



Lehrstuhl für Umformtechnik

Masterarbeit

Konzipierung und Auslegung einer
Druckautoklavenanlage für
Hochdruckanwendungen in der additiven
Fertigung

Daniel Roth, BSc

Mai 2022



MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN

www.unileoben.ac.at

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 31.05.2022

Unterschrift Verfasser/in
Daniel Roth

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen meinen großen Dank aussprechen, die mich bei der Anfertigung meiner Masterarbeit unterstützt haben - denn eine Masterarbeit trägt die Handschrift des Erstellers aber ist niemals das Werk eines Einzelnen!

Ein besonderer Dank geht an meinen Betreuer Dipl.-Ing. Manuel Keinprecht, an Dipl.-Ing. Marcel Sorger und an Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Stockinger für die enorme Unterstützung und Betreuung beim Verfassen dieser Masterarbeit.

Mein Dank geht auch an Dipl.-Ing. (FH) Rene Pichler, der mir in schwierigen Phasen meines Studiums beruflich den Rücken freigehalten hat.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Eltern, Barbara und Mario und meiner Schwester Nadine für die Ermutigungen und Zusprüche während des Studiums; sowie für den Rückhalt in allen Lebensphasen bedanken.

Ich möchte mich auch bei meinen Studienkollegen, Thorsten, Marcel und Jonny - die zu Freunden wurden - für die gemeinsamen lustigen aber auch herausfordernden Stunden während unseres Studiums bedanken - ohne euch wäre der Weg nur umso schwerer gewesen.

Tief verbunden und über alles dankbar bin ich meiner Frau, Bianca, für ihr unendliches Verständnis für viele Entbehrungen, ihre uneingeschränkten, motivierenden und unterstützenden Worte sowie für ihren Rückhalt, ihren moralischen Beistand, Liebe und menschlichen Halt, was mir immer Kraft und Mut während des Studiums gab.

Kurzfassung

In der Verfahrenstechnik machen Druckbehälter einen großen Anteil der verwendeten Apparate aus. Im Forschungsbetrieb werden Druckbehälter dazu verwendet, um die im Realprozess auftretenden Umgebungsbedingungen bestmöglich nachzustellen und deren Wirkung auf den Prozess zu erforschen. Durch die Untersuchung und Evaluierung der Einflüsse von verschiedenen Prozessparametern und deren Wechselwirkungen können Rückschlüsse auf das Prozessverhalten und die Prozessqualität gezogen werden. Die dadurch gewonnen praktischen Implikationen können im Realprozess angewandt werden und bieten dadurch einen prozesstechnischen- und wirtschaftlichen Mehrwert.

Um drahtbasierte additive Fertigungsverfahren unter variierenden Drücken, Temperaturen und Atmosphären untersuchen zu können, werden diese in einer Druckautoklavenanlage durchgeführt. Diese Masterarbeit befasst sich mit der Konzipierung und Auslegung einer Druckautoklavenanlage für Hochdruckanwendungen in der additiven Fertigung am Lehrstuhl für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben. Im Zuge dieser Arbeit wird die Auslegung und Konzipierung eines Druckbehälters nach dem Regelwerk AD 2000 dargestellt. Die Auslegung umfasst den Grundkörper des Mantels, das Verschlussystem, Schraubenverbindungen und den Deckel. Es werden zusätzlich die konstruktive Ausführung und die notwendigen Schritte zur Erlangung der Konformität des Druckbehälters behandelt.

Abstract

In process engineering, pressure vessels make up a large proportion of the employed apparatus. In research, pressure vessels are used to simulate the environmental conditions occurring during the real process in order to investigate their effect on the process. By investigating and evaluating the influences of various process parameters and their interactions, conclusions can be drawn about process behavior and process quality. The practical implications obtained can be applied in the real process and thus offer added value in terms of process technology and economic advantage.

In order to be able to investigate wire-based additive manufacturing processes under varying pressures, temperatures and atmospheres, trials are carried out in an autoclave system.

This master thesis deals with the conception and design of an autoclave system for high-pressure applications in additive manufacturing at the Chair of Metal Forming at the Montanuniversität Leoben. In the scope of this work, the design and conception of a pressure vessel according to the AD 2000 regulations is presented. The design includes the basic body of the shell, the closure system, bolted connections and the cover. In addition, the constructive design and the necessary steps for obtaining the conformity of the pressure vessel are dealt with.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
2.	Stand der Technik.....	2
3.	Grundlagen	3
3.1.	Physikalische Grundlagen.....	3
3.1.1.	Druck	3
3.1.2.	Gasdruck.....	4
3.2.	Mechanische Grundlagen.....	5
3.2.1.	Kesselgleichungen	5
3.2.2.	Festigkeithypothesen.....	7
3.2.3.	Spannungsverläufe	8
3.2.4.	Versagensarten.....	10
3.2.5.	Werkstoffe.....	11
3.3.	Apparate.....	15
3.3.1.	Unterteilung von Behälter	16
3.3.2.	Elemente eines Druckbehälters	16
3.3.3.	Einstufung von Druckgeräten	30
3.4.	Vergleich zwischen EN13445 und AD 2000.....	32
4.	Gefahrenanalyse.....	34
5.	Konzipierung und Auslegung des Druckbehälters.....	35
5.1.	Anforderungen an die Druckkammer.....	35
5.2.	Einstufung und Konformitätsbewertung.....	36
5.3.	Auslegung	38
5.3.1.	Merkblatt B 0 – Berechnung von Druckbehältern	38
5.3.2.	Merkblatt B 1 – Zylinder- und Kugelschalen unter innerem Überdruck	40
5.3.3.	Merkblatt B 3 – gewölbte Böden unter innerem und äußerem Überdruck	41
5.3.4.	Merkblatt B 9 – Ausschnitte in Zylindern, Kegeln und Kugeln	43
5.3.5.	Merkblatt B 7 – Schraubenverbindung	47
5.3.6.	Merkblatt B 5 – Ebene Böden.....	47
5.4.	FE-Analyse	48
6.	Konstruktion	56
6.1.	Übersicht der Gesamtanlage.....	56
6.2.	Grundkörper	56
6.3.	Viewport – Aufbau und Komponenten	63
6.4.	Deckel	65

6.5. Verschlussystem	68
7. Werkstoffwahl	71
8. Prüfungen	74
8.1. Prüfungen im Konformitätserlangungsprozess	74
8.2. Prüfvorschriften – wiederkehrende Prüfungen	75
9. Auswertung und Ergebnisse	76
10. Zusammenfassung und Ausblick	77
Abbildungsverzeichnis	79
Tabellenverzeichnis	83
Literaturverzeichnis	84
Anhang	88
Anhang A: Gefahrenanalyse	88
Anhang B: Risikoanalyse	93
Anhang C: Berechnung	97
Anhang D: Übersichtszeichnung	118

Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Einheit	Beschreibung
A	mm ²	Fläche
A _k	mm ²	Kreisringfläche
A _{Sp}	mm ²	Spannungsquerschnitt Schraube
A _{un}	mm ²	Ungeschwächter Plattenquerschnitt
A _a	mm ²	Geschwächter Plattenquerschnitt
A _{p_M}	mm ²	Druckbelastete Fläche Muffe
A _{p_St}	mm ²	Druckbelastete Fläche Stutzen
A _{p_St_Kl}	mm ²	Druckbelastete Fläche Stutzen am Klöpperboden
A _{sigma_M}	mm ²	Tragende Querschnittsfläche Muffe
A _{sigma_St}	mm ²	Tragende Querschnittsfläche Stutzen
A _{sigma_St_Kl}	mm ²	Tragende Querschnittsfläche Stutzen am Klöpperboden
A _p	mm ²	Druckbelastete Fläche allgemein
A _σ	mm ²	Tragende Querschnittsfläche allgemein
b	mm	Scheibenbreite
B _D	mm	Dichtungsbreite
b _M	mm	Scheibenbreite Muffe
b _{St}	mm	Scheibenbreite Stutzen
b _{St_Kl}	mm	Scheibenbreite Stutzen Klöpperboden
b ₀	mm	Breite der Dichtfläche
b1 _K	-	Berechnungsbeiwert Iterationsschritt 2 Klöpperboden
b2 _K	-	Berechnungsbeiwert Iterationsschritt 1 Klöpperboden
C	-	Berechnungsbeiwert für Deckel
c	kJ/kg K	Spezifische Wärmekapazität
c ₁	mm	Koeffizient für Wanddickenunterschreitung
c1 _D	mm	Koeffizient für Wanddickenunterschreitung Deckel
c1 _K	mm	Koeffizient für Wanddickenunterschreitung Klöpperboden
c1 _M	mm	Koeffizient für Wanddickenunterschreitung Mantel
c1 _{Muffe}	mm	Koeffizient für Wanddickenunterschreitung Muffe
c1 _{St}	mm	Koeffizient für Wanddickenunterschreitung Stutzen
c ₂	mm	Abnutzungszuschlag
c2 _D	mm	Abnutzungszuschlag Deckel

c2_K	mm	Abnutzungszuschlag Klöpperboden
c2_M	mm	Abnutzungszuschlag Mantel
c2_Muffe	mm	Abnutzungszuschlag Muffe
c2_St	mm	Abnutzungszuschlag Stutzen
c5	mm	Konstruktionszuschlag Vollschaftschraube
Ca	-	Ausschnittsbeiwert
D	mm	Durchmesser
D_B	mm	Berechnungsdurchmesser Dichtung
D_D	mm	Durchmesser Deckel
d_D	mm	Innendurchmesser Deckel
d_S	mm	Durchmesser Schraube
D _a	mm	Außendurchmesser
Da_Ka	mm	Außendurchmesser Kalotte
Da_M	mm	Außendurchmesser Muffe
Da_R	mm	Außendurchmesser Rohr
Da_St	mm	Außendurchmesser Stutzen
dD	mm	Mittlerer Dichtungsdurchmesser
d _G	mm	Gewindedurchmesser
D _i	mm	Innendurchmesser
Di_Kl	mm	Innendurchmesser Klöpperboden
Di_M	mm	Innendurchmesser Muffe
Di_R	mm	Innendurchmesser Rohr
Di_St	mm	Innendurchmesser Stutzen
d _k	mm	Schaftdurchmesser
E	N/mm ²	E-Modul
F	N	Kraft
F _d	N	Deckelkraft
F _{DB}	N	Dichtungskraft
F _{FB}	N	Flanschkraft
F _{RB}	N	Rohrkraft
F _S	N	Kraft pro Schraube
F _{SB}	N	Mindestschraubenkraft
f _s	-	Berechnungsbeiwert
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
GGW_L	-	Gleichgewicht linke Seite

GGW_R	-	Gleichgewicht rechte Seite
h	mm	Höhe
h ₁	mm	Höhe des Bords (Klöpperboden)
h ₂	mm	Wölbungshöhe
K	N/mm ²	Temperaturabhängiger Werkstoffkennwert
K ₂₀₀	N/mm ²	Werkstoffkennwert bei 200 °C
K _{200_S}	N/mm ²	Werkstoffkennwert Schraube bei 200°C
K ₂₂₀	N/mm ²	Werkstoffkennwert bei 220 °C
K _{250_S}	N/mm ²	Werkstoffkennwert Schraube bei 250°C
K ₃₀₀	N/mm ²	Werkstoffkennwert bei 300 °C
K_Schraube	N/mm ²	Werkstoffkennwert Schraube
k1	mm	Dichtungskennwert
l_B	mm	Länge der Beeinflussung
l_M	mm	Mantellänge
Ls	mm	Mittragende Länge
IS_M	mm	Mittragende Länge Muffe
IS_M_g	mm	Gewählte mittragende Länge Muffe
IS_St_Kl	mm	Mittragende Länge Stutzen Klöpperboden
IS_St_Kl_n	mm	Tatsächliche mittragende Länge Stutzen Klöpperboden
IS_St_n	mm	Tatsächliche mittragende Länge Stutzen
IS_Stutzen	mm	Mittragende Länge Stutzen
n	-	Anzahl der Schrauben
p	Pa	Druck
p _{0_05}	Pa	5% des Druckes
p_B	Pa	Berechnungsdruck
p_D	Pa	Druck am Deckel
p_h_M	Pa	Hydrostatischer Druck
p_K	Pa	Druck in der Kammer
p_V	Pa	Druck - Berechnung
p _{abs}	Pa	Absoluter Druck
p _{amb}	Pa	Atmosphärendruck
p _e	Pa	Überdruck, Relativdruck
phi	-	Verhältnisswert
r	mm	Radius
r ₁ , r1	mm	Kalottenradius

r_2, r_2	mm	Krempenradius
r_a	mm	Äußerer Rohradius
Re	N/mm ²	Streckgrenze
ρ_A	kg/m ³	Dichte von Argon
r_i	mm	Innerer Rohradius
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit
s, t	mm	Wandstärke
S	-	Sicherheitsbeiwert allgemein
s_{A_K}	mm	Angenommene Wandstärke Klöpperboden
s_D	mm	Wandstärke Deckel - Berechnung
$s_{D_{An}}$	mm	Angenäherte Wandstärke
s_{D_g}	mm	Gewählte Wandstärke Deckel
s_{K_1}	mm	Angenommene Krempenwandstärke Iteration 1
s_{K_2}	mm	Angenommene Krempenwandstärke Iteration 2
s_{Ka}	mm	Wandstärke Kalotte
s_{Ka_g}	mm	Gewählte Wandstärke Kalotte
s_{Kl_g}	mm	Gewählte Stützenwandstärke
s_{Kr_g}	mm	Gewählte Krempenwandstärke
s_{M_A}	mm	Abgeschätzte Wandstärke Mantel
s_{M_B}	mm	Berechnete Mantelwandstärke
s_{M_g}	mm	Gewählte Mantelwandstärke
s_{Mu_g}	mm	Gewählte Wandstärke Muffe
$s_{Mu_{zw}}$	mm	Zwischenwahl Wandstärke Muffe
S_S	-	Sicherheitsbeiwert
s_{St_k}	mm	Wandstärke Stützen konstruktiv ausgeführt
$s_{St_{Kl_k}}$	mm	Wandstärke Stützen Klöpperboden konstruktiv ausgeführt
s_{St_n}	Mm	Tatsächliche Wandstärke Stützen neu
$S_{St_{zw}}$	mm	Zwischenwahl Wandstärke Stützen
$S_{St_{zw_{Kl}}}$	mm	Zwischenwahl Wandstärke Stützen am Klöpperboden
S_{w_s}	-	Sicherheitsbeiwert
s_A	mm	Wandstärke Mantel
s_e	mm	Wandstärke Klöpperboden Literatur
σ_{zul}	N/mm ²	Zulässige Spannung
S_k	-	Sicherheitsbeiwert Schrauben
s_{min}	mm	Mindestwandstärke

sS, sS_St	mm	Wandstärke Stutzen
sS_M	mm	Wandstärke Muffe
sS_St_Kl	mm	Wandstärke Stutzen am Klöpperboden
T	°C	Temperatur
T_K200	°C	Temperatur für die Berechnung des Werkstoffkennwert bei 200°C
T_K220	°C	Temperatur für die Berechnung des Werkstoffkennwert bei 220°C
T_K300	°C	Temperatur für die Berechnung des Werkstoffkennwert bei 300°C
T _{MAX}	°C	Maximale Temperatur
T _{MIN}	°C	Minimale Temperatur
u	-	Wandstärkenverhältnis
V	m ³	Volumen
V_1	-	Verhältnis Wandstärke zu Innendurchmesser Stutzen
V_2	-	Verhältnis Wandstärke zu Innendurchmesser Muffe
V_3	-	Verhältnis Wandstärke zu Innendurchmesser Stutzen Klöpperboden
V_B8	-	Wandstärkenverhältnis
V_B8_2	-	Wandstärkenverhältnis Muffe
vA_M	-	Verschwächungsfaktor Muffe
vA_St	-	Verschwächungsfaktor
vA_St_Kl	-	Verschwächungsfaktor Klöpperboden
Z	-	Hilfswert
Z	-	Einschnürung
α	K ⁻¹	Wärmedehnzahl
α_k	J/cm ²	Kerbschlagzähigkeit
Δl	mm	Längendifferenz
Δp	Pa	Differenzdruck
ε	-	Bruchdehnung
ν	-	Koeffizient für die Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen
β	-	Berechnungsbeiwert für gewölbte Böden
λ	W/m K	Wärmeleitfähigkeit
σ_1	N/mm ²	Erste Hauptnormalspannung

σ_2	N/mm ²	Zweite Hauptnormalspannung
σ_3	N/mm ²	Dritte Hauptnormalspannung
σ_D	N/mm ²	Dauerfestigkeit
σ_{max}	N/mm ²	Maximale Normalspannung
σ_r	N/mm ²	Radialspannung
σ_v	N/mm ²	Vergleichsspannung
σ_x, σ_o	N/mm ²	Spannung in Längsrichtung
σ_{zul}	N/mm ²	Zulässig Spannung
σ_φ, σ_u	N/mm ²	Spannung in Umfangsrichtung
τ_{max}	N/mm ²	Maximale Schubspannung

1. Einleitung

In der Gas- und Ölindustrie befinden sich für die Verarbeitung von rohrförmigen Erzeugnissen additive Fertigungsverfahren im Entwicklungsprozess. Aus diesem Grund soll für Hochdruckanwendungen eine Pilotanlage in Form einer Druckautoklavenanlage konzipiert, ausgelegt und gebaut werden. Um Versuche unter realen Bedingungen durchführen zu können, soll am Lehrstuhl für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben solch eine Pilotanlage implementiert werden. Diese Pilotanlage soll als Grundlage für zukünftige Forschungsarbeiten im Bereich der additiven Fertigung dienen.

Im zweiten Kapitel folgt ein kurzer Überblick über den Stand der Technik von Behältern für Hochdruckanwendungen wobei im nachfolgenden Kapitel 3 die, für diese Masterarbeit relevanten, technischen Grundlagen beschrieben werden. Die in Kapitel 4 durchgeführte Gefahrenanalyse bildet die Basis für die Konzipierung und Auslegung des Druckbehälters in Kapitel 5, wobei hier auf die Anforderungen, Einstufung und Konformitätsbewertung sowie die Berechnung nach den Merkblättern der AD 2000 und auf die FEM-Analyse genauer eingegangen wird. Die konstruktive Ausführung des Druckbehälters wird detailliert in Kapitel 6 beschrieben. Danach werden die verwendeten Werkstoffe (Kapitel 7) und durchzuführenden Prüfungen (Kapitel 8) gefolgt von der Auswertung und den Ergebnissen in Kapitel 9 behandelt. Den Abschluss der Masterarbeit bildet Kapitel 10 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2. Stand der Technik

Drahtbasierte Fertigungsprozesse, wie das Wire Arc Additive Manufacturing, sind charakterisiert durch formgebendes Auftragsschweißen. Für Anwendungen unter Normalbedingungen arbeiten zahlreiche Unternehmen an der Weiterentwicklung und Verbesserung dieses Prozesses, bei dem es zum Einbringen eines Schweißdrahtes in einem Schmelzbad kommt. [1]

Für Forschungsarbeiten unter hohen Temperaturen und hohen Drücke, sogenannte hyperbare Bedingungen, sind kaum vergleichbare Forschungsergebnisse sowie dafür genutzte Anlagen veröffentlicht.

An der TU Delft (Niederlande) wurden bereits Arbeiten auf diesem Gebiet durchgeführt, wobei hier eine ähnliche Druckautoklavenanlage zum Einsatz gekommen ist.

Druckautoklaven finden unter anderem Anwendung im Bereich der medizinischen Laboratoriumsdiagnostik für die Sterilisation unter hohen Drücken und Temperaturen [2].

Auch im Bereich der additiven Fertigung von Kunststoffen kommen Druckautoklaven zur Anwendung. Beim sogenannten Duroplast-Tapelegen wird der Druckautoklav für den Härteprozess eingesetzt. Eine wichtige Rolle spielen Druckautoklaven auch bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen aus Elastomeren und Duroplasten. Beim Differential Pressure Resin Transfer Moulding (DP-RTM) dient der Druck im Druckautoklav als Gegendruck zum Injektionsdruck. [3]

Der grundlegende Aufbau der oben beschriebenen Druckautoklaven ist in den meisten Fällen ähnlich, wobei für die Anwendung in der Medizintechnik und der additiven Fertigung marginale Unterschiede im Bereich der verwendeten Werkstoffe und Einbauten vorliegen. In der Medizintechnik werden meist nichtrostende Edelstähle verwendet und in der additiven Fertigung werden meist Kohlstoffstähle verwendet. Weiter Unterschiede sind im Inneren Aufbau zu erkennen, da im Bereich der additiven Fertigung meist Formen und in der Medizintechnik einfache Einschubladen ins Innere eingebracht werden. [2]

Grundsätzlich bestehen Druckautoklaven aus einem zylindrischen Mantel, einem Boden und einem Verschlussystem, wobei sich dieser abhängig vom Betriebsdruck konstruktiv unterscheidet.

Schraubbare Verschlussysteme können mit Klammerschrauben, Klemmschrauben oder Klappschrauben ausgeführt werden. Für Hochdruckanwendungen kommen spezielle Verschlussysteme mit Klemm- und Verriegelungssystemen zum Einsatz. [4]

3. Grundlagen

Die theoretischen Grundlagen für die Auslegung und den Umgang mit einem Druckbehälter werden in diesem Kapitel unter Berücksichtigung der physikalischen Grundgesetze und der mechanischen Auslegung vorgestellt. Zudem werden benötigte Begriffe und mathematische Beziehungen erläutert.

3.1. Physikalische Grundlagen

Die physikalischen Grundlagen für den Druck, der in einem Druckbehälter herrscht, werden in diesem Kapitel durch die Erklärung des Druckes selbst sowie dem Gasdruck beschrieben.

3.1.1. Druck

Der Druck p ist eine physikalische skalare Größe und lässt sich definieren als das Verhältnis aus Normalkraft und Fläche, auf jene die Normalkraft wirkt, wie in Gleichung 1.1 dargestellt [5]. Wie in Abbildung 1 zu sehen, ist die darunter stehende Definition des Druckes grafisch dargestellt.

$$p = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

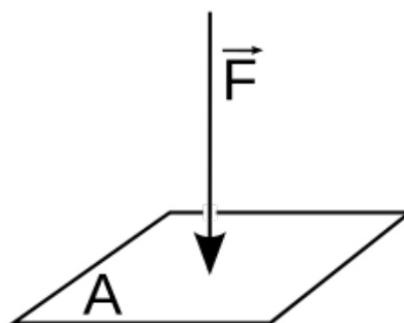


Abbildung 1: Darstellung von jener Normalkraft und Fläche, die zur Definition des Druckes herangezogen werden. [6]

Aufgrund der skalaren Größe ist der Druck richtungsunabhängig und wirkt in jede Richtung gleich. Dies ergibt für die Berechnung gleichmäßig beanspruchte Bereiche am Bauteil [7]. Zusätzlich werden unterschiedliche Definitionen für den Druck bzw. der Druckgrößen verwendet, welche nachfolgend kurz beschrieben sind [8].

Der absolute Druck p_{abs} ist jener Druck, der auf das ideale, also absolute Vakuum (0 bar) bezogen wird. Beim Überdruck p_e , wird der Druck auf den jeweils herrschenden Atmosphärendruck p_{amb} bezogen, siehe Gleichung 1.2 [8].

$$p_e = p_{abs} - p_{amb} \quad (1.2)$$

Tritt eine Differenz zwischen zwei Drücken auf, so spricht man vom Differenzdruck Δp [8]

$$\Delta p = p_2 - p_1 \quad (1.3)$$

3.1.2. Gasdruck

Vom sogenannten Gasdruck spricht man, wenn es sich beim verwendeten Medium um ein reines Gas oder ein Gasgemisch handelt. Der Gasdruck wird durch die Kräfte des Gases beschrieben, die auf eine Fläche wirken. Durch die chaotische, zufällige Bewegung der Gasmoleküle kommt es durch elastische Stoßwirkung zwischen Gasmolekül und Gefäßwand zu Impulsübertragen, wie in Abbildung 2 dargestellt. Da die Übertragung des Impulses von der kinetischen Energie der Gasmoleküle abhängt, ist der Impuls größer, wenn die innere Energie des Gases höher ist. Die übertragenen Impulse summieren sich aufgrund der hohen Teilchenzahl zu einer Kraft. Mit dieser Gesamtkraft wird die Beziehung zum Gasdruck hergestellt. [5]

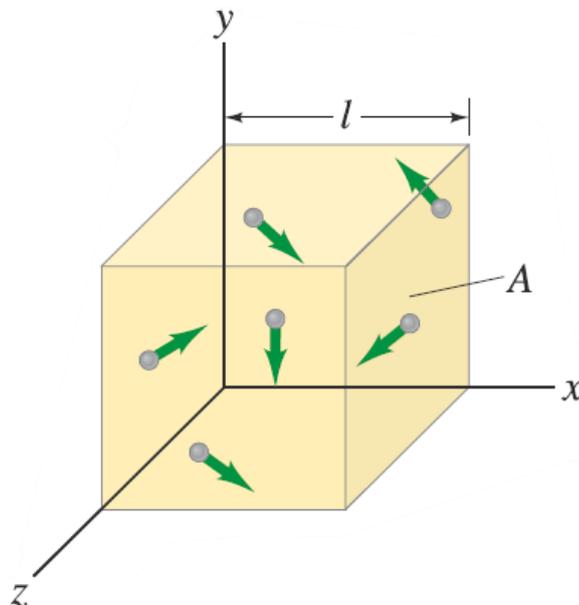


Abbildung 2: Darstellung der chaotischen, zufälligen Bewegung der Gasmoleküle in einem abgeschlossenen System [9]

3.2. Mechanische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die mechanischen Grundlagen dargestellt, welche für die Auslegung von Druckbehältern notwendig sind. Im Kapitel Kesselgleichungen werden die grundlegendsten Berechnungsformeln erläutert.

3.2.1. Kesselgleichungen

Um Auskunft über den ebenen Spannungszustand bei einem Druckbehälter zu erhalten, wird ein dünnwandiger zylindrischer Kessel betrachtet. Dafür werden die nach DIN2413 genormten Kesselgleichungen aus der technischen Mechanik für die Berechnung herangezogen. Die Kesselgleichungen sind einfach aufgebaut, da diese als Membranspannung auf einem Kräftegleichgewicht beruht und dadurch sämtliche Elastizitätsgrößen und Verformungsannahmen nicht berücksichtigt werden müssen. Der Geltungsbereich der Kesselgleichungen beschränkt sich auf dünne und gekrümmte Druckbehälter. Eine Betrachtung des Spannungszustandes für die Herleitung der Kesselgleichungen erfolgt in einem, vom Deckel weiter entfernten Bereich, da in diesen Bereichen ein homogener Spannungszustand vorzufinden ist. Ist die Wandstärke s des betrachteten Behälters viel kleiner als der Radius des Mantels, sprich die Bedingung $s \ll r$ ist erfüllt, so können Spannungen in radialer Richtung vernachlässigt werden. [10, 11]

Ein dünnwandiger Kessel mit den betrachteten Spannungszuständen und den einzelnen Spannungen ist in der Abbildung 3 zu sehen. Je nachdem welche Schnittebene man betrachtet, treten Axialspannungen oder Umfangsspannungen auf.

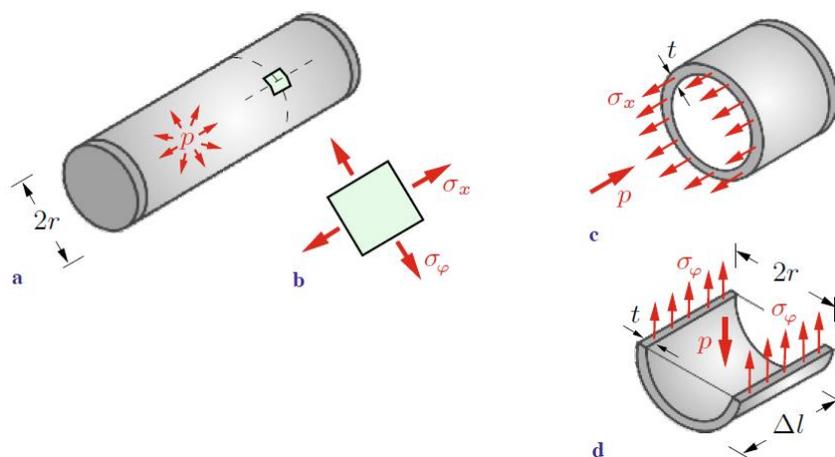


Abbildung 3: Dünwandiger Kessel (a) mit dem betrachteten (lokal ebenen) Spannungszustand (b) (Element in der Tangentialebene), Darstellung der Axialspannung (c) und Umfangsspannung (d) [11]

Bei der Betrachtung der obenstehenden Abbildung 3 ist zu erkennen, dass c) einen Schnitt senkrecht zur Mittelachse darstellt, wobei auf der gesamten Schnittfläche ($\pi * r$) der Druck p gleichmäßig wirkt. Aufgrund der Annahme, dass die Spannung in Längsrichtung gleichförmig verteilt ist, gilt nach [11]:

$$\sigma_x * 2 * r * \pi * s - p * \pi * r^2 = 0 \quad (1.4)$$

Somit gilt für die Längsspannung σ_x :

$$\sigma_x = \frac{p * r}{2 * s} \quad (1.5)$$

In Abbildung 3 Punkt d) ist ein Schnitt entlang der Mittelachse bzw. der Länge l abgebildet. Dabei wirken in den Schnittflächen Spannungen in Umfangsrichtung, wobei der Druck nur auf eine Hälfte des Rohres wirkt, was sich durch eine Verdoppelung der Spannung im Vergleich zu Längsspannung bemerkbar macht. Nach [11] gilt:

$$\sigma_\varphi * 2 * \Delta l * s - p * 2 * r * \Delta l = 0 \quad (1.6)$$

Somit gilt für die Umfangsspannung σ_φ :

$$\sigma_\varphi = \frac{p * r}{s} \quad (1.7)$$

Sollte der Behälter nicht dünnwandig sein, tritt auch eine Radialspannung σ_r auf. In dieser Arbeit wird immer von einem dünnwandigen Behälter ausgegangen, wodurch laut [11] diese Komponenten vernachlässigt werden kann:

$$\sigma_r = -\frac{p}{2} \quad (1.8)$$

Die maximale Schubspannung τ_{max} ergibt sich aus den Hauptspannungen σ_1 und σ_2 wobei die Umfangsspannung $\sigma_\varphi = \sigma_1$, und die Längsspannung $\sigma_x = \sigma_2$ entsprechen [11]:

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} * (\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{p * r}{4 * s} \quad (1.9)$$

Durch Umstellung der Gleichung für die Umfangsspannung und Erweiterung durch zwei Komponenten, c_1 -Wanddickenunterschreitung, welche die auftretenden Minustoleranzen von Erzeugnissen

kompensiert und c_2 -Abnutzungszuschlag, welche die auftretenden Abnützungen durch Erosion usw. ausgleicht, kann jene Berechnungsformel angeschrieben werden, welche als Grundlage für die Berechnungsformel für die Wandstärke im Regelwerk AD-2000 dient [12]:

$$s_{min} = \frac{p * r}{4 * \sigma_{zul}} + c_1 + c_2 \quad (1.10)$$

Die nachstehende Abbildung 4 zeigt einen mit Wasser gefüllten Druckbehälter, der bei einem Explosionsdruckfestigkeitsnachweise aufgrund der Umfangsspannung längs aufgerissen ist. Dieses Schadensbild charakterisiert den häufigsten Schadenfall an Druckbehälter.



Abbildung 4: Längs aufgerissener Druckbehälter aufgrund der hohen Umfangsspannung [13]

3.2.2. Festigkeithypothesen

Für die Berechnung der Vergleichsspannungen können unterschiedliche Festigkeithypothesen angewandt werden.

Folglich werden die gängigsten Festigkeithypothesen und resultierenden Vergleichsspannungen aufgelistet:

- Normalspannungshypothese [11]

$$\sigma_v = \sigma_{max} \quad (1.11)$$

$$\sigma_v = \sigma_\varphi = \frac{p * r}{s} \quad (1.12)$$

- Schubspannungshypothese [11]

$$\sigma_v = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1.13)$$

$$\sigma_v = \sigma_\varphi - \sigma_r = \frac{p * r}{s} - \left(-\frac{p}{2}\right) = \frac{p * (2 * r + s)}{2 * s} \quad (1.14)$$

- Gestaltänderungs-Energie-Hypothese (dreiachsig, siehe Formel 1.15, darunter zweiachsig, siehe Formel 1.16) [11]

$$\sigma_v = \frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1.15)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 * \sigma_2} \quad (1.16)$$

$$\sigma_v = \frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \frac{\sqrt{3}}{2} * \frac{p * r}{s} \quad (1.17)$$

Die Gleichung 1.17 der Schubspannungshypothese kann nun zur Wandstärke umgestellt werden, siehe dazu Gleichung 1.18. Für die Vergleichsspannung kann das Verhältnis von Werkstoffkennwert K und Sicherheitsbeiwert S eingesetzt werden. Der Werkstoffkennwert beschreibt die temperaturabhängige Streckgrenze. Durch die Verwendung des Durchmessers statt des Radius und dem Einsetzen der Zuschlagwerte ergibt sich eine erweiterte Kesselgleichung. [14]

$$s = \frac{p * D_a}{20 * \frac{K}{S} * v + p} + c_1 + c_2 \quad (1.18)$$

3.2.3. Spannungsverläufe

Aufgrund der unterschiedlichen Komponenten aus denen ein Druckbehälter aufgebaut ist, treten auch unterschiedliche Spannungszustände auf. In der Abbildung 5 ist der schematische Spannungsverlauf im zylindrischen Schuss, Krempe und kegeligen Schuss dargestellt, wobei der rotgefärbte Verlauf die Biegespannungen kennzeichnet und der schwarz gefärbte Verlauf die Membranspannungen kennzeichnet. Die unterbrochenen Linien zeigen die Spannungen in Längsrichtung, die durchgezogenen Linien zeigen die Spannungen in Umfangsrichtung. [13].

Unter Membranspannung versteht man einen über die Wanddicke konstanten Normalspannungsanteil, wobei die Biegespannungen in der Schalenmitte vernachlässigt werden können [15, 16].

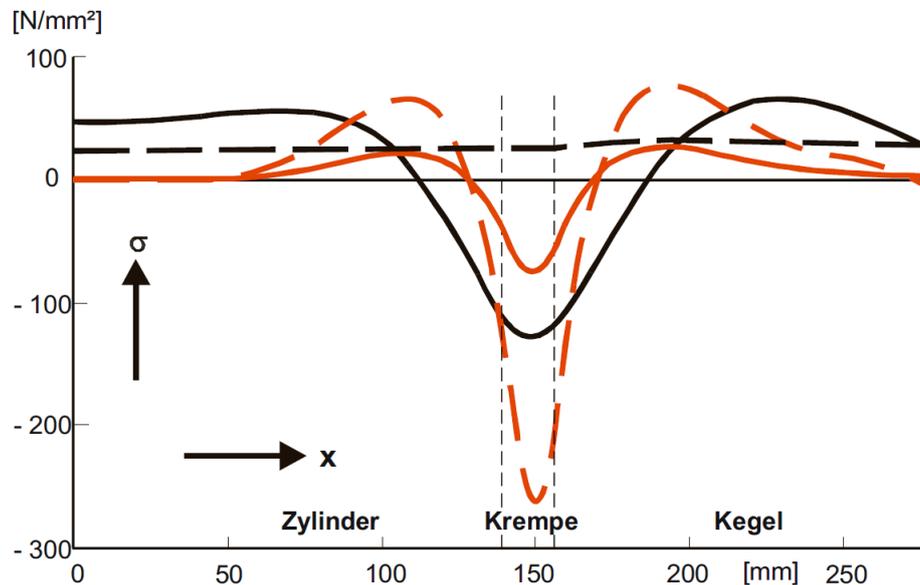


Abbildung 5: Zu erwartender Spannungsverlauf bei einem Druckbehälter unter Innendruck. rot: Biegespannung, schwarz: Membranspannung; strichlierte Linie: Spannung in Umfangsrichtung, durchgezogene Linie: Spannungen in Längsrichtung [13]

Der Spannungsverlauf um eine Stützeinschweißung ist in der nachstehenden Abbildung 6 zu sehen. Auf der linken Seite der Abbildung sind die Spannungsverläufe der Spannungen in Umfangsrichtung σ_u (schwarz) und in Längsrichtung σ_o (rot) des Stützens dargestellt. Auf der rechten Seite der Abbildung 6 sind Spannungen in Umfangsrichtung σ_u (schwarz) und Spannungen in Längsrichtung σ_o (rot) des Zylinders dargestellt. [13]

Diese Spannungsverläufe treten auf, weil es zum einen zur Schwächung der des Zylinderrohres kommt und weil der eingeschobene und verschweißte Stützen als Verstärkung wirkt.

3.2.5. Werkstoffe

Im Behälterbau spielt der verwendete Werkstoff eine wichtige Rolle, da alle Parameter wie etwa Temperatur, Druck und Medium einen großen Einfluss auf den Werkstoff haben [17]. Als Bemessungsgrundlage für Komponenten eines Druckbehälters dienen in erster Linie die mechanische Beanspruchung infolge des herrschenden Innendrucks. Aufgrund diversen Medien kann Korrosion auftreten, was wiederum einen Einfluss auf Werkstoffkennwerte hat [18, 19]. Für die Betrachtung und Unterscheidung bzw. Charakterisierung der Werkstoffe werden allgemein folgende Kennwerte herangezogen [18, 20]:

- Zugfestigkeit R_m
- Streckgrenze R_e
- Warmstreckgrenze (bis 350°C) $R_m(T)$
- Dauerfestigkeit σ_D
- Bruchdehnung ε
- Einschnürung Z
- Kerbschlagzähigkeit α_k
- Verformbarkeit und Verfestigung
- Wärmeleitfähigkeit λ und Wärmeausdehnungskoeffizient α
- spezifische Wärmekapazität c
- Verschleißbeständigkeit
- Korrosionsbeständigkeit

Durch die Verwendung von bedingungsabhängigen Sicherheitsbeiwerten kann aus den Festigkeitskennwerten eine zulässige Spannung ermittelt werden, welche dann für die Auslegung herangezogen werden kann [19].

Im Behälterbau sind die verwendeten Werkstoffe in den Lieferformen Bleche, Rohre, Schrauben, Scheiben und Muttern in vorrangiger Verwendung. Bleche werden in den Lieferformen Grobblech (> 5mm), Mittelblech (3 mm - 4,75 mm) und Feinbleche (< 3 mm) angeboten, wobei diese im normalen Zustand, gerollt oder als gepresster Boden geliefert werden können. [21]

In der nachfolgenden Abbildung 7 ist eine grundlegende Vorgehensweise für die Werkstoffwahl im Anlagen-, Apparate- und Behälterbau als Ablaufschema abgebildet. In diesem Schema kommt es zum Vergleich von Anforderungsspektrum A und Eigenschaftsspektrum E. Das eingehende Anforderungsspektrum A beinhaltet Anwendungsanforderungen wie mechanische und chemische Anforderungen und ist wird üblicherweise aus den Betriebsbeanspruchungsanalyse abgeleitet. Weiteres beinhaltet das Anforderungsspektrum A auch zu erfüllende Fertigungsanforderungen und die zu erfüllenden Normen und Vorschriften. Das Eigenschaftsspektrum E beinhaltet mechanische

Eigenschaften, physikalische Eigenschaften, chemische Eigenschaften, elektrische und magnetische Eigenschaften sowie weitere Punkte wie Verfügbarkeit, Kosten etc. [20]

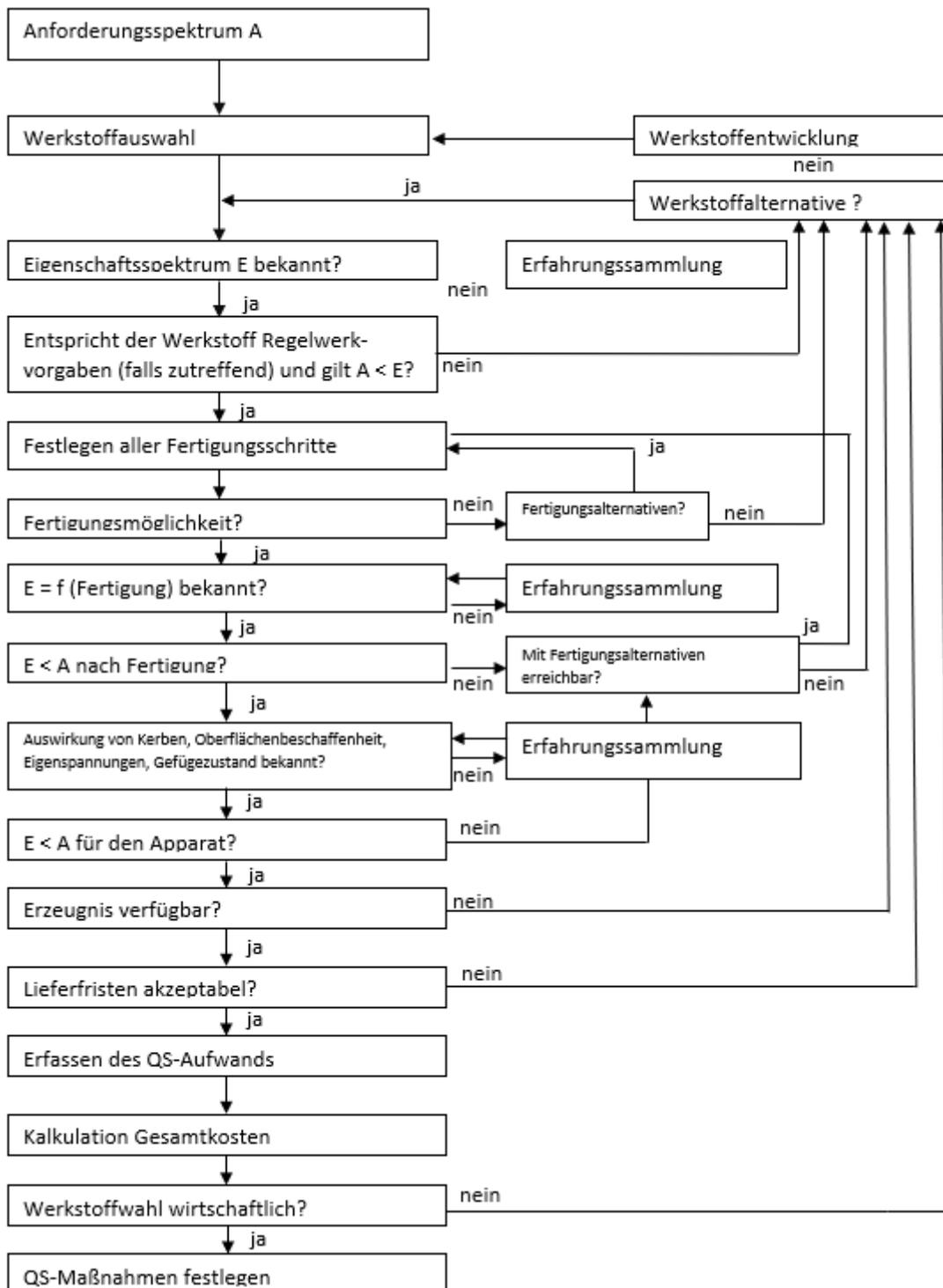


Abbildung 7: Schema der Werkstoffwahl für einen Druckbehälter. Die Anforderungen aus dem Anforderungsspektrum A werden im Ablauf mit den Eigenschaften aus dem Eigenschaftsspektrum E verglichen [20]

Aufgrund der großen Vielzahl an Werkstoffgruppen und deren Werkstoffe gibt es eine Vielzahl an Anwendungen für die einzelnen Werkstoffe. In der nachstehenden Tabelle wird ein Überblick über wichtige Werkstoffe der Gruppe Eisenmetalle und deren Anwendungsbeispiele dargestellt

Tabelle 1: Anwendungsbeispiele für die gängigsten Werkstoffe aus der Werkstoffgruppe Eisenmetalle [20]

Werkstoff	Anwendung
Weicheisen	Dichtungsmaterial
Grauguss	Emaillierte Behälter
Stahlguss	Hochbelastete Maschinenteile
Niedriglegierter Stahl	Behälter und Rohrleitungen
Hochlegierter Stahl – ferritisch	Korrosionsbeanspruchte Behälter, drucklos
Hochlegierter Stahl – austenitisch	Korrosionsbeanspruchte Druckbehälter
Hochlegierter Stahl – martensitisch	Gehärtete und vergütete Teile im Bereich Apparatebau
Hochlegierter Stahl – hitzebeständig	Zunderbeständige Behälter

Einen Überblick über die wichtigsten Werkstoffe im Behälterbau wird in den nächsten Kapiteln gegeben.

Gusseisenwerkstoffe

Folgende Gusseisenwerkstoffe kommen für Druckbehälter zur Anwendung, Grauguss (Gusseisen mit Lamellengraphit, niedriglegiert und unlegiert), Gusseisen mit Kugelgraphit (niedriglegiert und unlegiert) sowie austenitisches Gusseisen mit Lamellengraphit [4].

Grauguss besitzt eine hohe Verschleißfestigkeit, einen erhöhten Korrosionswiderstand aufgrund des hohen Gehalts des als Graphit gelösten Kohlenstoffes und ist zunderbeständig. Vor allem wegen der Beständigkeit gegen Verzunderung findet graues Gusseisen Anwendung bei Schmelzkesseln, Behältern welche sich in Glühöfen befinden und Vergleichbares [19, 20].

Laut [4] Merkblatt-W3 findet der Grauguss bei Druckbehältern ab 20 bar Innendruck seine Anwendungsgrenzen.

Stahlguss

Stahlguss ist im Vergleich zum oben beschriebenen Gusseisen aufgrund seiner größeren Schwindung und höherem Schmelzpunkt schlechter zu vergießen. Da such der Stahlguss aber durch eine höhere Zähigkeit und Festigkeit vom Gusseisen abhebt, wird dieser für hochbeanspruchte Komponenten wie Armaturen etc. verwendet. [19, 20]

Stahl – unlegiert und niedriglegiert

Bei unlegierten und niedriglegierten Stählen unterscheidet man zwischen allgemeinen Baustählen (DIN 17100, 17102), unlegierten und niedriglegierten Kesselbleche (DIN 17155), schweißbare Feinkornbaustähle (DIN 17102), Rohrwerkstoffe (DIN 1629, 17175), Vergütungsstähle/Schraubenwerkstoffe (DIN 267, DIN 17240) sowie kaltzähe Stähle. [19, 20]

Allgemeine Baustähle werden vorwiegend für die Komponenten der Tragelemente (Pratzen, Tragringe etc.) eines Behälters eingesetzt (S185, S235JR, 275JR, S355JR, E295, E335, E360). [19, 20]

Kesselbleche, niedrig- und unlegiert, finden bei Druckbehälter, Dampfkesseln und/oder Rohrleitungen für einen Temperaturbereich von 10 °C bis 500 °C Anwendung und können bis 60mm Wandstärke verbaut werden (P253GH, P265, P295GH, P355GH; 17 Mn 4, 13CrMo 4). [19, 20]

Schweißbare Feinkornbaustähle werden aufgrund ihrer hohen Zähigkeit und höheren Streckgrenze allgemein für Apparate verwendet (S275NL, S2355NL, S355ML, S460NL, S460MNL). [19, 20]

Rohrwerkstoffe werden dort eingesetzt, wo keine besonderen Anforderungen an die Festigkeit gestellt werden. Diese Werkstoffe sind für einen Temperaturbereich von -10 °C bis 300 °C zu verwenden, darüber hinaus müssen warmfeste Werkstoffe verwendet werden (P235GH, P265GH, 15 Mo 3, 13CrMo 44, 15 NiCuMoNb 5). [19, 20]

Vergütungsstähle/Schraubenwerkstoffe finden Anwendung bei Temperaturen von -10 °C bis 300 °C, wobei die gängigsten Festigkeitsklassen 4.6-2, 5.6 und 6.6 sind. Je nach Anforderung können auch höherfeste Materialien verwendet werden (Ck 45, Ck 35, 24 CrMo 5, 21CrMo V 5 11). [19, 20]

Kaltzähe Stähle werden bei tiefen Temperaturen im Apparatebau verwendet, wobei es sich hier meist um Flüssiggasbehälter handelt (14 Ni 6, 10 Ni 14 etc.). [19, 20]

Hochlegierter Stahl

Hochlegierte ferritische Stähle werden für Behälter, Rohrleitungen etc. bei Hochtemperaturanwendungen von (600 °C bis 1200 °C herangezogen. Sie besitzen bei Raumtemperatur eine begrenzte Zähigkeit, sind gut zu verarbeiten, weisen eine hohe Temperaturwechselfestigkeit auf, sind kaum anfällig gegen Spannungsrisskorrosion und sind zunderbeständig (X 10 CrAl 7, X10 CrSi 6). Austenitische Stähle besitzen im Apparatebau aufgrund der guten mechanischen Eigenschaften einen großen Anwendungsbereich. Allgemein sind austenitische Stähle korrosionsbeständig, haben eine hohe Warmfestigkeit, sind einfach zu verarbeiten und weisen bei tieferen Temperaturen einen geringeren Zähigkeitsabfall auf. Je nach Legierung können minimale Temperaturen von -190 °C und maximale Temperaturen von 550 °C als Anwendungstemperatur definiert werden. Die Anwendungsgrenze hinsichtlich des Druckes liegt bei 300 bar (X 2 CrNiN 18 10, X 2 CrNiMoN 18 13). Stähle mit martensitischem Gefüge werden dort angewandt, wo keine

Schweißverbindung hergestellt werden muss. Hitzebeständige Stählen haben den Vorteil, dass sie auch bei höheren Temperaturen eine hohe Zunderbeständigkeit aufweisen. Trotz der hohen Zunderbeständigkeit bildet sich eine dünne Zunderschicht aus, welche aber eine bestimmte Schutzwirkung besitzt, da dadurch die Aufnahme von Elementen bzw. Stoffen aus der Umgebung durch einen erhöhten Diffusionswiderstand erschwert wird. [19]

3.3. Apparate

Apparate kommen vorwiegend in der Verfahrenstechnik zur Anwendung, wobei es sich dabei um ein Bauteil handelt, welches zur Umsetzung von Energie und/oder Stoffen verwendet wird [20]. Da Apparate keine mechanische Arbeit aufnehmen oder abgeben können, sind es keine Maschine und besitzen keine Komponenten, welche zur Kraftübertragung verwendet werden. Apparat ist ein Überbegriff für Behälter, den man in Kessel, Wärmetauscher, Reaktoren, Rohrleitung und Druckbehälter aufteilen kann. Allgemein betrachtet handelt es sich grundlegend um zumindest einen Hohlkörper und zwei Deckeln, welche unlösbar, durch Schweißverbindung, oder lösbar, durch Schraubverbindung, miteinander verbunden sind. Diese Bauteile bilden zusammen einen Behälter, der im Stande ist, Flüssigkeiten oder Gase aufzunehmen. [22]

In der nachstehenden Abbildung 8 ist ein Überblick unterschiedlicher Apparate dargestellt, wobei ein Druckbehälter mit Rohrleitungen aber auch andere verfahrenstechnische Apparate zu sehen sind.



Abbildung 8: Mehrere Ausführungsarten von Apparaten wie Druckbehälter (rechts) und Reaktor (links) [13]

Grundsätzlich kommt es in einem Apparat zur Einwirkung von Druck, Temperatur, und Medium, wodurch bei der Auslegung die verfahrenstechnische und funktionsgerechte Seite aber auch die mechanische und festigkeitsgerechte Seite betrachtet wird. Durch die Koppelung beider Seiten wird ein Bauteil generiert, das sicherheitstechnisch richtig ausgelegt ist und auch funktionsfähig ist. [22]

3.3.1. Unterteilung von Behälter

Abhängig davon, ob ein Behälter mit Druck beaufschlagt wird oder nicht, werden die Behälter in drucklose Behälter und Druckbehälter unterteilt. Bei drucklosen Behältern erfolgt eine weitere Klassifizierung nach [22] in:

- Oberirdische Tanks
- Transportbehälter
- Flüssigkeitsbehälter
- Schüttgutbehälter
- Rühranlagen

Von drucklosen Behältern spricht man, wenn diese für die Lagerung von Flüssigkeiten, Gasen oder Feststoffen mit geringem Über- oder Unterdruck verwendet werden. [19]

Wirkt in einem Behälter ein Druck der $\pm 0,5$ bar vom Atmosphärendruck abweicht, so spricht man von einem Druckbehälter. Sie gehören einem geschlossenen System an oder sind selbst ein abgeschlossenes System. [23]

Neben der Lagerung von Fluiden unter Druck, kann es auch zum Druckanstieg aufgrund verfahrenstechnischer Vorgänge in einem Druckbehälter kommen [22].

3.3.2. Elemente eines Druckbehälters

Druckbehälter besteht aus mehreren Bauteilen, wobei diese grundsätzlich immer aus einem Mantel, zwei Böden, Ausschnitten und darin verbaute Stützen aufgebaut ist. In der nachstehenden Abbildung 9 ist schematisch ein Druckbehälter mit allen möglichen Bauteilen dargestellt.

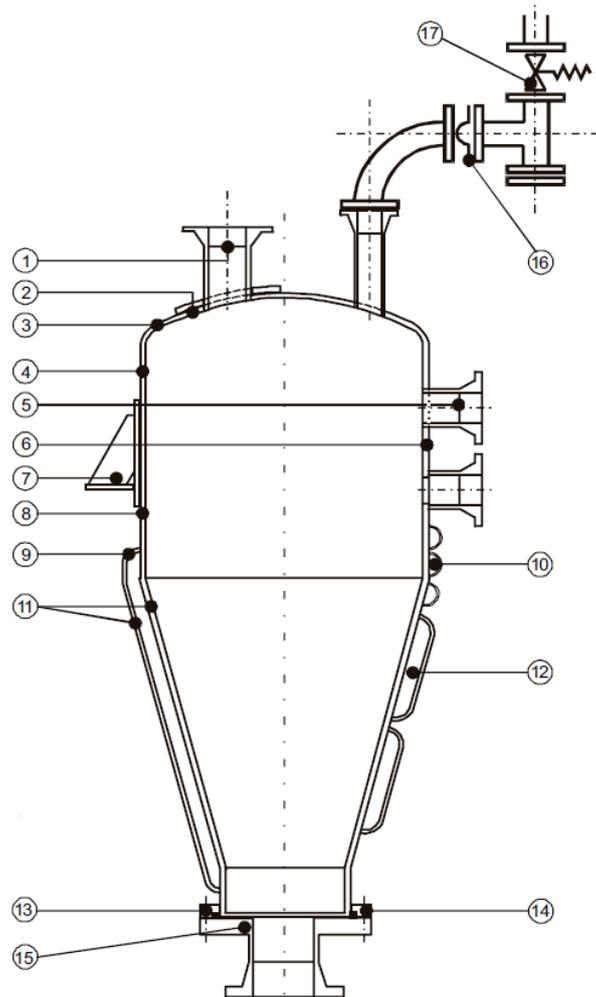


Abbildung 9:Übersicht der möglichen Komponenten eines Druckbehälters bestehend aus zwei Stützen (1,5), zwei gewölbten Böden (2,3), mehreren Mänteln (4,6,8), einer Pratzen (7), einer Krempe (9), einem kegeligen Schuss (11), Schrauben (13), Flansch (14), ebener Boden (15), Berstscheibe (16) und einem Sicherheitsventil (17), [24]

Mantel

Der Mantel eines Druckbehälters, auch zylindrischer Schuss genannt, besitzt in den meisten Fällen eine zylindrische Form, da dieser aufgrund des kreisförmigen Querschnitts einer höheren Druckkraft standhält, siehe Abbildung 10. Bei kegelliger Ausführung spricht man von einem kegeligen Schuss [24]. Anhand der Wandstärke des Mantels unterscheidet man ob es sich dabei um einen dickwandigen oder einen dünnwandigen Druckbehälter handelt. Dies ist abhängig vom s Verhältnis u aus dem äußeren Radius r_a und dem inneren Radius r_i . Die Berechnung des Verhältnisses erfolgt nach Gleichung 1.19 und unterscheidet zwischen einem dünnwandigen und dickwandigen Profil. [25]

$$u = \frac{r_a}{r_i} \qquad \begin{array}{l} u \leq 1,2 \dots \text{dünnwandiges Profil} \\ u \geq 1,2 \dots \text{dickwandiges Profil} \end{array} \qquad (1.19)$$

Ob ein Behälter mit einem Mantel aus einem dünnwandigen oder dickwandigen Profil ausgeführt wird hängt von mehreren Einflussgrößen ab. Diese Größe sind der Berechnungsdruck, Temperaturbelastung, Durchmesser, Werkstoff, Sicherheitswert, Auslastungsgrad der Schweißnaht etc. wird die resultieren Wandstärke beeinflusst. [19]



Abbildung 10: Druckbehälter zylindrischen Schuss und Stützring [26]

Da ein Mantel nicht nur mit innerem Überdruck, sondern auch mit äußerem Überdruck beaufschlagt werden kann, muss auch die Situation des äußeren Überdruckes betrachtet werden. Bei der Berücksichtigung des äußeren Überdruckes müssen die elastische und plastische Verformung betrachtet werden, da es in dieser Art der Druckbeaufschlagung zu unterschiedlichen Verformungen kommt. Diese Verformung macht sich durch Bildung von Falten, dem (Ein-)Beulen sowie dem (Ein-)Knicken sichtbar, wobei Beulen das Ausweichen der Zylinderschale in Richtung normal auf die Fläche ist und das Knicken das plötzliche Ausweichen normal zur Fläche aufgrund von Stabilitätsverlust ist. Je nach Ergebnis müssen Stützringe verbaut werden, welche entgegen des äußeren Überdruckes wirken. In der nachstehenden Abbildung 11, ist ein Kessel abgebildet, der aufgrund äußeren Überdruckes und fehlenden Stützringen eingebeult worden ist. [13, 19, 27]



Abbildung 11: Durch äußeren Überdruck eingebeulter Kessel [22]

In der Verfahrenstechnik sind aber auch Behälter im Einsatz, deren (Teil-)Mäntel kegelförmig ausgeführt sind, wobei es in den allermeisten Fällen eine Kombination aus einem zylindrischen und einem kegeligen Mantel ist, wie in Abbildung 12 dargestellt. Diese werden hauptsächlich verwendet, um Strömungsgeschwindigkeiten des Mediums oder den Massenstrom entlang des Behälters zu verändern. Somit können aufgrund des Durchmesserunterschiedes unterschiedliche Massen an Medium in den jeweiligen Bereichen bewegt werden. Der kegelige Schuss dient somit der einfacheren Entleerung des Behälters. [19]



Abbildung 12: Druckbehälter mit Kombination aus zylindrischen Schuss (oben) und kegeligen Schuss (unten). Der kegelige Schuss wird meist zur Auslassöffnung hin verjüngt. [28]

Abschlusselemente - Böden

Im Behälterbau wird aus einem zylindrischen Schuss durch die Verwendung von Abschlusselementen ein kompletter Druckbehälter. Böden können aber auch verwendet werden, um zwei Räume voneinander abzutrennen und abzudichten. Beispielsweise kann dies zur Trennung zweier Medien dienen um einen Wärmeaustausch über Flächen zu gewährleisten und dabei einen Stofftransport zu verhindern. Die Hauptaufgabe von Böden ist aber das Abschließen von zylindrischen oder kegelförmigen Schüssen um einen Behälter zu bilden, indem das Medium nicht austreten kann. [13]

Bei den Böden unterscheidet man nach [13] zwischen folgenden Ausführungen (siehe Abbildung 13):

- a) Ebener (flacher) Boden – meist nur gebördelt
- b) Leicht gewölbte und gebördelte Böden
- c) Normal gewölbte und gebördelte Böden
- d) Klöpperboden (nach DIN28011/DIN28012)
- e) Korbbogenboden (nach DIN28013/DIN28014)
- f) Halbkugelboden
- g) Kegelboden

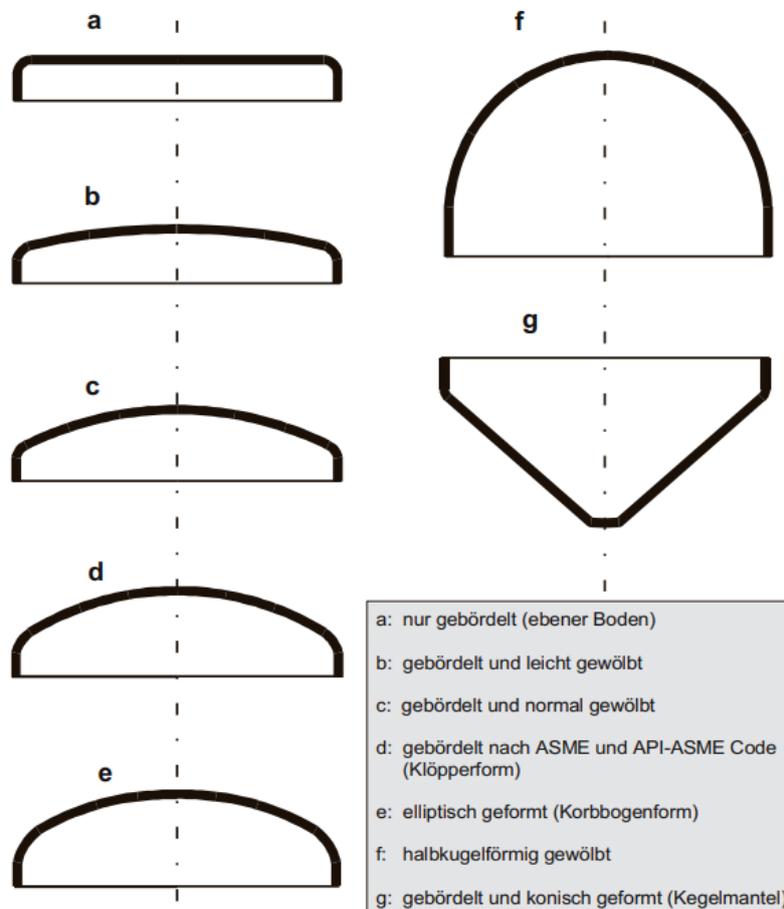


Abbildung 13: Darstellung der gängigsten Bodenformen [13]

Je nach Anwendung bzw. herrschender Bedingungen kann zwischen den einzelnen Böden beliebig gewählt werden. Bei niedrigen Betriebsdrücken werden meist gerade Böden, auch ebene Platten genannt, verwendet. Mit zunehmendem Druck kommen aufgrund des günstigeren Spannungsverhältnisses, gewölbte Böden zum Einsatz. Diese werden aus ebenen Platten (Blechen) hergestellt, wobei hier im Vergleich zu ebenen Böden ein zusätzlicher Kostenaufwand hinzukommt. In Summe sind sie aber, wirtschaftlicher, da die günstigeren Spannungsverhältnisse und das zusätzliche Volumen bei gewölbten Böden die Kosten relativieren. [13]

In der nachstehenden Abbildung 14, werden gängige Böden und deren Preise, Belastbarkeit und Formstabilität dargestellt. Mit steigender Wölbung kommt es zum Anstieg des Stückpreises und zum Anstieg der Formstabilität, wodurch auch die Belastbarkeit erhöht wird. Weiters ist die, schon vorhin erwähnte Volumensteigerung im Boden mit größer werdender Wölbung zu erkennen.

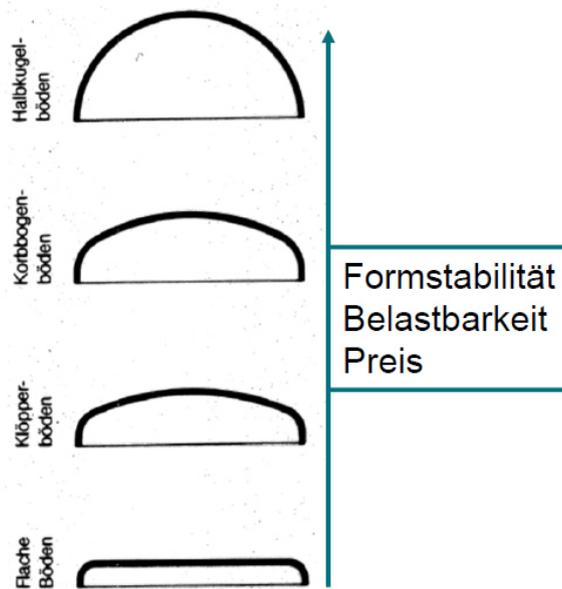


Abbildung 14: Reihung der gängigsten Böden nach Formstabilität, Belastbarkeit und Preis, wobei zu erkennen ist, dass eine steigende Wölbung zum Anstieg der Kosten aber auch der Belastbarkeit aber auch Formstabilität führt. [24]

Ein Boden besteht im Allgemeinen aus einem Bord mit der Höhe h_1 , einer Kalotte mit Radius R und einer Krempe mit dem Radius r , wobei auch noch die Größen wie die Wölbungshöhe h_2 , die Wandstärke s_e und der äußerer Bodendurchmesser D_a für die vollständige Beschreibung eines gewölbten Bodens benötigt wird, siehe Abbildung 15. Der Bord dient als zylindrische Verbindungsstelle zwischen dem Mantel und dem Boden. Die darauffolgenden außenliegenden Teile bezeichnet man als Krempe und ist jener Abschnitt des Bodens, der die Wandstärke des gesamten Bodens bestimmt, da dieser Abschnitt einem bestimmten Verformungsverhalten folgt. Durch den

Innendruck versucht der Krepfenbereich eine ideale Halbkugelform anzunehmen, wodurch hohe Spannungen entstehen. Die Kalotte bildet den kugelförmigen mittleren Teil und dient als Abschluss des Bodens. [4, 13, 22]

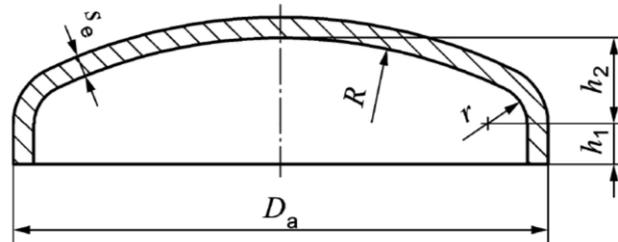


Abbildung 15: Gewölbter Boden mit Kalotte (R), Krempe (r) und Bord (h_1), Wölbungshöhe (h_2), Wandstärke (s_e) und äußerem Bodendurchmesser (D_a) [4]

Stutzen

Stutzen werden entweder am zylindrischen Schuss aufgesetzt oder durchgesteckt. Im Behälterbau dienen sie als Anschluss für weitere Rohrleitungen (Zu- oder Ableitung) oder dienen als Schnittstelle für die Montage von Messgeräten. Der Stutzen besitzt entweder ein Innengewinde für die Ausführung als Muffe oder es wird ein Flansch am Stutzen angeschweißt. Sofern äußere Kräfte und/oder Momente am Stutzen auftreten, müssen diese bei der Auslegung berücksichtigt werden. [22, 25]

Eine Darstellung der unterschiedlichen Ausführungen von Stutzen sind in der Abbildung 16 zu erkennen, wobei a) den Stutzen mit Flansch kennzeichnet und b) die Ausführung als Muffe darstellt.

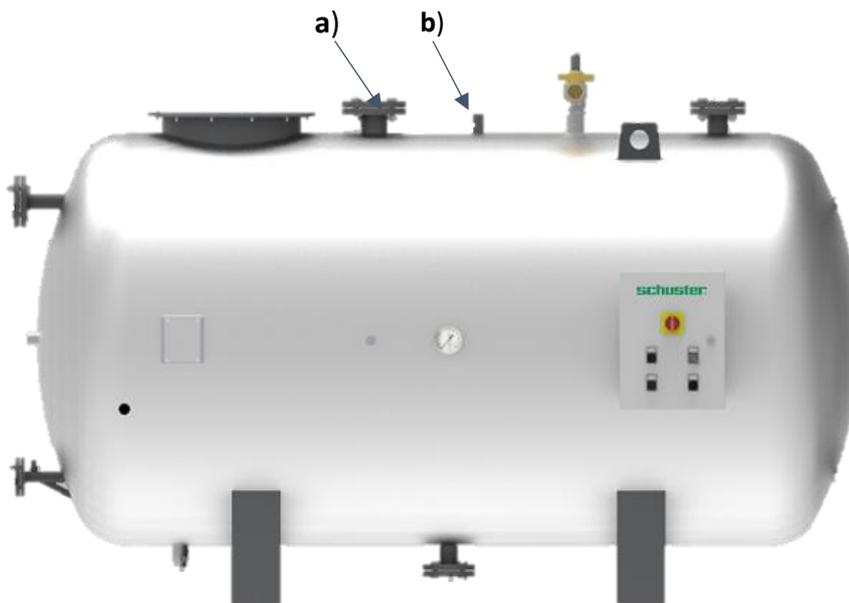


Abbildung 16: Druckbehälter mit Stutzen - a) Stutzen mit Flansch, b) Stutzen mit Innengewinde (Muffe) [29]

In der nachfolgende Abbildung 17 sind die oben beschriebenen Ausführung der Stutzeinschweißung schematisch dargestellt, wobei links der Stutzen aufgesetzt ist und rechts durchgesteckt.

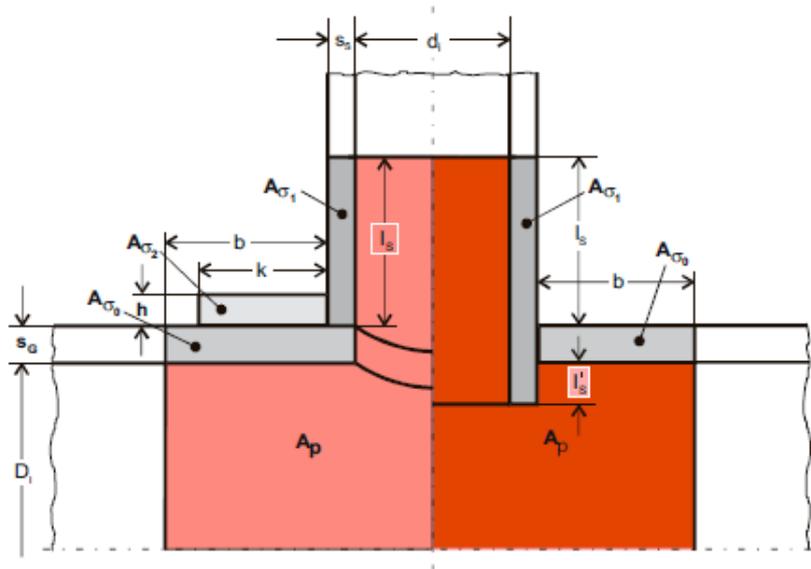


Abbildung 17: Unterschiedliche Arten der Stutzeinschweißung mit einem aufgesetzten Stutzen (links) und durchgesteckte Stutzen (rechts) [13]

Je nach Ausführung der Stutzeinschweißung muss aufgrund des Ausschnittes am zylindrischen/kegeligen Schuss und damit der damit verbundenen Schwächung eine Verstärkung eingebaut werden [24].

Eine Verstärkung kann rohrförmig und/oder scheibenförmig ausgeführt werden. Die Varianten der rohrförmigen Verstärkung ist in nachstehender Abbildung 18 zu sehen. Hier übernimmt ein Rohrstück die Verstärkung, welches als Versteifung des ausgeschnittenen Bereichs wirkt. Die Ausführung a) laut Abbildung 18, zeigt die Möglichkeit des aufgesetzten Rohres, wobei der Innendurchmesser des Rohrs d_i , gleich dem Durchmesser des Ausschnittes entspricht. Ausführung b) und c) zeigen die Variante mit dem durchgesteckten Rohr, wobei sich diese nur durch die unterschiedliche Tiefe des eingesteckten Rohres unterscheiden. Bei beiden Ausführung b) und c) ist der Innendurchmesser des Rohres nicht gleich dem Durchmesser des Ausschnittes. Die geometrischen Größen aller drei Ausführungen a) bis c) sind aber einheitlich charakterisiert durch den Innendurchmesser des Mantels D_i , der Wandstärke des Mantels s_A , Wandstärke des Stutzens s_s , mitttragender Länge l_s und Innendurchmesser des Stutzens d_i . [4]

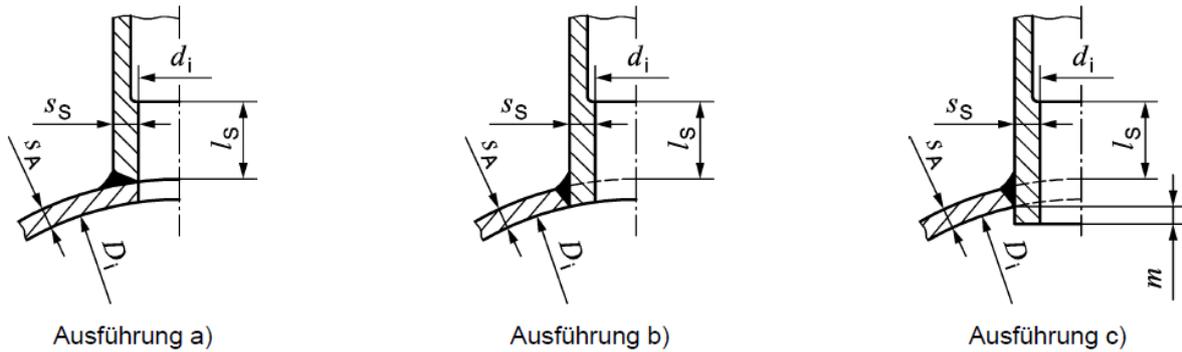


Abbildung 18: Rohrförmige Verstärkung a) aufgesetzt b) durchgesteckt aber bündig mit zylindrischen Schuss c) durchgesteckt [4]

Die zweite Möglichkeit der Verstärkung bildet die scheibenförmige Verstärkung, welche in der nachstehenden Abbildung 19 zu sehen ist. Hier wird der Bereich des Ausschnittes zusätzlich zum eingeschweißten Rohr mit einer Scheibe verstärkt. Dadurch kann die Wandstärke des Stutzens s_s dünner ausfallen, da eine kreisrunde Scheibe diese Stützwirkung übernimmt. Diese Scheibe wird charakterisiert durch die Breite b des Kreisringes und der Höhe h . In der Abbildung 19 werden Ausführung a) und b) gegenübergestellt, wobei hier der Unterschied in der Einstecktiefe und der daraus veränderlichen Größen sich ergeben. Gemeinsam mit der Wandstärke des Mantels und der Höhe der Scheibe ergibt sich die Wandstärke s_A . [4, 22]

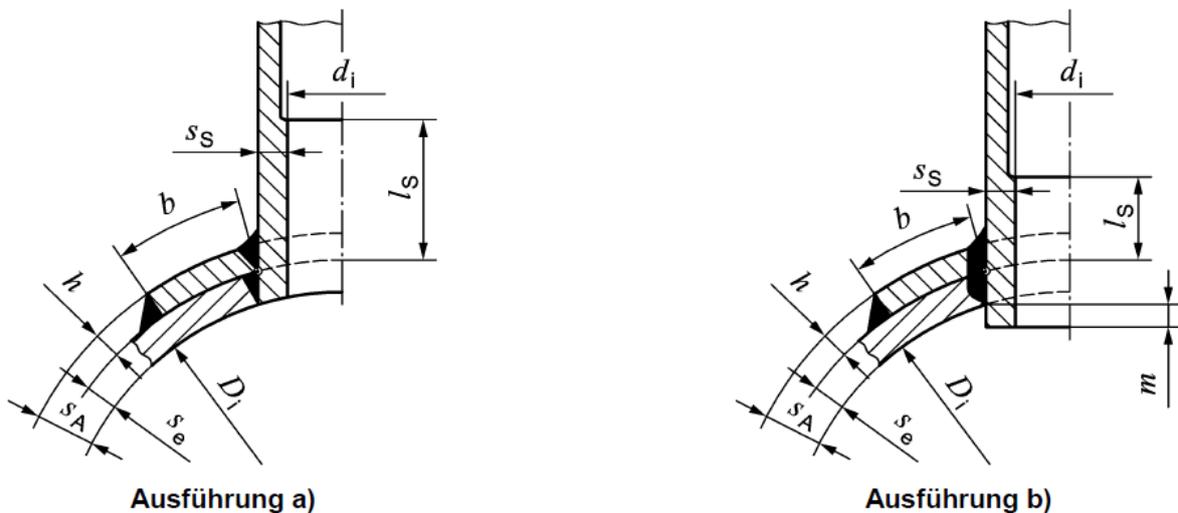


Abbildung 19: Scheiben- und rohrförmige Verstärkung a) eingesteckt mit Scheibe b) durchgesteckt mit Scheibe [4]

Flansche

Im Apparatebau werden Flansche verwendet um Apparate mit anderen Maschinenteilen oder Rohrleitung verbinden zu können. Die Flansche sind an den Stutzen durch eine Schweißverbindung mit dem Behälter verbunden. In den meisten Fällen werden nun Anbauteile, Messgeräte, Rohrleitungen usw. durch eine lösbare Verbindung mit dem Behälter verbunden. Durch eine Schraubenverbindung wird auch eine Flächenpressung erzeugt, welche für das Zusammendrücken des Dichtelementes zwischen den beiden Flanschen benötigt wird. Bei Flanschen gibt es unterschiedliche Ausführungen. Hier unterscheidet man in erster Linie zwischen Losflansche und Festflansche, wobei diese als Flansch oder Blindflansch, falls der Stutzen verschlossen werden soll, ausgeführt werden können. [20]

In der untenstehenden Abbildung 20 sind die gängigsten Flanschausführungen zu sehen.

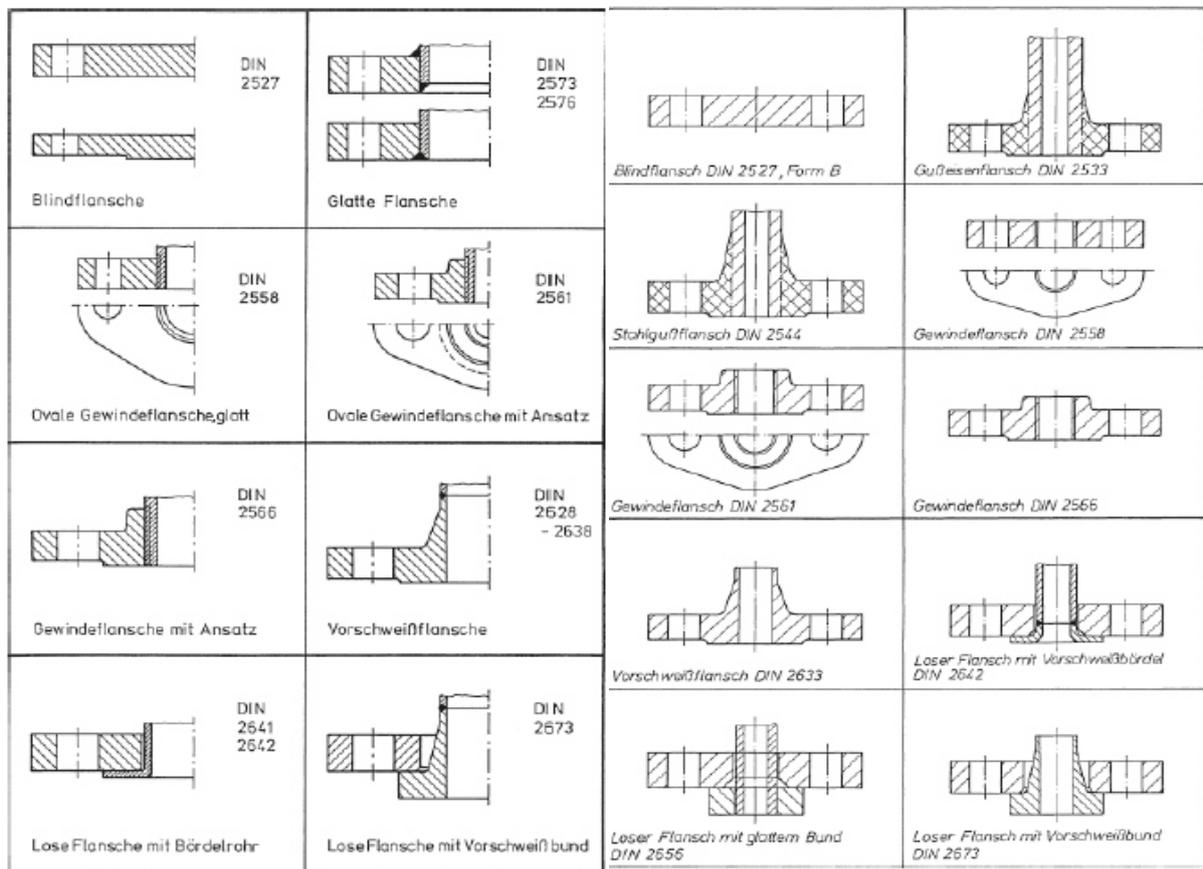


Abbildung 20: Darstellung der unterschiedlichen Ausführungsarten von Flanschen [22]

Um die oben dargestellten Flansche verbinden zu können, werden Schrauben benötigt, die im nachstehenden Kapitel Schrauben beschrieben werden.

Schrauben

Für die in Kapitel Flansche beschriebene lösbare Verbindung von Flanschen werden Schrauben verwendet. Neben der Verbindung mit weiteren Teilen aus dem Bereich des Apparatebaus werden diese Schraubenverbindungen auch dafür verwendet um die erforderliche Pressung der Dichtelemente zu gewährleisten. Im Apparatebau werden dafür Dehnschrauben (Schaftdurchmesser $d_k < \text{Gewindedurchmesser } d_G$) oder Schaftschrauben (Schaftdurchmesser $d_k = \text{Gewindedurchmesser } d_G$) (bis ~ 40 bar und 300°C) verwendet, siehe Abbildung 21. Bei auftretenden Druck- und Temperaturwechseln werden zusätzlich zu den Dehnschrauben noch Dehnhülsen verwendet, um die benötigte Gewindepressung auf längeren Zeitraum gewährleisten zu können. Alternativ können auch beispielsweise Spannscheiben oder Tellerfedern verwendet werden. [13, 22]

Die, durch die Schraubenverbindung erzeugte Schraubenkraft muss so gewählt sein, dass folgende Punkte nach [22] erfüllt werden:

- Aufnahme von Wärmespannungen
- Aufnahme von Kräften (Dichtung, Ringflächen, Rohr)
- Schließen des Dichtspaltes
- Ausgleichen der Unebenheit der Dichtflächen durch Anpassung der Dichtung

Wie in Abbildung 21 zu erkennen, können Flansche mittels Schaftschraube oder Dehnschraube in Kombination mit einer Dehnhülse verwendet werden. Unabhängig von Art der Schraube muss eine bestimmte Flächenpressung erreicht werden, damit ein fester Sitz der Dichtung gewährleistet wird, siehe dazu linke Einbausituation in Abbildung 21.

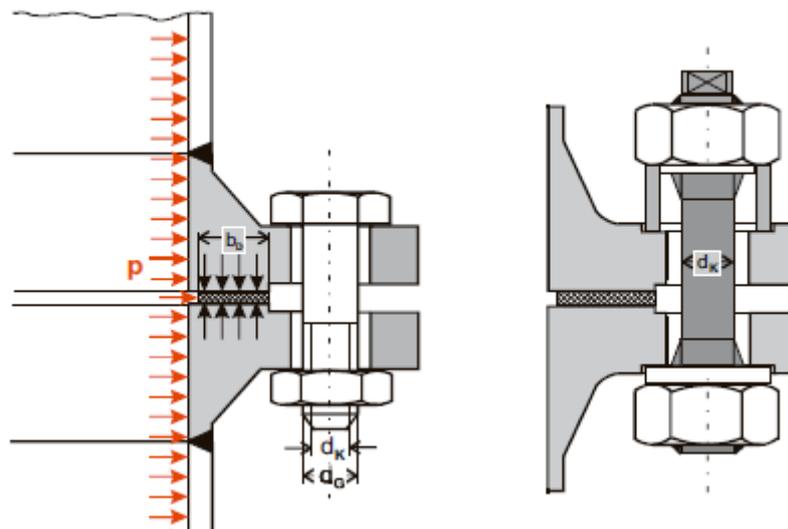


Abbildung 21: Flansche links mit Schaftschraube (Schaftdurchmesser d_k und Gewindedurchmesser d_G und rechts mit Dehnschraube (Schaftdurchmesser d_k) und Dehnhülse verbunden. Der Druck p im Inneren versucht die Dichtung mit der Breite b_0 auszublasen, wodurch eine Flächenpressung durch die Schraubenverbindung aufgebaut werden muss. [13]

Die benötigte Flächenpressung hängt von der verwendeten Dichtung ab, welche im nachstehenden Kapitel Dichtungen behandelt werden.

Dichtungen

Im Behälterbau werden Dichtungen hauptsächlich für das Abdichten verwendet, um den Austritt des verwendeten Mediums zu verhindern. Weiters haben sie die Aufgabe, Räume mit unterschiedlichen Betriebsdrücken abzutrennen. Im Behälterbau werden ausschließlich statische Dichtungen verwendet, da mit Ausnahme von Rührwerken, keine Relativbewegung zwischen den einzelnen Bauteilen auftritt. [19, 30]

Im Behälterbau haben sich folgende Ausführungsformen von Dichtungen etabliert:

- O-Ringe
- Dichtungsbänder
- Flachdichtungen

O-Ringe kommen als radial-statische Abdichtung von Rohren, Zylindern, Deckeln oder Buchsen zum Einsatz. Im Bereich der axial-statischen Abdichtung findet sie vermehrt bei Verschlüssen und Flanschen Anwendung [31].

Flachdichtungen werden meist bei Überwurfmutter und Flanschverbindung eingesetzt [32]. Dichtungsbänder kommen bei der Abdichtung von Gewinde zum Einsatz [33].

Tragelemente

Tragelemente dienen zur Abstützung von liegenden oder stehenden Druckbehältern, da diese im Vergleich zu drucklosen Behältern (meist mit Flachböden ausgeführt) aufgrund der gewölbten Böden nicht direkt abgestellt werden können [27, 34]. Tragelemente werden wie folgt eingeteilt:

- Verankerung (Tragsättel, Standzargen, Füße)
- Verankerungen hängend (Tragringe, Prätzen)
- Transportelemente (Transportflaschen, Hebeösen, Tragzapfen)

In der nachstehende Abbildung 22 sind die unterschiedlichen Ausführungsarten der Tragelemente für liegende und stehende Lagerung des Behälters dargestellt. Die dort dargestellten Bauteile Zarge, Fuß, Pratze, Stutzen, Sattel, Doppelmantel und Ring dienen zur Aufnahme des Behälters auf dem Boden oder einem Gerüst. Mit der Hebeöse und der Hebekonsole kann der Behälter gehoben werden. [13, 35]

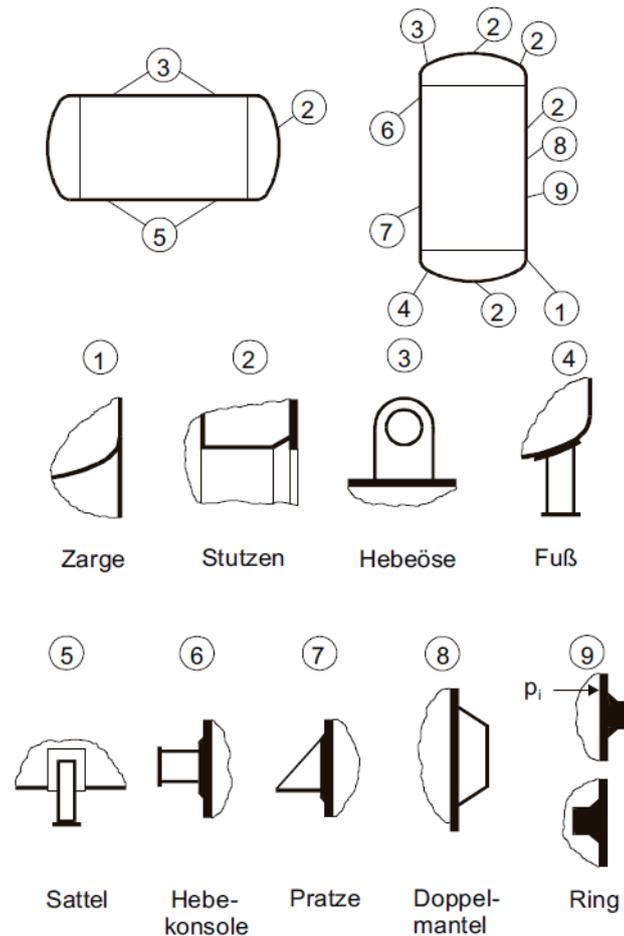


Abbildung 22: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Tragelemente [13]

Absicherungselemente

Um die Sicherheit bei Druckbehältern gewährleisten zu können werden sogenannte Absicherungselemente verwendet. [22]

Diese Elemente sollen ein Überschreiten des zulässigen Betriebsdruckes im Behälter begrenzen. Man unterteilt Absicherungselemente in mechanische (Berstscheiben und Sicherheitsventile) sowie mess- und regeltechnische Elemente. [13]

Sicherheitsventile öffnen ab einem eingestellten Druck und das Medium strömt durch die Austrittsöffnung aus, wobei der Überdruck abgebaut wird. [36] Der Aufbau eines Sicherheitsventils ist in Abbildung 23 dargestellt. Bei Berstscheiben, wie in Abbildung 24 dargestellt, kommt es zum Abbau des gesamten Überdruckes durch Versagen durch Bruch aufgrund von Biegebeanspruchung der Berstscheibe wenn der maximale Druck erreicht wird [37].

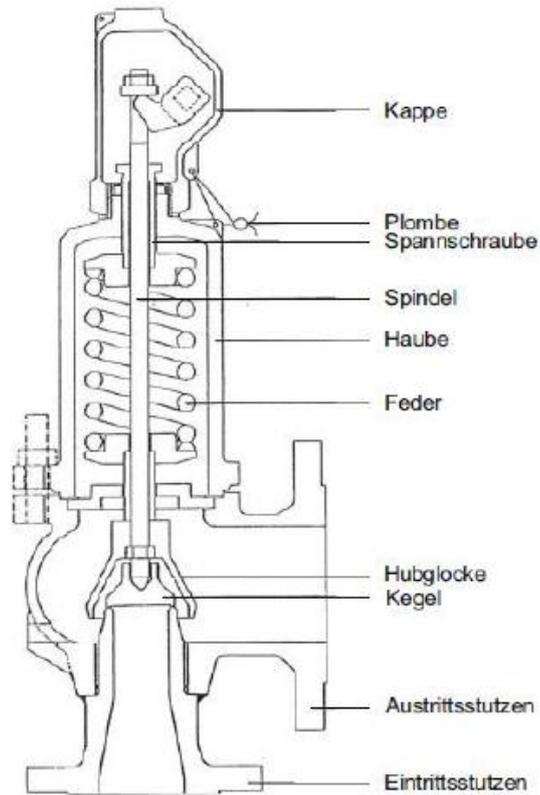


Abbildung 23: Schnitt durch ein federbelastetes Sicherheitsventil [13]

In der Abbildung 24 sind die beiden Ausführungen der Berstscheiben zu sehen. Im oberen Bereich ist eine Knickberstscheibe und im unteren Bereich ist eine vorgewölbte Berstscheibe zu erkennen.

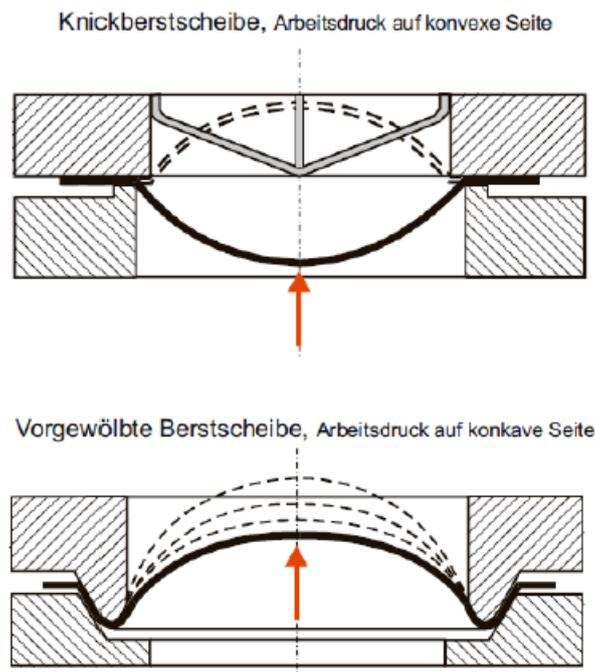


Abbildung 24: Anwendung von Berstscheiben für die Druckbegrenzung. Gegenüberstellung Knickberstscheibe (Druck auf konvexer Seite) und vorgewölbte Berstscheibe (Druck auf konkaver Seite) [13]

3.3.3. Einstufung von Druckgeräten

Laut der Druckgeräterichtlinie, Anhang II, muss eine Einstufung von Druckbehältern in eine Kategorie erfolgen. Eine Kategorie steht für ein bestimmtes Gefahrenpotential, wobei Kategorie I durch ein niedriges und Kategorie IV durch ein hohes Gefahrenpotential bestimmt ist. Essentielle Faktoren für die Einstufung sind hierbei der Inhalt, der Aggregatzustand und die Fluidgruppe sowie der Druck. Weiters besitzt jede Kategorie noch zusätzlich einzelne Module, wobei jedes einzelne Modul das Verfahren zu Erlangung der Konformität beschreibt. Alle Druckgeräte müssen unabhängig von der Einstufung eine CE-Erklärung besitzen. Eine Ausnahme gibt es bei Druckbehältern der Kategorie I, diese besitzen keine C-Erklärung, da die die jeweiligen Sicherheitsanforderungen nicht erfüllt werden und auch nicht erfüllt werden müssen. [38, 39]

In der nachstehenden Tabelle 2 sind die Kategorien und deren Module zusammengefasst:

Tabelle 2: Übersicht der Kategorien und deren Modul

Kategorie I	Kategorie II	Kategorie III	Kategorie IV
Modul A	Modul A2	Modul B(E) + F	Modul G
-	Modul D1	Modul (B)(B) + C2	Modul B(B) + F
-	Modul E1	Modul B(E) + D	Modul B(B) + D
-	-	Modul B(B) + E	Modul H1
-	-	Modul H	-

Um die richtige Kategorie ermitteln zu können, müssen mehrere Schritte durchgeführt werden. Grundsätzlich muss überprüft werden ob es sich um einen Druckbehälter handelt ($p > 0,5 \text{ bar}$). Weiteres darf kein Ausschluss nach AD 2000 Art. 1 Abs. 2 vorliegen. Ausschluss wäre zum Beispiel, wenn es sich um ein Rohrsystem, einen einfachen Druckbehälter gemäß Druckgeräterichtlinie 2014/29/EU oder einer Aerosolpackung gemäß 75/324/EWG und weiteren Beispielen handelt. Des Weiteren muss unterschieden werden, ob es sich um einen befeuerten oder unbefeuerten Behälter handelt. Für die Ermittlung der Kategorie ist weiters eine darauffolgende Unterscheidung, ob es sich um eine Rohrleitung oder einen Behälter handelt wichtig. Danach wird unterschieden ob es sich beim Medium um ein Gas oder eine Flüssigkeit handelt und deren Dampfdruck über 0,5 bar liegt. Danach erfolgt eine Unterteilung des Fluids nach den Fluidgruppen. [4, 39, 40]

Nachdem diesen Fragen beantwortet wurde, kann mithilfe des dementsprechenden Diagramms durch Auftragen des Druckes und des Volumens die vorliegende Kategorie ermittelt werden. In der nachfolgenden Abbildung 25 ist ein solches Diagramm für die Bestimmung der Kategorie abgebildet.

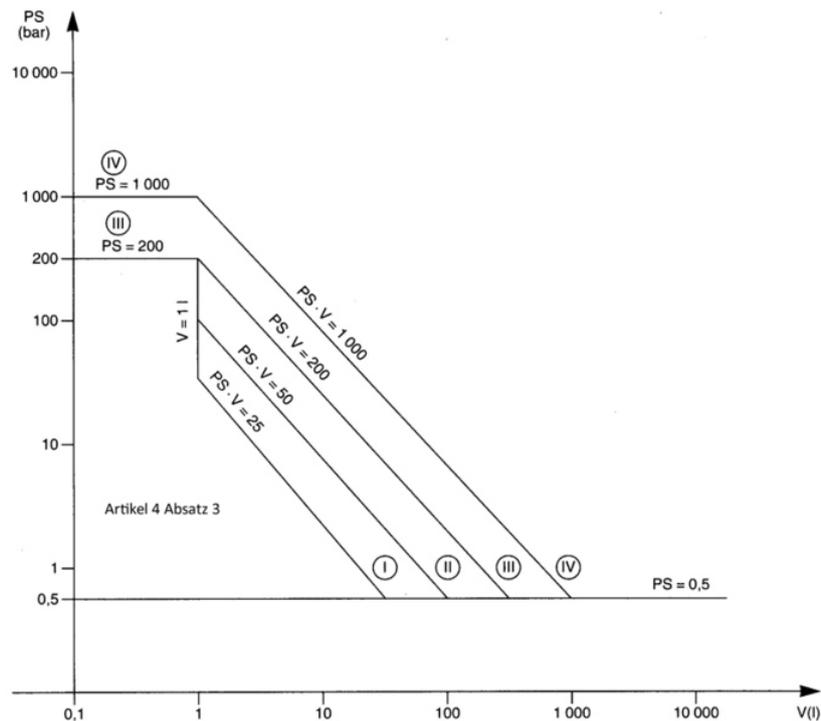


Abbildung 25: Diagramm für die Bestimmung der Kategorie, der Druck ist über dem Volumen aufgetragen. Bestimmung der Kategorie durch einsetzen der Wert für Druck und Volumen [39]

Um ein Konformitätsbewertungsverfahren innerhalb einer Kategorie wählen zu können, muss eine Modulkombination bzw. ein einzelnes Modul gewählt werden. Je nach Modul müssen der notifizierten Stelle unterschiedliche technische Dokumente vom Hersteller zur Verfügung gestellt werden [41].

Das Modul A und A2 beinhaltet die interne Fertigungskontrolle. Bei Modul A ist der Hersteller selbst für die interne Fertigungskontrolle verantwortlich. Die Erweiterung A2 sagt aus, dass zusätzlich zu internen Fertigungskontrolle durch eine stichprobenartige Druckgeräteprüfung erweitert wird. [39]

Das Modul B(B) fordert die EU-Baumusterprüfung, daher der Zusatz (B) für Baumusterprüfung. Hier kommt es zur Feststellung, ob die Druckgeräterichtlinie vom Hersteller erfüllt worden ist, wobei dafür die Prüfung eines Baumusters und Durchsicht der technischen Unterlagen durch eine notifizierte Stelle erfolgt. [39]

Modul B(E) fordert als Bewertungsverfahren für die Konformität ein Entwurfsmuster, daher Zusatz (E) für Entwurfsprüfung. Bei Modul B(E) entfällt jedoch das Baumuster. Hier genügt die Prüfung der technischen Unterlagen zur Feststellung, ob die Anforderungen der Druckgeräterichtlinie vom Hersteller erfüllt worden sind. [39]

Modul C2 erlangt den Nachweis der Konformität mit der sogenannten Bauart. Die Herstellererklärung, die in der EU-Baumusterprüfbescheinigung beschrieben ist, ist für eine Bauart des Druckgerätes notwendig. Es erfolgen stichprobenartige Kontrollen durch die notifizierte Stelle, von Prüfung und Fertigung des Herstellers. [39]

Modul F und G benötigt für die Konformitätserklärung eine Einzelprüfung. Die Feststellung der Konformität erfolgt bei diesen Modulen durch eine Einzelprüfung. Die Prüfung und Abnahme des Druckgerätes erfolgen durch eine unabhängige Instanz. Nach positiver Prüfung und Abnahme, erfolgt die CE-Kennzeichnung und Ausstellung der Konformitätserklärung. [39]

Modul D, D1, E, E1, H, H1 erlangen durch Qualitätssicherungs-Systeme die Konformität. Diese Module beinhalten Qualitätssicherungs-Systeme (QS), um Ziele in der Qualität zu setzen und zu überwachen. Die QS im Bereich des Produktionsprozesses wird den Modulen D und D1 geregelt. Module E und E1 befassen sich mit der QS des Produktes selbst. Umfassende QS wird durch das Modul H abgedeckt. Überwachung und Entwurfsprüfung wird durch das Modul H1 geregelt. [39]

3.4. Vergleich zwischen EN13445 und AD 2000

Für die Auslegung eines Druckbehälters können unterschiedliche Regelwerke und Normen herangezogen werden.

Bei der EN13445 handelt es sich um eine harmonisierte Norm, die aus der Druckgeräte-Richtlinie 2014/68/EU hervorgegangen ist und diese auch erfüllt [42].

Die AD 2000 (Arbeitsgemeinschaft Deutschland) ist ein Regelwerk, bei dem ebenfalls die Dimensionierung und Konstruktion von Druckbehältern beschrieben wird. Dabei handelt es sich um keine Norm, sondern um ein Regelwerk, bei dem es zur Spezifizierung und Präzisierung der Anforderungen der EN-Normen und Druckgeräte-Richtlinie kommt. [43]

Folgende wichtige Unterschiede treten nach [44] zwischen der EN13445 und der AD 2000 auf:

- Die EN 13445 gilt im Vergleich zum AD 2000-Regelwerk nur für unbefeuerte Behälter
- Die Norm EN 13445 beinhaltet ein besseres Sprödbruchkonzept, wobei drei unterschiedliche Verfahren für dieses Konzept zur Verfügung stehen.
- Mit dem AD 2000-Regelwerk können im Vergleich zur EN13445 auch nichtmetallische Druckbehälter ausgelegt werden.
- Zusätzliche konstruktive Möglichkeiten werden in der EN 13445 im Vergleich zur AD 2000 geboten
- In der EN 13445 ist die Grenze für ruhende Beanspruchung deutlich niedriger als in der AD 2000
- Die EN 13445 bietet im Vergleich zum AD 2000-Regelwerk die Möglichkeit eines analytischen Nachweises

- Für die Anwendung der AD 2000-Merkblätter benötigen die Hersteller eine Qualifizierung von einer unabhängigen Stelle (TÜV). Da es sich bei der EN 13445 um eine harmonisierte Norm handelt wird hier keine Qualifizierung benötigt.
- Bei der EN 13445 richtet sich der Prüfungsumfang für Schweißungen nach der Schweißnahtlänge
- Schweiß- oder Prüfaufsichten werden in der EN 13445 nicht gefordert

4. Gefahrenanalyse

Um Gefahren, Probleme oder Fehler schon frühzeitig erkennen zu können, wurde eine Gefahrenanalyse erstellt. Diese Analyse soll zeigen, wo Gefahren aber auch Fehler bei der Auslegung auftreten können. Da es sich hier um eine Komponente handelt, bei deren eine Fehlfunktion, eine falsche Auslegung oder eine falsche Anwendung zum Ausfall der Anlage bis hin zum Personenschaden kommen kann, müssen alle möglich auftretenden Gefahrenquellen analysiert und so behandelt werden, dass diese nicht oder nur selten auftreten können.

In diesem Kapitel wird die Gefahrenanalyse kurz beschrieben, wobei die gesamte Analyse auch im Anhang A dargestellt ist.

Jede mögliche Gefahr ist mit einer Laufnummer gekennzeichnet. Die Gefahren werden anhand von Vorgaben der Druckgeräterichtlinie (2014/68/EU) definiert. Eine Nichtbeachtung oder falsche Behandlung der in der DGRL aufgelisteten Punkte, führt zu einer zusätzlichen potentiellen Gefahrenquelle. Es werden auch die Sicherheitsanforderungen für die jeweilige Gefahr dargestellt, sowie mögliche Maßnahmen zur Minderung beziehungsweise vollständigen Beseitigung ebendieser Gefahr. Sollte die Gefährdung durch die Maßnahmen nicht vollständig beseitigt worden sein, wird eine Möglichkeit der Kennzeichnung bzw. Information auf die Restgefahr in der Betriebsanleitung vorgegeben. [45]

Um die in der Gefahrenanalyse aufgezeigten Gefahren minimieren zu können, werden diese in eine Risikoanalyse übergeleitet. Die Risikoanalyse ist ebenfalls im Anhang B zu finden. In der Risikoanalyse kommt es zur Charakterisierung des Versagens die durch die Gefahren aus der Gefahrenanalyse auftreten können. Dabei wird die Versagensart, die Ursache des Versagens, die Auswirkung und Entdeckungsmaßnahme definiert. Nach der ersten Bewertung der Charakteristik folgt die Definition der Maßnahmen um die zuvor berechnete Risiko-Prioritätszahl senken zu können und somit das Risiko zu minimieren. Dazu muss eine Maßnahme empfohlen werden, danach wird festgehalten welche Maßnahme festgelegt wurde und es folgt eine Beschreibung der implementierten Maßnahme, wobei hier beschrieben wird ob und wann die definierte Maßnahme durchgeführt wurde. Somit lässt sich eine zweite Bewertung durchführen, wobei hier die Risiko-Prioritätszahl geringer ausfallen muss, da die die Maßnahmen zur Risikominimierung führen sollen. Der Vergleich, wie sich die Risiko-Prioritätszahl zur ersten Bewertung verhält, kann in Diagrammen dargestellt werden, wobei dafür beide Werte der Bewertung gegenübergestellt werden.

Eine Risiko-Prioritätszahl ist das Produkt aus Auftretenswahrscheinlichkeit, Stärke der Auswirkung eines Fehlers und Wahrscheinlichkeit der Fehlerdetektion. Die Analyse und die Diagramme dafür sind dem Anhang zu entnehmen.

5. Konzipierung und Auslegung des Druckbehälters

In diesem Kapitel werden wesentliche Punkte und Vorgehensweisen, die für die Konzipierung des Druckbehälters angewandt worden sind, beschrieben.

5.1. Anforderungen an die Druckkammer

Die Druckkammer soll für einen Druck von $p = 100 \text{ bar}$ und einem Volumen von $V \sim 200 \text{ l}$ ausgelegt werden. Durch den Schweißprozess im Inneren soll die Auslegungstemperatur im Bereich von 20 °C bis 220 °C erfolgen. Das verwendete Fluid ist Argon, es kann aber auch Helium zum Einsatz kommen.

Die nachstehende Tabelle 3 zeigt einen Überblick über die physikalischen Anforderungen an die Druckkammer.

Tabelle 3: Zusammenfassung der physikalischen Anforderungen an die Druckkammer

Anforderungen	
Auslegungsdruck p	100 bar
Auslegungsvolumen V	200 l
Minimale Temperatur T_{MIN}	20 °C
Maximale Temperatur T_{MAX}	220 °C

Die Druckgeräterichtlinie (2014/68/EU) schreibt nicht vor ob die harmonisierte Norm EN13445 oder das AD 2000-Regelwerk für die Auslegung verwendet werden soll. Auch bei dieser Arbeit gibt es keine Vorgabe.

Der Druckbehälter soll über folgende zusätzliche Komponenten verfügen:

- Anschluss – für Vakuumpumpe
- Auslassventil
- Anschluss für Drucküberwachung
- 7 Anschlüsse für Gas/Wasser
- 3 Anschlüsse für Schweißstrom
- Erweiterung von 3 auf 4 Anschlüsse für die Elektronik

Es soll die Möglichkeit bestehen den Schweißprozess von drei Stellen beobachten zu können. Aufgrund der Gegebenheiten, wie zum Beispiel der Anschlüsse am Deckel, werden die drei Viewports an anderen Bereichen des Druckbehälters positioniert. Die Viewports ermöglichen eine Sicht in das Innere der Druckkammer und werden daher zweimal am zylindrischen Mantel und einmal am Boden eingeplant.

Des Weiteren soll ein vorhandener Verschluss, in Form eines C-Klammer-Verschlusses, so konstruiert werden, dass dieser einfach zu handhaben ist.

In der folgenden Abbildung 26 ist eine Skizze des Druckbehälters zu erkennen.

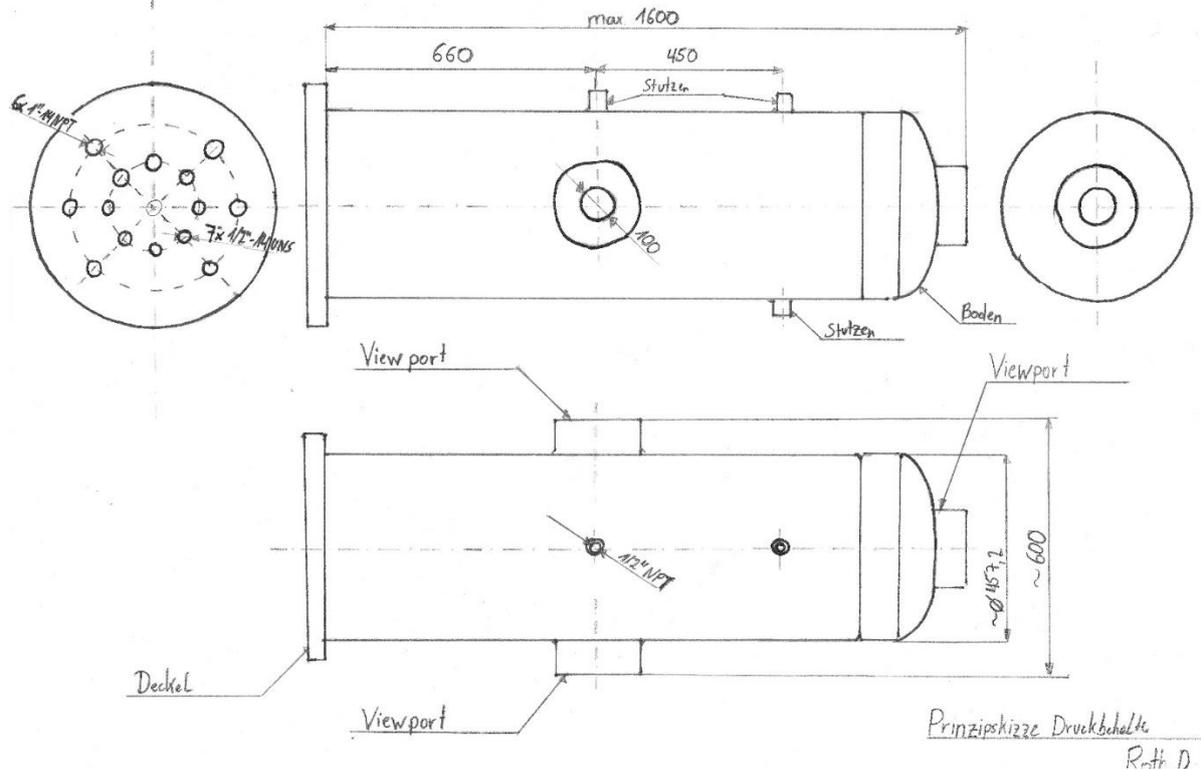


Abbildung 26: Erste Prinzipskizze für die Hauptabmessungen des Druckbehälters, sowie die Positionen der Viewports, Muffen und Anschlussgewinde.

5.2. Einstufung und Konformitätsbewertung

Durch die Einstufung und Konformitätsbewertung kommt es bei richtiger Ausführung zur Erlangung der Konformität. Dies wird durch die CE-Kennzeichnung vom Hersteller symbolisiert und besagt, dass das Produkt den geltenden Anforderungen nach der Druckgeräterichtlinie (2014/68/EU) genügt. In der nachstehenden Tabelle 4 sind die wichtigen Punkte für die Einstufung zu entnehmen. Dabei wird die Anwendung der Druckgeräterichtlinie (2014/68/EU) überprüft und die vorgesehene Kategorie durchgeführt. Sollten hier Abweichungen zu den Vorgaben laut [39] geben, so erfolgt keine Einstufung, da es kein Druckbehälter ist. [4, 39, 46]

Tabelle 4: Tabellarische Übersicht für die Einstufung des Druckbehälters

Bedingung/Fragestellung	Erfüllt/nicht erfüllt
max. zulässiger Druck $p > 0,5$ bar	JA, $p = 100$ bar
Liegt ein Ausschlussgrund nach Artikel 1 Absatz 2 in der AD 2000 vor?	NEIN
Handelt es sich um ein Ausrüstungsteil mit Sicherheitsfunktion nach Artikel 4 Absatz 1 der Druckgeräterichtlinie?	NEIN
Handelt es sich um einen befeuerten Druckbehälter?	NEIN
Besitzt der Druckbehälter eine Fremdbeheizung?	NEIN
Handelt es sich um einen Behälter oder eine Rohleitung?	BEHÄLTER
Medium Gas oder Flüssigkeit (zusätzlich muss der Dampfdruck bei zul. maximalen Temperatur $0,5$ bar über dem Atmosphärendruck liegen)	Gas
Zugehörigkeit Gas zur Fluidgruppe 1 oder Fluidgruppe 2	Fluidgruppe 2
Maximaler Druck / Volumen	100 bar / 200 l
KATEGORIE IV	

Aufgrund der Feststellung, dass es sich beim Fluid um ein Gas (Argon oder/und Helium ist) handelt, welches der Fluidgruppe 2 angehört, kann das Diagramm aus Abbildung 27 zur Bestimmung der Kategorie herangezogen werden.

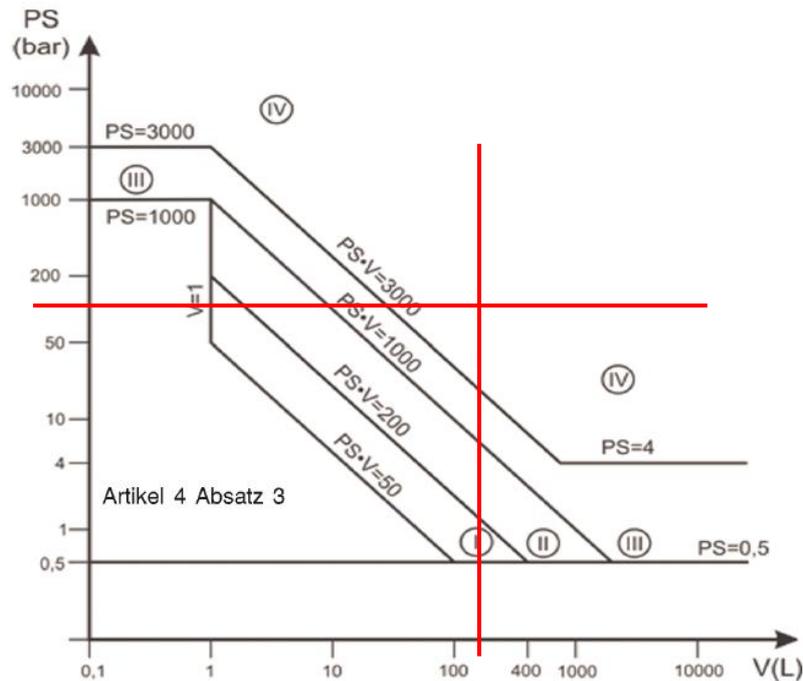


Abbildung 27.: Einstufung der Kategorie mittels zuständigem Diagramm Druck p über das Volumen. Die roten Linien entsprechen den Werten dieser Arbeit [39]

5.3. Auslegung

Die Auslegung des Druckbehälters erfolgt nach dem AD 2000-Regelwerkes. Dafür stehen die einzelnen Merkblätter (B 0-B 13) zur Verfügung, die je nach Anwendungsfall zu wählen sind. In den nachfolgenden Kapiteln folgt ein kurzer Überblick über die Berechnung. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass der Ablauf der Berechnung nicht nach aufsteigender Reihenfolge der Ziffern in der Bezeichnung des Merkblattes durchzuführen ist. Oftmals ist es notwendig ein Merkblatt mit einer höheren Ziffer vorzuziehen.

5.3.1. Merkblatt B 0 – Berechnung von Druckbehältern

Im Merkblatt B 0 des AD 2000 Regelwerkes, wird der Berechnungsdruck, die Berechnungstemperatur, der Festigkeitskennwert und der Sicherheitsbeiwert behandelt. Dabei sind die wichtigsten Werte und Anwendungsfälle nachfolgend dargestellt.

Berechnungsdruck

Als Berechnungsdruck wird der maximale zulässige Druck im System verwendet. Dabei handelt es sich um den vorgegebenen Druck $p = 100 \text{ bar}$.

Da der Behälter in die vertikale geschwenkt werden kann, muss ermittelt werden ob der hydrostatische Druck größer als 5% des Überdruckes ist. Dieser ist kleiner als 5% des Überdruckes, und

muss daher nicht bei der Berechnung berücksichtigt werden, da sich die Beanspruchung der Wandung nicht mehr als 5 % erhöht, siehe Berechnungsprotokoll Anhang C.

Berechnungstemperatur inkl. Festigkeitskennwert

Als Berechnungstemperatur wurde die maximale Temperatur von $T = 220 \text{ °C}$ herangezogen, wobei hier ein großer Sicherheitsfaktor enthalten ist, da sich die Behälterwand nicht auf 220 °C aufheizen wird. Da es sich um eine unbeheizte Wandung handelt, können direkt die 220 °C verwendet werden. Die minimale Temperatur wurde mit Raumtemperatur angegeben, wodurch wir über dem kritischen Wert von $T = -10 \text{ °C}$ liegen und daher keine zusätzliche Auslegung nach dem Merkblatt W 10 benötigen. Da die Berechnungstemperatur einen großen Einfluss auf die Streckgrenze hat, muss diese mittels linearer Interpolation für die angegebene Temperatur ermittelt werden.

Für die Auslegung wurde ein gängiger Kesselblech-Werkstoff verwendet, der in den meisten Fällen bei Druckbehältern und ähnlichen Apparaten eingesetzt wird – P265GH.

Dieser Werkstoff besitzt laut DIN nach Tabelle 5 folgende temperaturabhängige Streckgrenzen. Die ermittelte Streckgrenze bei 220 °C ist ebenfalls in Tabelle 5 zu finden ist.

Tabelle 5: Festigkeitswerte P265GH bei unterschiedlichen Temperaturen für die lineare Interpolation

Temperatur (°C)	Streckgrenze (N/mm ²)
200	206
300	157
220	196,2

Sicherheitsbeiwert

Der Sicherheitsbeiwert wurde anhand Tafel 2 – Sicherheitsbeiwerte gegen Streck- bzw. Dehngrenze - aus der AD 2000 – Merkblatt B 0 entnommen.

Der Sicherheitsbeiwert für Walz- und Schmiedestähle bei $S = 1,5$.

Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen

Für die Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindung wird der Faktor v verwendet. Dieser wurde bei diesem Druckbehälter mit $v = 100 \text{ %}$ gewählt, das bedeutet, dass die Berechnungsspannung in der Fügeverbindung zu 100% ausgenutzt wird. Die Blechstärken fallen dadurch dünner aus, sind aber mit einem höheren Prüfumfang verbunden.

Zuschläge

Zusätzlich zum Sicherheitsbeiwert müssen weitere Zuschläge für die Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung und für die Abnutzung berücksichtigt werden.

Der Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung c_1 wird durch Minustoleranz nach einschlägigen Maßnormen berücksichtigt. Laut DIN2448 beträgt die Toleranz ab einem Rohrdurchmesser von $D = 325 \text{ mm}$ 15% von der Wandstärke. Somit muss zuvor eine Berechnung der Wandstärke erfolgen und erst danach kann dieser Zuschlagswert ermittelt werden. Erst dann kann die endgültige Wandstärke ermittelt werden.

Der Zuschlag für die Abnutzung c_2 beträgt bei ferritischen Stählen $c_2 = 1 \text{ mm}$.

In der nachstehenden Tabelle 6 sind die Werte wie Sicherheitsbeiwert, Ausnutzungsbeiwert und Zuschläge zusammengefasst.

Tabelle 6: Übersicht gewählter Beiwerte für die Mantelwandstärke

Beiwert	Gewählter Wert
Sicherheitsbeiwert S	1,5
Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen ν	100 %
Abnutzung c_2	1 mm

5.3.2. Merkblatt B 1 – Zylinder- und Kugelschalen unter innerem Überdruck

Die Berechnungsregel des Merkblattes B 1 gelten nur, wenn folgendes Verhältnis zutreffend ist, wobei r_a der Außenradius und r_i der Innenradius des Mantels ist:

$$\frac{r_a}{r_i} \leq 1,2 \quad (1.20)$$

Dieses Verhältnis kann erst am Ende der Berechnung ermittelt werden.

Für die Berechnung der Wandstärke s des zylindrischen Schusses wurde folgende Formel verwendet:

$$s = \frac{D_a * p}{20 * \frac{K}{S} * \nu + p} + c_1 + c_2 \quad (1.21)$$

Für den Außendurchmesser wurde $D_a = 457,2 \text{ mm}$ definiert. Nach Gleichung 1.20 mit den tabellierten Werten von Tabelle 6 ist die Wandstärke für zylindrischen Schuss $s_{M_B} = 20,5 \text{ mm}$ ermittelt worden. Um den genormten Liefergrößen zu entsprechen, wurde eine Wandstärke von $s_{M_g} = 22,2 \text{ mm}$ gewählt. Der resultierende Rohrquerschnitt ist in der nachstehenden Abbildung 28 zu sehen.

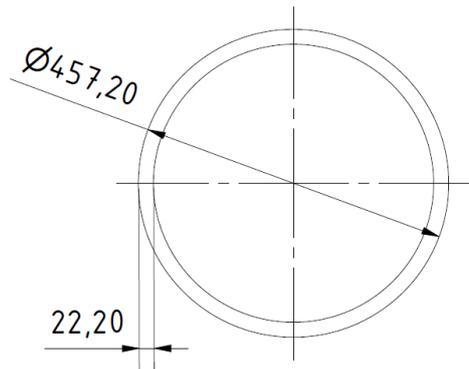


Abbildung 28: Rohrquerschnitt des verwendeten Rohres mit einer Wandstärke von $s_{M_g} = 22,2 \text{ mm}$ und einem Außendurchmesser $D_{a_R} = 457,2 \text{ mm}$ und entspricht somit einem 18" Rohr

5.3.3. Merkblatt B 3 – gewölbte Böden unter innerem und äußerem Überdruck

Für die Auslegung für den Behälterboden fiel die Entscheidung auf den Klöpperboden, da die Beanspruchbarkeit und die Verfügbarkeit am höchsten sind. Die folgenden Grenzen und Beziehungen müssen bei einem Klöpperboden eingehalten werden.

Der Kalottenradius R wird gleich dem Außendurchmesser des Mantels D_a definiert:

$$R = D_a \quad (1.22)$$

Der Krempe radius r entspricht bei einem Klöpperboden ein Zehntel des Mantelaußendurchmessers D_a

$$r = 0,1 * D_a \quad (1.23)$$

Die Wölbungshöhe h_2 lässt sich durch folgende Gleichung 1.24 bestimmen:

$$h_2 = 0,1935 * D_a - 0,455 * s_e \quad (1.24)$$

Folgende Grenze muss eingehalten werden:

$$0,001 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} \leq 0,1 \quad (1.25)$$

Die Höhe des zylindrischen Boards wird berechnet durch:

$$h_1 \geq 3,5 * s \quad (1.26)$$

Die Wandstärke der Kreppe wird mit folgender Formel berechnet:

$$s = \frac{D_a * p * \beta}{40 * \frac{K}{S} * v} + c_1 + c_2 \quad (1.27)$$

Der hier vorkommende Berechnungsbeiwert β muss durch folgende Gleichung 1.28 in Abhängigkeit mit der Abbildung 8 aus dem Merkblatt B 3 ermittelt werden, wobei hier ein iteratives Vorgehen notwendig ist. Für den ersten Iterationsschritt wird für die Wandstärke jene berechnete Wandstärke des anschließenden Zylinders verwendet. Da sich für c_1 aufgrund der Mantelwandstärke eine Wandstärke annehmen lassen konnte, wurde für den Wanddickenunterschreitungskoeffizient $c_1 = 0,5$ laut DIN28011-1 gewählt und der Abnutzungszuschlag mit $c_2 = 1$ definiert.

$$\text{Verhältnis} = \frac{s - c_1 - c_2}{D_a} \quad (1.28)$$

Aus der Berechnung ist für die gewählte Wandstärke der Kreppe $s = 23 \text{ mm}$ verwendet.

Für die Berechnung der Wandstärke im Bereich der Kalotte muss der Außendurchmesser aufgrund der obenstehenden und einzuhaltenden Beziehungen und Grenzen neu berechnet werden, wobei hier für die Wandstärke jene der Kreppe verwendet werden muss:

$$D_a = 2 * (R + s) \quad (1.29)$$

Dieser neue Wert für den Außendurchmesser kann nun in die Formel für die Wandstärke aus dem „Kapitel Merkblatt B 1 – Zylinder- und Kugelschalen unter innerem Überdruck“ eingesetzt werden. Dabei ergibt sich ein Wert für die Wandstärke der Kalotte $s_{Ka_g} = 19,51 \text{ mm}$. Um den Boden aus einem Blech formen zu können, wurde der Wandstärke der Kalotte auf $s_{Ka_g} = 23 \text{ mm}$ erhöht.

Es befindet sich ein Viewport im Klöpperboden innerhalb $0,6 * D_a$, laut dem Regelwerk AD 2000 müssen Schwächungen in diesem Bereich nicht berücksichtigt werden. Sollte der Wert außerhalb dieses Bereiches liegen, müssen weitere Berechnungen durchgeführt werden.

Weiters wurde die Sicherheit gegen elastisches Einbeulen berechnet. Dieser Berechnungsvorgang ist der Berechnung im Anhang zu entnehmen ist.

5.3.4. Merkblatt B 9 – Ausschnitte in Zylindern, Kegeln und Kugeln

In diesem Abschnitt werden die Ausschnitte und darin eingeschweißte Stutzen, die als Viewport dienen, berechnet.

Folgender Geltungsbereich muss eingehalten werden, damit das Merkblatt B 9 angewendet werden darf:

$$0,002 \leq \frac{s - c_1 - c_2}{D_a} \leq 0,1 \quad (1.30)$$

Für die Ausschnitte wurde für jeden Viewport die in der nachstehenden Abbildung 29 dargestellte Verstärkungsart- rohrförmige Verstärkung Ausführung c) – verwendet.

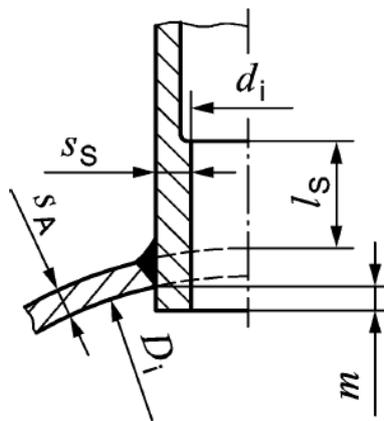


Abbildung 29: Rohförmige Verstärkung Ausführung c) Innendurchmesser Stutzen d_i , Wandstärke Stutzen s_s ; Wandstärke Mantel s_A ; mitttragende Länge l_s [4]

Der Außendurchmesser des Stutzens wurde mit $D_{a_St} = 190 \text{ mm}$ definiert und die Zuschläge c_1 und c_2 sind dem Berechnungsprotokoll zu entnehmen, wobei $c_{1_St} = 0,5 \text{ mm}$ definiert wurde. Aufgrund der Bearbeitung ist ein Zuschlag von 0,5 mm ausreichend.

Durch das nachstehende Verhältnis in Kombination mit dem Diagramm 7d aus der AD 2000; Abbildung 30– Merkblatt B 9 kann der Verschwächungsfaktor sowie anschließend die Wandstärke des Stutzens berechnet werden. Es ist zu beachten, dass bei der AD 2000 immer wieder im Laufe der Berechnung die Variablen bzw. deren Indizes abgeändert werden. In der Berechnung dieser Arbeit werden die Variablen immer gleich zu den Abbildungen aus der AD 2000 definiert, um Missverständnisse zu vermeiden.

$$\frac{s_s - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2} \quad (1.31)$$

Der genaue Berechnungsweg ist dem Anhang zu entnehmen.

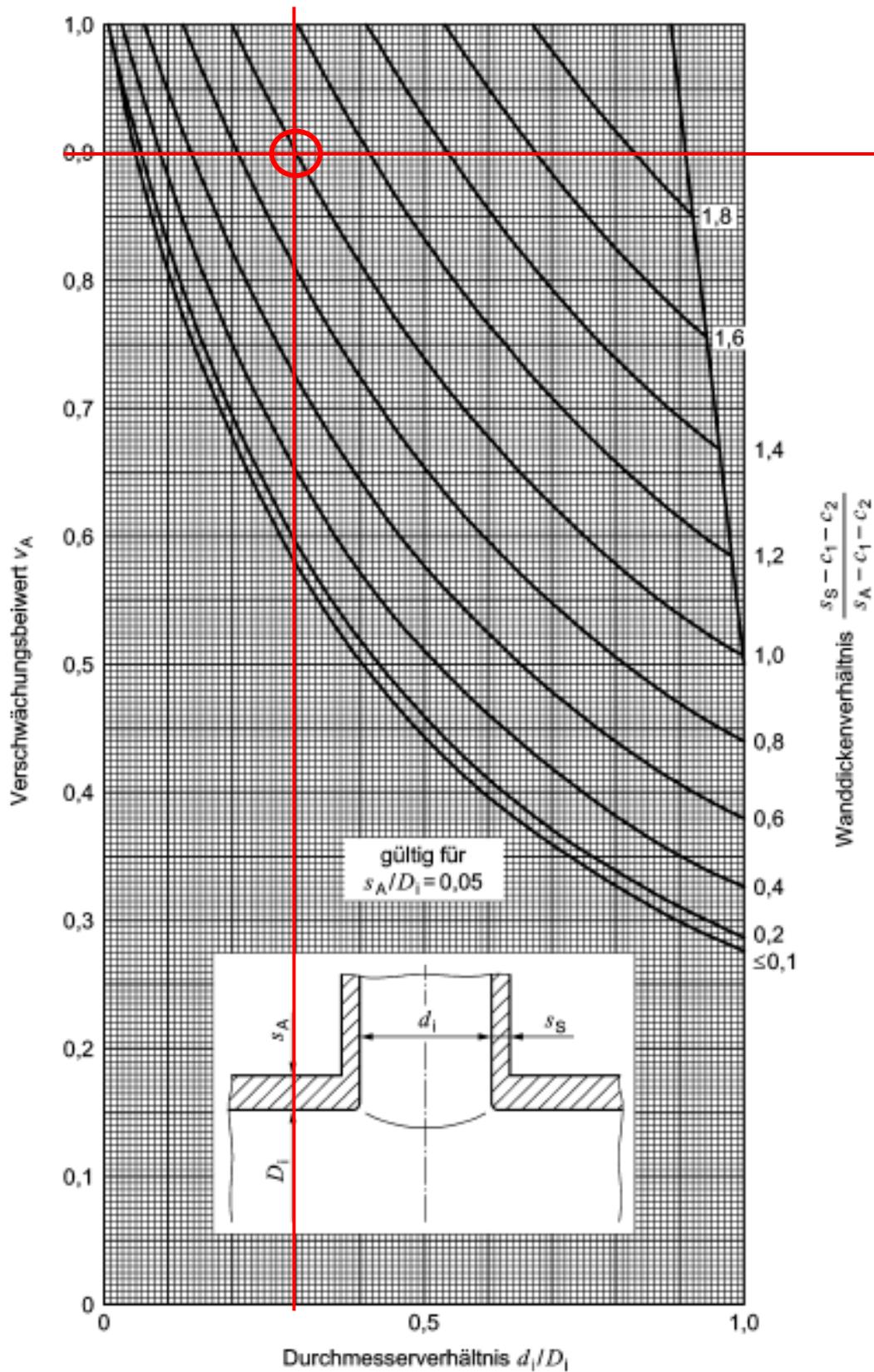


Abbildung 30: Diagramm der die Verschwächungsbeiwerte für Ausschnitte in zylindrischen Grundkörpern darstellt inkl. Beispiel wie man die Werte daraus bestimmt (rot markiert) [4]

Für die Wandstärke des Stutzens wurde rechnerisch $s_{St_{zw}} = 21 \text{ mm}$ berechnet.

Als weiterer Punkt wurde die mittragende Länge l_s des Stutzens berechnet, wobei es sich hier um jene Länge handelt, die die ermittelte Wandstärke vorweisen muss.

Diese Länge beträgt $l_{s_{Stutzen}} = 65,45 \text{ mm}$. Da die Wandstärke in der nachfolgenden Konstruktion erhöht wurde, kann die mittragende Länge nach AD 2000 Merkblatt B 9 4.4.3 verringert werden.

Die tatsächlich benötigte mittragende Länge bei einer Wandstärke von $s_{St_K} = 31,25 \text{ mm}$ beträgt daher $l_{s_{St_n}} = 43,98 \text{ mm}$. Dieser Wert muss erreicht werden, kann bei der Ausführung aber auch überschritten werden.

Als nächster Schritt wird der Festigkeitsnachweis für den Stutzen durchgeführt. Dieser erfolgt anhand nachstehender Beziehung Gleichung 1.30 und Verwendung des Berechnungsschemas aus Abbildung 31.

$$\frac{p}{10} * \left(\frac{A_p}{A_\sigma} + \frac{1}{2} \right) \leq \frac{K}{S} \quad (1.32)$$

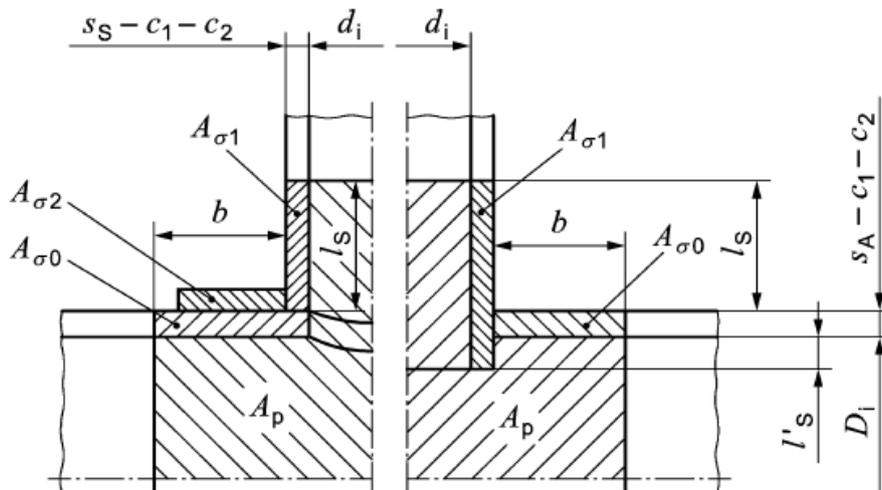


Abbildung 31: Berechnungsschema für den Festigkeitsnachweis für zylindrische Grundkörper [4]

Aus der Berechnung im Anhang C ist zu entnehmen, dass die Festigkeit des Stutzens mit den berechneten Werten nachgewiesen ist.

Für den Stutzen im Boden wurde die gleiche Berechnung durchgeführt, jedoch aufgrund der anderen Form des Bodens mit anderen Diagrammen. Für den Verschwächungsbeiwert wurde das Diagramm 8b aus der AD 2000 – Merkblatt B 9 herangezogen.

Für die Wandstärke des Stutzens wurde rechnerisch $s_{St_{zw_Kl}} = 21 \text{ mm}$ ermittelt.

5.3.5. Merkblatt B 7 – Schraubenverbindung

Je Stutzen werden die eingesetzte Acrylzylinder mit einem Deckel positioniert bzw. gesichert. Dieser Deckel soll laut Prinzipskizze (siehe Abbildung 26) mittels Innensechskantschrauben am Stutzen befestigt werden. Da in der AD 2000 dieser Fall nicht direkt behandelt wird, erfolgt eine Berechnung durch eine Annäherung an einen ähnlichen Fall in der AD 2000. Es wurde auch eine normgerechte Schraubendimensionierung durchgeführt worden.

Es wurden Schrauben mit der Festigkeitsklasse 8.8 für die Berechnung verwendet wobei hier eine Stückzahl $n = 12$ Schrauben definiert wurde.

Der Acrylzylinder überträgt den, in der Kammer herrschenden Druck über die Flachdichtung auf den Deckel, wobei diese Übertragung über die Kreisringfläche eingeleitet wird. Über die Auflagefläche der Schrauben, wird die Belastung vom Deckel in die Schrauben eingeleitet. Aus dem Berechnungsprotokoll im Anhang C kann entnommen werden, dass sich ein Spannungsquerschnitt von $65,45 \text{ mm}^2$ ergibt. Dies würde einer M12 Schraube entsprechen. Wie aber dem Berechnungsblatt zu entnehmen ist, wird bei der näherungsweise Berechnung nach AD 2000 ein Schraubendurchmesser von $d_S = 11,96 \text{ mm}$ berechnet. Aufgrund dieser Tatsache wurde statt einer Schraube mit M12 Gewinde eine Schraube mit M14 Gewinde verwendet.

Weiterer Vorteil der M14 Schraube ist auch die erreichbare Flächenpressung an der Flachdichtung. Da mit höherer Schraubendimension höhere Anzugsdrehmomente erforderlich sind, wird eine höhere Klemmkraft erzielt und dies führt wiederum zu einer höheren Flächenpressung.

5.3.6. Merkblatt B 5 – Ebene Böden

Bei der Konzepterstellung wurde von einem ebenen Deckel ausgegangen, da hier aufgrund der benötigten Anschlüsse ein gewölbter Boden nicht verwendet werden kann.

In der AD 2000 - Merkblatt B 5 werden unterschiedliche Fälle behandelt, wobei hier wieder eine näherungsweise Berechnung durchgeführt werden muss. Der Deckel wird durch eine C-Klammer mit konischen Flächen an den Flansch gedrückt und findet in der AD 2000 so keine Anwendung.

Die hohe Anzahl an Gewindebohrungen führt zu Schwächung des Grunddeckels. Für Zusatzwerte muss nun jener Querschnitt ermittelt, welcher am meisten Bohrungen beinhaltet. Wie in der Berechnung Anhang C zu erkennen ist, beinhaltet der Querschnitt mit den meisten Verschwächungen zwei Bohrungen mit 1"-14 UNS Gewinde und eine ½"-14 NPT Gewindebohrung. Dieser Querschnitt, der die Verschwächungen beinhaltet wird mit dem Querschnitt ohne Verschwächungen ins Verhältnis gesetzt und dadurch ein Zusatzwert C ermittelt, siehe Berechnungsblatt im Anhang A.

Für den Deckel wurde eine Wandstärke von $s_{D_{An}} = 50,92 \text{ mm}$ berechnet.

Gewählte Wandstärke des Deckels $s_{D_g} = 60 \text{ mm}$.

Der Deckel muss aufgrund der Bearbeitung aus einem stärkeren Blech gefertigt werden, wobei die gewählte Wandstärke die Mindestwandstärke darstellt.

5.4. FE-Analyse

Um eine Abschätzung der Richtigkeit der nach AD 2000 berechneten Werte durchführen zu können, wurde eine FE-Analyse mit dem im Autodesk Inventor Professional implementieren FE-Modul durchgeführt. An dieser Stelle ist aber zu erwähnen, dass es sich dabei um ein stark vereinfachtes Modul handelt, welches nur zur Abschätzung der Berechnungen dienen soll.

Für die Berechnung wurden zwei 3D-Modelle herangezogen, ein vereinfachtes Model und das fertigungsgerechte Model. Dieser Schritt war aufgrund des sehr hohen Grad an Detailierung, wie etwa bei den Schweißnähten für Stützeinschweißung notwendig, da es hier zu Problemen bei der FE-Analyse gekommen ist. Um diese Probleme beseitigen zu können, wurde der Mantel inklusive der Stützen, Boden und Flansch als ein Teil modelliert, siehe Abbildung 33. Es wurden auch die Anschweißteile an der Vorder- und Rückseite des Deckels von der Analyse ausgeschlossen, um diese vereinfachen und mögliche Fehlerquellen reduzieren zu können.

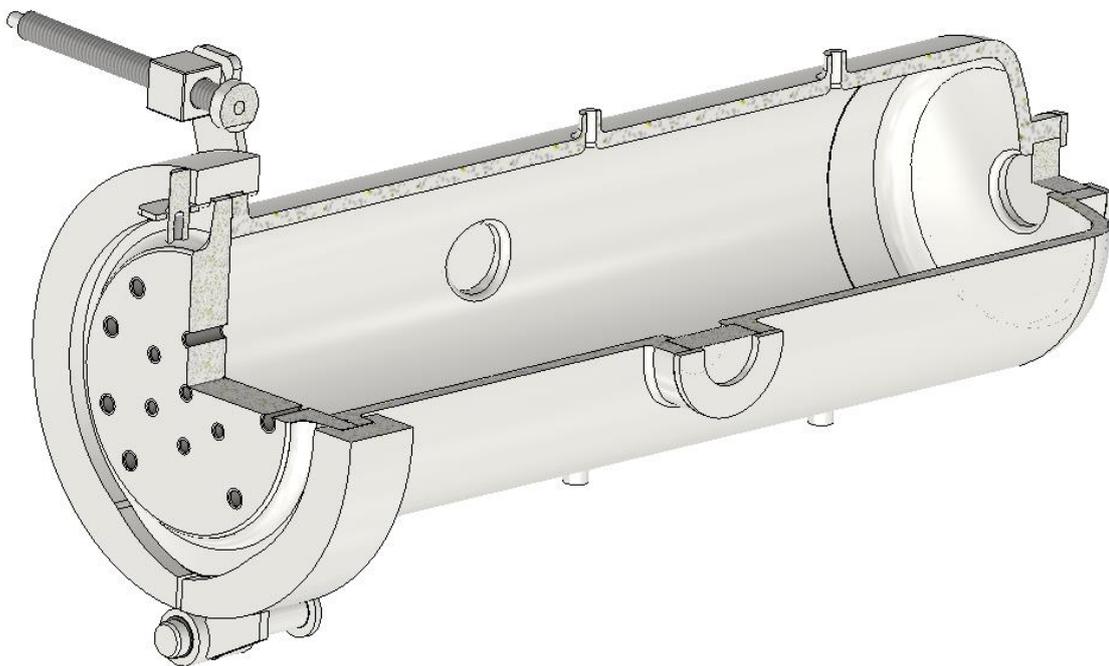


Abbildung 33: Vereinfachtes Model der Druckkammer für die erste FE-Analyse

Ein weiterer Vorteil der Verwendung eines vereinfachten Modells ist die Abschätzung der Verformungen der Komponenten unter Belastung. In Abbildung 34 ist die Verformung der C-Klammer

in a) bei einer Innenbelastung von 100 bar zu erkennen, wobei die Darstellung der Verformung verstärkt wurde, um diese auch erkennen zu können. Die Flanken der Klammer verformen sich nach außen, da der Deckel aufgrund der Innendruckbelastung nach außen gegen die seitlichen Flächen der Klammer gedrückt wird. Bei b) ist die unverformte Klammer zu sehen. Da der Deckel durch die Innendruckbelastung nach außen gedrückt wird, verformen sich die Flanken der Klammer auch nach außen. Die maximale Verformung der Klammer beträgt 0,14 mm und ist am äußersten Rand der Flanke zu erkennen, da es sich hier um den schwächsten Bereich der Klammer handelt.

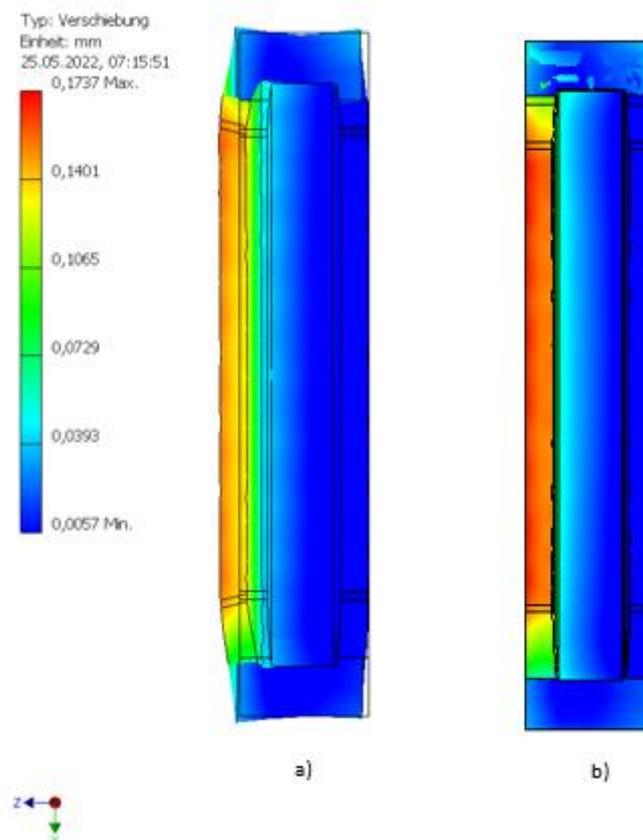


Abbildung 34: Verformung der Klammer in einer Ansicht wo die Verformung verstärkt in a) dargestellt werden kann. Die Flanken der Klammer werden nach außen gedrückt, wie es auch in der Realität zu erwarten wäre. b) zeigt die unverformte Klammer

Das Ergebnis der Berechnung der vereinfachten Baugruppe zeigt die zu erwartenden Verformungen, bzw. die Richtung der Verformung. Der Mantel verformt sich in Bereichen um die eingeschweißten Stutzen um 0,17mm und der Deckel wird nach außen gedrückt, wobei die maximale Verformung hier bei 0,56mm liegt, siehe Abbildung 35.

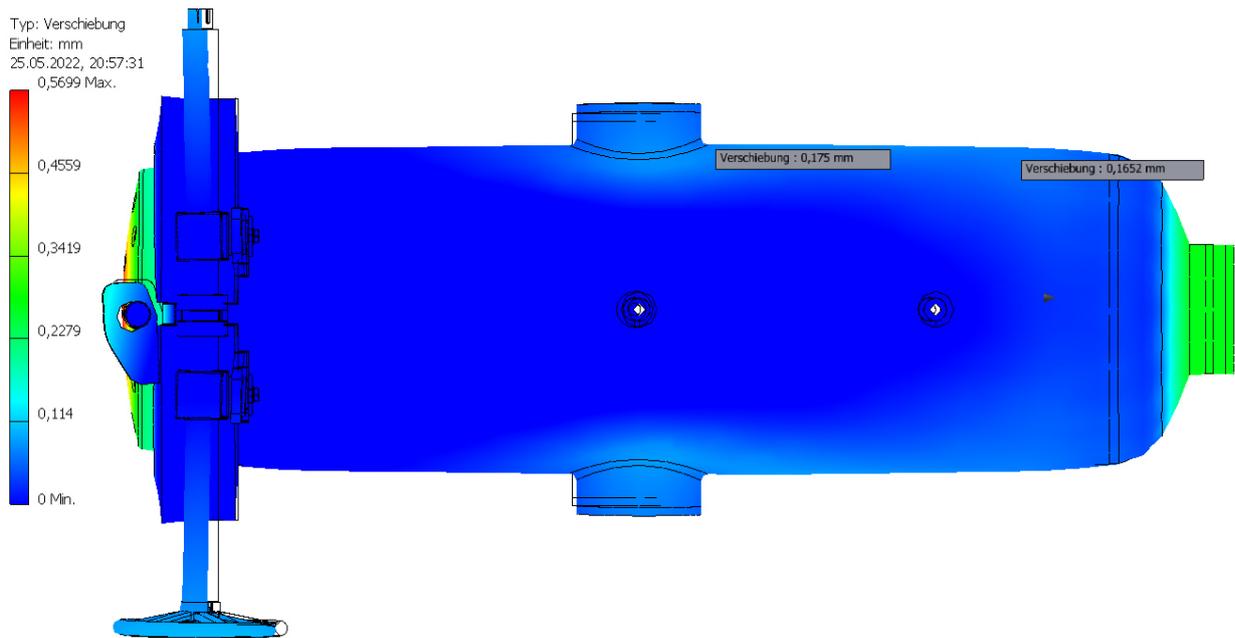


Abbildung 35: Verschiebung der Bauteile der vereinfachten-Baugruppe. Mantel verformt sich um 0,175mm

Die auftretenden Spannungen, wie in Abbildung 36 zu sehen, liegen unter dem temperaturabhängigen zulässigen Wert von 196 N/mm^2 , wie aus der Tabelle 5 zu entnehmen ist. Vereinzelt sind Bereiche zu erkennen, die diesen Wert überschreiten. Im Bereich der Bohrungen treten Spannungsspitzen aufgrund des groben Berechnungsnetzes auf. Die Spannungserhöhungen würden sich durch die Verwendung eines feineren Netzes in diesem Bereich vermeiden lassen.

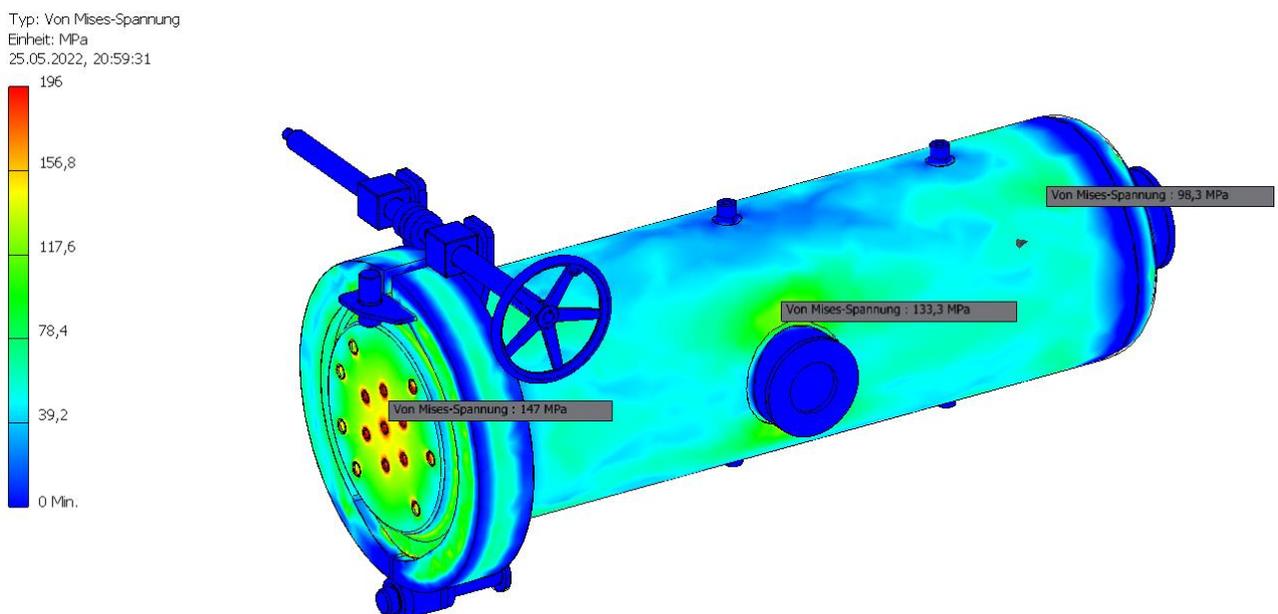


Abbildung 36: Darstellung der Spannungen am Behälter aufgrund Innendruck

Bei den Klammern kommt es in den Übergängen der Flanken zu Bereichen, in denen die Spannung etwas höher als in den benachbarten Bereichen ist. An den inneren Übergängen der Klammern treten vereinzelt Spannungsspitzen von 167,6 MPa auf, siehe Abbildung 37. Diese sind wieder auf das grobe Standardnetz dieses Moduls zurückzuführen, wobei diese den maximalen Wert von 196 MPa nicht überschreiten.

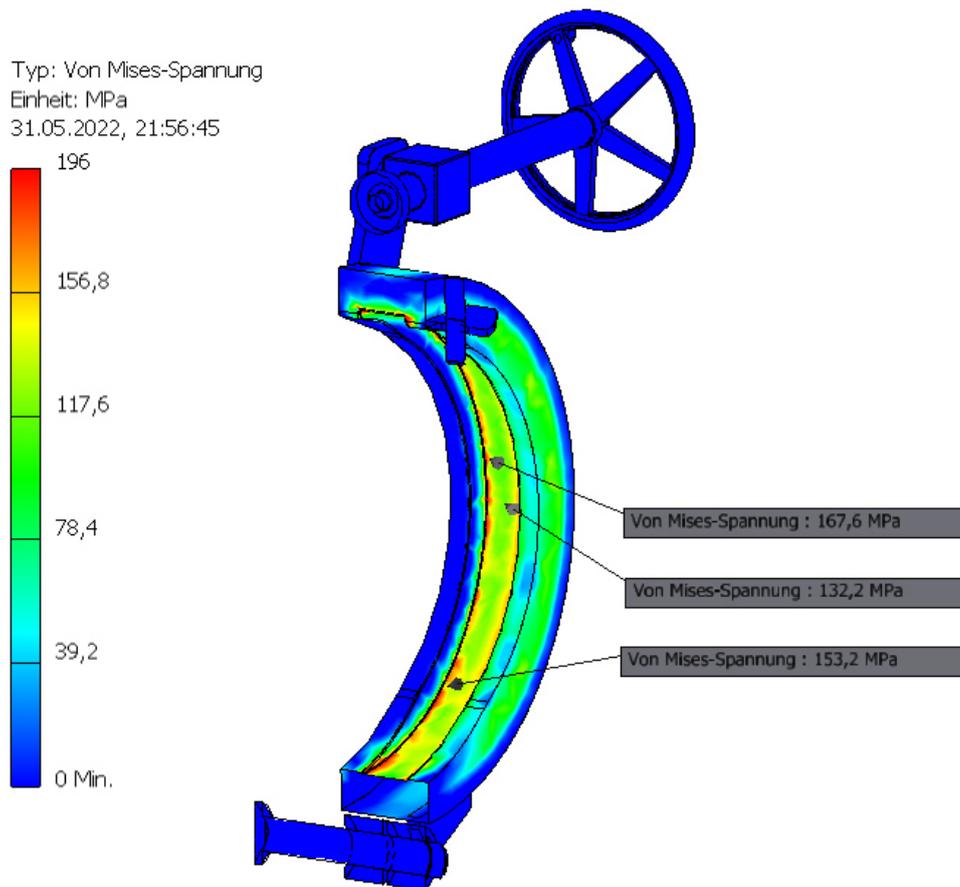


Abbildung 37: Darstellung der auftretenden Spannungen in der C-Klammer

Nach der Analyse der vereinfachten Baugruppe, wurde das fertigungsgerechte Modell für eine FE-Analyse herangezogen. Für Schweißnähte im Bereich der Stützeinschweißung und für die Verbindung des Mantels mit dem Klöpperboden wurden Vereinfachungen getroffen. Dafür wurden die Schweißnähte entfernt und Kontaktbedingungen zwischen den zu verschweißenden Bauteilen hergestellt.

Das Ergebnis der FE-Analyse ist in den nachstehenden Abbildung 38 bis Abbildung 41 zu sehen. Die maximale Verformung am Mantel beträgt 0,507 mm und am Deckel 0,5365 mm, Abbildung 38. Es ist zu erkennen, dass die durch Ausschnitte geschwächten Bereiche eine höhere Verschiebung aufweisen als die benachbarten Bereiche. Grund dafür ist, dass der Mantel an diesen Stellen die Möglichkeit hat

sich zu Verformen. Der Deckel verformt sich am stärksten, was aufgrund der flachen Ausführung zu erwarten ist. Dieser erfährt aufgrund der seitlichen Einspannung eine Durchbiegung in der Mitte, da hier keine Einspannung oder Begrenzung erfolgt. Die FE-Berechnung zeigt, dass die Anwendung des Regelwerkes AD 2000 eine sichere Abschätzung der Wandstärken ermöglicht, wodurch diese passend gewählt sind.

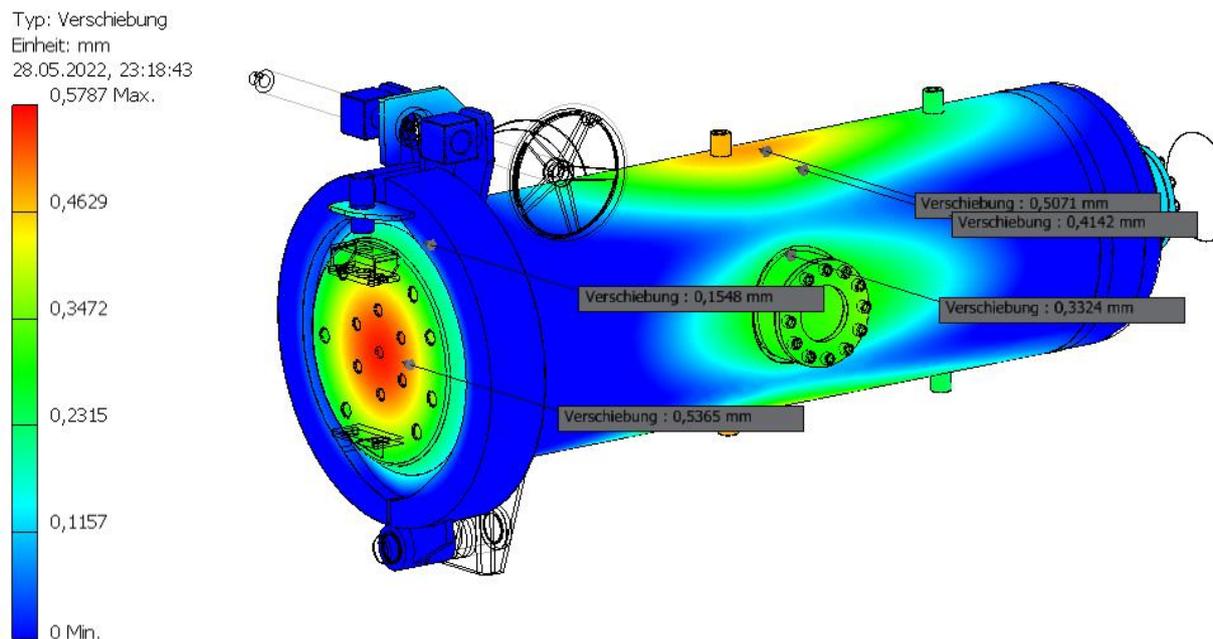


Abbildung 38: Darstellung der Verschiebungen aufgrund des Druckes von 100 bar. Deckel weist die höchsten Verschiebungen auf, da es sich um eine eingespannte ebene Platte handelt. Weiters ist zu erkennen, dass an den geschwächten Bereichen eine höhere Verschiebung als in den Nachbarbereichen auftritt.

Die Spannungen im Bereich der Gewindebohrungen sind an den Kanten wieder etwas höher mit 174,2 MPa, was aber wieder an der groben Ausführung des Berechnungsnetzes liegt. Bei diesem FE-Modul kann das Netz lokal nicht verfeinert oder eine automatische Vernetzungsstrategie angewandt werden. Im Bereich der maximalen Durchbiegung am Deckel treten Spannung von maximal 154,4 MPa auf. Der Mantel zeigt keine nennenswerten Spannungserhöhungen, wobei der maximale Wert bei 123,5 MPa liegt. In Abbildung 39 ist zu sehen, dass im Bereich rund um die Stützen keine nennenswert hohen Spannungen auftreten, da hier die Stützen eine versteifende Wirkung haben. Diese Spannungen liegen im Bereich von 79,6 MPa. Höhere Spannungen treten daher Ober- und Unterseite auf, wobei diese einen maximalen Wert von 123,5 MPa annehmen.

Typ: Von Mises-Spannung
Einheit: MPa
01.06.2022, 06:48:30

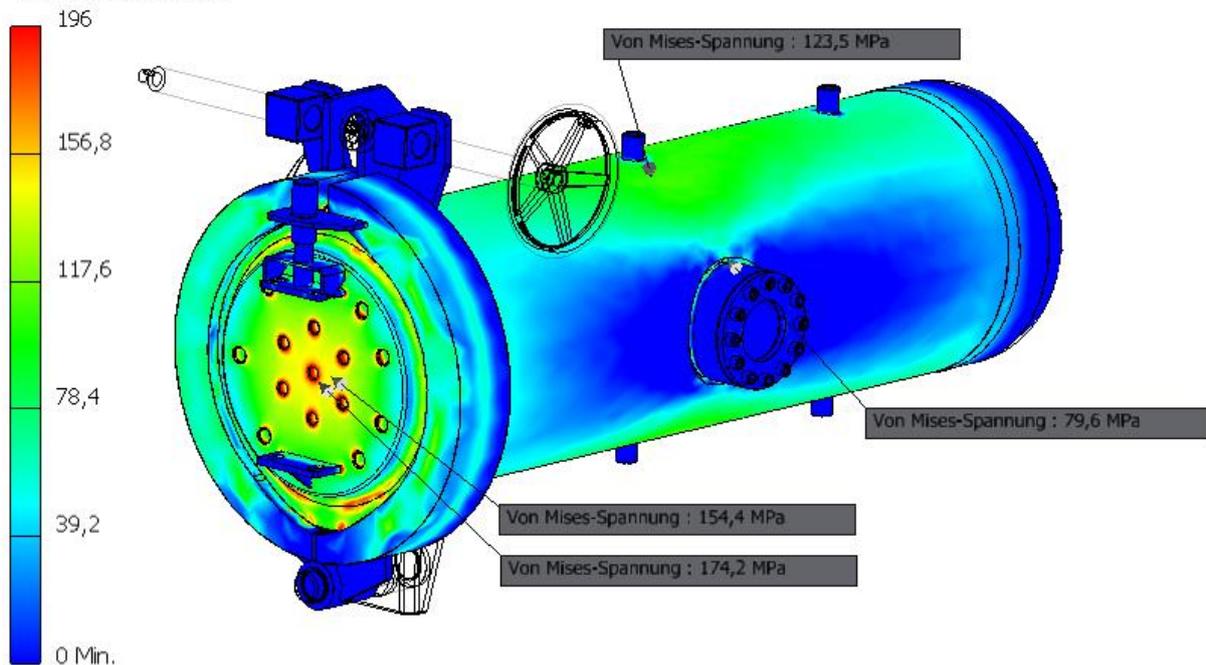


Abbildung 39: Darstellung der Spannungen am finalen Konzept mit maximaler Spannung am Mantel mit 123,5 MPa und am Deckel mit 154,4 MPa

Im Bereich des Klöpperboden sind in Abbildung 40 in der Nähe des Stutzens eine maximale Spannung von 71,3 MPa zu erkennen. Im Bereich der Kalotte treten Spannungen von 62,9 MPa auf. Über die Krempe bis hin zur Schweißnaht zum Mantel sind keine erhöhten Spannungen zu erkennen. Im Bereich der Schweißnaht steigt die Spannung auf 72,6 MPa, da es hier zum Übergang Rohr zu Klöpperboden kommt und die Wandstärke des Klöpperboden um 2,8 mm stärker ist. Dieser Wandstärkenunterschied führt zu einer örtlichen Spannungskonzentration,

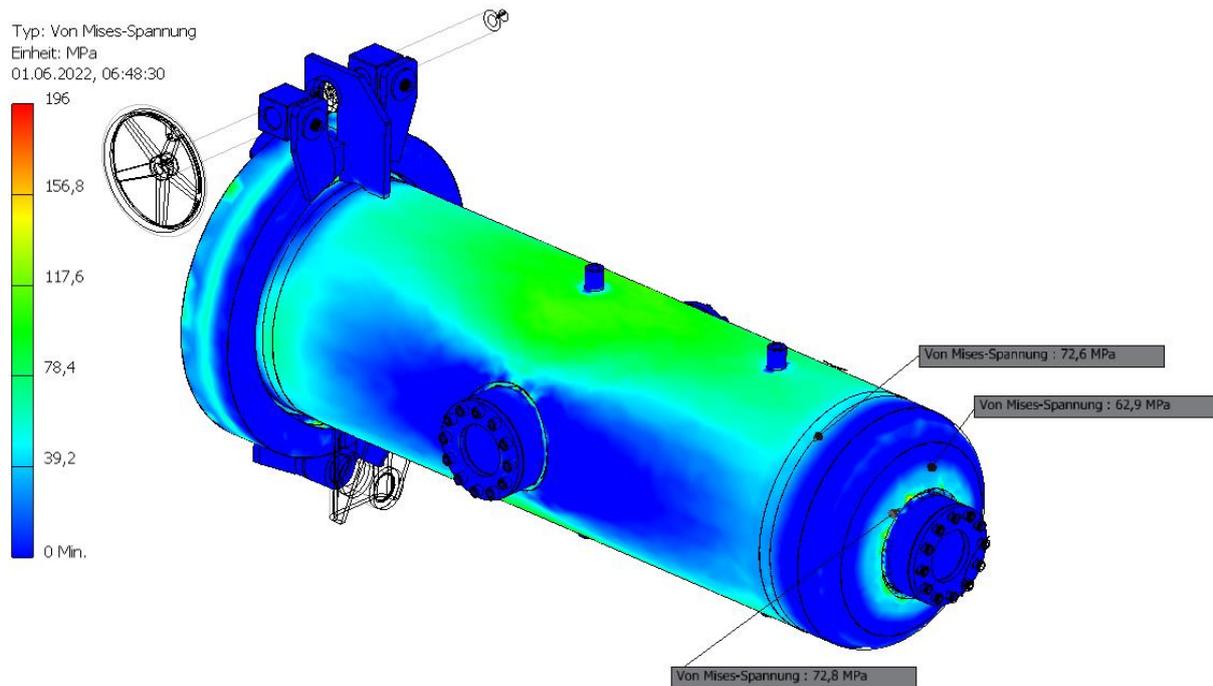


Abbildung 40: Darstellung der Spannungen im Bereich des Klöpperboden mit maximaler Spannung von 72,8 MPa

An den Übergangsbereichen der Verschlussklammer sind schon wie bei der vereinfachten Baugruppe Spannungsspitzen zu erkennen. Diese liegen bei 188,7 MPa, wobei das wieder auf das grobe Netz der der Berechnung zurückzuführen ist. Die Verschlussklammer zeigt in gewissen Bereichen etwas höherer Spannungen, mit einer maximalen Spannung von 187,7 MPa, was aber der Linienberührung geschuldet zurückzuführen ist. Die Spannungen sind im inneren der Klammer entlang der Schale einigermaßen gleichmäßig mit 137,1 MPa, da der Deckel die Kraft gleichmäßig auf die Flanken überträgt, siehe Abbildung 41.

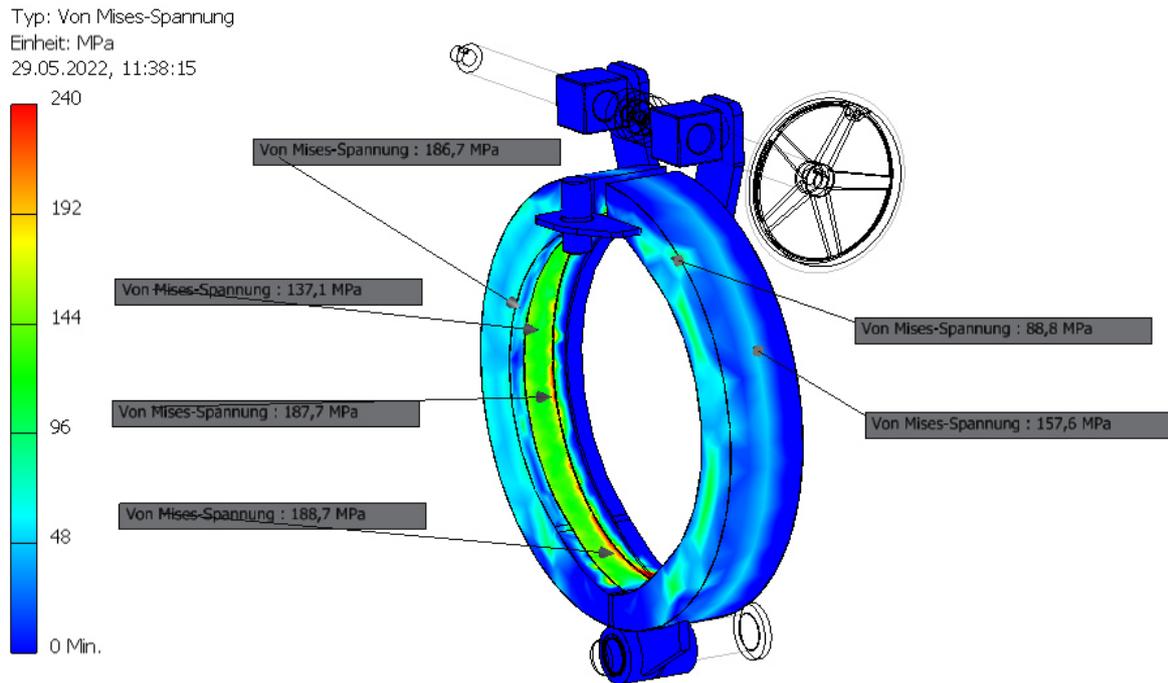


Abbildung 41: Spannungen am Verschlussystem mit maximaler Spannung von 188,7 MPa im Bereich einer Kante mit Linienberührung

Die FEM-Analyse bestätigt, dass die Auslegung des Druckbehälters nach AD 2000 fehlerfrei durchgeführt worden ist, da keine der zulässigen Spannungen überschritten wird und sich das Ergebnis der analytischen Berechnung und Finite-Elemente-Analyse (FEA) decken.

6. Konstruktion

Dieses Kapitel beinhaltet die Ausführung des Druckbehälters, sowie die Beschreibung der Funktionsweise. Dabei wird das Gesamtkonzept beschrieben sowie auf die einzelnen konstruktiven Details eingegangen. Nach einer kurzen Erklärung des gesamten Behälters inklusive Verschlussystem und Anbauteilen, folgt die Beschreibung der einzelnen Komponenten.

6.1. Übersicht der Gesamtanlage

Der Druckbehälter besteht aus dem Grundkörper, Einsätze in den Stutzen, dem Deckel und dem Verschlussystem. Diese Komponenten sind in der folgenden Abbildung 42 dargestellt, wobei der Grundkörper (1), der Viewport (2), das Verschlussystem (3) und der Deckel (4) dargestellt sind.

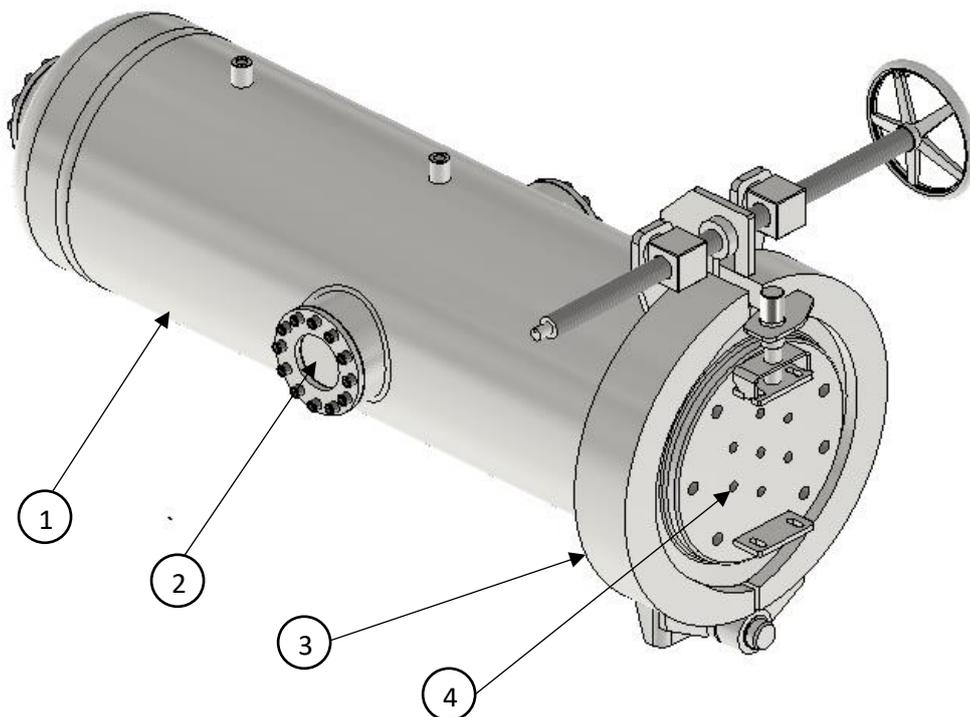


Abbildung 42: *Zusammgebauter Druckbehälter bestehend aus einem Grundkörper (1), dem Viewport (2), dem Verschlussystem (3) und dem Deckel (4)*

6.2. Grundkörper

Der Grundkörper ist jener Teil des Druckbehälters der aus mehreren Komponenten zusammengeschweißt ist und somit den Hauptbestandteil bildet. Der Grundkörper ist aus einem Rohr,

einem Klöpperboden, drei Stutzen, vier Muffen für diverse Anschlusskomponenten, einer Bolzenaufnahme, einem Führungsblech, zwei Zentrierstiften und einem Flansch aufgebaut. Eine Darstellung des Aufbaues mit den oben aufgezählten Komponenten ist in der nachstehenden Abbildung 43 zu sehen.

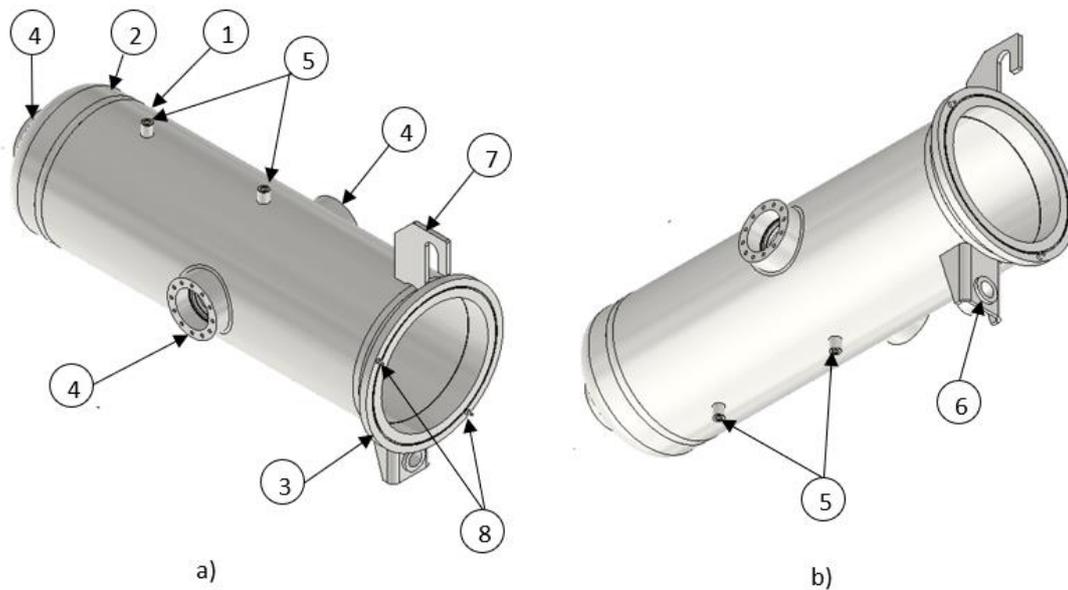


Abbildung 43: Grundkörper von zwei Blickrichtung dargestellt, wobei a) den Grundkörper von oben und b) den Grundkörper von unten zeigt. Es sind der Mantel (1), der Klöpperboden (2), der Flansch (3), die Stutzen (4), die Muffen (5), die Bolzenaufnahme (6), das Führungsblech (7) sowie die Zentrierstifte (8) zu sehen.

Das Rohr (1) auch als Mantel bezeichnet, dient als Verbindung zum Klöpperboden (2) und dem Flansch (3). Der Klöpperboden bildet das Abschlusselement am hinteren Ende der Druckkammer. Der Flansch dient dabei als Schnittstelle zum Deckel und dem Verschlusselement. Die eingeschweißten Stutzen (4) dienen zur Aufnahme der Acrylzylinder, da diese als sogenannte Viewports verwendet werden, um in das Innere sehen zu können. Die eingeschweißten Muffen (5) dienen als Einschraubelement für Pumpe, Manometer und weiteren Zusatzbauelementen. Durch die Bolzenaufnahme (6) ist als Drehpunkt für den Schwenkmechanismus des Verschlusses vorgesehen und wird durch das Führungsblech (7) beim Öffnen und Schließen als Längsführung unterstützt. Um ein möglichst einfaches Schließen des Deckels zu gewährleisten, sind zwei Zentrierstifte (8) am Flansch angebracht.

Mantelrohr

Der Mantel besteht aus einem Rohr mit einem Durchmesser von 457,2 mm und einer Wandstärke von 22,2 mm. Die Länge des Mantelrohres ist 1225 mm und besitzt zwei große, gegenüberliegende Ausschnitte mit einem Durchmesser von 192 mm für die Stutzeneinschweißung der Viewports sowie

vier kleine Ausschnitte mit einem Durchmesser von 37 mm für die Muffeneinschweißung. In der nachstehenden Abbildung 44 ist der Mantel dargestellt, wobei hier ein großer Ausschnitt, der für die Stützeinschweißung des Viewports und zwei kleine Ausschnitte, die für die Muffeneinschweißung benötigt werden, zu sehen sind. Die anderen Ausschnitte befinden sich je entlang der Achse im gegenüberliegenden Bereich.



Abbildung 44: $\varnothing 457,2 \times 22,2$ mm Rohr als Mantel mit einer Länge von 1225 mm und 2 großen sowie vier kleine Ausschnitte für die Stützen

Muffe

Bei diesem Druckbehälter kommen vier Muffen zum Einsatz, wie in Abbildung 45 abgebildet. Diese sind gleich gestaltet und besitzen ein $\frac{1}{2}$ " NPT-Gewinde, der Außendurchmesser beträgt $\varnothing 35$ mm und die Länge beträgt 62 mm. Somit können diese eingeschoben werden damit die Muffen innen und außen mit dem Rohr verschweißt werden können. Dies hat den Vorteil, dass somit diverse Schweißnahtprüfungen erspart werden, da bei einer aufgesetzten Muffe die Durchschweißung überprüft werden muss und bei einer eingeschobenen Muffe nicht.



Abbildung 45: Einzuschweißende Muffe mit einem $\frac{1}{2}$ " NPT Gewinde als Anschluss für diverse Komponenten

Stutzen

Der Grundbehälter besitzt zwei Stutzen mit einem Außendurchmesser von 190 mm. Diese werden als Viewport eingesetzt, wodurch der Schweißprozess im Inneren in verschiedenen Betrachtungswinkel beobachtet werden kann. Der Stutzen besitzt eine Schulter, die mehrere Aufgaben übernimmt und einen Durchmesser von 100 mm aufweist. Sie dient zur Abstützung und Begrenzung des Acrylzyinders in axialer Richtung. Dieser Acrylzyylinder ermöglicht die Sicht bei einer Druckkammer nach innen, da dieser im Vergleich zu einem Glas bei Hochdruckenwendungen nicht bricht.

Weiters befindet sich an diesem Absatz die Nut für einen O-Ring, der als Dichtung verwendet wird. In axialer Richtung befindet sich auch eine Nut für den O-Ring, der das Glas und eine Belüftungsscheibe in Position hält. An der Flanschfläche sind für die Verschraubung von einem Deckel mit dem Stutzen 12 Stück M12 Gewindebohrungen anzufinden. Da der Stutzen innen bündig mit dem Rohr abschließen soll, ist dieser auf der Innenseite analog zum Rohr gekrümmt ausgeführt. In der nachstehenden Abbildung 46 ist der Stutzen in einem 3D-Dreiviertelschnitt dargestellt wobei mit die Gewindebohrung (1), die Nut für den O-Ring (2) und die Nut für den Sicherungsring (3) markiert sind.

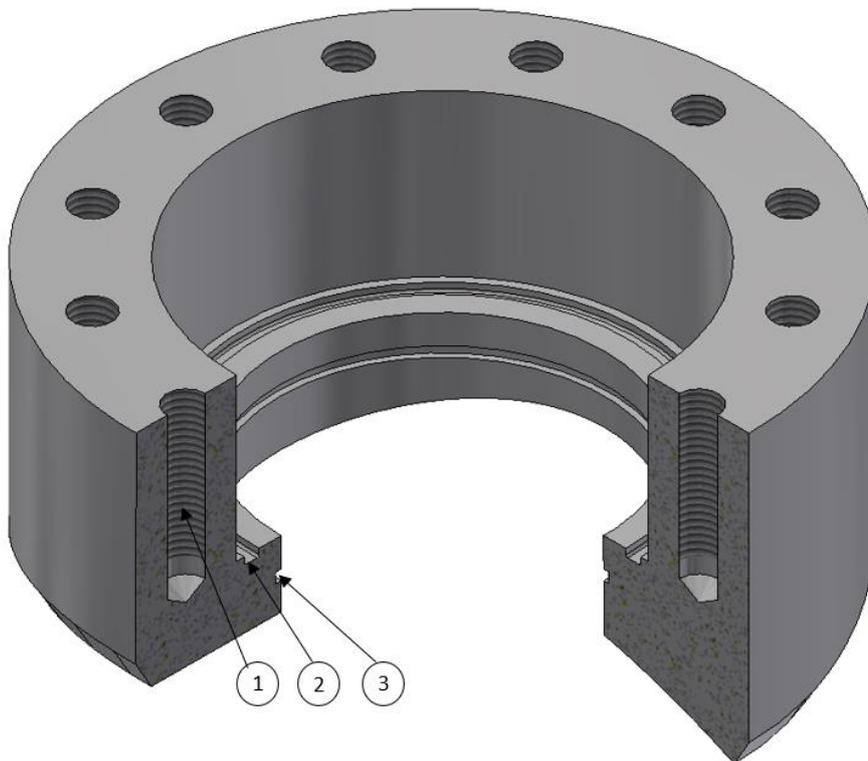


Abbildung 46: 3D-Dreiviertelschnitt des Stutzens „Viewport“ mit Darstellung der M14 Gewindebohrung (1), der Nut für den O-Ring (2) und die Nut für den Sicherungsring (3)

Klöpperboden

Der Klöpperboden ist das Abschlusselement des Behälters und ist in Abbildung 47 dargestellt.



Abbildung 47: Klöpperboden mit Ausschnitt bestehend aus einem Bord (1), einer Krempe (2) und einer Kalotte (3)

Der Außendurchmesser D_a des Bords beträgt wie beim Mantel 457,2 mm. Der Bord (1), welcher den gekrümmten Teil des Bodens mit dem Mantel verbindet, ist 80 mm lang. Die Wandstärke mit 24mm ist größer als die berechnete Wandstärke, da es bei der Herstellung des Klöpperbodens zur Unterschreitung der Wandstärke des verwendeten Bleches kommt. Somit muss gewährleistet sein, dass die sogenannte Mindestwandstärke dem berechneten Wert entspricht. Der, in der Berechnung anzufindende Wert für die Blechstärke ist stark aufgerundet, um auch höheren Materialabtrag gegenwirken zu können. Der Abtrag des Materials kann durch Schleifarbeiten beim Schweißen bzw. bei der Schweißnahtvorbereitung auftreten. Die Mindestwanddicke bei diesem Klöpperboden, welcher aus einem $s = 24 \text{ mm}$ Blech gefertigt wird, beträgt 23,5 mm. Laut der Berechnung im Anhang C besitzt Krempe (2) einen Radius von 157,88 mm und die Kalotte (3) einen Radius von 457,2 mm, wobei diese Werte laut AD 2000 eingehalten werden müssen. In der Mitte der Kalotte besitzt der Klöpperboden einen Ausschnitt mit Durchmesser von 92 mm für die Einschweißung des Stutzens auf der Hinterseite der Druckkammer.

Flansch

Der Flansch (siehe Abbildung 48) am vorderen Ende des Mantels besitzt mehrere Funktionen.

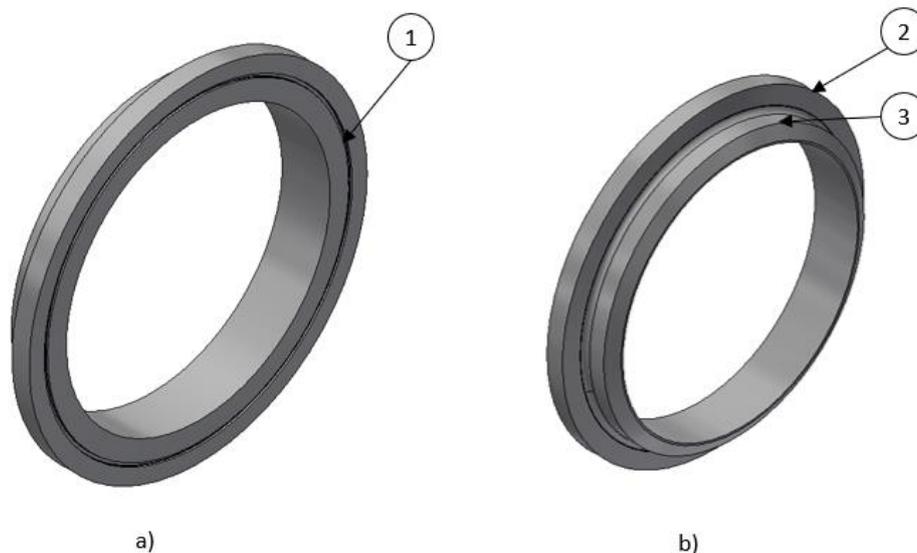


Abbildung 48: Darstellung des Flansches von der Vorderseite a) und von der Hinterseite b), wobei mit (1) die Nut für den O-Ring markiert ist. Die Fase (2) dient als Gegenstück zur Verschlussklammer und (3) markiert den zylindrischen Teil des Flansches

Einerseits bildet er die Dichtfläche zum Deckel und besitzt eine Nut (1) für den O-Ring. Zudem ist der Flansch für den Verschluss mit einer C-Klammer auf der inneren Flanschfläche konisch geformt. Die Fase (2) für den Verschluss besitzt einen Winkel von $8,4^\circ$ zur Senkrechten. Somit wird der Flansch durch die C-Klammer gegen den Deckel gepresst. Dies führt zur Kraftübertragung auf die Klammer und führt zur Verpressung des O-Ringes, welcher sich zwischen Deckel und Flansch befindet. Nach dem konischen Bereich, folgt ein zylindrisches Teilstück (3), damit der Flansch am Mantel angeschweißt werden kann. Der Außendurchmesser des zylindrischen Teilstückes beträgt 529 mm und der Innendurchmesser entspricht dem des Rohres. Die Stärke des Flansches beträgt 75 mm, womit dieser aus einem Blech mit einer Wandstärke von 80 mm gefertigt werden kann. In der Abbildung 48 ist der Flansch mit den oben beschriebenen konstruktiven Details veranschaulicht.

Bolzenaufnahme

Damit der Bolzen für die schwenkbaren C-Verschlussklammern gelagert werden kann, befindet sich auf dem Druckbehälter eine Bolzenaufnahme in Form eines aufgeschweißten Rohres (1), welches in Abbildung 49 zu sehen ist.

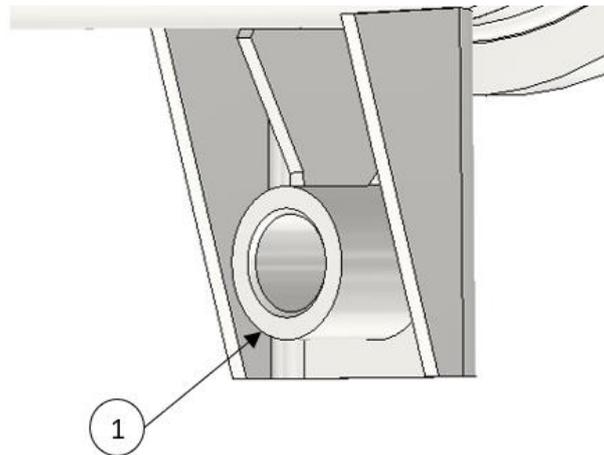


Abbildung 49: Bolzenaufnahme bestehend aus einem Rohr (1). Für die Stabilität und Positionierung des Rohres wird es in ein Biegeteil eingeschweißt

Die Länge des Rohrs beträgt 85 mm, der Innendurchmesser 51 mm und der Außendurchmesser 80 mm. An der innenliegenden Seite wird die Bewegung des Bolzens an der Kreisringfläche in die axiale Richtung nach außen verhindert.

Das Rohr wird in einem Blech eingeschweißt und bildet einen formsteifen Kasten. Dieser ist am Mantel angeschweißt und die Laschen des Aufnahmebleches sollen eine Schwenkbewegung des Rohres nach hinten verhindern.

Führungsblech

Das Führungsblech besteht aus einem 15 mm starken Blech und dient zur Führung der Spindel für das Verschlussystem, siehe Abbildung 50. Durch den Schlitz wird die Bewegung des Spindeleinsatzes in axialer Spindelrichtung verhindert. Das Führungsblech selbst wird am Mantel und am Flansch angeschweißt.

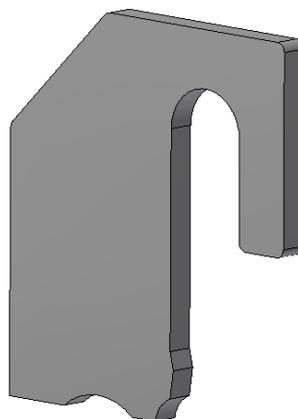


Abbildung 50: Das Führungsblech besitzt einen 50 mm breiten vertikalen Ausschnitt der als Führung/Begrenzung für die Führungsrolle dient

6.3. Viewport – Aufbau und Komponenten

Der Druckbehälter besitzt drei ident aufgebaute Viewports, welche die Betrachtung des Schweißprozesses im Inneren des Druckbehälters ermöglicht. In der nachstehenden Abbildung 51, ist der Aufbau des Viewports in einem 3D-Dreiviertelschnitt dargestellt. Der Stutzen wird im vorherigen Kapitel 6.2 beschrieben.

Um in die Kammer blicken zu können, wird ein Acrylzyylinder (1) in den Stutzen eingesetzt. Da es bei der Durchführung von Schweißversuchen zu Schweißspritzern kommen kann, müssen die Acrylzyylinder vor diesen geschützt werden. Aus diesem Grund werden vor jedem Acrylzyylinder austauschbare Glasscheiben (2) positioniert. Die Glasscheibe wird in axialer Richtung durch einen Sicherungsring (3) in axialer Position gehalten. Für die Breite der Nut des Sicherungsringes ist laut Norm eine Toleranz vorgegeben, da ohne diese der Sicherungsring nicht eingebaut werden kann. Aufgrund dieser Toleranz und den allgemeinen Fertigungstoleranzen kann die Glasscheibe nicht zwischen Acrylzyylinder und Sicherungsring eingespannt werden. Dadurch würde es bei der Druckbeaufschlagung zum Versagen der Glasscheibe kommen. Durch eine Hinterlüftung des Glases herrscht auf jeder Seite der gleiche Druck, wodurch ein Glasbruch verhindert werden kann. Dafür wird ein sogenannter Belüftungsring (4) zwischen Acrylzyylinder und der Glasscheibe positioniert. Dieser Ring ist 5 mm stark und besitzt 3 mm tief gefräste Kanäle, die als Belüftungsschlitze für die Kammer hinter der Glasscheibe dienen. Somit herrscht an beiden Seiten der Glasscheibe der gleiche Druck, wodurch das Bersten verhindert werden kann.

Die Abdichtung des Viewports ist durch einen axial verbauten O-Ring (5) vorgesehen. Der Acrylzyylinder wird durch den Deckel (6) gegen die Dichtfläche gepresst, wodurch eine ideale Verformung des O-Ringes nach außen auftritt. Hierbei ist zu beachten, dass die Flanschfläche den Oberflächen- und Toleranzangaben der Dichtungshersteller entsprechend bearbeitet sind. Eine geringe Spaltbildung durch unsachgemäße Bearbeitung der Funktionsflächen führt zu Extrusion des O-Ringes in den Spalt. Die axiale Druckkraft auf den Acrylzyylinder wird durch die Verschraubung des Deckels durch 12 Stück M14 Schrauben (7) mit dem Stutzen erzielt. Der Außendurchmesser des Flanschdeckels beträgt 190 mm. Um einen größeren Blickwinkel zu ermöglichen, beträgt der Innendurchmesser 100 mm. Zwischen Deckel und Stutzen befindet sich eine 2 mm starke Flachdichtung (8) aus Dichtungsmaterial AFM 31, die den Stutzen und den Acrylzyylinder im Bereich des Deckels überlappt. Diese Dichtung hat die Aufgabe axiale Toleranzen auszugleichen und eventuell auftretende Leckagen, die bei Verwendung eines flüchtigen Gases auftreten, zu unterbinden.

Sollte aufgrund einer hohen Anzahl an Schweißspritzern die Sicht durch das Glas nicht mehr vorhanden sein, so kann das Glas getauscht werden. Die Glasscheibe kann von Innen getauscht werden, wobei hier der Sicherungsring innen gelöst wird und das Glas entnommen werden kann. Es besteht aber auch

die Möglichkeit des Tausches von außen. Dafür muss die Stützenkopfplatte gelöst werden und danach kann die Flachdichtung, der Acrylglasstab, die Belüftungsscheibe und das Glas entnommen werden. Die erste Möglichkeit um die Glasscheibe zu tauschen, ist aufgrund des geringen Aufwandes zu empfehlen und es muss keine Dichtfläche geöffnet werden.

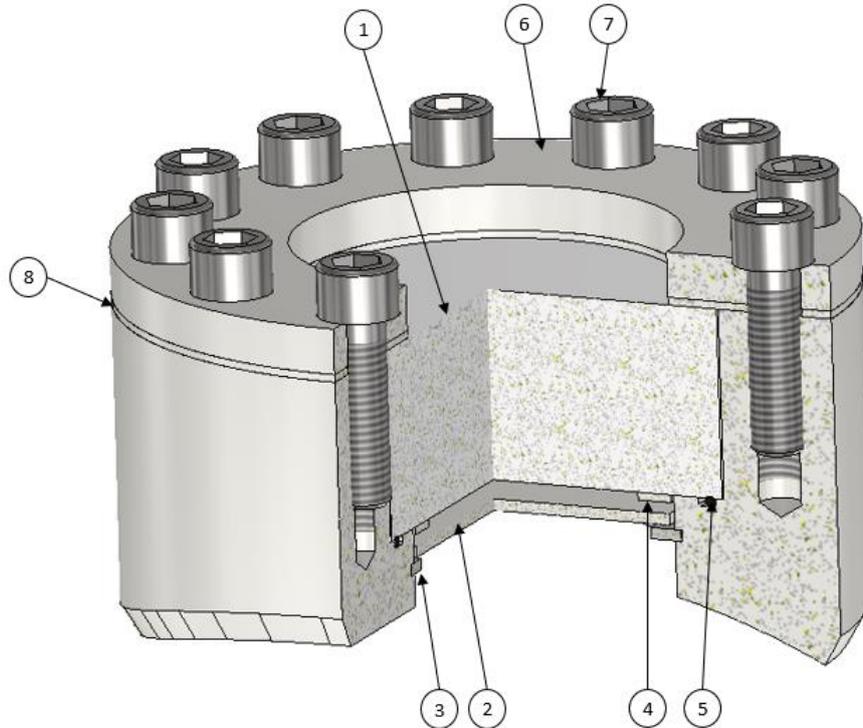


Abbildung 51: 3D-Dreiviertelschnitt des Viewports. Aufbau des Viewports mit einem Acrylzylinder (1), einer Glasscheibe (2), einem Sicherungsring (3), einer Belüftungsscheibe (4), O-Ring (5), einer Stützenkopfplatte (6), zwölf M14-Innensechskantschrauben (7) und einer Flachdichtung (8)

Der Belüftungsring wird in der Abbildung 52 detailliert dargestellt, wobei hier vier gefräste Taschen zu erkennen sind. Durch die gefrästen Kanäle kommt es zur Hinterlüftung der Glasscheiben, was zum Schutz vor Bruch bei Innendruckbelastung dient.

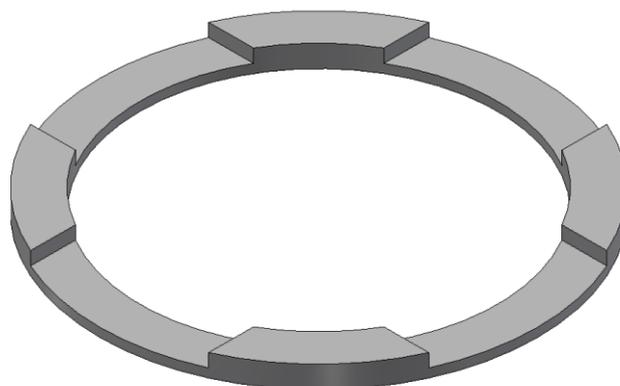


Abbildung 52: Belüftungsring mit gefrästen Taschen für die Hinterlüftung der Glasscheibe

6.4. Deckel

Mit dem Deckel wird die Druckkammer luftdicht verschlossen, da dieser die Dichtfläche zum Flansch und dessen O-Ring bildet.

Der Deckel, welcher in dargestellt ist, hat einen Durchmesser von 529 mm und besitzt ebenso eine konische Verschluss- und Klemmfläche (1).

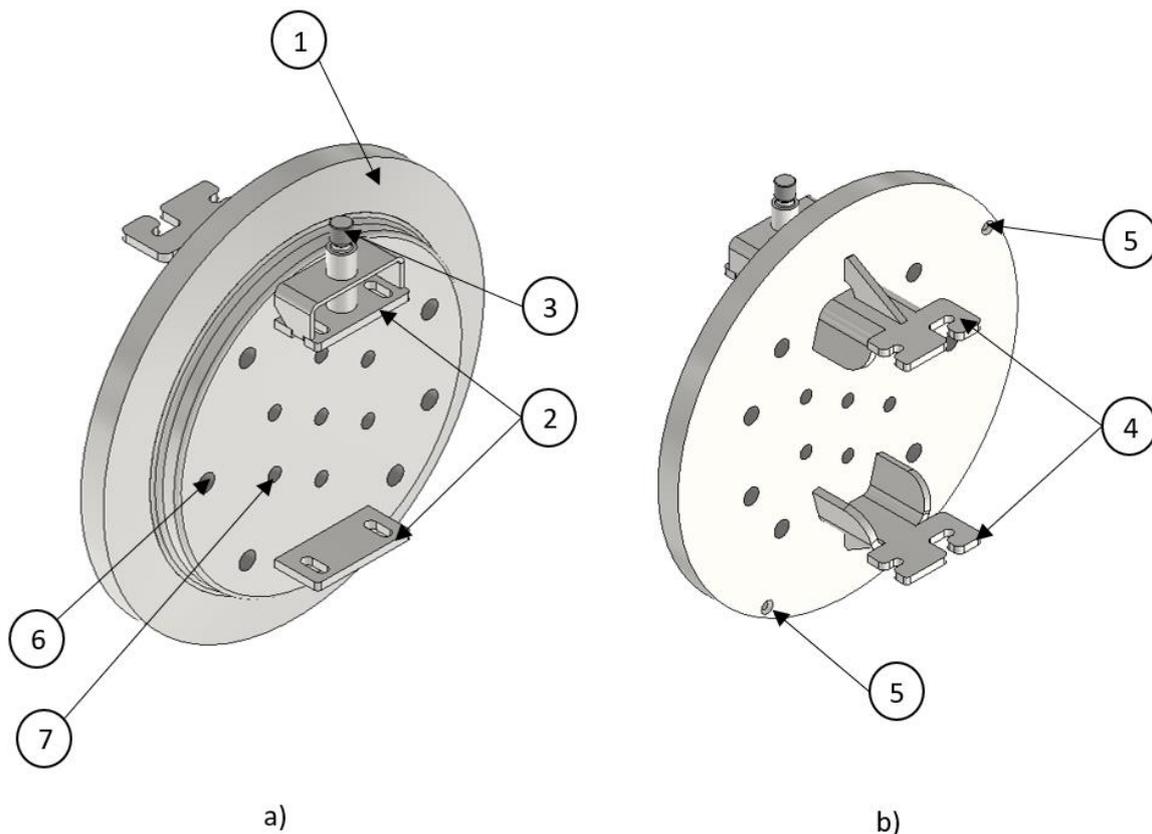


Abbildung 53: Der Deckel, Vorderansicht (a) und Rückansicht (b), inklusive Montagplatten (2), Gewindebolzen (3), Montageplatten innen (4), Zentrierbohrung (5), sieben Stück 1"-14 UNS Gewinde (6) und sieben Stück ½" NPT Gewinde (7), wird zum luftdichten Verschluss der Druckkammer benötigt. Konische Fläche (1) dient als Funktionsfläche für den Verschluss.

Diese konische Fläche bildet mit dem konischen Gegenstück des Verschlusses die Verschluss- und Klemmfunktion. Der Deckel ist im Bereich der Gewindebohrung 70 mm stark und ist somit stärker ausgeführt als berechnet.

Auf der Außenseite befinden sich zwei horizontal ausgerichtete Montagebleche (2). Diese dienen zur Anbindung an das verfahrbare Gestell. Der am oberen Montageblech aufgesetzte Bolzen (3) mit M24 Gewinde dient als Gegenstück für das Sicherungselement des Verschlusses, welches mit dem Bolzen verschraubt wird.

Auf der Innenseite sind zwei gekantete Bleche (4) für die Befestigung des Gestells mit der Schweißapparatur angebracht, wobei das Gestell zwischen beiden Blechen montiert wird. Um die

Montage vereinfachen zu können, ist eine „Einschubkontur“ an der rechten Seite erstellt worden, welche in Abbildung 54 zu sehen ist. Um diese Kontur nutzen zu können, werden Gewindestangen am Gestell angeschweißt. Bei der Montage wird das Gestell durch das rechte, in axiale Richtung vorhandene Langloch zum Deckel geschoben. Nachdem dieser Montagepunkt erreicht wurde, kann das Gestell nach rechts geschoben werden, wobei es nun in einer definierten Position befestigt werden. Durch diese Ausführung kann das Gestell ohne großen Kraftaufwand montiert werden. Weiters hat man durch diese „Einschubkontur“ den Vorteil, dass sich das Gestell in einer gesicherten Position befindet und ohne großen Kraftaufwand befestigt werden kann.

An der Deckelinnenseite sind zwei Zentrierbohrung (5) für die Aufnahme der Zentrierstifte am Flansch vorhanden. Diese dienen zur Vorzentrierung des Deckels, damit eine exzentrische Lagerung des Deckels vermieden werden kann, wodurch ein geringerer Kraftaufwand für das Schließen des Verschlusses benötigt wird.

Da die Schweißapparatur im Inneren der Druckkammer mit Leitungen für den Schweißstrom und allgemeiner Elektronik versorgt werden muss, werden dazu spezielle Einschraubverschraubungen verwendet. Diese Arte von Verschraubungen besitzen an beiden Enden Pins, mit denen das Kabel für Strom und Elektronik angeschlossen werden kann. Somit dienen diese Einschraubverschraubungen als Brücke bzw. Überbrückungsstück mit seitlichen Steckverbindungen für die Übertragung des Stroms und der elektronischen Signale ohne Dichtigkeitsproblemen. Für diese Einschraubverschraubungen werden drei 1“-14 UNS Gewinde (6) für den Schweißstrom und vier 1“-14 UNS Gewinde für die Elektronik benötigt, wobei einer davon für zukünftige Erweiterungen in der Elektronik vorgesehen ist. Dieser wird mit einer Verschlusschraube dicht verschlossen. Diese sind entlang eines Lochkreises mit dem Durchmesser 320 mm vorgesehen. Die Aufteilung entlang des Lochkreises führt zu einer optimalen Handhabung beim Anschließen der Kabel.

Für das Schutzgas und Wasser sind sieben Anschlüsse vorgesehen. Dabei handelt es sich um sieben ½“-14 NPT Gewinde (7), in denen die geraden Einschraubverschraubungen montiert werden können. Sechs Gewindebohrungen sind entlang des Lochkreisdurchmessers von 150 mm vorgesehen und eine Gewindebohrung ist in der Mitte des Deckels angebracht.

Die nachstehende Abbildung 54, beschreibt schematisch den Vorgang der vereinfachten Montage des Gestells. Der linke Fall a) zeigt den Beginn des Einführens des Gestells zwischen beide Bleche. Darstellung b) zeigt die Situation wo das Gestell in axiale Richtung im Endanschlag positioniert ist. In c) wird das Gestell nach rechts geschoben, wo es sich dann in Endposition befindet.

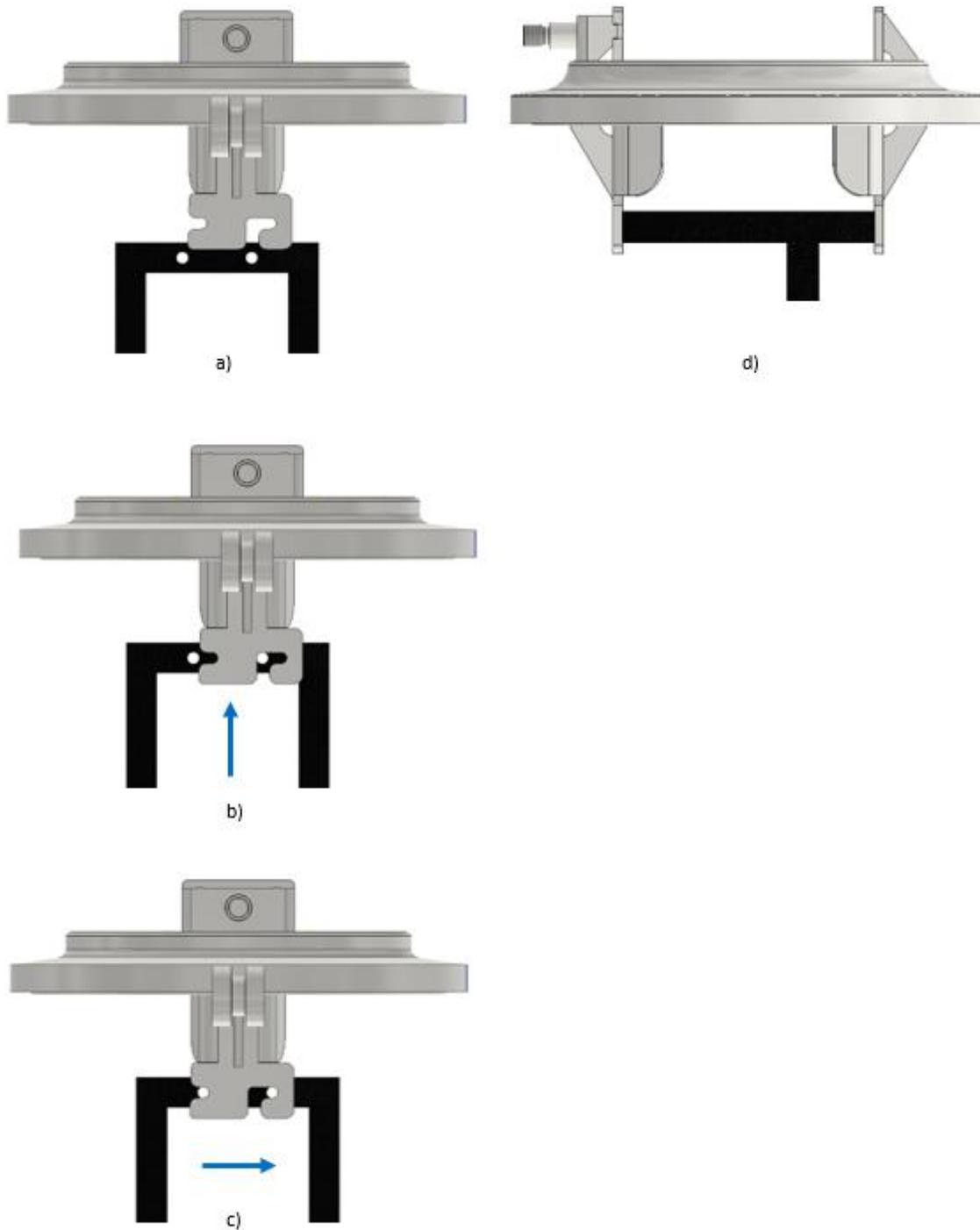


Abbildung 54: Darstellung der Einbausituation des Gestells am Deckel. a) zeigt den Anfangszustand, b) zeigt die Positionierung in axialer Richtung und c) zeigt die Endposition. In d) ist zu erkennen, dass das Gestell zwischen den Halterungen montiert wird

6.5. Verschlussystem

Das Verschlussystem, nach Abbildung 55, wird für das luftdichte Verschließen der Druckkammer verwendet. Dafür wurde ein radial wirkender C-Klemmverschluss modifiziert. Das Verschlussystem besteht aus mehreren einzelnen Komponenten, wobei die beiden C-Klammern (1) die wesentlichen Komponenten dieses Verschlusses sind. Dabei handelt es sich um zwei Klammern die eine Nut mit konischen Seitenflächen besitzen. Diese konischen Flächen führen in Kombination zu den konischen Flächen an Deckel und Flansch zu einer gleichmäßigen Kraftübertragung und Flächenpressung. Weiters führt die konische Ausführung zu einer Zentrierung beider Teile. Beide C-Klammern sind mittels Bolzen (2) über eine Bolzenaufnahme drehbar gelagert und mit dem Grundkörper der Druckkammer verbunden.

Über drehbar gelagerte Spindelmutter (3) werden beide C-Klammer durch eine spezielle Spindel (4) miteinander gekoppelt. Die an den Spindelmutter angeschweißten Lagerbolzen (5) werden in Verbindung mit einer Kunststoffgleitbuchse (6) an den Laschen der beiden C-Klammern drehbar verbunden.

Da sich der Klemmverschluss durch drehen der Spindel öffnen und schließen soll, muss dafür eine zweiteilige Spindel verwendet werden. Die Klammern entfernen sich beim Öffnen voneinander und nähern sich beim Schließen wieder an. Somit kann keine durchgehende Spindel verwendet werden, da die gegengleiche Bewegung so nicht realisiert werden kann. Der beschriebene Bewegungsablauf ist in Abbildung 56 zu sehen. Die Spindel wurde somit zweiteilig ausgeführt, wobei eine Führungsrolle (7) als zentrales Bindeelement für beide Spindeln dient. Es wird eine linksgängige und eine rechtsgängige Spindel eingesetzt. Durch die Führungsrolle wird gewährleistet, dass bei Drehbewegung der Spindel durch ein Handrad (8), eine symmetrische Bewegung der Klammern erzielt wird. Die Rolle, welche beide Spindeln miteinander verbindet wird durch das Führungsblech in horizontaler Richtung blockiert und kann somit nur nach unten und oben verfahren.

Um eine unerwünschte Öffnung der Klammer unter Druckbeaufschlagung unterbinden zu können, befindet sich auf einer Klammer ein Sicherungsblech (9). Dieses Sicherungsblech wird im geschlossenen Zustand durch einen Bolzen (10), der mit dem Gewindebolzen am Deckel, siehe Position 3 Abbildung 53 verschraubt wird, gesichert. Der Sicherungsbolzen wird auf den Bolzen am Deckel geschraubt. Da beide Klammern über die Spindel miteinander gekoppelt sind, reicht ein Sicherungsblech auf einer Klammer aus. Weiterer Vorteil der Sicherung ist, dass das Öffnen des Verschlusses im Betrieb durch ein unbeabsichtigtes Betätigen der Spindel bzw. Handrad nicht möglich ist.

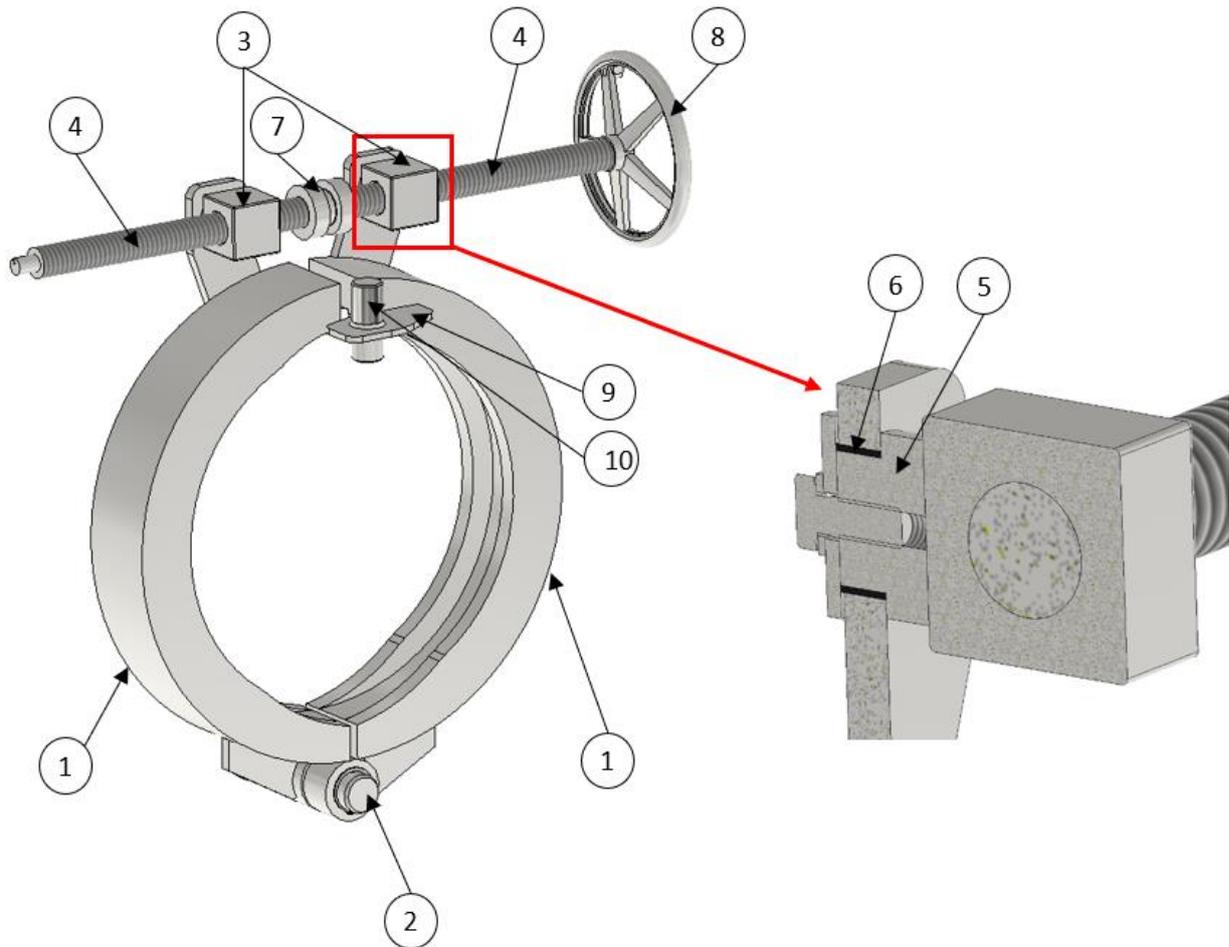
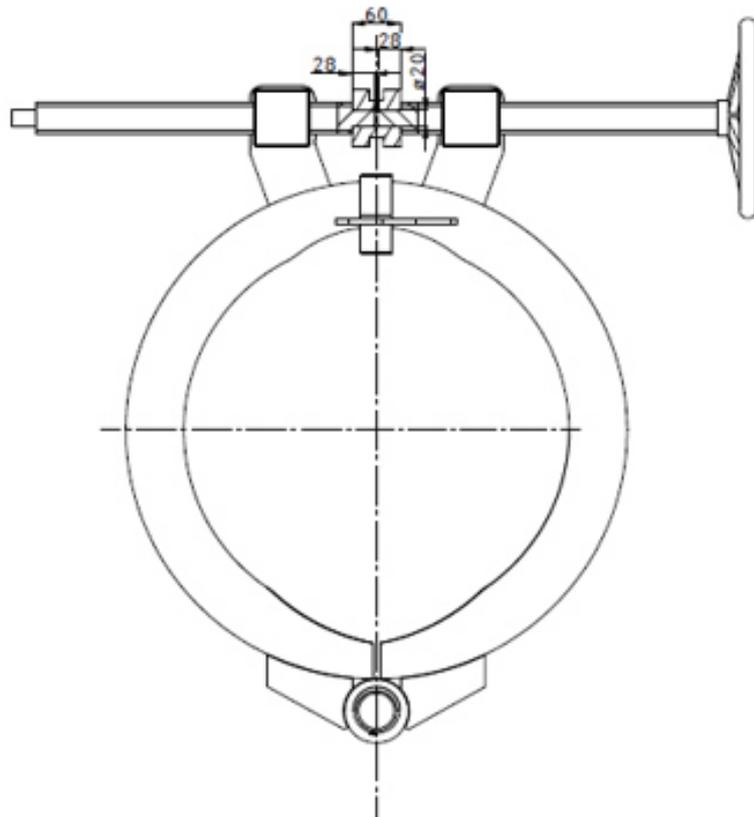


Abbildung 55: Verschlussystem bestehend aus zwei C-Klammern (1), einem Lagerbolzen (2), zwei Spindelmuttern (3), zwei Spindel (4), einem Lagerbolzen (5), einer Gleitlagerbuchse (6), der Führungsrolle (7), einem Handrad zum Drehen (8), einem Sicherungsblech (9) und einem Sicherungsbolzen (10). Rechte Seite der Abbildung zeigt einen 3D-Schnitt um die Gleitlagerbuchse (6) und den Lagerbolzen (5) darstellen zu können.

Die Gegenüberstellung beider Situationen – geschlossen bzw. geöffnet ist in der nachstehenden Abbildung 56 zu sehen. Weiters ist der Öffnungswinkel von 20° im geöffneten Zustand zu erkennen. Im geschlossenen Zustand haben beide C-Klammern den gleichen Mittelpunkt. Im geöffneten Zustand sind die Mittelpunkte der C-Klammern um 122 mm voneinander entfernt, wodurch ein Öffnen und Schließen des Deckels ermöglicht wird, ohne zu kollidieren und ohne die Klammer weit zu öffnen müssen.

Geschlossen



Geöffnet

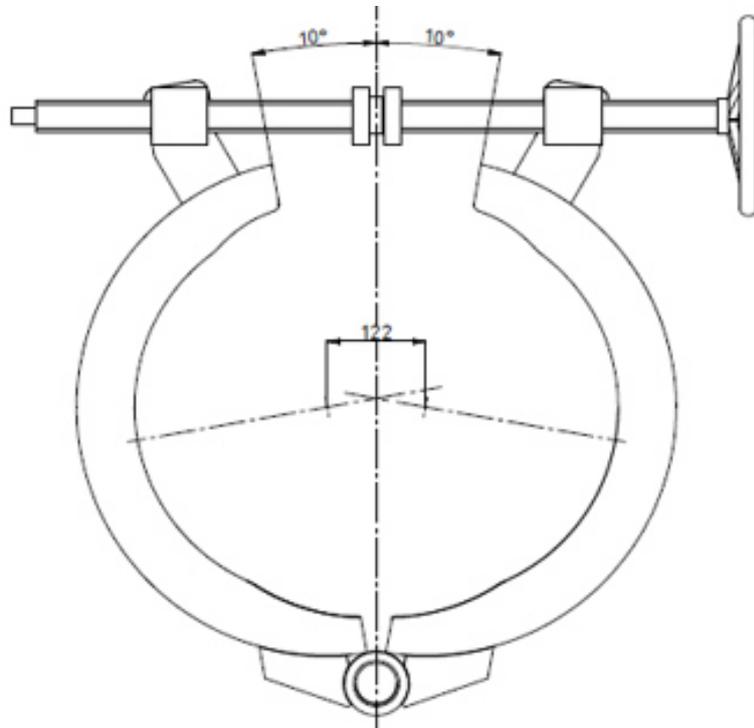


Abbildung 56: Gegenüberstellung der beiden Situationen. Oben ist der geschlossene Zustand und unten ist der geöffnete Zustand dargestellt.

7. Werkstoffwahl

Für die Druckkammer wurden Werkstoffe gewählt, die im Behälterbau am gängigsten sind, beziehungsweise vermehrt Anwendung finden. Aus der Literatur heraus zeigt sich, dass sogenannte Kesselbleche für diese Anwendungsfälle wie Druckbehälter, Reaktoren etc. verwendet werden. Es werden auch allgemeine Baustähle eingesetzt, wobei diese für Halterungen und ähnliche Komponenten verwendet werden.

Unabhängig von den Empfehlungen der Literatur wurde eine Werkstoffwahl mit dem *GRANTA EduPack* durchgeführt.

Um die Materialauswahl einzuschränken wurden im *GRANTA EduPack* nur Metalle betrachtet. Aufgrund der großen Auswahl an Metallen wurde diese durch genauere Angaben gewisser Eigenschaften wie Preis, Streckgrenze, Zugfestigkeit, Schweißbarkeit und Entflammbarkeit, welche in nachfolgende Tabelle 7 zu dargestellt sind, weiter eingeschränkt.

Tabelle 7: Definition bestimmter Werte für die Eingrenzung der Werkstoffe

Eigenschaft	Minimaler Wert	Maximaler Wert
Preis (€/kg)	0	1
Streckgrenze R_e (N/mm ²)	200	500
Zugfestigkeit R_m (N/mm ²)	400	700
Schweißbarkeit	Exzellent	
Entflammbarkeit	Nicht brennbar	

Die nachfolgende Abbildung 57 enthält die Werkstofflandkarte für die Metalle, welche die Eigenschaften aus Tabelle 7 erfüllen müssen.

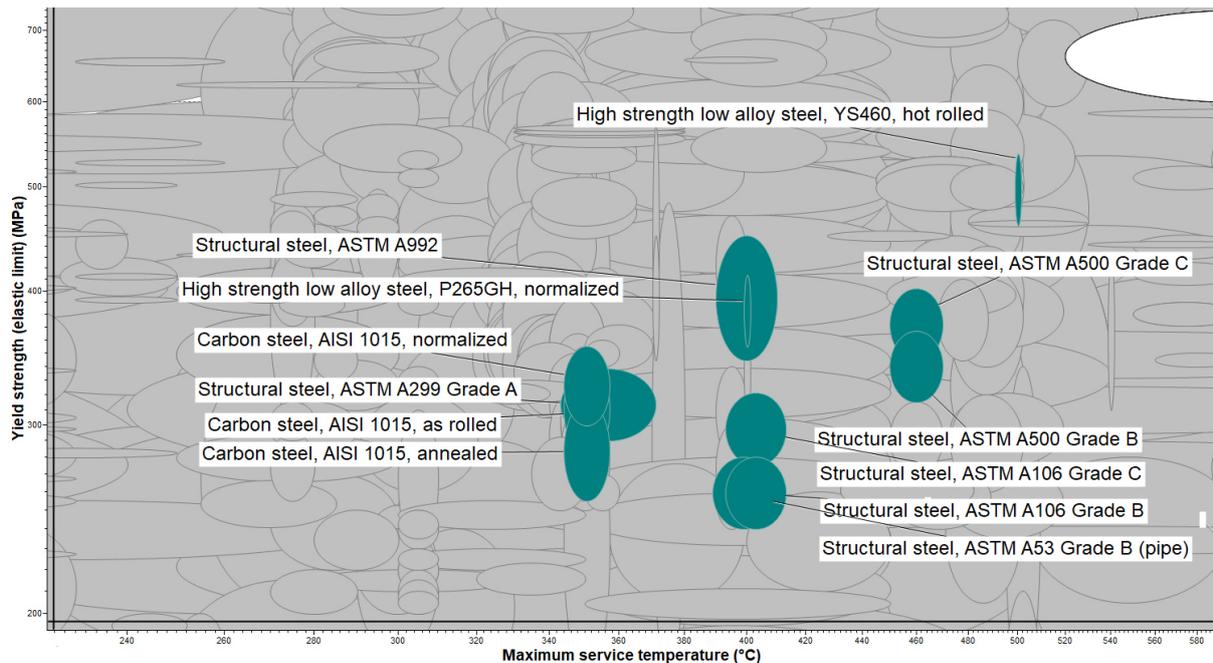


Abbildung 57: Ashby map für die Werkstoffwahl. Durch vorhin beschriebene Filterung bleiben Baustähle, hochfeste Werkstoffe aber auch niedriglegierte Werkstoffe und Werkstoffe nach ASTM über

Der Werkstoff AISI 1015 entspricht einem unlegierten Baustahl S235, welcher für einfache Anwendungen im Maschinenbau eingesetzt wird und daher für diese Anwendung nicht geeignet ist. Weiters werden alle Werkstoffe nach ASTM aus der Wahl genommen, da diese dem ASME-Code und nicht der AD 2000 unterliegen. Durch diese Eingrenzung stehen noch zwei Werkstoffe zur Verfügung, P355N/NH und YS460.

Beim Werkstoff YS460, in Europa als S460MC bekannt, handelt es sich um einen mikrolegierten Feinkornbaustahl und wird aufgrund der guten Kaltumformbarkeit für höherbelastete Bauteile wie Längsträger, Gelenkgabeln oder Querlenker verwendet wird [47]. Da die Komponenten dieser Anlage nicht durch Kaltumformung hergestellt werden, wird dieser Werkstoff nicht verwendet

Somit bleibt der Werkstoff P355N/NH über, wobei es sich hier um einen niedriglegierten Stahl handelt. Aufgrund des geringen Anteiles an Kohlenstoff (max. 0,2% C) ist er sehr gut schweißbar und weist hohe Zähigkeitseigenschaften auf. Dieser Werkstoff wird aufgrund dieser Werkstoffeigenschaften für Druckanwendungen im Apparatebau verwendet.

Die Datenbank des *GRANTA EduPacks* beinhaltet für Druckbehälterstähle nur den P355N/NH. Als endgültiger Werkstoff wurde der warmfeste Druckbehälterstahl P265GH gewählt. Beim P265GH handelt sich ebenfalls um einen Druckbehälterstahl nach DIN EN 10028 weist aber geringer Werkstoffkennwerte auf. Die Streckgrenze R_e des P265GH liegt bei 255 MPa und ist im Vergleich zum P355NH ($R_e = 345$ MPa) um 90 MPa geringer. Die Bruchdehnung ϵ ist bei beiden Werkstoffen mit 22%

gleich hoch. Einen Unterschied findet man bei der Kerbschlagarbeit, diese liegt beim P265GH bei 40 J und beim P355NH bei 50 J. Nachdem die Streckgrenze R_e des Werkstoffes P265GH für diese Anwendung aber ausreichend ist und dieser Werkstoff vorwiegend im Apparatebau verarbeitet wird, ist die Wahl auf den P265GH gefallen. Der P355NH kann daher auch als Alternative für den P265GH verwendet werden. Der Werkstoff der C-Klammer unterscheidet sich von den anderen, da es sich hier um einen P250GH handelt und diese schon aus dem Bestand verwendet wird. Die Werkstoffkennwerte dieses Werkstoffes, wie etwa Zugfestigkeit und Streckgrenze sind niedriger als beim P265GH. Da die Klammer allerdings einer geringeren Temperaturbelastung ausgesetzt ist, kann dieser Werkstoff problemlos verwendet werden.

Die nachfolgende Tabelle 8 gibt einen Überblick über die verwendeten Werkstoffe, wobei hier nur die berechneten und belastungskritischen Bauteile angeführt sind. Hier wird das Bauteil, dessen Werkstoff und Belastung, dargestellt.

Tabelle 8: Übersicht der gewählten Werkstoffe

Bauteil	Werkstoff	Belastung
Mantel	P265GH/P355NH	Druck- und Temperaturbelastet
Muffe	P265GH	Druck- und Temperaturbelastet
Stutzen	P265GH	Druck- und Temperaturbelastet
Klöpferboden	P265GH	Druck- und Temperaturbelastet
Flansch	P265GH	Druck- und Temperaturbelastet
C-Klammer	P250GH	Mechanisch belastet

8. Prüfungen

Dieses Kapitel beinhaltet die Prüfungen, die während und nach der Fertigung des Behälters durchgeführt werden müssen. Diese dienen dazu die Konformität des Druckbehälters zu erlangen und sind notwendig für eine sichere Inbetriebnahme sowie sicheren Betrieb.

In den nachstehenden Kapiteln werden auch die Prüfvorschriften bzw. Prüfintervalle für die wiederkehrenden Prüfungen beschrieben, um die Sicherheit im Betrieb gewährleisten zu können.

8.1. Prüfungen im Konformitätserlangungsprozess

Die Prüfungen, die in diesem Kapitel aufgelistet sind, sind für den Prozess der Erlangung der Konformität notwendig. Dazu wird das Merkblatt H0 des AD 2000 Regelwerks herangezogen.

Laut AD 2000 Merkblatt HP0 Tafel 1a, fällt der verwendete Werkstoff P265GH und seine Alternative P355NH in die Prüfgruppe 1.

Nach AD 2000 Tafel 1b ist eine Arbeitsprüfung und Ultraschall- oder Durchstrahlungsprüfung durchzuführen ist, wenn folgendes zutrifft:

- Wanddicke < 30mm
- $v = 1$ (Wert der die Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in der Schweißnaht beschreibt. Der Wert 1 bedeutet, dass die zulässige Berechnungsspannung in der Schweißnaht zu 100% ausgenutzt wurde, wodurch die Wandstärke kleiner ausgeführt werden kann aber dafür der Prüfumfang erhöht wird)
- Keine Wärmebehandlung

In Tabelle 9 sind Art und Umfang der Arbeitsprüfungen aufgelistet, wobei für diese Prüfgruppe drei Kerbschlagproben der Schweißnaht und eine Probeplatte, definiert nach dem Merkblatt HP 5/2 durchzuführen und herzustellen sind.

Tabelle 9. Übersicht von Umfang und Art der Arbeitsprüfung nach Merkblatt HP 0

Art der Arbeitsprüfung	Anzahl
Kerbschlagprobe Schweißnaht	3
Probeplatten nach HP 5/2	1

Für die Ultraschall- oder Durchstrahlungsprüfung ist der Prüfumfang der nachstehenden Tabelle 10 zu entnehmen. Für den Wanddickenbereich < 30 mm werden Röntgenprüfung (RT) Klasse A bzw. I oder Ultraschallprüfung (UT) Klasse A bzw. I angewandt. Über 30 mm kommen die Klassen B bzw. II zur Anwendung. Bei diesen Klassen handelt es sich um sogenannte Qualitätsstufen. Die Klasse A bzw. I

weist Basisqualität und die Klasse B bzw. II weist eine verbesserte Qualität auf, was sich beim Signal-Rausch-Verhältnis (SRV) zeigt. [48]

Tabelle 10: Prüfumfang der Schweißnähte nach Merkblatt HPO

Art der Schweißnaht	Prüfumfang (%)
Längsnaht (LN)	100
Rundnaht (RN)	100
Stoßstellen zwischen LN und LN oder LN und RN	25

Oberflächenprüfungen müssen aufgrund der geringen Wandstärke nicht durchgeführt werden.

Die vorhin beschriebenen Prüfungen dienen somit zur Erlangung der Konformität bzw. sind in diesem Prozess durchzuführen. Durch diese Maßnahmen kann aber nicht gewährleistet werden, dass die Betriebssicherheit über einen längeren Zeitraum gewährleistet werden kann. Aufgrund dieser Tatsache sind wiederkehrende Prüfungen vorgeschrieben.

8.2. Prüfvorschriften – wiederkehrende Prüfungen

Um die Sicherheit während der Verwendung des Druckbehälters sicherstellen zu können, schreibt die Betriebssicherheitsverordnung [49] vor, dass wiederkehrende Prüfungen der Druckanlage durchzuführen sind. Laut Druckgeräteüberwachungsverordnung (DGÜW-V) gibt es unterschiedliche Prüfzeiträume, welche abhängig von der zugeteilten Prüfstufe des Druckbehälter ist, wobei eine Prüfstufe das Gefahrenpotential des Druckbehälters festlegt. Nach Druckgeräteüberwachungsverordnung erfolgt die Zuteilung des Druckkessels nach § 22 zur Prüfstufe 1. Diese Prüfstufe ist gültig, wenn das Medium nicht zu Korrosion führt, ein ausreichender Korrosionsschutz vorhanden ist, Wandungen nicht überhitzen und verschleifen, der Druckbehälter keinen gefährdeten Schädigungsmechanismen ausgesetzt ist, das Material eine hohe Güte aufweist und der Druckbehälter eine dementsprechende Dokumentation besitzt.

Somit ergeben sich nach Druckgeräterichtlinie (2014/68/EU) folgende Prüfintervalle, nach Tabelle 11.

Tabelle 11: Übersicht der Prüffristen des Druckbehälters nach Druckgeräteüberwachungsverordnung

Art der Untersuchung	Prüffristen
Äußere Untersuchung	3 Jahre
Innere Untersuchung	12 Jahre
Druckprüfung	12 Jahre

Diese wiederkehrenden Prüfungen müssen durch eine unabhängige Instanz, wie beispielsweise TÜV Süd, durchgeführt werden.

9. Auswertung und Ergebnisse

Durch die Verwendung des Regelwerkes AD 2000 und dessen Merkblätter, konnte eine Druckautoklavenanlage für Hochdruckenwendungen in der additiven Fertigung ausgelegt und konzipiert werden. Durch diverse Vereinfachungen für die Bedienung des Druckbehälters und dem Verschlussystem, welches nun schnelle Schließ- und Öffnungsvorgänge erlaubt, ist eine Erleichterung im Forschungsbetrieb zu erwarten. In der nachstehenden Abbildung 58 ist die konstruktive Endversion der Druckautoklavenanlage dargestellt.

Die Beobachtung des Schweißprozesses im Inneren der Kammer kann über drei Stellen, zwei davon am Mantel und eine am Klöpperboden geschehen. Durch den Spindeltrieb und der schwenkbaren Ausführung des Verschlusses, kann die Kammer schnell und sicher geöffnet werden.

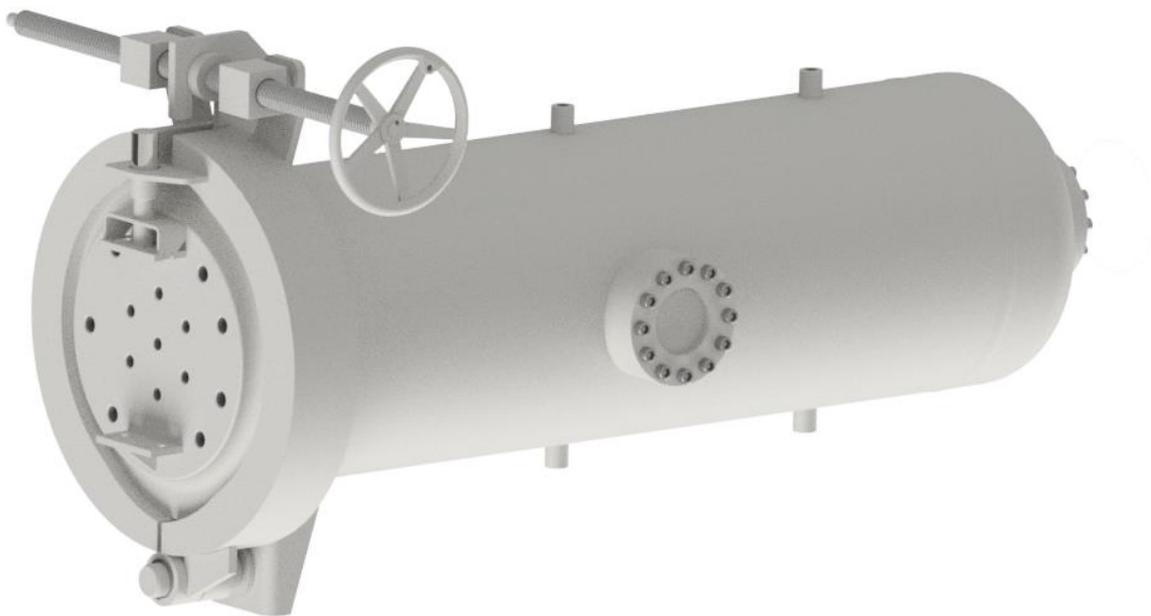


Abbildung 58: Druckbehälter für Hochdruckenwendungen mit einem Auslegungsdruck von 100 bar und einem Volumen von ca. 200 l

10. Zusammenfassung und Ausblick

Bei der, in dieser Arbeit betrachteten Druckautoklavenanlage, handelt es sich laut Einstufung nach der Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU um einen Druckbehälter der Kategorie IV Modul G. Kategorie IV bedeutet, dass es sich hierbei um einen Druckbehälter mit größtem Gefahrenpotential handelt, wodurch für die Erlangung der Konformität das Modul G verwendet werden muss. Dabei handelt es sich um den strengsten Prozess um eine Konformität zu erlangen. Beim Modul G wird für die Feststellung der Konformität eine Einzelprüfung durchgeführt, wobei eine Einzelprüfung die Prüfung und Abnahme des Druckgerätes durch eine unabhängige Instanz (TÜV) beinhaltet.

Die Konzipierung einer Druckautoklavenanlage für Hochdruckanwendungen zeigt, warum es notwendig ist, dass solche Anlagen nach einem Regelwerk beziehungsweise nach einer Norm ausgelegt werden müssen. Auch wenn es sich hier laut Kapitel 3.2.1 um einen dünnwandigen Behälter/Kessel handelt, genügt aufgrund der Druckbeaufschlagung von 100 bar eine Auslegung nach den Kesselgleichungen nicht. Da auch Temperaturbelastungen bis zu 220 °C auftreten, muss auch die Änderung der Werkstofffestigkeit mit steigender Temperatur beachtet werden. Die Auslegung nach der klassischen Mechanik findet hier keine Gültigkeit, da diese erst mit Zusatzwerten wie Abnutzungszuschlag c_2 und dem Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung c_1 erweitert werden muss. Aufgrund der oben beschriebenen Temperatur muss die zulässige Spannung durch die temperaturabhängigen Streckgrenzen ausgetauscht werden. Die Kesselgleichung kann aber für eine Abschätzung zur Erstkonzeptionierung herangezogen werden. Weiters kann es als Vergleichswert zum Ergebnis der Berechnung nach AD 2000 verwendet werden. Die berechneten Werte, wie zum Beispiele Wandstärke, Durchmesser etc., sind Mindestmaße die es einzuhalten gilt. Diese Maße wurden so dimensioniert, dass Rohre, Stutzen, Belche etc. dem gängigen Lieferprogramm entsprechen. Durch die Anpassung der berechneten Werte an da Lieferprogramm, kam es indirekt zu einer weiteren Erhöhung des Sicherheitsbeiwertes. Durch den verwendeten Faktor zur Berücksichtigung der Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen $\nu = 1$ treten geringere Wandstärken auf, wobei allerdings der Umfang an zerstörungsfreien Prüfungen steigt. Die Kontrolle der nach AD 2000 ermittelten Werte durch eine FE-Analyse zeigt, dass es zu einer richtigen Anwendung der Merkblätter aus der AD 2000 gekommen ist. Wären dabei sehr hohe Spannungen aufgetreten, würde dies ein Indiz für falsche Auslegung beziehungsweise einem Fehler in der Berechnung sein. Weiterführend kann aufgrund dieser Arbeit die Konformitätserlangung durch eine externe Instanz, wie etwa TÜV, erfolgen. Durch die momentane Materialverfügbarkeit treten Lieferverzögerungen auf, wodurch sich auch die benötigte Prüfung der Konstruktion durch den TÜV vertagt. Parallel zur Konformitätserlangung können die Fertigung des Druckbehälters,

Materialprüfungen, benötigte Arbeitsprüfungen und Zwischenbekundungen stattfinden, wodurch die Fertigstellung und das Inverkehrbringen des Behälters gewährleistet ist.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung von jener Normalkraft und Fläche, die zur Definition des Druckes herangezogen werden. [6]	3
Abbildung 2: Darstellung der chaotischen, zufälligen Bewegung der Gasmoleküle in einem abgeschlossenen System [9]	4
Abbildung 3: Dünnwandiger Kessel (a) mit dem betrachteten (lokal ebener) Spannungszustand (b) (Element in der Tangentialebene), Darstellung der Axialspannung (c) und Umfangsspannung (d) [11]	5
Abbildung 4: Längs aufgerissener Druckbehälter aufgrund der hohen Umfangsspannung [13].....	7
Abbildung 5: Zu erwartender Spannungsverlauf bei einem Druckbehälter unter Innendruck. rot: Biegespannung, schwarz: Membranspannung; strichlierte Linie: Spannung in Umfangsrichtung, durchgezogene Linie: Spannungen in Längsrichtung [13].....	9
Abbildung 6: Spannungsverlauf im Bereich der Stutzeinschweißung. Rot kennzeichnet die Spannungen σ_o , in Längsrichtung und schwarz kennzeichnet die Spannungen σ_u in Umfangsrichtung [13]	10
Abbildung 7: Schema der Werkstoffwahl für einen Druckbehälter. Die Anforderungen aus dem Anforderungsspektrum A werden im Ablauf mit den Eigenschaften aus dem Eigenschaftsspektrum E verglichen [20].....	12
Abbildung 8: Mehrere Ausführungsarten von Apparaten wie Druckbehälter (rechts) und Reaktor (links) [13].....	15
Abbildung 9: Übersicht der möglichen Komponenten eines Druckbehälters bestehend aus zwei Stützen (1,5), zwei gewölbten Böden (2,3), mehreren Mänteln (4,6,8), einer Pratten (7), einer Krempe (9), einem kegeligen Schuss (11), Schrauben (13), Flansch (14), ebener Boden (15), Berstscheibe (16) und einem Sicherheitsventil (17), [24]	17
Abbildung 10: Druckbehälter zylindrischen Schuss und Stützring [26].....	18
Abbildung 11: Durch äußeren Überdruck eingebeulter Kessel [22]	19
Abbildung 12: Druckbehälter mit Kombination aus zylindrischen Schuss (oben) und kegeligen Schuss (unten). Der kegelige Schuss wird meist zur Auslassöffnung hin verjüngt. [28]	19
Abbildung 13: Darstellung der gängigsten Bodenformen [13]	20
Abbildung 14: Reihung der gängigsten Böden nach Formstabilität, Belastbarkeit und Preis, wobei zu erkennen ist, dass eine steigende Wölbung zum Anstieg der Kosten aber auch der Belastbarkeit aber auch Formstabilität führt. [24]	21
Abbildung 15: Gewölbter Boden mit Kalotte (R), Krempe (r) und Bord (h_1), Wölbungshöhe (h_2), Wandstärke (s_e) und äußerem Bodendurchmesser (D_a) [4].....	22

Abbildung 16: Druckbehälter mit Stutzen - a) Stutzen mit Flansch, b) Stutzen mit Innengewinde (Muffe) [29]	22
Abbildung 17: Unterschiedliche Arten der Stuzeneinschweißung mit einem aufgesetzten Stutzen (links) und durchgesteckte Stutzen (rechts) [13]	23
Abbildung 18: Rohrförmige Verstärkung a) aufgesetzt b) durchgesteckt aber bündig mit zylindrischen Schuss c) durchgesteckt [4]	24
Abbildung 19: Scheiben- und rohrförmige Verstärkung a) eingesteckt mit Scheibe b) durchgesteckt mit Scheibe [4].....	24
Abbildung 20: Darstellung der unterschiedlichen Ausführungsarten von Flanschen [22]	25
Abbildung 21: Flansche links mit Schaftschraube (Schaftdurchmesser d_K und Gewindedurchmesser d_G und rechts mit Dehnschraube (Schaftdurchmesser d_K) und Dehnhülse verbunden. Der Druck p im Inneren versucht die Dichtung mit der Breite b_0 auszublasen, wodurch eine Flächenpressung durch die Schraubenverbindung aufgebaut werden muss. [13].....	26
Abbildung 22: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Tragelemente [13].....	28
Abbildung 23: Schnitt durch ein federbelastetes Sicherheitsventil [13].....	29
Abbildung 24: Anwendung von Berstscheiben für die Druckbegrenzung. Gegenüberstellung Knickberstscheibe (Druck auf konvexer Seite) und vorgewölbte Berstscheibe (Druck auf konkaver Seite) [13]	29
Abbildung 25: Diagramm für die Bestimmung der Kategorie, der Druck ist über dem Volumen aufgetragen. Bestimmung der Kategorie durch einsetzen der Wert für Druck und Volumen [39].....	31
Abbildung 26: Erste Prinzipskizze für die Hauptabmessungen des Druckbehälters, sowie die Positionen der Viewports, Muffen und Anschlussgewinde.	36
Abbildung 27.: Einstufung der Kategorie mittels zuständigem Diagramm Druck p über das Volumen. Die roten Linien entsprechen den Werten dieser Arbeit [39]	38
Abbildung 28: Rohrquerschnitt des verwendeten Rohres mit einer Wandstärke von $s_{M_g} = 22,2 \text{ mm}$ und einem Außendurchmesser $D_{a_R} = 457,2 \text{ mm}$ und entspricht somit einem 18" Rohr.....	41
Abbildung 29: Rohrförmige Verstärkung Ausführung c) Innendurchmesser Stutzen d_i , Wandstärke Stutzen s_S ; Wandstärke Mantel s_A ; mittragende Länge l_S [4]	43
Abbildung 30: Diagramm der die Verschwächungsbeiwerte für Ausschnitte in zylindrischen Grundkörpern darstellt inkl. Beispiel wie man die Werte daraus bestimmt (rot markiert) [4].....	44
Abbildung 31: Berechnungsschema für den Festigkeitsnachweis für zylindrische Grundkörper [4]....	45
Abbildung 32: Berechnungsschema für den Festigkeitsnachweis für kugelige Körper [4]	46
Abbildung 33: Vereinfachtes Model der Druckkammer für die erste FE-Analyse	48

Abbildung 34: Verformung der Klammer in einer Ansicht wo die Verformung verstärk in a) dargestellt werden kann. Die Flanken der Klammer werden nach außen gedrückt, wie es auch in der Realität zu erwarten wäre. b) zeigt die unverformte Klammer	49
Abbildung 35: Verschiebung der Bauteile der vereinfachten-Baugruppe. Mantel verformt sich um 0,175mm	50
Abbildung 36: Darstellung der Spannungen am Behälter aufgrund Innendruck.....	50
Abbildung 37: Darstellung der auftretenden Spannungen in der C-Klammer.....	51
Abbildung 38: Darstellung der Verschiebungen aufgrund des Druckes von 100 bar. Deckel weist die höchsten Verschiebungen auf, da es sich um eine eingespannte ebene Platte handelt. Weiters ist zu erkennen, dass an den geschwächten Bereichen eine höhere Verschiebung als in den Nachbarbereichen auftritt.....	52
Abbildung 39: Darstellung der Spannungen am finalen Konzept mit maximaler Spannung am Mantel mit 123,5 MPa und am Deckel mit 154,4 MPa.....	53
Abbildung 40: Darstellung der Spannungen im Bereich des Klöpperboden mit maximaler Spannung von 72,8 MPa.....	54
Abbildung 41: Spannungen am Verschlussystem mit maximaler Spannung von 188,7 MPa im Bereich einer Kante mit Linienberührung	55
Abbildung 42: <i>Zusammengebauter Druckbehälter bestehend aus einem Grundkörper (1), dem Viewport (2), dem Verschlussystem (3) und dem Deckel (4)</i>	56
Abbildung 43: Grundkörper von zwei Blickrichtung dargestellt, wobei a) den Grundkörper von oben und b) den Grundkörper von unten zeigt. Es sind der Mantel (1), der Klöpperboden (2), der Flansch (3), die Stützen (4), die Muffen (5), die Bolzenaufnahme (6), das Führungsblech (7) sowie die Zentrierstifte (8) zu sehen.	57
Abbildung 44: $\varnothing 457,2 \times 22,2$ mm Rohr als Mantel mit einer Länge von 1225 mm und 2 großen sowie vier kleine Ausschnitte für die Stützen.....	58
Abbildung 45: Einzuschweißende Muffe mit einem 1/2" NPT Gewinde als Anschluss für diverse Komponenten.....	58
Abbildung 46: 3D-Dreiviertelschnitt des Stützens „Viewport“ mit Darstellung der M14 Gewindebohrung (1), der Nut für den O-Ring (2) und die Nut für den Sicherungsring (3).....	59
Abbildung 47: Klöpperboden mit Ausschnitt bestehend aus einem Bord (1), einer Krempe (2) und einer Kalotte (3).....	60
Abbildung 48: Darstellung des Flansches von der Vorderseite a) und von der Hinterseite b), wobei mit (1) die Nut für den O-Ring markiert ist. Die Fase (2) dient als Gegenstück zur Verschlussklammer und (3) markiert den zylindrischen Teil des Flansches.....	61

Abbildung 49: Bolzenaufnahme bestehend aus einem Rohr (1). Für die Stabilität und Positionierung des Rohres wird es in ein Biegeteil eingeschweißt	62
Abbildung 50: Das Führungsblech besitzt einen 50 mm breiten vertikalen Ausschnitt der als Führung/Begrenzung für die Führungsrolle dient.....	62
Abbildung 51: 3D-Dreiviertelschnitt des Viewports. Aufbau des Viewports mit einem Acrylzylinder (1), einer Glasscheibe (2), einem Sicherungsring (3), einem Belüftungsscheibe (4), O-Ring (5), einer Stutzenkopfplatte (6), zwölf M14-Innensechskantschrauben (7) und einer Flachdichtung (8)	64
Abbildung 52: Belüftungsring mit gefrästen Taschen für die Hinterlüftung der Glasscheibe	64
Abbildung 53: Der Deckel, Vorderansicht (a) und Rückansicht (b), inklusive Montagplatten (2), Gewindebolzen (3), Montageplatten innen (4), Zentrierbohrung (5), sieben Stück 1“-14 UNS Gewinde (6) und sieben Stück ½“ NPT Gewinde (7), wird zum luftdichten Verschluss der Druckkammer benötigt. Konische Fläche (1) dient als Funktionsfläche für den Verschluss.	65
Abbildung 54: Darstellung der Einbausituation des Gestells am Deckel. a) zeigt den Anfangszustand, b) zeigt die Positionierung in axialer Richtung und c) zeigt die Endposition. In d) ist zu erkennen, dass das Gestell zwischen den Halterungen montiert wird	67
Abbildung 55: Verschlusssystem bestehend aus zwei C-Klammern (1), einem Lagerbolzen (2), zwei Spindelmuttern (3), zwei Spindel (4), einem Lagerbolzen (5), einer Gleitlagerbuchse (6), der Führungsrolle (7), einem Handrad zum Drehen (8), einem Sicherungsblech (9) und einem Sicherungsbolzen (10). Rechte Seite der Abbildung zeigt einen 3D-Schnitt um die Gleitlagerbuchse (6) und den Lagerbolzen (5) darstellen zu können.....	69
Abbildung 56: Gegenüberstellung der beiden Situationen. Oben ist der geschlossene Zustand und unten ist der geöffnete Zustand dargestellt.	70
Abbildung 57: Ashby map für die Werkstoffwahl. Durch vorhin beschriebene Filterung bleiben Baustähle, hochfeste Werkstoffe aber auch niedriglegierte Werkstoffe und Werkstoffe nach ASTM über	72
Abbildung 58: Druckbehälter für Hochdruckanwendungen mit einem Auslegungsdruck von 100 bar und einem Volumen von ca. 200 l.....	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anwendungsbeispiele für die gängigsten Werkstoffe aus der Werkstoffgruppe Eisenmetalle [20]	13
Tabelle 2: Übersicht der Kategorien und deren Modul.....	30
Tabelle 3: Zusammenfassung der physikalischen Anforderungen an die Druckkammer	35
Tabelle 4: Tabellarische Übersicht für die Einstufung des Druckbehälters.....	37
Tabelle 5: Festigkeitswerte P265GH bei unterschiedlichen Temperaturen für die lineare Interpolation	39
Tabelle 6: Übersicht gewählter Beiwerte für die Mantelwandstärke	40
Tabelle 7: Definition bestimmter Werte für die Eingrenzung der Werkstoffe	71
Tabelle 8: Übersicht der gewählten Werkstoffe	73
Tabelle 9: Übersicht von Umfang und Art der Arbeitsprüfung nach Merkblatt HP 0	74
Tabelle 10: Prüfumfang der Schweißnähte nach Merkblatt HPO.....	75
Tabelle 11: Übersicht der Prüffristen des Druckbehälters nach Druckgeräteüberwachungsverordnung	75

Literaturverzeichnis

- [1] D. Greitemeier, *Untersuchung der Einflussparameter Auf Die Mechanischen Eigenschaften Von Additiv Gefertigtem TiAl6V4*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2016. [Online]. Available: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4707235>
- [2] A. M. Gressner and T. Arndt, Eds., *Lexikon der medizinischen Laboratoriumsdiagnostik: Mit 434 Tabellen*, 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- [3] AVK, Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, *Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen ; mit 46 Tabellen*, 3rd ed. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
- [4] Verband der Technischen Überwachungs-Vereine, *AD 2000-Regelwerk: Taschenbuch-Ausgabe 2016*, 10th ed. Berlin: Beuth, 2016.
- [5] C. E. Mortimer, U. Müller, and J. Beck, *Chemie: Das Basiswissen der Chemie : 410 Abbildungen, 545 Formelbilder*, 12th ed. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag, 2015.
- [6] Michael Rundel, *Physik Libre*, 2021.
- [7] H. Herwig, *Strömungsmechanik A-Z // Strömungsmechanik A - Z: Eine systematische Einordnung von Begriffen und Konzepten der Strömungsmechanik*, 1st ed. Wiesbaden: Vieweg, 2004. Accessed: Jun. 8 2022. [Online]. Available: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:1111-201401171009>
- [8] H. Sigloch, *Technische Fluidmechanik*, 9th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014.
- [9] D. C. Giancoli, *Physik: Lehr- und Übungsbuch*, 3rd ed. München: Pearson Studium, 2011.
- [10] H. Hoffmann, R. Neugebauer, and G. Spur, Eds., *Handbuch Umformen*, 2nd ed. München: Hanser, 2012.
- [11] *Technische Mechanik 2: Elastostatik*, 10th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. [Online]. Available: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10303179>
- [12] S. Ripperger and K. Nikolaus, *Entwicklung und Planung verfahrenstechnischer Anlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2020.
- [13] D. Gleich and R. Weyl, *Apparatelemente: Praxis der sicheren Auslegung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
- [14] J. Giesecke, S. Heimerl, and E. Mosonyi, *Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb*, 5th ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- [15] U. Kuhlmann, Ed., *Dauerhaftigkeit - Ingenieurtragwerke*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2017.
- [16] H.-B. Horlacher and U. Helbig, Eds., *Rohrleitungen*, 2nd ed. Berlin: Springer Berlin, 2016.
- [17] M. Ulrich, *Werkstoff-Fragen des heutigen Dampfkesselbaues*. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 1930.

-
- [18] S. Schwaigerer, *Festigkeitsberechnung im Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau*, 3rd ed. Berlin: Springer-Verl., 1978.
- [19] H. Titze and H.-P. Wilke, *Elemente des Apparatebaues: Grundlagen - Bauelemente - Apparate*, 3rd ed. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 1992.
- [20] K. Sattler and W. Kasper, *Verfahrenstechnische Anlagen: Planung, Bau und Betrieb*. Weinheim: Wiley-VCH.
- [21] *Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik ; mit 412 Tabellen*, 20th ed. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [22] Florian Wöhry, "(Einführung in den) Apparatebau," 2020.
- [23] J. W. Mußmann, Ed., *Umsetzung der Europäischen Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU: Handlungshilfe und Potentiale*, 3rd ed. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH, 2016.
- [24] Christoph Ponak, "(Einführung in den) Apparatebau," 2020.
- [25] G. Scholz, *Rohrleitungs- und Apparatebau: Planungshandbuch für Industrie- und Fernwärmeversorgung*. Berlin: Springer Vieweg, 2012.
- [26] Rudia Wan, *Pressure Vessel Stainless*. [Online]. Available: <https://imgbin.com/png/Aj8pMZG0/pressure-vessel-stainless-steel-gas-pipe-png> (accessed: May 23 2022).
- [27] E. Wegener, *Festigkeitsberechnung verfahrenstechnischer Apparate*. Weinheim, New York, Chichester, Brisbane, Singapore: Wiley-VCH, 2002.
- [28] MAX BALDINGER AG, *Druckbehälter*. [Online]. Available: https://www.baldinger.biz/shop/index.php?route=product/product&product_id=14285 (accessed: May 23 2022).
- [29] Fa. Schuster, *Druckbehälter Produktübersicht*. [Online]. Available: <https://www.schusterboilers.com/products/industrial-369/tanks/1096/kt> (accessed: May 23 2022).
- [30] *Apparate: Technik, Bau, Anwendung*, 2nd ed. Essen: Vulkan-Verl., 1997.
- [31] H. J. Matthies and K. T. Renius, *Einführung in die Ölhydraulik: Mit 27 Tafeln sowie 110 Kurzaufgaben mit Lösungshinweisen*, 6th ed. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008.
- [32] B. Schlecht, *Maschinenelemente Bd.2: Getriebe - Verzahnungen - Lagerungen*, 1st ed. München: Pearson Studium, 2009. [Online]. Available: <https://www.pearson-studium.de/isbn/9783863265489>
- [33] *Handbuch Rohrleitungsbau*, 3rd ed. Essen: Vulkan-Verl., 2008.
- [34] P. Köhler, Ed., *CAD-Praktikum für den Maschinen- und Anlagenbau mit PTC Creo*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. [Online]. Available: <http://www.springer.com/>
- [35] R. Herz, *Grundlagen der Rohrleitungs- und Apparatechnik*, 2nd ed. Essen: Vulkan-Verl., 2004.
- [36] U. Hauptmanns, *Prozess- und Anlagensicherheit*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [37] *Industriearmaturen: Bauelemente der Rohrleitungstechnik*, 5th ed. Essen: Vulkan-Verl., 1997.
-

-
- [38] TÜV SÜD Industrie Service GmbH, *EINSTUFUNG VON DRUCKGERÄTEN IN KATEGORIEN*. [Online]. Available: <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/druckgeraete-info/druckgeraeterichtlinie/einstufung-druckgeraeterichtlinie#:~:text=Allgemeines, die%20Fluidgruppe%20und%20der%20Aggregatzustand.> (accessed: Jun. 8 2022).
- [39] *RICHTLINIE 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt: RICHTLINIE 2014/68/EU*, 2014.
- [40] J. Sauer, Ed., *Arbeitsschutz von A - Z ; [2014]*, 8th ed. Freiburg im Breisgau: Haufe-Lexware, 2013.
- [41] O. Eberhardt, *Die EU-Maschinenrichtlinie: Praktische Anleitung zur Anwendung der europäischen Richtlinien zur Maschinensicherheit - mit allen Richtlinientexten*, 4th ed. Renningen: expert-Verl., 2004.
- [42] Michael Krämer, *EN13445 in der Praxis – Konstruktion-Berechnung-Prüfung-Werkstoffe im Vergleich zu*.
- [43] TÜV SÜD Industrie Service GmbH, *AD 2000*. [Online]. Available: <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/druckgeraete-info/regelwerke-weltweit/anwendbare-regelwerke-und-standards/ad-2000>
- [44] K. H. Weber, *Engineering verfahrenstechnischer Anlagen: Praxishandbuch mit Checklisten und Beispielen*, 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- [45] V. Krey, *Praxisleitfaden Produktsicherheitsrecht: CE-Kennzeichnung - Gefahrenanalyse - Betriebsanleitung - Konformitätserklärung - Produkthaftung - Fallbeispiele*, 1st ed. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2009. [Online]. Available: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446420045>
- [46] Küppers Engineering, *Druckgeräte*. [Online]. Available: https://www.druckgeraete-online.de/seiten/dgr_dia2.htm
- [47] thyssenkrupp Hohenlimburg GmbH, *thyssenkrupp_hsm-460_produkthinformation_precision_steel_de*. [Online]. Available: https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/publikationen/precision_steel/produktinformationen_1/mikrolegierter_feinkornbaustahl/thyssenkrupp_hsm-460_produkthinformation_precision_steel_de.pdf (accessed: Jun. 8 2022).
- [48] K. Kolb and W. Kolb, *Grobstrukturprüfung mit Röntgen- und Gammastrahlen*. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag, 1970.
-

- [49] R. Studier, *Betriebssicherheitsverordnung BetrSichV 2022: Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln*, 1st ed. Berlin: epubli, 2022.

Anhang

Anhang A: Gefahrenanalyse

Der Anhang A beinhaltet die in Kapitel 4 beschriebene Gefahrenanalyse. Hier werden mögliche Gefahren, die in der Druckgeräterichtlinie festgehalten sind, dargestellt. Zu jeder Gefahr wurden Sicherheitsanforderungen definiert und auch Maßnahmen vorgestellt, wie die jeweilige Gefahr beseitigt oder vermindert werden kann. Nicht jede Gefahr lässt sich durch geeignete Maßnahmen beseitigen, darum wurden mögliche Restgefahren definiert, und sind in der gesetzlich verpflichtenden beizulegenden Betriebsanleitung festgehalten.

Laufnummer	Gefahr	Anhang DGRL	Sicherheitsanforderung	Maßnahmen Minderung/Beseitigung der Gefahr	Mögliche Restgefahr (in Betriebsanleitung)
1	Mechanisches Versagen wenn die Auslegung nicht nach den offiziellen Entwurfsmethodiken ausgeführt worden sind	2.1	LebensdauerAuslegung nach offiziellen Methoden und Einhaltung von Sicherheitsfaktoren für alle Ausfallsarten	Auslegung und Konstruktion nach AD 2000 (Merkblätter B und S)	-
2	Mechanisches Versagen aufgrund nicht vollständiger Annahme der auftretenden Belastung	2.2.1	Auslegung nach Betriebsbedingungen und beabsichtigte Verwendung der Druckbehälters Temperatur (Umgebung/Betrieb) Druck (Innen/Außen) Statischer Druck inkl. Füllgewicht (Betrieb-/Prüfbedingung) Belastung aufgrund Wind/Erdbeben/Verkehr Äußere Kräfte und Momente Materialermüdung oder mögliche Erosion und Korrosion Fluide die sich instabil zersetzen	Auslegung und Konstruktion nach AD 2000 (Merkblätter B und S) Wird in Laufnummer 3 behandelt Wird in Laufnummer 3 und Punkt 6 behandelt Nicht enthalten	Annahmen der Belastung bezüglich Erdbeben Betriebsverkehr sowie der äußeren Kräfte und Momente. Angegebene Korrosionszuschlag von der Auslegung
3	Mechanisches Versagen aufgrund falscher Berechnungs-/Auslegungsmethoden	2.2.2 2.2.3a 2.2.3b 2.2.3c	Auslegung nach folgenden Methoden: experimentelle Auslegungsmethode / Berechnungsmethode Zulässige Beanspruchung durch Sicherheitsfaktoren und Auslegungsverfahren begrenzt max. zulässiger Druck <= Berechnungsdruck Berechnungstemperatur soll hohe Sicherheitsbeiwerte beinhalten Maximale Spannung soll geringer als zulässige Spannung sein Alle Druck- und Temperaturkombination müssen berücksichtigt sein Geprüfte Werkstoffdaten inkl. entsprechender Sicherheitsfaktoren verwenden Geeignete Verbindungsmethoden verwenden Berücksichtigung von Korrosion, Ermüdung und Kriechen Stabilität der Struktur ausreichend	Methoden der Berechnung nach AD 2000 (Merkblätter B und S) Auslegung und Konstruktion nach AD 2000 (Merkblätter B und S); FEM-unterstützter Festigkeitsnachweis der Stützen Auslegung nach AD 2000 B0 und B4 Auslegung nach AD 2000 B0 Abschnitt 5 Auslegung nach AD 2000 B0 Abschnitt 6, 7 und 8 Auslegung nach AD 2000 B0 Abschnitt 5 und 4 Auslegung nach AD 2000 B0 Abschnitt 6 und AD 2000 W1 Auslegung nach AD 2000 B0 Abschnitt 8 und AD 2000 HPO Tafel 1 Korrosionszuschlag berücksichtigen, ruhende Belastung, außerhalb des Bereiches wo Kriechen eintritt, Beschichtung gegen Korrosion Auslegung nach AD 2000 S3/0	- - - - - - - Nachweis des richtigen Fundamentes muss vom Betreiber sichergestellt werden
4	Mechanisches Versagen durch Fehler im Inneren die durch fehlende Inspektionsmöglichkeiten nicht entdeckt werden	2.4	Inspektionsmöglichkeiten schaffen	Öffnungen nach AD 2000 A5	Arbeiten im engen Raum muss durch eine schriftliche Erlaubnis des Betreibers erfolgen
5	Mechanisches Versagen durch andauerndes Einwirken von Medien durch fehlende Entleerung/Entlüftung	2.5	Entleerung/Entlüftung einbauen	Laut Auslegungsdaten / Anwendungsfall	-

Laufnummer	Gefahr	Anhang DGRL	Sicherheitsanforderung	Maßnahmen Minderung/Beseitigung der Gefahr	Mögliche Restgefahr (in Betriebsanleitung)
6	Mechanisches Versagen durch Korrosion	2.6	Korrosionsschutzmaßnahmen / Wanddickenzuschläge	Schutzmaßnahmen / Werkstoffwahl durch Spezifikation bzw. Konstrukteur	Nachweis der Fluidverträglichkeit des Werkstoffes durch den Betreiber
7	Mechanisches Versagen durch Verschleiß	2.7	Geeignete Maßnahmen gegen Abrieb und Erosion	Keine Berücksichtigung, da aufgrund der Medien kein Verschleiß anzunehmen ist	-
8	Mechanisches Versagen durch eine Fehlfunktion von Baugruppen	2.8	Geeignete Komponenten und fehlerfreier Zusammenbau	Komponenten als Einzelteile bestellen	Bei Einbindung in Komplettanlage müssen die ergänzenden Komponenten fehlerfrei und passend sein
9	Mechanisches Versagen durch Überschreitung des zulässigen Druckes und Temperatur	2.10	Geeignete Schutzvorrichtungen gegen Überschreiten der zulässigen Werte	Stutzen für das Montieren von Sicherheitseinrichtungen vorsehen	Maximal zulässige Werte sind auf dem Typenschild vorhanden, diese müssen beachtet werden
10	Mechanisches Versagen durch fehlerhafte sicherheitsrelevanten Komponenten	2.11.1 2.11.2 2.11.3	Geeignete Komponenten mit hoher Zuverlässigkeit verwenden Verwendung einer Druckbegrenzung Verwendung von Temperaturüberwachung	Verwendung von Druckbegrenzungsventil, Thermometer etc.	Sicherheitseinrichtungen verwenden - -
11	Mechanisches Versagen durch falsche Fertigungsverfahren	3.1	Geeignete Fertigungsverfahren einsetzen	Erfüllung der Voraussetzungen nach AD 2000 HPO Kapitel 2-3 Anwendung des nach ISO 9001 zertifizierten QMI-System	-
		3.1.1	Bauteilvorbereitung passend durchführen	Durchführung von interner Fertigungskontrolle Durchführung der Prüfungen und Fertigung nach AD 2000 HP	-
		3.1.2	Schweißverbindung einwandfrei ausführen Zulassungen von Personal und Arbeitsverfahren sowie frei von Mängel	Durchführung von: Arbeitsprüfung, Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) durch Farbeindringprüfung (PT) und Röntgenprüfung (RT), Verfahrensprüfung nach AD 2000 HP2/1 Schweißer und Schweißaufsicht muss qualifiziert nach AD 2000 HP3 sein	-
		3.1.3	Zertifiziertes/qualifiziertes ZfP-Personal	Nach EN 473 zertifiziertes ZfP-Personal einsetzen	-
		3.1.4	Falls notwendig Wärmebehandlung des Klöpperbodens aufgrund der vorhergehenden Umformung	Durchführung einer Wärmebehandlung des Klöpperbodens nach der Umformung nach AD 2000 HP7/2 - von Lieferant durchzuführen	-
3.1.5	Werkstoff muss vollständig rückverfolgbar sein	Kennzeichnung übertragen nach AD 2000 HPO (Abschnitt 4)	-		
12	Mechanisches Versagen durch Abweichungen von der Entwurfszeichnung	3.2.1	Schlussprüfung durchführen	Durchführung von Prüfungen nach Modul G anhand Anhang 3 DGRL; Durchführung nach AD 2000 HP512	-
	Mechanisches Versagen durch Fehler in der Fertigung und im Entwurf	3.2.2	Druckprüfung o.ä durchführen	Durchführung einer Druckprobe nach AD 2000 HP30	-

Laufnummer	Gefahr	Anhang DGRL	Sicherheitsanforderung	Maßnahmen Minderung/Beseitigung der Gefahr	Mögliche Restgefahr (in Betriebsanleitung)
	Mechanisches Versagen durch Überschreitung des zulässigen Druckes und Temperatur	3.2.3	Sicherheitseinrichtung/Komponenten überprüfen	Nicht enthalten	-
13	Mechanisches Versagen durch falsche/fehlende Kennzeichnung	3.3	Richtige Kennzeichnung	Anbringen eines Typenschildes, das die Angaben der AD 2000 A401 besitzt	-
14	Mechanisches Versagen durch falschen Werkstoff	4	Für gesamte Lebensdauer geeigneter Werkstoff	Werkstoffe laut Spezifikation und Auslegung mit richtiger Bezeichnung bestellen und verwenden	-
		4.1	Auswahl geeigneter Werkstoffe (mechanische und chemische Eigenschaften etc.)	Wahl der Werkstoffe nach AD 2000 W1 / W10; Wahl der Verbindungswerkstoffe nach AD 2000 W0	-
		4.2	Festlegung geeigneter Werkstoffkennwerte	Beachtung der Werkstoffkennwerte nach AD 2000 W1 und DIN EN 10028-2; Schweißnahtzusatzkennwerte nach Kennblättern	-
		4.3	Werkstoffe müssen durch Prüfungen bescheinigt sein - Sicherstellung das Anforderungen erfüllt werden	Abnahmeprüfzeugnis 3.1C/3.1B nach DIN EN 10204	-
15	Mechanisches Versagen durch unzulässige Belastung	7.1.2	Auftretende Membranspannung	Beachtung der zul. Membranspannung nach AD 2000 B / S / W10	-
16	Mechanisches Versagen durch unzulässig gewählten Verbindungskoeffizient	7.2	Verwendeter Verbindungskoeffizient	Wahl des Verbindungskoeffizienten von 1,0; Arbeitsprüfungen nach AD 2000 HPS / Z; Zerstörungsfreie Prüfung nach AD 2000 HPS/3	-
17	Mechanisches Versagen durch Überschreitung des zulässigen Druckes	7.3	Geeignete Druckbegrenzung einrichten	Nicht enthalten	-
18	Mechanisches Versagen durch die Verwendung eines falschen Prüfdruckes	7.4	Geeignete hydrostatischen Prüfdruck verwenden	Wahl des geeigneten Prüfdruckes nach AD 2000 HP30	Prüfdruck auch im vertikal ausgerichteten Zustand (also aufrecht stehender Druckbehälter) beachten
19	Mechanisches Versagen durch den Einsatz von spröden Stählen	7.5	Geeignete Werkstoffeigenschaften	Werkstoffwahl nach AD 2000 W1 / W10; Schrauben nach AD 2000 W2; Schweißzusatz nach VdTÜV-Kennblättern	-
20	Mechanisches Versagen durch einen auftretenden externen Brand	2.12	Begrenzung der Brandschäden durch weitere Maßnahmen	Wird bei dieser Anlage nicht benötigt, da die Funken im inneren des Druckbehälters keinen Brand der Gesamtanlage hervorrufen	Keine Berücksichtigung eines externen Brandes
				Auslegung nach AD 2000 A5 und B	Verschluss nur im drucklosen Zustand öffnen; Anzugsdrehmomente beachten; Festgelegte Dichtungen verwenden
21	Unbeabsichtigte Freisetzung und Undichtheit bei Handhabung und Betrieb	2.3	Vorsehen eines Überdruckventils zum sicheren Abblasen	Nicht enthalten	Das gefahrlose Abblasen muss vom Betreiber sichergestellt werden
				Schutzmaßnahmen gegen hohe Oberflächentemperaturen	Berührungsschutz/Isolierung - sind nicht im Lieferumfang (wird auch nicht benötigt), da im Betrieb ein Sicherheitsabstand eingehalten werden muss, weiteres kommt es zu keiner hohen Oberflächentemperatur im Betrieb

Laufnummer	Gefahr	Anhang DGRL	Sicherheitsanforderung	Maßnahmen Minderung/Beseitigung der Gefahr	Mögliche Restgefahr (in Betriebsanleitung)
22	Unbeabsichtigte Freisetzung und Undichtheit durch nicht vorhandene/falsche Füll- und/oder Entleerungseinrichtungen	2.9	Komponenten für sicheres Füllen und richtige Auslegung Komponenten für sicheres Entleeren und richtige Auslegung	Stabilitätsnachweis für maximalen Füllungsgrad laut AD 2000 S3 - wird hier nicht benötigt, da der Druckbehälter in einem bestehenden Gestell montiert wird. Auslegung des Behälters auf Vakuum	Sicherer Anschluss von Befüllungsleitungen muss vom Betreiber sichergestellt werden falls nicht im Leistungsumfang Sicherer Anschluss von Entleerungsleitungen muss vom Betreiber sichergestellt werden falls nicht im Leistungsumfang
23	Sonstiges Versagen oder Fehlverhalten durch fehlerhafte Montage, Inbetriebnahme, Nutzung sowie fehlerhafte Wartung	3.4	Umfangreiche, fehlerfreie und ausführliche Betriebsanleitung	Auslieferung der Betriebsanleitung mit der allgemeinen Dokumentation für den Druckbehälter	-

Anhang B: Risikoanalyse

Dieser Anhang B beinhaltet die durchgeführte Risikoanalyse für diesen Druckbehälter. Durch die Verwendung von Laufnummern, kann die Gefahr aus der Gefahrenanalyse direkt auf die Risikoanalyse umgelegt werden. In der Risikoanalyse ist Versagensart aufgrund der Gefahr definiert. Weiters folgt hier die Definition der Ursache und Auswirkung sowie Entdeckungsmaßnahme. Nach der ersten Bewertung werden Maßnahmen definiert, um die Risikoprioritätszahl senken zu können. Dadurch werden empfohlenen Maßnahmen dargestellt aber auch die festgelegten Maßnahmen protokolliert. Nach der Beschreibung der Implementierung der Maßnahmen erfolgt eine zweite Bewertung um die ermittelte Risikoprioritätszahl vergleichen zu können. Dadurch lässt sich darstellen, ob die implementierten Maßnahmen zu einer Risikominimierung geführt haben.

Laufnummer analog zur Gefahrenanalyse	Charakteristik des Versagens				1. Bewertung				Maßnahmen - Status				2. Bewertung						
	Versagensart	Versagensursache	Auswirkung	tdeckungsmaßnah	A	B	E	RPZ	Empfohlene Maßnahmen		Festgelegte Maßnahmen		Implementierte Maßnahmen		Verantwortlich	A	B	E	RPZ
									Bewertung	RPZ	Bewertung	RPZ	Bewertung	RPZ					
1	Mechanisch	Nichtverwendung gerechter Entwurfsmethodiken	Anlagenschaden und Personenschaden	Kontrolle	3	8	1	24	Betriebszustände und Ausfallsarten ermitteln und Auslegung nach AD 2000 (Merkblätter B und S)	Vor der Konstruktionsphase die Betriebszustände und Ausfallsarten ermitteln und danach Auslegung nach AD 2000 (Merkblätter B und S) durchführen	Maßnahme erfolgte durch Kontrolle der Betriebszustände und Auslegung anhand der Merkblätter aus der AD 2000. Dokumentiert im Rechenbericht und in der Masterarbeit (MA)	Auslegende Person	1	8	1	8			
2	Mechanisch	Unvollständige Annahme der auftretenden Belastungen	Anlagenschaden und Personenschaden	Kontrolle	2	8	1	16	Prüfung des Lastenheftes und explizite Überprüfung der Belastungen	Vor der Auslegungsphase das Lastenheft überprüfen	Kontrolle es Lastenheftes wurde überprüft und die Daten wurden im Rechenbericht und in der MA festgehalten	Auslegende Person	1	8	1	8			
3	Mechanisch	Anwendung falscher Berechnungs-/Auslegungsmethoden	Anlagenschaden und Personenschaden	Kontrolle	2	7	3	42	Methoden der Berechnung nach AD 2000 (Merkblätter B und S)	Berechnungsmethoden müssen bis zum Zeitpunkt der Berechnung ermittelt und durchgeführt werden	Verwendete Berechnungsmethoden im Rechenbericht vermerkt	Auslegende Person	1	7	3	21			
4	Mechanisch	Nicht entdeckte Fehler im Inneren durch fehlende Inspektionsmöglichkeit	Anlagenschaden und Personenschaden	Freigabe durch zuständige Instanz (TUV-Süd)	2	5	1	10	Keine zusätzliche Öffnung	keine zusätzliche Öffnung		Auslegende Person	1	5	1	5			
5	Mechanisch	Fehlende Entleerung/Entlüftung fördert dauerhaftes Einwirken von Medium	Materialangriff	Freigabe des Konzeptes	2	3	1	6	Kontrolle laut Auslegungsfall	Vor der Auslegung muss Kontrolle erfolgen, ob Entleerungen/Entlüftungen benötigt werden	Dieser Punkt wurde vor der Konstruktionsphase durchgeführt	Auslegende Person	1	3	1	3			
6	Mechanisch	Korrosion	Materialangriff	Sichtkontrolle	2	3	1	6	Kontrolle der Spezifikation	Wahl eines geeigneten Werkstoffes laut Spezifikation vor der Auslegung	Vor der Auslegung wurde die Spezifikation bezüglich Korrosionsgefahr kontrolliert	Auslegende Person	1	3	1	3			
7	Mechanisch	Verschleiß	Materialangriff	Sichtkontrolle	2	4	1	8	Kontrolle der Spezifikation	Wahl eines geeigneten Werkstoffes laut Spezifikation vor der Auslegung	Vor der Auslegung wurde die Spezifikation bezüglich möglicher Verschleißmechanismen kontrolliert	Auslegende Person	1	4	1	4			
8	Mechanisch	Fehlfunktion von Baugruppen	Anlagenschaden und Personenschaden	Abschlussprüfung der Komponenten	4	8	4	128	Abnahmeprüfung und Anleitung für Zusammenbau	Abnahmeprüfung muss nach dem Zusammenbau durchgeführt werden und es muss für den Zusammenbau vor Montagebeginn eine Anleitung/Zeichnung ausgegeben werden	Festlegung der Prüfungen und Zeugnisse folgen	Monteur	2	8	1	16			
9	Mechanisch	Überschreitung der zul. Temperatur und des zul. Druckes	Anlagenschaden und Personenschaden	Manometer/Thermometer	3	7	2	42	Einatz von Druckbegrenzungsventilen (DBV's)	Vor der Inbetriebnahme muss ein DBV montiert und aktiv sein	Nach Fertigstellung	Auslegende Person	1	7	2	14			
10	Mechanisch	Fehlerhaftes Sicherheitskomponenten	Anlagenschaden	Abnahmeprüfung der Anlage	3	7	3	63	Abnahmeprüfung jeder einzelnen Komponente	Abnahmeprüfung der einzelnen Komponenten muss vor Inbetriebnahme durchgeführt werden	Nach Fertigstellung	Monteur	1	7	2	14			
11	Mechanisch	Falsche Fertigungsverfahren	Anlagenschaden	Fertigungsüberwachung	3	8	4	96	Fertigungsüberwachung	Während des Baus	Fertigungsüberwachung während der Fertigung und nicht später	Meister	3	8	4	96			
12	Mechanisch	Abweichung von Entwurfszeichnung	Anlagenschaden und Personenschaden	Kontrolle der Teile	4	8	5	160	Kontrolle der Bestellung / Kontrolle Wareneingang / Kontrolle Berechnung	Kontrolle vor der Bestellung / Kontrolle Wareneingang vor der Fertigung / Kontrolle Berechnung vor der Bestellung	Noch nicht durchgeführt	Auslegende Person / Schlosser / Lagerist	2	8	3	48			
13	Mechanisch	Fehlende Kennzeichnung	Anlagenschaden	Kontrolle ob vorhanden	2	5	1	10	Genietetes Typenschild anbringen und Foto in die Dokumentation geben	Genietetes Schild anbringen und Foto in Dokumentation müssen vor Auslieferung durchgeführt werden	Noch nicht durchgeführt	Schlosser	2	5	1	10			
14	Mechanisch	Falscher Werkstoff	Anlagenschaden und Personenschaden	Berechnung / Kontrollieren / Stückliste kontrollieren / Wareneingangskontrolle	2	8	2	32	Stückliste kontrollieren / Wareneingangskontrolle	Stückliste vor der Bestellung kontrollieren / Wareneingangskontrolle vor der Verarbeitung	Noch nicht durchgeführt	Auslegende Person / Schlosser / Lagerist	2	8	2	32			
16	Mechanisch	Unzulässig gewählter Verbindungskoeffizient	Anlagenschaden	/	3	6	3	54	Auslegung/Entwurf nach AD 2000 (Merkblätter B und S);	Während der Auslegung	Wurde durchgeführt und ist im Berechnungsprotokoll zu sehen	Auslegenden Person	3	6	2	36			
17	Mechanisch	Überschreitung des zulässigen Druckes	Anlagenschaden und Personenschaden	Kontrolle	3	8	4	96	Druckbegrenzung einrichten	Vor der Inbetriebnahme muss eine Druckbegrenzung laut Typenschild verbaut werden	Noch nicht durchgeführt	Auslegende Person	1	8	2	16			
18	Mechanisch	Falscher Prüfdruck	Anlagenschaden	Kontrolle	3	5	2	30	Wahl des geeigneten Prüfdruckes nach AD 2000 HP30	Vor der Druckprüfung muss die Wahl des geeigneten Prüfdruckes nach AD 2000 HP30 durchgeführt werden	Noch nicht durchgeführt	Auslegende Person	2	5	2	20			

Bedeutung (B)

Rating	Kriterium	Effekt	Beispiel
10	Fehler führt zu einem Versagen des Produktes im Einsatz, zu Personalschäden in der Produktion	Der Fehler betrifft die Sicherheit und/oder Anforderungen aus Regulatorien oder Gesetzen	Sicherheitsrisiko für den Kunden oder den Bediener
9	Der Fehler führt zu massiven Abweichungen hinsichtlich übergeordneter regulatoriven - z.B. Verkehrssicherheit oder zu möglichem Personenschaden	Massive Störung	Gesetzesauflagen werden nicht erfüllt. Bauteile müssen vorzeitig getauscht werden.
8	Der Fehler führt zu einer massiven Unzufriedenheit beim Kunden durch Schrott. Wahrscheinliche Lieferverzögerungen.		Ausfall eines Systems beim Kunden das jedoch kein Menschenleben gefährdet.
7	Der Fehler führt zu Kundenunzufriedenheit	Signifikante Störung	Escape/Kunde muss nacharbeiten/Kunde schickt es zurück.
6	Große Probleme in der Produktion		Der Fehler wird in der Schlussinspektion gefunden und kann nicht mehr beseitigt werden
5	Geringe Probleme in der Produktion	Moderate Störung	Der Fehler wird am Schluss gefunden und kann durch Nacharbeit beseitigt werden
4	Der Fehler kann die nachfolgenden Prozesse stören und/oder zu Nacharbeit führen.		Der Fehler geht zum nächsten Prozessschritt durch
3	Der Fehler kann die nachfolgenden Prozesse geringfügig stören und/oder zu geringer Nacharbeit führen.	Sehr geringe Störung	Der Fehler wird im nächsten Prozessschritt erkannt
2	Der Fehler führt zu kleinen Problemen im verursachenden Prozess mit/ohne geringer Nacharbeit.		Der Fehler wird in dem Prozessschritt in dem er entsteht erkannt und korrigiert.
1	Keinen Effekt für den Prozess / Kunden / Lieferzeit	Keine Störung	Kein Effekt

Auftretenswahrscheinlichkeit

Rating	Failure Probability	Cpk	PPM	~Anzahl/100
10	Sehr Hoch	≤0,33	333.333	33
9	Hoch	>0,51	125.000	12,5
8	Hoch	>0,67	50.000	5
7	Hoch	>0,83	12.500	1,25
6	Moderat	>1,00	2.500	0,25
5	Moderat	>1,17	500	0,05
4	Moderat	>1,33	67	0,007
3	Nieder	>1,50	7	0,0007
2	Nieder	>1,67	<1	0,00006
1	Sehr Nieder	>2,0	Fehler beseitigt	0,0000002

Entdeckungswahrscheinlichkeit

Rating	Kriterium	Bsp. für Prüfmethoden
10	Fehler kann nicht detektiert werden	Mehtode für Prozesskontrolle fehlt
9	Sehr unwahrscheinlich - Die Prüfung detektiert den Fehler höchstwahrscheinlich nicht	Indirekte Kontrolle nicht 100%
8	Unwahrscheinlich - Die Prüfung hat kaum eine Chance den Fehler zu detektieren	Visuelle Kinspektion
7	Sehr geringe - Die prüfung hat eine geringe Chance den Fehler zu detektieren..	Doppelte visuelle Inspektion
6	Gering - Die Prüfung kann den Fehler detektieren.	100% visuelle insp./Manuelle Vermessung.
5	Moderat - Die Prüfung kann den Fehler detektieren.	100% Go/NoGo-System. Periodische Vermessung entsprechend Regelkarte.
4	Moderat hoch - Die Prüfung hat gute Chancen den Fehler zu detektieren.	Automatische oder manuelle 100%Prüfung sodass das Material in der Folgeoperation nicht weiter läuft.
3	Hoch - Die Prüfung hat gute Chancen den Fehler zu detektieren.	Prüfung sodass das Matriel den fehlerverursachenden Prozess nicht verlässt
2	Sehr hoch - Die Prüfung detektiert den Fehler fast sicher.	Mehrfache Fehlerprüfung vor/während und nach dem Prozessschritt
1	Seh hoch -Die Prozesskontrolle lässt keine Fehler durch	Prozesskontrolle ist so weit dass kein Fehler entstehen kann

Anhang C: Berechnung

Dieser Anhang beinhaltet die Berechnung des Druckbehälters in Matlab. Die in der Berechnung verwendeten Formelzeichen sind im Abkürzungsverzeichnis detailliert beschrieben.

Für diese Berechnung wird das Regelwerk AD 2000 herangezogen. Die Berechnung wird nach den Vorschriften und Merkblättern aus dem Regelwerk AD 2000 durchgeführt.

1) Allgemeine Definitionen

Hier werden allgemeine Daten für die Berechnung definiert.

Material: H11 (P265GH)

Erdbeschleunigung g (m/s²):

$$g = 9.80665$$

$$g = 9.8067$$

Auslegungsdruck, Druck der in der Kammer herrscht (bar):

$$p_K = 100$$

$$p_K = 100$$

Dichte des Füllgas Argon (kg/m³):

$$\rho_A = 1.874$$

$$\rho_A = 1.8740$$

2) Mantelrohr

In diesem Kapitel erfolgt die Berechnung aller Größen für den zylindrischen Schuss Mantellänge:

Mantellänge

$$l_M = 1110$$

$$l_M = 1110$$

Aussendurchmesser Rohr (DN450 (mm)):

$$d_{aR} = 457.2$$

$$d_{aR} = 457.2000$$

Temperaturbereich: $0 < T < 220$ °C

Berechnung Festigkeitskennwert (DIN17100) - lineare Interpolation notwendig

Festigkeitskennwert bei 300 °C (N/mm²):

$$K_{300} = 157$$

$$K_{300} = 157$$

Definition der Temperatur von 300 °C:

$$T_{K300} = 300$$

$$T_{K300} = 300$$

Festigkeitswert bei 200°C (N/mm²):

$$K_{200}=206$$

$$K_{200} = 206$$

Definition der Temperatur von 300 °C:

$$T_{K200}=200$$

$$T_{K200} = 200$$

Definition der Temperatur von 220 °C:

$$T_{K220}=220$$

$$T_{K220} = 220$$

Festigkeitswert bei 220°C (N/mm²)

(lineare Interpolation)

$$K_{220}=K_{200}+((K_{200}-K_{300})/(T_{K200}-T_{K300}))*(T_{K220}-T_{K200})$$

$$K_{220} = 196.2000$$

Sicherheitsbeiwert für Walz und Schmiedestähle (AD-2000-Merkblatt B0 - Tafel 2):

$$S_{w_s}=1.5$$

$$S_{w_s} = 1.5000$$

Ermittlung des Berechnungsdruck (bar):

wenn gilt $p_{hyd} > 0,05 \cdot p_K$ --> $p = 0,95 \cdot p_K + p_{hyd}$

Hydrostatischer Druck (bar): Fall Druckbehälter ist in die vertikale geschwenkt:

$$p_{h_M} = (\rho_A \cdot g \cdot (l_M / 1000)) \cdot 10^{(-5)};$$

$$p_{\theta_05} = 0.05 \cdot p_K;$$

if $p_{h_M} > p_{\theta_05}$

$$p_B = (0.95 \cdot p_K) + p_{h_M};$$

else

$$p_B = p_K;$$

end

$$p_B$$

$$p_B = 100$$

Faktor v: Berücksichtigung der Ausnutzung der zulässigen

Berechnungsspannungen in der Schweißnaht (AD-2000-Merkblatt B0 - 8.1)

$$v=1$$

$$v = 1$$

Faktor c1: Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung

Nahtlose Rohre DIN 2448 Abweichung nach DIN 1629 wenn $d_a > 325\text{mm}$ dann beträgt die Abweichung $\pm 15\%$ Wert muss also nach Abschätzung gesetzt werden

Faktor c2 für den Mantel (mm): Abnutzungszuschlag (AD-2000-Merkblatt B0 9.2.1) - ferritische Stähle

$$c2_M=1$$

$$c2_M = 1$$

Abschätzung der Wandstärke, da fuer c1 benoetigt wird (AD-2000-Merkblatt B1 - 5(2))

$$s_M_A = ((Da_R * p_B) / ((20 * v * K_220 / S_w_s) + p_B))$$

$$s_M_A = 16.8336$$

Berechnung von c1 für den Mantel: 15% Toleranz der Wandstärke (mm)

$$c1_M = s_M_A * 0.15;$$

Berechnete Wandstärke des Mantels (mm) inklusive Faktor c1

$$s_M_B = s_M_A + c1_M + c2_M$$

$$s_M_B = 20.3586$$

Wahl einer gängigen Wandstärke (mm):

$$s_M_g = 22.2$$

$$s_M_g = 22.2000$$

Innendurchmesser des Rohrs (mm):

$$Di_R = Da_R - (2 * s_M_g)$$

$$Di_R = 412.8000$$

Überprüfung ob Geltungsbereich nach B1 (1) erfüllt ist ($Da/Di < 1.2$)

```
if (Da_R/Di_R) <= 1.2
    display('Geltungsbereich ok, es handelt sich um einen dünnwandigen Behälter')
end
```

Geltungsbereich ok, es handelt sich um einen dünnwandigen Behälter

3 Berechnung des Bodens

In diesem Kapitel wird der Boden des Behälters berechnet -> Klöpperboden

$$s = ((Da * p * \beta) / (40 * (K/S) * v)) + c1 + c2$$

Für die Berechnung muss das Ad 2000 B3 Bild 9 verwendet werden Verwendung von B3 Bild 8 (Seite4)

Das Verhältnis $d_i/D_a=0$ da keine Schwächung außerhalb $0,6 \cdot D_a$ auftritt.

Das zweite Verhältnis das benötigt wird ist folgendes:

$V_{B8} = (s_{Annahme_Korbboden} - c1_Korbboden1 - c2_Korbboden1) / D_a_Rohr$

Es müssen nun Annahmen gestellt werden danach iterativ vorgegangen werden

Erste Annahme: Wandstärke des Klöpperbodens wird als Wandstärke des Mantels gewählt

Somit beträgt die Wandstärke des angenommenen Klöpperbodens (mm):

$$s_{A_K} = s_{M_g}$$

$$s_{A_K} = 22.2000$$

Faktor $c1$ (mm): Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung

Für Klöpperboden muss dafür in der DIN28011 nachgeschlagen werden (mm):

$$c1_K = 0.5$$

$$c1_K = 0.5000$$

Faktor $c2$ (mm): Abnutzungszuschlag (AD-2000-Merkblatt B0 9.2.1) - ferritische Stähle

$$c2_K = 1$$

$$c2_K = 1$$

Berechnung des oben angeschriebenen Verhältnis aus dem Bild 8:

$$V_{B8_2} = (s_{A_K} - c1_K - c2_K) / D_a_R$$

$$V_{B8_2} = 0.0453$$

Aus dem Diagramm folgt für β :

$$b1_K = 2.45;$$

Wandstärke der Krempe (mm) nach der ersten Iteration:

$$s_{K_1} = ((D_a_R \cdot p_B \cdot b1_K) / (40 \cdot (K_{220} / S_{w_s}) \cdot v)) + c1_K + c2_K$$

$$s_{K_1} = 22.9094$$

Zweiter Iterationsschritt mit vorheriger Wandstärke

$$V_{B8_2} = (s_{K_1} - c1_K - c2_K) / D_a_R$$

$$V_{B8_2} = 0.0468$$

Berechnung des oben angeschriebenen Verhältnis aus dem Bild 8, für zweiten Iterationsschritt:

$$b2_K = 2.4$$

$$b2_K = 2.4000$$

Wandstärke der Krempe (mm) nach der zweiten Iteration:

$$s_K_2 = ((Da_R * p_B * b2_K) / (40 * (K_220 / S_w_s) * v)) + c1_K + c2_K$$

$$s_K_2 = 22.4725$$

Wahl der gewählten Wandstärke für die Krempe (mm):

$$s_Kr_g = 23;$$

Berechnung der Kalotte (AD-2000 8.1.1)

Definitionen laut AD 2000 B für einen Klöpferboden

Radius der Kalotte des Klöpferbodens (mm):

$$r1 = Da_R;$$

Außendurchmesser der Kalotte (mm):

$$Da_Ka = 2 * (r1 + s_Kr_g);$$

Wandstärke der Kalotte (mm)

$$s_Ka = ((Da_Ka * p_B) / ((40 * K_220 * v / S_w_s) + p_B)) + c1_K + c2_K$$

$$s_Ka = 19.5120$$

Da der Boden aus einem Blech gefertigt wird, wird auch für die Kalotte folgende Wandstärke (mm) gewählt

$$s_Ka_g = 23;$$

Beide Wandstärken sind gleich, daher definiert man eine gemeinsame Variable für die Wandstärke des Klöpferbodens (mm)

$$s_K1_g = s_Ka_g$$

$$s_K1_g = 23$$

Geometrische Werte des Klöpferbodens:

Radius Krempe (mm):

$$r2 = 0.1 * Da_R;$$

Wölbungshöhe (mm)

$$h2 = (0.1935 * Da_R) - (0.455 * s_K1_g);$$

Höhe des zylindrischen Bords (kann größer als der berechnete Wert sein) (mm)

$$h1 = 3.5 * s_K1_g;$$

Überprüfung ob Auslegung nach äußerem Überdruck erfolgen muss:

wenn der äußere Druck einen bestimmten Wert unterschreitet muss auch gegen elastisches Beulen berechnet werden

$$p \leq 3.66 \cdot (E/S_k) \cdot ((s-c_1-c_2)/R)^2$$

Sicherheitsbeiwert:

$$S_k = 3 + (0.002 / ((s_{K1_g} - c_{1_K} - c_{2_K}) / r_1))$$

$$S_k = 3.0425$$

Elastizitätsmodul (N/mm²)

$$E = 210000$$

$$E = 210000$$

Vergleichswert für den Druck (N/mm²):

$$p_V = 3.66 \cdot (E/S_k) \cdot ((s_{K1_g} - c_{1_K} - c_{2_K}) / r_1)^2$$

$$p_V = 558.6373$$

Überprüfen ob der Druck geringer als p_Vergleichswert ist

```
if (p_V*10) > 1.013
    display('Ausreichende Sicherheit gegen elastisches Beulen vorhanden, keine weiteren Schritte')
end
```

Ausreichende Sicherheit gegen elastisches Beulen vorhanden, keine weiteren Schritte notwendig

4 Stutzen - Ausschnitte im Zylinder

In diesem Kapitel werden die Stutzen berechnet

3.1 Stutzen "Viewport" seitlich im Mantel

Definition der Abmasse des Stutzens

Aussendurchmesser des Stutzens (mm):

$$D_{a_St} = 190$$

$$D_{a_St} = 190$$

Innendurchmesser des Stutzens (mm):

$$D_{i_St} = 127.5$$

$$D_{i_St} = 127.5000$$

Wanddickenverhältnis (AD-2000-Merkblatt - B9 - 4.4.1)

$$(s_{S-c1_Stutzen} - c_{2_Stutzen}) / (s_{A-c1_Mantel} - c_{2_Mantel})$$

Verhältnis sA/D_i ermitteln um Wert fuer Wanddickenverhaeltnis zu erhalten.

Zuvor werden die Variablen nach der AD 2000 definiert:

$$sA = s_{M_g}$$

$$sA = 22.2000$$

$$D_i = D_{i_R}$$

$$D_i = 412.8000$$

Verhältnis Wandstärke zu Innendurchmesser :

$$V_1 = sA/D_i$$

$$V_1 = 0.0538$$

Da $sA/D_{i_Mantel} = 0,0538$ muss folgendes Diagramm gewählt werden:

AD 2000- Merkblatt - B9 - Seite 15 - Diagramm 7d

Berechnung des Verschwächungsfaktor und des Verhältnis d_i/D_i für die gewählte Wandstärke des Zylindermantels um das Wanddickenverhältnis aus dem Diagramm zu erhalten.

Verschwächungsfaktor für den Stutzen:

$$vA_{St} = (((D_{a_R} * p_B) / (s_{M_g} - c1_M - c2_M)) - p_B) * (S_{w_s} / (20 * K_{220}))$$

$$vA_{St} = 0.8976$$

Verhältnis Innendurchmesser Stutzen zu Innendurchmesser Rohr d_i/D_i

$$V_2 = D_{i_St} / D_i$$

$$V_2 = 0.3089$$

laut Diagramm --> Wanddickenverhältnis 1

Faktor c_2 (mm) für den Stutzen: Abnutzungszuschlag (AD-2000-Merkblatt B0 9.2.1) - ferritische Staehle

$$c2_{St} = 1$$

$$c2_{St} = 1$$

Wandstärkenverhältnis (AD 2000 - Merkblatt B9 Seite 15)

$(sS - c1_{Stutzen} - c2_{Stutzen}) / (sA - c1_{Mantel} - c2_{Mantel}) = \text{Wandstaerkenverhaeltnis};$

Faktor c_1 (mm) für den Stutzen: Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung; Wahl des Wertes d_a aus einem Rundstahl gefertigt wird

$$c1_{St} = 1$$

$$c1_{St} = 1$$

Wandstärke des Stutzens (mm):

$$s_{St_K1} = ((s_A - c_{1_M} - c_{2_M}) * 1) + c_{1_St} + c_{2_St}$$

$$s_{St_K1} = 20.6750$$

Zwischenwahl der Wandstärke des Stutzens (mm)

$$s_{St_zw} = 21$$

$$s_{St_zw} = 21$$

Ermittlung der mittragenden Länge l_s (mm) (AD-2000-Merkblatt B9 - 4.4.3)

Beiwert für Zylinder- und Kegelschalen mit senkrechter Abzweigung

$$f_s = 1.25$$

$$f_s = 1.2500$$

$$l_{S_St} = f_s * \sqrt{((D_{i_St} + s_{St_zw} - c_{1_St} - c_{2_St}) * (s_{St_zw} - c_{1_St} - c_{2_St}))}$$

$$l_{S_St} = 65.9486$$

Die mittragende Länge kann gekürzt werden, wenn eine größere Wandstärke gewählt wird.

Laut AD 2000 - Merkblatt B9 Seite 9 (7) kann die neue mittragende Länge wie folgt berechnet werden:

$$l_{neu} * s_{neu} > l * s$$

Definition der Stutzenwandstärke (mm) wie sie konstruktiv ausgeführt werden muss:

$$s_{St_k} = 31.25$$

$$s_{St_k} = 31.2500$$

Berechnung der mittragenden Länge (mm) mit der neuen Wandstärke:

$$l_{S_St_n} = l_{S_St} * s_{St_zw} / s_{St_k}$$

$$l_{S_St_n} = 44.3175$$

Überprüfung der gegenseitigen Beeinflussung von Ausschnitten:

Wenn folgende Beziehung gilt, dann kann eine gegenseitige Beeinflussung vernachlässigt werden: AD 2000 - Merkblatt B9 Seite 9 (8)

$$l \geq 2 * \sqrt{((D_i + s_A - c_{1_Mantel} - c_{2_Mantel}) * (s_A - c_{1_Mantel} - c_{2_Mantel}))}$$

$$l_B = 2 * \sqrt{((D_i + s_A - c_{1_M} - c_{2_M}) * (s_A - c_{1_M} - c_{2_M}))}$$

$$l_B = 179.5303$$

Der Abstand zwischen den Stutzen muss nun größer sein als die berechnete Länge, damit sie sich nicht gegenseitig beeinflussen.

3.1.1) Festigkeit Stutzen (view port) (AD-2000 - Merkblatt B9)

Damit die Festigkeit nachgewiesen ist muss folgende Gleichgewichtsbedingung erfüllt sein:

```

figure(4);
I4 = imread("Bilder_Berechnung\Formel_Berechnung.png");
title('Gleichgewichtsbedingung');
image(I4);
axis off;

```

$$\frac{p}{10} \left(\frac{A_p}{A_\sigma} + \frac{1}{2} \right) \leq \frac{K}{S}$$

Definition der jeweiligen Flächen (AD 2000 Merkblatt B9 - Seite 7 Bild 9)

Die Breite der angedachten Scheiben (Vearstärkung; wird hier nicht verwendet, da keine Scheibe benötigt wird) aber für die Flächenberechnungen wird sie benötigen

Mittragende Breite (mm) des Grundkörpers für den Stutzen:

$$b_{St} = \sqrt{(D_i + s_{M_g} - c1_M - c2_M) \cdot (s_{M_g} - c1_M - c2_M)}$$

$$b_{St} = 89.7651$$

Druckbelastete Fläche (mm²):

$$A_{p_{St}} = ((b_{St} + s_{St_k} - c1_{St} - c2_{St} + (D_i/2)) \cdot (D_i/2)) + ((1S_{St_n} + s_{M_g} - c1_M - c2_M) \cdot (D_i/2))$$

$$A_{p_{St}} = 4.1738e+04$$

Tragende Querschnittsfläche (mm²):

$$A_{\sigma_{St}} = ((b_{St} + (s_{St_k} - c1_{St} - c2_{St})) \cdot (s_{M_g} - c1_M - c2_M)) + (1S_{St_n} \cdot (s_{St_k} - c2_{St} - c1_{St}))$$

$$A_{\sigma_{St}} = 3.5189e+03$$

Definition der linken Seite des Gleichgewichts:

$$GGW_L = (p_B/10) * ((Ap_St/Asigma_St) + (1/2))$$

$$GGW_L = 123.6127$$

Definition der rechten Seite des Gleichgewichts:

$$GGW_R = K_220 / S_w_s$$

$$GGW_R = 130.8000$$

Nachweis der Festigkeit (AD 2000-Merkblatt B9 (1))

```
if GGW_L <= GGW_R
    disp('Festigkeit des Stutzen "View port" nachgewiesen')
else
    display('Festigkeit des Stutzen-View port nicht nachgewiesen')
end
```

Festigkeit des Stutzen "View port" nachgewiesen

3.2 Stutzen "Viewports" im Boden

Definition der Abmasse des Stutzens, diese entsprechen den Dimensionen des vorherig berechneten Stutzens

Aussendurchmesser des Stutzens am Klöpperboden (mm):

$$Da_St = 190$$

$$Da_St = 190$$

Innendurchmesser des Stutzens am Klöpperboden (mm):

$$Di_St = 127.5$$

$$Di_St = 127.5000$$

Wanddickenverhältnis (AD-2000-Merkblatt - B9 - 4.4.1)

$$(sS-c1_Stutzen-c2_Stutzen)/(sA-c1_Mantel-c2_Mantel)$$

Verhältnis sA/Di ermitteln um Wert fuer Wanddickenverhaeltnis zu erhalten

Defintion der Variablen nach AD 2000 für die Wandstärke und den Innendurchmesser des Klöpperbodens

$$sA = s_M_g$$

$$sA = 22.2000$$

$$Di_Kl = 2 * (Da_R - s_Kl_g)$$

$$Di_Kl = 868.4000$$

Verhältnis:

$$V_1 = s_A / (D_{i_K1} / 2)$$

$$V_1 = 0.0511$$

Da $s_A / D_{i_Mantel} = 0,0511$ muss folgendes Diagramm gewählt werden:

AD 2000- Merkblatt - B9 - Seite 18 - Diagramm 8b

Berechnung des Verschwächungsfaktor und des Verhältnis d_i / D_i für die gewählte Wandstärke des Zylindermantels um das Wanddickenverhältnis aus dem Diagramm zu erhalten.

Verschwächungsfaktor für den Stutzen im Klöpperboden:

$$v_{A_St_K1} = \left(\left(\frac{D_{a_Ka} \cdot p_B}{s_{K1_g} - c_{1_K} - c_{2_K}} \right) - p_B \right) \cdot \left(\frac{S_{w_s}}{40 \cdot K_{220}} \right)$$

$$v_{A_St_K1} = 0.8347$$

Verhältnis d_i / D_i

$$V_3 = D_{i_St} / (D_{i_K1} / 2)$$

$$V_3 = 0.2936$$

laut Diagramm --> Wanddickenverhältnis 0,8

Faktor c_2 (mm) von vorher übernehmen: Abnutzungszuschlag (AD-2000-Merkblatt B0 9.2.1) - ferritische Stähle

$$c_{2_St} = 1$$

$$c_{2_St} = 1$$

Wandstärkenverhältnis (AD 2000 - Merkblatt B9 Seite 15)

$(s_S - c_{1_Stutzen} - c_{2_Stutzen}) / (s_A - c_{1_Mantel} - c_{2_Mantel}) = \text{Wandstaerkenverhaeltnis}$;

Faktor c_1 (mm): Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung

$$c_{1_St} = 1$$

$$c_{1_St} = 1$$

Wandstärke des Stutzens am Klöpperboden:

$$s_{S_St_K1} = (s_{K1_g} - c_{1_K} - c_{2_K}) \cdot 0.8 + c_{1_St} + c_{2_St}$$

$$s_{S_St_K1} = 19.2000$$

Zwischenwahl der Wandstärke (mm) für den Stutzen am Klöpperboden

$$s_{St_zw_K1} = 21$$

$$s_{St_zw_K1} = 21$$

Ermittlung der mitttragenden Länge (mm) l_S (AD-2000-Merkblatt B9 - 4.4.3)

$$f_S = 1;$$

$$l_{S_St_K1} = f_S \cdot \sqrt{(D_{i_St} + s_{St_zw_K1} - c_{1_St} - c_{2_St}) \cdot (s_{St_zw_K1} - c_{1_St} - c_{2_St})}$$

$$l_{S_St_K1} = 52.7589$$

Die mittragende Länge kann gekürzt werden, wenn eine größere Wandstärke gewählt wird.

Laut AD 2000 - Merkblatt B9 Seite 9 (7) kann die neue mittragende Länge wie folgt berechnet werden:

$l_{neu} > l_{s}$

Definition der Stutzenwandstärke (mm) wie sie konstruktiv ausgeführt werden muss:

$$s_{St_K1_k} = 31.25$$

$$s_{St_K1_k} = 31.2500$$

Berechnung der mittragenden Länge (mm) mit der neuen Wandstärke:

$$l_{S_St_K1_n} = l_{S_St_K1} * s_{St_zw_K1} / s_{St_K1_k}$$

$$l_{S_St_K1_n} = 35.4540$$

3.2.1) Festigkeit Stutzen (view port) (AD-2000 - Merkblatt B9)

Definition der jeweiligen Flächen (AD 2000 Merkblatt B9 - Seite 7 Bild 9)

Die Breite der angedachten Scheiben (Vearstärkung; wird hier nicht verwendet, da keine Scheibe benötigt wird) aber für die Flächenberechnungen wird sie benötigen

Mittragende Breite (mm) des Grundkörpers am Klöpperboden:

$$b_{St_K1} = \sqrt{(D_i + s_{K1_g} - c1_K - c2_K) * (s_{K1_g} - c1_K - c2_K)}$$

$$b_{St_K1} = 96.6305$$

Druckbelastete Fläche (mm²):

$$A_{p_St_K1} = ((b_{St_K1} + s_{St_k} - c1_{St} - c2_{St} + (D_i_{St}/2)) * (D_i_{St}/2)) + ((l_{S_St_K1_n} + s_{K1_g} - c1_K - c2_K) * (D_i_{St} - s_{St_k} + c1_{St} + c2_{St}))$$

$$A_{p_St_K1} = 4.2771e+04$$

Tragende Querschnittsfläche (mm²):

$$A_{\sigma_St_K1} = ((b_{St_K1} + (s_{St_k} - c1_{St} - c2_{St})) * (s_{K1_g} - c1_K - c2_K)) + (l_{S_St_K1_n} * (s_{St_K1_k} - c2_{St} - c1_{St}))$$

$$A_{\sigma_St_K1} = 3.7435e+03$$

Definition der linken Seite des Gleichgewichts:

$$GGW_{L_K1} = (p_B/10) * ((A_{p_St_K1}/A_{\sigma_St_K1}) + (1/2))$$

$$GGW_{L_K1} = 119.2541$$

Definition der rechten Seite des Gleichgewichts:

$$GGW_{R_K1} = K_{220}/S_{w_s}$$

$$GGW_{R_K1} = 130.8000$$

Nachweis der Festigkeit (AD 2000-Merkblatt B9 (1))

```
if GGW_L_K1 <= GGW_R_K1
    disp('Festigkeit des Stutzen "View port" am Boden nachgewiesen')
else
    display('Festigkeit des Stutzen-View port nicht nachgewiesen')
end
```

Festigkeit des Stutzen "View port" am Boden nachgewiesen

3.3) Berechnung der Stutzen NPT-Muffen

Defintion der Abmasse der Muffe

Aussendurchmesser der Muffe (mm):

$$Da_M = 35$$

$$Da_M = 35$$

Innendurchmesser der Muffe (mm):

$$Di_M = 21.223$$

$$Di_M = 21.2230$$

Wanddickenverhältnis (AD-2000-Merkblatt - B9 - 4.4.1)

$$(sS-c1_Stutzen-c2_Stutzen)/(sA-c1_Mantel-c2_Mantel)$$

Verhältnis sA/Di ermitteln um den Wert für das Wanddickenverhältnis zu erhalten

Verhältnis (sA/Di ist bei der NPT-Muffe gleich wie beim Stutzen):

$$V_2=V_1$$

$$V_2 = 0.0511$$

Da $sA/Di = 0,0538$ muss folgendes Diagramm gewählt werden:

AD 2000-Merkblatt - B9 Seite 15 Diagramm 7d

Berechnung des Verschwächungsfaktor und des Verhältnis di/Di für die gewählte Wandstärke des Zylindermantels um das Wanddickenverhältnis aus dem Diagramm zu erhalten.

Verschwächungsfaktor der Muffe:

$$vA_M = (((Da_R * p_B) / (s_M_g - c1_M - c2_M)) - p_B) * (S_w_s / (20 * K_{220}))$$

$$vA_M = 0.8976$$

Verhältnis Innendurchmesser Muffe zu Innendurchmesser des Rohrs (mm) di/Di

$$V_{B8_2} = Di_M / Di$$

$$V_{B8_2} = 0.0514$$

laut Diagramm --> Wanddickenverhaeltnis 0,1

Faktor c2 (mm) der Muffe: Abnutzungszuschlag (AD 2000- Merkblatt B0 9.2.1) - ferritische Stähle

$$c2_Muffe=1$$

$$c2_Muffe = 1$$

Wandstärkenverhältnis (AD 2000 - Merkblatt B9 Seite 15)

$(sS-c1_Stutzen-c2_Stutzen)/(sA-c1_Mantel-c2_Mantel) = \text{Wandstaerkenverhaeltnis};$

Faktor c1 (mm) für die Muffe nach DIN100600: Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung

$$c1_Muffe = 1$$

$$c1_Muffe = 1$$

Wandstärke der Muffe (mm):

$$sS_M = ((sA - c1_M - c2_M) * 0.1) + c1_Muffe + c2_Muffe$$

$$sS_M = 3.8675$$

Zwischenwahl der Wandstärke der Muffe (mm):

$$s_Mu_zw=5$$

$$s_Mu_zw = 5$$

Ermittlung der mitttragenden Länge (mm) lS (AD-2000-Merkblatt B9 - 4.4.3)

$$fs = 1.25;$$

$$lS_M = fs * \sqrt{((Di_M + s_Mu_zw - c1_St - c2_St) * (s_Mu_zw - c1_St - c2_St))}$$

$$lS_M = 10.6558$$

Gewählte mitttragende Länge (mm) der Muffe:

$$lS_M_g = 40$$

$$lS_M_g = 40$$

3.3.2) Festigkeit Stutzen (NPT) (AD-2000 - Merkblatt B9)

Definition der jeweiligen Flächen (AD 2000 Merkblatt B9 - Seite 7 Bild 9)

Die Breite der angedachten Scheiben (Vearstarkung; wird hier nicht verwendet, da keine Scheibe benötigt wird) aber für die Flächenberechnungen wird sie benötigen

Mittragende Breite (mm) der Muffe des Grundkörpers:

$$b_M = \sqrt{((Di + s_M_g - c1_M - c2_M) * (s_M_g - c1_M - c2_M))}$$

$$b_M = 89.7651$$

Druckbelastete Fläche (mm²):

$$A_{p_M} = ((b_M + s_Mu_zw - c1_St - c2_St + (Di_M/2)) * (Di/2)) + ((lS_M_g + s_M_g - c1_M - c2_M) * (Di_M/2))$$

$$A_{p_M} = 2.1960e+04$$

Tragende Querschnittsfläche (mm²):

$$A_{sigma_M} = ((b_M + (s_Mu_zw - c1_St - c2_St)) * (s_M_g - c1_M - c2_M)) + (lS_M_g * (s_Mu_zw - c2_St - c1_St))$$

$$A_{sigma_M} = 1.8524e+03$$

Definition der linken Seite des Gleichgewichts:

$$GGW_L_M = (p_B/10) * ((A_{p_M}/A_{sigma_M}) + (1/2));$$

Definition der linken Seite des Gleichgewichts:

$$GGW_R_M = K_220/S_w_s;$$

Nachweis der Festigkeit (AD 2000-Merkblatt B9 (1))

```
if GGW_L_M <= GGW_R_M
    disp('Festigkeit des Stutzen "NPT-Einschrauber" nachgewiesen')
else
    display('ACHTUNG Festigkeit des Stutzen-NP nicht nachgewiesen')
end
```

Festigkeit des Stutzen "NPT-Einschrauber" nachgewiesen

4) Schraubenberechnung View port

In diesem Kapitel erfolgen zwei Verfahren zur Berechnung der Schraubendimension:

4.1 Nach klassischer Maschinenelemente-Lehre

Berechnung Festigkeitskennwert - lineare Interpolation notwendig

Festigkeitskennwert Schrauben 8.8:

Festigkeit des Schraubenwerkstoffes bei Normalbedingungen (N/mm²)

$$K_Schraube = 640$$

$$K_Schraube = 640$$

Festigkeit des Schraubenwerkstoffes bei 250 °C (N/mm²)

$$K_250_S = 510$$

$$K_250_S = 510$$

Definition der Temperatur 250 °C

$$T_K250 = 250$$

$$T_{K250} = 250$$

Festigkeit des Schraubenwerkstoffes bei 200°C (N/mm²):

$$K_{200_S}=540$$

$$K_{200_S} = 540$$

Definition der Temperatur 250 °C

$$T_{K200}=200$$

$$T_{K200} = 200$$

Definition der Temperatur bei 200 °C

$$T_{K220}=220;$$

Festigkeitswert bei 220°C (N/mm²)

$$K_{220_Schraube}=K_{200_S}-((K_{200_S}-K_{250_S})/(T_{K200}-T_{K250}))*(T_{K220}-T_{K250})$$

$$K_{220_Schraube} = 522$$

Kraft berechnen die auf den Deckel wirkt:

Dazu wird der volle Durchmesser des Deckels verwendet

Druckbelasteter Aussendurchmesser des Deckes (mm)

$$D_D=127.5$$

$$D_D = 127.5000$$

Innendurchmesser Deckel (mm)

$$d_D=100$$

$$d_D = 100$$

Kreisringfläche auf der Druck einwirkt (mm²):

$$A_k = (D_D^2-d_D^2)*\pi/4$$

$$A_k = 4.9136e+03$$

Definition des Druckes (bar in N/mm²)

$$p_D = 10$$

$$p_D = 10$$

Kraft die aufgrund des Druckes auf den Deckel wirkt (N):

$$F_D = p_D*A_k$$

$$F_D = 4.9136e+04$$

Anzahl der Schrauben:

$$n = 12$$

$$n = 12$$

Kraft pro Schraube

$$F_S = F_D/n$$

$$F_S = 4.0947e+03$$

Zulässige Spannung der Schraube (N/mm²)

$$\text{Sigma}_{zul} = K_{220_Schraube}/2$$

$$\text{Sigma}_{zul} = 261$$

Spannungsquerschnitt (mm²) und daraus resultierende Durchmesser (mm)

$$A_{Sp} = F_S/\text{Sigma}_{zul}$$

$$A_{Sp} = 15.6885$$

$$d_S = \sqrt{A_{Sp} \cdot 4/\pi}$$

$$d_S = 4.4694$$

4.2) Nach AD 2000 - B7

Mittlerer Dichtungsdurchmesser (mm)

$$dD = (D_D + d_D)/2$$

$$dD = 113.7500$$

Breite (mm) der Dichtung wo direkt Druck von Acrylzyylinder wirkt

$$B_D = (D_D - d_D)/2$$

$$B_D = 13.7500$$

Dichtungskennwert für den Betriebszustand (mm)

$$k1 = 2 \cdot B_D$$

$$k1 = 27.5000$$

Rohrkraft (N)

$$F_{RB} = (p_B \cdot \pi \cdot (d_D^2))/40$$

$$F_{RB} = 7.8540e+04$$

Flanschkraft (N)

$$F_{FB} = (p_B \cdot \pi \cdot ((dD^2) - (d_D^2)))/40$$

$$F_{FB} = 2.3083e+04$$

Dichtungskraft (N)

$$F_{DB} = (p_B/10) \cdot \pi \cdot dD \cdot 1.2 \cdot k1$$

$$F_{DB} = 1.1793e+05$$

Mindestschraubenkraft (N)

$$F_{SB} = F_{RB} + F_{FB} + F_{DB}$$

$$F_{SB} = 2.1955e+05$$

Sicherheitsbeiwert

$$S_S = 1.8$$

$$S_S = 1.8000$$

Verhältniswert

$$\phi = 1.0$$

$$\phi = 1$$

Hilfswert

$$Z = \sqrt{(4 \cdot S_S) / (\pi \cdot \phi)}$$

$$Z = 1.5139$$

Konstruktionszuschlag (mm) bei Vollschaftschrauben

$$c5 = 3$$

$$c5 = 3$$

Durchmesser (mm) der Schraube

$$d_S = (Z \cdot \sqrt{(F_{SB} / (K_{220_Schraube \cdot n}))}) + c5$$

$$d_S = 11.9626$$

5) Blechdicke des Deckels

In diesem Kapitel wird die Dicke des Deckels berechnet, wo auch die Gewindebohrungen enthalten sind

Laut Ad 2000 Merkblatt B5 Ab Kapitel 4

Wandstärke für eine runden, ebenen Deckel

$$s = C \cdot D1 \cdot \sqrt{(p \cdot S) / (10 \cdot K)} + c1 + c2$$

Berechnungsbeiwert C Tafel 1 näher zu Fall d:

$$C = 0.35$$

$$C = 0.3500$$

Durchmesser des Deckels als ebene Platte (mm)

$$d_D = 529$$

$$d_D = 529$$

Unverschwächter Plattenquerschnitt (mm²)

$$A_{un} = (d_D^2) \cdot \pi / 4$$

$$A_{un} = 2.1979e+05$$

Fläche (mm²) der Ausschnitte in der Schnitteben die die meisten Bohrungen beinhaltet (2xgroße 1xkleine Durchmesser) (1-14 UNS; 1/2-14 NPT)

$$A_a = (2 \cdot ((25.4 \cdot \pi) / (4))) + (1 \cdot ((12.7^2 \cdot \pi) / (4)))$$

$$A_a = 166.5751$$

Ausschnittsbeiwert

$$C_a = \sqrt{A_{un} / (A_{un} - A_a)}$$

$$C_a = 1.0004$$

Berechnungsdurchmesser; belasteter Durchmesser (mm)

$$D_B = (d_D + d_{i_R}) / 2$$

$$D_B = 470.9000$$

Annäherung der Wandstärke des Deckels (mm)

$$s_{D_{An}} = C \cdot C_a \cdot D_B \cdot \sqrt{(p_B \cdot S_{w_s}) / (10 \cdot K_{220})}$$

$$s_{D_{An}} = 45.5887$$

Faktor c1 (mm) für den Deckel: Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung

$$c1_D = 1$$

$$c1_D = 1$$

Faktor c2 (mm) für den Deckel: Abnutzungszuschlag (AD 2000- Merkblatt B0 9.2.1) - ferritische Stähle

$$c2_D = 1$$

$$c2_D = 1$$

Wandstärke des Deckels

$$s_D = s_{D_{An}} + c1_D + c2_D$$

$$s_D = 47.5887$$

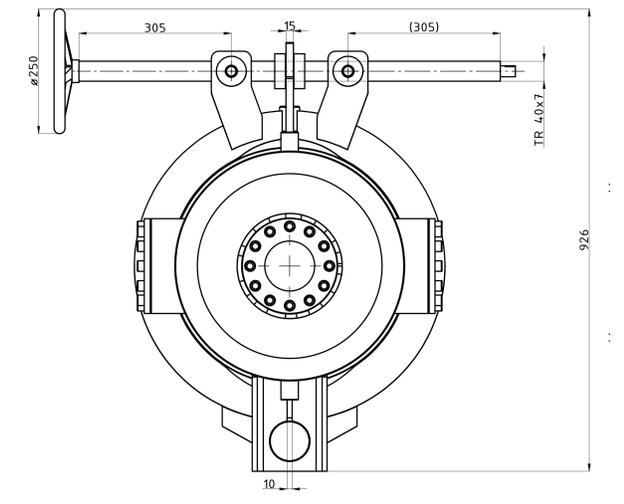
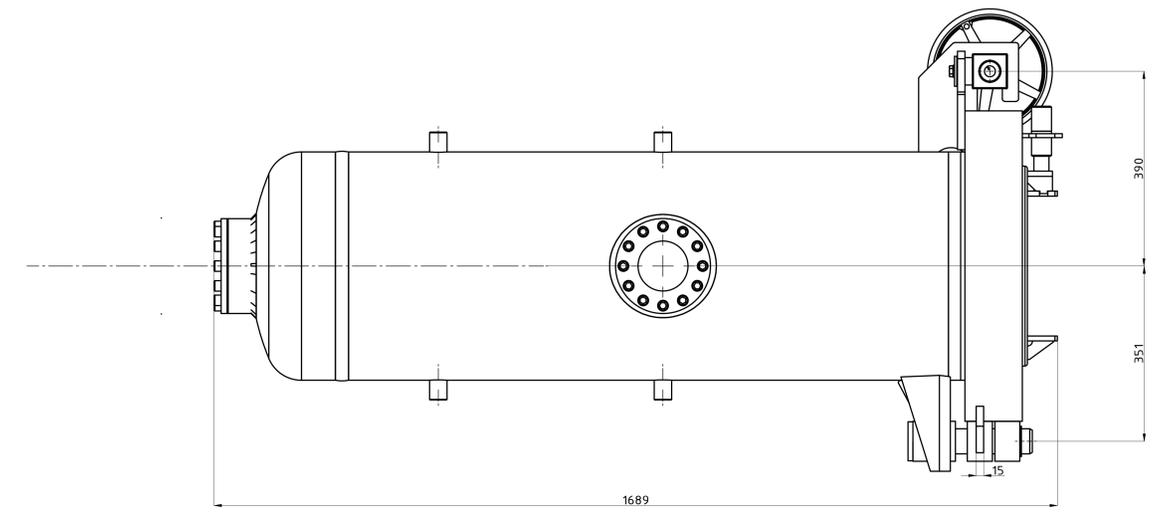
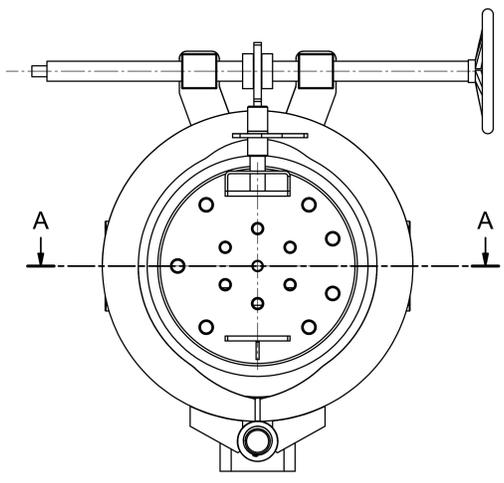
Wahl einer gängigen Blechstärke (wird aber sowieso bearbeitet)

$s_{D_g} = 60$

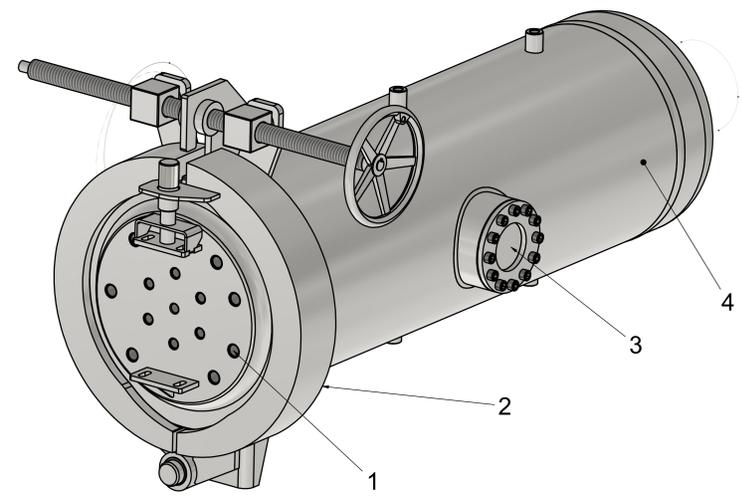
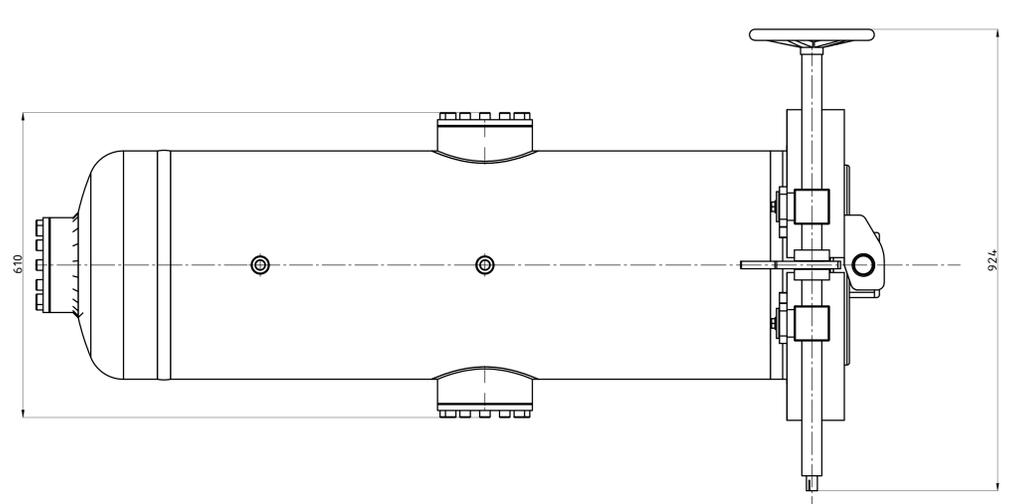
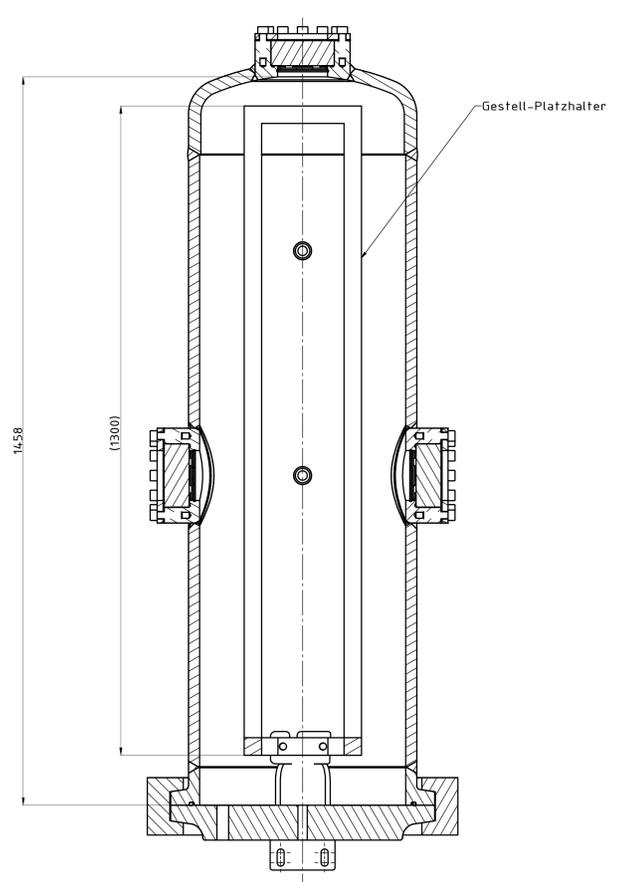
$s_{D_g} = 60$

Anhang D: Übersichtszeichnung

In diesem Anhang ist eine Übersichtszeichnung dargestellt.



A-A (1:5)



Auslegungsdruck: $p = 100\text{bar}$
 Volumen: $V \sim 200\text{l}$
 Auslegungstemperatur: $T = 220^\circ\text{C}$
 Kategorie IV
 Modul G

Pos.	Anz.	Benennung	Norm/Bez.	Werkst.	Bem.
4	1	Grundkörper		P265GH	
3	1	Viewport		/	
2	1	Verschlussystem		/	
1	1	Deckel		P265GH	

Stückliste					
Zeichn.	Datum	Name	Maßstab	Verstärkt	Grav.
D_Ü1	01.05.2022	Roth	1:5		
					700 kg

Übersicht Druckbehälter

