei bei einer definierten Temperatur im statischen Zugversuch die zeitabhängige Dehnung der Probe bestimmt. Als Belastung wird dazu entweder eine konstante Last (im technischen Zeitstandversuch) oder eine konstante Spannung (im physikalischen Kriechversuch) aufgebracht. Das Resultat eines solchen Messaufbaues ist die Messgröße Dehnung als Funktion der Zeit (siehe Abbildung 6).^[15]

Sollen im Speziellen die Kriechkurven des physikalischen Kriechversuches betrachtet werden, so können diese in drei Bereiche eingeteilt werden, die jeweils unterschiedliche Kurveneigenschaften besitzen (schematisch dargestellt in Abbildung 6). Im Bereich des „primären Kriechens“ oder „Übergangskriechens“ (Bereich I) nimmt die Dehnung ausgehend von der zeitunabhängigen Anfangsdehnung ϵ_0 stark zu; die Dehngeschwindigkeit jedoch nimmt stetig ab. In diesem Bereich überwiegt somit die Verfestigung des Werkstoffes gegenüber der entfestigenden Prozessen. Der anschließende Bereich des „stationären“ oder „sekundären Kriechens“ (Bereich II) wird von einer konstanten Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon}_c$ geprägt. Hier halten sich Verfestigung und thermisch aktivierte, entfestigende Vorgänge die Waage; die Dehnung steigt linear an.^[13, 15, 20]

Nach einer längeren Belastungsdauer ändert sich das Werkstoffverhalten erneut und es kommt zu einem starken Anstieg der Kriechgeschwindigkeit. Damit nimmt auch die Kriechdehnung überproportional zu, bis der Bauteil schließlich durch Bruch versagt. Dieser Abschnitt wird „tertiärer Kriechbereich“ genannt (Bereich III) und die thermisch aktivierten Verformungsvorgänge mit Entfestigung sind der vorherrschende Mechanismus. Es kommt zu massiven Schädigungen des Grundwerkstoffes.^[13, 15]

An diesem Punkt stellt sich die Frage, wie sich das Kriechverhalten eines Werkstoffes mathematisch beschreiben lässt. Aufgrund der wirtschaftlichen Bedeutung dieser Thematik existieren in der Literatur eine große Zahl an empirischen und halbempirischen Beziehungen. Der Larson-Miller-Parameter wird verwendet, um aus experimentellen Ergebnissen Kriechbruchdaten zu extrapolieren.^[13] Das Norton-Bailey-Potenzgesetz wird verwendet, um Kriechdehnungen und die Kriechdehnrate zu bestimmen.^[21] Mit der MPC Omega-Methode wiederum können Dehnungsakkumulation (ratcheting), Schädigung und Schädigungsrate, Kriechrate sowie verbleibende Lebensdauer berechnet werden.^[20, 22] Speziellere Ansätze werden u.a. in Wang, et al. [23], Katcher [24] und Ghatak und Robi [25] beschrieben.

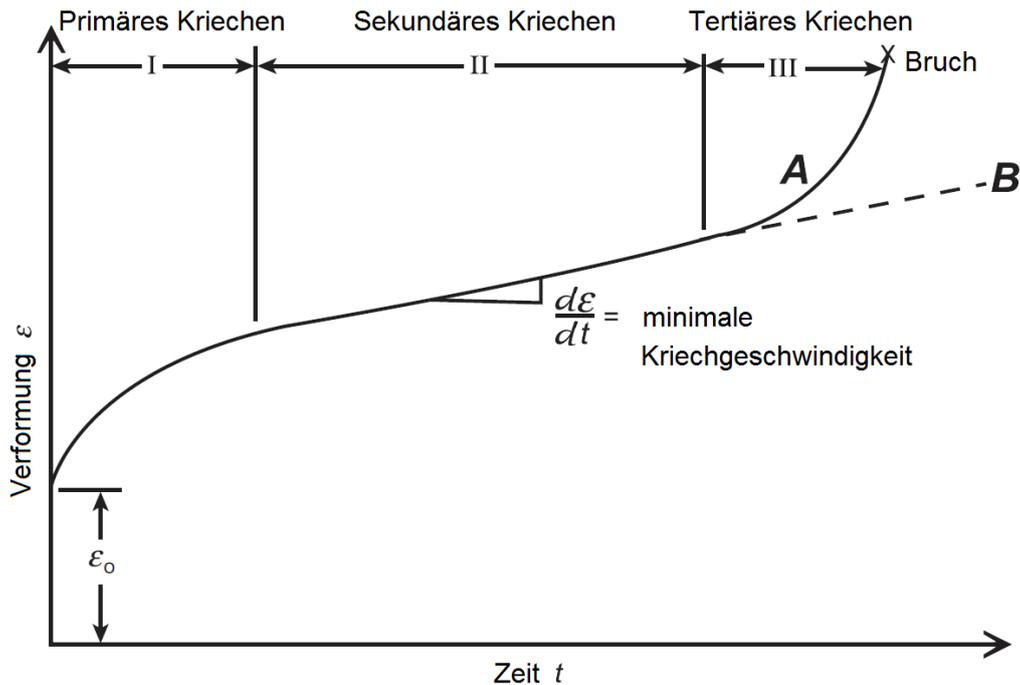


Abbildung 6 – Typische Kriechkurve mit den drei Bereichen des Kriechens^[20]
 A – Konstante Last B – Konstante Spannung

Insbesondere im Entwurfs- und Konstruktionsprozess stellen sich zusätzliche Probleme. Da Konstruktionen häufig komplizierte Spannungszustände aufweisen, ist keine direkte Vergleichbarkeit mit dem einachsigen Zugversuch gegeben. Auch Simulationen und Finite-Elemente-Analysen besitzen nur bedingte Aussagekraft, wenn wenig Informationen über die Werkstoffgesetze vorhanden sind.^[18]

Eine einfache Methode zur Betrachtung von sowohl defektfreien als auch beschädigten Strukturen ist die Referenzspannungs-Methode. Diese wurde mit der Zielsetzung entwickelt, das Kriechverhalten einer Struktur näherungsweise mit einem einzigen Zugversuch im Kriechbereich zu evaluieren. Dazu wird der betrachtete Belastungsfall über eine sogenannte Referenzspannung σ_{ref} beschrieben.^[5, 18]

Bei der Weiterentwicklung der ursprünglichen Methode wurde eine Formel (siehe Formel (2.1)) entwickelt, mit der eine Obergrenze für die wahre Referenzspannung bestimmt werden kann. Demnach kann unter Voraussetzung eines linearelastisch idealplastischen Werkstoffverhaltens mit der tatsächlich wirkenden Last P , der Fließgrenze σ_y und der Traglast P_u bei dieser Streckgrenze ein charakteristischer Wert der Referenzspannung ermittelt werden.^[5, 18, 26]

$$\sigma_{ref} = \frac{P * \sigma_y}{P_u} \quad (2.1)$$

Um eine konservative Vorhersage zu ermöglichen, wurde von Goodall, et al. [5] auf der Grundlage von Bruchberechnungen und experimentellen Daten eine Erweiterung von Formel (2.1) vorgeschlagen. Darin werden Spannungskonzentrationen berücksichtigt, indem das Verhältnis von Versagenslast zur Elastizitätsgrenze in die Formel eingeht – ausgedrückt durch die Variable χ (siehe Formel (2.2)).

$$\sigma_{ref} = \frac{P * \sigma_y}{P_u} * (1 + 0,13 * \overline{\chi - 1}) \quad (2.2)$$

Letztgenannte Formel (2.2) findet auch Anwendung in den Kriechnachweisen von Anhang B der EN 13445-3. Grundlegend ist dabei die Einschränkung, dass die Gültigkeit überwiegend auf Lastfälle mit konstanter Last beschränkt ist.^[2]

Ein anderer Ansatz arbeitet mit Spannungskonzentrationsfaktoren. Diese geben für verschiedene Geometrien und Belastungen das Verhältnis zwischen der maximalen Spannung in einer Geometrie und einer Bezugsspannung an.^[27] In der Literatur werden insbesondere Schweißnähte mit dieser Methode beurteilt. Anwendungsfälle finden sich u.a. in Dong [28] für Reparaturschweißungen, in Vazda [29] für Rundnähte im Kriechbereich sowie in Torshizi und Jahangiri [30] für eine Lebensdauerberechnung eines Wärmetauschers.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wurde das oben erwähnte Norton-Bailey-Potenzgesetz verwendet, welches primäres und sekundäres Kriechen abbilden kann. Gemäß dem Gesetz (siehe Formel (2.3)) wird die Kriechdehnung ε_{cr} maßgeblich von der aufgetragenen Spannung σ beeinflusst, da von einem exponentiellen Zusammenhang ausgegangen wird. Ebenso spielt die Kriechdauer t eine Rolle.^[20, 21]

$$\varepsilon_{cr} = A * \sigma^n * t^m \quad (2.3)$$

Dabei werden A , n und m als temperaturabhängige Materialkonstanten angenommen, welche im Allgemeinen unabhängig von der Spannung sind. Die beiden Exponenten n und m sind dimensionslose Parameter, während der Koeffizient A zu den Einheiten von Zeit und Spannung passen muss.^[21]

Alternativ kann das Norton-Bailey-Potenzgesetz auch über die Kriechgeschwindigkeit bzw. Kriechrate formuliert werden (siehe Formel (2.4)). Dabei wird die Kriechrate $\dot{\varepsilon}_{cr}$ als Funktion der Spannung σ sowie der Zeit t dargestellt. Weitere Größen in der Formel sind eine Bezugsspannung σ_0 , der Norton-Koeffizient n' , ein temperaturabhängiger Materialparameter A' sowie ein exponentieller Parameter m' für die Zeit. Häufig wird bei dieser Formulierung mit der Einschränkung gearbeitet, dass m' gleich Null ist. Sowohl jene Formulierung als auch diese Vereinfachung werden in dieser Arbeit verwendet.^[15, 21]

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = A' * \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{n'} * t^{m'} \quad (2.4)$$

2.5 Interaktion von Kriechen und Ermüdung

Wenn ein Bauteil unter Schwingbeanspruchung im Hochtemperaturbereich steht, wird ein besonders kritisches Schädigungsverhalten betrachtet. Einerseits tritt eine Schädigung durch Ermüdung auf (Rissbildung), andererseits kommt es aufgrund der hohen Temperatur zu einer Schädigung durch Kriechen (Hohlraumbildung). Damit muss die Überlagerung von Ermüdungs- und Kriechschädigung zusätzlich berücksichtigt werden.^[16]

Eine Berechnungsmethode nach der Hypothese der linearen Schadensakkumulation beruht darauf, für Kriechen analog zur Ermüdung Teilschädigungen zu ermitteln und zu einem Schädigungsmaß durch Kriechen aufzusummieren. Anschließend kann die Gesamtschädigung bestimmt werden, indem die Schädigung durch Ermüdung und die Schädigung durch Kriechen addiert werden. Eine nichtlineare Interaktion der beiden Schädigungsmechanismen wird in dieser Berechnung nicht abgebildet.^[16]

Für den zulässigen Grenzwert der Gesamtschädigung existieren verschiedene Ansätze, insbesondere auch in den maßgeblichen Rechtsvorschriften. EN 13445-3 Anhang B und die britische „Nuclear Electric R5 procedure“ gehen erst bei einer Gesamtschädigung von 1,0 von Bauteilversagen aus. Ein konservativerer Ansatz wird im amerikanischen „ASME BPVC.III.1.NH-2015“ gewählt, indem nicht ein einheitlicher Wert vorgegeben wird, sondern eine Grenzkurve der Zulässigkeit.^[16, 31]

Grundsätzlich können bei der Überlagerung von Ermüdungs- und Kriechschädigung nichtlineare Interaktionen der Schädigungsentwicklung eines Bauteiles auftreten. Daher existieren verschiedene erweiterte Methoden, die die nichtlineare Interaktion berücksichtigen und damit die Schwächen der Hypothese der linearen Schadensakkumulation teilweise ausbessern. Für Vor- und Nachteile der verschiedenen Erweiterungen sei auf die Literatur verwiesen.^[16]

2.6 Analytischer Zulässigkeitsnachweis – Direktes Verfahren

In dem folgenden Abschnitt soll auf die wichtigsten Schritte bei der Durchführung eines analytischen Zulässigkeitsnachweises nach dem direkten Verfahren eingegangen werden. Aus inhaltlichen Gründen wurde dabei der Rechtstext auf das Wesentliche verkürzt, das für diese Arbeit Relevanz hat. Für eine komplette Version inklusive aller sprachlichen Details und Erläuterungen wird auf den Originaltext der Norm verwiesen (siehe EN 13445-3 Anhang B [2]). Eine gute Darstellung der Nachweise außerhalb des Zeitstandbereiches erfolgte auch von Rauscher [32].

Der Analytische Zulässigkeitsnachweis – Direktes Verfahren wird in einzelne Nachweise unterteilt, die jeweils zumindest eine wesentliche Versagensart des Behälters behandeln. Die verschiedenen Nachweise wurden schon in Kapitel 2.1 aufgelistet. Zu Beginn der Analyse erfolgt die Festlegung von verschiedenen Lastfällen (Normalbetriebslastfälle, besondere Lastfälle, außergewöhnliche Lastfälle), die im Rahmen der Analyse betrachtet werden müssen. Lastfälle sind hier Kombinationen von gleichzeitigen Belastungen einer Struktur, die nach vernünftigem Ermessen auftreten können.^[2]

Jeder Nachweis muss im Allgemeinen für mehrere Lastfälle durchgeführt werden. In der Norm ist für jeden Nachweis eine einfache verbindliche Regel angegeben, die für die Zulässigkeit erfüllt sein muss. Zusätzlich können für jede verbindliche Regel mehrere Anwendungsregeln angeführt sein, die verschiedene Möglichkeiten zur Erfüllung der verbindlichen Regel aufzeigen. Die zutreffendste Anwendungsregel ist zu wählen.^[2]

Für die Festlegung der verschiedenen Lastfälle werden die auftretenden Lasten auf die Struktur – genannt Einwirkungen – unterteilt in:^[2]

- ständige Einwirkungen
- Temperatur, Druck und von diesen deterministisch abhängige Einwirkungen
- veränderliche Einwirkungen (außer Temperatur und Druck)
- außergewöhnliche Einwirkungen.

Für alle Einwirkungen sind charakteristische Werte festzulegen, die die Variation der Einwirkung berücksichtigen. Eine Ausnahme stellen Temperatur und Druck dar, bei denen die „nach vernünftigem Ermessen vorsehbar zu erwartenden“ höchsten und niedrigsten Werte (Supremum und Infimum) zu spezifizieren sind. Für Einwirkungen, bei denen die Zeitabhängigkeit von Bedeutung ist, müssen für Einspielnachweis und Ermüdungsnachweis charakteristische Funktionen festgelegt werden. Detailliertere Informationen dazu sind der Norm zu entnehmen.^[2]

Sicherheiten bezüglich der maximalen Belastungen werden beim analytischen Zulässigkeitsnachweis über das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt. Dabei werden die verschiedenen charakteristischen Werte jedes Lastfalls (Werkstoffkennwerte, einwirkende Lasten) mit den Teilsicherheitsbeiwerten so angepasst, dass gewisse Abweichungen abgedeckt sind. Die resultierenden Werte, die bei der Modellierung verwendet werden, werden Bemessungswerte genannt. Für die Einwirkungen werden die charakteristischen Werte mit den Teilsicherheitsbeiwerten (diese sind größer oder gleich 1) multipliziert, um die Bemessungswerte zu erhalten. Somit werden die Belastungen im Modell größer als die tatsächlichen Werte.^[1]

Schlussendlich sind für die Durchführung der Nachweise geeignete Berechnungsmodelle zu erstellen. Die Modelle arbeiten üblicherweise mit der Theorie 1.Ordnung, sprich einer Theorie mit linearen kinematischen Beziehungen sowie Gleichgewichtsbedingungen am unverformten Bauteil. Ausnahmen dazu stellen nur der Instabilitätsnachweis dar, sowie Fälle, bei denen die Einwirkungen einen ungünstigen (verschwächenden) Einfluss haben.^[2]

Die Grundlage der Modelle ist die betrachtete Geometrie, die im Rahmen der Simulation auf ihre Zulässigkeit analysiert werden soll. Die Abmessungen der betrachteten Struktur sollen den Nennwerten

entsprechen; nur für die Wanddicken sollen stattdessen die Berechnungswanddicken verwendet werden, welche aus den Nennwanddicken durch Abziehen der Zuschläge bestimmt werden. Als Anfangszustand wird ein spannungsloser Anfangszustand angenommen; außer es ist im jeweiligen Nachweis anders vorgeschrieben.^[2]

Abhängig vom jeweiligen Nachweis arbeiten die Modelle mit einem linearelastischen Werkstoffmodell oder mit einem linearelastischen-idealplastischen Werkstoffmodell. Bis auf den Tragfähigkeitsnachweis wird Fließen über die Mises'sche Fließbedingung beschrieben. Doch auch für den Tragfähigkeitsnachweis darf statt der Tresca'schen Fließbedingung die Fließbedingung nach Mises verwendet werden, wenn die Werkstoffkennwerte entsprechend adaptiert werden.^[2]

Bezüglich der Werkstoffkennwerte wird zwischen Festigkeitskennwerten und anderen Werkstoffkennwerten wie E-Modul, Querdehnungszahl und Wärmeausdehnungskoeffizienten differenziert. Für die Festigkeitskennwerte (Kurzzeitkennwerte und Langzeitkennwerte) wird im jeweiligen Nachweis festgelegt, welcher Festigkeitskennwert verwendet wird. Der Bemessungswert des Festigkeitskennwerts RM_d eines Werkstoffs wird durch Division durch den Teilsicherheitsbeiwert (dieser ist größer oder gleich 1) ermittelt.^[2]

Die anderen Werkstoffkennwerte werden nach Anhang O der EN 13445-3 bestimmt, wobei die Temperatur der Auswertung wiederum vom Nachweis abhängt. Dabei dürfen nach Abschnitt B.7.5.2 der EN 13445-3 zeitunabhängige Werte verwendet werden; es kann aber auch mit zeitabhängigen Werten gerechnet werden.^[2]

2.6.1 Nachweise außerhalb des Zeitstandbereiches

2.6.1.1 Tragfähigkeitsnachweis (TN)

Der Tragfähigkeitsnachweis wird auch Nachweis gegen Globales Plastisches Versagen genannt. Er soll sicherstellen, dass die betrachtete Struktur nicht durch starke plastische Verformung oder übermäßige lokale Dehnung versagt. Dazu wird für jeden Lastfall die Tragfähigkeit ermittelt. Die verbindliche Regel legt fest, dass für jeden Lastfall der Bemessungswert einer Einwirkung kleiner sein muss als die Tragfähigkeit.^[1, 2]

Bezüglich der Sicherheiten wird in der Norm zwischen Normalbetriebslastfällen und Prüflastfällen unterschieden. In dieser Arbeit soll nur die Vorgehensweise für Normalbetriebslastfälle näher beleuchtet werden. Für die Normalbetriebslastfälle erfolgt die Bestimmung der Tragfähigkeit mit einem Berechnungsmodell, das folgende Randbedingungen aufweist:^[2]

- linearelastisch-idealplastisches Werkstoffgesetz
- Tresca'sche Fließbedingung (Hauptschubspannungshypothese) und assoziiertes Fließgesetz
- Bemessungskennwerte der Werkstofffestigkeit RM_d nach Abbildung 7
- Teilsicherheitsbeiwerte γ_R für die Werkstoffe nach Abbildung 7
- proportionale Zunahme aller Einwirkungen und ein spannungsfreier Ausgangszustand

Als Zulässigkeitskriterium gilt der maximale Absolutwert der Hauptstrukturdehnungen, welcher für Normalbetriebslastfälle 5 %, für Prüflastfälle 7 % nicht überschreiten darf.^[2]

Es darf statt der Tresca'schen Fließbedingung auch die Mises'sche Fließbedingung verwendet werden. Dann sind jedoch die Bemessungswerte der Fließgrenze mit dem Faktor $\sqrt{3}/2$ zu multiplizieren.^[2]

Die Bemessungswerte für die Einwirkungen werden mit Teilsicherheitsbeiwerten bestimmt, die von der speziellen Charakteristik der Einwirkungen abhängen. Dabei kann die Überprüfung eines Lastfalls auch für eine Kombination von Einwirkungen erforderlich sein. In diesem Fall darf berücksichtigt werden, dass aus stochastischer Sicht ein gleichzeitiges Auftreten von veränderlichen Einwirkungen weniger wahrscheinlich ist. Details dazu sind der Norm zu entnehmen; die Teilsicherheitsbeiwerte finden sich in Abbildung 8.^[2]

Werkstoff	RM	γ_R
Ferritischer ¹ Stahl	R_{eH} oder $R_{p0,2/T}$	$1,25$ für $\frac{R_{p0,2/T}}{R_{m/20}} \leq 0,8$ $1,5625 \left(\frac{R_{p0,2/T}}{R_{m/20}} \right)$ sonst
Austenitischer Stahl ($30\% \leq A_5 < 35\%$)	$R_{p1,0/T}$	1,25
Austenitischer Stahl ($A_5 \geq 35\%$)	$R_{p1,0/T}$ (siehe Anm.)	$1,0$ für $\frac{R_{p1,0/T}}{R_{m/T}} \leq 0,4$ $\frac{2,5R_{p1,0/T}}{R_{m/T}}$ für $0,4 < \frac{R_{p1,0/T}}{R_{m/T}} \leq 0,5$ $1,25$ für $\frac{R_{p1,0/T}}{R_{m/T}} > 0,5$
Stahlguss	$R_{p0,2/T}$	$19/12$ für $\frac{R_{p0,2/T}}{R_{m/20}} \leq 19/24$ $\frac{2R_{p0,2/T}}{R_{m/20}}$ sonst

¹ Andere Stähle als Austenitischer nach 6.4 und 6.5

Abbildung 7 – RM und γ_R im TN für Normalbetriebslastfälle^[2]

Einwirkung	Bedingung	Teilsicherheitsbeiwert
Ständig	Bei ungünstigen Einwirkungen	$\gamma_G = 1,2$
Ständig	Bei günstigen Einwirkungen	$\gamma_G = 0,8$
Veränderlich	Bei nicht begrenzten veränderlichen Einwirkungen	$\gamma_Q = 1,5$
Veränderlich	Bei begrenzten veränderlichen Einwirkungen und bei Extremwerten	$\gamma_Q = 1,0$
Druck	Bei Einwirkungen ohne einen auf einem Naturgesetz beruhenden Grenzwert	$\gamma_P = 1,2$
Druck	Bei Einwirkungen mit einem auf einem Naturgesetz beruhenden Grenzwert, z.B. bei Vakuum	$\gamma_P = 1,0$
Temperatur *		$\gamma_T = 1,0$

* Es kann erforderlich sein, in einem TN Effekte durch behinderte Wärmedehnungen aufzunehmen, z.B. bei Verwendung von Teilmodellen bei denen Verschiebungen in einem Modell zu eingepprägten Verschiebungen in einem anderen Modell werden.

Abbildung 8 – Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen des TN für Normalbetriebslastfälle^[2]

2.6.1.2 Einspielnachweis (EN)

Der Einspielnachweis soll verhindern, dass der Schädigungsmechanismus der fortschreitenden plastischen Deformation (FPD) zu einem Versagen der Struktur führt. Davon ist die Rede, wenn sich bei zyklischen Belastungen kein stationärer Belastungszyklus einstellt. Die verbindliche Regel im EN lautet daher, dass bei wiederholter Einwirkung von festgelegten Einwirkungszyklen in einem Modell fortschreitende plastisch Deformation nicht auftreten darf.^[1, 2]

Das verwendete Berechnungsmodell für den Ermüdungsnachweis arbeitet dabei mit:^[2]

- Theorie 1. Ordnung
- linearelastisch-idealplastischem Werkstoffgesetz
- Mises'scher Fließbedingung (Gestaltänderungsenergiehypothese) und assoziiertem Fließgesetz
- Bemessungswerten der Fließgrenze gemäß dem folgenden Absatz

Als Bemessungswerte der Fließgrenze werden Kurzzeitfestigkeitswerte verwendet (Streckgrenze, 0,2%-Dehngrenze oder 1%-Dehngrenze), wobei zwischen ferritischen und austenitischen Werkstoffen unterschieden wird und ebenso nach Zeit, Ort und Temperatur differenziert werden kann. Dabei kann der Werkstoffkennwert bei der zeit- und ortsabhängigen Berechnungstemperatur bestimmt werden oder bei einer zeitunabhängigen Temperatur, die nicht kleiner als $0,75 * T_{c,max} + 0,25 * T_{c,min}$ sein darf. Details dazu sind der Norm zu entnehmen.^[2]

Bezüglich der Einwirkungszyklen wird im EN gefordert, dass im Nachweis die ungünstigsten nach vernünftigem Ermessen vorhersehbaren Kombinationen von Einwirkungen überprüft werden müssen. Insbesondere bei der thermischen Einwirkung sollte dabei auch die Änderungsgeschwindigkeit repräsentativ sein, da die auftretenden thermischen Spannungen von dieser abhängen. In manchen Fällen kann es sogar notwendig sein, die Temperaturfunktionen durch eine schnelle und eine langsame Funktion zu charakterisieren. Die Teilsicherheitsbeiwerte für diesen Nachweis sind alle gleich Eins.^[2]

Neben der verbindlichen Regel existieren beim EN mehrere Anwendungsregeln. In diesen werden unterschiedliche Zulässigkeitskriterien festgelegt, um für verschiedene Problemstellungen der Praxis gerüstet zu sein. So besteht ein Unterschied darin, ob ein Einspielen auf linearelastisches Verhalten nachgewiesen wird oder ob gezeigt wird, dass nach einer festgelegten Anzahl von Zyklen eine gewisse Dehnung nicht überschritten wird (sogenanntes „Technisches Einspielen“).^[2]

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte der Nachweis nach Anwendungsregel 1. Demnach gilt die verbindliche Regel als erfüllt, sofern der maximale Absolutwert der Hauptstrukturdehnungen nach der festgelegten Zyklenzahl kleiner als 5% ist. Sollte keine Zyklenzahl vorgegeben sein, so ist ein passender Wert zu wählen, mindestens jedoch 500 Zyklen. Für die genauen Festlegungen bei anderen Anwendungsregeln sei für den interessierten Leser auf die Originalfassung der Norm verwiesen.^[2]

2.6.1.3 Stabilitätsnachweis (SN)

Der Stabilitätsnachweis soll garantieren, dass für kritische Lastzustände Versagen durch Beulen oder Knicken ausgeschlossen werden kann. Diese Versagensformen sind hauptsächlich bei Druckspannungen von Bedeutung.^[2]

Die verbindliche Regel besagt, dass für jeden Lastfall der Bemessungswert der Einwirkung nicht größer als der entsprechende Bemessungswert der Versagensgrenze sein darf. Der Versagensgrenzwert wird mit einem Modell bestimmt, dass für Normalbetriebslastfälle die im Folgenden genannten Eigenschaften aufweist. Die Berechnung muss dabei mit nichtlinearen kinematischen Beziehungen sowie Gleichgewichtsbedingungen am verformten Bauteil erfolgen. Allerdings darf mit Theorie 2.Ordnung (Theorie mit linearen kinematischen Beziehungen und Gleichgewichtsbedingungen am verformten Körper) gerechnet werden, wenn die Genauigkeit ausreicht.^[2]

- Vordeformationen entsprechend den (klassischen) Verzweigungsbeulformen und mit Abweichungen von der Idealform entsprechend den nach EN 13445-4 zulässigen Werten oder gemäß auf der Zeichnung spezifizierten maximal zulässigen Werten
- linearelastisch-idealplastisches Werkstoffgesetz
- Mises'sche Fließbedingung und assoziiertes Fließgesetz
- Bemessungswerte der Fließgrenze RM nach Abbildung 7 (direkte Anwendung, kein Teilsicherheitsbeiwert)
- spannungsfreier Ausgangszustand
- der größte Absolutbetrag der Hauptstrukturdehnung darf 5% nicht überschreiten

Für die Einwirkungen werden die Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsregeln wie beim TN (siehe Abbildung 8) gewählt. Dabei muss auch eine Temperatureinwirkung mit einem Teilsicherheitsbeiwert von 1 berücksichtigt werden.^[2]

Der Bemessungswert der Versagensgrenze wird abschließend durch Division mit einem Teilsicherheitsbeiwert für die Widerstandsfähigkeit γ_R ermittelt. In Normalbetriebslastfällen kann der Wert $\gamma_R = 1,25$ verwendet werden, wenn eine Außendruckprüfung nach EN 13445-5 durchgeführt wurde; ansonsten ist der Wert $\gamma_R = 1,5$ zu anzuwenden.^[2]

2.6.1.4 Ermüdungsnachweis (ZEN)

Der Ermüdungsnachweis behandelt den Schädigungsmechanismus der Ermüdung, welcher insbesondere bei häufigen Lastwechseln eine Gefahr darstellt. Die verbindliche Regel dafür lautet, dass der für alle zyklischen Bemessungsfunktionen ermittelte Bemessungswert des Ermüdungsmaßes für zyklische Einwirkungen D_d nicht größer als Eins sein darf. Eine Anwendungsregel dazu legt fest, dass der ZEN als erbracht gilt, wenn die Forderungen nach Abschnitt 18 EN 13445-3 erfüllt sind.^[2]

Zu Beginn sollte jedoch überprüft werden, ob ein Ermüdungsnachweis überhaupt notwendig ist. Für Druckschwankungen existiert dabei in der EN 13445-3 ein Kriterium, anhand dessen überprüft werden kann, ob der Betrieb bei einer „Druckbelastung vorwiegend nicht-zyklischer Art“ erfolgt. Andere zyklische Einwirkungen wie zB. thermische Zyklen werden damit nicht erfasst.^[2]

Zur Anwendung dieser Regel wird die Anzahl der äquivalenten Druckzyklen über die volle Schwingbreite ermittelt, um festzustellen, ob es sich um eine Druckbelastung zyklischer oder nicht-zyklischer Art handelt. Liegt die Anzahl der äquivalenten Druckzyklen n_{eq} über die volle Schwingbreite unter 500, so gilt die Druckbelastung als nicht-zyklisch und eine Analyse der Ermüdung ist nicht erforderlich.^[2]

Wie können nun die äquivalenten Druckzyklen über die volle Schwingbreite ermittelt werden? Der Begriff „volle Schwingbreite“ bezeichnet die auftretende Spannungsdifferenz zwischen maximaler und minimaler Druckbelastung. Für Lastzyklen mit variierendem Druck kann die Bestimmung der Zahl der Druckzyklen n_i für jeden Lastzyklus nach dem „Reservoir“-Lastzyklenzählverfahren erfolgen, wie es in EN 13445-3 Abschnitt 18 beschrieben ist.^[2]

Die äquivalenten Druckzyklen können anschließend für verschiedene Belastungen nach Formel (2.5) berechnet werden. Darin beschreibt n_{eq} die Anzahl der äquivalenten Druckzyklen über die volle Schwingbreite, n_i die Anzahl der Druckzyklen bei einer Druckdifferenz ΔP_i und P_{max} den maximal zulässigen Druck, für den der gesamte Behälter für den Lastfall bei Normalbetrieb berechnet wurde.^[2]

$$n_{eq} = \sum n_i * \left(\frac{\Delta P_i}{P_{max}} \right)^3 \quad (2.5)$$

2.6.1.5 Standsicherheitsnachweis (SE)

Der Standsicherheitsnachweis oder Nachweis des statischen Gleichgewichts vergleicht die Bemessungswerte von stabilisierenden Einwirkungen und destabilisierenden Einwirkungen. Die verbindliche Regel lautet, dass die Bemessungswerte der stabilisierenden Einwirkungen größer als die der destabilisierenden Einwirkungen sein müssen.^[2]

Als Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen sind dabei die Werte aus dem Tragfähigkeitsnachweis zu verwenden (siehe Abbildung 8). Oftmals werden jedoch regionale Regelwerke für die charakteristischen Werte und die verlangte Gesamtsicherheit herangezogen, wodurch andere Teilsicherheitsbeiwerte erforderlich sein können. Bezüglich der Einwirkungen ist für destabilisierende Einwirkungen der obere charakteristische Wert zu verwenden (der schlechtest mögliche Fall); für stabilisierende Einwirkungen kommt der untere charakteristische Wert zur Anwendung. Mehr dazu steht wieder in der Norm.^[2]

2.6.2 Kriechnachweise

Kriechnachweise dienen dazu, die Zulässigkeit der Konstruktion im Zeitstandbereich nachzuweisen. Falls alle Berechnungstemperaturen unterhalb des Zeitstandbereiches liegen, sind keine Kriechnachweise notwendig.^[2]

Anderenfalls bietet der Anhang B der EN 13445-3 ein Kriterium an, anhand dessen bestimmt werden kann, ob Kriechnachweise erforderlich sind. Die Norm schreibt: „Sofern der kleinere der beiden Werte

- a) das Produkt von 1,2 und die Berechnungstemperatur für die Lebensdauer
- b) das Produkt von 1,5 und die 1%-Zeitdehngrenze der Berechnungstemperatur für die Lebensdauer

nicht größer ist als die 0,2%-Dehngrenze bei Berechnungstemperatur, sind Kriechnachweise erforderlich.“ Dann müssen für die betrachtete Konstruktion ein Kriechfestigkeitsnachweis, eine Kriechdehnungsnachweis und ein Nachweis zu Kriechermüdung und zyklischer Ermüdung durchgeführt werden.^[2]

Schon bei der Bestimmung der Lastfälle ist für Bauteile, für die eine Beanspruchung im Zeitstandbereich möglich ist, die Lebensdauer für jeden Kriechlastfall festzulegen, üblicherweise durch den Betreiber. Dabei darf für jeden Lastfall im Zeitstandbereich die spezifizierte Betriebszeit im Zeitstandbereich nicht unter 10.000 Stunden liegen. Falls keine Betriebszeit festgelegt ist, muss vom Hersteller eine vernünftige Annahme getroffen werden, jedoch mindestens 100.000 Stunden.^[2]

Bei den Kriechnachweisen für den analytischen Zulässigkeitsnachweis – Direktes Verfahren kommt den Schweißnähten besondere Beachtung zu. In Kapitel 2.7 wird im Detail auf die Schwierigkeiten und Änderungen eingegangen, die bei Schweißnähten im Kriechbereich auftreten.^[2]

Als charakteristische Werte der Werkstoffe für die Kriechnachweise können die Mittelwerte der Kriechfestigkeitswerte in den entsprechenden Werkstoffnormen verwendet werden. Sollen bezüglich Temperatur oder Belastungsdauer Extrapolationen vorgenommen werden, so kommt in diesen Fällen Abschnitt 19 der EN 13445-3 zur Anwendung.^[2]

2.6.2.1 Kriechfestigkeitsnachweis (KFN)

Im Kriechfestigkeitsnachweis wird überprüft, ob die betrachtete Struktur mit Zeitstandfestigkeiten entsprechend der geforderten Lebensdauer den gegebenen Einwirkungen standhalten kann. Nach der verbindlichen Regel muss für jeden Kriechlastfall der Bemessungswert der Einwirkung kleiner als die Tragfähigkeit eines Berechnungsmodells sein. Das verwendete Modell weist dabei für den Betrieb ohne Lebensdauerüberwachung (Erklärung siehe unten) folgende Randbedingungen auf:^[2]

- linearelastisch-idealplastisches Werkstoffgesetz
- Mises'sche Fließbedingung (Gestaltänderungsenergiehypothese) und assoziiertes Fließgesetz
- Werkstofffestigkeitskennwerte RM und Teilsicherheitsbeiwerte γ_R nach Abbildung 9
- proportionale Zunahme aller Einwirkungen und spannungsfreier Ausgangszustand

Für die Zulässigkeit ist zusätzlich erforderlich, dass der maximale Absolutwert für die Hauptstrukturdehnungen weniger als 5% beträgt. Vorteilhaft ist, dass der KFN nur für Normalbetriebslastfälle durchgeführt werden muss. Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen entsprechen dabei den Werten im TN nach Abbildung 8; die einzige Ausnahme bildet der Druck, der – auch bei Einwirkungen mit auf einem Naturgesetz beruhenden Grenzwert – mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_p = 1,2$ multipliziert wird. Ansonsten können analog zum TN Kombinationsregeln für die Einwirkungen zur Anwendung kommen, falls dies erforderlich ist.^[2]

Eine Option zur Reduktion der notwendigen Sicherheiten ist die Überwachung des Behälters. Diese „Lebensdauerüberwachung“ erfordert vom Betreiber einerseits die Kontrolle und Prüfung der Anlage nach den Festlegungen in den Betriebsanleitungen, andererseits eine ständige Aufzeichnung von Druck und Temperatur sowie die Aufbewahrung von Berichten. Entsprechende Maßnahmen zur Überwachung von Behältern sind in Anhang M der EN 13445-3 angeführt. Diese Arbeit betrachtet jedoch ausschließlich die Auslegung für Behälter ohne Lebensdauerüberwachung.^[2]

Werkstoff	RM	γ_R
Stahl	$R_{m/T/t}$	$1,25$ wenn $\frac{R_{m/T/t}}{R_{p1,0/T/t}} \leq 1,5$ sonst $\frac{1}{1,2} \cdot \frac{R_{m/T/t}}{R_{p1,0/T/t}}$

Abbildung 9 – RM und γ_R im KFN für Lastfälle ohne Überwachung

2.6.2.2 Kriechdehnungsnachweis (KDN)

Der Kriechdehnungsnachweis überprüft die Dehnungen einer beanspruchten Struktur im Zeitstandbereich. Die verbindliche Regel dabei besagt, dass in jedem Punkt des Bauteils die über alle Auslegungs-Lebensdauern im Zeitstandbereich akkumulierte äquivalente Kriech-Strukturdehnung 5% nicht übersteigen darf. Allerdings enthält die Norm die Einschränkung, dass die verbindliche Regel gegenwärtig nicht verwendet werden darf, sondern mit den Anwendungsregeln gearbeitet werden muss.^[2]

Dazu finden sich in der Norm zwei Anwendungsregeln, die jeweils andere Anwendungsfälle abdecken. Mit Anwendungsregel 1 werden lange durchgängige Kriechperioden betrachtet, weshalb die sogenannte „Akkumulationsregel gewichteter Standzeiten“ angewendet werden kann. Dabei gilt die Voraussetzung, dass die Temperaturen und die anderen wesentlichen Einwirkungen im Wesentlichen zeitunabhängig sind. Zusätzlich müssen die Kriechperioden lang genug sein, dass der Einfluss der Anfangsbedingungen auf die Standzeit vernachlässigt werden kann. Anwendungsregel 2 untersucht lange Kriechperioden, wie Anwendungsregel 1, die durch Einwirkungszyklen mit vernachlässigbaren Kriechvorgängen und ohne Plastifizierung unterbrochen sind.^[2]

2.6.2.2.1 Anwendungsregel 1

Die Anwendungsregel 1 gilt für Kriechlastfälle mit ausreichend langen Kriechperioden und mit im wesentlichen zeitunabhängigen Einwirkungen (sowohl Temperaturen als auch andere Einwirkungen). Dann ergibt eine Berechnung mit den zeitunabhängigen oberen Grenzwerten aller einschlägigen

Einwirkungen eine gute Näherung des Kriechverhaltens des Bauteils. Wichtig ist, dass die Kriechperioden so lang sind, dass der Einfluss einer anfänglichen Spannungsumlagerung auf die Standzeit vernachlässigbar ist.^[2]

Die verbindliche Regel gilt dabei als erfüllt, wenn die über alle Auslegungs-Lebensdauern im Zeitstandbereich akkumulierte gewichtete Standzeit im Zeitstandbereich in jedem Punkt des Bauteils nicht größer als Eins ist. Als Gewichtsfunktion wird dafür der Reziprokwert der zulässigen Standzeit für die Referenzspannung σ_{ref} , die im entsprechenden Lastfall ermittelt wurde, verwendet.^[2]

Grundlegend für die Durchführung des KDN nach Anwendungsregel 1 ist zu Beginn auch die Festlegung der Bemessungstemperatur im Zeitstandbereich. Die Bemessungstemperatur soll so festgelegt werden, dass sie die Berechnungstemperatur von oben begrenzt. Betriebliche Schwankungen können allerdings vernachlässigt werden, wenn sie nicht zu häufig auftreten und betragsmäßig im Rahmen bleiben. Ebenso kann die Temperatur ortsabhängig festgelegt werden.^[2]

Die operative Durchführung des KDN nach Anwendungsregel 1 startet mit der Ermittlung der Referenzspannung. Diese Berechnung muss für jedes Intervall der Dauer $\Delta t^{(k)}$ eines Lastfalls, bei dem die Berechnungstemperatur im Zeitstandbereich ist, durchgeführt werden. Zu Beginn werden jeweils die elastische Grenzeinwirkung $A_e^{(k)}$ sowie die (dehnungsbegrenzte) Grenzeinwirkung $A_u^{(k)}$ der betrachteten Struktur berechnet.^[2]

Die Ermittlung der elastischen Grenzeinwirkung $A_e^{(k)}$ erfolgt in einem Berechnungsmodell mit folgenden Festlegungen, wobei die Grenzeinwirkung A_e der Einwirkung am Beginn der Plastifizierung in dem Bereich mit Berechnungstemperaturen im Zeitstandbereich entspricht:^[2]

- linearelastisch-idealplastisches Werkstoffgesetz
- von Mises'sche Fließbedingung (Gestaltänderungsenergiehypothese)
- Werkstoffkennwerte RM analog dem KFN nach Abbildung 9
- Teilsicherheitsbeiwerte für die Werkstoffkennwerte $\gamma_R = 1$
- proportionale Zunahme aller Einwirkungen mit Ausnahme der Temperatur (diese ist zeitunabhängig zu verwenden)
- spannungsfreier Ausgangszustand

Die (dehnungsbegrenzte) Grenzeinwirkung $A_u^{(k)}$ beschreibt die Einwirkungen an der Tragfähigkeitsgrenze einer Konstruktion. Ermittelt wird diese in einem Modell mit den im Anschluss folgenden Randbedingungen. Als Einschränkung gilt, dass der maximale Absolutwert der Hauptstrukturdehnungen unter 5% bleiben muss.^[2]

- linearelastisch-idealplastisches Werkstoffgesetz
- Mises'sche Fließbedingung (Gestaltänderungsenergiehypothese) und assoziiertes Fließgesetz
- Werkstoffkennwerte RM analog dem KFN nach Abbildung 9
- Teilsicherheitsbeiwerte für die Werkstoffkennwerte $\gamma_R = 1$
- proportionale Zunahme aller Einwirkungen mit Ausnahme der Temperatur (diese ist zeitunabhängig zu verwenden)
- spannungsfreier Ausgangszustand

Konnten die beiden Grenzeinwirkungen ermittelt werden, ist für die Berechnung der Referenzspannung noch der Bemessungswert der Einwirkung(en) $A_d^{(k)}$ zu bestimmen. Dabei werden für die Einwirkungen – mit Ausnahme der Temperatur – die festgelegten zeitunabhängigen Grenzwerte herangezogen. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden analog zum KFN bestimmt. Anschließend kann für jeden Lastfall die Referenzspannung σ_{ref} nach Formel (2.6) berechnet werden.^[2]

$$\sigma_{ref} := \left[1 + 0,13 * \frac{(A_u - A_e)}{A_e} \right] * A_d * \frac{RM_d}{A_u} \quad (2.6)$$

Ausgehend von dieser Referenzspannung muss anschließend die zulässige Standzeit $\Delta t_{all}^{(k)}$ bei dieser Spannung $\sigma_{ref}^{(k)}$ ermittelt werden. Die Inverse der Standzeit entspricht der Gewichtsfunktion für jedes Intervall $\Delta t^{(k)}$ der Dauer eines Lastfalls (siehe Formel (2.7)).^[2]

$$\frac{1}{\Delta t_{all}^{(k)}} \dots \text{Gewichtsfunktion} \quad (2.7)$$

Wie wird aber diese zulässige Standzeit für eine gegebene Spannung bestimmt? Dafür werden Formeln oder Diagramme benötigt, die einen Zusammenhang zwischen der Spannungsbeanspruchung und der Belastungsdauer herstellen. Typische Kurven bei verschiedenen Temperaturen (Volllinie bei 550°C) sind in Abbildung 10 dargestellt.^[2]

Eine mögliche Vorgehensweise sind die Berechnungsmethoden von Abschnitt 19 der EN 13445-3. Das Kapitel beschreibt die Auslegung im Zeitstandbereich für Behälter gemäß der Norm. Bei der Anwendung von Anhang B sind einerseits die Interpolationen und Extrapolationen von Festigkeitswerten nach Abschnitt 19 sind zulässig. Andererseits können mit denselben Methoden die zulässigen Standzeiten bestimmt werden, indem nach einigen mathematischen Umformungen inverse Formeln abgeleitet werden.^[2]

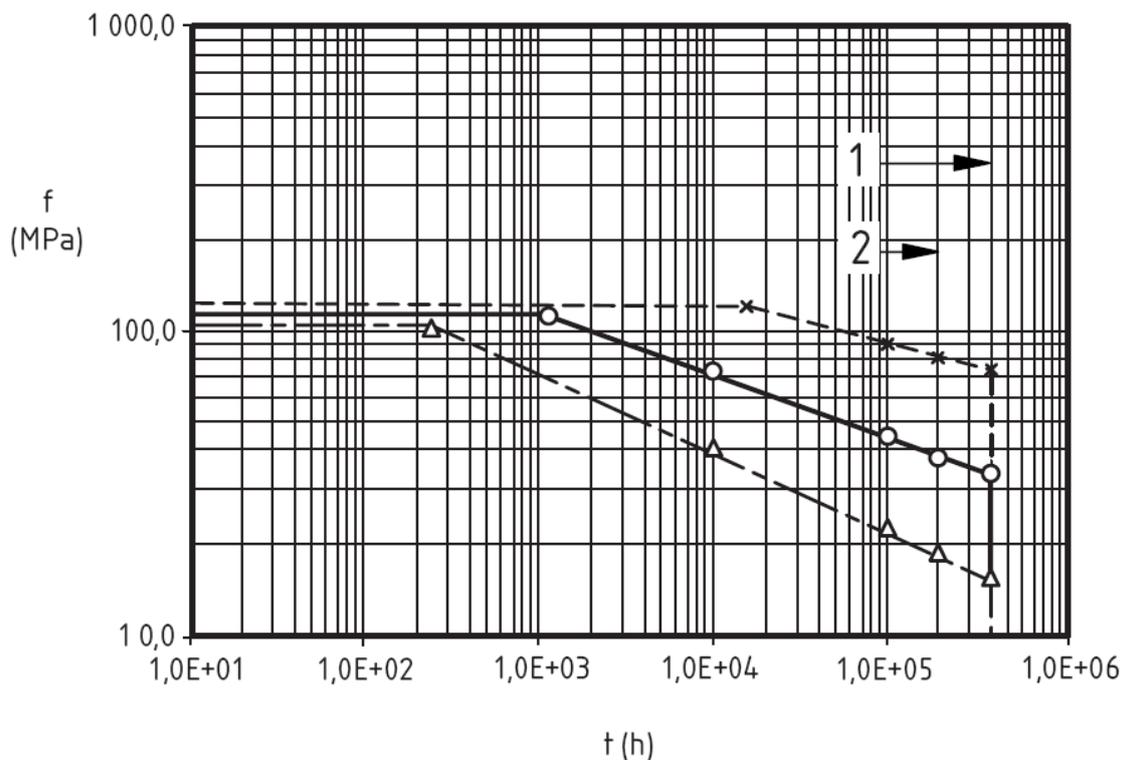


Abbildung 10 – Typische Auslegungskurven im Zeitstandbereich^[2]

Abschließend muss der Bemessungswert des Kriechermüdungsmaßes D_c berechnet werden (siehe Formel (2.9)). Dafür werden die gewichteten Standzeiten (siehe Formel (2.8)) über alle Intervalle aller Lastfälle mit Bezugstemperaturen im Zeitstandbereich aufsummiert und es resultiert die akkumulierte gewichtete Standzeit. Diese entspricht für den KDN nach Anwendungsregel 1 dem Bemessungswert des Kriechermüdungsmaßes D_c . Wie oben schon erwähnt, darf dieser Bemessungswert gemäß der verbindlichen Regel den Wert Eins an keinem Punkt überschreiten.^[2]

$$\frac{\Delta t^{(k)}}{\Delta t_{all}^{(k)}} \dots \text{gewichtete rechnerische Standzeit für den Lastfall } k \quad (2.8)$$

$$D_c = \sum \frac{\Delta t^{(k)}}{\Delta t_{all}^{(k)}} \quad (2.9)$$

2.6.2.2.2 Anwendungsregel 2

Diese Anwendungsregel gilt für ausreichend lange Kriechperioden (wie Anwendungsregel 1), die durch Einwirkungszyklen mit vernachlässigbaren Kriechvorgängen und ohne Plastifizierung unterbrochen werden. Dann können Kriechperioden und zyklische Einwirkungen getrennt betrachtet werden; außerdem können die unterbrochenen Kriechperioden zu einer gesamten Kriechperiode kombiniert werden.^[2]

Die verbindliche Regel des KDN ist erfüllt, wenn der Kriechdehnnachweis nach Anwendungsregel 1 und der Kriechermüdungsnachweis (KEN) erfüllt sind, wobei der Bemessungswert des Kriechermüdungsmaßes für die gesamte Kriechperiode nach Anwendungsregel 1 bestimmt wird. Wie es einem eindeutigen Rechtstext entspricht, bietet die Norm auch Kriterien zur Überprüfung der obigen Einschränkungen:^[2]

Lange Kriechperioden unterbrechende Einwirkungszyklen gelten als Einwirkungszyklen mit vernachlässigbarem Kriechvorgang, wenn die längste Dauer mit Berechnungstemperaturen im Zeitstandbereich weniger als 100 Stunden beträgt.^[2]

Die Überprüfung der Bedingung für die Plastifizierung erfolgt mit einem Berechnungsmodell. Lange Kriechperioden unterbrechende Einwirkungszyklen gelten als Einwirkungszyklen ohne Plastifizierung, wenn die resultierende maximale Vergleichsspannung nach Mises im folgenden Modell nicht größer ist als der Bemessungswert des unten spezifizierten Kurzzeitfestigkeitswertes. Für das Modell werden folgende Annahmen getroffen:^[2]

- linearelastisches Werkstoffgesetz
- eine anfängliche Spannungsverteilung $\sigma_{ij\ res}$ berechnet aus der Spannungsverteilung $\sigma_{ij\ limit}$ bei der Ermittlung der (dehnungsbegrenzten) Grenzeinwirkung A_u (nach den Formeln (2.10) und (2.11), wobei die Spannungsverteilung $\sigma_{ij\ elastic}$ im Kriechlastfall mit einem linear-elastischen Werkstoffgesetz ermittelt wurde)

$$\sigma_{ij\ creep} = \frac{A^{(k)}}{A_u} * \sigma_{ij\ limit} \quad (2.10)$$

$$\sigma_{ij\ res} = \sigma_{ij\ creep} - \sigma_{ij\ elastic} \quad (2.11)$$

Bei den Einwirkungen, Kombinationsregeln, der Referenztemperatur sowie der Referenzzeit für Kriechperioden werden die selben Regeln wie beim KFN angewandt, allerdings sind alle Teilsicherheitsbeiwerte gleich Eins.^[2]

Nach der Berechnung wird die resultierende maximale von Mises'sche Vergleichsspannung des Modells abhängig vom Werkstoff mit dem folgenden Wert verglichen (die Temperatur T_c beschreibt dabei die orts- und zeitabhängige Berechnungstemperatur):^[2]

- für ferritische Stähle mit dem spezifizierten Mindestwert von $R_{p0,2/T_c}$
- für austenitische Stähle mit dem spezifizierten Mindestwert von $R_{p1,0/T_c}$

2.6.2.3 Kriechermüdung und zyklische Ermüdung (KEN)

Eine kombinierte Überprüfung von Kriechermüdung und zyklischer Ermüdung erfolgt durch simple Addition des Bemessungswerts des Kriechermüdungsmaßes und des Bemessungswerts des Ermüdungsmaßes (für zyklische Einwirkungen), wobei die Summe den Wert 1 in keinem Punkt des Bauteils überschreiten darf.^[2]

2.7 Betrachtung von Schweißnähten

Schweißnähte erfordern bei technischen Konstruktionen eine besondere Betrachtung. Aus werkstofftechnische Sicht wird das Gefüge der Schweißnaht von den Erstarrungsbedingungen der Schmelze sowie den thermisch aktivierten Vorgängen in den nicht aufgeschmolzenen Bereichen (Rekristallisation, Ausscheidungen) beeinflusst. Aufgrund von Schweißnahtfehlern, den zurückbleibenden Schweißspannungen sowie den unterschiedlichen Materialeigenschaften der verbundenen Werkstoffe können Schweißnähte häufig eine Schwachstelle darstellen.^[15, 33, 34]

In der Werkstofftechnik erfolgt eine Beschreibung von Schweißnähten bevorzugt über die Aufteilung in drei verschiedene Bereiche: in Schweißgut, Wärmeeinflusszone und unveränderten Grundwerkstoff. Der Bereich des Schweißguts bezeichnet das entstehende Gefüge, wenn die Schmelze aus Grund- und Zusatzwerkstoff beim Abkühlen erstarrt. In der Wärmeeinflusszone kommt es nicht zu einer Aufschmelzung des Materials, allerdings wird durch den hohen Wärmeeintrag die Gefügestruktur beträchtlich verändert. In ausreichender Entfernung zur Schweißnaht schließlich findet sich unveränderter Grundwerkstoff.^[34]

Eine andere Vorgehensweise wird jedoch für Schweißnähte im Analytischen Zulässigkeitsnachweis – Direktes Verfahren gewählt. Dort besteht wenig Interesse an den genauen werkstofftechnischen Vorgängen. In vielen Fällen können die Schweißnähte gemeinsam mit dem Grundwerkstoff betrachtet werden. Nur bei Kriechbelastungen sind sie besonders kritisch, da dann Dehnungskonzentrationen auftreten können. Um diese Problematik abzudecken, muss eine Schweißnaht in den Kriechnachweisen als eigener Bereich modelliert werden, sobald die maximale Spannungskomponente normal zur Schweißnahtichtung 80% des einschlägigen Bemessungswertes des Kriechfestigkeitswertes übersteigt.^[2]

Dabei stellt sich die Frage, welche Werkstoffkennwerte für den Bereich der Schweißnaht verwendet werden. Schon für Schweißzusatzstoffe werden im Allgemeinen keine Werkstoffkennwerte im Zeitstandbereich angegeben. Außerdem kommt es bei einem Schweißprozesses zu Vermischungsvorgängen zwischen Zusatzmaterial und Grundmaterial, sodass Bereiche entstehen, in denen die Materialeigenschaften a priori gänzlich unbekannt sind. Selbst in der Wärmeeinflusszone können sich aufgrund von Gefügeänderungen die Werkstoffeigenschaften ändern.^[35, 36]

Abhängig vom geplanten Aufwand werden in der Norm zwei Möglichkeiten genannt. Bei der einfachen Option werden keine teuren und aufwendigen Prüfungen durchgeführt und die Bemessungswerte der Schweißnaht werden mit 80% der Bemessungswerte des Grundwerkstoffes festgelegt (mit Ausnahme von Sonderfällen). Alternativ können Prüfungen nach EN 13445-2 Anhang C durchgeführt werden, womit realitätsnahe Werkstoffkennwerte bestimmt werden. In diesem Fall gilt die Einschränkung, dass die Werte nicht höher als die Bemessungswerte des Grundwerkstoffes sein dürfen.^[2]

Zusätzlich gilt bei der Anwendung von EN 13445-3 Anhang B die Voraussetzung, dass alle kriechkritischen Bereiche für Untersuchungen und zerstörungsfreie Prüfungen während des Betriebs zugänglich sind. Außerdem müssen Anleitungen für die zweckmäßige Wartung und Inspektion erstellt und in die Betriebsanleitungen aufgenommen werden.^[2]

2.8 Verwendete Software

Für die Bearbeitung der beschriebenen Problemstellung wurde die Software *ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 19.0* verwendet. In dieser leistungsfähigen Finite-Elemente-Software sind lineare und nichtlineare Solver implementiert. In der programmeigenen Software *ANSYS® DesignModeler™* wurde die betrachtete Geometrie als zweidimensionales Flächenmodell erstellt (siehe Kapitel 3.2). Über die *ANSYS® Workbench™* Umgebung wurden die relevanten thermischen und mechanischen Analysen initialisiert und die wesentlichen Parameter vorgegeben. Nach der Lösung mit dem Solver erfolgte das Postprocessing ebenso in der Workbench, um die Analyseergebnisse für diese Arbeit zu exportieren. Die Bilder der berechneten Ergebnisse wurden mit freundlicher Genehmigung von ANSYS, Inc. verwendet.

Für numerische Auswertung wurde zusätzlich auf das Tabellenkalkulationsprogramm *MS Excel® 2016* sowie auf die Berechnungssoftware *PTC MathCad® 15.0* zurückgegriffen. Das verwendete Textverarbeitungsprogramm war *MS Word® 2016*.

3 Erstellung eines Berechnungsmodells

Die praktische Aufgabenstellung im Rahmen dieser Arbeit umfasste die Durchführung eines analytischen Zulässigkeitsnachweises – Direktes Verfahren nach EN 13445-3 Anhang B anhand einer Beispielgeometrie. Anschließend wurde ein Vergleich der Ergebnisse des Nachweises mit einer Finite-Elemente-Berechnung unter Verwendung des Kriechgesetzes nach Norton durchgeführt.

3.1 Festlegung des auftretenden Einwirkungen und Lastfälle

Die Zielsetzung ist, den Zulässigkeitsnachweis für eine Kugelschale mit Stutzen (exakte Geometrie – siehe Kapitel 3.2) durchzuführen, welche bei hoher Temperatur im Zeitstandbereich einer Druckbelastung und wechselnden thermischen Belastungen ausgesetzt ist.

Als wesentliche Einwirkungen für dieses Beispiel wurden die Einwirkungen Druck und Temperatur identifiziert. Die ständige Einwirkung Eigengewicht soll vernachlässigt werden. Andere ständige oder veränderliche Einwirkungen wie Wind- oder Schneelasten wurden ebenso nicht berücksichtigt. Auch mit einem Auftreten von außergewöhnlichen Einwirkungen wurde nicht gerechnet.

Vor der genauen Definition der zu betrachtenden Lastfälle wurde ein charakteristischer Betriebszyklus festgelegt (siehe Abbildung 11). Die Einwirkungen im Betrieb wurden dabei in einem sicheren Abstand zu den maximal zulässigen Einwirkungen gewählt – mit einer Differenz von 5°C bei der Temperatur und von 5 bar beim Druck.

Zu Beginn erfolgte die Wahl der maximalen Temperatur, sodass für alle gewählten Werkstoffe ausreichend Werkstoffkennwerte vorhanden waren. Anschließend wurden die Druckniveaus so bestimmt, dass in jedem Lastfall Tragfähigkeitsnachweis und Kriechfestigkeitsnachweis erfüllt waren. Abschließend wurde für die Wahl der Einspritztemperatur überprüft, ob bei der jeweiligen Temperatur der Kriechdehnnachweis und der Einspielnachweis der Struktur noch erfüllt wurden.

Während der gesamten Auslegungslbensdauer des Behälters von 100.000 Stunden soll der Betriebszyklus, der eine Dauer von 2000 Stunden aufweist, mehrmals ident durchlaufen werden.

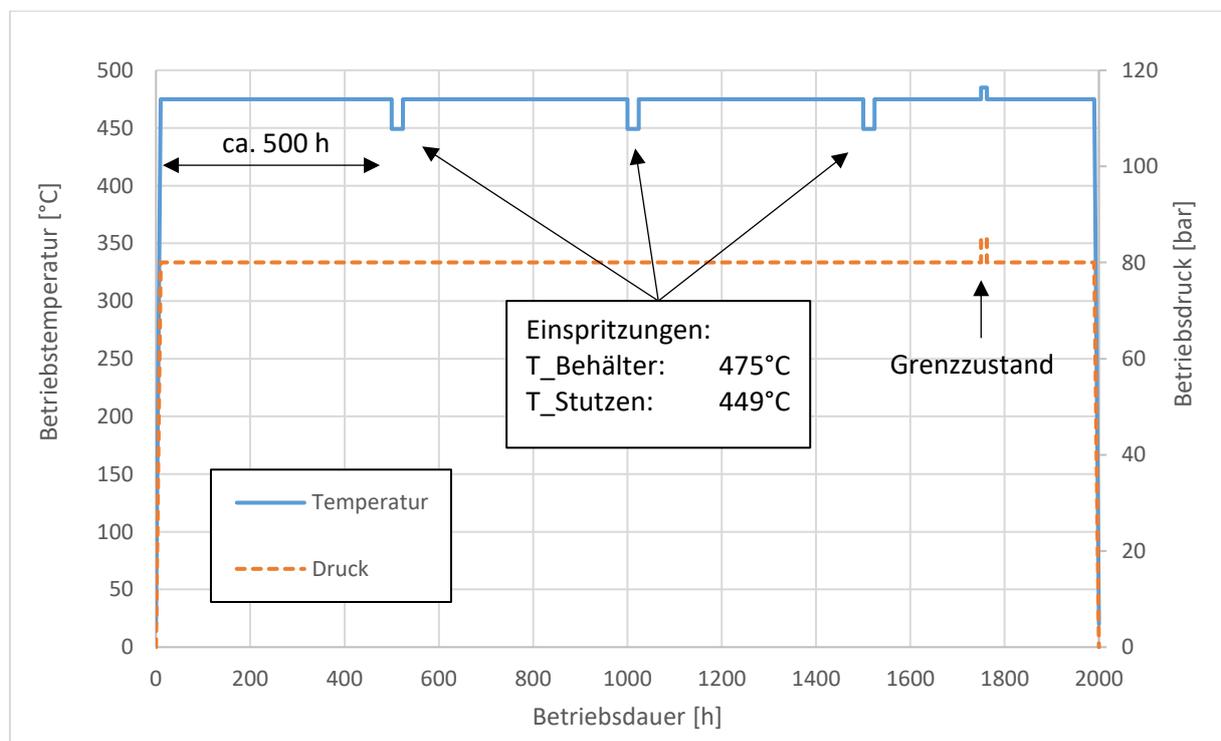


Abbildung 11 – Charakteristischer Betriebszyklus

Der genaue Ablauf eines charakteristischen Betriebszyklus kann wie folgt beschrieben werden: Ausgehend von Umgebungsbedingungen soll langsam auf die Betriebstemperatur von 475°C aufgeheizt und synchron dazu der Druck auf 80 bar erhöht werden. Nach etwa 500 Stunden konstanten Kriechens soll für 24 Stunden ein Einspritzzyklus stattfinden. Dabei soll plötzlich Medium mit einer Temperatur von 449°C durch den Stutzen isobar zugeführt werden. Im Rahmen dieser Einspritzung kommt es zu einem Thermoschock und den dazugehörigen Wärmespannungen. Nach längerer Zeit stellt sich in der Konstruktion eine stationäre Temperaturverteilung ein, welche in Abbildung 12 dargestellt ist. Der Übergang nach Beendigung der Einspritzung erfolgt langsam, womit er als quasistatisch betrachtet werden kann. Danach bleibt die Belastung wieder etwa 500 Stunden konstant bei Betriebsbedingungen, bis der nächste Einspritzzyklus folgt. Insgesamt finden so drei Einspritzzyklen pro Betriebszyklus statt.

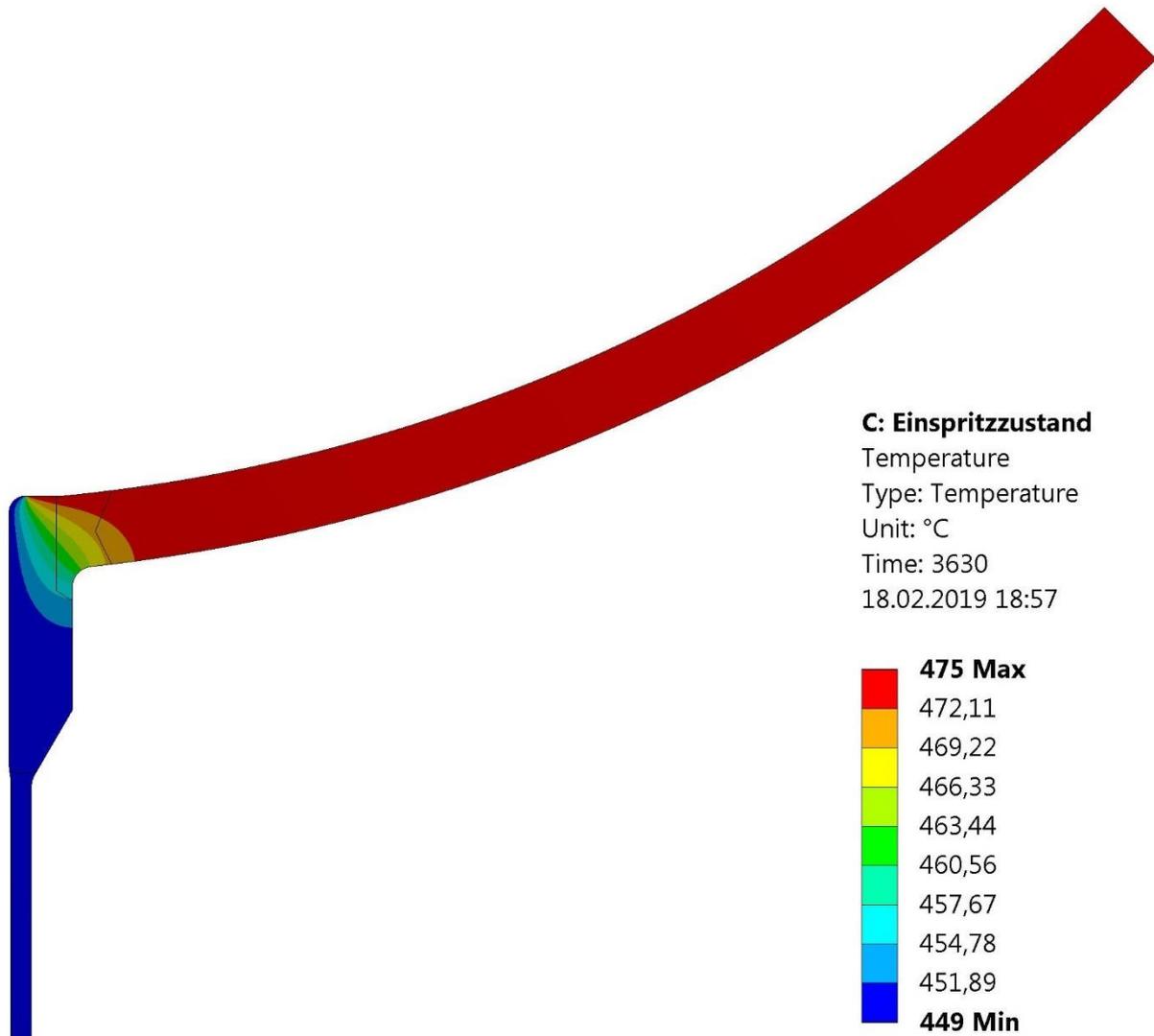


Abbildung 12 – Stationäre Temperaturverteilung im Einspritzlastfall

Nach 1750 Stunden des charakteristischen Betriebszyklus werden die Einwirkungen für 12 Stunden auf die maximal zulässigen Werte erhöht. Ziel dieser erhöhten Belastung ist die Berücksichtigung von möglichen Betriebsstörungen in der Berechnung. Dabei wirken auf die Struktur ein Druck von 85 bar und eine Temperatur von 480°C, wobei die Übergänge als quasistationär betrachtet werden. Zuletzt folgt eine weitere stationäre Kriechperiode, die mit einer langsamen Entlastung auf Umgebungsbedingungen nach insgesamt 2000 Stunden beendet wird.

Ausgehend vom charakteristischen Betriebszyklus mussten für den analytischen Zulässigkeitsnachweis die verschiedenen zu betrachtenden Lastfälle festgelegt werden. Da die Belastung im Kriechbereich

erfolgte, müssen für die Lastfälle im Kriechbereich zusätzlich entsprechende Betriebsdauern festgelegt werden. Die minimale Zeit für einen Lastfall sind nach EN 13445-3 10.000 Stunden. In Tabelle 2 sind die charakteristischen Werte für Druck und Temperatur sowie die jeweilige Betriebsdauer angeführt. Für manche Nachweise, bei denen die Zeitabhängigkeit der Problemstellung von Bedeutung ist, wurden charakteristische Funktionen verwendet. In diesen Fällen sind die charakteristischen Funktionen direkt bei dem entsprechenden Nachweis beschrieben.^[2]

Tabelle 2 – Charakteristische Werte der Einwirkungen

	P_{sup}	P_{inf}	T_{sup}	T_{inf}	Betriebsdauer
	[bar]	[bar]	[°C]	[°C]	[h]
Betriebslastfall	80	80	475	475	100.000
Einspritzlastfall	80	80	475	449	10.000
Grenzlastfall	85	85	480	480	10.000
Entlastungslastfall	0	0	20	20	-

Eine weitere auftretende Einwirkung im Berechnungsmodell waren die Längsspannungen in der Stutzenschale, wie sie in Rohrleitungen ohne äußere Verspannung zufolge des Drucks auftreten. Diese konnten diese als Einwirkung dem Druck zugerechnet werden. Deswegen erfolgte keine gesonderte Betrachtung in den Lastfällen; die numerischen Werte wurden passend zum Druck adaptiert. Die Berechnung erfolgte dabei mit Hilfe von Formel (3.1) abhängig vom Innendruck p_i :

$$\sigma_{längs} = \frac{p_i * d_i^2}{(d_a^2 - d_i^2)} \quad (3.1)$$

3.2 Geometrie

Als betrachtete Beispielgeometrie wurde ein Stutzen in einer Kugelschale gewählt (eine axialsymmetrische Modellhälfte ist in abgebildet; als Symmetrieachse zählt die senkrechte y-Achse am linken Rand). Die Kugelschale aus Behälterblech wird mit einem dicken Verstärkungsstück aus einem ähnlichen Werkstoff verschweißt. Dieses Verstärkungsstück soll als Rohr ausgeführt sein. Am unteren Ende wird das Verstärkungsstück mit einem Stutzenrohr geringerer Wanddicke verschweißt. Genauere Details zu den Werkstoffen werden in Kapitel 3.3 angeführt.

Für die Abmessungen wurden Nennwerte verwendet – mit Ausnahme der Wanddicken, für welche die Berechnungswanddicken ermittelt wurden. Diese Vorgehensweise entspricht den Vorgaben in EN13445-3 Anhang B. Zusätzlich wurden die Stutzeninnenkante und der Übergang außen abgerundet modelliert. Das Abrunden scharfer Kanten, wie sie bei Schweißnähten auftreten, ist bei der Anwendung des Kriechnachweises nach Anhang B notwendig, da sonst durch die großen Spannungsspitzen keine rein elastischen Einwirkungszyklen nachgewiesen werden können (siehe Anwendungsregel 2 im KDN in Kapitel 2.6.2.2.2).^[2]

Für die Kriechnachweise ist es außerdem wichtig, wie die verschiedenen Werkstücke miteinander verschweißt werden. Denn häufig unterscheiden sich die Kriecheigenschaften von Schweißnähten wesentlich von jenen des Grundwerkstoffes, sodass in den Schweißnähten Dehnungskonzentrationen auftreten. Zur Berücksichtigung dieser Unterschiede muss dann die Schweißnaht als Bereich mit verminderten Werkstoffkennwerten modelliert werden. Auf die genauen Bedingungen, wann eine solche Modellierung notwendig ist, wurde in Kapitel 2.7 eingegangen.^[2]

In der Beispielgeometrie soll das Verstärkungsstück über eine Doppel-HV-Naht mit der Kugelschale verschweißt werden. Für die Schweißnaht zwischen Verstärkungsstück und Stutzenrohr soll eine V-Naht verwendet werden. Die Bedingung für eine Modellierung der Schweißnaht mit verminderten Werkstoffkennwerten wurde für den Betriebslastfall mit einem linearelastischen Berechnungsmodell geprüft; die Ergebnisse zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3 – Schweißnähte im Berechnungsmodell

Geometrie	Bemessungswert Kriechfestigkeits- kennwert	80% des Bemessungs- werts	Maximale Normal- spannung	Bereich mit reduzierten Werten?
Doppel-HV-Naht	178,5 MPa	142,8 MPa	160 MPa	JA
V-Naht	162,5 MPa	130 MPa	34 MPa	NEIN

Nachdem für die Schweißnaht zwischen Kugelschale und Verstärkungsstück eine Verminderung der Werkstoffkennwerte in der Schweißnaht einschließlich Wärmeeinflusszone vorgeschrieben war, wurde die Schweißnaht inklusive Wärmeeinflusszone als ein eigener zusammenhängender Bereich modelliert (die Abmessungen wurden ähnlich zu Abbildung 14 gewählt). Zwischen Verstärkungsstück und Stutzenrohr wurden nur die geometrischen Verhältnisse modelliert, da die Bedingungen für verminderte Werkstoffkennwerte nicht erfüllt waren.

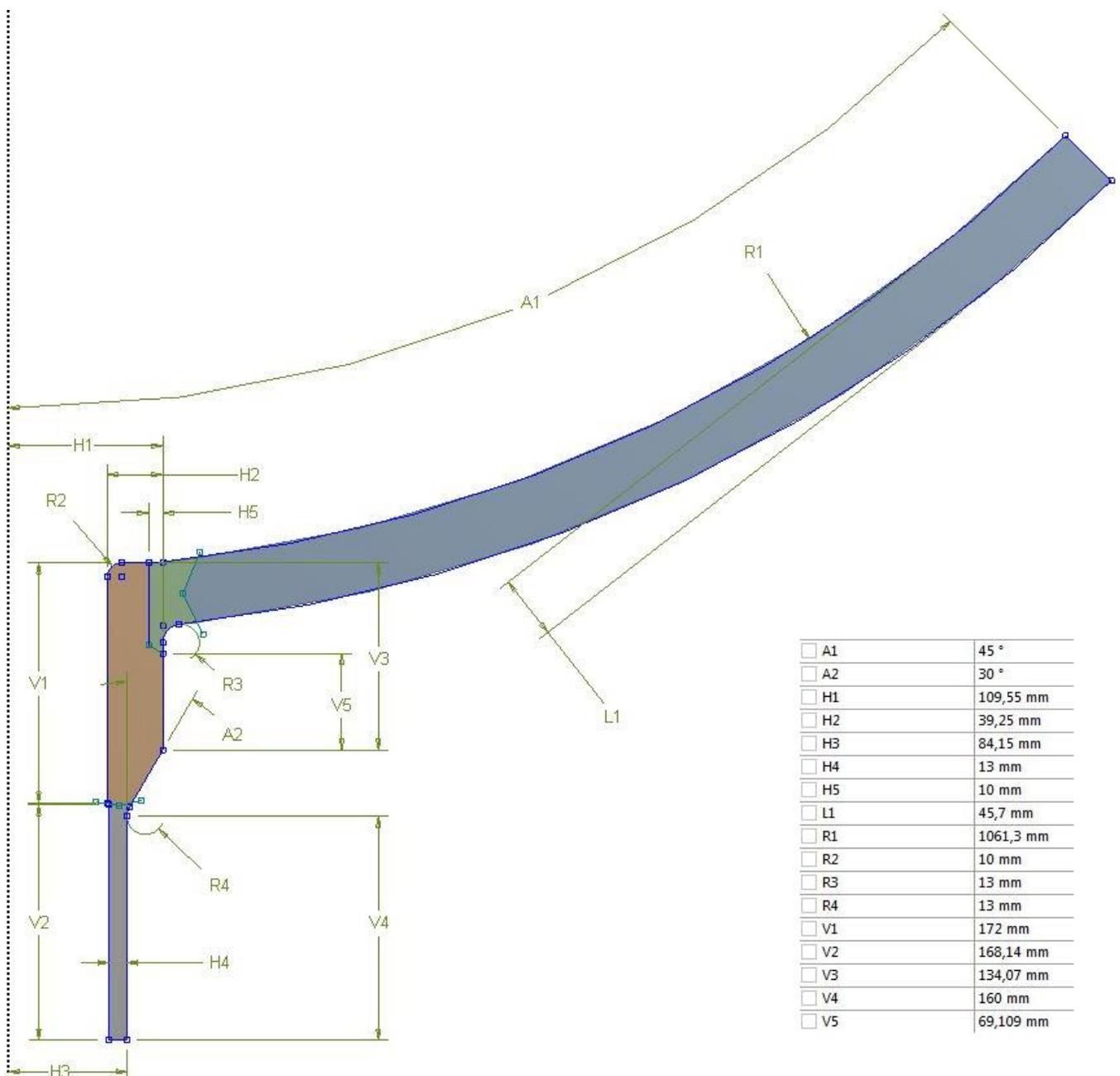


Abbildung 13 – Geometrie des Berechnungsmodells – Stutzen in Kugelschale



Abbildung 14 – Doppel-HV-Naht^[37]

3.3 Werkstoffkennwerte und Analyseinstellungen (Preprocessing)

Zielsetzung der Werkstoffwahl war die Verwendung von warmfesten Stählen, für die aufgrund ihrer Auflistung in den bestehenden Normen auf definierte Werkstoffkennwerte zugegriffen werden konnte. Dabei wurden Werkstoffe gewählt, die im Apparatebau eine entsprechende Verbreitung aufweisen. Für das Stutzenrohr wurde der ferritische warmfeste Stahl 16Mo3 verwendet. Bei der Kugelschale wurde der Werkstoff 10CrMo9-10 gewählt und für die Verstärkung des Stutzens wurde mit dem Werkstoff 11CrMo9-10+QT gearbeitet.^[38]

In der Tabelle 4 ist die Zuordnung der Werkstoffe zu den verschiedenen Einzelteilen übersichtlich dargestellt, und es werden die zugehörigen Normen, die Wanddicken sowie die wichtigsten Werkstoffkennwerte angeführt. Die spezifizierten Temperaturen sind dabei die maximal auftretenden Temperaturen in den verschiedenen Lastfällen.

Tabelle 4 – Werkstoffe, Werkstoffnormen, Wanddicken, Werkstoffkennwerte^[8, 12, 14]

	Kugelschale	Verstärkung Stutzen	Stutzenrohr
Werkstoff	10CrMo9-10	11CrMo9-10+QT	16Mo3
Norm	EN 10028-2	EN 10216-2	EN 10216-2
Werkstoffnummer	1.7380	1.7383	1.5415
Werkstoffgruppe	5.2	5.2	1.2
Nennwanddicke e_n	47 mm	46 mm	16 mm
Korrosionszuschlag	1 mm		
Neg. Wanddickentoleranz	0,3 mm	5,75 mm	2 mm
Berechnungswanddicke e_a	45,7 mm	39,25 mm	13 mm
Min. Streckgrenze R_{eH}	290 MPa	355 MPa	280 MPa
Min. Zugfestigkeit $R_{m/20}$	480 MPa	540 MPa	450 MPa
0,2%- Dehngrenze (475°C) $R_{p0,2/475}$	179 MPa	248 MPa	148 MPa
0,2%- Dehngrenze (480°C) $R_{p0,2/480}$	177,8 MPa	246,2 MPa	147,6 MPa
Zeitstandfestigkeit $R_{m/475/10.000}$	252,5 MPa	233,5 MPa	234 MPa
Zeitstandfestigkeit $R_{m/475/100.000}$	179 MPa	178,5 MPa	162,5 MPa
Zeitstandfestigkeit $R_{m/480/10.000}$	241 MPa	225 MPa	221 MPa
Zeitstandfestigkeit $R_{m/480/100.000}$	170 MPa	170 MPa	149 MPa

Die 0,2%-Dehngrenzen sowie die Zeitstandfestigkeiten wurden für Temperaturen, bei denen keine Werkstoffkennwerte angegeben waren, aus den nächstliegenden gegebenen Werkstoffkennwerten linear interpoliert. Mit dieser Vorgehensweise wurde der Vorgabe in EN 13445-2 bei den Dehngrenzen sowie in EN 13445-3 bei den Zeitstandfestigkeiten entsprochen.^[2, 8]

Zusätzlich erforderliche Werkstoffdaten wie der Elastizitätsmodul E , der (lineare) Wärmeausdehnungskoeffizient β oder die Wärmeleitfähigkeit λ wurden nach EN 13445-3 Anhang O ermittelt. Für die verwendeten Berechnungsmodelle wurden diese Werkstoffkennwerte als temperaturabhängig angenommen; die entsprechenden Tabellen finden Sie im Anhang. Als Referenztemperatur ohne thermische Dehnungen wurde für die Wärmeausdehnungskoeffizienten eine Temperatur von 20°C gewählt.^[2]

Gesonderte Betrachtung erforderte die modellierte Schweißnaht. Da zum Zeitpunkt der Auslegung die tatsächlichen Werkstoffkennwerte unbekannt waren (abhängig z.B. von Schweißverfahren, Schweißzusatz), wurden für die Schweißnaht die Werkstoffkennwerte des schwächeren angrenzenden Grundwerkstoffes verwendet; eine Ausnahme stellten die Zeitstandkennwerte dar, für die gemäß EN 13445-3 Anhang B nur 80% der Bemessungswerte des schwächeren angrenzenden Grundwerkstoffes verwendet werden durften (Werkstoffkennwerte aufgelistet in Tabelle 5).^[2]

Tabelle 5 – Werkstoffkennwerte Schweißnaht

Min. Streckgrenze R_{eH}	290 MPa
Min. Zugfestigkeit $R_{m/20}$	480 MPa
0,2%- Dehngrenze (475°C) $R_{p0,2/475}$	179 MPa
0,2%- Dehngrenze (480°C) $R_{p0,2/480}$	177,8 MPa
Zeitstandfestigkeit $R_{m/475/10.000}$	186,8 MPa
Zeitstandfestigkeit $R_{m/475/100.000}$	142,8 MPa
Zeitstandfestigkeit $R_{m/480/10.000}$	180 MPa
Zeitstandfestigkeit $R_{m/480/100.000}$	136 MPa

Die Analyseeinstellungen, die im Preprocessing festgelegt werden, beeinflussen die Komplexität der Berechnung und haben damit direkte Auswirkungen auf die Performance der Analyse. Für diese Problemstellung wurde zur Begrenzung der Rechenzeit ein axialsymmetrisches Modell der Geometrie verwendet. Implizit wird damit von einer gleichmäßigen Fertigungsqualität über den gesamten Umfang ausgegangen.

Im Rahmen der Vernetzung (Meshing) wurden alle Flächenelemente mit einem gleichmäßigen Netz von 8 mm Größe überzogen. An den Stellen mit zu erwartenden Spannungskonzentrationen – am Stutzen-Innenrand sowie am Übergang Schale-Schweißnaht an der Außenseite – wurden zur exakteren Berechnung und Darstellung in einem Radius von 15 mm um die ausgewählten Punkte kleinere Elemente mit 1 mm Größe erzeugt. Insgesamt wurde die Geometrie somit in 1917 Elemente untergeteilt; davon wurde etwa die Hälfte für die Analyse der zugrundeliegenden Struktur und der andere Teil für die Betrachtung der Details aufgewendet. In Abbildung 15 ist die Vernetzung graphisch dargestellt.

Zuletzt mussten die notwendigen kinematischen Randbedingungen festgelegt sowie die jeweiligen Einwirkungen auf das Berechnungsmodell aufgebracht werden, wobei eine entsprechende Darstellung der belasteten Kanten in Abbildung 16 erfolgt. Aufgrund der Axialsymmetrie und der Ebenheit des Modells besaß jeder Knoten nur zwei Freiheitsgrade. Die näherungsweise Annahme eines ungestörten Membranspannungszustandes in der Kugelschale in ausreichender Entfernung von der Schweißnaht wurde als zusätzliche Randbedingung gewählt, die eine unzulässige Bewegung des Modells verhinderte.

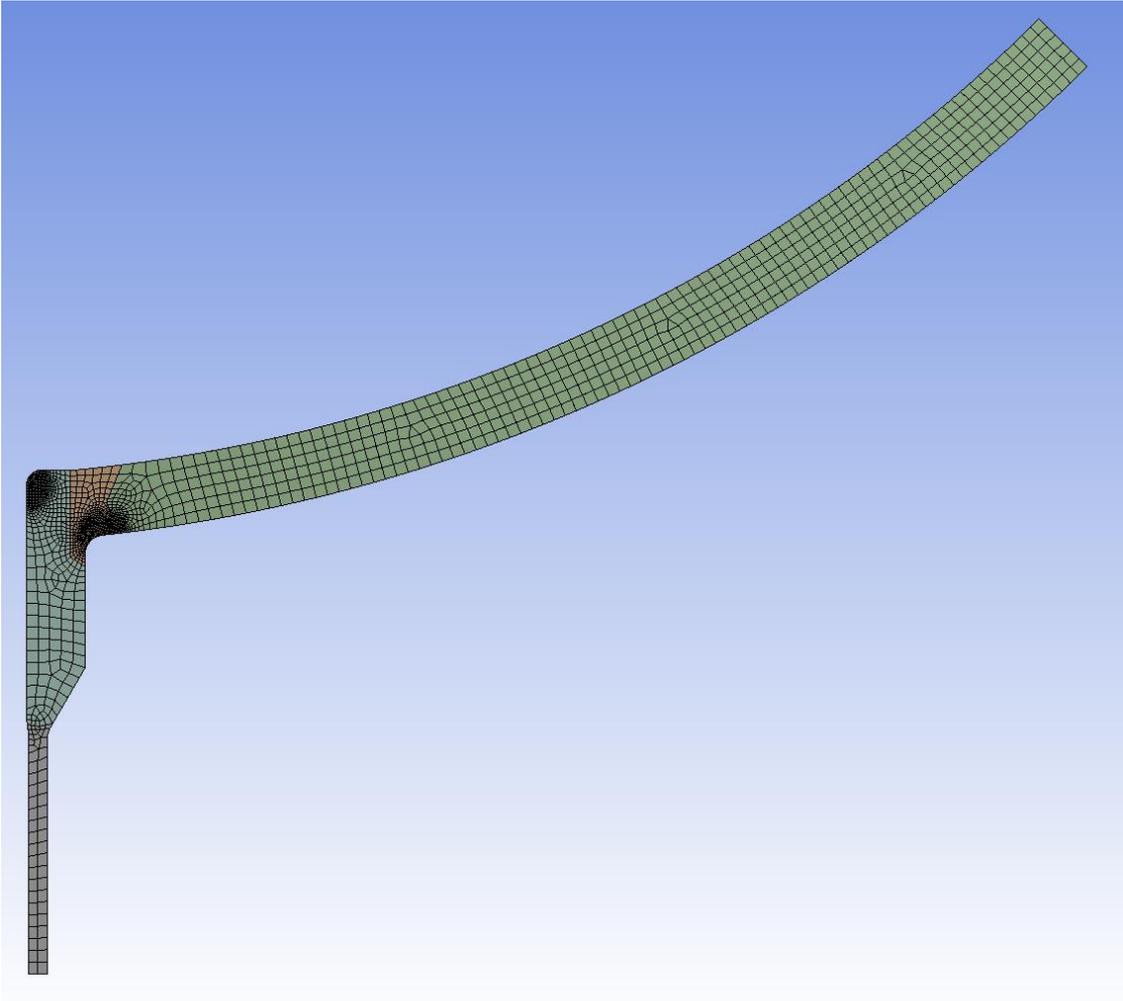


Abbildung 15 – Vernetzung (Meshing) des Bauteiles

Bei den Einwirkungen Innendruck und Längsspannungen variierten die quantitativen Werte von Nachweis zu Nachweis, sodass in der Darstellung in Abbildung 16 nur die belasteten Kanten farblich markiert sind. Die verwendeten Buchstaben stehen für folgende Randbedingungen:

- A – Kante ohne Verschiebung normal zur Schnittfläche (vulgo Membranspannungszustand)
- B – Kanten mit Innendruckbelastung (11 Kanten)
- C – Kante mit Längsspannung in axialer Richtung (Zugspannung zufolge Innendrucks im Rohr)

Als weitere Einwirkung war außerdem die Temperatur relevant. Für einige Nachweise wurde dabei mit einer konstanten Temperatur gerechnet; in anderen Nachweisen wurde eine Temperaturverteilung vorgegeben, die sich aus der transienten Betrachtung des Einspritzvorganges ergab. Die Stutzen-Innenkante wurde dabei zum Stutzen gezählt und auch von den Thermoschocks belastet, um eine konservative Betrachtung zu ermöglichen. Entsprechend der Temperaturverteilung wurde auch mit temperaturabhängigen Werkstoffkennwerten gerechnet. Das Modell zur Bestimmung des Temperaturverlaufes und weitere Information sind im Anhang zu finden.

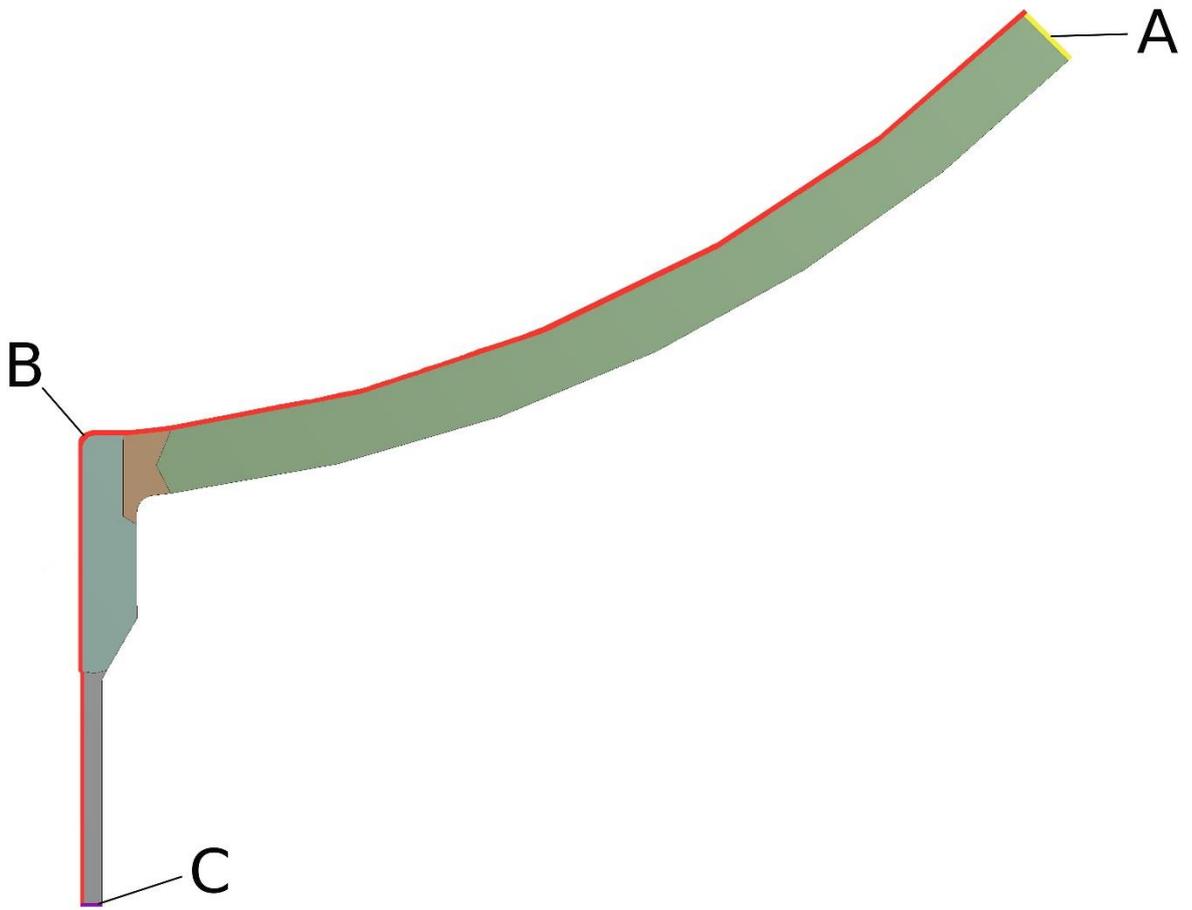


Abbildung 16 – Einwirkungen im Berechnungsmodell

4 Nachweise des analytischen Zulässigkeitsnachweises – Direktes Verfahren

4.1 Nachweise außerhalb des Zeitstandbereiches

Für die Nachweise außerhalb des Zeitstandbereiches wurden der Schweißnaht die Werkstoffkennwerte des schwächeren angrenzenden Grundwerkstoffes zugewiesen.

4.1.1 Tragfähigkeitsnachweis (TN)

Der Tragfähigkeitsnachweis wurde nur für den Lastfall mit den maximalen Belastungen, den Grenzlastfall, durchgeführt. Damit sind implizit alle anderen Lastfälle auch abgedeckt, da deren Einwirkungen (sowohl Druck als auch Temperatur) durchgehend geringere Werte annehmen. Der Nachweis wurde nach der verbindlichen Regel erbracht und es wurde dabei von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, nach einer Umrechnung die Mises'sche Fließbedingung zu verwenden.^[2]

Die wesentlichen Parameter für den Tragfähigkeitsnachweis waren:

- Temperatur von 480 °C
- Theorie 1. Ordnung
- linearelastisch-idealplastisches Werkstoffgesetz
- von Mises'sche Fließbedingung und assoziiertes Fließgesetz
- Bemessungswerte für die Werkstofffestigkeit RM_d nach Formel (4.1)
- Teilsicherheitsbeiwert für die Festigkeit von $\gamma_R = 1,25$
- Teilsicherheitsbeiwert für die Druckeinwirkung von $\gamma_P = 1,2$
- proportionale Zunahme aller Einwirkungen und ein spannungsfreier Ausgangszustand

$$RM_d = \frac{R_{p0,2/480}}{\gamma_R} * \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4.1)$$

Der Faktor $\sqrt{3}/2$ in Formel (4.1) stellt den Korrekturfaktor für die Fließbedingung nach Mises dar. Die daraus ermittelten Bemessungswerte für die verschiedenen Werkstoffkennwerte werden in Tabelle 6 aufgelistet. Diese wurden über die Option „Bilineare isotrope Verfestigung“ auf das Berechnungsmodell aufgegeben.

Tabelle 6 – Bemessungswerte des Tragfähigkeitsnachweises

Werkstoff	0,2% - Dehngrenze [MPa]	Bemessungswerte [MPa]	Tangentenmodul [Pa]
10CrMo9-10	177,8	123,2	100
11CrMo9-10+QT	246,2	170,6	100
16Mo3	147,6	102,3	100
Schweißnaht	177,8	123,2	100

Bei der Durchführung des Tragfähigkeitsnachweises wurde die Geometrie hohen Belastungen ausgesetzt, um numerisch die Tragfähigkeit der Struktur zu ermitteln. Als maximale Einwirkungen wurden ein Druck von 11 MPa und eine Längsspannung von -27,582 MPa aufgegeben. Bei einer Aufteilung der Lastaufbringung in 100 Teilschritte wurde nach 93 Teilschritten die maximale Belastung vor dem Strukturversagen erreicht. Die berechneten Ergebnisse sind in Tabelle 7 angeführt; Abbildung 17 zeigt die Vergleichsspannung nach Mises bei der maximalen Belastung.

Zulässigkeit ist für Normalbetriebslastfälle gegeben, solange der maximale Absolutwert der Hauptstrukturdehnungen geringer als 5% ist. Dieses Kriterium war für diesen Nachweis erfüllt; zur Bestätigung sind die maximalen Hauptstrukturdehnungen in Abbildung 18 und Abbildung 19 abgebildet. Alle Hauptstrukturdehnungen sind betragsmäßig kleiner als 0,05.

Tabelle 7 – Ergebnisse des Tragfähigkeitsnachweises

	Ergebnis	Formel
Berechneter Maximaldruck p_{d_max}	10,23 MPa	$= 11 \text{ MPa} * 0,93$
Maximal zulässiger Druck p_{c_max}	8,525 MPa	$p_{c_max} = \frac{p_{d_max}}{\gamma_P}$
Druck im Grenzlastfall p_c	8,5 MPa	$p_c < p_{c_max} \rightarrow \text{Zulässig}$

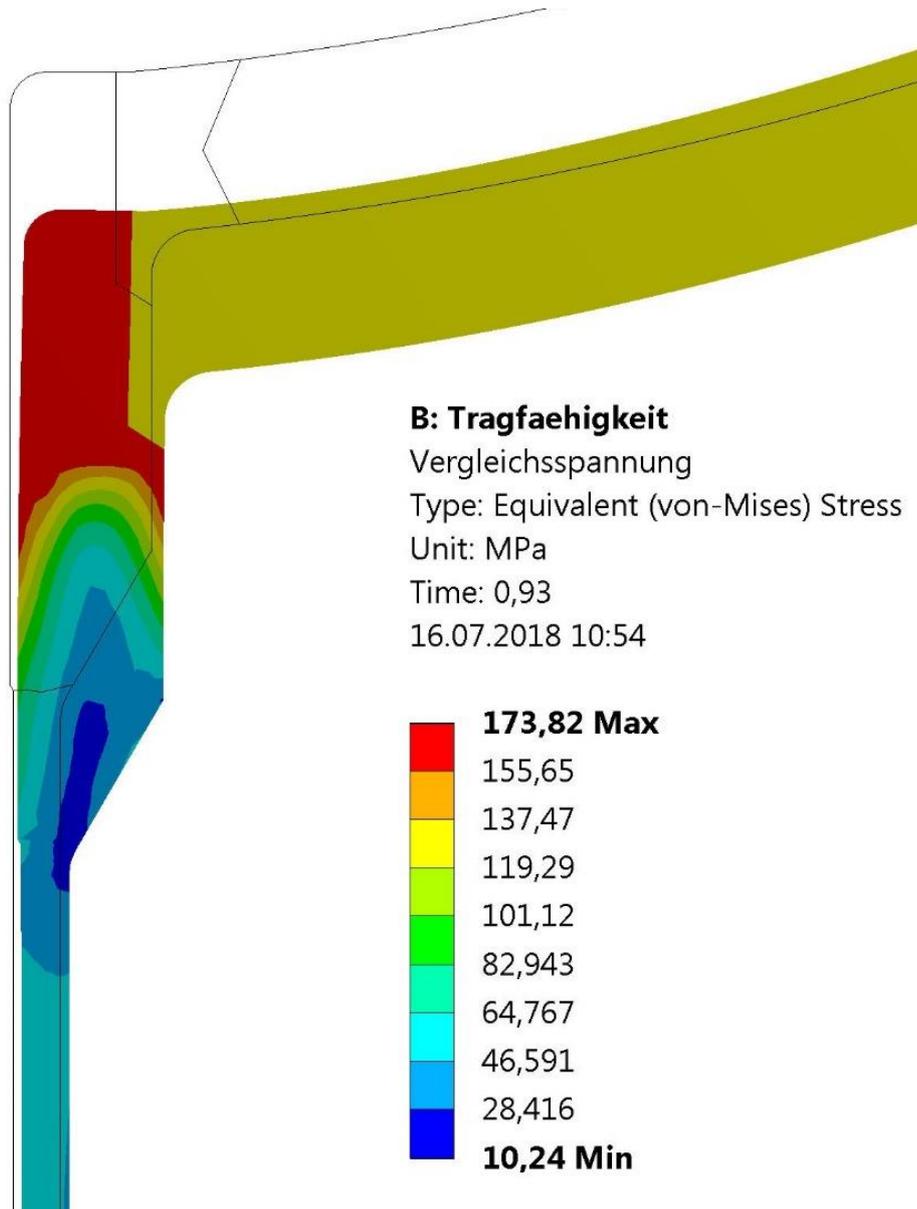


Abbildung 17 – Vergleichsspannungen nach Mises im TN

B: Tragfaehigkeit

EPTO1

Expression: EPTO1

Unit: mm/mm

Time: 0,93

16.07.2018 10:36

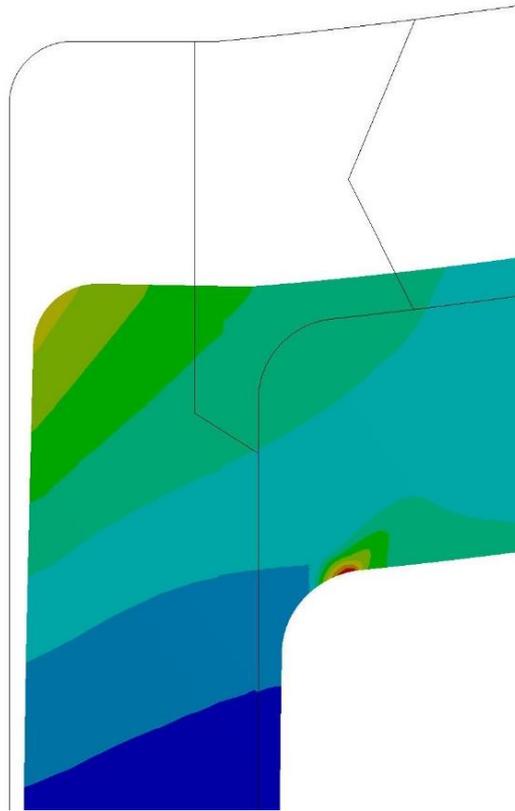
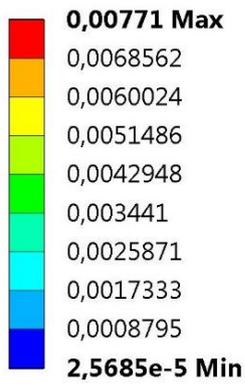


Abbildung 18 – Maximale Hauptstrukturdehnungen TN

B: Tragfaehigkeit

EPTO3

Expression: EPTO3

Unit: mm/mm

Time: 0,93

16.07.2018 10:37

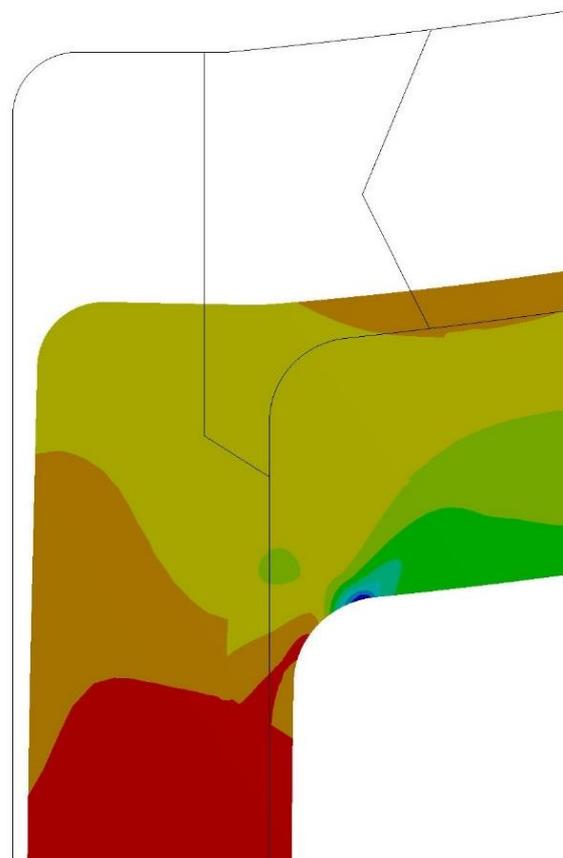
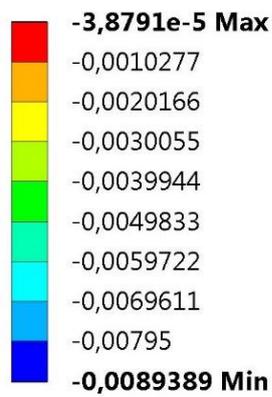


Abbildung 19 – Minimale Hauptstrukturdehnungen TN

4.1.2 Einspielnachweis (EN)

Im Einspielnachweis soll überprüft werden, ob der Schädigungsmechanismus der fortschreitenden plastischen Deformation für den Behälter eine Gefahr darstellt.

Für den charakteristischen Betriebszyklus musste überprüft werden, ob es bei einem Wechsel zwischen minimaler und maximaler Belastung – also zwischen Entlastungslastfall und Grenzlastfall – zu einem Einspielen der Struktur kam. Während dieser Übergang quasistationär betrachtet werden konnte, mussten bei der Thermoschock-Beanspruchung der Einspritzzyklen die maximal auftretenden Spannungen kontrolliert werden, die sich bei einem Temperaturwechsel innerhalb von einer Sekunde ergaben. Zur Betrachtung der Einwirkungen wurde mit einer charakteristischen Funktion gearbeitet.

Im Einspielnachweis wurde die Zulässigkeit nach der verbindlichen Regel mit einem Berechnungsmodell überprüft, das die folgenden Randbedingungen besaß. Dabei wurde als Berechnungstemperatur die Temperatur des Betriebslastfalls von 480°C gewählt.^[2]

- Theorie 1.Ordnung
- linearelastisch-idealplastisches Werkstoffgesetz
- Mises'sche Fließbedingung (Gestaltänderungsenergiehypothese) und assoziiertes Fließgesetz
- als Bemessungswerte der Fließgrenze die Dehngrenzen $R_{p0,2/480}$, siehe Tabelle 8
- alle Teilsicherheitsbeiwerte gleich Eins (γ_R, γ_P)

Tabelle 8 – Bemessungswerte der Fließgrenze für den Einspielnachweis

Werkstoff	Bemessungswerte [MPa]	Tangentenmodul [Pa]
10CrMo9-10	177,8	100
11CrMo9-10+QT	246,2	100
16Mo3	147,6	100
Schweißnaht	177,8	100

Ziel für die charakteristische Funktion im EN ist ein Lastzyklus, der die auftretenden Spannungen mit ihren ungünstigsten Absolutwerten abbilden soll. Aus Gründen der Einfachheit erfolgte dabei die Einspritzung direkt bei Druck und Temperatur des Grenzlastfalls, womit die Ergebnisse auf der sicheren Seite liegen. Eine schematische Darstellung der verwendeten charakteristischen Funktion zeigt Abbildung 21.

Die Thermoschock-Beanspruchung erfolgte an der Stutzenoberfläche innen, wobei als konservative Annahme auch die Rundung am Übergang zum Behälter der vollen Beanspruchung ausgesetzt war. An den spezifizierten Kanten wechselte die Temperatur innerhalb einer Sekunde von der Grenztemperatur von 480°C auf die Einspritztemperatur von 449°C. Abbildung 20 visualisiert den Temperaturverlauf drei Sekunden nach der Einspritzung.

Da die maximalen Vergleichsspannungen dabei in den ersten zwei Sekunden nach Einspritzbeginn auftraten und es ausschließlich in diesem Zeitraum auch zu plastischen Dehnungen kam, wurde die Simulation auf diese wenigen Zeitpunkte beschränkt. Anschließend folgte ein quasistatischer Aufwärmprozess, in dem keine Spannungsspitzen auftraten.

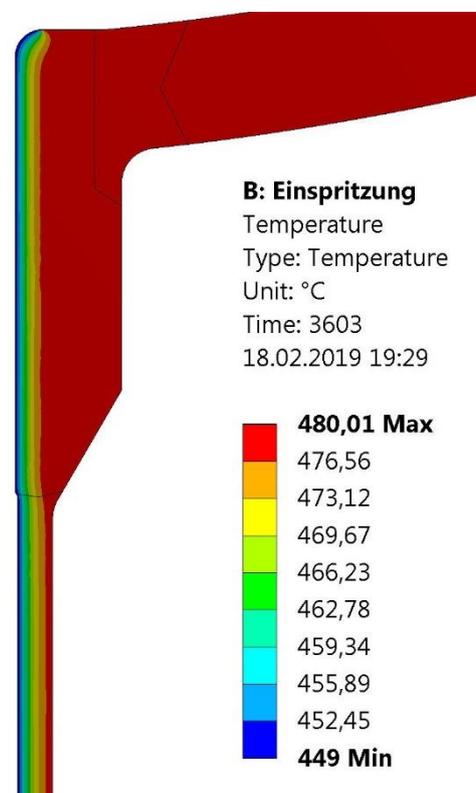


Abbildung 20 – Temperaturverteilung im Einspritzlastfall nach 3 Sekunden

Somit konnte mit drei Temperaturverteilungen ein adaptierter Belastungszyklus erstellt werden, mit dem das Einspielverhalten der Struktur überprüft werden sollte.

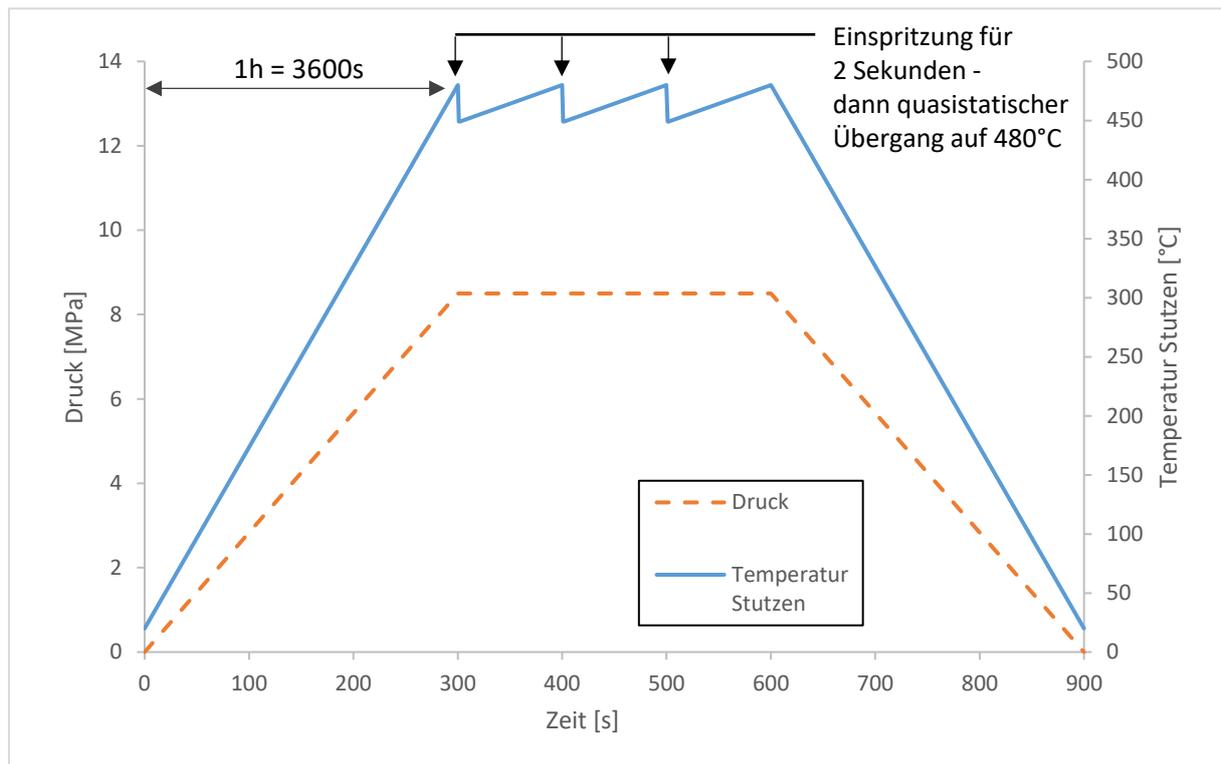


Abbildung 21 – Adaptierter Belastungszyklus für den EN (An- und Abfahren nicht maßstäblich)

Insgesamt wurden fünf adaptierte Belastungszyklen, welche insgesamt 15 Einspritzungen abbildeten, simuliert. Anhand der berechneten Absolutwerte der Hauptstrukturdehnungen, wurde eine Extrapolation für jene 50 Belastungszyklen erstellt, die innerhalb der Lebensdauer von 100.000 Stunden plangemäß durchlaufen werden.

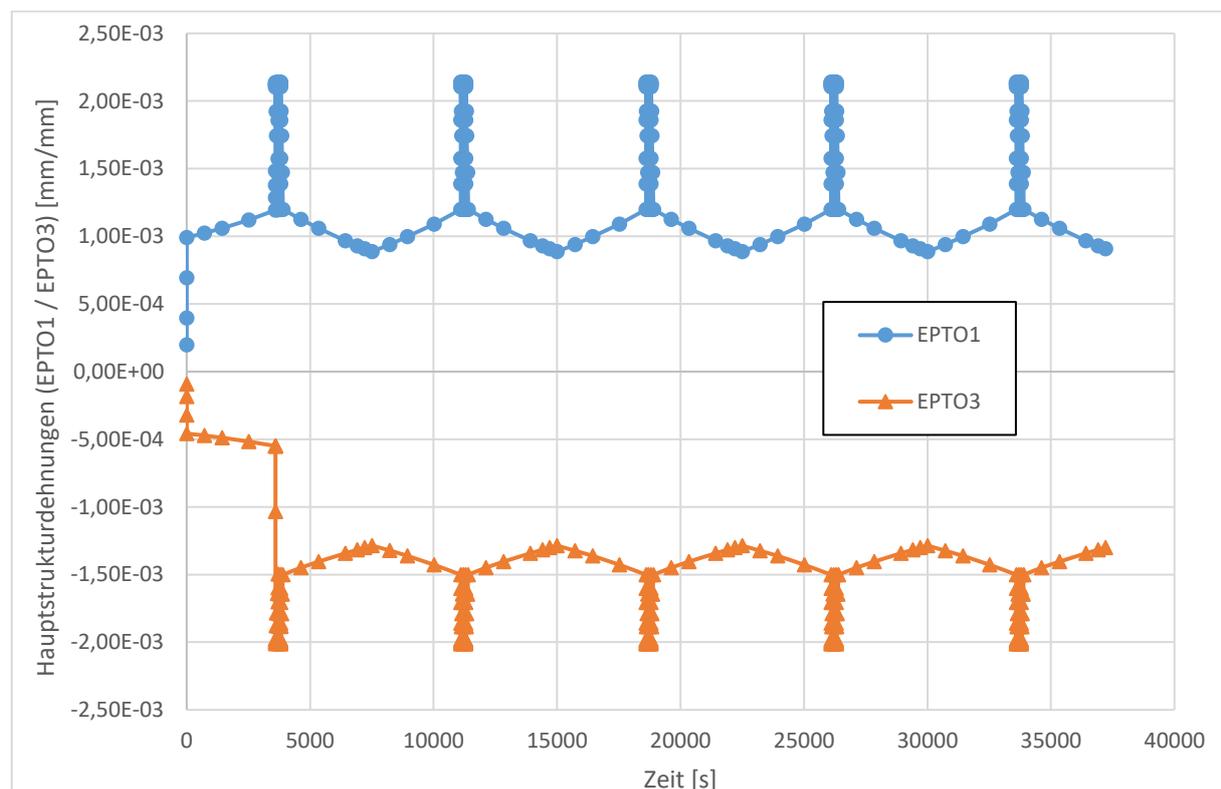


Abbildung 22 – Hauptstrukturdehnungen in fünf adaptierten Belastungszyklen im EN

Die Ergebnisse der Simulation zeigten, dass sich nach einem adaptierten Belastungszyklus mehr oder weniger ein konstanter Spannungszustand einstellte. Numerisch wurden zwar bei den Einspritzungen kleine Änderungen in den plastischen Dehnungen festgestellt; wie in Abbildung 22 zu erkennen ist, waren diese Änderungen jedoch vernachlässigbar. Insgesamt blieben die Absolutwerte der Hauptstrukturdehnungen in der Simulation unter 1%; auch für die erwarteten 50 Betriebszyklen war kein wesentlicher Anstieg der Dehnungen zu erwarten.

Damit konnte nach Anwendungsregel 1 des Einspielnachweises „Technisches Einspielen“ festgestellt werden, da die maximalen Absolutwerte der Hauptstrukturdehnungen unter dem Grenzwert von 5% blieben. Das Resultat des EN lautete somit **zulässig**.

Eine gute Visualisierung des Einspielverhaltens ermöglichen auch Dehnungs-Spannungskurven. Für den Punkt mit den höchsten Vergleichsspannungen nach Mises an der Stutzeninnenseite wurde diese Auswertung durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass nach Plastifizierungen im ersten charakteristischen Betriebszyklus - der waagrechte Abschnitt in Abbildung 23 - die Struktur linearelastisches Verhalten aufwies. Folglich ergab sich im Dehnungs-Spannungsdiagramm in Abbildung 23 eine Gerade - bei fortschreitender plastischer Deformation käme es zu einer periodischen Verschiebung der Gerade in Richtung höherer Dehnungen.

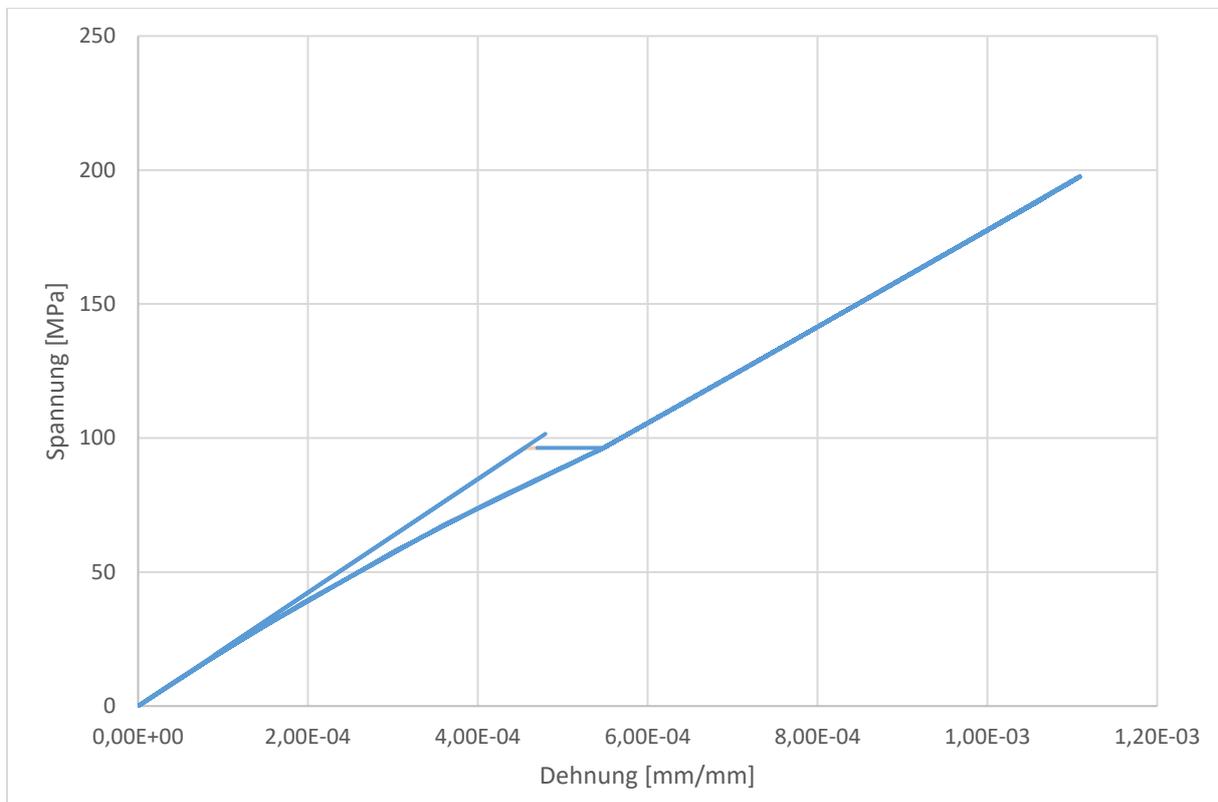


Abbildung 23 – Dehnungs-Spannungskurve im EN für den Punkt mit den maximalen Vergleichsspannungen

4.1.3 **Stabilitätsnachweis (SN)**

Bei der betrachteten Problemstellung stellte der Innendruck in allen betrachteten Lastfällen eine bestimmende Belastung dar. Damit war die Gefahr von Instabilität nicht gegeben und ein Stabilitätsnachweis war für dieses Beispiel nicht erforderlich.

4.1.4 Ermüdungsnachweis (ZEN)

Der Ermüdungsnachweis soll den Nachweis bringen, dass die Schädigung durch Ermüdung für die betrachtete Struktur kein Risiko darstellt.^[2]

Zu Beginn sollte überprüft werden, ob ein Ermüdungsnachweis aufgrund der Druckschwankungen notwendig ist. Dazu wurde das Kriterium der Norm herangezogen, das in Kapitel 2.6.1.4 dieser Arbeit detailliert beschrieben ist.

Die Anzahl der äquivalenten Druckzyklen n_{eq} über die volle Schwingbreite wurde nach Formel (2.5) ermittelt. In jedem charakteristischem Betriebszyklus mit der Dauer von 2000 Stunden traten die Druckzyklen einmal auf (siehe Abbildung 24), womit es im Laufe der Lebensdauer von 100.000 Stunden zu 50 Druckzyklen n_i kam. Als Druckdifferenz war dabei der maximal zulässigen Druck P_{max} von 8,5 MPa wesentlich, sodass die Ergebnisse nach Tabelle 9 berechnet wurden.^[2]

Tabelle 9 – Anzahl der äquivalenten Druckzyklen ZEN

Lastzyklus	n_i	ΔP_i	n_{eq}
Entlastungslastfall – Grenzlastfall	50	8,5 MPa	50
Summe			50

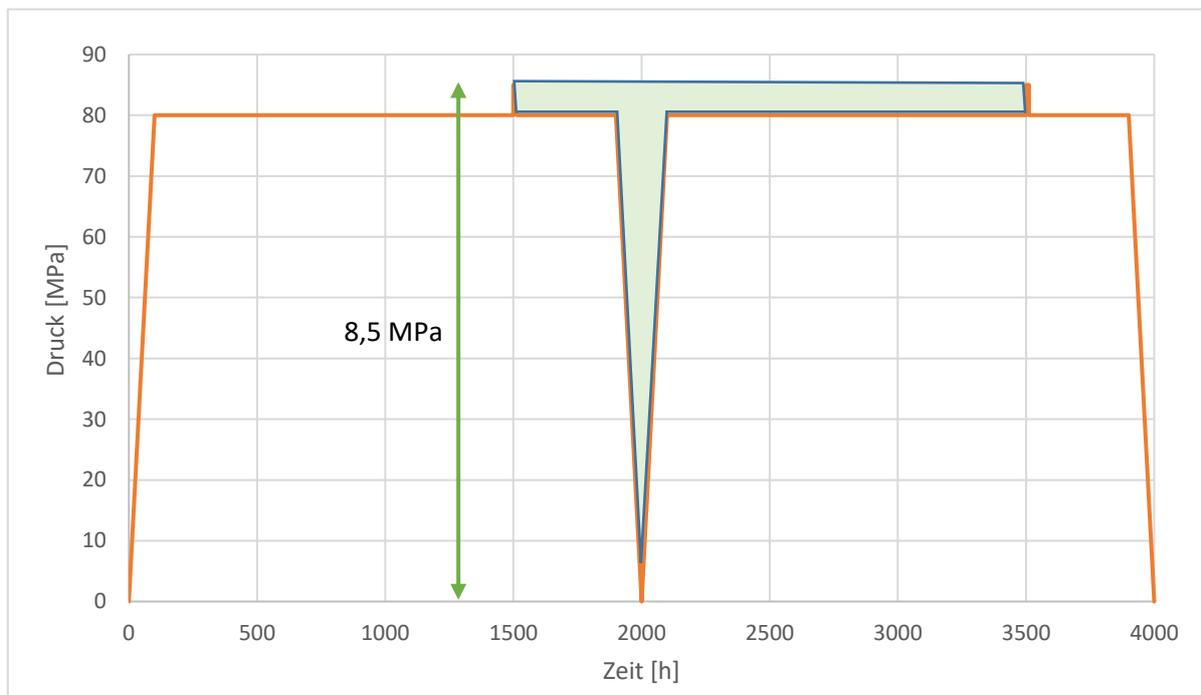


Abbildung 24 – Ermittlung der Druckzyklen über die volle Schwingbreite im ZEN

Da der ermittelte Wert der Anzahl der äquivalenten Druckzyklen über die volle Schwingbreite deutlich geringer als der Grenzwert von 500 Druckzyklen war, stellte Ermüdung aufgrund der zyklischen Druckbeanspruchung keine große Gefahr dar.

Im charakteristischen Betriebszyklus dieser Arbeit traten neben obigen Druckzyklen aber zusätzlich thermische Spannungen als zyklische Belastungen auf. Nach der verbindlichen Regel des ZEN musste somit für die kombinierte zyklische Belastung Druck/Temperatur der Bemessungswert des Ermüdungsmaßes für zyklische Einwirkungen bestimmt werden.^[2]

Als Anwendungsregel beim ZEN werden die Berechnungen nach Abschnitt 18 der EN 13445-3 angeführt. Dort werden geeignete Regeln und Verfahren genannt, mit denen der Schädigungsmechanismus der Ermüdung zufriedenstellend behandelt werden kann. Leider arbeitet dieser Abschnitt mit der Einschränkung, dass die Regeln nur für Behälter mit Betriebstemperaturen unterhalb des

Zeitstandbereiches des Werkstoffes gültig sind. Der Grund dafür dürfte sein, dass die beschriebenen Methoden auf der Hypothese der linearen Schadensakkumulation beruhen.^[2, 16]

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass für einen Ermüdungsnachweis im Zeitstandbereich die Norm alleine als Berechnungsgrundlage nicht ausreichend ist. Für diese Fälle ist es notwendig, die Zulässigkeit mit komplexeren Modellen und/oder Theorien nachzuweisen. In der Literatur finden sich dazu verschiedene Verfahren. Eine Option ist, die Schädigungsberechnung in Teilzyklen zu unterteilen und deren inelastische Dehnungsschwingbreiten auszuwerten (strain range partitioning).^[16]

Die Anzahl der betrachteten thermischen Zyklen für diese Arbeit betrug 150 Zyklen. Verglichen mit den zulässigen 500 Druckzyklen handelte es sich um eine geringe Anzahl an Wechselbeanspruchungen. Deshalb wurde für diese Belastungen die Annahme getroffen, dass sie für eine etwaige Ermüdungsschädigung innerhalb der Lebensdauer von 100.000 Stunden nicht relevant seien. Es soll jedoch festgehalten werden, dass dies eine Bestätigung durch weitere Untersuchungen erfordert.

4.1.5 Standsicherheitsnachweis (SE)

Der Standsicherheitsnachweis bzw. Nachweis des statischen Gleichgewichts vergleicht die Bemessungswerte von stabilisierenden Einwirkungen und destabilisierenden Einwirkungen. Insgesamt müssen die Bemessungswerte der stabilisierenden Einwirkungen größer sein als diejenigen der destabilisierenden.^[2]

Der Standsicherheitsnachweis ist nur sinnvoll für komplette Behälter, die mit einem Tragwerk ausgestattet sind. Dann können Einwirkungen wie Wind- und Erdbebenlasten berücksichtigt werden. Im Rahmen dieses Beispiels waren diese Bedingungen nicht erfüllt, weswegen auf eine Durchführung dieses Nachweises verzichtet wurde.

4.2 Kriechnachweise

Zu Beginn stellte sich die Frage, ob Kriechnachweise erforderlich sind. Für strittige Fragestellungen legt der Anhang B der EN 13445-3 exakte Regeln fest, wann Kriechnachweise durchgeführt werden müssen. Zu finden sind diese Bedingungen in Abschnitt B.1.4 der Norm EN 13445-3 (siehe auch Kapitel 2.6.2). Die Ergebnisse der hier betrachteten Problemstellung zeigt Tabelle 10, wobei die Einschränkungen der folgenden Absätze zu beachten sind.^[2]

Gegenwärtig ist die Anwendung dieser Bedingungen auf gewisse Problemstellungen eingeschränkt. Die Ursache dafür ist, dass in den Werkstoffnormen für Rohrwerkstoffe heute keine 1%-Zeitdehngrenzen angegeben sind. Damit können nicht alle Bedingungen überprüft werden und bei der Beteiligung von Rohrwerkstoffen in einer Konstruktion sind somit Kriechnachweise immer durchzuführen, sobald die Temperaturen innerhalb des Zeitstandbereiches liegen.^[14, 39]

Ein Grund für die fehlenden Werkstoffkennwerte ist der große Aufwand, den die Durchführung von Zeitstandversuchen mit sich bringt. Deswegen existiert für die weniger kritischen Rohrwerkstoffe nur eine schlechte Datenbasis. Wird allerdings davon ausgegangen, dass bei gleicher Werkstoffzusammensetzung das Herstellverfahren nur geringen Einfluss auf die Kriechbeständigkeit hat, so können die 1%-Zeitdehngrenzen aus anderen Normen als Referenz verwendet werden. Für diese Arbeit wurde mit dieser Annahme auf die Werkstoffnorm für Schmiedestücke zurückgegriffen, da dort beide Rohrwerkstoffe angeführt waren. Dieses Vorgehen stellt jedoch keine normgerechte Vorgangsweise dar.^[2, 40]

Da Schweißnähte für Kriechbeanspruchung besonders kritische Stellen darstellen, wurden als Zeitstandwerkstoffkennwerte der Schweißnaht 80% der Zeitstandwerkstoffkennwerte des schwächeren angrenzenden Grundwerkstoffes verwendet. Diese Regel findet auch bei den Kriechnachweisen nach Anhang B ihre Anwendung.^[2]

Tabelle 10 – Auslegung im Zeitstandsbereich – Bedingungen

	10CrMo9-10	11CrMo9-10+QT	16Mo3	Schweißnaht
$1,2 * T$ [°C]	570	570	570	570
$1,5 * R_{1\%/475/100.000}$ [MPa]	137,5	137,5	116,5	110
$\min(1,2 * T; 1,5 * R_{1\%})$	137,5	137,5	116,5	110
$R_{p0,2/475}$ [MPa]	179	248	148	179
Kriechnachweise?	erforderlich	erforderlich	erforderlich	erforderlich

T ... Berechnungstemperatur für die Lebensdauer (hier 475°C)

4.2.1 Kriechfestigkeitsnachweis (KFN)

Im Rahmen des Kriechfestigkeitsnachweises mussten mehrere Lastfälle betrachtet werden, da für diese Lastfälle jeweils unterschiedliche Betriebsbeanspruchungen spezifiziert wurden. Ein Nachweis war für den Betriebszustand mit der Lebensdauer von 100.000 Stunden durchzuführen. Für den maximalen Grenzlastfall mit der Lebensdauer von 10.000 Stunden musste ebenfalls ein Nachweis erbracht werden. Implizit war auch der Einspritzlastfall abgedeckt, da dort bei gleicher Lebensdauer sowohl Druck als auch Temperatur geringere Werte annahmen.

4.2.1.1 Kriechfestigkeitsnachweis für den Betriebslastfall

Der Kriechfestigkeitsnachweis für den Betriebslastfall erfolgte direkt nach der verbindlichen Regel des Kriechfestigkeitsnachweises. Dabei wurde zur Bestimmung der Tragfähigkeit ein Berechnungsmodell mit folgenden Parametern verwendet:

- Belastungsdauer 100.000 Stunden, Temperatur 475°C
- Theorie 1. Ordnung
- linearelastisch-idealplastisches Werkstoffgesetz
- von Mises'sche Fließbedingung und assoziiertes Fließgesetz
- Bemessungswerte für die Fließgrenze mit den Kriechfestigkeitswerten RM_d nach Formel (4.2)
- Teilsicherheitsbeiwert für die Festigkeit von $\gamma_R = 1,25$
- Teilsicherheitsbeiwert für die Druckeinwirkung von $\gamma_P = 1,2$
- proportionale Zunahme aller Einwirkungen und ein spannungsfreier Ausgangszustand

$$RM_d = \frac{R_{m/475/100.000}}{\gamma_R} \quad (4.2)$$

In Tabelle 11 sind die ermittelten Bemessungswerte für die verschiedenen Werkstoffe angeführt. Diese wurden über die Option „Bilineare isotrope Verfestigung“ auf das Modell aufgegeben.

Tabelle 11 – Bemessungswerte des KFN für den Betriebslastfall

Werkstoff	Zeitstandfestigkeit [MPa]	Bemessungswert [MPa]	Tangentenmodul [Pa]
10CrMo9-10	179	143,2	100
11CrMo9-10+QT	178,5	142,8	100
16Mo3	162,5	130	100
Schweißnaht	142,8	114,24	100

Als Einwirkungen wurden für den Kriechfestigkeitsnachweis ein Druck von 12 MPa und eine Längsspannung von -30,09 MPa vorgegeben. Bei einem Zeitschritt von 0,95462 der Gesamtlast wurde das Kriterium noch erfüllt, dass die maximalen Absolutwerte der Hauptstrukturdehnungen 5% nicht überschreiten (siehe Abbildung 25 und Abbildung 26). Mit der so bestimmten Traglast wurde die

verbindliche Regel des KFN erfüllt, da der Betriebsdruck p_c kleiner als der maximal zulässige Druck p_{c_max} ist. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 12. Phänomenologisch treten die größten Dehnungen bei diesem Nachweis in der Rundung der Schweißnaht auf. Da die Festigkeitswerte der Schweißnaht die vergleichsweise geringsten Werte annehmen, ist in diesem Bereich mit erhöhten Dehnungen zu rechnen.

Tabelle 12 – Ergebnisse des KFN für den Betriebslastfall

	Ergebnis	Formel
Berechneter Maximaldruck p_{d_max}	11,45 MPa	$= 12 \text{ MPa} * 0,95462$
Maximal zulässiger Druck p_{c_max}	9,54 MPa	$p_{c_max} = \frac{p_{d_max}}{\gamma_P}$
Druck im Betriebslastfall p_c	8 MPa	$p_c < p_{c_max} \rightarrow \text{Zulässig}$

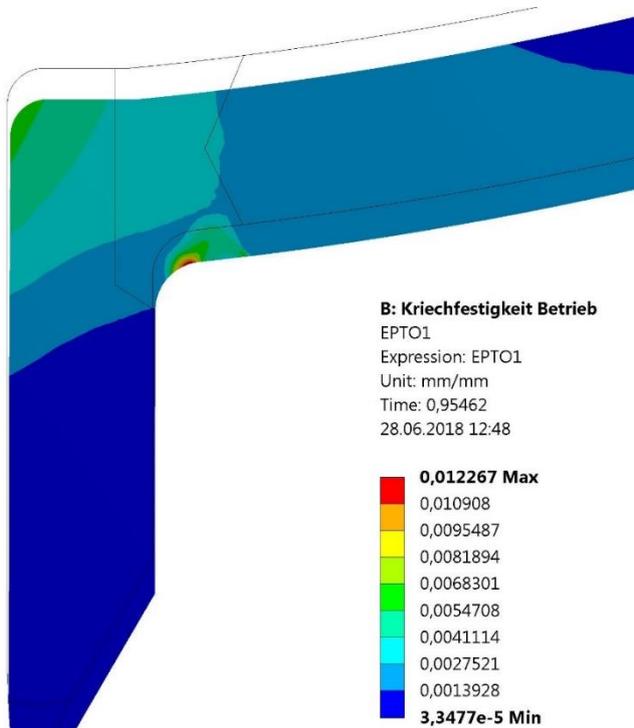


Abbildung 25 – Maximale Hauptstrukturdehnungen KFN Betriebslastfall

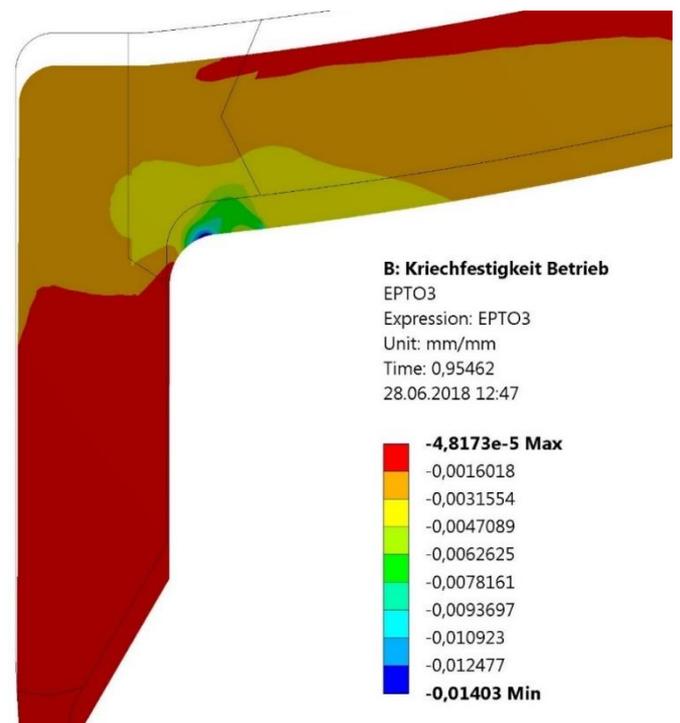


Abbildung 26 – Minimale Hauptstrukturdehnungen KFN Betriebslastfall

4.2.1.2 Kriechfestigkeitsnachweis für den Grenzlastfall

Auch der Kriechfestigkeitsnachweis für den Grenzlastfall erfolgte direkt nach der verbindlichen Regel. Für das Berechnungsmodell zur Bestimmung der Tragfähigkeit wurden die folgenden Werte und Parameter verwendet:

- Belastungsdauer 10.000 Stunden, Temperatur 480°C
- Theorie 1. Ordnung
- linearelastisch-idealplastisches Werkstoffgesetz
- von Mises'sche Fließbedingung und assoziiertes Fließgesetz
- Bemessungswerte für die Fließgrenze mit den Kriechfestigkeitswerten RM_d nach Formel (4.3)
- Teilsicherheitsbeiwert für die Festigkeit von $\gamma_R = 1,25$
- Teilsicherheitsbeiwert für die Druckeinwirkung von $\gamma_P = 1,2$
- proportionale Zunahme aller Einwirkungen und ein spannungsfreier Ausgangszustand

$$RM_d = \frac{R_{m/480/10.000}}{\gamma_R} \quad (4.3)$$

Die Werkstoffkennwerte für die Plastifizierung im Berechnungsmodell sind für die verschiedenen Werkstoffe in Tabelle 13 angeführt. Diese wurden erneut über die Option „Bilineare isotrope Verfestigung“ auf das Modell aufgebracht.

Tabelle 13 – Bemessungswerte des KFN für den Grenzlastfall

Werkstoff	Zeitstandfestigkeit [MPa]	Bemessungswert [MPa]	Tangentenmodul [Pa]
10CrMo9-10	241	192,8	100
11CrMo9-10+QT	225	180	100
16Mo3	221	176,8	100
Schweißnaht	180	144	100

Für diesen Nachweis wurde das obige Modell mit einem Innendruck von 18 MPa sowie den zugehörigen Längsspannungen von -45,134MPa beaufschlagt. Bei einem Zeitschritt von 0,85 konnte ein Ergebnis berechnet werden, bei dem die Begrenzung der Absolutwerte der Hauptstrukturdehnungen auf 5% noch erfüllt war. Somit konnte die Tragfähigkeit bestimmt werden; die entsprechenden Ergebnisse sind in Tabelle 14 angeführt. Als Resultat wurde festgestellt, dass eine Erfüllung der verbindlichen Regel für diesen Nachweis gewährleistet ist, wobei der Abstand zu den maximal zulässigen Bedingungen noch ziemlich groß ist.

Tabelle 14 – Ergebnisse des KFN für den Grenzlastfall

	Ergebnisse	Formeln
Berechneter Maximaldruck p_{d_max}	15,3 MPa	$= 18 \text{ MPa} * 0,85$
Maximal zulässiger Druck p_{c_max}	12,75 MPa	$p_{c_max} = \frac{p_{d_max}}{\gamma_P}$
Druck im Grenzlastfall p_c	8,5 MPa	$p_c < p_{c_max} \rightarrow \text{Zulässig}$

Wie bei dem Kriechfestigkeitsnachweis für den Betriebszustand traten die maximalen absoluten Hauptstrukturdehnungen am abgerundeten Übergang in der Schweißnaht auf. In Abbildung 27 und Abbildung 28 sind die entsprechenden Ergebnisse abgebildet.

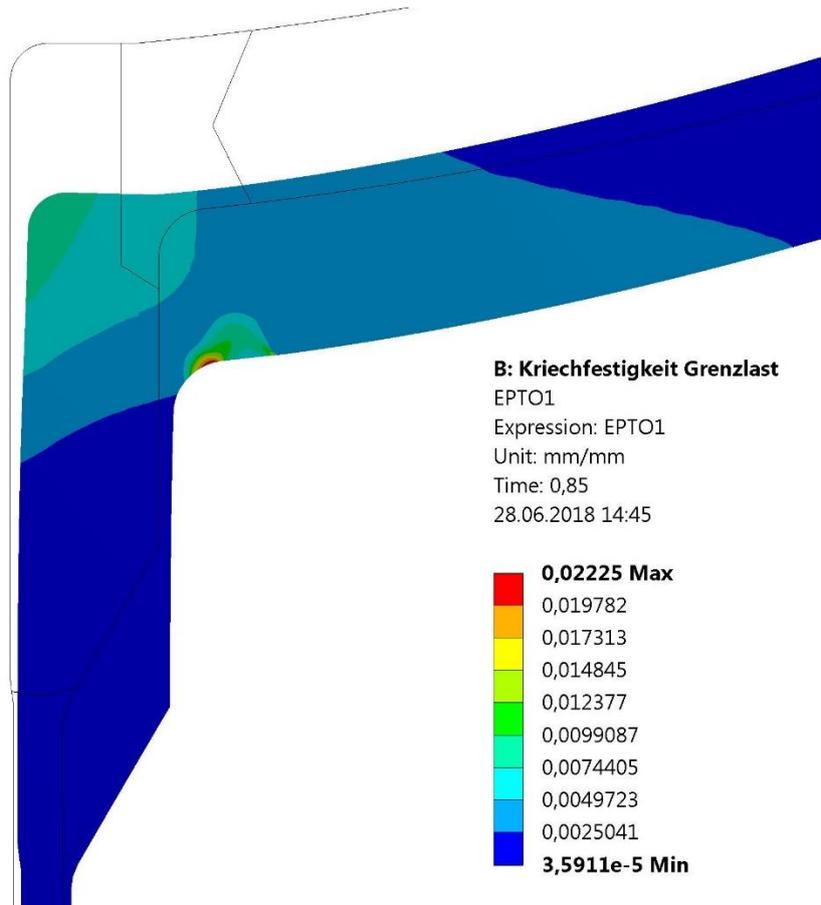


Abbildung 27 – Maximale Hauptstrukturdehnungen KFN Grenzlastfall

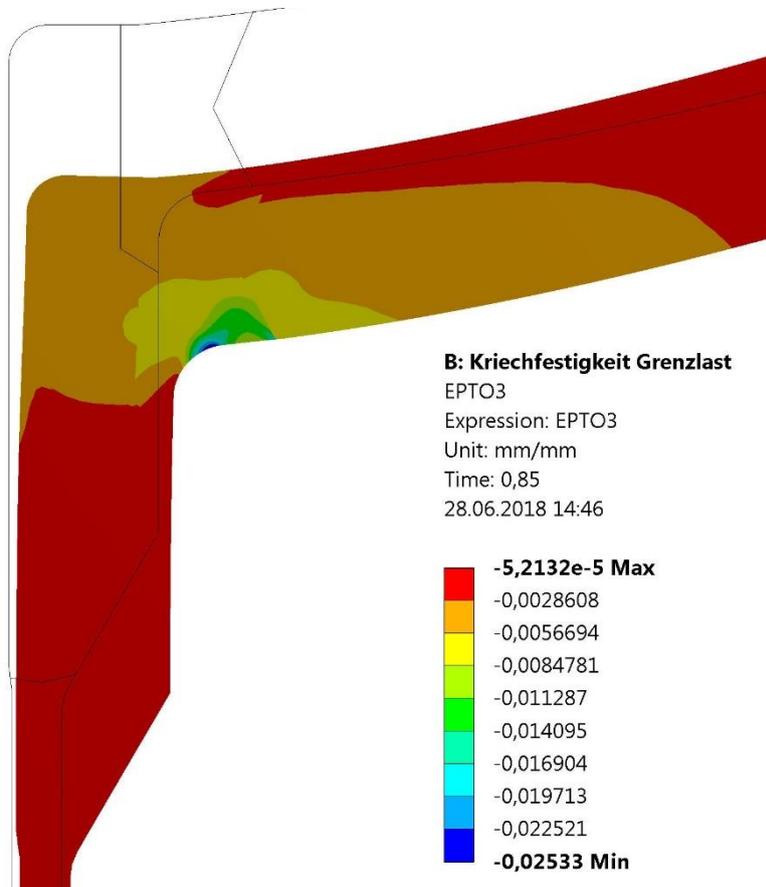


Abbildung 28 – Minimale Hauptstrukturdehnungen KFN Grenzlastfall

4.2.2 Kriechdehnungsnachweis (KDN)

Im Rahmen der Kriechdehnungsnachweise wurde die erwartete Formänderung des Materials auf Zulässigkeit überprüft. Dabei wurde der Betriebslastfall für den KDN nach Anwendungsregel 1 als ein durchgehender Lastfall von 100.000 Stunden betrachtet. Zusätzlich mussten für den Einspritzlastfall sowie den Grenzlastfall jeweils ein KDN nach Anwendungsregel 2 durchgeführt werden.

4.2.2.1 Kriechdehnungsnachweis für den Betriebslastfall

Im Betriebslastfall kommt es zu langen Kriechperioden, die in festgelegten Abständen durch den Einspritzlastfall unterbrochen werden. Wird davon ausgegangen, dass die Einspritzungen keinen großen Einfluss auf die Struktur haben, so kann der Betriebslastfall als eine durchgehende Kriechperiode von 2000 Stunden betrachtet werden. Gilt zusätzlich die Annahme, dass auch die Entlastungsvorgänge keine große Bedeutung haben, so können alle auftretenden Kriechperioden zu einer durchgängigen Kriechbelastung zusammengefasst werden. Deren Zulässigkeit wurde in diesem Nachweis betrachtet. Ob die genannten Annahmen zutreffen, wurde anschließend im KDN nach Anwendungsregel 2 geprüft (siehe Kapitel 4.2.2.2).

Mit der gesammelten Betrachtung aller Kriechperioden befindet sich die Berechnung auf der sicheren Seite. Denn die tatsächlichen Festigkeitswerte kürzen sich im Lauf der Berechnung, sodass nur das Verhältnis der Kennwerte wesentlich ist. Im Bereich kurzer Belastungsdauern werden diese Kennwerte allerdings durch Extrapolation ermittelt, sodass die Verhältnisse großer Unsicherheit unterliegen.

Der durchgehende Kriechlastfall wurde im Kriechdehnungsnachweis mit der Anwendungsregel 1 abgedeckt, wobei die Annahme gemacht wurde, dass die Vernachlässigung des Einflusses der Anfangsbedingungen zulässig sei. Wie im charakteristischen Betriebszyklus spezifiziert, sollte als gesamte Lebensdauer eine Betriebszeit von 100.000 Stunden angenommen werden. Die Wahl der Bemessungstemperatur wurde entsprechend der Betriebsbedingungen im Betriebslastfall auf 475°C festgelegt.

Zunächst waren zur Ermittlung der Referenzspannungen (für die verschiedenen Werkstoffe) die elastische Grenzeinwirkung A_e und die dehnungsbegrenzte Grenzeinwirkung A_u zu berechnen. Diese Rechnung beruhte auf einem Modell mit folgenden Randbedingungen:

- Linearelastisch-idealplastisches Werkstoffgesetz
- von Mises'sche Fließbedingung und assoziiertes Fließgesetz
- Bemessungswerte für die Fließgrenze mit der Kriechfestigkeit $RM_d = R_{m/475/100.000}$
- Teilsicherheitsbeiwerte für die Festigkeit $\gamma_R = 1$
- Proportionale Zunahme aller Einwirkungen (mit Ausnahme der Temperatur)
- Spannungsfreier Ausgangszustand

Bei der Bestimmung der dehnungsbegrenzten Grenzeinwirkung A_u galt zusätzlich die Forderung, dass die maximalen absoluten Hauptstrukturdehnungen unter 5 % bleiben. Die Werkstoffkennwerte des verwendeten Berechnungsmodells konnten nicht direkt den Normen entnommen werden; sie konnten aber durch lineare Interpolation bestimmt werden. Anschließend wurden sie als bilineare isotrope Plastizität in das Modell eingebracht; die numerischen Werte sind in Tabelle 15 angeführt.

Tabelle 15 – Werkstoffkennwerte des KDN für den Betriebslastfall

Werkstoff	Bemessungswert [MPa]	Tangentenmodul [Pa]
10CrMo9-10	179	100
11CrMo9-10+QT	178,5	100
16Mo3	162,5	100
Schweißnaht	142,8	100

Als Einwirkungen wurden auf das Modell ein Druck von 15 MPa sowie eine zugehörige Längsspannung von -37,612 MPa aufgegeben. Dabei zeigte sich in der Simulation, dass bis zum Zeitschritt 0,45 ausschließlich elastische Verformungen auftraten. Die Maximalbelastung unter Berücksichtigung der Einschränkung der absoluten Hauptstrukturdehnungen trat beim Zeitschritt 0,96 auf. Tabelle 16 fasst die Resultate für die Berechnung der Referenzspannung zusammen.

Tabelle 16 – Zwischenergebnisse zur Ermittlung der Referenzspannungen für den Betriebslastfall

	Wert	Formel
Elastische Grenzeinwirkung A_e	6,75 MPa	$= 15 \text{ MPa} * 0,45$
(Dehnungsbegrenzte) Grenzeinwirkung A_u	14,4 MPa	$= 15 \text{ MPa} * 0,96$
Bemessungswert des Drucks A_d	9,6 MPa	$= 8 \text{ MPa} * \gamma_P$

Die Kriterien zur Bestimmung der Grenzeinwirkungen sollen im Anschluss graphisch illustriert werden. Die elastische Grenzeinwirkung wurde über lineare Extrapolation der maximalen Spannung berechnet.

Gut erkennbar ist die Grenze auch bei den plastischen Hauptstrukturdehnungen, deren Verlauf über der Simulationszeit in Abbildung 29 dargestellt ist. Ab einer Zeit von 0,50 kam es dabei zu plastischen Dehnungen.

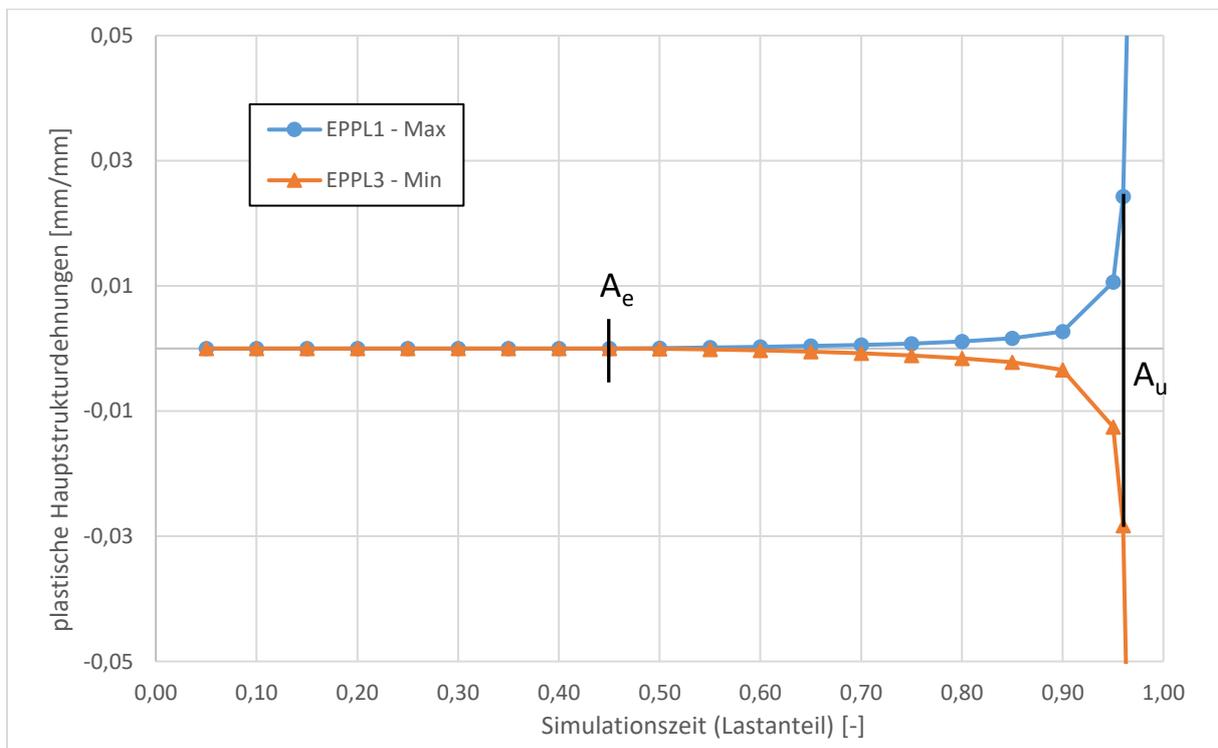


Abbildung 29 – Plastische Hauptstrukturdehnungen im KDN für den Betriebslastfall

Bei der dehnungsbegrenzten Grenzeinwirkung bestimmten die maximalen Absolutwerte der Hauptstrukturdehnungen den relevanten Zeitschritt, wobei die maximalen Werte des gewählten Berechnungsergebnisses in Abbildung 30 und Abbildung 31 abgebildet sind.

Um die Referenzspannungen zu berechnen, wurden auch Bemessungswerte für die tatsächlichen Einwirkungen benötigt. In diesem Beispiel war dabei der Teilsicherheitsbeiwert für den Druck von Bedeutung, der mit $\gamma_P = 1,2$ festgelegt ist. Ausgehend vom Betriebsdruck von $p = 8 \text{ MPa}$ wurde damit der Bemessungswert ermittelt; das Ergebnis steht in Tabelle 16.

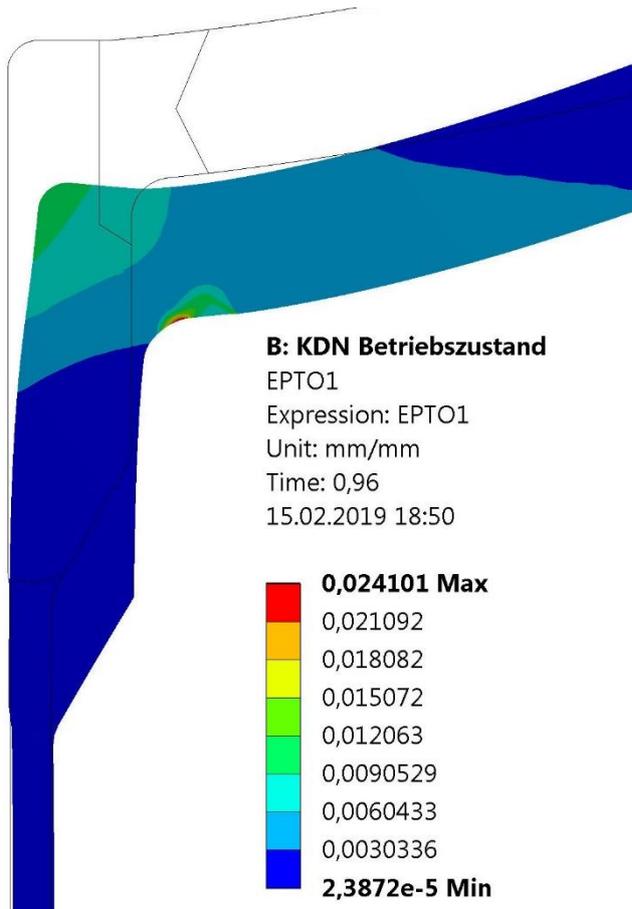


Abbildung 30 – Maximale Hauptstrukturdehnungen KDN Betriebslastfall

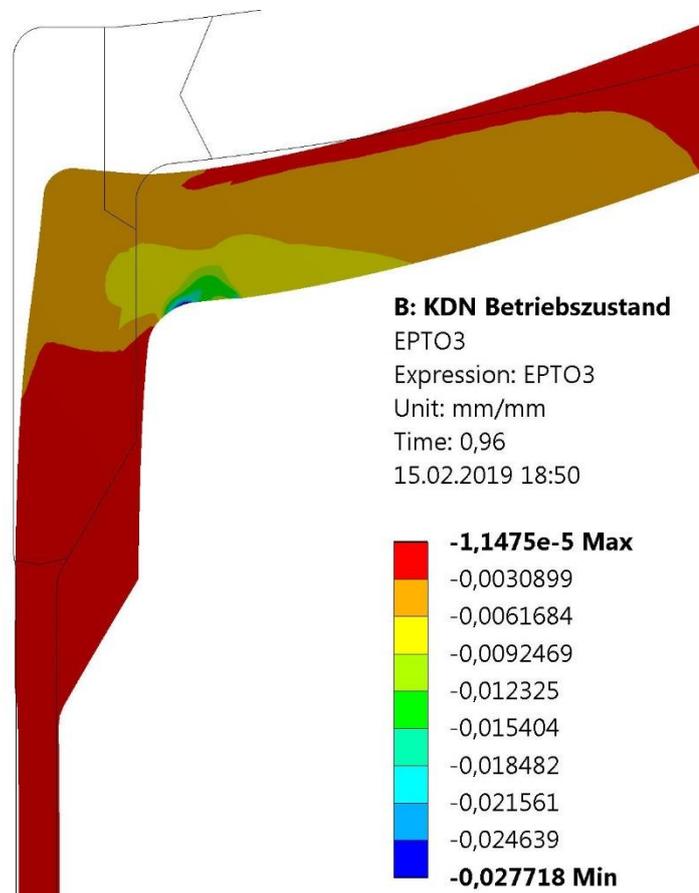


Abbildung 31 – Minimale Hauptstrukturdehnungen KDN Betriebslastfall

Aus den ermittelten Zwischenergebnissen konnten die Referenzspannungen nach Formel (2.6) berechnet werden (Ergebnisse siehe Tabelle 17). Für die Werkstoffkennwerte RM_d wurden erneut die Bemessungswerte des obigen Modells eingesetzt, weshalb abhängig vom Werkstoff andere Referenzspannungen resultierten.

Tabelle 17 – Referenzspannungen und die Ermittlung der zulässigen Standzeit im KDN nach AR 1

	10CrMo9-10	11CrMo9-10+QT	16Mo3	Schweißnaht
Referenzspannung σ_{ref} [MPa]	136,90	136,52	124,28	109,22
Max. Zeitstandfestigkeit f_{RtB} [MPa]	160,5	178,5	135	142,8
Lebensdauer bei max. Zeitstandfestigkeit t_B [h]	200.000	100.000	250.000	100.000
Zweithöchste Zeitstandfestigkeit f_{RtA} [MPa]	179	233,5	143,5	186,8
Lebensdauer bei zwth. Zeitstandfestigkeit t_A [h]	100.000	10.000	200.000	10.000
Zulässige Standzeit [h]	400.000	200.000	338.250	200.000

Als nächster Schritt war nun für jede Referenzspannung σ_{ref} und den zugehörigen Werkstoff die zulässige Standzeit Δt_{all} zu bestimmen (*all* ... allowable, eng. zulässig).

Für diese Arbeit erfolgte die Ermittlung der zulässigen Standzeit nach den Formeln in Kapitel 19 der EN 13445-3 „Auslegung im Zeitstandbereich“. Dort werden Formeln für die Berechnung der „zulässigen Zeit bis zum Eintreten des Schadensfalls“ [2] angeführt. Dabei legt die Norm sowohl Formeln für die Interpolation zwischen zwei gegebenen Lebensdauern fest als auch Formeln für die Extrapolation über die maximal gegebenen Lebensdauern hinaus. Als Werkstoffkennwerte wurden die Zeitstandfestigkeiten bei 475°C mit einem Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_R = 1$ verwendet.^[2]

Da alle Referenzspannungen geringere Werte annahmen als die maximalen Zeitstandfestigkeiten, die in den Werkstoffnormen angeführt sind (siehe Tabelle 17), kamen für diese Arbeit die Extrapolationsformeln zur Anwendung. Die Extrapolation war dabei bis zum doppelten Wert der maximalen Lebensdauer zulässig. Die in dieser Arbeit verwendeten Formeln sind mit den Formeln (4.4), (4.5), (4.6) und (4.7) gegeben.^[2]

$$\Delta t_{all} = \min \{t_{R,T_i,max}; t_{R,f_{Rt_i},ex}\} \quad (4.4)$$

$$t_{R,T_i,max} = 2 * t_B \quad (4.5)$$

$$t_{R,f_{Rt_i},ex} = t_A * \left(\frac{t_B}{t_A}\right)^{\gamma_R} \quad (4.6)$$

$$\gamma_R = \frac{\log(\sigma_{ref}) - \log(f_{Rt_A})}{\log(f_{Rt_B}) - \log(f_{Rt_A})} \quad (4.7)$$

Sind die zulässigen Standzeiten $\Delta t_{all}^{(k)}$ für alle Werkstoffe bekannt, können mit der Intervalldauer $\Delta t^{(k)}$ eines Belastungszyklus die gewichteten rechnerischen Standzeiten für diesen Belastungszyklus ermittelt werden. Dazu wird die Intervalldauer eines Belastungszyklus durch die zulässige Standzeit dividiert, wie es in Formel (2.8) gezeigt wurde. Für die gesamte Struktur ist dabei der Werkstoff mit der größten gewichteten rechnerischen Standzeit pro Belastungszyklus maßgeblich.

Während im allgemeinen Fall die Betrachtung aller Lastfälle mit Temperaturen im Zeitstandbereich erforderlich ist, war bei der hier betrachteten Fragestellung die Analyse des charakteristischen Betriebszyklus ausreichend. Innerhalb der Lebensdauer von 100.000 Stunden traten bei der Intervalldauer eines Betriebszyklus von 2000 Stunden genau 50 Betriebszyklen auf. Mit einer Summation über diese Zyklen konnte nach Formel (2.9) das gesamte Kriechermüdungsmaß D_c ermittelt werden. Dabei wurde diese Rechnung nur für die höchstbelasteten Werkstoffe durchgeführt, die die maßgebliche Kriechschädigung bestimmen (fett markiert in Tabelle 18).

Tabelle 18 – Ergebnisse des KDN nach AR 1 für den Betriebslastfall

	10CrMo9-10	11CrMo9-10+QT	16Mo3	Schweißnaht
Intervalldauer eines Betriebszyklus [h]	2000			
Zulässige Standzeit [h]	400.000	200.000	338.250	200.000
Gewichtete rechnerische Standzeit	0,005	0,01	0,006	0,01
Kriechermüdungsmaß D_c nach 50 Betriebszyklen	0,5			
Zulässigkeit? ($D_c \leq 1$)	zulässig			
Zulässige Zyklenzahl	100			

Der Kriechdehnnachweis nach Anwendungsregel 1 ergab somit für die Beispielgeometrie und einen charakteristischen Betriebszyklus gemäß Spezifikation eine zulässige Zyklenzahl von 100. Für eine Lebensdauer von 100.000 Stunden – oder 50 Betriebszyklen – summierte sich das Kriechermüdungsmaß D_c auf den Wert 0,5. Da dieser Wert gleichzeitig der akkumulierten gewichteten Standzeit entspricht und kleiner als Eins war, konnte nach Anwendungsregel 1 die verbindliche Regel des KDN als erfüllt betrachtet werden; die Struktur mit den Einwirkungen war **zulässig**.

4.2.2.2 Kriechdehnnachweis für den Einspritzlastfall

Im charakteristischen Betriebszyklus wurde spezifiziert, dass die konstanten Belastungen des Betriebslastfalls von den kurzfristigen Einwirkungen des Einspritzlastfalls unterbrochen werden. Der Kriechdehnnachweis für die konstante Kriechbelastung wurde schon in 4.2.2.1 geführt. Damit auch der Belastungszyklus mit Einspritzungen zulässig ist, musste nachgewiesen werden, dass die auftretende Kriechschädigung vernachlässigbar ist und es nicht zu Plastifizierungen kommt. Dieser Nachweis erfolgte mit dem Kriechdehnnachweis nach Anwendungsregel 2.

Da für den Einspritzlastfall insgesamt eine Dauer von 24 Stunden festgelegt wurde, war die Einschränkung erfüllt, dass die Kriechvorgänge vernachlässigbar seien. In der Norm wird davon ausgegangen, dass es innerhalb dieser kurzen Zeit zu keinen wesentlichen Spannungumlagerungen kommt, die erneut primäres Kriechen begünstigen und damit auf lange Sicht zu nennenswerten Materialschädigungen führen können.

Für die Überprüfung auf Plastifizierung wurde ein Berechnungsmodell verwendet, welches mit folgenden Randbedingungen arbeitete:

- Linearelastisches Werkstoffgesetz
- Eigenspannungszustand entsprechend dem Spannungszustand bei der Ermittlung der (dehnungsbegrenzten) Grenzwirkung A_u (Details im folgenden Absatz)
- Alle Teilsicherheitsbeiwerte gleich 1

Der Eigenspannungszustand für das Berechnungsmodell $\sigma_{ij\ res}$ wurde mit folgender Vorgehensweise bestimmt: Der Spannungszustand $\sigma_{ij\ limit}$ bei der Ermittlung der Grenzwirkung A_u im KDN nach Anwendungsregel 1 wurde so skaliert, dass der Druck dem Druck $p = 80\ bar$ im Betriebslastfall entsprach. Anschließend wurden die elastischen Spannungen, die aufgrund der Druckbelastung bei der entsprechenden Temperatur wirkten, subtrahiert, sodass das Resultat den Eigenspannungszustand nach Abbildung 32 darstellte.

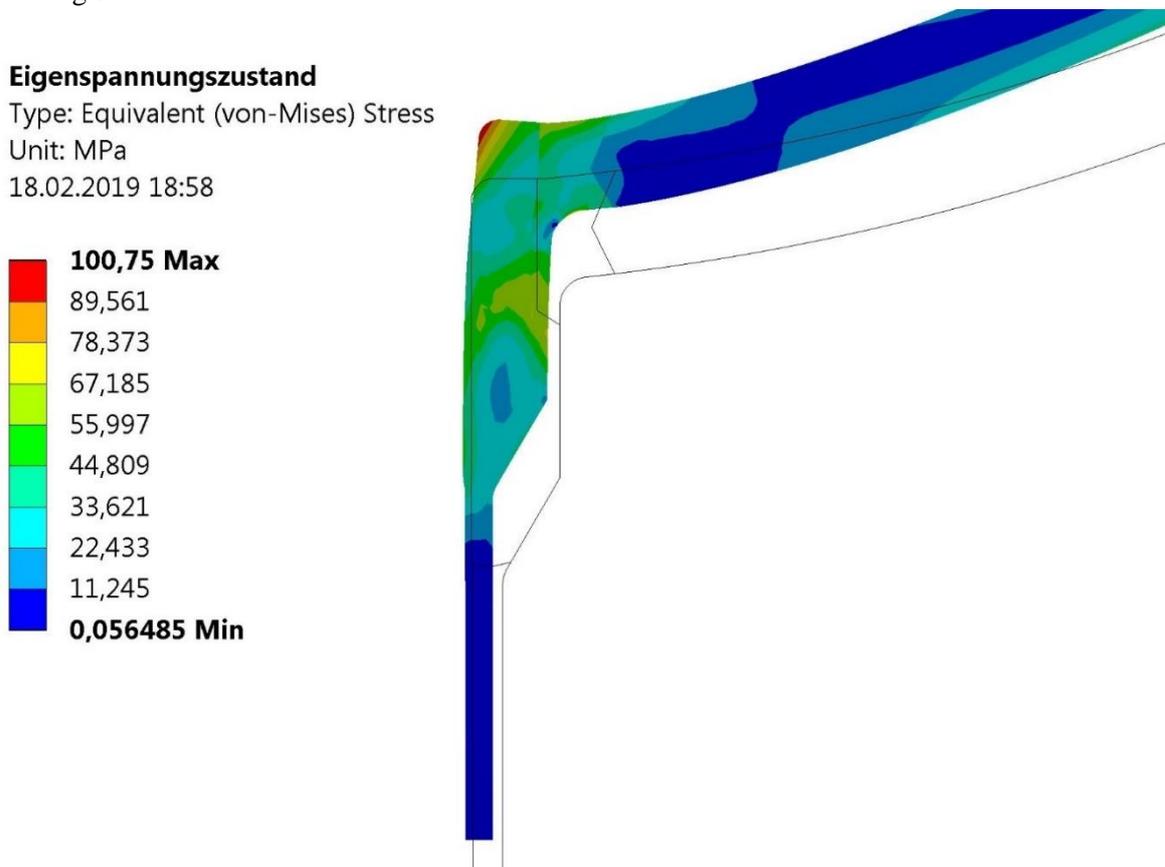


Abbildung 32 – Eigenspannungszustand nach Einspritzungen im entlasteten Zustand

Um die thermischen Spannungen im Einspritzlastfall zu berücksichtigen, wurde in einer transienten Analyse die Temperaturverteilung zu verschiedenen Zeitpunkten ermittelt (siehe Abbildung 33 sowie im Anhang). Darauf aufbauend erfolgte eine Berechnung des linearelastischen Spannungsfeldes $\sigma_{ij\ elastic}$ mit einem linearelastischen Werkstoffmodell. Als Einwirkungen wurden dabei zusätzlich zur Temperaturverteilung die Werte des Einspritzlastfalls für den Druck und die Längsspannungen auf das Modell aufgegeben.

Es stellte sich heraus, dass direkt nach dem plötzlichen Thermoschock – in der ersten Sekunde der Simulation – die Vergleichsspannungen im linearelastischen Modell die höchsten Werte erreichten (siehe Abbildung 34). Durch eine Überlagerung des Eigenspannungsfelds mit dem linearelastischen Spannungsfeld zu diesem Zeitpunkt wurde der kritische Spannungszustand bestimmt. Die Vorgehensweise erfolgte dabei nach den Formeln (2.10) und (2.11), wie es im theoretischen Teil beschrieben wurde.

Die Analyse des kritischen Spannungszustands zeigte erhöhte Vergleichsspannungen in der Verstärkung des Stutzens, da es dort zu einer Überlagerung zwischen Eigenspannungszustand, Spannungen aufgrund des Innendrucks und thermischen Spannungen kam. Besonders die thermischen Spannungen nehmen aufgrund des Thermoschocks hohe Werte an. In Abbildung 35 sind die Vergleichsspannungen nach Mises für diese Überlagerung dargestellt.

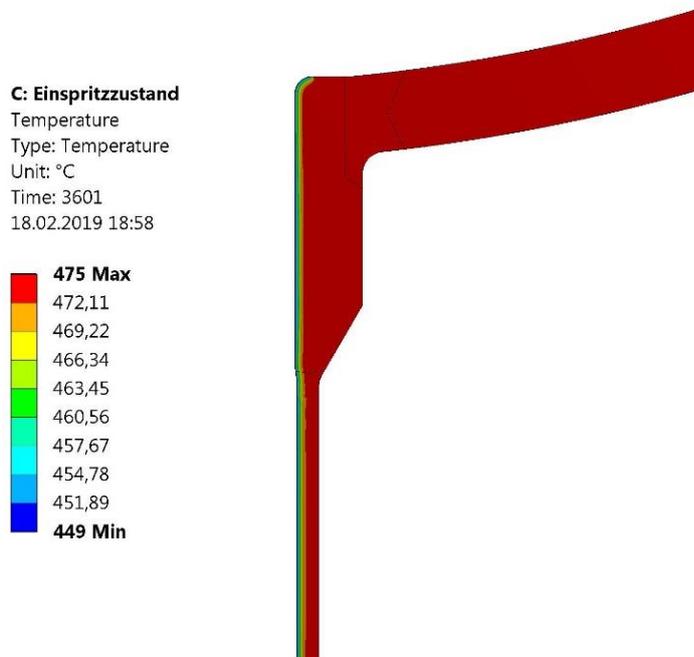


Abbildung 33 – Temperaturverteilung im Einspritzlastfall (nach einer Sekunde)

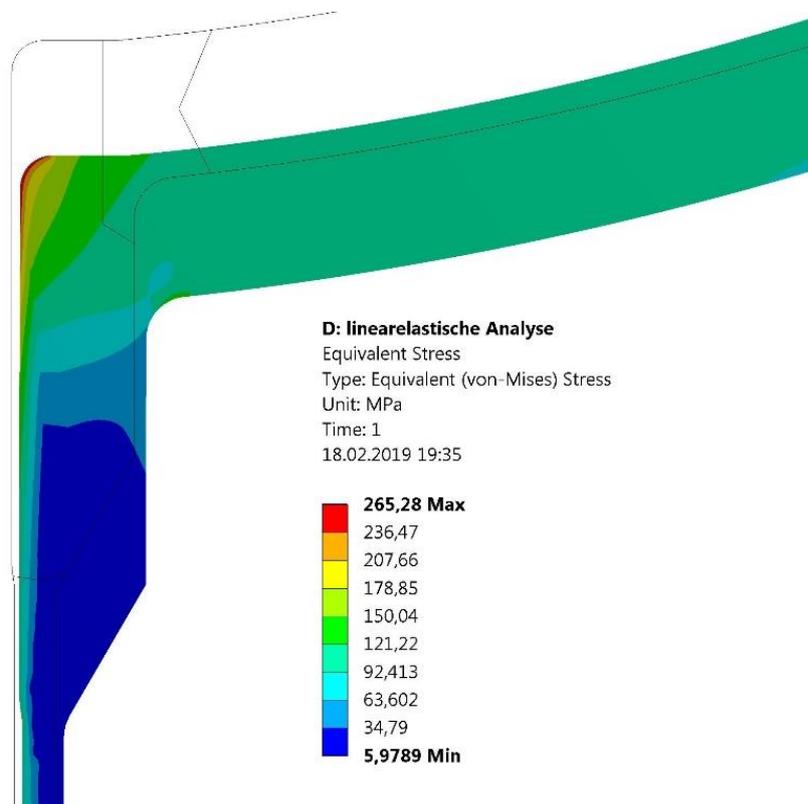


Abbildung 34 – linearelastischer Spannungszustand im Einspritzlastfall für den KDN

Spannungsüberlagerung Einspritzung

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

18.02.2019 18:59

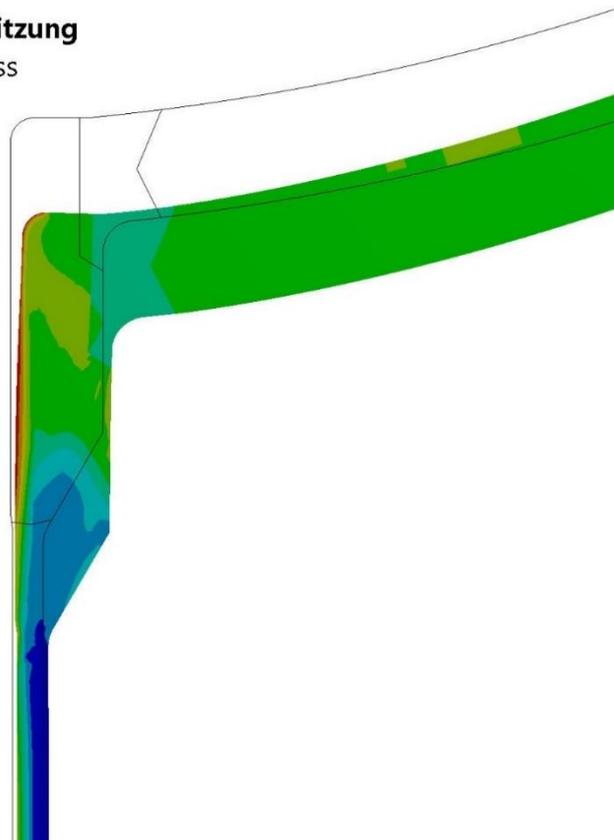
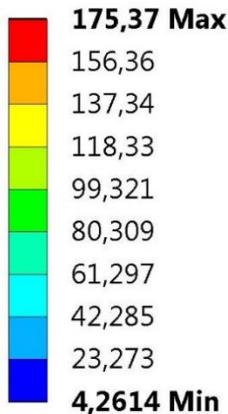


Abbildung 35 – Vergleichsspannung nach Mises für KDN nach AR 2 im Einspritzlastfall

In der Norm ist festgelegt, dass die Maximalwerte der eben ermittelten Vergleichsspannungen nach Mises zur Beurteilung der Zulässigkeit mit Bemessungswerten der Kurzzeitfestigkeit verglichen werden müssen. Für die hier verwendeten ferritischen Werkstoffen erfolgte der Vergleich mit den 0,2%-Dehngrenzen bei der Bemessungstemperatur $R_{p0,2/475}$, welche in Tabelle 19 angeführt sind. Für Zulässigkeit durften die maximalen Vergleichsspannungen in keinem Ort und zu keiner Zeit die Bemessungswerte überschreiten.^[2]

Tabelle 19 – Bemessungswerte der Kurzzeitfestigkeitswerte im KDN für den Einspritzlastfall

(in MPa)	10CrMo9-10	11CrMo9-10+QT	16Mo3	Schweißnaht
Bemessungswerte Kurzzeitfestigkeit (475°C)	179	248	148	179
Überschreitung des Bemessungswertes	Nein	Nein	Nein	Nein
Plastifizierungen	keine			

Da in den verschiedenen Strukturelementen die jeweiligen Bemessungswerte nicht überschritten wurden, war die Bedingung erfüllt, dass es sich um Einwirkungszyklen ohne Plastifizierung handelt. Eine gute Visualisierung des Ergebnisses wird ermöglicht, wenn die lokale Vergleichsspannung nach Mises und der Bemessungswert ins Verhältnis gesetzt werden. Abbildung 36 zeigt eine solche Darstellung, in der rote Bereiche unzulässige Spannungsüberhöhungen darstellen würden. Da das kleinste Verhältnis größer als Eins ist, existieren keine kritischen Bereiche.

Für die Zulässigkeit der Struktur muss die verbindliche Regel für den KDN nach Anwendungsregel 2 erfüllt sein. Diese besagt, dass Kriech- und Kriechermüdungsnachweis erfüllt sein müssen. In dieser Arbeit wurde davon ausgegangen, dass Ermüdung keine wesentliche Schädigung verursacht. Unter diesen Voraussetzungen war der Kriechdehnnachweis erfüllt; die Einwirkungen waren **zulässig**.^[2]

Im Laufe der Simulationen stellte sich heraus, dass dieser Nachweis lastbestimmend war. Insbesondere im Stutzenrohr mit geringen Festigkeitswerten bei hohen Temperaturen kam es bei vielen Einspritztemperaturen zu Plastifizierungen.

Im Vergleich zur stationären Betrachtung, bei der eine Einspritztemperatur von 415°C alle Bedingungen erfüllte, musste die Temperatur für die transiente Betrachtung auf die erwähnten 449°C angehoben werden.

Am Übergang Verstärkung – Zylinderschale kam es nicht zu kritischen Spannungen, sodass mit überschaubarem Engineering-Aufwand im Bereich der Rohrverbindung deutliche Verbesserungen zu erzielen wären.

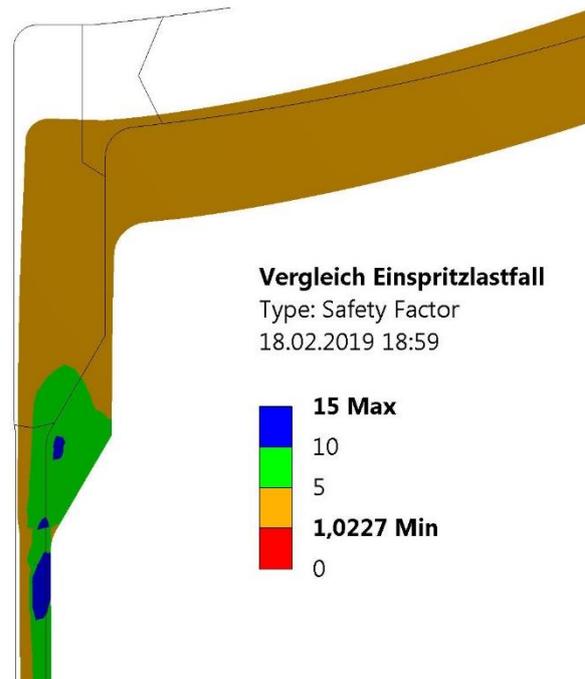


Abbildung 36 – Kriterium für Plastifizierung KDN Einspritzlastfall

4.2.2.3 Kriechdehnungsnachweis für den Grenzlastfall

Da im Betriebszyklus neben dem Einspritzzyklus auch der Grenzlastfall das stationäre Kriechen unterbricht, musste diese Störung ebenso auf ihre Zulässigkeit untersucht werden. Analog zum Einspritzlastfall musste überprüft werden, ob für den Einwirkungszyklus die Kriechvorgänge vernachlässigbar seien und keine Plastifizierungen auftreten. Der Nachweis erfolgte nach Anwendungsregel 2.

Nach der Spezifikation im charakteristischen Betriebszyklus befand sich der Behälter in diesem Lastfall weiterhin im Kriechbereich und die gesamte Betriebsdauer war auf 12 Stunden beschränkt. Damit war das Kriterium erfüllt, dass es sich um Einwirkungszyklen mit vernachlässigbaren Kriechvorgängen handelt, da der Betrieb weniger als 100 Stunden im Zeitstandbereich erfolgte.

Die Überprüfung, ob es sich um Einwirkungszyklen ohne Plastifizierung handelt, erfolgte wieder an einem Berechnungsmodell. Dieses Modell verwendete die folgenden Einschränkungen:

- Linearelastisches Werkstoffgesetz
- Eigenspannungszustand entsprechend dem Spannungszustand bei der (dehnungsbegrenzten) Grenzwirkung A_u (analog zur Berechnung für den Einspritzlastfall; siehe Kapitel 4.2.2.2 bzw. Abbildung 32)
- Alle Teilsicherheitsbeiwerte gleich 1

Ziel war die Bestimmung der maximalen Absolutwerte der Vergleichsspannung nach Mises. Dazu wurden als Einwirkungen die Werte des Grenzlastfall festgelegt: ein Druck von 85 bar und eine Temperatur von konstanten 480°C.

Die Grenzwerte der maximalen von Mises'schen Vergleichsspannung waren gemäß Norm die Bemessungswerte der Kurzzeitfestigkeitskennwerte $R_{p0.2/480}$, da hier ausschließlich ferritische Werkstoffe betrachtet wurden. Tabelle 20 zeigt die genauen Zahlenwerte.

Die Überlagerung des linearelastischen Spannungsfeldes mit dem Eigenspannungsfeld zeigt, dass es sich um einen Einwirkungszyklus ohne Plastifizierung handelt, da die Bemessungswerte der Kurzzeitfestigkeit nicht überschritten werden. Die Sicherheiten sind sogar relativ hoch (siehe Abbildung 38).

Tabelle 20 – Ergebnisse des KDN nach Anwendungsregel 2 im Grenzlastfall

(in MPa)	10CrMo9-10	11CrMo9-10+QT	16Mo3	Schweißnaht
Bemessungswerte Kurzzeitfestigkeit (480°C)	177,8	246,2	147,6	177,8
Überschreitung des Bemessungswertes	Nein	Nein	Nein	Nein
Plastifizierungen?	keine			

Abbildung 37 zeigt die Vergleichsspannungen nach Mises im Grenzlastfall; dabei wurden keine allzu hohen Werte erreicht. Da für den Nachweis davon ausgegangen wurde, dass Ermüdung kein wesentlicher Schadensmechanismus ist, galt der KDN nach Anwendungsregel 2 als erfüllt. Die Struktur war bei den gegebenen Belastungen **zulässig**.

Spannungsüberlagerung Grenzlastfall

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

15.02.2019 19:56

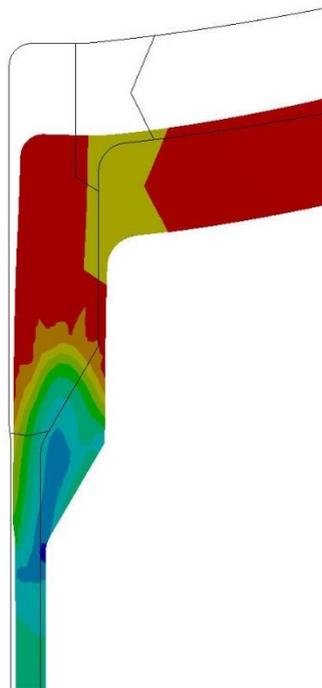
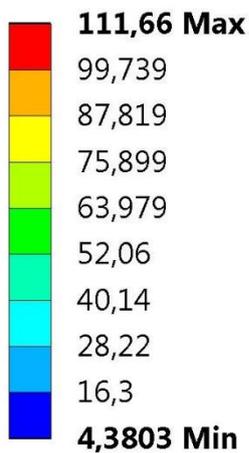


Abbildung 37 – Vergleichsspannungen nach Mises für KDN Grenzlastfall

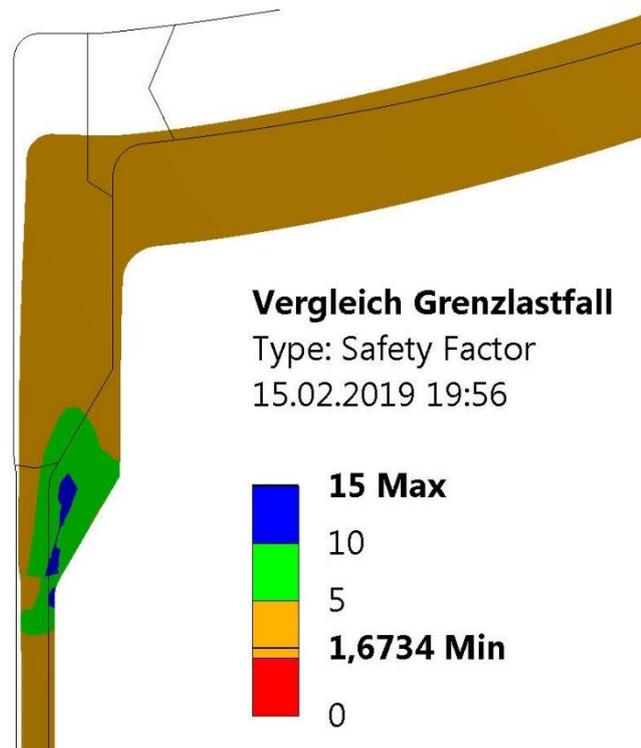


Abbildung 38 – Kriterium für Plastifizierung KDN Grenzlastfall

4.2.2.4 Kriechdehnungsnachweis für den Entlastungslastfall

Da im KDN nach Anwendungsregel 1 die auftretenden Kriechbelastungen zu einem zusammenhängenden Kriechlastfall addiert wurden, musste auch für die Unterbrechungen durch den Entlastungslastfall die Zulässigkeit im KDN nach Anwendungsregel 2 gezeigt werden. Dabei mussten erneut die Einschränkungen bezüglich Kriechvorgängen und Plastifizierung überprüft werden.

Die Voraussetzung, dass es sich um Einwirkungszyklen ohne wesentliche Kriechvorgänge handelt, ist aufgrund der Spezifikation erfüllt. Im Entlastungslastfall bei Umgebungstemperatur tritt kein Kriechen auf. Für die Übergänge wurde jeweils mit einer Dauer von 1 Stunde gerechnet, womit die Einschränkung von maximal 100 Stunden eingehalten wird.

Für die Überprüfung auf Plastifizierungen war kein eigenes linearelastisches Modell notwendig. Da im Entlastungslastfall keine externen Belastungen auf die Struktur wirkten, konnte der Nachweis einfach durch einen Vergleich des ermittelten Eigenspannungszustands mit den Plastizitätsgrenzen bei Raumtemperatur durchgeführt werden. Der Eigenspannungszustand wurde wieder aus der skalierten Grenzwirkung A_u ermittelt, wie es detailliert in Kapitel 4.2.2.2 beschrieben ist. Die Bemessungswerte und die Ergebnisse des Vergleichs sind in Tabelle 21 angeführt.

Tabelle 21 – Ergebnisse des KDN nach Anwendungsregel 2 für den Entlastungslastfall

(in MPa)	10CrMo9-10	11CrMo9-10+QT	16Mo3	Schweißnaht
Bemessungswerte Kurzzeitfestigkeit (20°C)	290	355	280	290
Überschreitung des Bemessungswertes	Nein	Nein	Nein	Nein
Plastifizierungen?	keine			

Eigenspannungszustand

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

15.02.2019 19:30

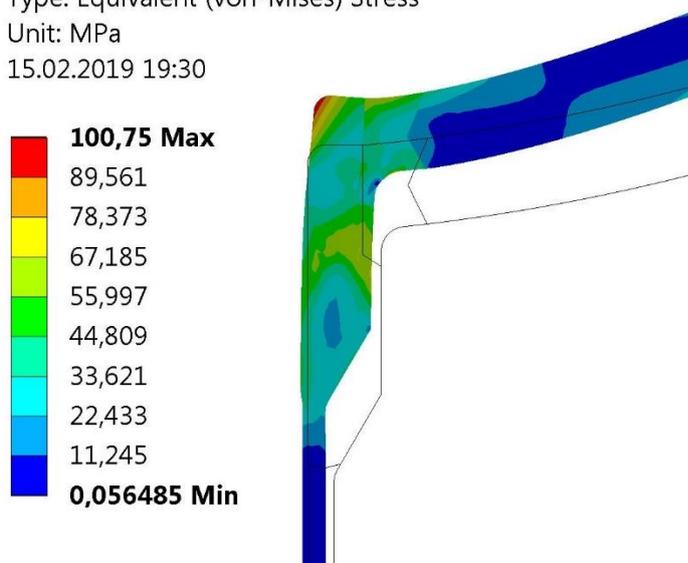


Abbildung 39 – Vergleichsspannungen Mises für KDN Entlastungslastfall

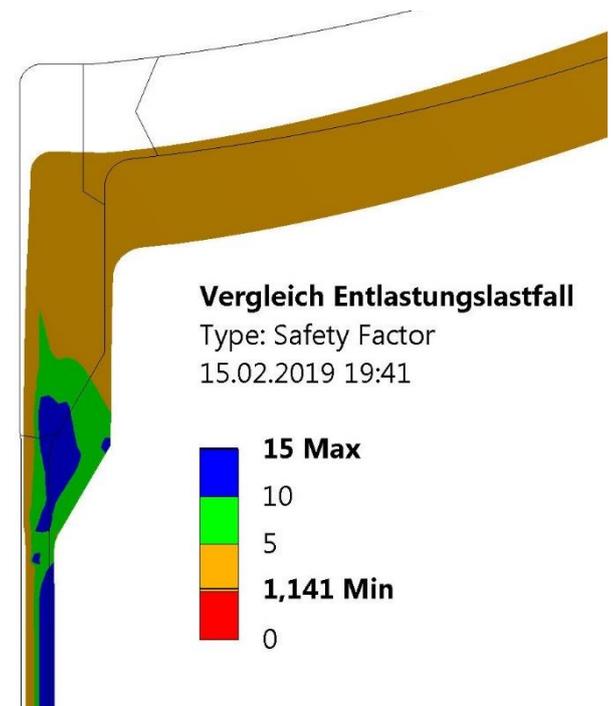


Abbildung 40 – Kriterium für Plastifizierung KDN Entlastungslastfall

5 Simulation des Kriechverhaltens mit dem Norton-Gesetz

Zum Vergleich mit den Ergebnissen der Nachweise sollte eine Simulation des Kriechverhaltens nach dem Norton-Bailey-Potenzgesetz durchgeführt werden. Als relevante Formulierung des Werkstoffgesetzes wurde dabei die Schreibweise nach Formel (2.4) verwendet. Zusätzlich wurde davon ausgegangen, dass das Kriechverhalten zeitunabhängig ist und der Parameter m' folglich gleich Null gesetzt werden kann.

5.1 Werkstoffparameter und Berechnungsmodell

Die Beschreibung der verwendeten Werkstoffe nach dem Norton-Bailey-Potenzgesetz setzte voraus, dass gewisse Werkstoffparameter für dieses Kriechgesetz bekannt sind: der Nortonkoeffizient n' sowie der Koeffizient A' . Zusätzlich spielte die Referenzspannung σ_0 für das Nortongesetz eine Rolle.

Da es für die verwendeten Werkstoffe keine tabellierten Werte der erwähnten Werkstoffparameter gab, wurde versucht, diese Werkstoffkennwerte aus anderen veröffentlichten Daten zu approximieren. Eine naheliegende Möglichkeit dazu ist die Verwendung der Zeitdehngrenzen, für welche häufig Werte in den Werkstoffnormen aufgelistet werden (zumeist im Abstand von je 10°C). Für die dort angeführten Spannungen lassen sich aus der Gesamtdehnung und der Belastungsdauer Dehngeschwindigkeiten ermitteln. Dabei gilt die implizite Annahme, dass die Kriechrate im Bereich sekundären Kriechens konstant bleibt.^[12, 14]

Ein mittlerer Norton-Koeffizient n' zwischen zwei gegebenen Belastungsdauern konnte für einen festgelegten Werkstoff nach Formel (5.1) ermittelt werden. Die notwendigen Dehnraten wurden dazu nach Formel (5.2) bestimmt, wobei aus praktischen Gründen in Sekunden umgerechnet wurde. Komplizierter wurde die Sache für den Parameter A' , da dieser von der Bezugsspannung σ_0 abhängig war. Mit einem Trick konnte jedoch auch ohne Festlegung einer bestimmte Bezugsspannung ein Kriechgesetz formuliert werden: Die Parameter A' und σ_0 wurden mit dem Norton-Koeffizienten zu einem einzigen Parameter zusammengefasst, der über Formel (5.3) definiert werden konnte (Analoges gilt für 10.000 Stunden). Als Resultat wurde ein Kriechgesetz nach Formel (5.4) ermittelt.

$$n' = \frac{\frac{\log \dot{\epsilon}_{10.000}}{\log \dot{\epsilon}_{100.000}}}{\frac{\log (R_{p1.0/475/10.000})}{\log (R_{p1.0/475/100.000})}} \quad (5.1)$$

$$\dot{\epsilon}_{100.000} = \frac{1\% \text{ Gesamtdehnung}}{100.000 \text{ h Belastungsdauer}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \approx 2,78 * 10^{-9} \frac{1}{\text{s}} \quad (5.2)$$

$$K = \frac{A'}{(\sigma_0)^{n'}} = \frac{\dot{\epsilon}_{100.000}}{(R_{p1.0/475/100.000})^{n'}} \quad (5.3)$$

$$\dot{\epsilon} = K * \sigma^{n'} \quad (5.4)$$

Soweit zur Theorie – für die praktische Umsetzung waren noch Zeitdehngrenzen notwendig. Wie schon bei den Nachweisen trat hier das Problem auf, dass in den Werkstoffnormen gewisser Fertigungsverfahren keine Zeitdehngrenzen enthalten waren.

Für das Kesselblech wurden die 1%-Zeitdehngrenzen aus der Norm EN 10028-2 direkt verwendet. Bei Rohrwerkstoffen trat leider das oben beschriebene Problem auf; als Alternative wurde daher die Norm für Schmiedestücke EN 10222-2 herangezogen. Für die verwendeten Rohrwerkstoffe waren dort

1%-Zeitdehngrenzen angegeben. Eine Sonderbehandlung kam wieder den Schweißnähten zu, die als Material geringerer Festigkeit modelliert wurden. Als numerische Werte wurden für die Schweißnähte 80% der Werte des schwächeren angrenzenden Grundwerkstoffes angenommen. Berechnete Ergebnisse werden in Tabelle 22 aufgelistet.^[12, 14, 40]

Tabelle 22 – Bestimmung der Parameter für das Norton-Kriechgesetz im Betriebslastfall^[12, 40]

	10CrMo9-10	11CrMo9-10+QT	16Mo3	Schweißnaht
$R_{p1.0/475/10.000}$ [MPa]	190	190	174	152
$R_{p1.0/475/100.000}$ [MPa]	137,5	137,5	116,5	110
Norm	EN 10028-2	EN 10222-2	EN 10222-2	-
Norton-Parameter n'	7,11993	7,11993	5,73976	7,11993
Koeffizient $K = \frac{A'}{(\sigma_0)^{n'}}$	$1,6563 * 10^{-26}$	$1,6563 * 10^{-26}$	$3,8325 * 10^{-23}$	$8,1121 * 10^{-26}$

Die ermittelten Werkstoffparameter wurden verwendet, um für die verwendeten Werkstoffe Werkstoffgesetze für Kriechen vorzugeben. Falls für die Temperaturen keine Zeitdehngrenzen in den Werkstoffnormen gegeben waren, wurde vor der Berechnung zwischen den zwei angrenzenden Werten linear interpoliert.

Als sonstige Werkstoffkennwerte waren für die Simulation die mechanischen Werkstoffkennwerte Elastizitätsmodul und Wärmeausdehnungskoeffizient sowie der thermische Werkstoffkennwert Wärmeleitfähigkeit relevant. Diese wurden nach Anhang O der EN 13445-3 bestimmt, wobei die genauen Tabellen im Anhang angeführt sind. Alle Werkstoffkennwerte wurden dabei als isotrop angenommen. Die Wärmeleitfähigkeit unterschied sich je nach Werkstoffgruppe.^[2]

Für das Berechnungsmodell der Simulation wurden dieselbe Geometrie und dieselbe Vernetzung wie bei den Nachweisen verwendet. Die übrigen Randbedingungen waren:

- linearelastisch – idealplastisches Werkstoffgesetz
- von Mises'sche Fließbedingung und assoziiertes Fließgesetz
- Theorie 1. Ordnung
- Plastische Fließgrenze bei $R_{p0,2/T}$ (temperaturabhängig)
- Eigenspannungsfreier Ausgangszustand
- Kriechen nach dem Norton-Bailey-Potenzgesetz

Tabelle 23 – Fließgrenzen für die Simulationen nach Norton

(in MPa)	10CrMo9-10	11CrMo9-10+QT	16Mo3	Schweißnaht
Fließgrenze $R_{p0,2/475^\circ C}$	179	248	148	179
Fließgrenze $R_{p0,2/480^\circ C}$	177,8	246,2	147,6	177,8

5.2 Stationäres Kriechen

Die Betrachtung von stationärem Kriechen ermöglicht eine einfache und schnelle Analyse des Kriechlastfalls, da auch lange Lebensdauern mit geringem Aufwand simuliert werden können. Wurde für Unterbrechungen des Kriechlastfalls rein elastisches Verhalten angenommen, so kam es auch zu einer guten Übereinstimmung mit dem Verhalten bei Einspritzungen. In der Simulation wurden die Belastungen dafür für die gesamte Dauer des Kriechlastfalls konstant gehalten. Zum Abschluss erfolgte eine Entlastung, um die auftretenden Verformungen und Dehnungen bestimmen zu können.

Die Simulation erfolgte für dieses Beispiel mit Belastungen wie im Betriebslastfall für die gesamte Lebensdauer von 100.000 Stunden, sodass das Ausmaß der Kriechdehnung bei hauptsächlich sekundärem Kriechen während der Lebensdauer ermittelt werden konnte. Als Einwirkungen auf das Modell wurden eine einheitliche Temperatur von 475°C, ein Druck von 8 MPa sowie eine zugehörige Längsspannung von -20,06 MPa festgelegt.

Für eine Struktur unter konstanter Belastung im Zeitstandbereich ergab sich eine Spannungsverteilung mit anfänglich hohen lokalen Spannungen (siehe Abbildung 41), bei der sich im Laufe der Zeit ein gleichmäßigerer Spannungszustand einstellte (siehe Abbildung 42). Diese Charakteristik resultierte aus dem Kriechgesetz, das bei höheren Spannungen zu höheren Dehngeschwindigkeiten führt. Das Ergebnis der Simulation eines stationären Kriechlastfalls zeigte genau diese Entwicklung; die Änderung der Spannungszustände ließ sich bei einem Vergleich leicht feststellen.

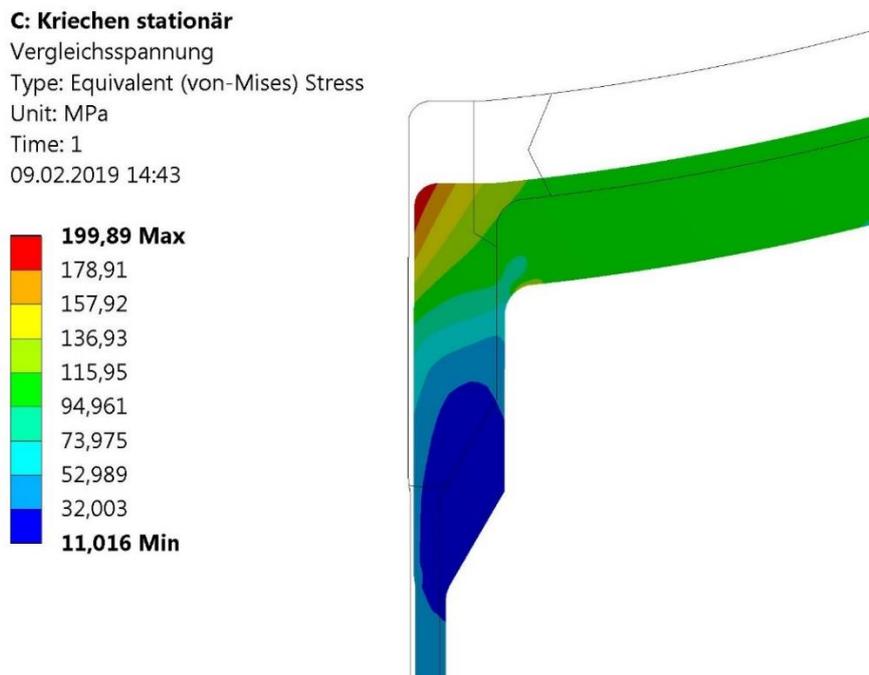


Abbildung 41 – Vergleichsspannungen nach Mises bei erstmaliger Belastung



Abbildung 42 – Vergleichsspannungen nach Mises bei stationärer Kriechsimulation (belastet nach 100.000.Stunden)

Die Betrachtung der Dehnungen im stationären Kriechlastfall zeigte, dass für die festgelegten Belastungen die akkumulierten Kriechdehnungen nicht ins Gewicht fielen. Die maximalen Absolutwerte der Hauptstrukturdehnungen blieben nach 100.000 Stunden im Zeitstandbereich weit unter einem Wert von 1% Dehnung (siehe auch Abbildung 43).

Eine interessante Beobachtung lieferte die Betrachtung des Punktes mit den maximalen Kriechdehnungen. Während innerhalb der ersten 25.000 Stunden die maximale Kriechdehnung an der Innenkante des Stutzen auftrat, verlagerte sich im Anschluss der höchstbelastete Punkt nach außen in die Rundung der Schweißnaht. Als Ursache wurde eine Veränderung des Spannungszustandes identifiziert.

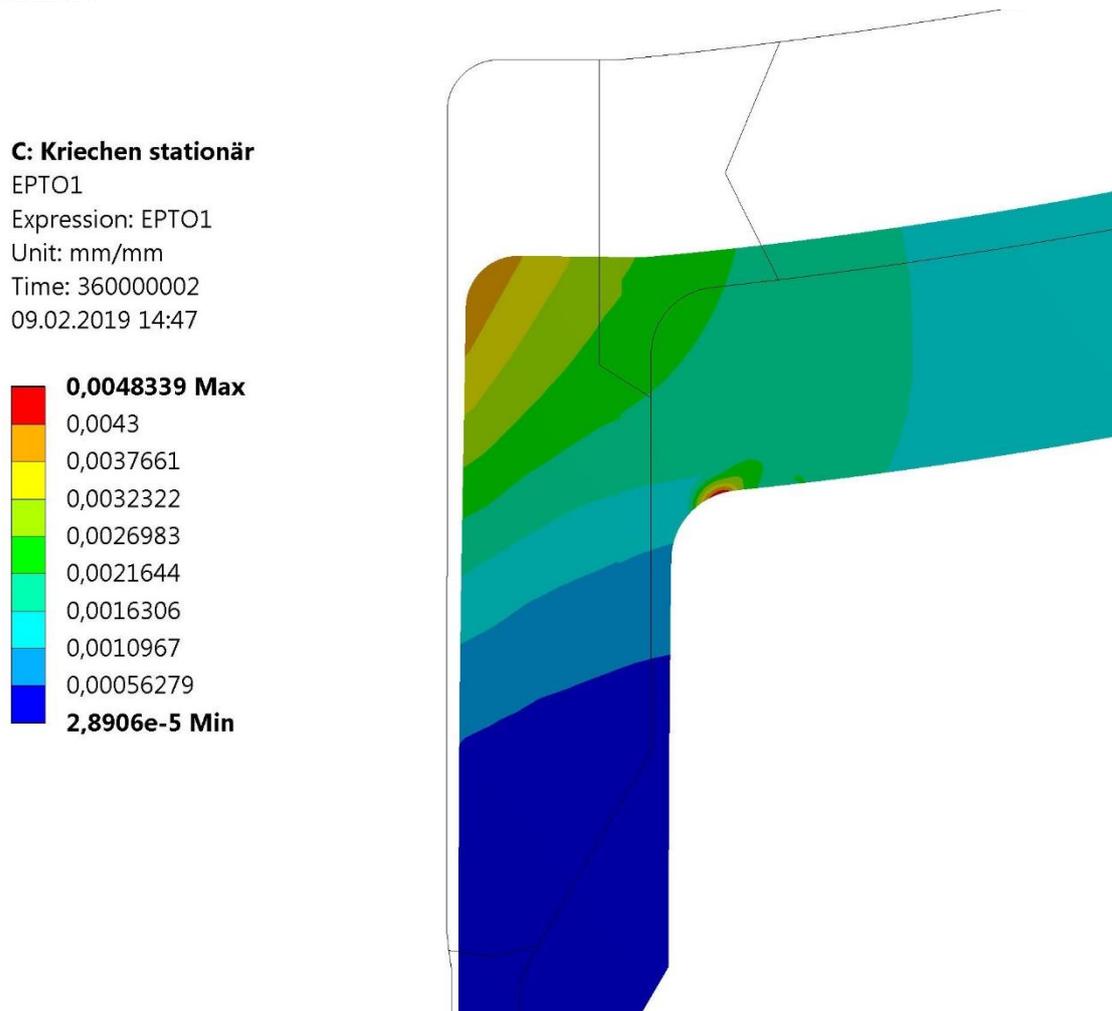


Abbildung 43 – Maximale Hauptstrukturdehnungen bei stationärer Kriechsimulation (belastet nach 100.000 Stunden)

5.3 Kriechen mit Einspritzungen

Eine genauere Abbildung des realen Verhaltens konnte erfolgen, indem für die Simulation mit dem Norton-Bailey-Potenzgesetz auch die spezifizierten Einwirkungsverläufe berücksichtigt wurden. Dazu wurden in dem Modell die Einspritzungen abgebildet, indem nach einem schnellen Übergang für 24 Stunden Kriechen mit der stationären Temperaturverteilung im Einspritzlastfall erfolgte. Mit einer Kriechdauer von 12 Stunden wurde auch ein Auftreten des Grenzlastfalls berücksichtigt.

Nachteilig für diese Simulation war ein deutlich höherer Konfigurationsaufwand, da eine exakte Spezifizierung der Lastfälle mit den zugehörigen Zeitschritten wesentlich war. Mit der zunehmenden Komplexität des Modells kam es natürlich auch zu einem Anstieg des Rechenaufwands. Da die schnellen Übergänge ohne (nichtlineare) Kriechberechnung erfolgten, blieb die gesamte Rechendauer in einem vernünftigen Bereich.

Nachdem bei den betrachteten Lastfällen die Struktur unterschiedliche Temperaturen aufwies, bestand für die Kriechsimulation die Notwendigkeit, diese Temperaturwechsel zu berücksichtigen. Für diese Arbeit wurde im Einspritzlastfall der konservative Ansatz gewählt, die gesamte Struktur mit dem Kriechgesetz bei 475°C zu rechnen. Da es bei höheren Temperaturen üblicherweise zu höheren Dehnungen kommt, wird diese Annahme als gerechtfertigt gesehen. Anders wurde beim Grenzlastfall mit einer Temperatur von 480°C vorgegangen, für den explizite Nortonparameter bestimmt wurden. Die Ermittlung der Koeffizienten erfolgte analog zu Kapitel 5.1; die Zahlenwerte sind im Anhang zu finden.

Insgesamt erfolgte eine Simulation von 3 charakteristischen Betriebszyklen inklusive der 9 auftretenden Einspritzungen, sodass eine Betriebszeit von 6.000 Stunden abgebildet wurde. Damit konnte das anfängliche Verhalten der Struktur analysiert werden und es standen ausreichend Daten zur Verfügung, um umfangreiche Extrapolationen durchzuführen.

Eine Betrachtung der Vergleichsspannungen nach Mises (siehe Abbildung 44) ergab, dass die maximalen Vergleichsspannungen im Kriechlastfall für den Lastfall mit Einspritzungen geringere Werte annahmen als für den stationären Lastfall. Da es nicht zu einem Auftreten von Plastifizierungen kam, wurden als Ursache die Kriechdehnungen identifiziert, die bei den hohen thermischen Spannungen im Einspritzvorgang auftraten. Durch das beobachtete primäre Kriechen kam es zu einer Änderung des Spannungszustandes, sodass die Spannungsspitzen im Betriebslastfall geringere Absolutwerte hatten.

In den ersten beiden Betriebszyklen kam es in der Folge zu einer Annäherung der maximalen Spannungen in den beiden Lastfällen. Dieses Verhalten entsprach durchaus den Erwartungen, da bei hohen Spannungen die Kriechdehnungen größere Werte annehmen (und vice versa). Im dritten Betriebszyklus endete diese Annäherung und die Differenz der maximalen Spannungen blieb danach konstant, wenn auch betragsmäßig gering ($\Delta = 1,2 \text{ MPa}$). Das ist Hinweis darauf, dass sich im Lastfall mit Einspritzungen ein ähnlicher Spannungszustand wie im stationären Lastfall einstellt.

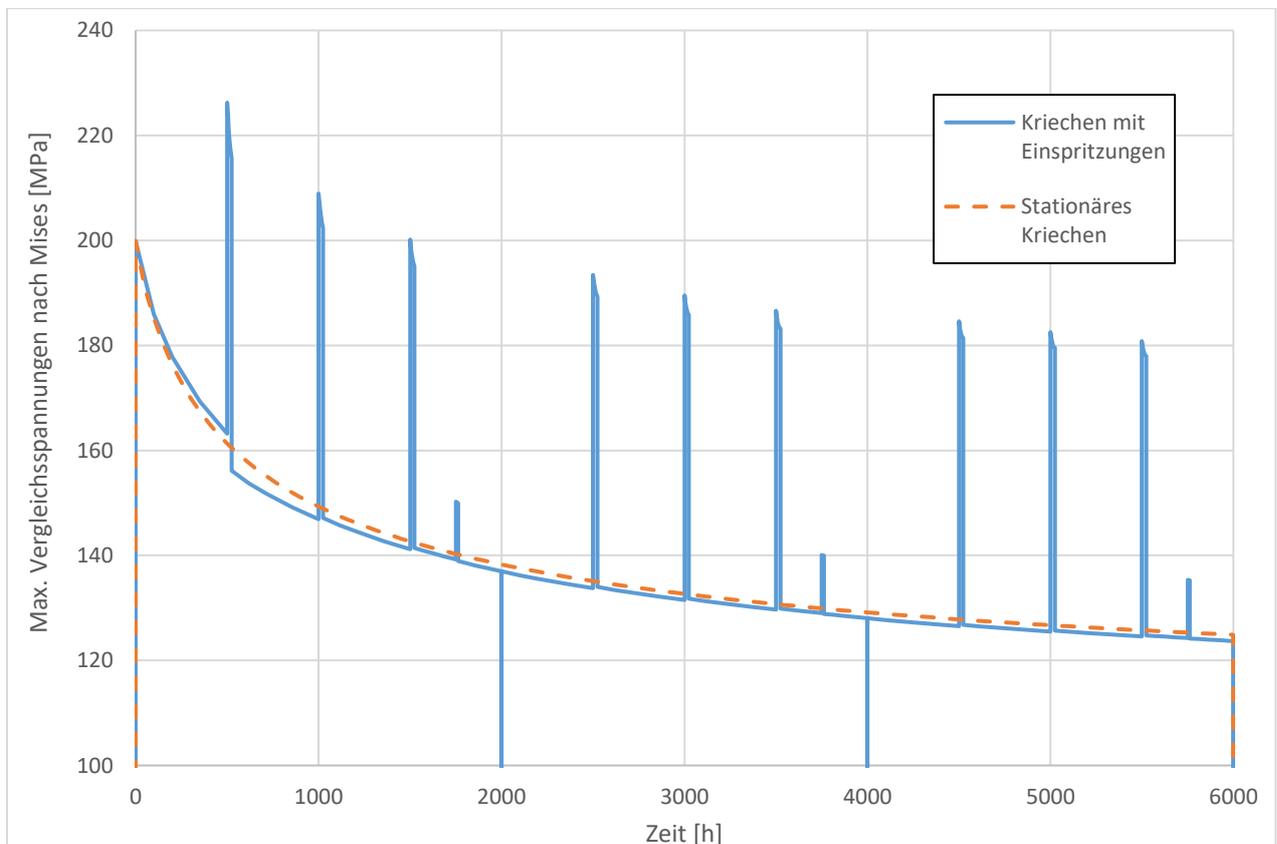


Abbildung 44 – Maximale Vergleichsspannungen nach Mises in den Simulationen

Diese Beobachtung konnte mit der Betrachtung der Dehnungen überprüft werden. Wurden die maximalen Hauptstrukturdehnungen zwischen den beiden Lastfällen verglichen, so zeigte sich eine langsam wachsende Abweichung. Da die maximalen Spannungen im Lastfall mit Einspritzungen geringer waren, war diese Entwicklung eine Folge der Kriechdehnungen während des Einspritzvorganges. Die berechneten Kurven sind in Abbildung 45 dargestellt. Bei den minimalen Hauptstrukturdehnungen zeigte sich ein ähnlicher Effekt, allerdings traten dort keine Peaks aufgrund der Einspritzung auf.

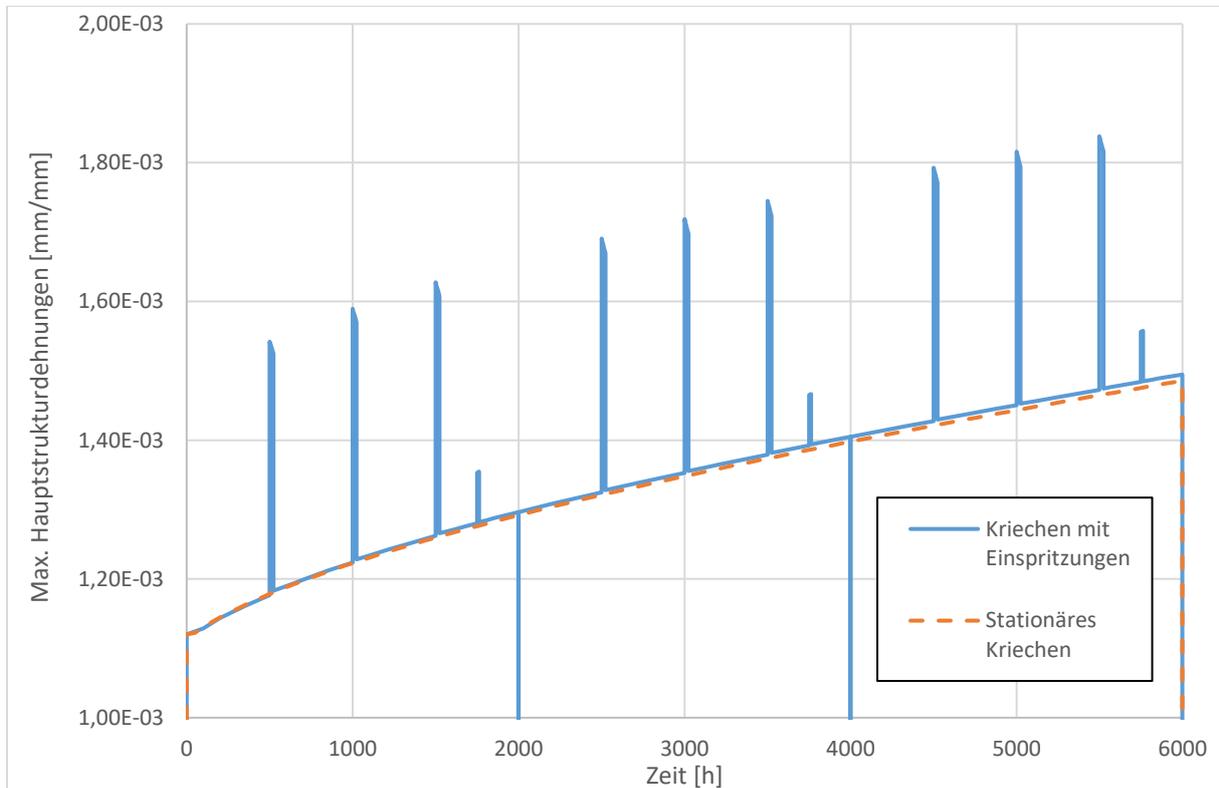


Abbildung 45 - Maximale Hauptstrukturdehnungen in den Simulationen (skaliert)

Um eine eindeutige Charakterisierung des Verhaltens zu erreichen, wurden zuletzt die Kriechdehnungen betrachtet (siehe Abbildung 46). Dabei konnte die Vermutung bestätigt werden, dass der stationäre Kriechlastfall und der Kriechlastfall mit Einspritzungen zur selben Spannungsverteilung führen. Der Vergleich zwischen den beiden Kurven zeigte, dass nach drei Betriebszyklen die Änderung der Kriechdehnungen in beiden Lastfällen annähernd den gleichen Wert hatte. Die Simulation im stationären Lastfall ergab somit ein realistisches Ergebnis, sofern die Differenz konstant blieb.

Durch lineare Extrapolationen aus den berechneten Kriechdehnungen im dritten Betriebszyklus für die gesamte Lebensdauer wurde eine konservative Abschätzung der auftretenden Gesamtdehnungen ermöglicht. Da die Spannungen mit der Zeit abnehmen, sind bei Gültigkeit des Norton-Bailey-Potenzgesetzes in der Realität geringere Kriechdehnungen zu erwarten.

Als Resultat der Extrapolationen wurde ermittelt, dass die absoluten Hauptstrukturdehnungen innerhalb der Lebensdauer den Wert von 1% (entspricht einem Absolutwert von $0,01 \cdot 10^{-2}$ in Tabelle 24) nicht überschreiten. Auch die berechneten Kriechdehnungen blieben unter diesem Grenzwert, wie die numerischen Ergebnisse in Tabelle 24 zeigen.

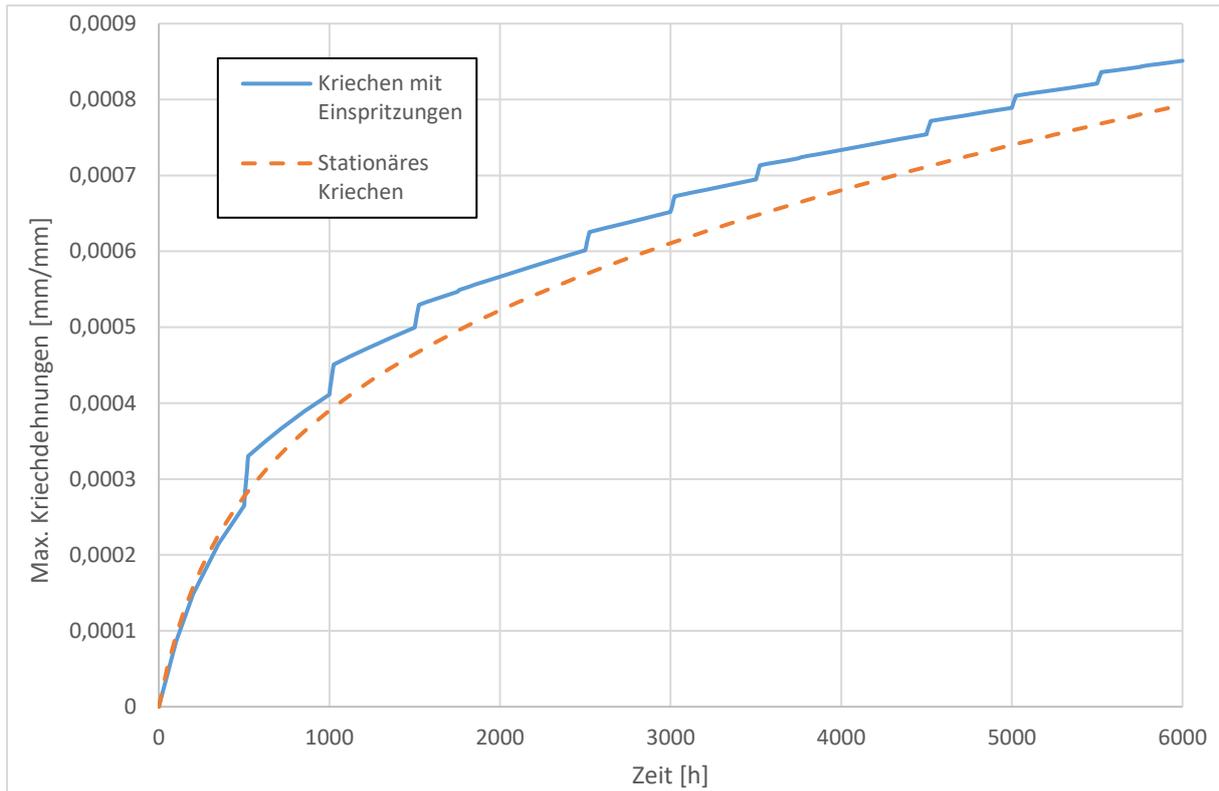


Abbildung 46 – Maximale Kriechdehnungen in den Simulationen

Zusammengefasst zeigte sich, dass die Zulässigkeit in den Nachweisen auch bei einer Simulation mit einem Kriechgesetz bestätigt werden konnte. Bis auf einen konstanten Offset in den Dehnungen stellte sich bei dem Lastfall mit Einspritzungen ein ähnlicher Spannungszustand wie im stationären Lastfall ein, womit die Voraussetzungen der Norm erfüllt waren.

Tabelle 24 – Extrapolationen der Dehnungen aus Simulationsergebnissen

(in mm/mm)	Maximale Hauptstrukturdehnungen	Minimale Hauptstrukturdehnungen	Maximale Kriechdehnungen	Minimale Kriechdehnungen
Änderung im 3. Betriebszyklus	$8,97 \cdot 10^{-5}$	$-1,71 \cdot 10^{-4}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$-1,82 \cdot 10^{-4}$
Extrapolation (50 * Änderung im 3. Zyklus)	$4,49 \cdot 10^{-3}$	$-8,57 \cdot 10^{-3}$	$5,87 \cdot 10^{-3}$	$-9,12 \cdot 10^{-3}$
Gesamtdehnung nach der Lebensdauer	$5,89 \cdot 10^{-3}$	$-9,74 \cdot 10^{-3}$	$6,61 \cdot 10^{-3}$	$-9,94 \cdot 10^{-3}$

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Analytischer Zulässigkeitsnachweis - Direktes Verfahren nach EN 13445-3 Anhang B für eine festgelegte Struktur durchgeführt. Die Ergebnisse des Nachweises wurden mit FEM-Simulationen des Verformungsverhaltens verglichen, bei denen als Kriechgesetz das Norton-Bailey-Potenzgesetz zur Anwendung kam.

6.1 Vergleich der Ergebnisse

Die Betriebsbedingungen wurden für diese Arbeit so gewählt, dass alle relevanten Nachweise im Wesentlichen erfüllt waren. Bei den Nachweisen außerhalb des Zeitstandbereichs wurden ein Tragfähigkeitsnachweis und ein Einspielnachweis durchgeführt. Die Betrachtung der Ermüdung wurde vernachlässigt, da mit der Annahme gearbeitet wurde, dass Ermüdung bei der geringen Zahl von Belastungszyklen keine relevante Schädigung verursachte. Stabilitätsnachweis und der Nachweis des statischen Gleichgewichts wurden nicht durchgeführt, da diese für den betrachteten Behälterausschnitt nicht zielführend waren.

Kriechfestigkeitsnachweise wurden ebenso erfüllt wie der Kriechdehnnachweis nach Anwendungsregel 1 für den durchgehenden Kriechlastfall im Betriebszustand. Die Kriechdehnnachweise nach Anwendungsregel 2 zeigten, dass auch gewisse Abweichungen vom Kriechlastfall für eine kurze Zeit zulässig sind. Für thermische Einwirkungen wurde allerdings festgestellt, dass bei der Thermoschockbeanspruchung nur geringe Temperaturdifferenzen möglich waren, weil Plastifizierungen nicht zulässig sind. Für den kombinierten Nachweis Kriechermüdung und zyklische Ermüdung wurde wieder die Annahme herangezogen, dass Ermüdung für die betrachtete Problemstellung vernachlässigbar ist.

Im Rahmen der Simulation zeigte sich, dass die transienten Einspritzzyklen zu zusätzlichen plastischen Dehnungen im Vergleich zum stationären Kriechlastfall führten. Nach einigen Zyklen stellte sich jedoch ein ähnlicher Spannungszustand ein, sodass die Kriechgeschwindigkeit bei größeren Gesamtdehnungen eine ähnliche Größenordnung wie im stationären Lastfall aufwies. Damit konnte nachgewiesen werden, dass bei Gültigkeit des Werkstoffmodells keine großen Spannungsumlagerungen in den Einspritzvorgängen stattfanden, womit eine Voraussetzung für den Kriechdehnnachweis nach Anwendungsregel 1 verifiziert werden konnte.

Eine Fragestellung, die in der Simulation nicht im Speziellen behandelt wurde, stellt die kombinierte Schädigung von Kriechen und Ermüdung dar. Für eine Analyse der relevanten Wechselwirkungen müsste mit einem geeigneten Werkstoffmodell gerechnet werden. Die Vorgehensweise bei der Auswahl und der Vergleich von den verschiedenen Modellen wären in zukünftigen Arbeiten zu ermitteln.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der analytische Zulässigkeitsnachweis nach EN 13445-3 Anhang B auch im Zeitstandbereich eine flexible alternative Auslegungsmethode darstellt. Vorteilhaft ist, dass Strukturen aus unterschiedlichen Werkstoffen analysiert werden können und dass variable Belastungen bei der Auslegung berücksichtigt werden können.

Doch es treten dabei auch Schwierigkeiten auf. Hervorzuheben ist, dass die Kriechdehnnachweise in EN 13445-3 Anhang B leicht zu Unklarheiten führen. So geht aus den Durchführungsanweisungen kaum der theoretische Hintergrund für die verschiedenen Operationen hervor, der für ein besseres Verständnis der Materie und eine exakte Anwendung vorteilhaft wäre. Die Arbeit mit vielen Verweisen verringert die Lesbarkeit zusätzlich.

Mit Methoden der Norm alleine ist außerdem der kombinierte Nachweis Kriechermüdung und zyklische Ermüdung nicht zu führen. Die entsprechenden Abschnitte in EN 13445-3 schließen eine Anwendung im Zeitstandbereich aus, sodass die Ermüdungsschädigung anderweitig zu bestimmen ist. Im

Auslegungsprozess besteht somit die Notwendigkeit, sich mit der entsprechenden Prüfstelle (zB. TÜV) auf ein passendes Verfahren zu einigen.

Abschließend soll erwähnt werden, dass die Nachweise und Berechnungen dieser Arbeit nicht immer exakt den Vorschriften der Normen genügen. Die getroffenen Annahmen oder Vereinfachungen lassen sich nach Meinung des Autors fachlich gut rechtfertigen – juristisch gesehen ist die Vorgehensweise trotzdem problematisch. Das nächste Kapitel behandelt diese Einschränkungen.

6.2 Juristische Einschränkungen

Die Durchführung des Analytischen Zulässigkeitsnachweises nach dem direkten Verfahren erfolgte mit einigen fachkundigen Annahmen, die in diesem Abschnitt angeführt werden.

Die Problematik der fehlenden Zeitdehngrenzen in den Werkstoffnormen bei bestimmten Fertigungsverfahren (zB. Rohrwerkstoffe) wurde schon einige Male erwähnt. Für eine Auslegung und Berechnung ohne Überwachung der Lebensdauer in den Kriechnachweisen nach EN 13445-3 Anhang B werden diese benötigt, um den Teilsicherheitsfaktor zu bestimmen. In dieser Arbeit wurde mit den Zeitdehngrenzen aus EN 10222-2 gearbeitet, anstatt eine Berechnung mit Lebensdauerüberwachung durchzuführen.

6.3 Einschränkungen der Simulation

Die durchgeführten Simulationen arbeiten mit einigen Voraussetzungen, die hier abschließend noch einmal zusammengefasst werden sollen. Das ist insofern von Bedeutung, als die Interpretation von Simulationsergebnissen immer mit Vorsicht zu betrachten ist, sofern keine Experimente zur Validierung durchgeführt wurden. Da Simulationen auf einem Modell beruhen, ist immer die Zulässigkeit des verwendeten Modells zu prüfen.

Eine grundlegende Annahme für diese Arbeit war, dass die verwendeten Werkstoffe im Kriechbereich dem Norton-Bailey-Potenzgesetz folgen. Diese Annahme ist für viele Werkstoffe im Bereich des sekundären Kriechens zutreffend; sie wurde allerdings für diese Arbeit nicht explizit überprüft. In einem Konstruktionsprozess kann es daher notwendig sein, diese Annahme über Literaturrecherche, eigene Erfahrungswerte oder durchgeführte Experimente zu validieren.

Darauf aufbauend wurde davon ausgegangen, dass die Parameter des Kriechgesetzes aus den Zeitdehngrenzen in den Werkstoffnormen ermittelt werden können. Damit wurde vorausgesetzt, dass es sich um zeitunabhängige Parameter handelt und dass sich der Werkstoff bei den gegebenen Standzeiten (hier 10.000 Stunden und 100.000 Stunden) im sekundären Kriechbereich befindet. Wie schon für den Zulässigkeitsnachweis wurden außerdem für die Rohrwerkstoffe die Zeitdehngrenzen aus der EN 10222-2 verwendet.

7 Anhang

7.1 Literaturverzeichnis

- ^[1] Zeman, J. L., Rauscher, F., Schindler, S. *Pressure Vessel Design - The Direct Route*; Elsevier Ltd.: Oxford, 2006.
- ^[2] Unbefeuerte Druckbehälter - Teil 3: Konstruktion, EN 13445-3, European Committee for Standardization (CEN), Brüssel, 2015.
- ^[3] Mayer, K.-H., Masuyama, F. *The development of creep-resistant steels*. In: F. Abe, T.-U. Kern, R. Viswanathan. *Creep-Resistant Steels*. Woodhead Publishing Limited: Cambridge, England, 2008.
- ^[4] Holdsworth, S. The European Creep Collaborative Committee (ECCC) Approach to Creep Data Assessment. *Jour. Press. Vessel Tech.* Vol. 130, 2008.
- ^[5] Goodall, I. W., Leckie, F. A., Ponter, A. R. S., Townley, C. H. A. The Development of High Temperature Design Methods Based on Reference Stresses and Bounding Theorems. *Jour. Eng. Mat. and Techn.* Vol. 101, 1979.
- ^[6] Lidonnici, F. Cross Comparison of European and American Pressure Vessel Standards in the Design of the Main Pressure Vessel Components. *Proceed. ASME 2009 Press. Vess. and Pip. Div. Conf.* 2009.
- ^[7] Unbefeuerte Druckbehälter - Teil 1: Allgemeines, EN 13445-1, European Committee for Standardization (CEN), Brüssel, 2016.
- ^[8] Unbefeuerte Druckbehälter - Teil 2: Werkstoffe, EN 13445-2, European Committee for Standardization (CEN), Brüssel, 2016.
- ^[9] Unbefeuerte Druckbehälter - Teil 5: Inspektion und Prüfung, EN 13445-5, European Committee for Standardization (CEN), Brüssel, 2016.
- ^[10] Conrad, K.-J. *Grundlagen der Konstruktionslehre*; Carl Hanser Verlag: München, 2013.
- ^[11] Klapp, E. *Apparate- und Anlagentechnik*; Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, New York, 1980.
- ^[12] Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen - Teil 2: Unlegierte und legierte Stähle mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen, EN 10028-2, European Committee for Standardization (CEN), Brüssel, 2009.
- ^[13] Rösler, J., Harders, H., Bäker, M. *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*; Vieweg + Teubner: Wiesbaden, 2008.
- ^[14] Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 2: Rohre aus unlegierten und legierten Stählen mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen, EN 10216-2, European Committee for Standardization (CEN), Brüssel, 2013.
- ^[15] Hornbogen, E., Warlimont, H. *Metalle*; Springer: Berlin Heidelberg, 2006.
- ^[16] Radaj, D., Vormwald, M. *Ermüdungsfestigkeit - Grundlagen für Ingenieure*; Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2007.
- ^[17] Haibach, E. *Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*; Springer-Verlag: Berlin, 2006.

- [18] Jelwan, J., Chowdhury, M., Pearce, G. Creep Life Design Criterion and its applications to pressure vessel codes. *Mat. Phys. and Mech.* Vol. 11, 2011.
- [19] Ilschner, B., Singer, R. F. *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik*; Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2010.
- [20] Moss, D. R., Basic, M. *Pressure Vessel Design Manual*; Elsevier Inc.: Oxford, 2013.
- [21] May, D. L., Gordon, A. P., Segletes, D. S. The application of the Norton-Bailey law for creep prediction through power law regression. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2013: Turbine technical Conference and Exposition.* San Antonio, Texas, USA. 2013.
- [22] Prager, M. Development of the MPC Omega Method for Life Assessment in the Creep Range. *Jour. Press. Vessel Tech.* Vol. 117, 1995.
- [23] Wang, Q., Yang, M., Song, X. L., Jia, J., Xiang, Z. D. Rationalization of Creep Data of Creep-Resistant Steels on the Basis of the New Power Law Creep Equation. *Metall. and Mat. Transactions.* Vol. 47A, 2016.
- [24] Katcher, M. A Modified Power Law for Creep Analysis. *Jour. Press. Vessel Tech.* Vol. 126, 2004.
- [25] Ghatak, A., Robi, P. S. Modification of Larson-Miller Parameter Technique for Predicting Creep Life of Materials. *The Indian Institute of Metals.* Vol. 69, 2016.
- [26] Webster, G. A., Ainsworth, R. A. *High Temperature Component Life Assessment*; Chapman & Hall: London, 1994.
- [27] Pilkey, W. D., Pilkey, D. F. *Peterson's Stress Concentration Factors*; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, 2008.
- [28] Dong, P. On repair weld residual stresses and significance to structural integrity. *Welding in the World.* Vol. 62, 2018.
- [29] Vazda, D. On concentration effects in circumferential welds due to dissimilar creep properties. *Int. Jour. Press. Vessels Piping.* Vol. 73, 1997.
- [30] Torshizi, S. E. M., Jahangiri, A. Analysis of Fatigue-Creep Crack Growth in the Superheater Header of a Power Plant Boilers and Estimation of Its Remaining Lifetime. *Jour. Fail. Anal. and Prev.* Vol. 18, 2018.
- [31] Takahashi, Y., Ogata, T., Take, K. Study on creep-fatigue failure prediction methods for type 304 stainless steel. *Nucl. Eng. Design.* Vol. 153, 1995.
- [32] Rauscher, F. Design by Analysis: Direct Route for Cases With Pressure and Thermal Action. *Jour. Press. Vessel Tech.* Vol. 130, 2008.
- [33] Corigliano, P., Crupi, V., Guglielmino, E., Fricke, W. FE analysis of cruciform welded joints considering different mechanical properties for base material, heat affected zone and weld metal. *Frattura ed Integrità Strutturale.* Vol. 30, 2014.
- [34] Schulze, G. *Die Metallurgie des Schweißens*; Springer: Berlin Heidelberg, 2010.
- [35] Datenblatt Zusatzwerkstoffe Böhler. http://www.guttruff.de/wp-content/uploads/2017/05/11_Boehler.pdf [Aufgerufen am 04.06.2018]
- [36] Chellapandi, P., Chetal, S. C. Influence of mis-match of weld and base material creep properties on elevated temperature design of pressure vessels and piping. *Nucl. Eng. Design.* Vol. 195, 2000.

- ^[37] Neugebauer, F. Schweissverbindung - Verfahrensprüfung - Voest-Alpine MCE. 2018.
- ^[38] Boese, U., Ippendorf, F. *Das Verhalten der Stähle beim Schweißen*; Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH: Düsseldorf, 2001.
- ^[39] Geschweißte Stahlrohre für Druckbeanspruchungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 2: Elektrisch geschweißte Rohre aus unlegierten und legierten Stählen mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen, EN 10217-2, European Committee for Standardization (CEN), Brüssel, 2005.
- ^[40] Schmiedestücke aus Stahl für Druckbehälter - Teil 2: Ferritische und martensitische Stähle mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen, EN 10222-2, European Committee for Standardization (CEN), Brüssel, 2013.

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 – Berechnungsverfahren nach EN 13445-3 ^[2]	3
Abbildung 2 – Nachweise des Analytischen Zulässigkeitsnachweises nach EN 13445-3 ^[2]	4
Abbildung 3 – Werkstoffkennwerte für ein Metall ohne (links) / mit (rechts) ausgeprägter Streckgrenze ^[13]	6
Abbildung 4 – Schematische Darstellung (doppeltlinear) von Wöhler-Linien mit (I) / ohne (II) Dauerschwingfestigkeit ^[15]	7
Abbildung 5 – Wöhler-Linie in doppeltlogarithmischer Darstellung ^[17]	8
Abbildung 6 – Typische Kriechkurve mit den drei Bereichen des Kriechens ^[20]	10
Abbildung 7 – RM und γR im TN für Normalbetriebslastfälle ^[2]	14
Abbildung 8 – Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen des TN für Normalbetriebslastfälle ^[2]	14
Abbildung 9 – RM und γR im KFN für Lastfälle ohne Überwachung.....	18
Abbildung 10 – Typische Auslegungskurven im Zeitstandbereich ^[2]	20
Abbildung 11 – Charakteristischer Betriebszyklus.....	24
Abbildung 12 – Stationäre Temperaturverteilung im Einspritzlastfall.....	25
Abbildung 13 – Geometrie des Berechnungsmodells – Stutzen in Kugelschale.....	27
Abbildung 14 – Doppel-HV-Naht ^[37]	28
Abbildung 15 – Vernetzung (Meshing) des Bauteiles.....	30
Abbildung 16 – Einwirkungen im Berechnungsmodell.....	31
Abbildung 17 – Vergleichsspannungen nach Mises im TN.....	33
Abbildung 18 – Maximale Hauptstrukturdehnungen TN.....	34
Abbildung 19 – Minimale Hauptstrukturdehnungen TN.....	34
Abbildung 20 – Temperaturverteilung im Einspritzlastfall nach 3 Sekunden.....	35
Abbildung 21 – Adaptierter Belastungszyklus für den EN (An- und Abfahren nicht maßstäblich) ...	36
Abbildung 22 – Hauptstrukturdehnungen in fünf adaptierten Belastungszyklen im EN.....	36
Abbildung 23 – Dehnungs-Spannungskurve im EN für den Punkt mit den maximalen Vergleichsspannungen.....	37
Abbildung 24 – Ermittlung der Druckzyklen über die volle Schwingbreite im ZEN.....	38
Abbildung 25 – Maximale Hauptstrukturdehnungen KFN Betriebslastfall.....	41
Abbildung 26 – Minimale Hauptstrukturdehnungen KFN Betriebslastfall.....	41
Abbildung 27 – Maximale Hauptstrukturdehnungen KFN Grenzlastfall.....	43
Abbildung 28 – Minimale Hauptstrukturdehnungen KFN Grenzlastfall.....	43
Abbildung 29 – Plastische Hauptstrukturdehnungen im KDN für den Betriebslastfall.....	45
Abbildung 30 – Maximale Hauptstrukturdehnungen KDN Betriebslastfall.....	46
Abbildung 31 – Minimale Hauptstrukturdehnungen KDN Betriebslastfall.....	46
Abbildung 32 – Eigenspannungszustand nach Einspritzungen im entlasteten Zustand.....	49
Abbildung 33 – Temperaturverteilung im Einspritzlastfall (nach einer Sekunde).....	50
Abbildung 34 – linearelastischer Spannungszustand im Einspritzlastfall für den KDN.....	50
Abbildung 35 – Vergleichsspannung nach Mises für KDN nach AR 2 im Einspritzlastfall.....	51
Abbildung 36 – Kriterium für Plastifizierung KDN Einspritzlastfall.....	52
Abbildung 37 – Vergleichsspannungen nach Mises für KDN Grenzlastfall.....	53
Abbildung 38 – Kriterium für Plastifizierung KDN Grenzlastfall.....	53
Abbildung 39 – Vergleichsspannungen Mises für KDN Entlastungslastfall.....	54
Abbildung 40 – Kriterium für Plastifizierung KDN Entlastungslastfall.....	54
Abbildung 41 – Vergleichsspannungen nach Mises bei erstmaliger Belastung.....	57
Abbildung 42 – Vergleichsspannungen nach Mises bei stationärer Kriechsimulation (belastet nach 100.000.Stunden).....	57
Abbildung 43 – Maximale Hauptstrukturdehnungen bei stationärer Kriechsimulation (belastet nach 100.000 Stunden).....	58

Abbildung 44 – Maximale Vergleichsspannungen nach Mises in den Simulationen	59
Abbildung 45 - Maximale Hauptstrukturdehnungen in den Simulationen (skaliert)	60
Abbildung 46 – Maximale Kriechdehnungen in den Simulationen	61
Abbildung 47 – Randbedingungen für die zeitabhängige thermische Analyse.....	71

7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 – Ausgewählte Regelwerke zur Auslegung von Druckgeräten ^[6]	2
Tabelle 2 – Charakteristische Werte der Einwirkungen	26
Tabelle 3 – Schweißnähte im Berechnungsmodell.....	27
Tabelle 4 – Werkstoffe, Werkstoffnormen, Wanddicken, Werkstoffkennwerte ^[8, 12, 14]	28
Tabelle 5 – Werkstoffkennwerte Schweißnaht.....	29
Tabelle 6 – Bemessungswerte des Tragfähigkeitsnachweises	32
Tabelle 7 – Ergebnisse des Tragfähigkeitsnachweises.....	33
Tabelle 8 – Bemessungswerte der Fließgrenze für den Einspielnachweis	35
Tabelle 9 – Anzahl der äquivalenten Druckzyklen ZEN.....	38
Tabelle 10 – Auslegung im Zeitstandsbereich – Bedingungen	40
Tabelle 11 – Bemessungswerte des KFN für den Betriebslastfall	40
Tabelle 12 – Ergebnisse des KFN für den Betriebslastfall.....	41
Tabelle 13 – Bemessungswerte des KFN für den Grenzlastfall.....	42
Tabelle 14 – Ergebnisse des KFN für den Grenzlastfall	42
Tabelle 15 – Werkstoffkennwerte des KDN für den Betriebslastfall.....	44
Tabelle 16 – Zwischenergebnisse zur Ermittlung der Referenzspannungen für den Betriebslastfall ...	45
Tabelle 17 – Referenzspannungen und die Ermittlung der zulässigen Standzeit im KDN nach AR 1 .	47
Tabelle 18 – Ergebnisse des KDN nach AR 1 für den Betriebslastfall.....	48
Tabelle 19 – Bemessungswerte der Kurzzeitfestigkeitswerte im KDN für den Einspritzlastfall.....	51
Tabelle 20 – Ergebnisse des KDN nach Anwendungsregel 2 im Grenzlastfall	53
Tabelle 21 – Ergebnisse des KDN nach Anwendungsregel 2 für den Entlastungslastfall	54
Tabelle 22 – Bestimmung der Parameter für das Norton-Kriechgesetz im Betriebslastfall ^[12, 40]	56
Tabelle 23 – Fließgrenzen für die Simulationen nach Norton.....	56
Tabelle 24 – Extrapolationen der Dehnungen aus Simulationsergebnissen.....	61
Tabelle 26 – E-Moduli für verschiedene Temperaturen ^[2]	70
Tabelle 27 – Wärmeausdehnungskoeffizienten bei verschiedenen Temperaturen ^[2]	70
Tabelle 28 – Wärmeleitfähigkeiten für verschiedene Temperaturen nach Werkstoffgruppen ^[2]	70
Tabelle 29 – Differentielle spezifische Wärmekapazitäten für die thermische Analyse	70
Tabelle 30 – Dichten für die thermische Analyse (für alle Stähle gleich).....	70
Tabelle 31 – Bestimmung der Parameter für das Norton-Kriechgesetz im Grenzlastfall	71

7.4 Material

- Verwendete Tabellen für die Ermittlung der sonstigen Werkstoffkennwerte nach Anhang O:^[2]

Tabelle 25 – E-Moduli für verschiedene Temperaturen^[2]

Temperatur [°C]	E-Modul [MPa]	Querkontraktionszahl [-]
20	211770	0,3
200	198610	0,3
250	194745	0,3
300	190788	0,3
350	186740	0,3
400	182601	0,3
450	178371	0,3
500	174050	0,3

Tabelle 26 – Wärmeausdehnungskoeffizienten bei verschiedenen Temperaturen^[2]

Temperatur [°C]	Wärmeausdehnungskoeffizient β [1/°C]
20	1,13E-05
200	1,257E-05
250	1,288E-05
300	1,316E-05
350	1,342E-05
400	1,367E-05
450	1,388E-05
500	1,408E-05

Tabelle 27 – Wärmeleitfähigkeiten für verschiedene Temperaturen nach Werkstoffgruppen^[2]

Temperatur [°C]	Wärmeleitfähigkeit Gr.1.2 λ [W/(m*K)]	Wärmeleitfähigkeit Gr.5.2 λ [W/(m*K)]
20	49,502	37,087
50	48,989	37,221
100	48,08	37,335
200	46,055	37,15
300	43,756	36,416
350	42,504	35,842
400	41,183	35,132
450	39,793	34,283
500	38,355	33,297

Tabelle 28 – Differentielle spezifische Wärmekapazitäten für die thermische Analyse

Temperatur [°C]	Spezifische Wärmekapazität [J/(kg*K)]
20	460,41
420	622,63
450	641,25
475	658,63

Tabelle 29 – Dichten für die thermische Analyse (für alle Stähle gleich)

Temperatur [°C]	Dichte [kg/m ³]
420	7721,8
475	7702,02

- Analyse des thermischen Zustands

Für die Nachweise, bei denen die Einspritzvorgänge berücksichtigt werden mussten, war es notwendig, eine transiente Analyse des thermischen Zustands durchzuführen. Dazu mussten zusätzliche Werkstoffkennwerte spezifiziert werden, wobei die Werte nach EN 13445-3 Anhang O festgelegt wurden. Die konkreten Zahlenwerte zeigen Tabelle 28 und Tabelle 29. Im Berechnungsmodell wurden die Geometrie sowie das Netz nicht verändert.

Als Einwirkungen wurde an der Innenseite des Stutzens die Temperatur auf 449°C (Randbedingung B) festgelegt, während an der Innenseite der Schale eine Temperatur von 475°C (Randbedingung A) vorgegeben wurde. Da keine genauen Informationen über den Temperaturverlauf im Übergang bekannt sind, wurde als konservative Annahme die Stutzen-Innenkante ebenso mit dem Thermoschock beansprucht. Das verwendete Modell ist in Abbildung 47 dargestellt.

Die Auswertung erfolgte nach verstrichenen Sekunden, wobei es in den ersten zwei Sekunden zu einem Auftreten der maximalen Spannungen kam. Auch zu Plastifizierungen kam es nur bei diesen Zeitpunkten. Im weiteren Verlauf der Simulationen wurden die restlichen Zeitschritte daher nicht mehr berücksichtigt.

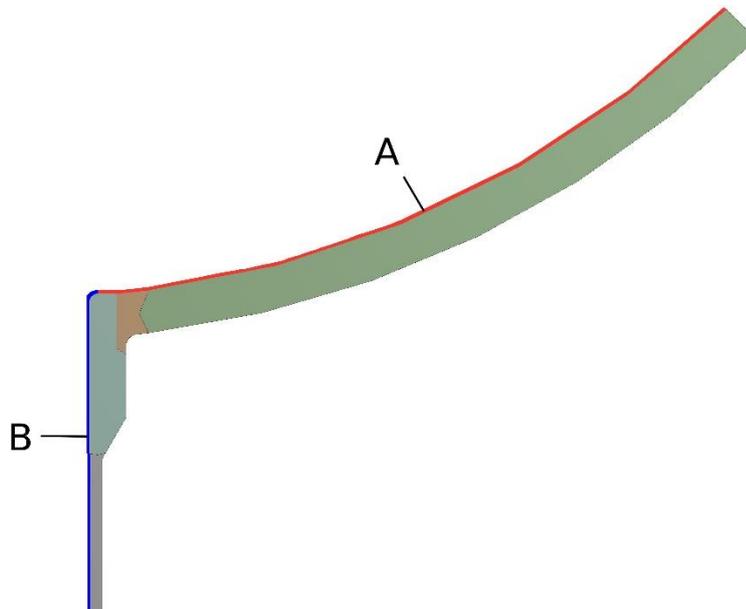


Abbildung 47 – Randbedingungen für die zeitabhängige thermische Analyse

- Bestimmung der Parameter für das Norton-Kriechgesetz bei 480°C

Tabelle 30 – Bestimmung der Parameter für das Norton-Kriechgesetz im Grenzlastfall

	10CrMo9-10	11CrMo9-10+QT	16Mo3	Schweißnaht
$R_{p1.0/480/10.000}$ [MPa]	180	180	166	144
$R_{p1.0/480/100.000}$ [MPa]	130	130	107	104
Norm	EN 10028-2	EN 10222-2	EN 10222-2	-
Norton-Parameter n'	7,07568	7,07568	5,24317	7,07568
Koeffizient $K = \frac{A'}{(\sigma_0)^{n'}}$	$3,0627 \cdot 10^{-26}$	$3,0627 \cdot 10^{-26}$	$6,3576 \cdot 10^{-22}$	$1,4853 \cdot 10^{-25}$