Inhaltlich überprüft und unverändert
weiterhin gültig: 2017-11 & 2022-11

KTA 3211.2

Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung

Fassung 2013-11

Frühere Fassung der Regel: 1992-06 (BAnz. Nr. 165 vom 3. September 1993, Berichtigung BAnz. Nr. 111 vom 17. Juni 1994)

Inhalt

		Seite
Grundlagen		2
1	Anwendungsbereich	2
2	Allgemeine Anforderungen und Begriffe	2
2.1	Begriffe	2
2.2	Allgemeine Anforderungen	3
3	Lastfallklassen und Beanspruchungsstufen	4
3.1	Allgemeines	4
3.2	Lastfallklassen	4
3.3	Beanspruchungsstufen	4
4	Einwirkungen auf die Komponenten infolge von mechanischen und thermischen Belastungen sowie durch das Medium	6
4.1	Allgemeines	6
4.2	Mechanische und thermische Belastungen	6
4.3	Zusammenstellung von Belastungen der Komponenten	6
4.4	Überlagerung von Belastungen und Zuordnung zu Beanspruchungsstufen	6
4.5	Einwirkungen des Mediums	6
5	Konstruktive Gestaltung	7
5.1	Übergeordnete Anforderungen	7
5.2	Allgemeine Anforderungen an Bauteile und deren Schweißnähte	8
5.3	Komponentenbezogene Anforderungen	12
6	Dimensionierung	16
6.1	Allgemeines	16
6.2	Schweißnähte	16
6.3	Plattierungen	16
6.4	Zuschläge	16
6.5	Wanddicken	16
6.6	Spannungsvergleichswerte	17
6.7	Zulässige Spannungen für die Dimensionierung	17
6.8	Betriebsnennspannung	17
7	Allgemeine Analyse des mechanischen Verhaltens	18
7.1	Allgemeines	18
7.2	Belastungen	20
7.3	Beanspruchungen	20
7.4	Resultierende Verformungen	20
7.5	Ermittlung, Bewertung und Begrenzung mechanischer Größen	21
7.6	Mechanische Systemanalyse	21
7.7	Spannungsanalyse	22
7.8	Ermüdungsanalyse	27
7.9	Verformungsanalyse	36
7.10	Stabilitätsanalyse	36
7.11	Spannungs-, Verformungs- und Ermüdungsanalyse für Flanschverbindungen	36
7.12	Vermeidung des Versagens infolge thermisch bedingter fortschreitender Deformation für Bauteile der Prüfgruppe A1	36
8	Komponentenspezifische Analyse des mechanischen Verhaltens	38
8.1	Allgemeines	38
8.2	Behälter	38
8.3	Pumpen	53
8.4	Armaturengehäuse	55
8.5	Rohrleitungen	64
8.6	Integrale Bereiche von Komponentenstützkonstruktionen	85
9	Art und Umfang der vorzulegenden Festigkeitsnachweise und zugehörige Unterlagen	86
Anhang A:	Dimensionierung	87
Anhang B:	Anforderungen an den Primärspannungsnachweis bei erneuten rechnerischen Nachweisen	162
Anhang C:	Bestimmungen und Literatur, auf die in dieser Regel verwiesen wird	163
Anhang D:	Änderungen gegenüber der Fassung 1992-06 und Erläuterungen (informativ)	165

Grundlagen

(1) Die Regeln des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) haben die Aufgabe, sicherheitstechnische Anforderungen anzugeben, bei deren Einhaltung die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage (§ 7 Abs. 2 Nr. 3 Atomgesetz -AtG-) getroffen ist, um die im AtG und in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) festgelegten sowie in den „Sicherheitskriterien", „Störfall-Leitlinien" und „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke" (SiAnf) weiter konkretisierten Schutzziele zu erreichen.

(2) In den Sicherheitskriterien wird im Kriterium 1.1 „Grundsätze der Sicherheitsvorsorge" unter anderem eine umfassende Qualitätssicherung bei Fertigung, Errichtung und Betrieb, im Kriterium 2.1 „Qualitätsgewährleistung" unter anderem die Anwendung, Aufstellung und Einhaltung von Auslegungs-, Werkstoff-, Bau-, Prüf-, und Betriebsvorschriften sowie die Dokumentation der Qualitätsüberwachung gefordert.

In den Kriterien 4.2 „Nachwärmeabfuhr im bestimmungsgemäßen Betrieb", 4.3 „Nachwärmeabfuhr nach Kühlmittelverlusten", 5.3 „Einrichtungen zur Steuerung und Abschaltung des Kernreaktors" und 8.5 „Wärmeabfuhr aus dem Sicherheitseinschluss" werden für die Sicherheitssysteme weitere Auslegungs- und Beschaffenheitsanforderungen gestellt.

Die Regeln KTA 3211.1 bis 3211.4 dienen zur Konkretisierung von Maßnahmen zur Erfüllung dieser Forderungen im Rahmen ihres Anwendungsbereiches. Hierzu wird auch eine Vielzahl im Einzelnen aufgeführter Regeln aus dem konventionellen Bereich der Technik, insbesondere DIN-Normen, mit herangezogen.

(3) Der hier definierte Anwendungsbereich umfasst die druck- und aktivitätsführenden Systeme und Komponenten außerhalb der druckführenden Umschließung (Regeln der Reihe KTA 3201), die eine spezifisch reaktorsicherheitstechnische Bedeutung gemäß RSK-Leitlinie (Abschnitt 4.2) besitzen.

(4) Im Einzelnen werden in KTA 3211.2 die Anforderungen festgelegt, die zu stellen sind an:

a) die Einstufung in Prüfgruppen, Lastfallklassen und Beanspruchungsstufen,
b) die Auslegung, Konstruktion und Berechnung der Komponenten,
c) die Berechnungsverfahren und Konstruktionsprinzipien für die Erzielung und Einhaltung der geforderten Qualität der Komponenten,
d) die Unterlagen für die vorzulegenden Nachweise.

1 Anwendungsbereich

(1) Diese Regel ist anzuwenden auf die Auslegung, Konstruktion und Berechnung der drucktragenden Wandungen von nicht zur druckführenden Umschließung des Reaktorkühlmittels gehörenden druck- und aktivitätsführenden Systemen und Komponenten von Leichtwasserreaktoren, die bis zu Auslegungstemperaturen von 673 K (400 °C) betrieben werden und eine spezifisch reaktorsicherheitstechnische Bedeutung besitzen. Diese ist gegeben, wenn eines der nachfolgenden Kriterien erfüllt ist:

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

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

b) Bei Versagen des Anlagenteils werden große Energien freigesetzt und die Versagensfolgen sind nicht durch bauliche Maßnahmen, räumliche Trennung oder sonstige Sicherheitsmaßnahmen auf ein im Hinblick auf die nukleare Sicherheit vertretbares Maß begrenzt.
c) Das Versagen des Anlagenteils kann unmittelbar oder in einer Kette von Folgeereignissen zu einem Störfall im Sinne des § 49 StrlSchV führen.

(2) Zum Anwendungsbereich dieser Regel gehören folgende Komponenten:

a) Druckbehälter,
b) Rohrleitungen und Rohrleitungsteile,
c) Pumpen und
d) Armaturen

einschließlich der integralen Bereiche der Komponentenstützkonstruktionen.

(3) Diese Regel gilt nicht für

a) Rohrleitungen und Armaturen gleich oder kleiner als DN 50, sie darf jedoch zur Erstellung von Spannungs- und Ermüdungsanalysen für Rohrleitungen und Armaturen gleich oder kleiner als DN 50 angewendet werden,

   Hinweis:
   Vereinfachte Vorgehensweisen sind in Abschnitt 8.5.1 (5) angegeben.
   Anforderungen an Messleitungen sind in KTA 3507 geregelt.

b) Einbauteile der Komponenten (die nicht Bestandteil der druckführenden Wandung sind) und Zubehör,
c) Systeme und Anlagenteile, die Hilfsfunktionen für die hier behandelten Systeme ausführen,
d) Systemteile, deren Systemdruck allein durch die geodätische Druckhöhe im Saugbereich bestimmt wird,
e) Teile zur Kraft- und Leistungsübertragung in Pumpen und Armaturen sowie Prüfungen zum Funktionsfähigkeitsnachweis.

2 Allgemeine Anforderungen und Begriffe

2.1 Begriffe

(1) Funktionsfähigkeit

Unter Funktionsfähigkeit wird die über die Standsicherheit und Integrität hinausgehende Fähigkeit zur Erfüllung der geforderten Aufgabe bei dem jeweiligen Ereignis verstanden.

Bei der Funktionsfähigkeit wird unterschieden, ob diese während oder nach dem Ereignis oder während und nach dem Ereignis gegeben sein muss. Dabei wird unterschieden zwischen aktiver und passiver Funktionsfähigkeit sowie zwischen aktiven und passiven Komponenten.

a) Aktive Funktionsfähigkeit der Komponente stellt sicher, dass die spezifizierten mechanischen Bewegungen (relative Bewegungen zwischen Teilen) ausgeführt werden können (Beachtung z. B. der Möglichkeit des Schließens von Spielen, der Entstehung oder Änderung von Reibkräften).
b) Passive Funktionsfähigkeit der Komponente bedeutet, dass zulässige Verformungen und Bewegungen nicht überschritten werden.
c) Aktive Komponenten sind solche, für die zur Erfüllung der sicherheitstechnischen Aufgabenstellungen mechanische Bewegungen spezifiziert sind, z. B. Pumpen, Armaturen. Alle anderen Komponenten sind passive Komponenten, z. B. Behälter, Rohrleitungen.

(2) Integrität

Integrität ist der Zustand einer Komponente oder Barriere, bei dem die an sie gestellten sicherheitstechnischen Anforderungen hinsichtlich Festigkeit, Bruchsicherheit und Dichtheit erfüllt sind.

(3) Standsicherheit

Unter Standsicherheit wird die Sicherheit gegen unzulässige Veränderungen der Lage und des Aufstellortes verstanden (z. B. Umstürzen, Abstürzen, unzulässiges Verrutschen).

2.2 Allgemeine Anforderungen

(1) Für die Komponenten ist eine Einstufung in Prüfgruppen und Werkstoffgruppen in Abhängigkeit von Auslegungsdaten und Abmessungen unter Beachtung der vorgesehenen Werkstoffe und Spannungsgrenzen vorzunehmen. Dabei dürfen für Komponenten innerhalb eines Systems, unter Umständen auch für Bauteile einer Komponente, unterschiedliche Prüfgruppen gewählt werden.

(2) Die zulässige Zuordnung zu Prüf- und Werkstoffgruppen ist nach **Tabelle 2-1** vorzunehmen.

(3) Der Spannungsvergleichswert in Prüfgruppe A1 ist S_m. In den Prüfgruppen A2 und A3 ist der Spannungsvergleichswert S.

(4) Für die Lastfälle der Gesamtanlage oder des Systems sind nach Abschnitt 3 die Belastungen der Komponente anzugeben und in Abhängigkeit von den sicherheitstechnischen Aufgabenstellungen den Betriebsstufen A, B, P, C, D zuzuordnen. Hieraus ist zur Dimensionierung der tragenden Querschnitte ein abdeckender Lastfall zu bilden, der der Auslegungsstufe (Stufe 0) zugeordnet ist. Diese Angaben sind komponentenbezogen als Grundlage für die Auslegung, Konstruktion und Berechnung vorzugeben (siehe Abschnitt 4).

(5) Entsprechend den sicherheitstechnischen Aufgabenstellungen der Komponenten sind Standsicherheit, Integrität und Funktionsfähigkeit wie nachfolgend erläutert nachzuweisen:

a) Standsicherheit der Komponente

Die Standsicherheit wird vorwiegend durch den Festigkeitsnachweis der Abstützung erbracht. Hierbei ist der Anschluss der Abstützung an die Komponente und die Verankerung (Abstützung, Komponente) zu beachten.

b) Integrität der Komponente

Beim Integritätsnachweis ist für das Bauteil oder für die Komponente unter Anwendung der allgemein anerkannten, technischen Verfahren zu zeigen, dass die während ihrer Betriebszeit auftretenden Beanspruchungen ertragen werden können.

Beim Nachweis der Integrität sind die Standsicherheit und, soweit erforderlich (z. B. bei Flanschverbindungen), die Dichtheit mit einzubeziehen.

c) Funktionsfähigkeit der Komponente

Beim Funktionsfähigkeitsweis ist für das Bauteil oder für die Komponente zu zeigen, dass die Verformungsbeschränkungen für die drucktragenden Wandungen bei den während der Betriebszeit auftretenden Beanspruchungen eingehalten werden.

Hinweis:
In dieser Regel werden nur die Anforderungen an die drucktragenden Wandungen zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der Komponente berücksichtigt.

(6) Die konstruktive Gestaltung ist gemäß den Festlegungen im Abschnitt 5 „Konstruktive Gestaltung“ auszuführen. Hiernach sind außer allgemeinen auch komponentenbezogene Konstruktionsregeln zu beachten. Die Verwendung anderer Konstruktionsformen bedarf gesonderter Nachweise.

(7) Die in der Komponente auftretenden Beanspruchungen sind in Abhängigkeit von den Beanspruchungsstufen zu beurteilen und gemäß der Festlegung der Abschnitte 6 bis 8 zu begrenzen.

(8) Die in Abschnitt 7 angegebenen Beanspruchungsgrenzen gelten für Beanspruchungen, die auf der Grundlage linear elastischer Werkstoffgesetze ermittelt wurden, sofern in den einzelnen Abschnitten keine hiervon abweichenden Festlegungen enthalten sind.

<table>
<tr><th rowspan="3">Prüf-gruppe</th><th colspan="2">Einstufungskriterien</th><th colspan="4">Zuordnung der Werkstoffe</th></tr>
<tr><th rowspan="2">Spannungs-vergleichswert</th><th rowspan="2">Abmessungs-begrenzung</th><th colspan="3">Ferritische Werkstoffe</th><th colspan="2">Austenitische Werkstoffe</th></tr>
<tr><th colspan="2">Werkstoffe nach KTA 3211.1</th><th>Werkstoffe im Geltungsbereich des AD 2000-Merkblatts W 0</th><th>Werkstoffe nach KTA 3211.1</th><th>Werkstoffe 1.4550, 1.4580, 1.4541, 1.4571 im Geltungsbereich des AD 2000-Merkblatts W 0</th></tr>
<tr><td>A 1</td><td>S_m</td><td>—</td><td>W I</td><td rowspan="3">(1) W II für:
- EG 1-Kleinteile
- Integrale Stützkonstruktionen
(2) Werkstoffe für Sonderanwendungen nach Einzelvereinbarung</td><td rowspan="3">Werkstoffe mit $R_{p0,2RT} \le 370$ N/mm² für EG 1-Kleinteile</td><td rowspan="3">Für alle Abmessungen zulässig</td><td rowspan="3">Für:
a) EG 1-Kleinteile,
b) integrale Stützkonstruktion</td></tr>
<tr><td rowspan="2">A 2</td><td rowspan="2">S</td><td>—</td><td>W I
$R_{p0,2RT} \le 370$ N/mm²</td></tr>
<tr><td>Bei Behältern:
$s \le 16$ mm
Bei Rohrleitungen, Pumpen, Armaturen:
≤ DN 150 [1)]</td><td>W II</td></tr>
<tr><td>A 3</td><td>S
zusätzlich:
$P_{mNB} \le 50$ N/mm²</td><td>—</td><td colspan="4"></td></tr>
</table>

(1) Diesen Prüfgruppen liegt entsprechend dem unterschiedlichen Gefährdungspotential (Beanspruchung, Abmessung) und unter Beachtung der verwendeten Werkstoffe die gleiche Basissicherheit (siehe RSK-Leitlinien) zugrunde.

(2) Komponenten innerhalb eines Systems und Baugruppen innerhalb einer Komponente dürfen unterschiedlichen Prüfgruppen zugeordnet werden.

1) Bei Pumpen: Nenndurchmesser des größten Druckstutzens.
Bei Armaturen: Nenndurchmesser des Eintrittsstutzens.

Tabelle 2-1: Prüfgruppen: Einstufungskriterien und Werkstoffzuordnung

(9) Alle in den Abschnitten 6 und 7 angegebenen Beanspruchungsgrenzen wurden aus der Sicht der Festigkeitsberechnung und der Qualitätssicherung so festgelegt, dass für die Prüfgruppen A1, A2 und A3 eine vergleichbare Sicherheit erreicht wird.

(10) Der Umfang der erforderlichen Festigkeitsnachweise ist in Abhängigkeit von den Prüfgruppen festgelegt. Die Festigkeitsnachweise für die Prüfgruppe A1 sind als Dimensionierung nach Abschnitt 6 und als allgemeine Analyse des mechanischen Verhaltens nach Abschnitt 7 oder als komponentenspezifische Analyse des mechanischen Verhaltens nach Abschnitt 8 durchzuführen. Alternativ ist die Anwendung gleichwertiger Berechnungsformeln zulässig (siehe Abschnitt 7.1.1 Absatz 6). Für die Prüfgruppen A2 und A3 ist eine Dimensionierung nach Abschnitt 6, erforderlichenfalls nach Abschnitt 8, und fallweise eine vereinfachte Ermüdungsanalyse nach Abschnitt 7 oder 8 durchzuführen.

(11) Die Komponenten der Prüfgruppen A2 und A3 sind nach den gleichen Gesichtspunkten zu konstruieren und zu berechnen, wobei die Berechnung im Wesentlichen einen Nachweis des Gleichgewichts mit den äußeren Kräften und eine Überprüfung der Ermüdung (in Prüfgruppe A3 nur für Rohrleitungen) beinhalten muss.

(12) Im Rahmen der Festigkeitsberechnung ist gegebenenfalls der Stabilitätsnachweis zu erbringen.

(13) Die nach dieser Regel notwendigen Festigkeitsnachweise, Stabilitätsnachweise und Funktionsfähigkeitsnachweise dürfen rechnerisch oder experimentell erbracht werden.

(14) Komponentenbezogene Regeln für die Dimensionierung sind im Anhang A und fallweise im Abschnitt 8 enthalten.

3 Lastfallklassen und Beanspruchungsstufen

3.1 Allgemeines

(1) Aus dem Einsatz der Systeme und den Ereignissen der Gesamtanlage resultierende Belastungen der Systeme sind entsprechend ihrem physikalischen und zeitlichen Zusammenhang zu Lastfällen zusammenzustellen. Diese Lastfälle werden entsprechend ihrer Bedeutung für die Gesamtanlage und im Hinblick auf die Einhaltung der Schutzziele den in Abschnitt 3.2 beschriebenen Lastfallklassen zugeordnet. In Anlehnung an die Lastfallklassen werden für die einzelnen Komponenten eines Systems die aus den Lastfällen resultierenden Beanspruchungen den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Beanspruchungsstufen zugeordnet.

(2) An die Beanspruchungsstufen sind Entscheidungskriterien bezüglich des Weiterbetriebs der Komponente oder der durchzuführenden Maßnahmen nach Ablauf des betreffenden Lastfalls gekoppelt (siehe Abschnitt 3.3).

(3) Ergeben sich aus sonstigen Belastungen (z. B. Transport-, Montage- und Reparaturfälle) Beanspruchungen nennenswerter Größe, so sind diese in einem Festigkeitsnachweis zu ermitteln. Die zulässigen Beanspruchungsgrenzen sind hierfür im Einzelfall festzulegen.

3.2 Lastfallklassen

3.2.1 Allgemeines

(1) Unter Lastfall ist ein Zustand oder eine Zustandsänderung eines Systems zu verstehen, die zu Belastungen der einzelnen Komponenten führen. Die genauen oder konservativen Werte der Belastungen sind der Konstruktion, der Dimensionierung und der Analyse des mechanischen Verhaltens der Komponenten und Bauteile zugrunde zu legen.

(2) Die Lastfälle sind entsprechend ihrer Bedeutung für die Gesamtanlage und im Hinblick auf die Einhaltung der Schutzziele einer der nachfolgend aufgeführten Lastfallklassen zugeordnet.

3.2.2 Auslegungsfälle (AF)

Als Auslegungsfälle sind diejenigen Lastfälle zu betrachten, welche die normalen Betriebsfälle (NB) gemäß dem nachfolgenden Abschnitt 3.2.3 abdecken, soweit diese in den Komponenten oder Bauteilen maximale primäre Beanspruchungen hervorrufen.

3.2.3 Bestimmungsgemäßer Betrieb

3.2.3.1 Normale Betriebsfälle (NB)

Normale Betriebsfälle sind Betriebszustände oder Betriebszustandsänderungen, für die die Anlage bei funktionsfähigem Zustand der Systeme vorgesehen ist. Es handelt sich insbesondere um Anfahren des Systems, Vollastbetrieb, Teillastbetrieb und Abfahren des Systems, Funktionsfähigkeitsprüfungen einschließlich der bei diesen Laständerungen auftretenden Transienten.

3.2.3.2 Anomale Betriebsfälle (AB)

Als anomale Betriebsfälle werden Abweichungen von den normalen Betriebsfällen bezeichnet, die durch Funktions- oder Schaltfehler der Komponente selbst oder der Nachbarkomponenten entstehen. Der anschließenden Fortführung des Betriebs stehen keine sicherheitstechnischen Gründe entgegen.

3.2.3.3 Prüffälle (PF)

Die Prüffälle umfassen die Erstdruckprüfung (Komponenten- und Systemdruckprüfung), sowie wiederkehrende Druck- und Dichtheitsprüfungen.

3.2.4 Störfälle

3.2.4.1 Allgemeines

Störfälle sind Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb, bei deren Eintritt der Betrieb der Anlage aus sicherheitstechnischen Gründen nicht fortgeführt werden kann und für die die Anlage ausgelegt ist.

3.2.4.2 Notfälle (NF)

Notfälle sind Störfälle, die eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit haben.

3.2.4.3 Schadensfälle (SF)

Schadensfälle sind Störfälle, die eine extrem geringe Eintrittswahrscheinlichkeit haben oder es sind postulierte Lastfälle.

3.3 Beanspruchungsstufen

3.3.1 Allgemeines

Die Beanspruchungsstufen der Komponenten sind bezüglich des Weiterbetriebs und der durchzuführenden Maßnahmen wie folgt zu unterscheiden, wobei bei Einhaltung der in Abschnitt 6 bis 8 angegebenen Beanspruchungsgrenzen die sicherheitstechnischen Aufgabenstellungen (Standsicherheit und Integrität) in jeder Beanspruchungsstufe gewährleistet sind.

3.3.2 Auslegungsstufe (Stufe 0)

3.3.2.1 Allgemeines

(1) Der Stufe 0 werden die Beanspruchungen der Auslegungsfälle (AF) zugeordnet. Die Beanspruchungen der Stufe 0

ergeben sich demnach aus der Wirkung des Auslegungsdrucks und zusätzlicher Auslegungslasten, so dass die maximalen primären Beanspruchungen aus den zur Stufe A gemäß Abschnitt 3.3.3.2 gehörenden Lastfällen einschließlich der zugehörenden Stabilitätsfälle in den Komponenten und deren Bauteile abgedeckt werden. Die Daten des Lastfalls bestehen aus Auslegungsdruck (siehe Abschnitt 3.3.2.2), Auslegungstemperatur (siehe Abschnitt 3.3.2.3) und zusätzlichen Auslegungslasten (siehe Abschnitt 3.3.2.4).

Hinweis:
(1) Die Beanspruchungsgrenzen der Stufe 0 sind derart festgelegt, dass die Beanspruchungen das Gleichgewicht zu den äußeren mechanischen Lasten so herstellen, dass unter Berücksichtigung der erforderlichen Sicherheiten kein Verformungsversagen und kein Gewaltbruch auftreten.

(2) In Komponentenspezifikationen und Auslegungsdatenblättern wird anstelle der Bezeichnung „Auslegungsüberdruck“ auch die Bezeichnung „Zulässiger Betriebsüberdruck“ und anstelle der Bezeichnung „Auslegungstemperatur“ auch die Bezeichnung „Zulässige Betriebstemperatur“ verwendet.

3.3.2.2 Auslegungsdruck

(1) Der zu spezifizierende Auslegungsdruck für eine Komponente oder ein Bauteil ist mindestens die größte Druckdifferenz zwischen den druckbelasteten Oberflächen gemäß Stufe A (siehe Abschnitt 3.3.3.2).

(2) Für Bauteile, bei denen die beidseitigen Drücke voneinander unabhängig sind, ist der größte der im Folgenden angegebenen Werte der Auslegung zugrunde zu legen:

a) maximale Differenz zwischen Innendruck und Atmosphärendruck,
b) maximale Differenz zwischen Außendruck und Atmosphärendruck zur Berücksichtigung des Stabilitätsverhaltens,
c) maximale Differenz zwischen Innen- und Außendruck zur Berücksichtigung des Stabilitätsverhaltens.

(3) Für Bauteile, bei denen die beidseitigen Drücke voneinander abhängig sind, ist der Auslegungsdruck gleich der maximalen Druckdifferenz.

(4) Hydrostatische Drücke sind zu berücksichtigen, sofern sie 5 % des Auslegungsdrucks übersteigen.

(5) Es wird davon ausgegangen, dass Sicherheitsventile und sonstige Sicherheitseinrichtungen so bemessen und eingestellt sind, dass der Druck im anomalen Betrieb den Auslegungsdruck bis zur Freigabe des vollen Abblasequerschnitts und während des Abblasens um nicht mehr als 10 % überschreitet. Hierbei sind jedoch die Beanspruchungsgrenzen von Stufe B (siehe Abschnitt 3.3.3.3) einzuhalten.

(6) Erfolgt die Auswahl eines Bauteils anhand einer Nenndruckstufe PN, muss der Nenndruck mindestens dem Auslegungsdruck entsprechen. Weitere Bedingungen sind gegebenenfalls dieser Regel oder der betreffenden Bauteilnorm zu entnehmen.

3.3.2.3 Auslegungstemperatur

Die Auslegungstemperatur dient der Festlegung der Festigkeitskennwerte. Sie soll mindestens gleich der höchsten gemäß Stufe A (siehe Abschnitt 3.3.3.2) zu erwartenden Temperatur in der Wand an der zu betrachtenden Stelle sein.

3.3.2.4 Zusätzliche Auslegungslasten

Zusätzliche Auslegungslasten müssen bei Überlagerung mit dem Auslegungsdruck mindestens so hoch angesetzt werden, dass sie die gleichzeitig wirkenden ungünstigsten primären Beanspruchungen der Stufe A abdecken.

Hinweis:
In Einzelfällen können die Belastungen aus den Stufen B, C und D auslegungsbestimmend sein. Die Nachweisführung für diese Belastungen erfolgt unter Einhaltung der jeweils zulässigen primären Beanspruchung.

3.3.3 Betriebsstufen

3.3.3.1 Allgemeines

Die Ermittlung und Begrenzung der Beanspruchungen für die Betriebsstufen hat im Rahmen einer Analyse des mechanischen Verhaltens zu erfolgen. Hierbei darf von den tatsächlichen und jeweiligen Belastungen sowie Temperaturen ausgegangen werden.

3.3.3.2 Stufe A

(1) Der Stufe A sind die Beanspruchungen aus den normalen Betriebsfällen (NB) zugeordnet.

(2) Die Zulässigkeit der Vergleichsspannungen und der Vergleichsspannungsschwingbreiten ist gemäß Abschnitt 7.7.3 nachzuweisen.

Hinweis:
Die Beanspruchungsgrenzen der Stufe A sind derart festgelegt, dass unter Berücksichtigung der erforderlichen Sicherheiten kein Verformungsversagen und kein Gewaltbruch sowie kein Versagen durch fortschreitende Deformation und Ermüdung auftreten können.

3.3.3.3 Stufe B

(1) Sofern keine Einstufung in Stufe A erfolgt, sind der Stufe B die Beanspruchungen aus den anomalen Betriebsfällen (AB) zugeordnet.

(2) Für die der Stufe B zugeordneten Lastfälle ist die Zulässigkeit der Vergleichsspannungen und der Vergleichsspannungsschwingbreiten gemäß Abschnitt 7.7.3 nachzuweisen.

(3) Der Primärspannungsnachweis braucht nur geführt zu werden, wenn die primären Beanspruchungen der Stufe 0 oder der Stufe A überschritten werden.

Hinweis:
Die Beanspruchungsgrenzen der Stufe B sind derart festgelegt, dass unter Berücksichtigung der erforderlichen Sicherheiten kein Verformungsversagen und kein Gewaltbruch sowie kein Versagen durch fortschreitende Deformation und Ermüdung auftreten können.

3.3.3.4 Stufe C

(1) Sofern keine Einstufung in Stufe B erfolgt, sind der Stufe C Beanspruchungen aus den Notfällen (NF) zugeordnet.

(2) Bei den der Stufe C zugeordneten Lastfällen sind beim Spannungsnachweis nur primäre Spannungen zu berücksichtigen. Überschreitet die Gesamtzahl der Lastspiele aller spezifizierten Ereignisse der Stufe C für die betreffende Komponente die Zahl 25, so sind die über die Anzahl 25 hinausgehenden Lastspiele in der Ermüdungsanalyse für die betreffende Komponente zu berücksichtigen.

Hinweis:
Die Beanspruchungsgrenzen der Stufe C erlauben plastische Deformation im Bereich von geometrischen Diskontinuitäten und schließen einen Gewaltbruch aus. Nach Auftreten eines solchen Falles kann eine Inspektion der betroffenen Komponente erforderlich werden.

(3) Als äußerer Überdruck ist ohne zusätzlichen Stabilitätsnachweis 120 % des zulässigen äußeren Überdrucks gemäß Stufe 0 zulässig. Sofern die entsprechenden Nachweise für die Stufe A geführt werden, gilt diese Festlegung sinngemäß.

3.3.3.5 Stufe D

(1) Sofern keine Einstufung nach Stufe B oder C erfolgt, sind der Stufe D Beanspruchungen aus den Schadensfällen (SF) zugeordnet.

(2) Bei den der Stufe D zugeordneten Lastfällen sind beim Spannungsnachweis nur primäre Spannungen zu berücksichtigen.

Hinweis:
Die Grenzen dieser Beanspruchungsstufe schließen einen Gewaltbruch aus. Dabei wird in Kauf genommen, dass in größeren Bereichen plastische Verformungen auftreten können. Für die betroffene Komponente kann eine Reparatur oder ein Austausch erforderlich werden.

3.3.3.6 Stufe P

(1) Die Stufe P gilt für Beanspruchungen aus den Prüffällen (PF) (Druckprüfungen der Komponenten).

(2) Bei den der Stufe P zugeordneten Lastfällen sind beim Spannungsnachweis nur die primären Spannungen zu berücksichtigen. Überschreitet die Anzahl der Druckprüfungen nicht die Zahl 10, so brauchen diese in der Ermüdungsanalyse nicht berücksichtigt zu werden. Überschreitet die Anzahl der Druckprüfungen die Zahl 10, so müssen alle Druckprüfungen in der Ermüdungsanalyse berücksichtigt werden.

(3) Die Erstdruckprüfung einer nicht im System eingebauten Komponente ist bei Walz- und Schmiedestählen mit dem 1,3fachen Auslegungsdruck, bei Stahlguss mit dem 1,5fachen Auslegungsdruck und bei Kugelgraphitguss mit dem zweifachen Auslegungsdruck als Prüfdruck p' durchzuführen.

4 Einwirkungen auf die Komponenten infolge von mechanischen und thermischen Belastungen sowie durch das Medium

4.1 Allgemeines

(1) Alle maßgebenden Einwirkungen auf die Komponenten infolge von mechanischen und thermischen Belastungen sowie durch das Medium sind bei der Auslegung, Konstruktion und Berechnung zu berücksichtigen.

(2) Unter mechanischer und thermischer Belastung ist die Einwirkung der unter Abschnitt 3 definierten Lastfälle auf die Komponente zu verstehen. Diese Einwirkung ruft in den Komponenten Beanspruchungen hervor, für welche die Komponenten auszulegen sind.

(3) Einwirkungen des Mediums können an den Komponenten

a) örtliche oder großflächige Abtragungen verursachen (Korrosion und Erosion),
b) die Ermüdungsfestigkeit reduzieren,
c) im Zusammenwirken mit Spannungen zur Rissbildung führen.

4.2 Mechanische und thermische Belastungen

(1) Unter mechanischen und thermischen Belastungen werden Kräfte und Momente, aufgezwungene Verformungen und Temperaturfelder verstanden, soweit sie Beanspruchungen in den Komponenten hervorrufen.

(2) Als mechanische und thermische Belastungen sind anzusehen:

a) Belastungen aus dem Medium, verursacht z. B. durch dessen Druck, Temperatur, Drucktransienten, Temperaturtransienten, Strömungskräfte, Schwingungen.
b) Belastungen aus der Komponente selbst, verursacht z. B. durch deren Eigengewicht, Vorspannungen, Formabweichungen, Einbauten.
c) Belastungen aus den Nachbarkomponenten, verursacht z. B. durch Rohrleitungskräfte infolge behinderter Wärmedehnungen.
d) Belastungen aus der Umgebung z. B. durch Festpunktverschiebungen, Schwingungen infolge Erdbeben.

4.3 Zusammenstellung von Belastungen der Komponenten

Alle für die Auslegung, Konstruktion und Berechnung notwendigen Daten sind den komponentenbezogenen Unterlagen zu entnehmen. Diese enthalten neben den erforderlichen Daten für den Festigkeitsnachweis auch Angaben zur Bauart und Aufgabenstellung der Komponente.

4.4 Überlagerung von Belastungen und Zuordnung zu Beanspruchungsstufen

Die Überlagerung der Belastungen auf eine Komponente und die Zuordnung der überlagerten Belastungen zu Beanspruchungsstufen ist anlagenbezogen vorzunehmen und komponentenbezogen festzulegen.

Hinweis:
Ein Beispiel für die Überlagerung von Belastungen und der Zuordnung zu Beanspruchungsstufen ist in **Tabelle 4-1** angegeben.

4.5 Einwirkungen des Mediums

(1) Den Einwirkungen des Mediums ist durch die Wahl geeigneter Werkstoffe, Dimensionierung, konstruktive und spannungsgerechte Gestaltung, verfahrenstechnische oder fertigungstechnische Maßnahmen (z. B. Spannungsarmglühen, Plattierung oder Auftragschweißung, Vermeidung enger Spalte) zu begegnen.

(2) Bei Unsicherheiten hinsichtlich der Wirkung des Mediums auf die Bauteilintegrität ist dies durch eine Beschränkung des zulässigen Erschöpfungsgrades D (siehe Abschnitt 7.8.3), durch betriebsnahe Experimente oder durch geeignete Maßnahmen im Rahmen der Betriebsüberwachung und wiederkehrenden Prüfungen zu berücksichtigen.

Hinweis:
Anforderungen an die Betriebsüberwachung und wiederkehrenden Prüfungen sind in KTA 3211.4 festgelegt.

Beanspruchungsstufen	Belastungen [1]												
	Statische Belastung							Transiente Belastungen			Schwingende und dynamische Belastungen		
	Auslegungsdruck	Auslegungstemperatur [2]	Druck	Temperatur [2]	Eigengewicht und andere Lasten	Mechanische Lasten, Reaktionskräfte	Behinderte Wärmedehnung	Transiente Lasten (Druck, Temperatur, mechanische Lasten), dynamische Belastung	Anomale Belastungen (statisch und dynamisch)	Prüfbelastungen (statisch und dynamisch)	Bemessungserdbeben	Einwirkungen von innen	Sonstige Einwirkungen von außen
Stufe 0	X	X			X								
Stufe A			X	X	X	X	X	X					
Stufe B			X	X	X	X	X		X				
Stufe P			X	X	X					X			
Stufe C			X	X	X	X							
			X	X	X	X						X	
Stufe D			X	X	X	X					X		
			X	X	X	X						X	
			X	X	X	X							X

[1] Im jeweiligen Belastungsfall ist zu prüfen, welche Belastungen zutreffen.
[2] Zur Festlegung des Spannungsvergleichswertes bei der für die betreffenden Belastungen maßgebenden Temperatur.

Tabelle 4-1: Beispiel für die Überlagerung von Belastungen der Komponente und Zuordnung zu Beanspruchungsstufen

5 Konstruktive Gestaltung

5.1 Übergeordnete Anforderungen

5.1.1 Grundsätze

(1) Die Konstruktion der Komponenten muss

a) funktionsgerecht,
b) beanspruchungsgünstig,
c) werkstoffgerecht,
d) fertigungs- und prüfgerecht,
e) wartungsfreundlich gestaltet sein.

(2) Die vorgenannten allgemeinen Anforderungen stehen in Wechselwirkung zueinander und sind unter Berücksichtigung der komponentenbezogenen Anforderungen aufeinander abzustimmen. Insoweit stellen die in den Abschnitten 5.2 und 5.3 enthaltenen Festlegungen und Beispiele Konkretisierungen der im Abschnitt 5.1 enthaltenen grundsätzlichen Anforderungen dar.

5.1.2 Funktionsgerechte, beanspruchungsgünstige Konstruktion

Komponenten sind so zu gestalten und auszulegen, dass sie die spezifischen funktionellen Anforderungen erfüllen.

Hieraus resultieren folgende Grundsätze:

a) Günstige Bedingungen für die Betriebsbelastungen der Komponenten unter Berücksichtigung der aus dem System resultierenden Belastungen (z. B. Stell-, Schließ- und Strömungskräfte, Temperaturschichtungen).
b) Günstiger Spannungsverlauf, insbesondere in gestörten Bereichen (Stutzen, Wanddickenübergänge, Auflagerstellen).
c) Vermeidung schroffer Wanddickenübergänge, insbesondere bei Komponenten, die transienten Temperaturbelastungen unterliegen (siehe Abschnitt 5.2.6).
d) Vermeidung von Schweißnähten in Bereichen örtlich erhöhter Spannungen.
e) Rohrleitungsverlegung mit Gefälle.

5.1.3 Werkstoffgerechte Konstruktion

(1) Im Hinblick auf die Wahl des Werkstoffes und der Erzeugnisform sind folgende Kriterien zu berücksichtigen:

a) Festigkeit,
b) Zähigkeit,
c) Korrosionsbeständigkeit,
d) Reparaturfähigkeit,
e) Herstellbarkeit (Minimierung von Herstellungsfehlern),
f) Prüfbarkeit.

(2) Es sind Werkstoffe nach KTA 3211.1 einzusetzen. Für besondere Beanspruchungen, z. B. Erosion, Korrosion oder erhöhter Verschleiß, können „Werkstoffe für besondere Anwendungen“ zugelassen werden.

(3) Werkstoffe sind in einer für die auftretenden Beanspruchungen geeigneten Erzeugnisform (z. B. Bleche, Schmiedeteile, Gussteile, nahtlose Rohre) einzusetzen.

(4) Die Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe innerhalb einer Komponente ist auf das notwendige Maß zu beschränken.

5.1.4 Herstellungsgerechte Konstruktion

5.1.4.1 Fertigungsgerecht

Für die fertigungsgerechte Konstruktion gelten folgende Grundsätze:

a) Es sind Erzeugnisformen und Wanddicken zu wählen, die günstige Voraussetzungen für die Verarbeitung und zerstörungsfreie Prüfung gewährleisten.

b) Die Anzahl der Schweißnähte ist sinnvoll zu minimieren. Sie sind so anzuordnen, dass die Zugänglichkeit beim Schweißen (unter Beachtung der Wärmebehandlung) und eine Minimierung von Schweißeigenspannungen berücksichtigt werden.

c) Halteeisen (Montagehilfen) an ferritischen Wänden sind mindestens zweilagig anzuschweißen. Die letzte Schweißraupe darf den Grundwerkstoff des Bauteils nicht berühren.

d) Die Konstruktion ist so auszubilden, dass eventuelle Reparaturen möglichst einfach durchführbar sind.

5.1.4.2 Prüfgerechte Konstruktion

(1) Die Formgebung der Bauteile sowie die Gestaltung und die Anordnung der Schweißnähte muss die Durchführbarkeit der gemäß KTA 3211.1, KTA 3211.3 und KTA 3211.4 geforderten zerstörungsfreien Prüfungen mit ausreichender Fehlererkennbarkeit an den Erzeugnisformen, Schweißnähten und eingebauten Komponenten gestatten. Die von der Art des anzuwendenden Prüfverfahrens abhängigen Anforderungen an die prüfgerechte Konstruktion sind im einzelnen KTA 3211.3 Abschnitt 11.1 zu entnehmen.

(2) Für die prüfgerechte Konstruktion gelten folgende Grundsätze:

a) Anschweißungen an drucktragenden Wandungen sind grundsätzlich durchzuschweißen, so dass eine zerstörungsfreie Prüfung der Verbindungsnaht möglich ist. Die Zulässigkeit von Kehlnähten ist in Abschnitt 5.2.2.2 (4) festgelegt.

b) Die Konstruktion ist grundsätzlich so zu gestalten, dass alle zugänglichen Verbindungsschweißnähte an drucktragenden Teilen wandeben, Anschweißnähte an der drucktragenden Wand mit kerbfreiem Übergang bearbeitet werden können (siehe Abschnitt 5.2.2). Den Oberflächenzustand der Verbindungsschweißnähte regelt KTA 3211.3 Tabelle 5-4.

c) Einseitig geschweißte Nähte sind zulässig, wenn die Prüfbarkeit mit den in KTA 3211.3 vorgegebenen zerstörungsfreien Prüfverfahren sichergestellt ist. Konstruktiv ist sicherzustellen, dass die Bedingungen aus KTA 3211.3 eingehalten werden können.

d) Geschmiedete Teile sind so zu gestalten und zu fertigen, dass die zerstörungsfreien Prüfungen, z. B. Ultraschallprüfung und Oberflächenrissprüfung, am fertigen Stück oder am Schmiederohling nach der für den Werkstoff vorgeschriebenen Wärmebehandlung möglich sind. Ausnahmen hiervon sind in KTA 3211.1 geregelt.

e) Gehäuse aus Stahlguss sind so zu gestalten, dass die zerstörungsfreien Prüfungen (z. B. Durchstrahlungsprüfung, Oberflächenrissprüfung) grundsätzlich auch an der Innenoberfläche möglich sind. Nur in Bereichen mit Betriebsnennspannungen kleiner als oder gleich 50 N/mm^2 sind Einschränkungen zulässig. Die Möglichkeit der Oberflächenrissprüfung ist außen und, soweit zugänglich, innen durch konstruktive Maßnahmen sicherzustellen.

5.1.5 Wartungsfreundliche Konstruktion

(1) Bei der Konstruktion der drucktragenden Wand der Komponenten ist auf eine einfache Zugänglichkeit und gute Durchführbarkeit von wiederkehrenden Prüfungen zu achten.

(2) Es sind folgende Grundsätze zu beachten:

a) Es ist auf gute Zugänglichkeit für die Instandhaltung (insbesondere Prüfung, visuelle Kontrolle, Reparatur oder Austausch) zu achten. Es sind einfache Prüfgeometrien in den zerstörungsfrei zu prüfenden Bereichen zu wählen.

b) Es ist auf gute Zugänglichkeit für eventuelle Reparaturen unter Beachtung der Gesichtspunkte des Strahlenschutzes zu achten.

c) Aktivitätsführende Komponenten sind so zu konstruieren, dass Ablagerungen soweit wie möglich vermieden werden und die Dekontaminierung durchführbar ist.

d) Schweißnähte sind im Kontrollbereich nach Strahlenschutzverordnung so anzuordnen und zu gestalten, dass die Rüst- und Prüfzeiten für wiederkehrende Prüfungen möglichst kurz sind.

e) Bei Komponenten, die wiederkehrend zu prüfen aber nicht für zerstörungsfreie Prüfungen zugänglich sind, ist die Betriebsnennspannung auf kleiner als oder gleich 50 N/mm^2 zu begrenzen.

5.2 Allgemeine Anforderungen an Bauteile und deren Schweißnähte

5.2.1 Allgemeines

Außer den nachfolgend genannten Anforderungen sind bei Anwendung spezieller Berechnungsverfahren gegebenenfalls zusätzliche Geometriebedingungen zu berücksichtigen.

5.2.2 Schweißnähte

5.2.2.1 Stumpfnähte

Stumpfnähte sind durchzuschweißen. Bei Stumpfnähten sollen Kreuzstöße, Nahtkreuzungen und Schweißgutanhäufungen vermieden werden. Der kleinste seitliche Versatz von T-Stößen muss mindestens der dreifachen zu verschweißenden Wanddicke entsprechen; er braucht jedoch 150 mm nicht zu überschreiten. Ausführungsformen für Einseitennähte sind im **Bild 5.2-1** dargestellt.

5.2.2.2 Anschweißnähte

(1) Anschweißungen an drucktragenden Wandungen sind grundsätzlich mit einer Schweißnahtlänge von größer als oder gleich 50 mm auszuführen. Ausnahmen (z. B. Flachnocken für Rohrleitungen) sind mit entsprechender Nachweisführung zulässig.

(2) Eckstöße und Überschweißungen von Stumpfnähten sind nicht zulässig.

Bei Halteblechen und Pratzenanschweißungen an Bauteilen mit Wanddicken s größer als oder gleich 16 mm sind dazu Freischnitte vorzusehen.

(3) DHV- und HV-Nähte mit Gegenlage nach **Bild 5.2-2** sind ohne Einschränkung zulässig. HV-Nähte ohne Gegenlage sind in Ausnahmefällen bei eingeschränkter Zugänglichkeit zulässig, wenn die Nähte durchgeschweißt werden und mittels zerstörungsfreier Verfahren prüfbar sind.

(4) Kehlnähte sind als umlaufend geschlossene Nähte auszuführen und in folgenden Fällen zulässig:

a) In Prüfgruppe A2 unter der Voraussetzung der Verwendung von austenitischen und ferritischen Werkstoffen mit $R_{p0,2RT}$ kleiner als oder gleich 300 N/mm^2 und unter der Voraussetzung, dass vorwiegend ruhende Beanspruchung vorliegt.

   Mediumberührte Kehlnähte in Prüfgruppe A2 sind nur zulässig, wenn sie zusätzlich zu diesen Voraussetzungen beschliffen und einer Oberflächenprüfung unterzogen werden und wenn bei ferritischen Werkstoffen die Härtewerte in der WEZ deutlich (ca. 10 Prozent) unterhalb 350 HV 10 liegen. Hierfür genügt ein Nachweis bei der Verfahrensprüfung.

b) in Prüfgruppe A3;

c) wenn durchgeschweißte Nähte zu deutlich ungünstigeren Konstruktionen führen, als dies bei Einsatz von Kehlnähten der Fall ist;

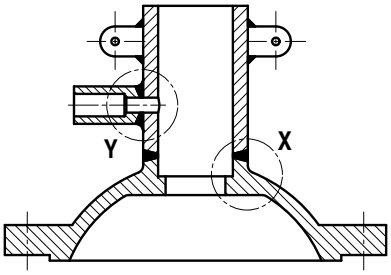
d) als Dichtnähte (siehe **Bild 5.2-3**);

e) als Anschweißungen an austenitischen Schweißplattierungen.

5.2.2.3 Stutzennähte

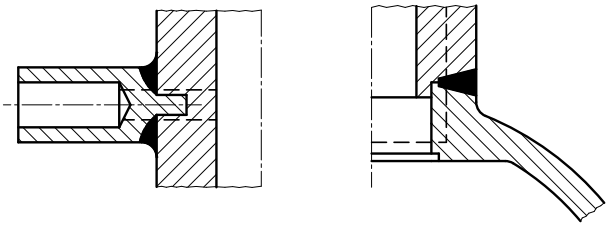
(1) Die zulässigen Ausführungsformen von Schweißnähten und Schweißnahtübergängen an Stutzen sind in **Bild 5.2-4** dargestellt.

(2) Stutzeneinschweißungen sind, soweit dies aufgrund der Abmessungen möglich ist, gegenzuschweißen. Einseitennähte sind zulässig, wenn die Wurzel mechanisch bearbeitet wird. Ist in Ausnahmefällen die mechanische Bearbeitung der Wurzel nicht möglich, ist die Prüfbarkeit sicherzustellen.



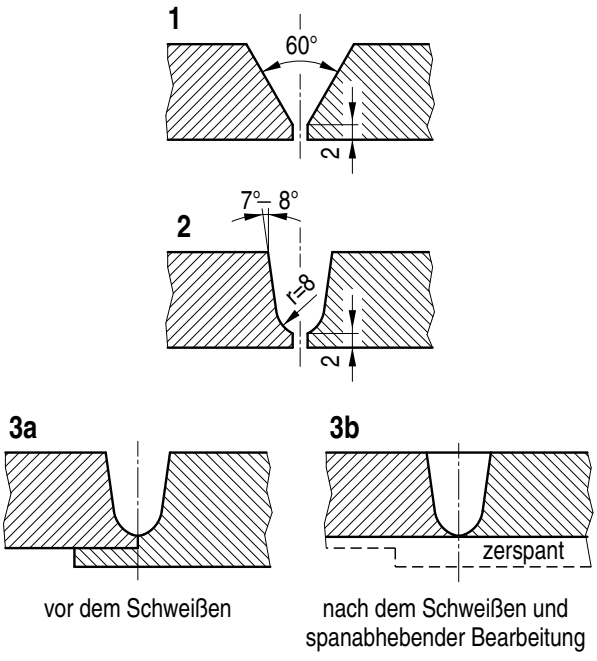
Einzelheit Y
vor dem Aufbohren

Einzelheit X
vor dem Ausdrehen



Herstellungsgerechte Bearbeitungszugabe wählen

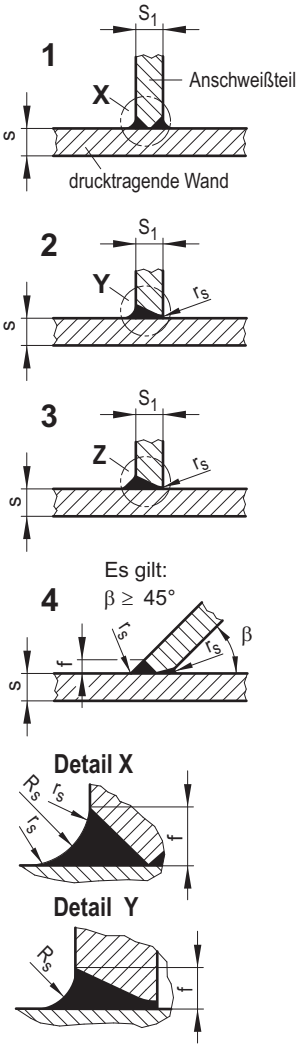
– – – Endkontur



vor dem Schweißen

nach dem Schweißen und spanabhebender Bearbeitung

Bild 5.2-1: Beispiele für einseitig ausgeführte Stumpfnähte



Generell gilt für Nahtkontur und Gestaltung der Übergänge auch an den Kehlnähten aller Ausführungen:

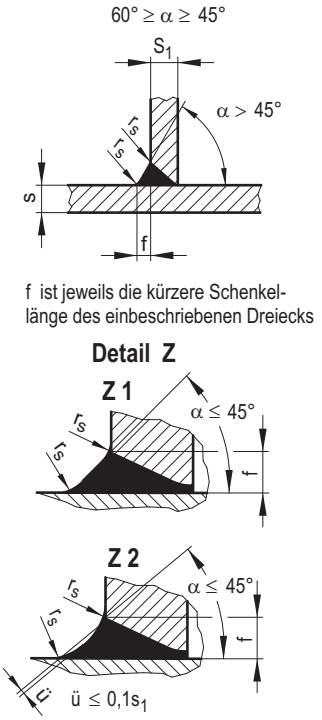
$s_1 \leq s$

$R_s \geq 0{,}5\, s_1$

$f \geq 0{,}5\, s_1$

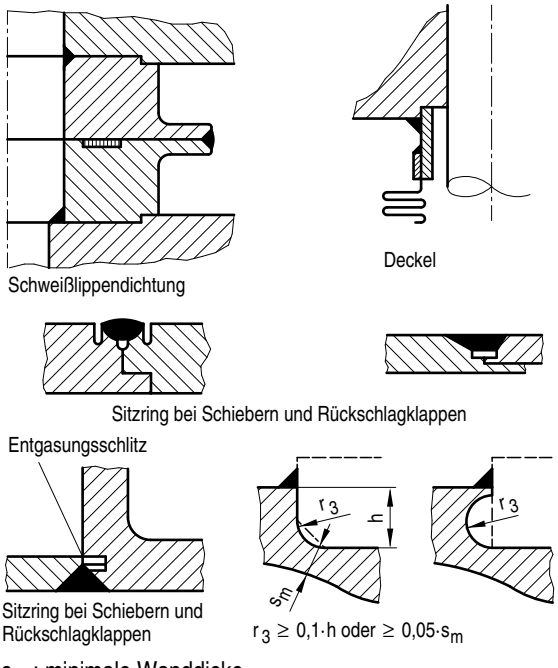
$r_s \geq 5$ mm, jedoch nicht größer $R_s/2$

R_s und r_s mit tangentialem Übergang zu verschweißten Teilen bzw, zu anderen Übergangsradien ausführen



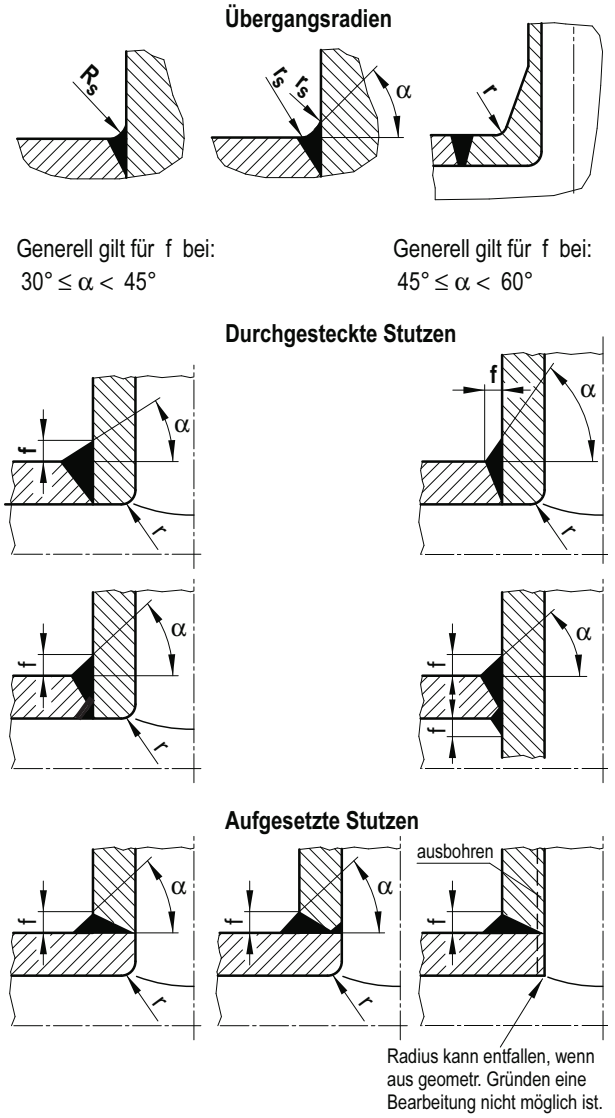
f ist jeweils die kürzere Schenkellänge des einbeschriebenen Dreiecks

Bild 5.2-2: Beispiele für HV- und DHV-Nähte bei Anschweißungen



s_m : minimale Wanddicke

Bild 5.2-3: Beispiele für Schweißnähte mit überwiegender Dichtfunktion



Bezeichnungen siehe **Tabelle 5.2-1**

Bild 5.2-4: Ausführungsformen von Schweißnähten an Stutzen

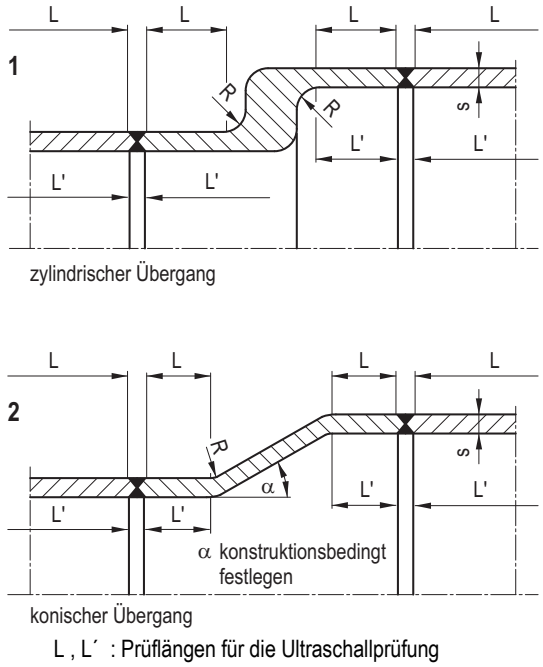


Bild 5.2-5: Beispiele für zulässige Ausführungsformen von Durchmesserübergängen

5.2.3 Durchmesserübergänge

(1) Das **Bild 5.2-5** zeigt Beispiele für zulässige Ausführungsformen von Durchmesserübergängen.

(2) Die Prüflängen L oder L* und L' nach **Bild 5.2-5** sind gemäß KTA 3211.3 Abschnitt 11, abhängig vom gewählten Prüfverfahren, auf beiden Seiten der Schweißnaht vorzusehen. Vorhandene Radien an Kanten oder Übergängen sind dabei zu berücksichtigen. Die Prüflänge ist vom Radiusauslauf bis zur Flanke der Schweißnaht anzusetzen. Bei Ausführungsform (2) darf der zylindrische Ansatz für Komponenten der Prüfgruppe A3 zwischen Schweißnaht und Konus entfallen (Eckschweißung), wenn $R > 3 \cdot s$, $\alpha \leq 30°$, die Naht gegengeschweißt wird und die Nahtoberflächen innen und außen beschliffen werden.

5.2.4 Flansche und Dichtungen

(1) Flansche dürfen nur geschmiedet oder gegossen, im Fall von Losflanschen auch nahtlos gewalzt werden.

(2) Für Flanschverbindungen an Stutzen und in Rohrleitungen sollen Vorschweißflansche nach DIN-Normen oder Vorschweißflansche mit Normabmessungen eingesetzt werden. Hinsichtlich der Zuordnung der Druckstufe ist Abschnitt A 2.10.3 zu beachten.

(3) Für austenitische und ferritische Flanschverbindungen, die nicht wie Normflansche ausgeführt werden können, sind die Gestaltung der Dichtflächen und die Schraubenteilung in Anlehnung an die entsprechenden Norm-Flanschverbindungen zu wählen. Anzupassen sind bevorzugt die Höhe des Flanschblattes und der Übergang zum Rohranschluss. Für den Radius r zwischen dem Flanschblatt und dem kegeligen oder zylindrischen Ansatz gilt folgende Bedingung:

Der Radius soll mindestens $0{,}25 \cdot s_R$ betragen, jedoch nicht weniger als 6 mm (s_R = Wanddicke des angeschlossenen Rohres).

(4) Bei nicht genormten Flanschen soll die Schraubenzahl möglichst groß gewählt werden, so dass eine gleichmäßige und sichere Abdichtung erreicht wird. Es sind mindestens vier Schrauben nach Abschnitt 5.2.5 vorzusehen. Die Anzahl der Schrauben soll durch 4 teilbar sein. Das Verhältnis Mittenabstand benachbarter Schraubenlöcher zu Schraubenlochdurchmesser muss gleich oder kleiner als 5 sein.

(5) Bei der Wahl der Dichtung ist die Belastbarkeit durch Druck, Temperatur, Strahlung, Medium und äußere Lasten sowie die Werkstoffverträglichkeit zu berücksichtigen. Bei der Gestaltung der Dichtflächen sind die spezifischen Eigenschaften der Dichtungselemente zu beachten.

5.2.5 Schrauben und Muttern

(1) Es sind Schrauben und Muttern nach DIN-Normen einzusetzen, soweit dies konstruktiv möglich ist. Dabei sind Dehnschrauben oder Schrauben mit Dehnschäften zu bevorzugen. Die tragende Gewindelänge ist auf die Werkstoffpaarung (z. B. Bolzen-Gehäuse) abzustimmen. Dehnschrauben nach DIN 2510-1 bis DIN 2510-4 oder Schrauben mit Dehnschäften sind bei Auslegungstemperatur größer als 300 °C oder Auslegungsdruck größer als 4 MPa einzusetzen.

(2) Ferritische Schrauben sind mit einem geeigneten Oberflächenschutz zu versehen.

(3) Schrauben und Muttern zur Verbindung mit austenitischen Teilen sind möglichst aus gleichem oder artgleichem Werkstoff wie die zu verbindenden Teile auszuführen. Werden Werkstoffe mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten verwendet, ist die Auswirkung der unterschiedlichen Wärmeausdehnung zu beachten.

(4) Schrauben unter M 10 oder entsprechendem Gewindekerndurchmesser sind grundsätzlich nicht zulässig. In Sonderfällen (z. B. bei Schrauben für Armaturen) dürfen auch kleinere Schrauben verwendet werden, jedoch darf M 6 oder ein entsprechender Gewindekerndurchmesser nicht unterschritten werden.

(5) Schraubverbindungen sind so zu konstruieren, dass Schrauben vorwiegend auf Zug beansprucht werden.

5.2.6 Stutzen

(1) Die geometrischen Ausführungsbedingungen (Wanddickenverhältnisse, Schweißnahtradien, Stutzenlängen) sind in **Tabelle 5.2-1** angegeben. Die Definition der in der **Tabelle 5.2-1** enthaltenen Größen ist den **Bildern 5.2-4** und **5.2-6** zu entnehmen.

(2) Für Stutzen größer als oder gleich DN 125 und einer Stutzenwanddicke s_A größer als oder gleich 15 mm ist grundsätzlich die Grundschale im Ganzen unter Beachtung eines günstigen Spannungsverlaufes zu verstärken. Bei einem Durchmesserverhältnis q_A größer als 0,8 ist zusätzlich eine Spannungsanalyse durchzuführen, sofern dieser Bereich nicht durch zutreffende Dimensionierungsverfahren abgedeckt ist. Das Durchmesserverhältnis q_A ist definiert als Quotient aus mittlerem Durchmesser des abgehenden Rohres und mittlerem Durchmesser des verstärkten Bereiches des Grundrohres.

$$q_A = \frac{d_{Ai} + s_A}{d_{Hi} + s_H} \qquad (5.2\text{-}1)$$

(3) Das Wanddickenverhältnis von Stutzen zur Grundschale ist grundsätzlich kleiner als oder gleich 1,3 zu wählen (siehe **Tabelle 5.2-1**). Dieses Wanddickenverhältnis darf in folgenden Fällen größer sein:

a) die zusätzliche Wanddicke des Stutzens wird nicht zur Verstärkung des Stutzenausschnittes herangezogen, sondern aus konstruktiven Gründen gewählt (z. B. Mannlochstutzen),

b) der Stutzen wird mit verkürztem Verstärkungsbereich ausgeführt (z. B. Stutzen, die aus Gründen der verbesserten Prüfbarkeit des Rohranschlusses konisch ausgeführt sind),

c) das Durchmesserverhältnis von Stutzen zu Grundschale ist kleiner als oder gleich 1:10 und der Stutzendurchmesser ist kleiner als oder gleich DN 125,

d) im Einzelfall bis zu einem Wanddickenverhältnis s_A/s_H kleiner als oder gleich 1,5, sofern eine allgemeine Analyse des mechanischen Verhaltens gemäß Abschnitt 7 durchgeführt wird.

(4) Bei großem Stutzendurchmesser im Vergleich zum Grundschalendurchmesser ist das Wanddickenverhältnis zu reduzieren. Im Falle eines Abzweigs mit q_A größer als 0,8 ist das Wanddickenverhältnis auf s_A/s_H kleiner als oder gleich 1,0 zu begrenzen.

(5) Stutzen sind aus geschmiedeten Stangen (Durchmesserbegrenzung abhängig von der Begutachtung), nahtlos geschmiedeten Hohlkörpern oder nahtlosen Rohren herzustellen. Längsnahtgeschweißte Stutzen sind zulässig, wenn die Längsnaht gegengeschweißt wird oder die Wurzel mechanisch abgearbeitet wird.

(6) Bei Stutzen aus ferritischen Stählen mit DN 125 oder größer und s_A größer als 15 mm sind Prüflängen gemäß KTA 3211.3 für die Ultraschallprüfung der Stutzeneinschweißnaht vorzusehen.

(7) Bei Stutzen aus austenitischen Stählen mit DN 125 oder größer und ferritischen Stählen mit DN 125 oder größer und s_A gleich 15 mm oder kleiner sind Prüflängen gemäß KTA 3211.3 für die Durchstrahlungsprüfung der Stutzeneinschweißnaht sicherzustellen.

Wanddickenverhältnisse	s_A/s_H	≤ 1,3 : 1 zusätzliche Regelungen siehe Abschnitt 5.2.6 (4)
	s_A/s_R bei PB ≥ 4 MPa	≥ 1,5 : 1 (Nennmaße) und ≥ 2 : 1 bezogen auf rechnerische Wanddicke der anschließenden Rohrleitung
Ausführung der Schweißnähte und der Übergänge	Grundsätzliche Anforderungen R_S	≥ 0,5 · s_H bei durchgesteckten oder aufgesetzten Stutzen
	Grundsätzliche Anforderungen f	≥ 0,4 · s_H bei durchgesteckten Stutzen ≥ 0,8 · s_A bei aufgesetzten Stutzen
	Ein Überschweißen der Schweißkanten ist zu vermeiden	
	r_S	≥ 5 mm, jedoch nicht größer als 0,25 · s_H
	α	30° bis 60 °
	r (außerhalb der Schweißnähte)	Übergänge sind zu runden und Kanten zu brechen. Die Radien sind konstruktionsbedingt und spannungsgünstig festzulegen.
Mindeststutzenlängen l für Behälter		100 mm bei DN ≤ 80 150 mm bei DN > 80

s_A Wanddicke des Abzweigs (Stutzens)
s_H Wanddicke des Grundkörpers
s_R Wanddicke des an den Stutzen angeschlossenen Rohrs
r Radius an Verschneidungskante
R_S Schweißnahtradius
r_S Übergangsradius an Naht
f Schweißnahteckmaß
α Schweißnahtwinkel
l Stutzenlänge

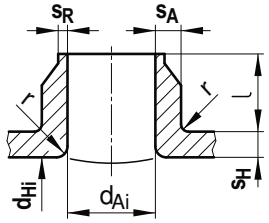


Tabelle 5.2-1: Anforderungen an Wanddickenverhältnisse, Schweißnähte und Übergänge von Stutzen

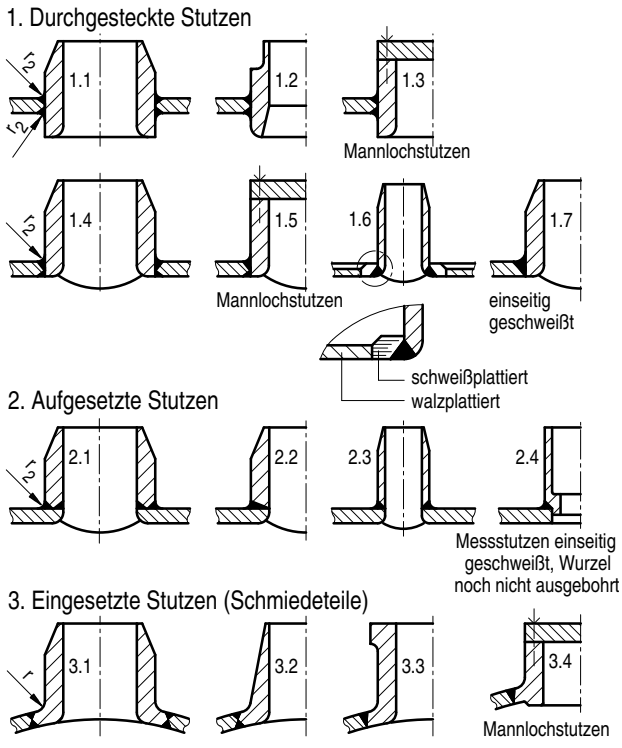


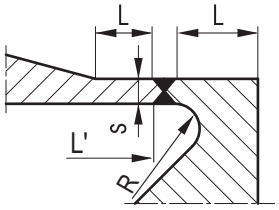
Bild 5.2-6: Beispiele von Stutzen-Ausführungsformen

5.2.7 Gewölbte und ebene Böden

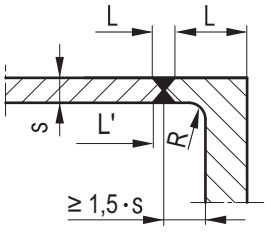
Folgende gewölbte Bodenformen sind vorzugsweise zu verwenden:

a) gekrempter ebener Boden
b) Klöpperboden
c) Korbbogenboden
d) Halbkugelboden.

Das **Bild 5.2-7** zeigt zulässige Ausführungsformen für vorgeschweißte ebene Böden (z. B. Endkappen). Die Ausführungen 1 und 2 sind zulässig für Schmiedeteile oder kombinierte Schmiedewalzherstellung. Ausführung 2 darf auch aus geschmiedeten Stangen hergestellt werden für kleiner als oder gleich DN 150. Für geflanschte ebene Deckel, die in Dickenrichtung nur auf Druck beansprucht werden, sind Bleche zugelassen. Für Druckprüfungen sind Blinddeckel aus Blech zugelassen.



Ausführung 1



Ausführung 2

Wanddicke s in mm	Ausführung	Bedingung für R in mm	Bedingung für L, L'
$s \leq 40$	1	$R = \max\{5; 0{,}5 \cdot s\}$	gemäß KTA 3211.3
$s \leq 40$	2	$R = \max\{8; 0{,}5 \cdot s\}$	
$s > 40$	1 und 2	$R \geq 0{,}3 \cdot s$	

Bild 5.2-7: Zulässige Ausführungsformen von geschweißten ebenen Böden

5.3 Komponentenbezogene Anforderungen

5.3.1 Allgemeines

Die Vorgaben bezüglich der konstruktiven Gestaltung gemäß Abschnitt 5.1 bis 5.2 gelten übergeordnet für alle Komponententypen. Nach folgend werden ergänzende komponentenbezogene Konstruktionsanforderungen aufgeführt, die einige Konstruktionselemente von Apparaten und Behältern, Pumpen, Armaturen und Rohrleitungen betreffen.

5.3.2 Behälter

5.3.2.1 Stutzen

(1) Für die konstruktive Gestaltung von Stutzen an Behältern gelten die Festlegungen von Abschnitt 5.2.6.

(2) Der rechnerisch als Ausschnittsverstärkung berücksichtigte Teil des Stutzens ist der druckführenden Wand des Behälters zuzuordnen. Der zum Behälter gehörende Bereich darf bis zur ersten Stutzenanschlussnaht oder bei geflanschten Anschlüssen bis zur Trennebene zwischen den Flanschen erweitert werden.

5.3.2.2 Besichtigungsöffnungen

(1) Besichtigungsöffnungen sind nach den Anforderungen des AD 2000-Merkblattes A5 vorzusehen.

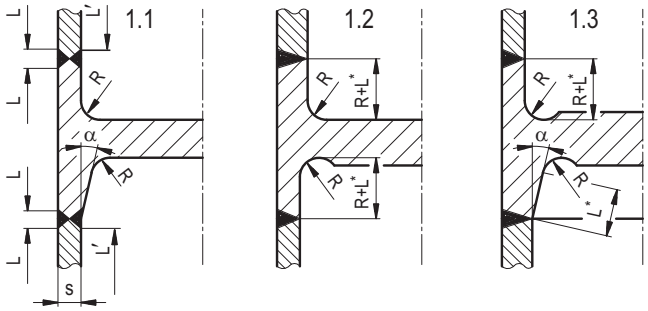
(2) Stutzen für Besichtigungsöffnungen müssen den in Abschnitt 5.2.6 gestellten Anforderungen an die Gestaltung genügen. Verschlüsse und Abdichtungen (z. B. Mannloch) sind so auszubilden, dass mehrmaliges Öffnen zu Besichtigungs- und Reparaturzwecken ohne Beeinträchtigung der Dichtheit möglich ist; Schweißlippendichtungen sind zu vermeiden.

(3) Bei Behältern, die mit radioaktiven Medien beaufschlagt werden, sind Einsteigeöffnungen, wenn nach AD 2000-Merkblatt A5 gefordert, mit DN 600 vorzusehen.

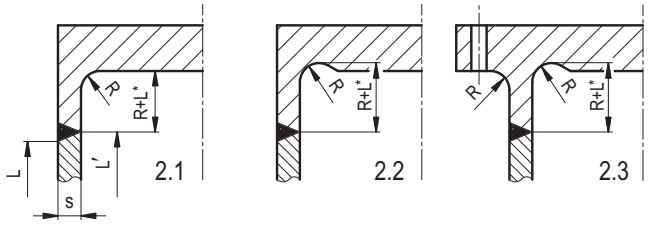
5.3.2.3 Rohrböden

(1) Das **Bild 5.3-1** zeigt Beispiele typischer Ausführungsformen von Rohrböden mit zylindrischen Ansätzen zum Anschluss der Zylinderschüsse. Sie gelten für ferritische und austenitische Werkstoffe.

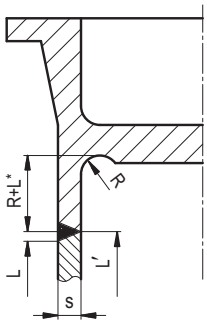
1. Beidseitig vorgeschweißte Rohrböden



2. Einseitig vorgeschweißte Rohrböden



3. Sonderform



Schmiedestück
Vorkammer mit integriertem Rohrboden

L , L′ : Prüflängen für die Ultraschallprüfung

L* : Prüflänge für die Durchstrahlungsprüfung

s in mm	R [1)]	α
≤ 40	0,5 · s	≤ 10°
> 40	0,3 · s	≤ 10°

[1)] Mindestwerte

Bild 5.3-1: Ausführungsformen für Rohrböden (prinzipielle Beispiele), konstruktive Anforderungen.

(2) Die Anschlussnaht des Zylinders an den Rohrboden ist gegenzuschweißen, d. h. sie ist grundsätzlich nicht als Schlussnaht auszuführen. Ausnahmen sind bei kleinen Abmessungen zulässig, die von innen nicht zugänglich sind. Eine Bearbeitung auf der Innenseite muss während der Herstellung grundsätzlich möglich sein.

(3) Bei innen und außen beschliffenen Schweißnahtoberflächen ist die Prüflänge für die Ultraschallprüfung nur an einer Nahtaußenseite erforderlich.

(4) Andere Ausführungsformen als in **Bild 5.3-1** dargestellt, sind zulässig, wenn die zulässigen Spannungen und die geometrischen Voraussetzungen zur Durchführung der zerstörungsfreien Prüfung nachgewiesen werden.

5.3.2.4 Kompensatoren

(1) Es dürfen ein- oder mehrlagige Balgkompensatoren, mit Längs- oder Umfangsnähten am Balg eingesetzt werden. Die nachfolgenden Festlegungen gelten für einlagige Kompensatorbälge; mehrlagige Kompensatorbälge sind im Einzelfall nachzuweisen.

(2) Die Kompensatorbälge sind mittels Stumpfnähten an die Schweißenden oder Behälterschüsse anzuschließen, siehe Ausführungsbeispiel **Bild 5.3-2**; dabei sollen Mischverbindungen vermieden werden.

(3) Zur Prüfung der Anschlussnaht soll eine Prüflänge von $L \geq 3 \cdot s$ (siehe **Bild 5.3-2**) vorgesehen werden. Die gesamte zylindrische Länge (siehe **Bild 5.3-2**) mit der Wanddicke s soll aus Festigkeitsgründen das Maß

$$l = 0{,}5 \cdot \sqrt{s \cdot d / 2}$$

nicht überschreiten (siehe Abschnitt 8.2.5.2).

(4) Kompensatorbälge sind nicht für die Aufnahme von nennenswerten Quer- und Längskräften sowie von Biegemomenten geeignet. Deshalb ist durch konstruktive Maßnahmen, wie z. B. Führungen, Einbauten und Stützkonstruktionen, sicherzustellen, dass derartige Belastungen vom Kompensatorbalg ferngehalten werden.

Hinweis:
Festlegungen zur Berücksichtigung der Schweißnahtlage für den Fall hoher Ermüdungsbeanspruchung sind in Abschnitt 8.2.5.4.2.5 enthalten.

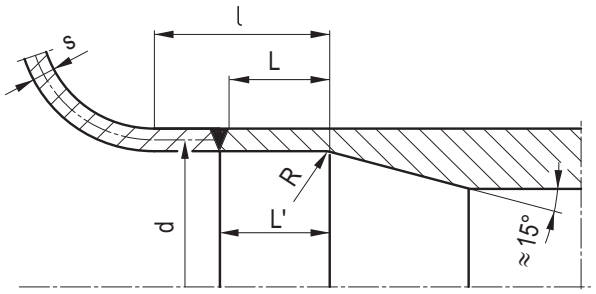


Bild 5.3-2: Beispiel für Anschlussform

5.3.3 Pumpengehäuse

Pumpengehäuse können als geschmiedete, gegossene oder geschweißte Konstruktionen ausgeführt werden. Einige typische Ausführungsformen sind im Abschnitt A 3 dargestellt. Es gelten die konstruktiven Anforderungen gemäß den Abschnitten 5.1 und 5.2. Zusätzlich ist folgendes zu beachten:

a) Das Pumpengehäuse ist so zu gestalten, dass auch bei Einwirkung von Rohrleitungskräften und -momenten sowie von EVA-Belastungen zusätzlich zu den aus dem Betrieb herrührenden hydraulischen und thermischen Belastungen die geforderte Funktionsfähigkeit erhalten bleibt. Dabei sind die Auflagerung der Pumpe, die Steifigkeit der Stützkonstruktion und die Verankerung im Gebäude zu berücksichtigen.

b) Der Aufbau des Pumpengehäuses und der zugehörigen Systeme muss eine möglichst gute Zugänglichkeit für Instandhaltung, Austausch von Verschleißteilen und Reparatur gestatten.

5.3.4 Armaturengehäuse

Armaturengehäuse können als geschmiedete, gegossene oder geschweißte Konstruktionen ausgeführt werden. Einige typische Ausführungsformen sind im Abschnitt A 4 dargestellt. Es gelten die konstruktiven Anforderungen gemäß den Abschnitten 5.1 und 5.2. Zusätzlich ist folgendes zu beachten:

a) Das Armaturengehäuse ist so steif zu gestalten, dass auch bei Einwirkung von Rohrleitungskräften und -momenten sowie von EVA-Belastungen zusätzlich zu den aus dem Betrieb herrührenden hydraulischen Belastungen die geforderte Funktionsfähigkeit erhalten bleibt. Dabei ist die Halterung bzw. Lagerung zu berücksichtigen.

b) Der Aufbau des Armaturengehäuses und der zugehörigen Systeme muss eine möglichst gute Zugänglichkeit für Instandhaltung, Austausch von Verschleißteilen und Reparatur gestatten.

c) Bei der Konstruktion des Armaturengehäuses muss besonderer Wert auf sanfte Querschnittsübergänge gelegt werden.

5.3.5 Rohrleitungen

5.3.5.1 Rohre, Rohrbögen und Rohrbiegungen

(1) Rohre, Rohrbögen und Rohrbiegungen mit PN größer als 40 sollen nahtlos ausgeführt werden.

(2) Das Verhältnis R_m/d_a von Rohrbiegungen muss gleich oder größer als 1,5 betragen. Ein Verhältnis R_m/d_a von gleich oder größer als 2 ist anzustreben.

(3) Bögen mit geraden Rohrenden sind vorzusehen, wenn dies für die Durchführbarkeit der zerstörungsfreien Prüfungen erforderlich ist. Rohrbögen ohne gerade Rohrenden, sind zulässig:

a) bei austenitischen und ferritischen Verbindungen, die durchstrahlt werden,

b) bei gleicher Wanddicke von Rohr und Rohrbogen $\geq$ DN 300 und $R \geq 1{,}5 \cdot D$,

c) bei innen beschliffener Schweißnaht (US-prüfbar von einer Nahtseite).

(4) Zulässige Ausführungen von Rohrbögen sind in **Bild 5.3-3** angegeben.

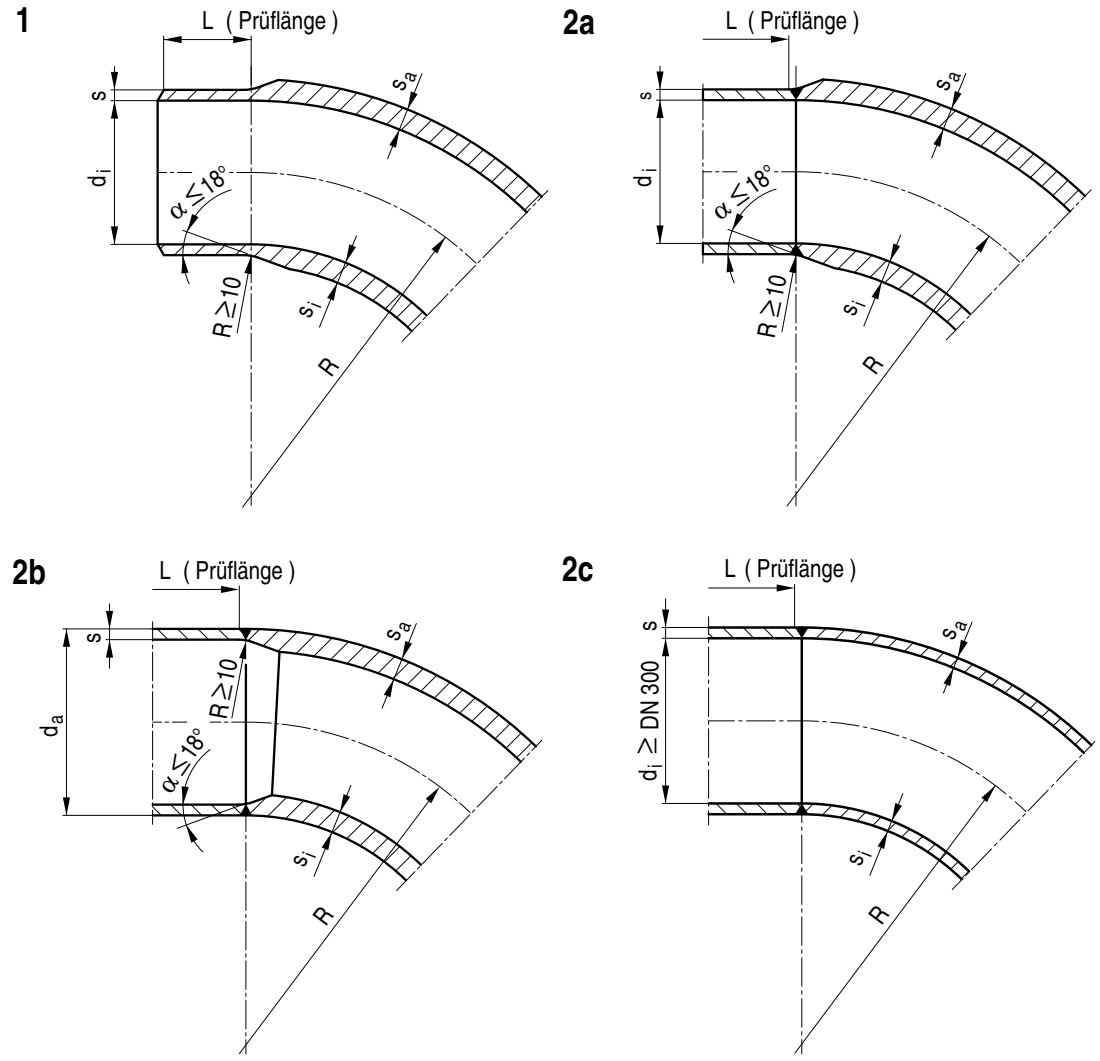
5.3.5.2 Geschweißte Anschlüsse an Rohrwandungen für Festpunkte und Teilfestpunkte

Die nachfolgenden Festlegungen gelten für Festpunkte und Teilfestpunkte:

a) Die Ausführungen a) und b) von **Bild 5.3-4** sind für Rohrleitungen bis PN 40 zulässig. Die Ausführung c) von **Bild 5.3-4** darf auch für Rohrleitungen mit Nenndruck größer als 4 MPa eingesetzt werden.

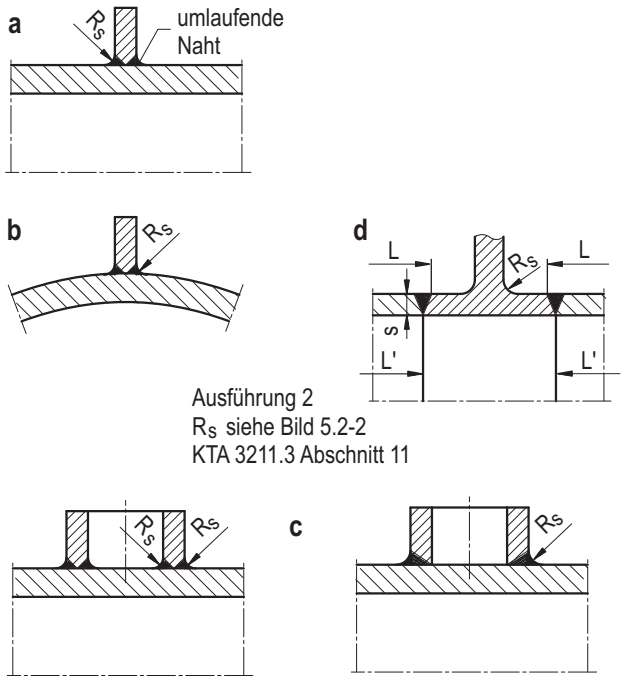
b) Für Rohrleitungen größer als oder gleich DN 250 und Nenndruck größer als oder gleich 4 MPa sowie Betriebstemperatur größer als 100 °C sind grundsätzlich geschmiedete Formteile zu verwenden (Ausführung d von **Bild 5.3-4**). In Abstimmung mit dem Sachverständigen darf für den genannten Anwendungsbereich die Ausführung c) **aus Bild 5.3-4** eingesetzt werden.

c) Die Prüfbarkeit der Anschweißnaht und der Komponente muss sichergestellt sein.



Wenn Anschrägungen außen und innen angebracht werden, muss die Summe der Winkel kleiner oder gleich 18° sein.

Bild 5.3-3: Ausführung von Rohrbögen



Zulässig bei Einhaltung der Voraussetzungen nach Abschnitt 5.2.2.2

Ausführung a, b und c: Wanddickenverhältnis Anschluss/Rohr ≤ 1,3:1

L , L´ : Prüflängen für die Ultraschallprüfung

Bild 5.3-4: Geschweißte Anschlüsse an Rohrwandungen für Festpunkte und Teilfestpunkte

5.3.6 Komponentenstützkonstruktionen

5.3.6.1 Allgemeines

(1) Die Stützkonstruktion der Komponenten können als Stützkonstruktionen mit integralen oder nichtintegralen Bereichen ausgeführt werden.

(2) Zum integralen Bereich einer Stützkonstruktion gehören die fest mit der Komponente verbundenen Teile (z. B. angeschweißt, angegossen, aus dem Vollen gearbeitet) mit Stützungsfunktion.

Zum nichtintegralen Bereich einer Stützkonstruktion gehören die mit der Komponente lösbar oder nicht verbundenen Teile (z. B. geschraubt, gestiftet, lose aufliegend) mit Stützungsfunktion, sowie diejenigen Teile mit Stützungsfunktion einer fest mit der Komponente verbundenen Stützkonstruktion außerhalb des Einflussbereiches (siehe Abschnitt 8.6).

Hinweis:

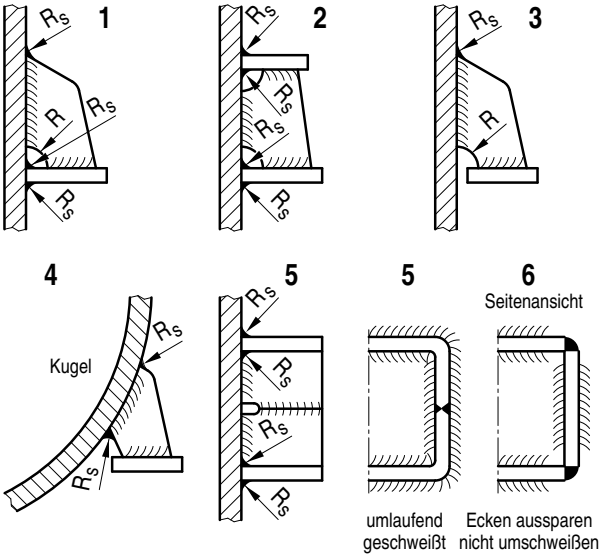
Nichtintegrale Bereiche einer Stützkonstruktion werden als Stahlbauteile eingestuft und fallen in den Anwendungsbereich der Regel KTA 3205.2 und im Falle von serienmäßig hergestellten Standardhalterungen (mit Eignungsprüfung) in den Anwendungsbereich der Regel KTA 3205.3.

(3) Für geschweißte integrale Stützkonstruktionen gelten die gleichen Anforderungen wie für die drucktragende Wand. Anschweißnähte an der drucktragenden Wand sind durchzuschweißen, sofern es sich nicht um Kehlnähte nach Abschnitt 5.2.2.2 (4) handelt.

5.3.6.2 Behälter

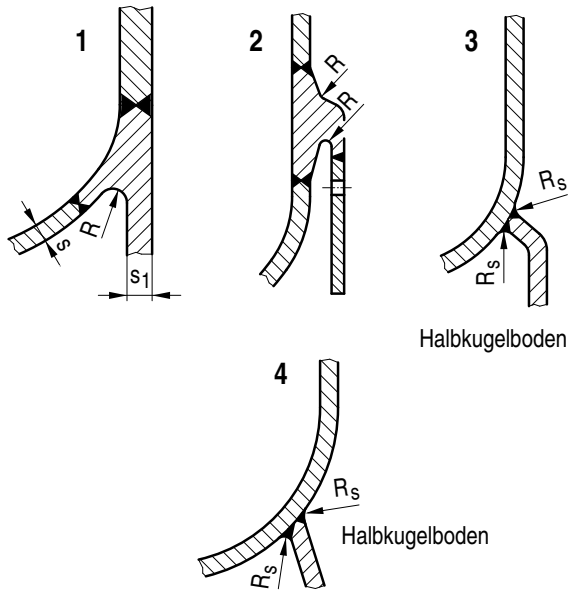
(1) Zulässige Ausführungsformen sind in den **Bildern 5.3-5** bis **5.3-7** dargestellt.

(2) Bei warmgehenden Komponenten sind unterschiedliche Wärmedehnungen von Komponenten und Stützkonstruktionen zu berücksichtigen.



Bei den Ausführungsformen 1 bis 4 werden zwei Stege je Unterstützungspratze angeordnet. Der Radius R_S ist gemäß Bild 5.2-2 festzulegen. Der Radius R ist im Hinblick auf einen günstigen Spannungsverlauf zu wählen. Die Ausführungsformen 1, 2, 3 und 4 sind nur für kleine Komponenten oder bei Betriebsdruck kleiner als oder gleich 4 MPa zu verwenden.

Bild 5.3-5: Beispiele für Komponentenstützkonstruktionen mit integralen Anschlüssen von stehend angeordneten Druckbehältern mit Auflagerpratzen



Die Radien R_S sind gemäß Bild 5.2-2 festzulegen.

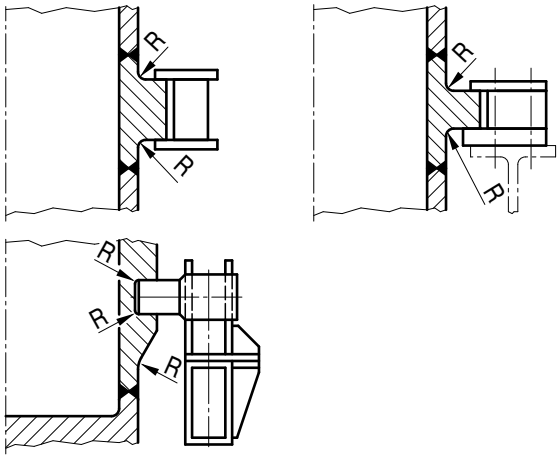
Bild 5.3-6: Beispiele für Komponentenstützkonstruktionen mit integralen Anschlüssen von stehend angeordneten Druckbehältern mit Standzarge

(3) Im Falle horizontaler Belastungen (z. B. Einwirkungen von außen) können bei stehend angeordneten Behältern zur Sicherstellung der Standsicherheit seitliche Abstützungen erforderlich werden. Diese Abstützungen können je nach Konstruktion auch Vertikalkräfte abtragen.

Beispiele:

a) Standzargen mit oder ohne umlaufenden Tragring (siehe **Bild 5.3-6**)
b) Schmiedering im Zylindermantel (siehe **Bild 5.3-7**).
c) Führungszapfen (siehe **Bild 5.3-7**)
d) Pratzen (siehe **Bild 5.3-5**).

(4) Bei den Komponenten müssen an geeigneten Stellen Montageösen oder Traghaken vorgesehen werden.

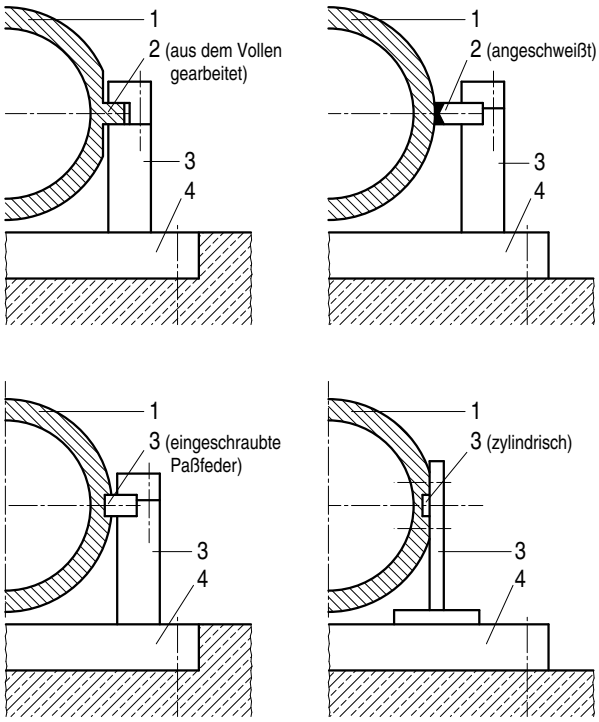


Es sind spannungstechnisch günstige Radien vorzusehen.

Bild 5.3-7: Beispiele für Komponentenstützkonstruktionen von stehenden Behältern mit Schmiederingen

5.3.6.3 Pumpen

Für geschweißte integrale Komponentenstützkonstruktionen gelten die gleichen Anforderungen wie für drucktragende Teile (durchgeschweißte Nähte, Prüfanforderungen). Beispiele von Komponentenstützkonstruktionen für Pumpen sind in **Bild 5.3-8** angegeben.

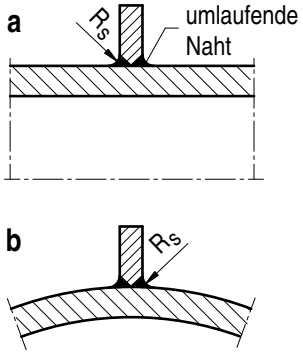


1 Gehäuse
2 Integrale Komponentenstützkonstruktion
3 Nichtintegrale Komponentenstützkonstruktion
4 Fundamentplatte einschließlich Ankerschrauben

Bild 5.3-8: Beispiele von Komponentenstützkonstruktionen für Pumpen

5.3.6.4 Armaturen

Für Abstützungen von Armaturen größer als oder gleich DN 250, Nenndrücken größer als oder gleich 4 MPa und Betriebstemperaturen größer als oder gleich 100 °C sind geschmiedete Formteile zu verwenden. In den anderen Fällen sind geschmiedete und geschweißte Anschlüsse zulässig. Beispiele für geschweißte Anschlüsse an Armaturen für Komponentenstützkonstruktionen sind in **Bild 5.3-9** angegeben.



Wanddickenverhältnis Anschluss/Rohr ≤ 1,3:1
R_S siehe Bild 5.2-2

Bild 5.3-9: Geschweißte Anschlüsse an Armaturen für Komponentenstützkonstruktionen

6 Dimensionierung

6.1 Allgemeines

(1) Die Dimensionierung ist unter Zugrundelegung der Auslegungsstufe (Stufe 0) gemäß Abschnitt 3.3.2 vorzunehmen.

Hinweis:
Anhang B enthält Festlegungen zu einer möglichen Nachweisführung bei der erneuten rechnerischen Bewertung einer Komponente.

(2) Die Dimensionierung ist mit einem der folgenden Verfahren vorzunehmen:

a) nach Anhang A,

b) als Primärspannungsnachweis, wobei die primären Spannungen unter Verwendung der im Abschnitt 7.7.3.4 festgelegten Primärspannungsgrenzen zu beschränken sind,

c) als Grenztragfähigkeitsnachweis, wobei zur Berechnung der unteren Grenztraglast als Wert für die Fließspannung $\sigma_F = 1{,}5 \cdot S_m$ bei Auslegungstemperatur zu verwenden ist und die spezifizierte Belastung 67 % des Wertes der unteren Grenztraglast gemäß Abschnitt 7.7.4.1 nicht überschreiten darf.

In Sonderfällen dürfen auch andere geeignete Verfahren angewendet werden, wenn mit analytischen und/oder experimentellen Untersuchungen gezeigt wird, dass unter Berücksichtigung eventueller Wechselwirkungen möglicher Schädigungsmechanismen die aus Abschnitt 7.7.3.4 ableitbaren Sicherheiten vorliegen. Dabei dürfen gemessene oder detailliert belegte Eingangsdaten (z. B. Wanddicken) zugrunde gelegt werden.

Die Dimensionierung von Bauteilen, für die in **Anhang A** zutreffende Berechnungsregeln enthalten sind, hat nach diesen Berechnungsregeln zu erfolgen.

(3) Darüber hinaus ist gegebenenfalls ein Stabilitätsnachweis zu führen (siehe Abschnitt 7.10).

6.2 Schweißnähte

(1) Durchgeschweißte Nähte

Da die Schweißnähte den Anforderungen nach KTA 3211.1 und KTA 3211.3 zu genügen haben, brauchen Schweißnähte in der Dimensionierung der Bauteile nicht gesondert berücksichtigt zu werden.

(2) Kehlnähte

Bei Anschweißnähten gemäß Abschnitt 5.2.2.2 (4) ist die verminderte Tragfähigkeit von Kehlnähten in der Dimensionierung der Bauteile zu berücksichtigen, z. B. gemäß KTA 3205.1. Hierbei sind die zulässigen Spannungen dem zutreffenden Teil der Tabelle 7-4 von KTA 3205.1 (laufende Nummern 7 bis 9) zu entnehmen. Die Beanspruchungsstufen sind dabei sinngemäß zuzuordnen (H = Stufen 0 und A; HZ = Stufen B und P; HS1 = C und HS2/HS3 = D). Die Spannungsermittlung orientiert sich am Abschnitt E3 von KTA 3205.1 mit den Einschränkungen nach Abschnitt 7.2.2 (3) von KTA 3205.1.

6.3 Plattierungen

(1) Bei der Bestimmung der erforderlichen Wanddicken und Querschnitte sind vorhandene Plattierungen als nicht tragend anzusehen.

(2) Bei der Berechnung gegen Innendruck ist der lichte Durchmesser des unplattierten Bauteils zu berücksichtigen.

(3) Formgebende Schweißungen, welche die Anforderungen nach KTA 3211.3 erfüllen, gelten nicht als Plattierung.

6.4 Zuschläge

(1) Bei der Ermittlung der Nennwanddicke sind die Fertigungstoleranzen durch einen entsprechenden Zuschlag c_1 zu berücksichtigen. Der Zuschlag c_1 ist gleich dem Absolutbetrag der Minustoleranz der Nennwanddicke gemäß der Abnahmespezifikation.

(2) Durch einen spezifizierten Zuschlag c_2 ist die Wanddickenminderung infolge chemischer oder mechanischer Abnutzung zu berücksichtigen. Dies gilt sowohl für die Minderung der Wanddicke wie für die Vergrößerung des lichten Durchmessers. Der Zuschlag c_2 darf entfallen, wenn keine Abnutzung erwartet wird oder wenn eine Plattierung vorhanden ist.

6.5 Wanddicken

(1) Unabhängig vom angewandten Verfahren zur Dimensionierung sind die folgenden Festlegungen einzuhalten:

Die Nennwanddicke s_n muss unter Berücksichtigung der Zuschläge c_1 und c_2 der Bedingung genügen:

$$s_n \geq s_0 + c_1 + c_2 \qquad (6.5\text{-}1)$$

Dabei ist s_0 die rechnerisch erforderliche Wanddicke.

Eine Nachrechnung ist mit der Wanddicke $s_{0n} = s_n - c_1 - c_2$ durchzuführen, siehe **Bild 7.1-1**.

Bei Ermittlung der Wanddicke über den Nennaußendurchmesser d_{an} ist in den Berechnungsformeln

$$d_a = d_{an} \qquad (6.5\text{-}2)$$

und bei Ermittlung der Wanddicke über den Nenninnendurchmesser d_{in}

$$d_i = d_{in} + 2 \cdot c_2 \qquad (6.5\text{-}3)$$

zu setzen.

(2) Rohrleitungen mit Nenndurchmesser größer als oder gleich DN 150 und druckführende Komponenten mit vergleichbaren Abmessungen sind bei Verwendung ferritischer Werkstoffe mit einer Wanddicke von größer als oder gleich 10 mm und bei Verwendung austenitischer Werkstoffe mit einer Wanddicke größer als oder gleich 5 mm auszuführen. Ausnahmen sind bei kaltgehenden Komponenten (Auslegungsdruck kleiner als oder gleich 2,5 MPa und Auslegungstemperatur kleiner als oder gleich 100 °C) zugelassen.

Nicht anzuwenden ist die Forderung hinsichtlich der Mindestwanddicken auf Kompensatoren und Wärmetauscherrohre.

6.6 Spannungsvergleichswerte

(1) Die Spannungsvergleichswerte sind für die Prüfgruppen A1, A2 und A3 (siehe Abschnitt 2) gemäß **Tabelle 6.6-1** unterschiedlich festgelegt.

(2) Der Spannungsvergleichswert für die Komponenten der Prüfgruppe A1 ist S_m. Der Spannungsvergleichswert für die Komponenten der Prüfgruppen A2 und A3 ist S.

(3) Der S_m-Wert und der S-Wert ergeben sich unter Zugrundelegung der Temperatur T des jeweiligen Bauteils und der Raumtemperatur RT. Als Temperatur T ist bei den Betriebsstufen die örtlich und zeitlich jeweils vorhandene Temperatur zu verwenden. Für die Auslegungsstufe (Stufe 0) ist dagegen die Auslegungstemperatur zu verwenden.

Werkstoff	Prüfgruppe A1	Prüfgruppe A2/A3
	Spannungsvergleichswerte	
	S_m	S
Ferrit	min. $\begin{cases} R_{mRT} / 3 \\ R_{mT} / 2{,}7 \\ R_{p0,2T} / 1{,}5 \end{cases}$	min. $\begin{cases} R_{mRT} / 4 \\ R_{p0,2T} / 1{,}6 \\ R_{p0,2RT} / 1{,}6 \end{cases}$
Austenit	min. $\begin{cases} R_{mRT} / 3 \\ R_{mT} / 2{,}7 \\ R_{p0,2RT} / 1{,}5 \\ R_{p0,2T} / 1{,}1 \\ R_{p0,2T} / 1{,}5^{1)} \end{cases}$	min. $\begin{cases} R_{mRT} / 4 \\ R_{p0,2T} / 1{,}1 \\ R_{p0,2RT} / 1{,}6 \\ R_{p0,2T} / 1{,}5^{1)} \end{cases}$
Stahlguss [2)]	min. $\begin{cases} R_{mRT} / 4 \\ R_{mT} / 3{,}6 \\ \text{Ferrit:} \\ R_{p0,2T} / 2 \\ \text{Austenit:} \\ R_{p0,2T} / 2^{1)} \end{cases}$	min. $\begin{cases} R_{mRT} / 4 \\ R_{mT} / 3{,}6 \\ \text{Ferrit:} \\ R_{p0,2T} / 2{,}5 \\ \text{Austenit:} \\ R_{p0,2T} / 2{,}5^{1)} \end{cases}$

Die ausgeführten Werkstoffkennwerte sind als Mindestwerte einzusetzen.

Hinweis:
Die Festigkeitskennwerte sind auf die Wanddicke bei der letzten Wärmebehandlung (Vergütung, Normalisierung oder Lösungsglühen) bezogen.

Fußnoten:

1) Dieses Kriterium gilt nur für die Dimensionierung.

Bei Austenit mit einem Verhältnis $R_{p0,2RT}/R_{mRT} \leq 0{,}5$ darf anstelle $R_{p0,2T}$ mit $R_{p1,0T}$ gerechnet werden, sofern für $R_{p1,0T}$ Gewährleistungswerte vorliegen.

2) Für Anschweißenden aus ferritischem Stahlguss (z. B. an Armaturengehäusen), die zusätzlich US geprüft werden, dürfen um 25 % höhere Spannungen zugrunde gelegt werden.

Tabelle 6.6-1: Bildung der Spannungsvergleichswerte für drucktragende Teile

6.7 Zulässige Spannungen für die Dimensionierung

(1) Die zulässigen Spannungen für die Dimensionierung drucktragender Wandungen sind in Abhängigkeit von Prüfgruppe, Beanspruchungsstufe und Spannungskategorie in **Tabelle 6.7-1** festgelegt.

(2) Die zulässigen Spannungen für die Dimensionierung drucktragender Schraubenverbindungen sind für alle Prüfgruppen in derselben Weise, jedoch abhängig von Beanspruchungsstufe und Belastungsart in **Tabelle 6.7-2** festgelegt.

Spannungskategorie		Beanspruchungsstufen	Prüfgruppe A1	Prüfgruppe A2, A3 [3)]
Primäre Spannungen	Allgemeine primäre Membranspannung P_m	0, A	S_m	S [1)]
		B	$1{,}1 \cdot S_m$	$1{,}1 \cdot S$
		Druckprüfung P	$0{,}9 \cdot R_{p0,2T}$	$0{,}9 \cdot R_{p0,2T}$
		C	Größter Wert von: [2)] $1{,}2 \cdot S_m$ und $R_{p0,2T}$	$1{,}5 \cdot S$
		D	Kleinster Wert von: $2{,}4 \cdot S_m$ und $0{,}7 \cdot R_{mT}$	$2{,}0 \cdot S$
	Allgemeine primäre Membranspannung und primäre Biegespannung P_m+P_b oder örtliche primäre Membranspannung und primäre Biegespannung P_l+P_b	0, A	$1{,}5 \cdot S_m$	$1{,}5 \cdot S$
		B	$1{,}65 \cdot S_m$	$1{,}65 \cdot S$
		Druckprüfung P	$1{,}35 \cdot R_{p0,2T}$	$1{,}35 \cdot R_{p0,2T}$
		C	Größter Wert von: [2)] $1{,}8 \cdot S_m$ und $1{,}5 \cdot R_{p0,2T}$	$1{,}8 \cdot S$
		D	Kleinster Wert von: $3{,}6 \cdot S_m$ und R_{mT}	$2{,}4 \cdot S$

Die aufgeführten Werkstoffkennwerte sind als Mindestwerte einzusetzen.

1) Die Festlegungen zur Begrenzung der Betriebsnennspannung gemäß **Tabelle 2-1** sind zu beachten.

2) Jedoch nicht mehr als 90 % des zulässigen Wertes der Stufe D.

3) Bei Austeniten ist sicherzustellen, dass die zulässigen Spannungen für die Prüfgruppe A 1 nicht überschritten werden.

Tabelle 6.7-1: Zulässige Spannungen für die Dimensionierung von drucktragenden Wandungen

6.8 Betriebsnennspannung

Die Betriebsnennspannung ist die allgemeine primäre Membranspannung (P_{mNB}) infolge Beanspruchung aus Innendruck im Normalbetrieb (Beanspruchungsstufe A) und ist in drucktragenden Schalen der Komponente nach folgenden Gleichungen zu bestimmen:

a) Zylindrische Grundschale:

$$P_{mNB} = p \cdot \left(\frac{d_i}{2 \cdot s_{0n}} + 0{,}5 \right) \qquad (6.8\text{-}1)$$

b) Kugelförmige Schale:

$$P_{mNB} = p \cdot \left(\frac{d_i^{\,2}}{4 \cdot (d_i + s_{0n}) \cdot s_{0n}} + 0{,}5 \right) \qquad (6.8\text{-}2)$$

Bezeichnungen in den Gleichungen (6.8-1) und (6.8-2):

d_i = Innendurchmesser der Schale

s_{0n} = Nennwanddicke der Schale abzüglich Zuschläge gemäß Abschnitt 6.5

p = Betriebsdruck der Betriebsstufe A

Um zu erreichen, dass auch in den Übergangsbereichen und den Störstellen ein niedriges Spannungsniveau herrscht, sind die Anforderungen an die konstruktive Gestaltung gemäß Abschnitt 5 zu beachten.

Lfd. Nr.	Schraubenbelastung [1]	Schraubenart	Zulässige Spannung σ_{zul}				
			Einbauzustand	Beanspruchungsstufe			
				0	A, B	P	C, D
1	Mittlere Zugspannung nur aus Innendruck $F_S = F_{RP} + F_F$	—	—	$\frac{1}{3}R_{p0,2T}$ [2]	—	—	—
2	Mittlere Zugspannung aus Innendruck, erforderlicher Dichtungskraft und äußeren Lasten $F_S = F_{RP} + F_F + F_{DB} + F_{RZ} + F_{RM}$	Dehnschraube	—	$\frac{1}{1,5}R_{p0,2T}$	$\frac{1}{1,5}R_{p0,2T}$	—	$\frac{1}{1,1}R_{p0,2T}$
		Starrschraube	—	$\frac{1}{1,8}R_{p0,2T}$ [3]	$\frac{1}{1,8}R_{p0,2T}$	—	$\frac{1}{1,3}R_{p0,2T}$
3	Mittlere Zugspannung im Prüfzustand F_{SP}	Dehnschraube	—	—	—	$\frac{1}{1,1}R_{p0,2T}$	—
		Starrschraube	—	—	—	$\frac{1}{1,3}R_{p0,2T}$	—
4	Mittlere Zugspannung im Einbauzustand [4] F_{S0}	Dehnschraube	$\frac{1}{1,1}R_{p0,2RT}$ [5]	—	—	—	—
		Starrschraube	$\frac{1}{1,3}R_{p0,2RT}$	—	—	—	—
5	Mittlere Zugspannung aus Innendruck, äußeren Lasten, Restdichtungskraft und ggf. unterschiedlicher Wärmedehnung [6] unter Berücksichtigung des Verspannungszustandes	—	—	—	$\frac{1}{1,1}R_{p0,2T}$ [7]	—	—
6	Gesamtspannung [8] (einschließlich Spannungsspitzen)	—	—	—	$2 \cdot S_a$ [9] $D \leq 1,0$	—	—

[1] Bedeutung der verwendeten Formelzeichen siehe Abschnitt A 2.9.1. Für F_{DB} ist die jeweils zutreffende Größe einzusetzen ($F_{DBU/L}$ bei Krafthauptschlussverbindungen und „$g_{KNS} \cdot F_{DKU}$“ bei Kraftnebenschlussverbindungen).

[2] Spannungsgrenze nur bei Flanschverbindungen mit Betriebsdruck > 2,5 MPa einzuhalten, die zusätzlich zum Innendruck durch höhere, äußere Kräfte und Momente belastet werden.

[3] Konstruktionszuschlag c gemäß Abschnitt A 2.9.4.3 ist zu berücksichtigen.

[4] Die vom Anzugsverfahren abhängige Streuung der Krafteinleitung in die Schrauben ist bei den Festigkeitsnachweisen zur sicheren Seite hin zu berücksichtigen (maximale Schraubenkraft).

[5] Zusätzlich ist für den Montagevorgang, soweit dieser mit einem Drehmomentenschlüssel erfolgt, die Vergleichsspannung mit $R_{p0,2RT}$ zu begrenzen. Die rechnerische Torsionsspannung darf mit dem polaren Widerstandsmoment $W_p = (\pi/12) \cdot d_0^3$ (mit d_0 als Dehnschaftdurchmesser) ermittelt werden.

[6] Berücksichtigung unterschiedlicher Wärmedehnung bei einer Auslegungstemperatur > 120 °C. Die Temperaturbegrenzung gilt nicht für die Werkstoffpaarung Austenit/Ferrit in Flansch und Schrauben.

[7] Bei Auftreten von Biegespannungen ist die Summe aus mittlerer Zugspannung und Biegespannung (abhängig von Innendruck, Vorspannung, Temperatureinfluss und Zusatzlasten) mit $R_{p0,2T}$ zu begrenzen.

[8] Aus Verformungsanalyse zu ermitteln (z. B. Verspannungsschaubild), zur Ermüdungsanalyse siehe auch Abschnitt 7.11.2 (2).

[9] Die Begrenzung der Spannungsamplitude S_a und des Erschöpfungsgrades D erfolgt nach Abschnitt 7.8.

Tabelle 6.7-2: Zulässige Spannungen σ_{zul} für drucktragende Schraubenverbindungen der Prüfgruppen A1, A2 und A3

7 Allgemeine Analyse des mechanischen Verhaltens

7.1 Allgemeines

7.1.1 Zielsetzung

(1) Mit der Analyse des mechanischen Verhaltens muss nachgewiesen werden, dass die Komponenten allen Belastungen gemäß den in Abschnitt 3.3 aufgeführten Beanspruchungsstufen standhalten.

(2) Der Umfang der Nachweisführung ist abhängig von der Prüfgruppe. In Abschnitt 2 insbesondere Absatz 10 und 11 sind entsprechende Angaben enthalten.

(3) Im Rahmen der Analyse des mechanischen Verhaltens sind die Beanspruchungen und erforderlichenfalls die Kraftgrößen und die Verformungen der zu untersuchenden Komponente infolge von Belastungen unter Einhaltung der Randbedingungen und unter Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung ihrer Nachbarkomponente und einzelnen Bauteile gemäß Abschnitt 7.6, gegebenenfalls unter Verwendung der Anhänge C und D von KTA 3201.2, zu ermitteln. Diese Ermittlung darf rechnerisch oder experimentell oder in Kombination rechnerisch und experimentell erfolgen.

(4) Die so ermittelten Beanspruchungen und Verformungen sind hinsichtlich ihrer Zulässigkeit gemäß den Abschnitten 7.7 bis 7.12 zu überprüfen.

(5) Hierbei ist zu beachten, dass die Genauigkeit der ermittelten Größen von der Güte der geometrischen Idealisierung der Komponente oder des Bauteils, von der Genauigkeit der Annahme der Belastungen, Randbedingungen und Werkstoffeigenschaften sowie von den Eigenschaften des gewählten Berechnungsverfahrens und der Art seiner Durchführung abhängt.

(6) Die Analyse des mechanischen Verhaltens kann alternativ mit Berechnungsformeln durchgeführt werden, wenn bei hinreichend genauer und vollständiger Erfassung der Belastungsvorgaben und der geometrischen Gegebenheiten die Nachweisziele des Abschnittes 7 erreicht werden. Gegebenenfalls reichen hierzu die Auslegungsformeln für die Dimensionierung aus.

7.1.2 Schweißnähte

(1) Da die Schweißnähte den Anforderungen nach KTA 3211.1 und KTA 3211.3 zu genügen haben, braucht der Einfluss der Schweißnähte bei der Festlegung der zulässigen Spannungen nicht besonders berücksichtigt zu werden.

(2) Im Rahmen von Ermüdungsanalysen sind die hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit reduzierenden Einflüsse von Schweißnähten in Abhängigkeit von der Schweißnahtbearbeitung zu berücksichtigen.

Hinweis:
Spannungsbeiwerte hinsichtlich Ermüdung (K-Werte) sind in **Tabelle 8.5-1** enthalten.

7.1.3 Plattierungen

(1) Bei der Bestimmung der erforderlichen Wanddicken und Querschnitte sind vorhandene Plattierungen als nicht tragend anzusehen. Auftragsschweißungen auf das Grundmaterial mit gleichwertigen Werkstoffen gelten nicht als Plattierungen.

(2) Bei der thermischen Analyse darf die Plattierung berücksichtigt werden. Beträgt die Plattierung mehr als 10 % der Wanddicke, muss sie bei der Analyse des mechanischen Verhaltens berücksichtigt werden. Die Spannungskategorisierung und -bewertung ist getrennt für den Grundwerkstoff und die Plattierung durchzuführen.

7.1.4 Wanddicke für die Analyse des mechanischen Verhaltens

(1) Für die Analyse des mechanischen Verhaltens eines Bauteils ist die mittlere auszuführende (oder mittlere ausgeführte) Wanddicke als s_c unter Abzug des Abnutzungszuschlags c_2 gemäß Abschnitt 6.4 einzusetzen:

$$s_c = s_n + \frac{c_3 - c_1}{2} - c_2 \qquad (7.1\text{-}1)$$

Hierbei ist s_n definiert in Gleichung (6.5-1). c_3 ist gleich der Plustoleranz. c_1 ist gleich dem Absolutbetrag der Minustoleranz gemäß Abschnitt 6.4, siehe auch **Bild 7.1-1**.

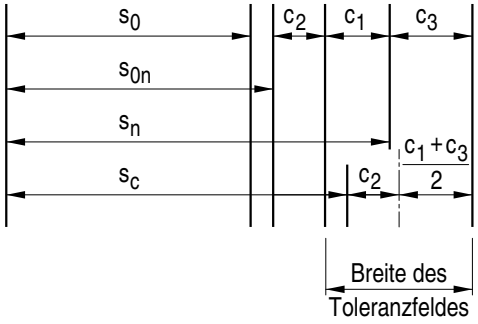


Bild 7.1-1: Wanddicken

Die Berechnungswanddicke s_c nach Gleichung (7.1-1) ist so festgelegt, dass sie in der Mitte des Toleranzfeldes abzüglich des Abnutzungszuschlags c_2 liegt.

(2) Bei entsprechender Begründung, z. B. aufgrund eines unsymmetrischen Toleranzfeldes oder bei Schmiedestücken darf auch eine andere Wanddicke als s_c gewählt werden, wenn diese die erforderliche Wanddicke ($s_0 + c_2$) nicht unterschreitet.

(3) Betragen die Wanddickentoleranzen c_1 und c_3 jeweils nicht mehr als 2 % der Nennwanddicke s_n, so brauchen sie für die Festlegung von s_c nicht berücksichtigt werden.

7.1.5 Maß- und Formabweichungen

7.1.5.1 Allgemeines

(1) Die Beschränkung von Maß- und Formabweichungen aus fertigungs- und prüftechnischen Gründen ist in KTA 3211.3 Abschnitt 9 geregelt. Im Rahmen der Analyse des mechanischen Verhaltens können Maß- und Formabweichungen mit den in KTA 3211.3 Abschnitt 9 angegebenen Werten vernachlässigt werden, sofern in den nachfolgenden Abschnitten dieser Regel keine anderslautenden Festlegungen getroffen sind.

(2) Alle Angaben beziehen sich auf den ungestörten Membranbereich schalenförmiger Bauteile.

7.1.5.2 Zylindrische Bauteile

7.1.5.2.1 Wanddickenabweichungen

(1) Abweichungen der vorhandenen Wanddicke abzüglich des Zuschlags c_2 von der der Berechnung zugrunde gelegten Wanddicke s_c brauchen nicht gesondert in der Analyse des mechanischen Verhaltens berücksichtigt zu werden, wenn sie unterhalb von ± 5 % von s_c liegen.

(2) Bei Rohrleitungen ist eine Abweichung der vorhandenen Wanddicke abzüglich des Zuschlags c_2 von der der Berechnung zugrunde gelegten Wanddicke s_c nur dann zu berücksichtigen, wenn diese Abweichung außerhalb des Toleranzfeldes gemäß Komponentenspezifikation oder vergleichbarer Unterlagen liegt.

(3) Für dünnwandige ($s_c \leq 5$ mm) und mehrlagige Komponenten, deren Wanddicke neben den Festigkeitsanforderungen weiteren Bedingungen genügen muss (z. B. Wärmetauscherrohre, Kompensatorbälge), sind die der Analyse des mechanischen Verhaltens zugrunde zu legenden Werte im Einzelfall festzulegen. Dies gilt auch für Wanddickentoleranzen in geometrisch gestörten Bereichen (z. B. Durchdringungsbereich eines T-Stücks).

7.1.5.2.2 Unrundheiten

(1) Innendruck

Ovalitäten und Abflachungen mit flachem Verlauf in Längsrichtung dürfen bis zu einem Innendurchmesser von $d_i = 1000$ mm keine Abweichung vom Innendurchmesser größer als oder gleich 1 % ergeben. Oberhalb eines Innendurchmessers von 1000 mm darf der Wert $(d_i + 1000)/(2 \cdot d_i)$ [%] nicht überschritten werden.

Dabei ist die Unrundheit folgendermaßen zu bestimmen:

a) Ovalität

$$U = 2 \cdot \frac{d_{i,max} - d_{i,min}}{d_{i,max} + d_{i,min}} \cdot 100\,[\%] \qquad (7.1\text{-}2)$$

b) Abflachungen

$$U = 4 \cdot \frac{q}{d_i} \cdot 100\,[\%] \qquad (7.1\text{-}3)$$

Hierbei ist q im **Bild 7.1-2** dargestellt.

(2) Außendruck

Die zulässigen Unrundheiten können KTA 3211.3 Abschnitt 9.3.4.2 entnommen werden. Bei Überschreitung dieser Werte ist ein gesonderter Stabilitätsnachweis zu führen.

(3) Für Rohre sind folgende Unrundheiten zulässig:

für Innendruck: 2 %

für Außendruck: 1 %

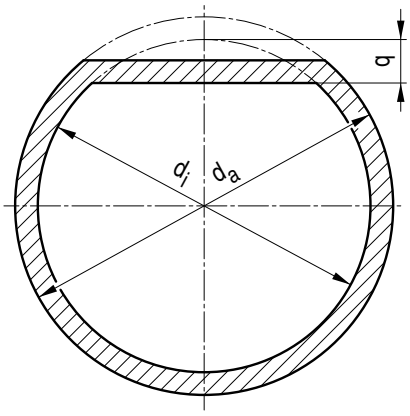


Bild 7.1-2: Abflachung q

7.1.5.3 Kugeln

7.1.5.3.1 Wanddickenabweichungen

Es gelten die Angaben des Abschnitts 7.1.5.2.1.

7.1.5.3.2 Unrundheiten

(1) Innendruck

Ovalitäten und Abflachungen sollen keine Abweichung vom Innendurchmesser ergeben, die größer ist als die beiden Werte

$(d_i + 1000)/(2 \cdot d_i)$ [%] und $(d_i + 300)/(d_i)$ [%].

Die zulässigen Werte können auch **Bild 7.1-3** entnommen werden.

Die Bestimmung der Unrundheiten muss gemäß Abschnitt 7.1.5.2.2 (1) erfolgen.

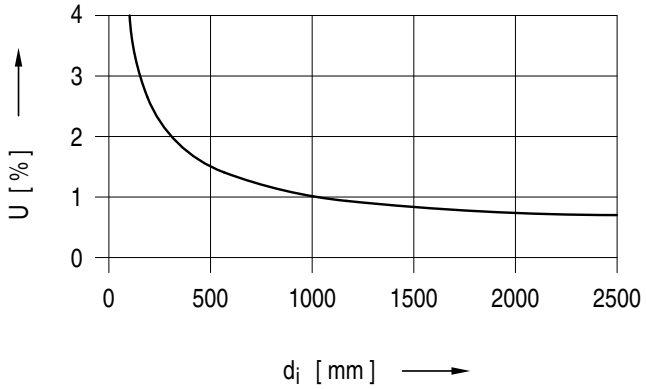


Bild 7.1-3: Unrundheiten

(2) Außendruck

Es dürfen die Kriterien des Abschnitts 7.1.5.2.2 (2) angewendet werden.

7.1.5.4 Kegel

Kegel sind ebenso wie zylindrische Bauteile zu behandeln. Der Bezug für die Unrundheit sind Kreisquerschnitte senkrecht zur Symmetrieachse.

7.1.5.5 Rohrbogen und Rohrbiegungen

(1) Für die Unrundheiten im mittleren Bereich des Rohrbogens der Rohrbiegung gilt:

$$U = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_0} \cdot 100\ [\%] \qquad (7.1\text{-}4)$$

wobei

d_{max} = maximaler Durchmesser

d_{min} = minimaler Durchmesser

d_0 = Durchmesser vor dem Biegen

Für Innendruck soll U 5 % nicht überschreiten.

(2) Für Außendruck gelten die Kriterien des Abschnitts 7.1.5.2.2 (2).

7.1.6 Kantenversätze beim Schweißen

Die Beschränkung von Kantenversätzen aus fertigungs- und prüftechnischen Gründen ist in KTA 3211.3 Abschnitt 5.7.1.2 geregelt. Im Rahmen der Analyse des mechanischen Verhaltens können Kantenversätze mit den in KTA 3211.3 angegebenen Werten vernachlässigt werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass die rechnerisch erforderliche Wanddicke im Nahtbereich eingehalten wird.

Die Regelungen in Abschnitt 8.5 bleiben hiervon unberührt.

7.2 Belastungen

(1) Als Belastungen sind alle Einwirkungen auf die Komponente oder das Bauteil anzunehmen, die Beanspruchungen in diesen hervorrufen.

(2) Die Belastungen resultieren aus den Lastfällen gemäß Abschnitt 3 und sind im Abschnitt 4 erläutert.

(3) Für alle statischen und dynamischen Belastungen eines Lastfalles sind die Schnittlasten vektoriell zu addieren. In den Fällen, in denen dies nicht möglich ist, sind die dynamischen Anteile komponentenweise nach der SRSS-Methode (Wurzel aus der Summe der Quadrate) zu bilden und den statischen Anteilen in positiver und negativer Richtung zu überlagern.

7.3 Beanspruchungen

(1) Die Beanspruchungen bestehen in Spannungen oder Verzerrungen oder in der Kombination von Spannungen und Verzerrungen. Ihre Bewertung erfolgt als Vergleichsspannung oder Vergleichsdehnung. Im Falle eines linear-elastischen Zusammenhangs sind Spannungen und Verzerrungen zueinander proportional. Bei der Spannungs- und Ermüdungsanalyse gemäß den Abschnitten 7.7 und 7.8 ist dieser proportionale Zusammenhang grundsätzlich auch oberhalb der Streckgrenze oder Dehngrenze des Werkstoffs zugrunde zu legen (fiktive Spannungen).

Im Falle elastisch-plastischer Analysen nach den Abschnitten 7.7.4, 7.8.1, 7.8.4 oder 7.12 ist das in diesen Abschnitten beschriebene Vorgehen zugrunde zu legen.

(2) Die Beanspruchungen treten entweder als (vorwiegend) ruhende Beanspruchungen, als Wechselbeanspruchungen oder dynamische Beanspruchungen auf. Schwellende Beanspruchung ist als Sonderfall der Wechselbeanspruchung anzusehen.

(3) Die Begrenzung (vorwiegend) ruhender Beanspruchungen hat im Rahmen der Spannungsanalyse gemäß Abschnitt 7.7 zu erfolgen. Die Begrenzung wechselnder Beanspruchungen muss zusätzlich im Rahmen der Ermüdungsanalyse gemäß Abschnitt 7.8 vorgenommen werden.

7.4 Resultierende Verformungen

(1) Unter resultierenden Verformungen sind die Integrale der Verzerrungen zu verstehen. Sie stellen die Änderungen der Geometrie der Komponente, des Bauteils oder der idealisierten Struktur infolge von Belastungen dar.

(2) Die resultierenden Verformungen können durch Verschiebungen und daraus abgeleitete Größen (z. B. Verdrehun-

gen) beschrieben werden. Sie müssen gegebenenfalls beschränkt werden, damit die Funktionsfähigkeit der Komponente und ihrer Nachbarkomponenten nicht beeinträchtigt wird.

7.5 Ermittlung, Bewertung und Begrenzung mechanischer Größen

(1) Die im Abschnitt 7.1.1 genannten mechanischen Größen sind rechnerisch nach den im Anhang C von KTA 3201.2 aufgeführten Methoden oder experimentell oder in Kombination rechnerisch und experimentell zu ermitteln.

(2) Bei vergleichbarer physikalischer Aufgabenstellung, Eignung der Verfahren und Einhaltung der zugehörigen Bedingungen dürfen die nach unterschiedlichen Verfahren ermittelten Ergebnisse als gleichwertig angesehen werden.

(3) In Abschnitt 8 sind alternative Anforderungen enthalten, die vollständig oder teilweise die hier festgelegten Anforderungen im Rahmen des Gültigkeitsbereichs des Abschnitts 8 ersetzen.

(4) Die so ermittelten mechanischen Größen sind im Hinblick auf die Vermeidung des zähen Bruchs und des Ermüdungsbruchs sowie unzulässige Verformungen und Instabilität zu bewerten und zu begrenzen.

7.6 Mechanische Systemanalyse

7.6.1 Allgemeines

(1) Aus den äußeren Belastungen (z. B. Kräften, Momenten, Verschiebungen, Temperaturverteilungen) müssen für die gewünschten Stellen im zu untersuchenden System die Schnittgrößen (z. B. Schnittkräfte, Schnittmomente und Verschiebungen) in der Komponente oder an den Schnittstellen zwischen Komponente und Nachbarkomponente ermittelt werden.

(2) Äußere systemunabhängige Belastungen, die das Verhalten des Systems nicht ändern (z. B. radiale Temperaturverteilung und gegebenenfalls Innendruck) brauchen nur bei der Ermittlung und Bewertung der Spannungen berücksichtigt zu werden.

7.6.2 Modellabbildung

7.6.2.1 Allgemeines

Durch die Modellabbildung muss das System in ein idealisiertes Modell mit den Eigenschaften gemäß den Abschnitten 7.6.2.2 bis 7.6.2.5 überführt werden. Darüber hinaus sind die Anforderungen an die jeweilige Berechnungsmethode und ihre zugehörige Modellabbildung gemäß Anhang C von KTA 3201.2 zu erfüllen.

7.6.2.2 System-Geometrie

In der System-Geometrie sind die Komponenten und Bauteile, die das Verhalten der zu untersuchenden Struktur wesentlich beeinflussen, zu erfassen. Die Geometrie einer Rohrleitung darf mittels gerader und gekrümmter Stäbe als Stabzug dargestellt werden, der dem Verlauf der Rohrachse entspricht.

7.6.2.3 Steifigkeiten

(1) Rohrleitungsteile

Die Rohrleitungsteile sollen bei der Analyse des mechanischen Verhaltens der Struktur mit den Steifigkeiten entsprechend ihrer Geometrie (mittlere Abmessungen einschließlich Plattierung) behandelt werden.

Hinweis:
Im Falle symmetrischer Toleranzen sind dies die Nennabmessungen.

(2) Kleinkomponenten

Kleinkomponenten sind Bestandteile der Rohrleitungen (z. B. Armaturen, Sammlertrommeln, Verteilerstücke, Abzweigstücke und Sonderbauteile). Falls diese Teile von geringem Einfluss auf die Steifigkeit der Gesamtstruktur sind, dürfen sie durch entsprechende Grenzsteifigkeiten ersetzt werden (z. B. Armaturen: starr; Isolierung: ohne Steifigkeitseinfluss).

(3) Kompensatoren

Die Steifigkeit der Kompensatoren ist zu berücksichtigen.

(4) Großkomponenten

Der Einfluss von Großkomponenten (z. B. Behälter) ist durch geeignete Modellabbildung unter Berücksichtigung der Steifigkeit zu erfassen.

(5) Komponenten-Stützkonstruktionen und Gebäude

Der Einfluss der Komponenten-Stützkonstruktionen und des Gebäudes (Überstrukturen) ist zu berücksichtigen.

7.6.2.4 Massenverteilung

(1) Die Massen im System setzen sich aus den Massen der Komponenten jeder ihrer Bauteile, der Füllung, der Isolation sowie anderen Zusatzmassen zusammen.

(2) Ein System mit kontinuierlicher Massenverteilung darf auch als ein System mit diskreten Massen behandelt werden.

(3) Die Massenverteilung muss den nötigen Anforderungen an die Schnittkraftverteilung und an die Schwingungsformen gerecht werden.

(4) Bei wesentlicher Exzentrizität müssen auch die Drehträgheiten (Massenträgheitsmomente) für die rotatorischen Freiheitsgrade berücksichtigt werden.

7.6.2.5 Randbedingungen

Als Randbedingungen sind Kraftgrößen und Verschiebungsgrößen entsprechend ihrer Wirkung im betrachteten Lastfall zu berücksichtigen.

7.6.2.6 Entkopplung von Teilsystemen

(1) Statische Entkopplungsbedingungen

Teilsysteme dürfen entkoppelt werden, wenn an der Koppelstelle entsprechende Entkopplungsbedingungen eingehalten werden:

a) das Verhältnis der Flächenträgheitsmomente ist kleiner als oder gleich 0,01,

b) das Verhältnis derjenigen Elemente der Steifigkeitsmatrizen, die für die betrachteten Verformungen maßgebend sind, ist hinreichend klein,

(2) Dynamische Entkopplungsbedingungen

Bei dynamischen Belastungen dürfen Strukturen unterteilt werden, falls die Wechselwirkung zwischen den Teilstrukturen berücksichtigt wird oder das Schwingungsverhalten nicht unzulässig verändert wird.

7.6.3 Rechenverfahren

(1) Die zum Einsatz kommenden Rechenverfahren hängen sowohl vom gewählten mathematischen Ansatz als auch von der zu untersuchenden Belastung (statisch oder dynamisch) ab. Bei der Behandlung dynamischer Lastfälle dürfen folgende Verfahren eingesetzt werden:

a) statisches Ersatzlastverfahren,

b) Antwortspektrummethode,

c) Zeitverlaufmethode.

(2) Speziell für die Erdbebenlastfälle sind die Festlegungen in KTA 2201.4 zu beachten.

7.7 Spannungsanalyse

7.7.1 Allgemeines

(1) Durch eine Spannungsanalyse mit Spannungskategorisierung und Spannungsbegrenzung ist in Verbindung mit den geforderten Werkstoffeigenschaften nachzuweisen, dass keine unzulässigen Verzerrungen, insbesondere nur begrenzte plastische Verformungen auftreten.

(2) Die Spannungsanalyse für Schrauben ist gemäß Abschnitt 7.11.2 durchzuführen.

7.7.2 Spannungskategorien

7.7.2.1 Allgemeines

(1) Die Spannungen sind in Abhängigkeit von der erzeugenden Ursache und ihrer Auswirkung auf das Festigkeitsverhalten des Bauteils Spannungskategorien zuzuordnen, das heißt in primäre Spannungen, sekundäre Spannungen und Spannungsspitzen einzuteilen und gemäß ihrer Zuordnung in unterschiedlicher Weise zu begrenzen.

(2) Erscheint in Grenzfällen die Zuordnung zu einer der genannten Spannungskategorien nicht eindeutig, ist die Auswirkung einer plastischen Verformung auf das Festigkeitsverhalten im Falle einer angenommenen Überschreitung der vorgesehenen Belastung als maßgebend anzusehen.

Hinweis:
Die im folgenden verwendeten Definitionen und sprachlichen Bezeichnungen entstammen der Theorie der Flächentragwerke (Schalen, Platten, Scheiben u.a.) und sind sinngemäß auch auf andere Tragwerke und Bauteile (Stäbe, als Stäbe betrachtete Rohre, Balken, Schrauben, Formstücke, Stülpringe u.a.) anzuwenden. Bei den nachfolgend genannten Spannungen ist zwischen den einzelnen Komponenten des Spannungstensors zu unterscheiden.

7.7.2.2 Primäre Spannungen

(1) Primäre Spannungen P sind solche Spannungen, die das Gleichgewicht mit äußeren Kraftgrößen (Lastgrößen) herstellen.

(2) Hinsichtlich des Festigkeitsverhaltens ist ihr wesentliches Merkmal, dass bei einer (unzulässig großen) Steigerung der äußeren Lasten die Verformungen nach vollständiger Plastifizierung des Querschnitts wesentlich zunehmen, ohne sich hierbei selbst zu begrenzen.

(3) Die primären Spannungen sind gesondert nach ihrer Verteilung über dem für das Tragverhalten zugrunde zu legenden Querschnitt als Membranspannung (P_m, P_l) und als Biegespannung (P_b) zu unterscheiden. Hierbei sind die Membranspannungen definiert als Mittelwert der jeweiligen Spannungskomponente über dem für das Tragverhalten zugrunde zu legenden Querschnitt, bei Flächentragwerken jeweils als Mittelwert der Spannungskomponente über der Wanddicke. Die Biegespannungen sind definiert als die über dem betrachteten Querschnitt proportional zum Abstand von der neutralen Achse linear veränderlichen Spannungen, bei Flächentragwerken als der linear veränderliche Anteil der über der Wanddicke verteilten Spannungen.

(4) Hinsichtlich der Verteilung der Membranspannung entlang der Wand sind allgemeine primäre Membranspannungen (P_m) und örtliche primäre Membranspannungen (P_l) zu unterscheiden. Während allgemeine primäre Membranspannungen so verteilt sind, dass als Folge einer Plastifizierung keine wesentliche Spannungsumlagerung zu benachbarten Bereichen hin stattfinden würde, ist im Falle von örtlichen primären Membranspannungen an Störstellen bei einer Plastifizierung eine Spannungsumlagerung möglich. Obwohl die Spannungen daher teilweise den Charakter einer Sekundärspannung haben, werden sie konservativ als örtliche primäre Membranspannungen definiert.

An Störstellen darf eine primäre Membranspannung als örtliche primäre Membranspannung eingestuft werden, wenn die Ausdehnung in meridionaler Richtung mit einer Membranspannung größer dem 1,1fachen der zulässigen allgemeinen Membranspannung nicht größer ist als $1 \cdot \sqrt{R \cdot s_c}$.

Hierbei ist R der kleinste Hauptkrümmungsradius, gemessen bis zur Mitte der Wanddicke, und s_c die kleinste Wanddicke im betrachteten Bereich.

Zwei benachbarte Bereiche mit örtlichen Erhöhungen der primären Membranspannung größer als $1{,}1 \cdot S_m$ und axialsymmetrischer Spannungsverteilung müssen in meridionaler Richtung mindestens den Abstand $2{,}5 \cdot \sqrt{R \cdot s_c}$ haben. Hierbei gilt $R = (R_1 + R_2)/2$ und $s_c = (s_{c,1} + s_{c,2})/2$ wobei für die Radien R_i und die Wanddicken $s_{c,\,i}$ der beiden Bereiche 1 und 2 die jeweils örtlich vorhandenen Werte entsprechend der Definition der örtlichen primären Membranspannung heranzuziehen sind.

Weiterhin sind einzelne Bereiche mit örtlichen primären Membranspannungen, hervorgerufen durch konzentrierte Belastungen (z. B. im Bereich von Auflagerpratzen), so anzuordnen, dass es zu keinen Überlappungen von Bereichen kommt, in denen das 1,1fache der zulässigen allgemeinen Membranspannung überschritten wird.

Für Bauteile, auf die die obigen Bedingungen nicht angewendet werden können, oder die die obigen Bedingungen nicht einhalten, darf der örtliche Charakter von Membranspannungen auch mit dem Traglastverfahren oder einer Grenztragfähigkeitsanalyse nach Abschnitt 7.7.4 nachgewiesen werden.

7.7.2.3 Sekundäre Spannungen

(1) Sekundäre Spannungen (Q) sind solche Spannungen, die durch Zwängungen infolge geometrischer Unstetigkeiten oder bei Verwendung von Werkstoffen mit unterschiedlichen Elastizitätsmoduln unter äußeren Belastungen entstehen oder die sich durch Zwängungen infolge unterschiedlicher Wärmedehnungen ergeben. Nur Spannungen aus dem linearisierten Verlauf der Spannungsverteilung werden zu den sekundären Spannungen gezählt.

(2) Hinsichtlich des Festigkeitsverhaltens ist ihr wesentliches Merkmal, dass sie im Falle des Überschreitens der Fließgrenze beim Ausgleich der Verformungsdifferenzen plastische Verformungen bewirken, die sich selbst begrenzen.

(3) Spannungen in Rohrleitungen, die aufgrund von Dehnungsbehinderungen im System oder allgemein infolge der Erfüllung kinematischer Randbedingungen entstehen, werden mit P_e bezeichnet. Unter ungünstigen Bedingungen können sich in relativ langen Rohrleitungen Stellen mit großen Verformungen ergeben. Die sie verursachenden Zwängungen wirken dann wie äußere Lasten. Zusätzlich ist für diese Stellen nachzuweisen, dass die plastischen Dehnungen örtlich begrenzt bleiben.

7.7.2.4 Spannungsspitzen

(1) Spannungsspitzen (F) sind solche Spannungen, die der Summe der betreffenden primären und sekundären Spannungen überlagert sind. Sie haben keine merklichen Verformungen zur Folge und sind in Verbindung mit primären und sekundären Spannungen für die Ermüdung von Bedeutung.

(2) Zu den Spannungsspitzen zählen auch die Abweichungen von Nennspannungen in nichtrohrförmig verstärkten Lochrändern infolge Druck und Temperatur, wobei die Nennspannungen aus Gleichgewichtsbetrachtungen abzuleiten sind.

7.7.3 Spannungsüberlagerung und Spannungsbeurteilung

7.7.3.1 Allgemeines

(1) Für jeden Lastfall sind, wie im Folgenden dargelegt, die gleichzeitig wirkenden gleichgerichteten Spannungen für jede

Spannungskategorie gesondert oder für verschiedene Spannungskategorien (z. B. primäre und sekundäre Spannungen) gemeinsam zu addieren.

(2) Die Zuordnung von Spannungen zu Belastungen in Behältern und Rohrleitungen in Abhängigkeit vom Bauteil und Ort der Beanspruchungen geben die **Tabellen 7.7-1** bis **7.7-3** wieder.

(3) Aus diesen Spannungssummen ist für die primären Spannungen die Vergleichsspannung, für die Summe aus primären und sekundären Spannungen oder für die Summe aus primären Spannungen, sekundären Spannungen und Spannungsspitzen jeweils die Vergleichsspannungsschwingbreite zu bilden.

(4) In den Abschnitten 7.7.3.2 und 7.7.3.3 ist der Bildung der Vergleichsspannungen und der Vergleichsspannungsschwingbreiten die Festigkeitshypothese nach von Mises oder diejenige nach Tresca zugrunde zu legen.

7.7.3.2 Vergleichsspannungen

(1) Nach Festlegung eines kartesischen Koordinatensystems sind die Summen aller gleichzeitig wirkenden Normal- und Schubspannungen der jeweiligen Achsenrichtung für

a) die allgemeinen primären Membranspannungen oder

b) die örtlichen primären Membranspannungen und

c) die Summe aus primären Biegespannungen und entweder den allgemeinen oder den örtlichen primären Membranspannungen

gesondert zu bilden.

(2) Aus den überlagerten Spannungskomponenten ist die Vergleichsspannung nach von Mises unmittelbar zu berechnen

$$\sigma_{V,v.Mises}=\sqrt{\sigma_x^2+\sigma_y^2+\sigma_z^2-\left(\sigma_x\cdot\sigma_y+\sigma_x\cdot\sigma_z+\sigma_y\cdot\sigma_z\right)+3\cdot\left(\tau_{xy}^2+\tau_{xz}^2+\tau_{yz}^2\right)} \quad (7.7\text{-}1)$$

(3) Zur Bildung der Vergleichsspannung nach Tresca sind für jeden der drei Fälle (1) a) bis c) unter Berücksichtigung der jeweiligen primären Schubspannungen die Hauptspannungen zu ermitteln, es sei denn, die primären Schubspannungen verschwinden oder sind vernachlässigbar klein, so dass die vorhandenen Normalspannungen bereits die Hauptspannungen darstellen. Die Vergleichsspannung ist dann jeweils gleich der Differenz aus der größten und der kleinsten Hauptspannung.

$$\sigma_{V,Tresca} = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (7.7\text{-}2)$$

(4) Für die drei Fälle (1) a) bis c) erhält man so die Vergleichsspannung aus P_m, P_l und $P_m + P_b$ oder $P_l + P_b$.

7.7.3.3 Vergleichsspannungsschwingbreiten

(1) Zur Vermeidung des Versagens infolge

a) fortschreitender Deformation,

b) Ermüdung

sind die zu den jeweiligen Spannungskategorien gehörigen Vergleichsspannungsschwingbreiten zu ermitteln und entsprechend Abschnitt 7.7.3.4 zu begrenzen.

(2) Im Fall a) sind die benötigten Spannungstensoren aus den gleichzeitig wirkenden Spannungen der primären und sekundären Spannungskategorien zu bilden, im Fall b) aus den gleichzeitig wirkenden Spannungen aller Spannungskategorien.

(3) Aus der Menge der zu betrachtenden Beanspruchungszustände sind unter Verwendung eines festen Koordinatensystems zwei Beanspruchungszustände so auszuwählen, dass die aus der Differenz der zugehörigen Spannungstensoren nach der verwendeten Festigkeitshypothese gebildete Vergleichsspannung ein Maximum wird. Dieses Maximum stellt die Vergleichsspannungsschwingbreite dar.

(4) Haben die zu betrachtenden Beanspruchungszustände gleichbleibende Hauptspannungsrichtungen, so genügt es bei Anwendung der Festigkeitshypothese nach Tresca, das Maximum der Differenz je zweier Hauptspannungsdifferenzen gleicher Paare von Hauptspannungsrichtungen zu bilden. Dieses Maximum stellt dann die Vergleichsspannungsschwingbreite (nach Tresca) dar.

7.7.3.4 Begrenzung der Vergleichsspannungen und Vergleichsspannungsschwingbreiten

(1) Der Umfang der Nachweisführung für Komponenten der Prüfgruppe A1 ist der **Tabelle 7.7-4** insoweit zu entnehmen, als dort für jede Beanspruchungsstufe die Begrenzungen der Vergleichsspannungen und der Vergleichsspannungsschwingbreiten vorgegeben sind.

(2) Für Komponenten der Prüfgruppe A2 und A3 gilt entsprechend **Tabelle 6.7-1**. Für Schrauben der Prüfgruppen A1, A2 und A3 gilt **Tabelle 6.7-2**.

(3) Die Begrenzungen gemäß den **Tabellen 6.7-1 und 7.7-4** gelten nur für volle Rechteckquerschnitte, wie sie zum Beispiel der betrachteten Spannungsverteilung in Schalenbauteilen zugrunde gelegt werden. Bei anderen Querschnitten sind die Stützziffern in Abhängigkeit von dem jeweiligen Tragverhalten festzulegen.

(4) Beim Auftreten eines dreiachsigen Zugspannungszustands ist außer bei Beanspruchungsstufe D zusätzlich die Summe der primären Hauptspannungen zu begrenzen mit

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \leq 4 \cdot S_m$$

Behälterteil	Ort	Spannungen hervorgerufen durch	Art der Spannung	Kategorie
Zylinder- oder Kugelschale	Ungestörter Bereich	Innendruck	Membranspannung Spannungsänderung senkrecht zur Schalenmittelfläche	P_m Q
		Axialer Temperaturgradient	Membranspannung Biegespannung	Q Q
	Verbindung mit Boden oder Flansch	Innendruck	Membranspannung [3] Biegespannung	P_l Q [1]
Beliebige Schale oder Boden	Beliebiger Schnitt durch den gesamten Behälter	Äußere Kraft oder Moment oder Innendruck [2]	Mittelwert der Membranspannung über den gesamten Behälterschnitt (Spannungskomponente senkrecht zur Schnittebene)	P_m
		Äußere Kraft oder Moment [2]	Biegeanteil über den gesamten Behälterschnitt (Spannungskomponente senkrecht zur Schnittebene)	P_m
	In der Nähe von Stutzen oder anderen Öffnungen	Äußere Kraft oder Moment oder Innendruck [2]	Membranspannung [3] Biegespannung Spannungskonzentration an Hohlkehle oder Ecke	P_l Q F
	Beliebig	Temperaturdifferenz zwischen Boden und Mantel	Membranspannung Biegespannung	Q Q
Gewölbter oder kegeliger Boden	Im Bereich der Rotationsachse	Innendruck	Membranspannung Biegespannung	P_m P_b
	Im Bereich der Krempe oder Verbindung zum Mantel	Innendruck	Membranspannung Biegespannung	P_l [4] Q
Ebener Boden	Im Bereich der Rotationsachse	Innendruck	Membranspannung Biegespannung	P_m P_b
	Verbindung zum Mantel	Innendruck	Membranspannung Biegespannung	P_l Q [1]
Gelochter Boden	Regulärer Steg in einem regelmäßigen Lochfeld	Druck	Membranspannung (Mittelwert über Stegquerschnitt) Biegespannung (Mittelwert über Stegbreite, aber veränderlich über Wandstärke) Spannungskonzentration	P_m P_b F
	Einzelner oder von der normalen Anordnung abweichender Steg	Druck	Membranspannung (wie vor) Biegespannung (wie vor) Spannungskonzentration	Q F F
Stutzen	Querschnitt senkrecht zur Stutzenachse	Innendruck oder äußere Kraft oder Moment [2]	Mittelwert der Membranspannung über den Stutzenquerschnitt (Spannungskomponente senkrecht zur Schnittebene)	P_m [5]
		Äußere Kraft oder Moment [2]	Biegung über den Stutzenquerschnitt	P_m [5]
	Stutzenwand	Innendruck	Allgemeine Membranspannung Örtliche Membranspannung Biegung Spannungskonzentration	P_m [5] P_l [5] Q [5] F
		Unterschiedliche Dehnung	Membranspannung Biegespannung Spannungskonzentration	Q Q F

Tabelle 7.7-1: Spannungskategorisierung in Behältern für einige typische Fälle
(Fortsetzung siehe Folgeseite)

Behälterteil	Ort	Spannungen hervorgerufen durch	Art der Spannung	Kategorie
Plattierung	Beliebig	Unterschiedliche Dehnung	Membranspannung Biegespannung	F F
Beliebig	Beliebig	Radiale Temperaturverteilung [6]	Äquivalenter linearer Anteil [7] Abweichung vom äquivalenten linearen Spannungsverlauf	Q F
Beliebig	Beliebig	Beliebig	Spannungskonzentration durch Kerbwirkung	F

[1] Wenn das Randmoment erforderlich ist, um die Biegemomente in Boden- oder Plattenmitte in zulässigen Grenzen zu halten, sind diese Biegespannungen als P_b zu klassifizieren.

[2] Hierzu gehören alle Anschlusskräfte der Rohrleitungen aus Eigengewicht, Schwingungen und behinderter Wärmedehnung sowie Trägheitskräfte.

[3] Außerhalb des die Störstelle enthaltenden Bereiches darf die Membranspannung in Meridian- und Umfangsrichtung der Grundschale den Wert von $1{,}1 \cdot S_m$ nicht überschreiten und die Länge des Bereiches in meridionaler Richtung darf nicht größer sein als $1{,}0 \cdot \sqrt{R \cdot s_c}$.

[4] In dünnwandigen Behältern muss die Möglichkeit des Einbeulens und unzulässiger Deformation untersucht werden.

[5] Die P_m-Klassifikation für Spannungen aus äußeren Kräften und Momenten ist anzuwenden in dem Bereich des Stutzens, der innerhalb der im Anhang A angegebenen Grenzen für die Ausschnittsverstärkung liegt, unabhängig davon, ob Ausschnittsverstärkung vorliegt oder nicht. Außerhalb der Grenzen für Ausschnittsverstärkung gilt die P_m-Klassifikation für die allgemeine, über den Querschnitt (und nicht über die Wanddicke) gemittelte Membranspannung, hervorgerufen durch Innendruck und eingeprägte mechanische Lasten.

[6] Es ist zu untersuchen, ob die Gefahr des Versagens infolge fortschreitender Deformation besteht.

[7] Der äquivalente lineare Anteil ist definiert als die lineare Spannungsverteilung, die das gleiche Biegemoment erzeugt, wie die tatsächliche Spannung.

Tabelle 7.7-1: Spannungskategorisierung in Behältern für einige typische Fälle (Fortsetzung)

Rohrleitungskomponente	Ort	Spannungen hervorgerufen durch	Art der Spannung	Kategorie
Gerade Rohre, Krümmer und Reduzierstücke, Abzweige und T-Stücke mit Ausnahme des Durchdringungsbereiches	Ungestörtes Rohr	Innendruck	Mittlere Membranspannung	P_m
		Mechanische Lasten einschließlich Eigengewicht und Trägheitskräfte	Biegespannung über Rohrquerschnitt (Spannungskomponente senkrecht zur Schnittebene)	P_b
	Im Bereich von Störstellen (Wanddickenänderungen, Verbindung verschiedener Rohrleitungsteile)	Innendruck	Membranspannung (über Wanddicke) Biegespannung (über Wanddicke)	P_l Q
		Mechanische Lasten einschließlich Eigengewicht und Trägheitskräfte	Membranspannung (über Wanddicke) Biegespannung (über Wanddicke)	P_l Q
		Behinderte Wärmedehnung	Membranspannung Biegespannung	P_e P_e
		Axialer Temperaturgradient	Membranspannung Biegespannung	Q Q
	Beliebig	Beliebig	Spannungskonzentration	F
Abzweige und T-Stücke	Bereich der Durchdringung	Innendruck, mechanische Lasten einschließlich Eigengewicht und Trägheitskräfte und behinderte Wärmedehnung	Membranspannung Biegespannung	P_l Q
		Axialer Temperaturgradient	Membranspannung Biegespannung	Q Q
		Beliebig	Spannungskonzentration	F
Bolzen und Flansche	Ungestörte Bereiche	Innendruck, Dichtkraft, Schraubenkräfte	Mittlere Membranspannung	P_m
	Im Bereich von Wanddickenänderungen	Innendruck, Dichtkraft, Schraubenkräfte	Membranspannung Biegespannung	P_l Q
		Axialer oder radialer Temperaturgradient	Membranspannung Biegespannung	Q Q
		Behinderte Wärmedehnung	Membranspannung Biegespannung	P_e P_e
		Beliebig	Spannungskonzentration	F
Beliebig	Beliebig	Radialer Temperaturgradient [1]	Biegespannung über der Wand Spannungskonzentration	F F

[1] Es ist zu untersuchen, ob die Gefahr des Versagens infolge fortschreitender Deformation besteht.

Tabelle 7.7-2: Spannungskategorisierung in Rohrleitungen für einige typische Fälle

Typ der Komponentenstützkonstruktion	Ort	Spannungen hervorgerufen durch	Art der Spannung	Kategorie
Beliebige Schale	Beliebiger Schnitt durch die gesamte Komponentenstützkonstruktion	Aufzunehmende Kraft oder aufzunehmendes Moment	Mittelwert der Membranspannung über den gesamten Schnitt (Spannungskomponente senkrecht zur Schnittebene)	P_m
		Aufzunehmende Kraft oder aufzunehmendes Moment	Biegeanteil über den gesamten Schnitt (Spannungskomponente senkrecht zur Schnittebene)	P_b
	Im Bereich einer Störstelle [1] oder Öffnung	Aufzunehmende Kraft oder aufzunehmendes Moment	Membranspannung Biegespannung	P_m Q [2]
	Beliebige Stelle	Ausdehnungsbehinderung [3]	Membranspannung Biegespannung	P_e P_e
Beliebige Platte oder Scheibe	Beliebige Stelle	Aufzunehmende Kraft oder aufzunehmendes Moment	Membranspannung Biegespannung	P_m P_b
	Im Bereich einer Störstelle [1] oder Öffnung	Aufzunehmende Kraft oder aufzunehmendes Moment	Membranspannung Biegespannung	P_m Q [2]
	Beliebige Stelle	Ausdehnungsbehinderung [3]	Membranspannung Biegespannung	P_e P_e

[1] Unter Störstellen sind wesentliche Geometrieänderungen wie Wanddickenänderungen und Übergänge zwischen verschiedenen Schalentypen zu verstehen. Lokale Spannungskonzentrationen, z. B. an Ecken und Bohrungen, fallen nicht darunter.

[2] Berechnung ist nicht erforderlich.

[3] Dies sind Spannungen, die aus der Unterdrückung oder Behinderung von Verschiebungen oder aus unterschiedlichen Verschiebungen von Komponentenstützkonstruktionen oder Festpunkten herrühren, einschließlich Spannungserhöhungen an Störstellen. Ausgenommen ist die behinderte Wärmedehnung von Rohrleitungen. Die Kräfte und Momente aus behinderter Wärmedehnung von Rohrleitungen fallen für die Komponentenstützkonstruktionen unter „Aufzunehmende Kraft oder aufzunehmendes Moment“.

Tabelle 7.7-3: Spannungskategorisierung integraler Bereiche von Komponentenstützkonstruktionen für einige typische Fälle

Spannungskategorie		Beanspruchungsstufen					
		Stufe 0 [1]	Stufe A	Stufe B	Stufe P [2]	Stufe C [3]	Stufe D
Primäre Spannungen	P_m	S_m	—	$1{,}1 \cdot S_m$	$0{,}9 \cdot R_{p0,2T}$	Größter Wert von: $R_{p0,2T}$ [4] und $1{,}2 \cdot S_m$	Kleinster Wert von: $0{,}7 \cdot R_{mT}$ und $2{,}4 \cdot S_m$
	P_l	$1{,}5 \cdot S_m$	—	$1{,}65 \cdot S_m$	$1{,}35 \cdot R_{p0,2T}$	Größter Wert von: $1{,}5 \cdot R_{p0,2T}$ [4] und $1{,}8 \cdot S_m$	Kleinster Wert von: R_{mT} und $3{,}6 \cdot S_m$
	$P_m + P_b$ oder $P_l + P_b$	$1{,}5 \cdot S_m$	—	$1{,}65 \cdot S_m$	$1{,}35 \cdot R_{p0,2T}$	Größter Wert von: $1{,}5 \cdot R_{p0,2T}$ [4] und $1{,}8 \cdot S_m$	Kleinster Wert von: R_{mT} und $3{,}6 \cdot S_m$
Primäre plus sekundäre Spannungen	P_e	—	$3 \cdot S_m$ [5]	$3 \cdot S_m$ [5] [6]	—	—	—
	$P_m + P_b + P_e + Q$ oder $P_l + P_b + P_e + Q$	—	$3 \cdot S_m$ [5]	$3 \cdot S_m$ [5] [6]	—	—	—
Primäre plus sekundäre Spannungen plus Spannungsspitzen	$P_m + P_b + P_e + Q + F$ oder $P_l + P_b + P_e + Q + F$	—	$2 \cdot S_a$ [8] $D \le 1{,}0$	$2 \cdot S_a$ [7] [8] $D \le 1{,}0$	—	—	—

Die aufgeführten Werkstoffkennwerte sind als Mindestwerte einzusetzen.
Bei Anwendung der komponentenspezifischen Analyse des mechanischen Verhaltens gemäß Abschnitt 8 gelten die dort angegebenen Grenzen.
Die Bildung der Spannungsvergleichswerte S_m ist in **Tabelle 6.6-1** angegeben.

[1] Zur Nachweisführung bei der erneuten rechnerischen Bewertung einer Komponente siehe **Anhang B**.

[2] Bei Überschreitung der Zahl 10 sind alle Lastspiele dieser Stufe in die Ermüdungsanalyse gemäß den Stufen A und B einzubeziehen.

[3] Bei Überschreitung der Zahl 25 sind die über 25 hinausgehenden Lastspiele dieser Stufe in die Ermüdungsanalyse gemäß den Stufen A und B einzubeziehen.

[4] Jedoch nicht mehr als 90 % des zulässigen Wertes der Stufe D

[5] Bei Überschreiten der Grenze von $3 \cdot S_m$ (bei Stahlguss $4 \cdot S_m$) ist eine elastisch-plastische Analyse unter Berücksichtigung der Lastspiele durchzuführen (siehe Abschnitt 7.8.1). Diese kann unter den zugehörigen Voraussetzungen eine vereinfachte elastisch plastische Analyse gemäß Abschnitt 7.8.4 sein.

[6] Diese Nachweise sind nicht in den Fällen vorgeschrieben, in denen Beanspruchungen der Lastfälle NF und SF aus Gründen der Funktionsfähigkeit oder aus anderen Gründen in diese Betriebsstufe eingestuft wurden.

[7] Der Ermüdungsnachweis ist nicht in den Fällen vorgeschrieben, in denen Beanspruchungen der Lastfälle NF und SF aus Gründen der Funktionsfähigkeit oder aus anderen Gründen dieser Betriebsstufe zugeordnet wurden und diese Lastfälle der Gruppe von 25 Lastspielen der Stufe C angehören, für die keine Ermüdungsanalyse erforderlich ist.

[8] Die Begrenzung der Spannungsamplitude S_a und des Erschöpfungsgrades D erfolgt nach Abschnitt 7.8.

Tabelle 7.7-4: Begrenzung der Vergleichsspannungen und Vergleichsspannungsschwingbreiten: Zulässige Werte in Abhängigkeit von Spannungskategorie und Beanspruchungsstufe für ferritische und austenitische Stähle einschließlich Stahlguss der Prüfgruppe A1

7.7.4 Grenztragfähigkeitsanalyse

Hinweis:
Zur Nachweisführung bei der erneuten rechnerischen Bewertung einer Komponente siehe **Anhang B**.

7.7.4.1 Allgemeines

(1) Die nachfolgenden Festlegungen gelten für platten- und schalenförmige Bauteile der Prüfgruppen A1, A2 und A3. Sie sind nicht anwendbar

a) auf Befestigungselemente mit Gewinde,
b) bei Konstruktionen (z. B. Kehlnähten), bei denen das Versagen infolge lokaler Versagensarten eintreten kann,
c) wenn die Möglichkeit von Instabilitätsversagen der Struktur besteht.

(2) Die Grenzen für die allgemeine primäre Membranspannung, die örtliche primäre Membranspannung sowie die primäre Membran- und Biegespannung (elastisch gerechnet) müssen dann nicht an jeder Stelle eingehalten sein, wenn mittels einer Grenztragfähigkeitsanalyse gezeigt wird, dass die spezifizierten Belastungen mit den in 7.7.4.2 angegebenen Sicherheiten unterhalb der jeweiligen unteren Grenztraglast liegen.

(3) Die untere Grenztraglast ist diejenige Grenztraglast, die als untere Grenze (lower bound theorem) unter Annahme eines ideal elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens mit der fiktiven Fließspannung σ_F errechnet wird. Dabei muss die Spannungsverteilung in der Struktur die Gleichgewichtsbedingungen erfüllen. Mehrachsige Beanspruchungszustände sind mittels der von-Mises-Hypothese zu bewerten.

7.7.4.2 Zulässige Belastungen

(1) Beanspruchungsstufe 0

Bei dieser Beanspruchungsstufe wird zur Berechnung der unteren Grenztraglast als Wert für die Fließspannung wie folgt verwendet:

Bauteile der Prüfgruppe A1 : $\sigma_F = 1{,}5 \cdot S_m$

Bauteile der Prüfgruppe A2 und A3 : $\sigma_F = 1{,}5 \cdot S$

Die Verwendung des S_m-Wertes kann bei Werkstoffen ohne ausgeprägte Streckgrenze während der ersten Lastwechsel zu kleinen bleibenden Dehnungen führen. Sofern diese Dehnungen nicht zulässig sind, ist der Wert der Bezugsspannung S_m unter Verwendung von Dehnungsbegrenzungsfaktoren nach **Tabelle 7.7-5** zu reduzieren.

Die spezifizierte Belastung darf 67 % des Wertes der unteren Grenztraglast nicht überschreiten.

(2) Beanspruchungsstufe B

Bei dieser Beanspruchungsstufe wird zur Berechnung der unteren Grenztraglast als Wert für die Fließspannung wie folgt verwendet:

Bauteile der Prüfgruppe A1 : $\sigma_F = 1{,}65 \cdot S_m$

Bauteile der Prüfgruppe A2 und A3 : $\sigma_F = 1{,}65 \cdot S$

Die Verwendung des 1,1fachen S_m-Wertes kann bei Werkstoffen ohne ausgeprägte Streckgrenze während der ersten Lastwechsel zu kleinen bleibenden Dehnungen führen. Sofern diese Dehnungen nicht zulässig sind, ist der Wert der Bezugsspannung S_m unter Verwendung von Dehnungsbegrenzungsfaktoren nach **Tabelle 7.7-5** zu reduzieren.

Die spezifizierte Belastung darf 67 % des Wertes der unteren Grenztraglast nicht überschreiten.

(3) Beanspruchungsstufe C

Bei dieser Beanspruchungsstufe wird zur Berechnung der unteren Grenztraglast als Wert für die Fließspannung wie folgt verwendet:

Bauteile der Prüfgruppe A1 : $\sigma_F = 1{,}8 \cdot S_m$

Bauteile der Prüfgruppe A2 und A3 : $\sigma_F = 1{,}8 \cdot S$

Die spezifizierte Belastung darf 67 % des Wertes der unteren Grenztraglast nicht überschreiten.

(4) Beanspruchungsstufe D

Bei dieser Beanspruchungsstufe wird zur Berechnung der unteren Grenztraglast als Wert für die Fließspannung wie folgt verwendet:

Bauteile der Prüfgruppe A1: $\sigma_F = \min \{2{,}3 \cdot S_m; 0{,}7 \cdot R_{mT}\}$

Bauteile der Prüfgruppe A2 und A3: $\sigma_F = 2{,}0 \cdot S$

Die spezifizierte Belastung darf 90 % des Wertes der unteren Grenztraglast nicht überschreiten.

(5) Prüfstufe P

Bei dieser Beanspruchungsstufe wird zur Berechnung der unteren Grenztraglast als Wert für die Fließspannung wie folgt verwendet:

Bauteile der Prüfgruppe A1 : $\sigma_F = 1{,}5 \cdot S_m$

Bauteile der Prüfgruppe A2 und A3 : $\sigma_F = 1{,}5 \cdot S$

Die spezifizierte Belastung darf 80 % des Wertes der unteren Grenztraglast nicht überschreiten.

(6) Bei Einhaltung folgender Bedingungen darf die untere Grenztraglast aus einer einzigen Berechnung mit ideal elastisch-plastischem Werkstoffverhalten für die einzelnen Beanspruchungsstufen proportional den unterschiedlichen Fließspannungen umgerechnet werden:

a) Der Berechnung liegt ein geometrisch lineares Berechnungsmodell zugrunde (z. B. keine nicht linearen Lagerbedingungen).
b) Die Belastung ist proportional (z. B. bei Belastung durch Druck und äußere Lasten steigen beide Lastanteile im gleichen Verhältnis),
c) Bei mehr als einem Werkstoff gilt für das gesamte untersuchte Bauteil die niedrigste Fließspannung.

Bleibende Dehnung in %	Faktoren
0,20	1,00 *)
0,10	0,90
0,09	0,89
0,08	0,88
0,07	0,86
0,06	0,83
0,05	0,80
0,04	0,77
0,03	0,73
0,02	0,69
0,01	0,63

*) Bei Werkstoffen ohne ausgeprägte Streckgrenze kann bei Temperaturen von oberhalb 50 °C der S_m-Wert 67 % der Dehngrenze $R_{p0,2T}$ überschreiten und 90 % dieses Wertes erreichen; damit ist eine bleibende Dehnung von etwa 0,1 % verbunden. Wenn diese Dehnung nicht zulässig erscheint, ist der S_m-Wert unter Verwendung der Faktoren dieser Tabelle zu reduzieren.

Tabelle 7.7-5: Faktoren zur Begrenzung der Dehnungen für Werkstoffe ohne ausgeprägte Streckgrenze

7.8 Ermüdungsanalyse

7.8.1 Allgemeines

7.8.1.1 Zielsetzung und Vorgehen

(1) Zur Vermeidung des Versagens infolge Ermüdung bei wechselnder Beanspruchung ist abhängig von der Prüfgruppe und der Komponentenart eine Ermüdungsanalyse durchzuführen.

(2) Bewertungsgrundlage für die Ermüdungsanalyse sind Ermüdungskurven (**Bilder 7.8-1 bis 7.8-4**), die auf Versuchen in Luftatmosphäre basieren.

Hinweis:
Vergleiche hierzu auch Abschnitt 4, insbesondere Abschnitt 4.5.

(3) Die in **Bild 7.8-2** für Temperaturen gleich oder kleiner als 80 °C und größer als 80 °C dargestellten Ermüdungskurven gelten für die austenitischen Stähle X6CrNiNb18-10 (1.4550) und X6CrNiTi18-10 (1.4541). Für alle sonstigen austenitischen Stähle ist die in **Bild 7.8-3** dargestellte Ermüdungskurve anzuwenden.

(4) Die Gleichungen für die in **Bild 7.8-2** dargestellten Ermüdungskurven für die Stähle 1.4550 und 1.4541 lauten:

a) als Funktion $S_a = f(\hat{n}_i)$

$$S_a = 10^{-2} \cdot E \cdot \left[\left(\frac{e^a}{\hat{n}_i} \right)^{\frac{1}{b}} + c \right] \qquad (7.8.1\text{-}1)$$

b) als Funktion $N = f(S_a)$

$$\hat{n}_i = \frac{e^a}{\left(\frac{S_a}{10^{-2} \cdot E} - c \right)^b} \qquad (7.8.1\text{-}2)$$

mit

S_a : halbe Vergleichsspannungsschwingbreite in N/mm²

$\hat{n}_i$: zulässige Lastspielzahl

E : Elastizitätsmodul

Als Bezugsgröße für die Darstellung der fiktiven elastischen Spannungsschwingbreiten wurde der Elastizitätsmodul $E = 1{,}79 \cdot 10^5$ N/mm² gewählt.

Die Konstanten a, b und c betragen:

a) a = 4,400 bei T ≤ 80 °C und 4,500 bei T > 80 °C

b) b = 2,450 bei T ≤ 80 °C und 2,365 bei T > 80 °C

c) c = 0,071 bei T ≤ 80 °C und 0,0478 bei T > 80 °C.

7.8.1.2 Prüfgruppen A1 und A2

7.8.1.2.1 Notwendige Bedingungen für die Durchführung einer Ermüdungsanalyse

(1) Ermüdungsanalysen sind durchzuführen, wenn wenigstens eine der nachfolgenden Bedingungen zutrifft.

a) Die Mindestzugfestigkeit R_{mRT} des Werkstoffs übersteigt 550 N/mm².

b) Die Summe der Lastspiele mit den nachfolgend aufgeführten Beanspruchungen gemäß ba) bis bd) übersteigt 1000 Lastspiele.

ba) Erwartete Anzahl der Lastspiele mit voller Druckschwankungsbreite einschließlich An- und Abfahrten.

bb) Erwartete Anzahl der Druckschwankungen mit Druckdifferenzen größer $0{,}2 \cdot p$ (p = Auslegungsdruck).

bc) Vorhandene Anzahl der gewichteten Temperaturzyklen zwischen zwei benachbarten Punkten (siehe Absatz (2)). Dabei sind lastfallweise jeweils aus allen benachbarten Punkten diejenigen zwei herauszusuchen, für die sich die größte Wandtemperaturdifferenz im betrachteten Zeitpunkt ergibt. Die Anzahl der Lastspiele mit dieser Temperaturdifferenz ergibt sich komponentenbezogen. Die Anzahl der gewichteten Temperaturzyklen wird gebildet, indem für jeden Lastfall die komponentenbezogene Lastspielzahl mit dem in **Tabelle 7.8-1** angegebenen Faktor aufgrund der zugehörigen größten Temperaturdifferenz multipliziert wird und dann über alle Lastfälle aufsummiert wird.

Temperaturschwingbreite [K]	Faktor
$\Delta T < 30$	0
$30 \le \Delta T < 60$	1
$60 \le \Delta T < 80$	2
$80 \le \Delta T < 140$	4
$140 \le \Delta T < 190$	8
$190 \le \Delta T < 250$	12
$250 \le \Delta T$	20

Tabelle 7.8-1: Faktor für die Ermüdungsanalyse zur Berücksichtigung der Materialtemperaturdifferenz

bd) Für Behälter mit Schweißnähten, die Werkstoffe unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten (α_1, α_2) miteinander verbinden, ist die Anzahl der Temperaturzyklen zu berücksichtigen, bei denen das Produkt $\Delta T \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)$ größer als 0,00034 ist. Dabei ist ΔT die Schwingbreite der Betriebstemperatur an der betrachteten Stelle.

(2) Für benachbarte Punkte gilt

a) Für Differenzen der Oberflächentemperatur:

aa) „Benachbarte Punkte“ werden bei Rotationsschalen in meridionaler Richtung als Punkte definiert, die weniger als die Strecke $2 \cdot \sqrt{R \cdot s_c}$ voneinander entfernt sind. Dabei sind R der senkrecht auf der Oberfläche stehende, von der Rotationsachse bis zur Wandmitte gerechnete Radius und s_c die Dicke des Bauteils am betrachteten Punkt. Wenn das Produkt $R \cdot s_c$ variiert, soll der Mittelwert für die Punkte genommen werden.

ab) Benachbarte Punkte werden in Umfangsrichtung von Rotationsschalen und bei ebenen Bauteilen (z. B. Flansche und flache Deckel) als zwei beliebige Punkte der gleichen Oberfläche definiert.

b) Für Temperaturdifferenzen über die Wanddicke werden „benachbarte Punkte“ als zwei beliebige Punkte auf seiner Oberflächennormalen definiert.

7.8.1.2.2 Anzuwendende Verfahren der Ermüdungsanalyse

(1) Folgende Verfahren der Ermüdungsanalyse sind zulässig:

a) Vereinfachter Nachweis der Sicherheit gegen Ermüdung nach Abschnitt 7.8.2

Dieser Nachweis beruht auf einer Beschränkung von Druckschwingbreiten, Temperaturunterschieden und Lastspannungsschwingbreiten nach Höhe und Lastspielzahl. Bei Einhaltung dieser Grenzen ist die Sicherheit gegen Ermüdung gegeben. Diesem Verfahren liegt ein linear-elastischer Spannungs-Dehnungszusammenhang zugrunde.

b) Elastische Ermüdungsanalyse nach Abschnitt 7.8.3

Dieses Verfahren ist insbesondere dann anzuwenden, wenn der Nachweis der Sicherheit gegen Ermüdung nach Abschnitt 7.8.2 nicht erbracht werden kann. Die elastische Ermüdungsanalyse ist nur dann zulässig, wenn die Vergleichsspannungsschwingbreite aus primären und sekundären Spannungen bei Stählen den Wert $3 \cdot S_m$, bei Stahlguss den Wert $4 \cdot S_m$ nicht überschreitet.

c) Vereinfachte elastisch-plastische Ermüdungsanalyse nach Abschnitt 7.8.4

Dieses Verfahren darf angewendet werden für Lastspiele, in denen die Vergleichsspannungsschwingbreite aller primären und sekundären Spannungen die Grenze $3 \cdot S_m$ für Bauteile aus Stahl bzw. $4 \cdot S_m$ für Bauteile aus Stahlguss überschreiten, jedoch diese Grenzen von der Vergleichsspannungsschwingbreite der primären und sekundären

Spannungen infolge mechanischer Belastungen eingehalten sind. Der Einfluss der Plastifizierung wird durch Verwendung des Faktors K_e nach Abschnitt 7.8.4 berücksichtigt. Anstelle dieses K_e-Wertes dürfen auch experimentell oder rechnerisch belegte oder aus der Literatur entnommene Werte verwendet werden. Die Anwendbarkeit ist zu zeigen.

Hinweis:
Literatur [1] enthält einen Vorschlag zur Ermittlung von K_e-Werten.

Zusätzlich ist zu zeigen, dass kein Versagen infolge fortschreitender Deformation auftritt.

d) Allgemeine elastisch-plastische Ermüdungsanalyse

Während die vorstehend aufgeführten Verfahren auf der Grundlage linear-elastischen Werkstoffverhaltens beruhen, darf anstelle dieser Verfahren eine Ermüdungsanalyse ausgehend vom wirklichen Werkstoffverhalten vorgenommen werden, wobei zusätzlich zu zeigen ist, dass kein Versagen infolge fortschreitender Deformation auftritt.

(2) Für Rohrleitungen darf anstelle der Nachweise nach den Abschnitten 7.8.3 und 7.8.4 die komponentenspezifische Ermüdungsanalyse nach Abschnitt 8.5 durchgeführt werden.

(3) Für Armaturen darf die komponentenspezifische Ermüdungsanalyse nach Abschnitt 8.4.6 durchzuführen.

(4) Die Ermüdungsanalyse von Schrauben ist gemäß Abschnitt 7.11.2 durchzuführen.

7.8.1.3 Prüfgruppe A3

Für Komponenten der Prüfgruppe A3 mit Ausnahme von Rohrleitungen entfällt eine Ermüdungsanalyse. Rohrleitungen der Prüfgruppe A3 sind hinsichtlich der Ermüdungsanalyse wie Rohrleitungen der Prüfgruppe A2 zu behandeln.

7.8.2 Vereinfachter Nachweis der Sicherheit gegen Ermüdung

Die Spannungsspitzen brauchen nicht gesondert im Ermüdungsnachweis berücksichtigt zu werden, wenn für die Beanspruchungen der Stufen A und B des Bauteils die nachfolgenden Bedingungen der Absätze a) bis f) erfüllt sind.

Hinweis:
Wenn Lastfälle der Stufe B auf ihr Ermüdungsverhalten untersucht werden sollen, gelten für sie die gleichen Bedingungen wie für die der Stufe A.

a) Lastspiele zwischen Atmosphären- und Betriebsdruck

Die spezifizierte Anzahl der Lastspiele (einschließlich An- und Abfahrten), bei denen der Innendruck vom Atmosphären- zum Betriebsdruck ansteigt und wieder zurückgeht, übersteigt in den anzuwendenden Ermüdungskurven (siehe **Bilder 7.8-1 bis 7.8-3**) nicht diejenige Lastspielzahl, die dem S_a-Wert entspricht, der für Stähle dreimal so groß und für Stahlguss viermal so groß ist wie der S_m-Wert bei Betriebstemperatur für den betrachteten Werkstoff.

b) Druckschwankungen bei Normalbetrieb

Die spezifizierten Druckschwankungen der Stufe A übersteigen nicht die Größe von 1/3 des Auslegungsdrucks, multipliziert mit dem Verhältnis (S_a/S_m), wobei S_a derjenige Wert ist, der der Ermüdungskurve für die gesamte spezifizierte Anzahl von signifikanten Druckschwankungen entnommen wird, und S_m der Spannungsvergleichswert für den Werkstoff bei Betriebstemperatur ist. Überschreitet die spezifizierte Anzahl von signifikanten Druckschwankungen die sich aus der anzuwendenden Ermüdungskurve ergebende maximale Lastspielzahl, dann darf der S_a-Wert für die maximale Lastspielzahl der anzuwendenden Ermüdungskurve benutzt werden. Signifikante Druckschwankungen sind solche, bei denen der gesamte Anstieg die Größe von 1/3 des Auslegungsdrucks, multipliziert mit dem Verhältnis S/S_m übersteigt. Hierbei ist S wie folgt definiert:

ba) Wenn die spezifizierte Lastspielzahl 10^6 oder kleiner ist, gilt für S der Wert von S_a der Ermüdungskurve bei 10^6 Lastspielen.

bb) Wenn die spezifizierte Lastspielzahl größer als 10^6 ist, gilt für S der Wert von S_a bei der maximalen Lastspielzahl der anzuwendenden Ermüdungskurve.

c) Temperaturunterschied beim Anfahren und Abfahren

Der Temperaturunterschied in K (Kelvin) zwischen zwei benachbarten Punkten des Bauteils überschreitet in der Betriebsstufe A nicht den Wert $S_a/(2 \cdot E \cdot \alpha)$. Hierin ist S_a der Ermüdungskurve für die spezifizierte Anzahl von An- und Abfahrlastzyklen zu entnehmen; α ist der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient für den Mittelwert der Temperaturen beider Punkte, und E ist der Elastizitätsmodul für den Mittelwert der Temperaturen beider Punkte.

Hinweis:
Benachbarte Punkte sind in Abschnitt 7.8.1.2.1 (2) erläutert.

d) Temperaturunterschied bei Betriebszuständen außer An- und Abfahren

Der Temperaturunterschied in K (Kelvin) zwischen zwei beliebigen, benachbarten Punkten ist kleiner als der Wert $S_a/(2 \cdot E \cdot \alpha)$. Hierin ist der Wert S_a der Ermüdungskurve für die gesamte spezifizierte Anzahl der signifikanten Temperaturschwankungen zu entnehmen. Eine Temperaturschwankung ist als signifikant zu betrachten, wenn ihr gesamter rechnerischer Schwankungsbereich die Größe $S/(2 \cdot E \cdot \alpha)$ übersteigt. Hierbei ist S wie folgt definiert:

da) Wenn die spezifizierte Lastspielzahl 10^6 oder kleiner ist, gilt für S der Wert von S_a der Ermüdungskurve bei 10^6 Lastspielen.

db) Wenn die spezifizierte Lastspielzahl größer als 10^6 ist, gilt für S der Wert von S_a bei der maximalen Lastspielzahl der anzuwendenden Ermüdungskurve.

e) Temperaturunterschiede bei ungleichen Werkstoffen

Für Komponenten, die aus Werkstoffen mit verschiedenen Elastizitätsmoduln oder Wärmeausdehnungskoeffizienten hergestellt sind, überschreitet die gesamte rechnerische Schwingbreite der Temperaturunterschiede des Bauteils im Normalbetrieb nicht die Größe $S_a/[2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 - E_2 \cdot \alpha_2)]$. Hierin ist der Wert S_a der Ermüdungskurve für die spezifizierte gesamte Anzahl signifikanter Temperaturschwankungen zu entnehmen. E_1 und E_2 sind die Elastizitätsmoduln, α_1 und α_2 die linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten bei den Mittelwerten der Temperaturen für die beiden Werkstoffe. Eine Temperaturschwankung ist als signifikant zu betrachten, wenn ihr gesamter rechnerischer Schwankungsbereich die Größe $S/[2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 - E_2 \cdot \alpha_2)]$ überschreitet. Hierbei ist S wie folgt definiert:

ea) Wenn die spezifizierte Lastspielzahl 10^6 oder kleiner ist, gilt für S der Wert von S_a der Ermüdungskurve bei 10^6 Lastspielen.

eb) Wenn die spezifizierte Lastspielzahl größer als 10^6 ist, gilt für S der Wert von S_a bei der maximalen Lastspielzahl der anzuwendenden Ermüdungskurve.

Wenn die beiden verwendeten Werkstoffe verschiedene Ermüdungskurven haben, so ist der kleinere S_a-Wert für die Anwendung dieses Abschnitts einzusetzen.

f) Mechanische Lasten

Die spezifizierte gesamte Schwingbreite mechanischer Lasten, mit Ausnahme des Innendrucks, aber einschließlich der Rohrleitungskräfte führt nicht zu Lastspannungen, deren Schwingbreite den Wert S_a überschreitet, der aus der Ermüdungskurve für die gesamte spezifizierte Anzahl von signifikanten Lastspielen zu entnehmen ist. Wenn die

gesamte spezifizierte Anzahl von signifikanten Lastspielen die maximale Lastspielzahl der anzuwendenden Ermüdungskurven überschreitet, darf der Wert S_a mit der maximalen Lastspielzahl der zu benutzenden Ermüdungskurve eingesetzt werden. Eine Lastschwankung ist als signifikant zu betrachten, wenn der gesamte rechnerische Spannungsausschlag infolge Last den Wert S der anzuwendenden Ermüdungskurve überschreitet. Hierbei ist S wie folgt definiert:

fa) Wenn die spezifizierte Lastspielzahl 10^6 oder kleiner ist, gilt für S der Wert von S_a der Ermüdungskurve bei 10^6 Lastspielen.

fb) Wenn die spezifizierte Lastspielzahl größer als 10^6 ist, gilt für S der Wert von S_a bei der maximalen Lastspielzahl der anzuwendenden Ermüdungskurve.

7.8.3 Elastische Ermüdungsanalyse

(1) Voraussetzung für die Anwendung der elastischen Ermüdungsanalyse ist die Erfüllung des $3 \cdot S_m$-Kriteriums bei Stählen und des $4 \cdot S_m$-Kriteriums bei Stahlguss gemäß Abschnitt 7.7.3.4.

(2) Da in den Betriebsstufen A und B die Spannungsschwingbreiten $\sigma_V = 2 \cdot \sigma_a = 2 \cdot E_T \cdot \varepsilon_a$ verschieden große Werte annehmen, sind diese abdeckend in Stufen $2 \cdot \sigma_{ai}$ einzuteilen und deren Beitrag zur Erschöpfung wie im Folgenden beschrieben zu akkumulieren:

Zu jeder Stufe $\sigma_{ai} = S_a$ muss die zulässige Lastspielzahl $\hat{n}_i$ aus der Ermüdungskurve nach **Bild 7.8-1, Bild 7.8-2** oder **Bild 7.8-3** bestimmt und mit der spezifizierten oder bei Nachrechnung im Betrieb aufgetretenen Lastspielzahl n_i verglichen werden.

Die Summe der Quotienten $n_i / \hat{n}_i$ stellt den Erschöpfungsgrad „D“ dar; für diesen gilt im Rahmen der Auslegung:

$$D = \frac{n_1}{\hat{n}_1} + \frac{n_2}{\hat{n}_2} + ... \frac{n_k}{\hat{n}_k} \leq 1{,}0 \qquad (7.8\text{-}1)$$

Wenn eine mediumbedingte Verringerung der Ermüdungsfestigkeit nicht auszuschließen ist, ist ab einer Aufmerksamkeitsschwelle D = 0,4 durch folgende Maßnahmen eine Berücksichtigung des Mediums auf die Ermüdung erforderlich:

a) Einbeziehung der betroffenen Bauteilbereiche in ein Überwachungsprogramm nach KTA 3211.4 oder

b) betriebsnahe Experimente oder

c) rechnerische Nachweise unter Berücksichtigung von mediumsbedingten Abminderungsfaktoren und realistischer Randbedingungen.

Hinweis:
Siehe die Erläuterungen zu Abschnitt 7.8 im **Anhang D** im Hinblick auf die Aufmerksamkeitsschwelle bei austenitischen Stählen für den Fall, dass die Bewertung des Erschöpfungsgrades nicht auf Basis der in den **Bildern 7.8-2** und **7.8-3** dargestellten Ermüdungskurven erfolgte.

7.8.4 Vereinfachte elastisch-plastische Ermüdungsanalyse

Im Rahmen der vereinfachten elastisch-plastischen Ermüdungsanalyse darf die $3 \cdot S_m$-Grenze bei Stählen und die $4 \cdot S_m$-Grenze bei Stahlguss mit der Spannungsschwingbreite aus primären und sekundären Spannungen überschritten werden, wenn die nachfolgenden Anforderungen der Absätze a) bis d) erfüllt werden.

a) Die Vergleichsspannungsschwingbreite aus primären und sekundären Membranspannungen und Biegespannungen ohne thermische Biegespannungen über der Wanddicke muss kleiner oder gleich $3 \cdot S_m$ bei Stählen und kleiner oder gleich $4 \cdot S_m$ bei Stahlguss sein. Die Begrenzung der thermisch bedingten fortschreitenden Deformation ist nachzuweisen vgl. z. B. Abschnitt 7.12.3 und Abschnitt 8.5.2.4.4.1 b).

b) Der Wert der halben Vergleichsspannungsschwingbreite S_a, der mit der Ermüdungskurve gemäß **Bild 7.8-1, Bild 7.8-2** oder **Bild 7.8-3** zu vergleichen ist, muss mit dem Faktor K_e multipliziert werden. Dabei darf der K_e-Wert für Stahl folgendermaßen ermittelt werden:

$$K_e = 1{,}0 \qquad \text{für } S_n \leq 3 \cdot S_m \qquad (7.8\text{-}2)$$

$$K_e = 1{,}0 + \frac{(1-n)}{n \cdot (m-1)} \cdot \left(\frac{S_n}{3 \cdot S_m} - 1 \right) \quad \text{für } 3 \cdot S_m < S_n < m \cdot 3 \cdot S_m \qquad (7.8\text{-}3)$$

$$K_e = 1/n \qquad \text{für } S_n \geq m \cdot 3 \cdot S_m \qquad (7.8\text{-}4)$$

S_n : Spannungsschwingbreite aus primären und sekundären Spannungen

In den vorstehenden Gleichungen tritt bei Stahlguss anstelle des Wertes $3 \cdot S_m$ der Wert $4 \cdot S_m$.

Die Materialparameter m und n sind der **Tabelle 7.8-2** zu entnehmen. Die Temperatur für den verwendeten Werkstoff darf den Wert für T_{max} in **Tabelle 7.8-2** nicht überschreiten.

Für lokale Wärmespannungen dürfen bei der Ermüdungsanalyse die elastischen Gleichungen verwendet werden. Die Querkontraktionszahl ν ist wie folgt zu bestimmen:

$$\nu = 0{,}5 - 0{,}2 \cdot \left(\frac{R_{p0,2T}}{S_a} \right), \text{ aber nicht kleiner als } 0{,}3 \qquad (7.8\text{-}5)$$

$$\text{Hierbei ist } T = 0{,}25 \cdot \check{T} + 0{,}75 \cdot \hat{T} \qquad (7.8\text{-}6)$$

mit

$\hat{T}$ maximale Temperatur innerhalb des betrachteten Lastspiels

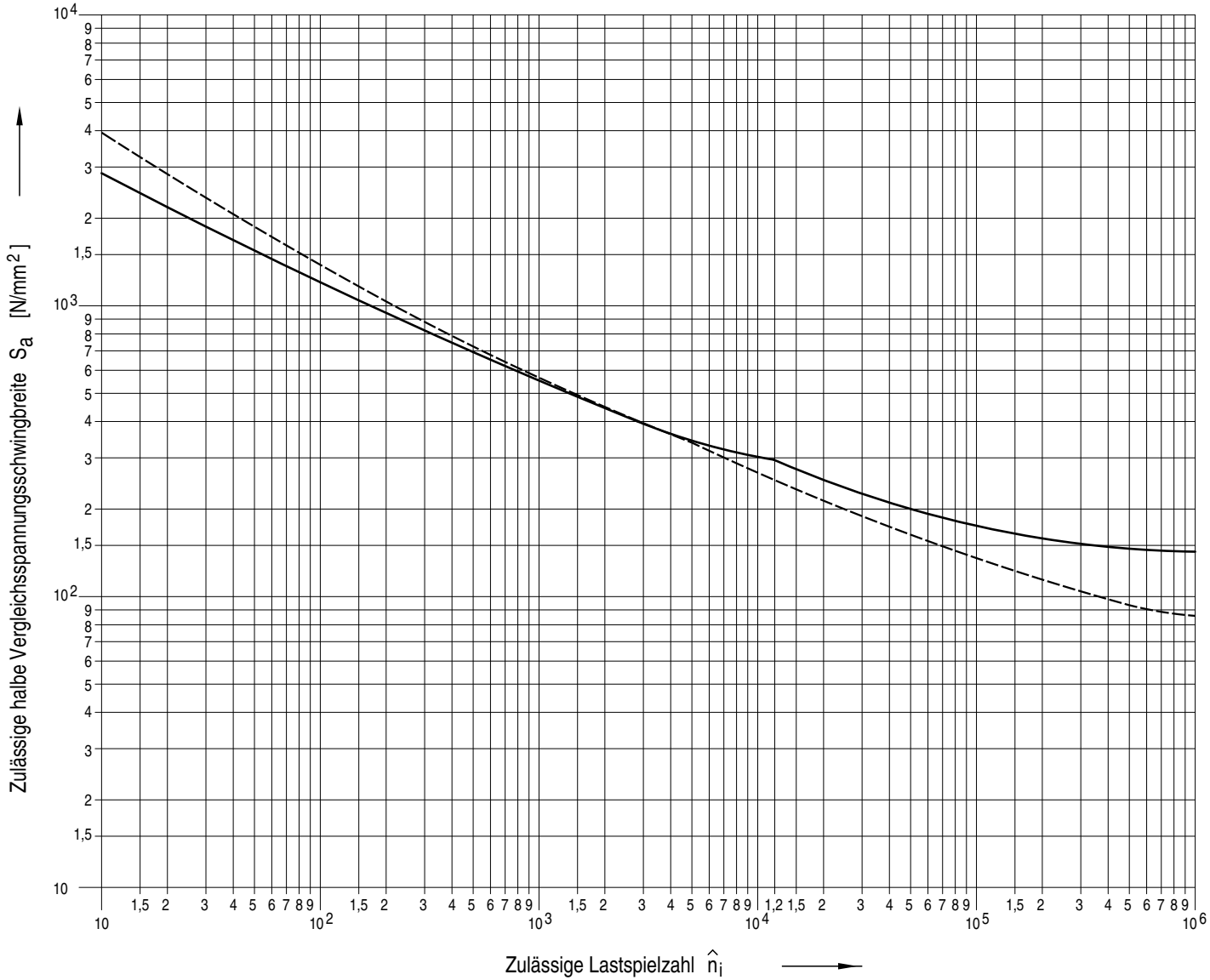
$\check{T}$ minimale Temperatur innerhalb des betrachteten Lastspiels

c) Abweichend von b) dürfen K_e-Werte rechnerisch oder experimentell ermittelt oder der Literatur entnommen werden. Die Anwendbarkeit ist zu zeigen.

d) Die Begrenzung der Erschöpfung infolge Ermüdung erfolgt nach Abschnitt 7.8.3.

Art des Werkstoffes	m	n	T_{max} in °C
Niedriglegierter C-Stahl	2,0	0,2	370
Martensitischer, rostfreier Stahl	2,0	0,2	370
Unlegierter C-Stahl	3,0	0,2	370
Austenitischer, rostfreier Stahl	1,7	0,3	425
Nickel-Basislegierung	1,7	0,3	425

Tabelle 7.8-2: Materialparameter



$R_m \leq 550$ N/mm^2

$R_m = 790$ bis 900 N/mm^2

$E = 2{,}07 \cdot 10^5$ N/mm^2

Werte für Zugfestigkeiten zwischen 550 N/mm^2 und 790 N/mm^2 dürfen linear interpoliert werden.

Liegen der berechneten Spannungsschwingbreite Dehnungen mit einem E-Modul $E_T \neq E$ zugrunde, so ist die berechnete Spannungsschwingbreite mit dem Quotienten E/E_T zu multiplizieren.

Hinweis:
Die genauen und verbindlichen Werte für den Zusammenhang S_a und $\hat{n}_i$ sind in Tabelle 7.8-3 angegeben.

Bild 7.8-1: Ermüdungskurven für ferritische Stähle

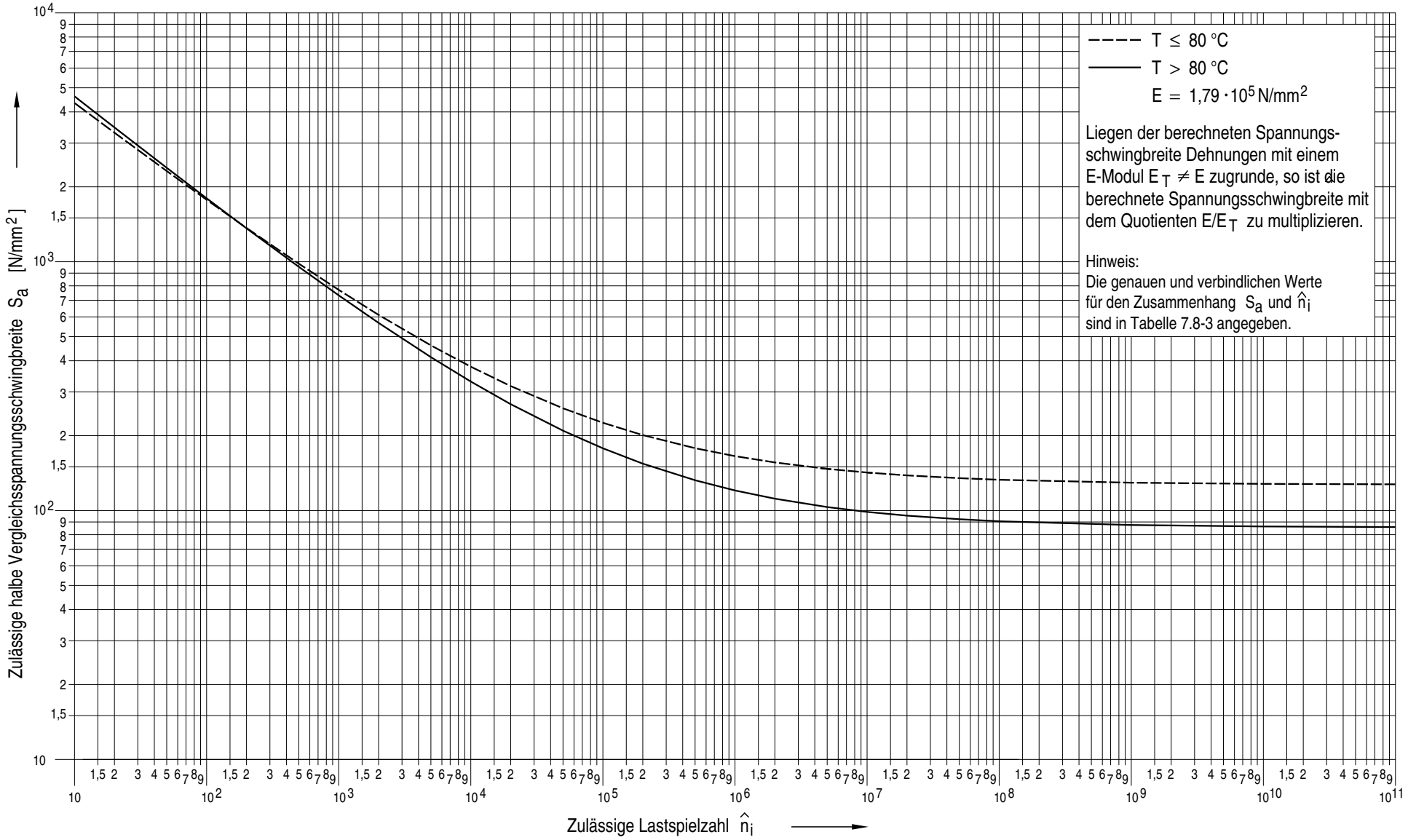


Bild 7.8-2: Ermüdungskurven für die austenitischen Stähle 1.4550 und 1.4541

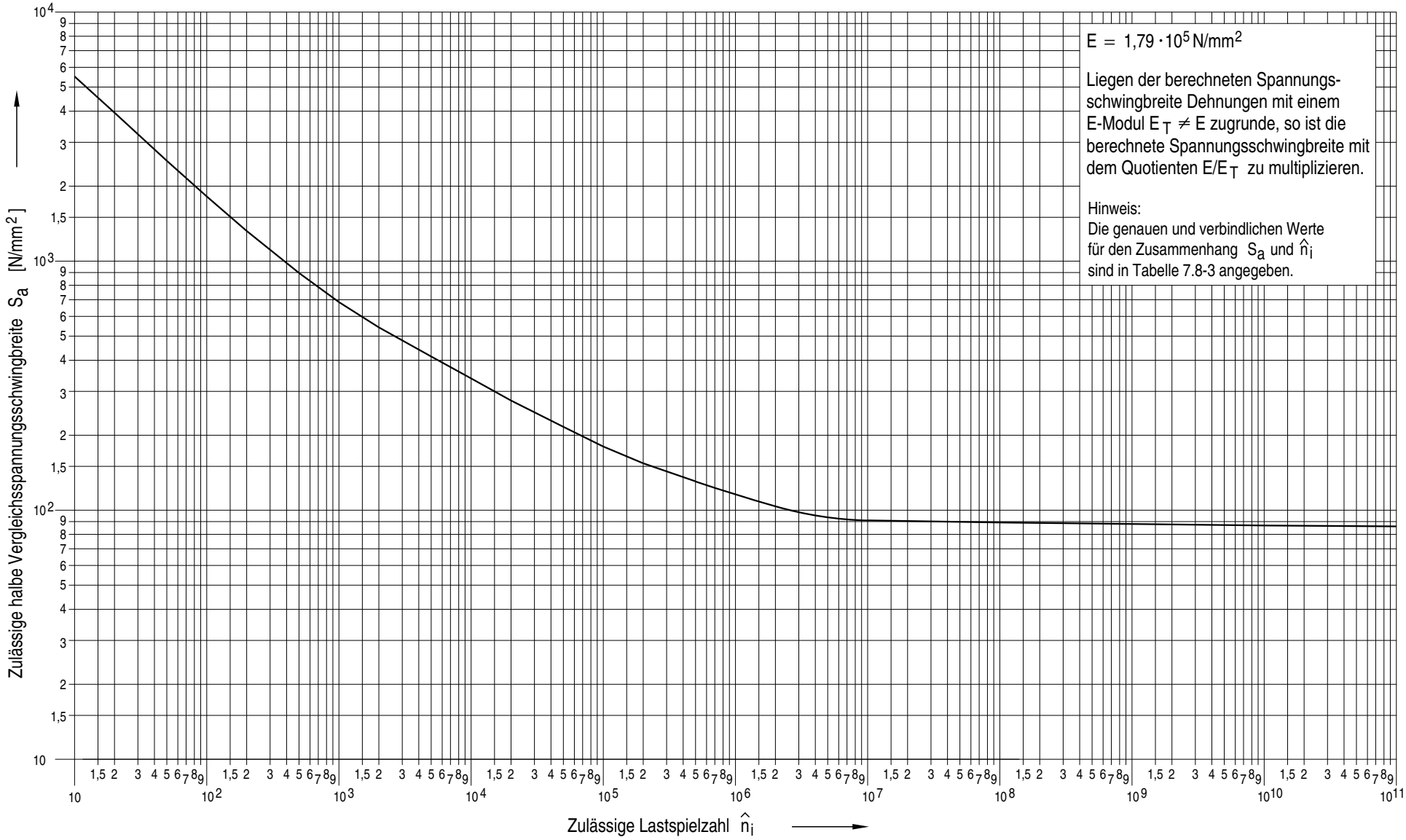
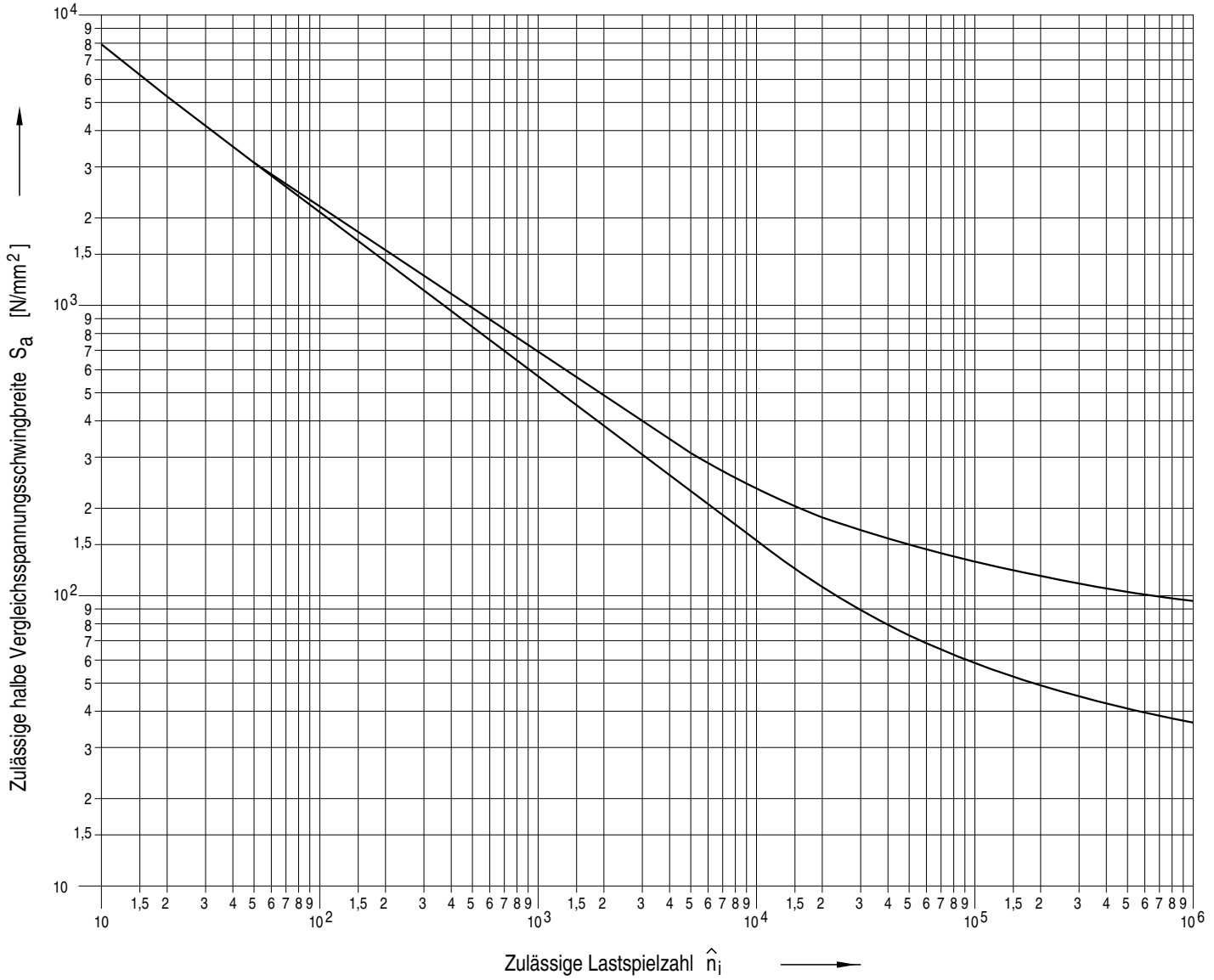


Bild 7.8-3: Ermüdungskurve für austenitische Stähle außer den Stählen 1.4550 und 1.4541



$E = 2{,}07 \cdot 10^5\ N/mm^2$

Liegen der berechneten Spannungsschwingbreite Dehnungen mit einem E-Modul $E_T \neq E$ zugrunde, so ist die berechnete Spannungsschwingbreite mit dem Quotienten E/E_T zu multiplizieren.

Hinweis:
Die genauen und verbindlichen Werte für den Zusammenhang S_a und $\hat{n}_i$ sind in Tabelle 7.8-3 angegeben.

maximale Nennspannung $\leq 2{,}7 \cdot S_m$

maximale Nennspannung $= 3{,}0 \cdot S_m$

Bild 7.8-4: Ermüdungskurven für hochfeste Schraubenstähle für Temperaturen ≤ 370 °C

Bild	Zulässige halbe Vergleichsspannungsschwingbreite S_a [1)2)] bei zulässiger Lastspielzahl $\hat{n}$																								
	$1{\cdot}10^1$	$2{\cdot}10^1$	$5{\cdot}10^1$	$1{\cdot}10^2$	$2{\cdot}10^2$	$5{\cdot}10^2$	$1{\cdot}10^3$	$2{\cdot}10^3$	$5{\cdot}10^3$	$1{\cdot}10^4$	$1{,}2{\cdot}10^{4*}$	$2{\cdot}10^4$	$5{\cdot}10^4$	$1{\cdot}10^5$	$2{\cdot}10^5$	$5{\cdot}10^5$	$1{\cdot}10^6$	$2{\cdot}10^6$	$5{\cdot}10^6$	$1{\cdot}10^7$	$2{\cdot}10^7$	$5{\cdot}10^7$	$1{\cdot}10^8$	$1{\cdot}10^9$	$1{\cdot}10^{10}$	$1{\cdot}10^{11}$
7.8-1: Kurve Zugfestigkeit 790 - 900 N/mm²	2900	2210	1590	1210	931	689	538	427	338	303	296	248	200	179	165	152	138								
7.8-1: Kurve Zugfestigkeit ≤ 550 N/mm²	4000	2830	1900	1410	1070	724	572	441	331	262	—	214	159	138	114	93,1	86,2								
7.8-2 T ≤ 80 °C	4341	3302	2312	1773	1368	981	770	612	461	378	—	316	257	225	201	178	165	156	147	142	138	135	133	129	128	127
7.8-2 T > 80 °C	4618	3467	2381	1798	1363	953	732	568	413	330	—	268	209	178	154	132	120	112	103	99	95	92	91	87	86	86
7.8-3	5508	3947	2522	1816	1322	894	684	542	413	338	—	275	216	180	154	130	116	104	94	91	—	—	89	88	87	86
7.8-4: Kurve max. Nennspannung [3)] ≤ 2,7 · S_m	7930	5240	3100	2210	1550	986	689	490	310	234	—	186	152	131	117	103	93,1								
7.8-4: Kurve max. Nennspannung [3)] = 3,0 · S_m	7930	5240	3100	2070	1415	842	560	380	230	155	—	105	73	58	49	42	36,5								

[1)] Den hier aufgeführten Werten für S_a liegen die jeweils in den **Bildern 7.8-1 bis 7.8-4** angegebenen E-Moduln zugrunde.

[2)] Zwischen den Tabellenwerten darf bei doppeltlogarithmischer Darstellung linear interpoliert werden (im doppeltlogarithmischen Diagramm: Geradenstücke zwischen den Stützpunkten). Ist für einen gegebenen Wert $S_a = S$ die zugehörige Lastspielzahl $\hat{n}$ zu ermitteln, dann geschieht dies mit Hilfe der benachbarten Stützwerte $S_j < S < S_i$ und $n_j > n > n_i$ wie folgt:

$$\hat{n} / \hat{n}_i = \left(\hat{n}_j / \hat{n}_i\right)^{\log\frac{S_i}{S} / \log\frac{S_i}{S_j}}$$

Beispiel: gegeben: Stahl entsprechend Zugfestigkeit ≤ 550 N/mm², S_a = 370 N/mm²

daraus folgt: S_i = 441 N/mm², S_j = 331 N/mm², $\hat{n}_i = 2 \cdot 10^3$, $\hat{n}_j = 5 \cdot 10^3$

$$\hat{n} / 2000 = (5000 / 2000)^{\log\frac{441}{370} / \log\frac{441}{331}}$$

$$\hat{n} = 3500$$

[3)] Nennspannung = Zugspannung + Biegespannung

* Dieser Stützpunkt ist zwecks genauerer Darstellung des Kurvenverlaufs zusätzlich angegeben.

Tabelle 7.8-3: Wertetabelle für die Ermüdungskurven der Bilder 7.8-1 bis 7.8-4

7.9 Verformungsanalyse

Eine Verformungsanalyse ist nur dann durchzuführen, wenn aus Funktionsgründen spezifizierte Verformungsgrenzen eingehalten werden müssen.

7.10 Stabilitätsanalyse

Wenn unter Einwirkung einer Beanspruchung eine plötzliche Verformung ohne wesentliche Laststeigerung zu erwarten ist, muss eine Stabilitätsanalyse durchgeführt werden.

7.11 Spannungs-, Verformungs- und Ermüdungsanalyse für Flanschverbindungen

7.11.1 Allgemeines

(1) Die Beanspruchungszustände der Flanschverbindungen sind für die maßgebenden Lastfälle zu ermitteln. Die Nachprüfung der Kraft- und Verformungsverhältnisse darf näherungsweise nach dem in Abschnitt A 2.10.5 angegebenen vereinfachten Verfahren durchgeführt werden. Der genaue Nachweis ist unter Berücksichtigung des elastischen Verhaltens der Struktur entsprechend diesem Abschnitt zu führen. Die Dimensionierung und Spannungsanalyse darf nach den Abschnitten A 2.9 und A 2.10 erfolgen.

(2) In die Struktur sind, soweit erforderlich, einzubeziehen:

a) die paarigen Flansche, die nichtpaarigen Flansche oder der Flansch mit ebenem oder gewölbtem Deckel,
b) die Schrauben,
c) die Dichtung und
d) die unmittelbar angeschlossene Schale.

(3) Als Lastfälle sind zu untersuchen:

a) der Einbauzustand oder die Einbauzustände,
b) die Zustände des bestimmungsgemäßen Betriebes,
c) gegebenenfalls Störfallzustände.

(4) Die Beanspruchungen der Flanschverbindung in den Lastfällen des bestimmungsgemäßen Betriebes und gegebenenfalls der Störfälle sind in Verbindung mit dem zugehörigen Einbauzustand, d. h. unter Einhaltung der Konstanz des Mutternweges (Definition siehe Abschnitt A 2.10.6.1), zu berechnen.

(5) Für die Flansche, für die gegebenenfalls zur Flanschverbindung gehörenden Deckel und für die angeschlossenen Schalen ist eine Spannungsanalyse nach Abschnitt 7.7 sowie eine Ermüdungsanalyse nach Abschnitt 7.8 durchzuführen. Die Spannungen sind nach **Tabelle 6.7-2** zu begrenzen. Für Schrauben ist eine Spannungs- und Ermüdungsanalyse nach Abschnitt 7.11.2 erforderlich.

(6) Die Beurteilung der Dichtungsbeanspruchungen ist nach gesicherten Angaben des Dichtungsherstellers, z. B. anhand von Dichtungsdatenblättern (siehe Abschnitt A 2.11), vorzunehmen. Die Restdichtungskraft ist entsprechend den jeweiligen Anforderungen unter Berücksichtigung von Setzvorgängen zu kontrollieren.

7.11.2 Spannungs- und Ermüdungsanalyse für Schrauben

(1) Bei der Beurteilung der Beanspruchungen in Schrauben werden unterschieden: Mittlere Zugspannungen, Biegespannungen, Torsionsspannungen und Spannungsspitzen.

(2) Eine spezifische Ermüdungsanalyse für Schrauben ist durchzuführen, wenn die Schrauben nicht durch den vereinfachten Nachweis der Sicherheit gegen Ermüdung der Komponente gemäß Abschnitt 7.8.2 abgedeckt sind. Hierbei sind die Werkstoffeigenschaften und die geometrischen Randbedingungen der Schraubenverbindung z. B. bei der Ermittlung der Lastspiele aus Druckschwankungen und Temperaturunterschieden zu berücksichtigen.

(3) Die zulässigen Spannungen für Schrauben sind in **Tabelle 6.7-2** angegeben.

(4) Die Beurteilung des Ermüdungsverhaltens erfolgt unter Zugrundelegung der Spannungsschwingbreite der maximalen Gesamtspannung, unter Berücksichtigung des Federungsverhaltens der Schraubenverbindung, wobei die Schwingbreite der Normalspannungen mit einem Kerbfaktor kleiner als oder gleich 4 zu multiplizieren ist. Der Erschöpfungsgrad ist gemäß Gleichung (7.8-1) zu bilden und zu beschränken.

Kerbfaktoren kleiner 4 müssen nachgewiesen werden.

(5) Für Schrauben mit spezifizierten Zugfestigkeiten R_{mRT} kleiner als oder gleich 690 N/mm² gelten die Ermüdungskurven gemäß **Bild 7.8-1, Bild 7.8-2** oder **Bild 7.8-3**, für hochfeste Schrauben mit spezifizierten Zugfestigkeiten R_{mRT} größer als 690 N/mm² ist die Ermüdungskurve für Temperaturen bis 370 °C im **Bild 7.8-4** angegeben. Diese Schrauben sind als Dehnschrauben gemäß Abschnitt A 2.9.3 (2) auszuführen.

7.12 Vermeidung des Versagens infolge thermisch bedingter fortschreitender Deformation für Bauteile der Prüfgruppe A1

7.12.1 Allgemeines

(1) Überschreitet die Vergleichsspannungsschwingbreite aus primären Spannungen P und sekundären Spannungen Q bei Stählen den Wert $3 \cdot S_m$, bei Stahlguss den Wert $4 \cdot S_m$ (siehe Abschnitt 7.8.1), so ist gemäß den folgenden Festlegungen zu zeigen, dass die mit den Lastspielen fortschreitende Deformation in zulässigen Grenzen bleibt.

(2) Beim Nachweis der Begrenzung von zyklisch fortschreitender Deformation sind die gleichen Lastfälle der verschiedenen Stufen sowie deren Lastfallkombinationen zu berücksichtigen, die auch bei der Ermüdungsanalyse nachgewiesen wurden.

(3) Der Nachweis der Begrenzung von zyklisch fortschreitender Deformation darf als vereinfachter Nachweis (Abschnitt 7.12.2) unter Verwendung von Näherungsformeln erfolgen; genauere Nachweise erfordern eine Dehnungsermittlung mittels elasto-plastischer Analysen (Abschnitt 7.12.3) oder mittels Messungen (Abschnitt 7.12.4).

7.12.2 Vereinfachter Nachweis mit Näherungsformeln

7.12.2.1 Anwendungsbereich

(1) Der vereinfachte Nachweis darf angewandt werden auf

a) achsensymmetrische Strukturen unter achsensymmetrischen Belastungen und ausreichend weit von lokalen Strukturdiskontinuitäten entfernt, oder
b) allgemeine Strukturen, in denen die thermische Spitzenspannung vernachlässigbar ist (d. h. lineare thermische Spannungsverteilung über die Wand).

(2) Die Nachweise basieren auf den Ergebnissen elastischer Analysen und einer Spannungsklassifikation entsprechend Abschnitt 7.7.3; dabei finden folgende auf die Streckgrenze $R_{p0,2T}$ bezogene Spannungsparameter Verwendung:

$$X = (P_l + P_b/K)_{max}/R_{p0,2T} \quad (7.12\text{-}1)$$

$$Y = (Q_R)_{max}/R_{p0,2T} \quad (7.12\text{-}2)$$

$$\text{wobei } T = 0{,}25 \cdot \breve{T} + 0{,}75 \cdot \hat{T} \quad (7.12\text{-}3)$$

mit (jeweils bezogen auf das betrachtete Lastspiel)

$(P_l + P_b/K)_{max}$ maximaler Wert der primären Vergleichsspannung, wobei der Biegespannungsanteil P_b mit dem Faktor K angepasst ist,

$(Q_R)_{max}$ maximale Schwingbreite der sekundären Vergleichsspannung,

$\hat{T}$ maximale Temperatur,

$\breve{T}$ minimale Temperatur,

K Stützfaktor, z. B. K = 1,5 für Rechteckquerschnitte.

(3) Bei Bedingungen entsprechend 7.12.2.1 (1) a) vereinfachen sich die Spannungsverhältnisse auf

X = maximale Membranspannung infolge Innendruck, dividiert durch $R_{p0,2T}$, und

Y = maximale Schwingbreite der Wärmespannung, dividiert durch $R_{p0,2T}$.

(4) Die Benutzung der Streckgrenze in den Spannungsverhältnissen statt der niedrigeren Proportionalitätsgrenze lässt solange ein kleines Anwachsen der Dehnungen während jedem Lastspiel zu, bis durch die Kaltverfestigung die Proportionalitätsgrenze auf den Wert der Streckgrenze erhöht ist.

(5) Dieses Verfahren ist anwendbar, solange die zu bewertende Lastspielzahl den Wert

$$n = \hat{n}\,(2 \cdot S_a = R_{p0,2T}) \qquad (7.12\text{-}4)$$

nicht überschreitet.

7.12.2.2 Nachweis durch Begrenzung der Spannungen

(1) Mit positiver Führung dieses Nachweises ist thermisch bedingte fortschreitende Deformation ausgeschlossen.

(2) Bei der Berechnung der zulässigen Sekundärspannung darf der Sekundärspannungsparameter Y mit dem größeren Wert von $R_{p0,2T}$ und $1,5 \cdot S_m$ multipliziert werden.

(3) Bei vorgegebenem Primärspannungsparameter X ist für die Schwingbreite folgender Sekundärspannungsparameter Y zulässig:

Fall 1: Linearer Temperaturverlauf oder linearer Sekundärspannungsverlauf über die Wanddicke:

für $0,0 < X \le 0,5$ ist $Y = 1/X$ (7.12-5)

für $0,5 < X < 1,0$ ist $Y = 4 \cdot (1-X)$ (7.12-6)

Fall 2: Parabolischer, monoton anwachsender oder abfallender Temperaturverlauf über die Wanddicke:

für $0,615 \le X \le 1,0$ ist $Y = 5,2 \cdot (1-X)$ (7.12-7)

für $X < 0,615$ ist $Y\,(X=0,5) = 2,70$

$Y\,(X=0,4) = 3,55$

$Y\,(X=0,3) = 4,65$

Fall 3: Beliebige Bauteilgeometrie und beliebige Belastung:

für $X \le 1,0$ ist

$$Y = 3,25\,(1-X) + 1,33\,(1-X)^3 + 1,38\,(1-X)^5 \qquad (7.12\text{-}8)$$

Anhaltswerte: $Y\,(X=1,0) = 0,00$

$Y\,(X=0,0) = 5,96$

7.12.2.3 Nachweis durch Begrenzung der Dehnungen

(1) Dieser Nachweis darf nur angewendet werden auf Bedingungen entsprechend Abschnitt 7.12.2.1 (1) a).

(2) Bei der Ermittlung der Dehnungen werden zusätzlich noch durch Index i gekennzeichnete Zustände betrachtet; es werden bezeichnet mit

Index 1 der untere Zustand bei der Extremwertbildung der Schwingbreite von Wärmespannung oder Sekundärspannung (niedrige Temperatur) und mit

Index 2 der obere Zustand bei der Extremwertbildung der Schwingbreite von Wärmespannung oder Sekundärspannung (hohe Temperatur).

(3) Werden die Spannungsparameter

X_1, Y_1 unter Verwendung der Streckgrenze $R_{p0,2T_1}$ bei der über die Wand gemittelten Temperatur T_1 zum Zustand 1 sowie

X_2, Y_2 unter Verwendung der Streckgrenze $R_{p0,2T_2}$ bei der über die Wand gemittelten Temperatur T_2 zum Zustand 2

ermittelt, so sind zur Bestimmung der Hilfsgrößen Z_i (i=1,2) folgende Fälle zu unterscheiden:

a) für $Y_i \cdot (1-X_i) > 1$ ist $Z_i = X_i \cdot Y_i$ (7.12-9)

b) für $Y_i \cdot (1-X_i) \le 1$ und $X_i + Y_i > 1$

ist $$Z_i = Y_i + 1 - 2 \cdot \sqrt{(1-X_i) \cdot Y_i} \qquad (7.12\text{-}10)$$

c) für $X_i + Y_i \le 1$ ist $Z_i = X_i$ (7.12-11)

(4) Daraus folgt in Abhängigkeit von der Hilfsgröße Z_i und unter Beachtung des Verhältnisses der Streckgrenzenwerte $\rho = R_{p0,2T_2} / R_{p0,2T_1}$ das plastische Dehnungsinkrement $\Delta\varepsilon$ pro Lastspiel zu

$Z_1 \le \rho$: $\Delta\varepsilon = 0$ (7.12-12)

$\rho < Z_1 \le 1$:

$$\Delta\varepsilon = \frac{R_{p0,2T_2} \cdot (Z_1/\rho - 1)}{E_{T_2}} \qquad (7.12\text{-}13)$$

falls $(Z_2 \cdot \rho - 1) \le 0$

$$\Delta\varepsilon = \frac{R_{p0,2T_2} \cdot (Z_1/\rho - 1) + R_{p0,2T_1} \cdot (Z_2 \cdot \rho - 1)}{E_{T_2}} \qquad (7.12\text{-}14)$$

falls $(Z_2 \cdot \rho - 1) > 0$

$Z_1 > 1$:

$$\Delta\varepsilon = \frac{R_{p0,2T_1} \cdot (Z_1 - 1)}{E_{T_1}} \qquad (7.12\text{-}15)$$

falls $(Z_2 - 1) \le 0$

$$\Delta\varepsilon = \frac{R_{p0,2T_1} \cdot (Z_1 - 1)}{E_{T_1}} + \frac{R_{p0,2T_2} \cdot (Z_2 - 1)}{E_{T_2}} \qquad (7.12\text{-}16)$$

falls $(Z_2 - 1) > 0$

(5) Die Summe aller Dehnungsinkremente darf am Ende der Lebensdauer den Wert 2 % nicht überschreiten.

7.12.3 Allgemeiner Nachweis durch elastisch-plastische Analyse

(1) Zur Bestimmung der plastischen Dehnungen bei zyklischer Belastung kann eine elasto-plastische Analyse durchgeführt werden. Das dabei zur Anwendung kommende Werkstoffmodell muss geeignet sein zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der zyklischen Dehnungen.

(2) Soll bei sich verfestigenden Werkstoffen bei der Bestimmung der gesamten Dehnung die Abnahme des Dehnungsinkrementes von Lastspiel zu Lastspiel in Anspruch genommen werden, so muss das Belastungshistogramm mehrere Lastspiele umfassen. Aus dem entsprechend dem Belastungshistogramm ermittelten zeitlichen Dehnungsverlauf kann durch konservative Extrapolation die maximale akkumulierte Dehnung berechnet werden.

(3) Die lokal akkumulierte plastische Zughauptdehnung darf am Ende der Lebensdauer an keiner Stelle eines Querschnittes folgende Maximalwerte überschreiten: 5,0 % im Grundwerkstoff, 2,5 % in Schweißnähten.

7.12.4 Gesonderter Nachweis durch Messungen

(1) Der zyklische Dehnungszuwachs kann auch durch Messungen bestimmt werden.

(2) Hinsichtlich der Extrapolation auf die akkumulierte plastische Gesamtdehnung sowie die Grenzen der zulässigen Dehnung gilt Abschnitt 7.12.3.

8 Komponentenspezifische Analyse des mechanischen Verhaltens

8.1 Allgemeines

(1) Die nachfolgend angegebenen komponentenspezifischen Analysen und Festigkeitsnachweise sind anerkannte und gebräuchliche Berechnungsverfahren. Werden mehrere Verfahren angegeben, sind diese innerhalb ihrer Anwendungsgrenzen zugelassen.

Hinweis:
Diese Verfahren basieren üblicherweise auf unterschiedlichen Grundlagen und enthalten unterschiedliche Konservativitäten, woraus nicht identische Ergebnisse resultieren können.

(2) Die komponentenspezifischen Analysen des mechanischen Verhaltens dienen dem Nachweis von Beanspruchungen und ersetzen bei Einhaltung der jeweils angegebenen konstruktiven und belastungsmäßigen Voraussetzungen sowie der jeweils angegebenen Spannungsgrenzen die Nachweise der allgemeinen Analyse des mechanischen Verhaltens nach Abschnitt 7 ganz oder teilweise.

(3) Wird mit einer der nachfolgend aufgeführten komponentenspezifischen Analysen die gegebene Belastung nicht vollständig erfasst, so sind die Beanspruchungen aus den Teilbelastungen gesondert zu ermitteln und entsprechend zu überlagern.

(4) Da Schweißnähte den Anforderungen in KTA 3211.1 und KTA 3211.3 zu genügen haben, braucht der Einfluss der Schweißnähte bei der Festlegung der zulässigen Spannungen nicht gesondert berücksichtigt zu werden.

(5) Im Rahmen von Ermüdungsanalysen sind die hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit reduzierenden Einflüsse von Schweißnähten in Abhängigkeit von der Schweißnahtbearbeitung zu berücksichtigen.

Hinweis:
Spannungsbeiwerte hierzu sind in **Tabelle 8.5-1** enthalten.

(6) Bei der komponentenspezifischen Analyse ist die Wanddicke s_c gemäß Abschnitt 7.1.4 zu verwenden. Dabei ist eine Plattierung entsprechend Abschnitt 7.1.3 zu berücksichtigen.

8.2 Behälter

8.2.1 Radiale Stutzen unter Innendruck und Rohranschlusslasten

8.2.1.1 Allgemeines

(1) Stutzen in drucktragenden zylindrischen oder kugelförmigen Schalen müssen einschließlich ihres Übergangsbereichs allen gleichzeitig wirkenden Belastungen, wie z. B. Innendruck und Rohranschlusslasten standhalten.

(2) Abhängig von der jeweiligen Beanspruchungsstufe, Prüfgruppe und Spannungskategorie sind die zulässigen Spannungen den **Tabellen 6.7-1** und **7.7-4** zu entnehmen.

(3) Die Anforderungen an die konstruktive Gestaltung gemäß Abschnitt 5.2 sind zu beachten.

(4) Die in Abschnitt 8.2.1.4 angegebenen Verfahren berücksichtigen nicht die gegenseitige Beeinflussung durch benachbarte Störstellen. Diese ist gegeben, wenn der Abstand der Störstellen $2 \cdot \sqrt{d_{Hm} \cdot s_H}$ unterschreitet.

8.2.1.2 Stutzen kleiner als oder gleich DN 50

Werden Stutzen kleiner als oder gleich DN 50 für Innendruck nach den Gleichungen des Anhangs A 2.8 dimensioniert, sind Analysen des mechanischen Verhaltens nicht erforderlich.

8.2.1.3 Stutzen größer als DN 50 mit überwiegender Innendruckbelastung

(1) Werden Stutzen mit überwiegender Innendruckbelastung, z. B. Mannlochstutzen, Blindstutzen und sonstige Stutzen ohne Rohrleitungsanschluss, nach Anhang A 2.8 dimensioniert, sind Analysen des mechanischen Verhaltens nicht erforderlich.

(2) Dies gilt auch für Stutzen mit Rohrleitungsanschluss, wenn die durch äußere Lasten hervorgerufenen zusätzlichen Primärspannungen 5 % der dafür nach **Tabelle 6.7-1** zulässigen Werte nicht überschreiten.

8.2.1.4 Stutzen größer als DN 50 mit Belastung durch Innendruck und Rohranschlusslasten

(1) Die Dimensionierung der Ausschnittsverstärkung erfolgt zunächst für Innendruck nach Anhang A 2.8, wobei für die Rohranschlusslasten Reserven vorzusehen sind.

Die Stutzenwanddicke muss mindestens die 1,5-fache Nennwanddicke einer angeschlossenen Rohrleitung aufweisen (siehe auch **Tabelle 5.2-1**).

Zur Überprüfung der Zulässigkeit von Rohranschlusslasten ist ergänzend ein Spannungsnachweis durchzuführen, bei dem die Spannungen infolge Innendruck und Rohranschlusslasten erfasst werden.

(2) Für die Ermittlung der Innendruckspannungen sind die beiden nachfolgend aufgeführten Verfahren zugelassen:

a) Verfahren 1 basiert auf einer Parameterstudie, wobei idealelastisches Werkstoffverhalten zugrunde gelegt wurde. Mit dem Verfahren können die Spannungskomponenten der Membran- sowie Membran- plus Biegespannungen mit Hilfe von Spannungsbeiwerten ermittelt werden. Die Beiwerte beziehen sich auf senkrecht zur Behälterwand verlaufende Schnitte, die für die Überlagerung von Spannungen aus äußeren mechanischen Lasten und Innendruckbelastung maßgebend sind. Das Verfahren ist vorzugsweise für Komponenten der Prüfgruppe A1 anzuwenden.
b) Verfahren 2: Diese Methode ergibt ausschließlich maximale Gesamtspannungen an repräsentativen Stellen infolge Innendruck.

(3) Die Berücksichtigung von äußeren Lasten darf gesondert mit einem Verfahren nach Abschnitt 8.2.2.4 erfolgen.

(4) Die Überlagerung der Spannungen aus Innendruck und äußeren Lasten sowie deren Absicherung erfolgt gemäß Abschnitt 8.2.3.

(5) Die Berechnungsverfahren 1 und 2 weisen die Spannungen in der Stutzenwand außerhalb des Übergangsbereichs nicht aus. Bei Stutzen mit einem Wanddickenverhältnis $s_A/s_R \leq 1{,}5$ nach **Bild 8.2-1** oder **Bild 8.2-2** ist deshalb die Spannung in der Stutzenwand getrennt zu überprüfen.

8.2.2 Verfahren zur Berechnung von radialen Stutzen

8.2.2.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt 8.2.2

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
d_{Am}	mittlerer Stutzendurchmesser	mm
d_{Hm}	mittlerer Durchmesser der Grundschale	mm
d_i	innerer Durchmesser oder Wölbungsdurchmesser des Bodens	mm
p	Innendruck	MPa
$p_{zul\ s}$	zulässiger Druck im Übergangsbereich Grundschale/Stutzen bei gegebener Geometrie und bei Ausnutzung der zulässigen Spannung	MPa

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
$p_{zul\,u}$	zulässiger Druck für die ungestörte Grundschale bei Ausnutzung der zulässigen Spannung	MPa
s_A	Stutzenwanddicke	mm
s_c	Wanddicke im unverstärkten Bereich gemäß Abschnitt 7.1.4	mm
s_H	Grundschalenwanddicke	mm
s_R	Nennwanddicke des anschließenden Rohres	mm
Q	sekundäre Membran- oder Biegespannung	N/mm²
P_L	lokale Membranspannung	N/mm²
S_m	Spannungsvergleichswert für die Komponenten der Prüfgruppe A1	N/mm²
α	Spannungsbeiwert für P_L oder $P_L + Q$ in Abhängigkeit von Ort und Richtung der Spannung gemäß Bildern 8.2-6 bis 8.2-13	—
β_k	Spannungsbeiwert für radiale Stutzen in Kugelschale	—
β_z	Spannungsbeiwert für radiale Stutzen in Zylinderschale	—
φ	Winkel zwischen Abzweig und Grundkörper	Grad
σ_a	Spannungskomponenten in axialer Richtung	N/mm²
σ_r	Spannungskomponenten in radialer Richtung	N/mm²
σ_t	Spannungskomponenten in Umfangsrichtung	N/mm²
σ_V	Vergleichsspannung	N/mm²

8.2.2.2 Verfahren 1: Spannungsindexmethode für primäre und sekundäre Spannungen infolge Innendruck

Hinweis:
Das Verfahren ist geeignet, die Spannungen zur Überlagerung mit Spannungen aus äußeren Lasten zur Verfügung zu stellen. Das Verfahren liefert keine Spannungsspitzen und deshalb auch keine Gesamtspannungen.

Zur Ermittlung der primären oder primären plus sekundären Spannungen in der Grundschale kann, z. B. für zylindrische und kugelförmige Schalen, folgendes Spannungsindexverfahren angewandt werden:

a) Radiale Stutzen in zylindrischen Schalen

Folgender Geltungsbereich ist zu beachten:

Durchmesser-/Wanddickenverhältnis
$30 \leq = d_{Hm}/s_H \leq = 200$

Wanddickenverhältnis
$0{,}75 \leq = s_A/s_H \leq = 1{,}3$

Durchmesserverhältnis

$$\frac{d_{Am}}{d_{Hm}} \leq 0{,}6$$

Zur Absicherung der Beanspruchungen im Übergangsbereich Grundschale/Stutzen sind die Spannungen an den Orten A und C gemäß Bild 8.2-1 zu ermitteln und zu beschränken.

Die Spannungen aus Innendruck werden wie folgt ermittelt:

$$\sigma = \alpha \cdot \frac{d_{Hm}}{2 \cdot s_H} \cdot p \qquad (8.2\text{-}1)$$

Die Spannungsbeiwerte α sind abhängig vom bezogenen Stutzendurchmesser $d_{Am}/\sqrt{d_{Hm} \cdot s_H}$ und dem Wanddickenverhältnis s_A/s_H den Bildern gemäß **Tabelle 8.2-1** zu entnehmen.

b) Radiale Stutzen in kugelförmigen Schalen

Folgender Geltungsbereich ist zu beachten:

Durchmesser-/Wanddickenverhältnis
$50 \leq = d_{Hm}/s_H \leq = 400$

Wanddickenverhältnis
$0{,}77 \leq = s_A/s_H \leq = 1{,}3$

Die Spannungen aus dem Innendruck werden wie folgt ermittelt:

$$\sigma = \alpha \cdot \frac{d_{Hm}}{4 \cdot s_H} \cdot p \qquad (8.2\text{-}2)$$

Die Spannungsbeiwerte α sind abhängig vom bezogenen Stutzendurchmesser $d_{Am}/\sqrt{d_{Hm} \cdot s_H}$ und dem Wanddickenverhältnis s_A/s_H den Bildern gemäß **Tabelle 8.2-2** zu entnehmen.

Ort	Spannungskategorie	Bild
A	P_L	8.2-4
C	P_L	8.2-5
A Innen	$P_L + Q$	8.2-6
C Innen	$P_L + Q$	8.2-7
A Außen	$P_L + Q$	8.2-8
C Außen	$P_L + Q$	8.2-9

Tabelle 8.2-1: Zuordnung der Spannungsbeiwerte α für Zylinderschalen

Spannungskategorie	Bild
P_L	8.2-10
$P_L + Q$	8.2-11

Tabelle 8.2-2: Zuordnung der Spannungsbeiwerte α für Kugelschalen

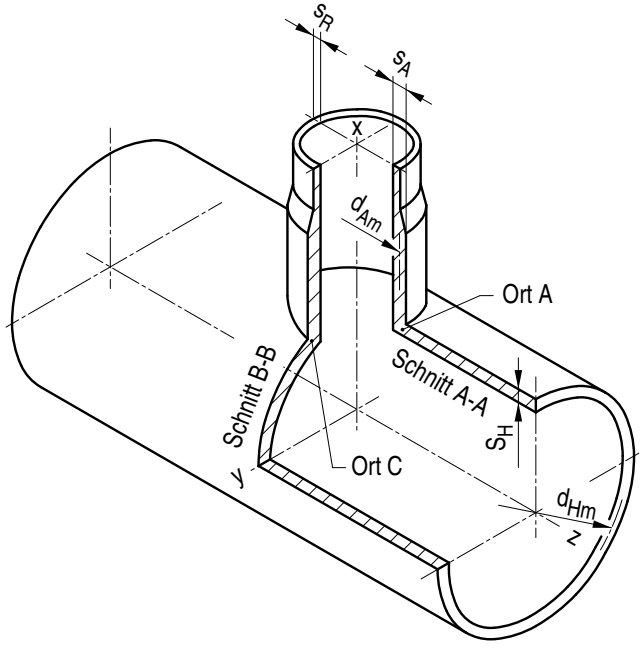


Bild 8.2-1: Stutzen an zylindrischer Schale

8.2.2.3 Verfahren 2: Spannungsindexmethode für maximale Gesamtspannungen infolge Innendruck

Folgender Geltungsbereich ist zu beachten:

a) $\frac{d_{Am}}{\sqrt{d_{Hm} \cdot s_H}} \leq 0{,}8$

b) $\frac{d_{Hm}}{s_H} \leq 100$

c) $\frac{d_{Am}}{d_{Hm}} \leq 0{,}5$

Die Spannungsindizes sind als das jeweilige Verhältnis der betreffenden Normalspannungskomponente oder der Vergleichsspannung (der maximalen Gesamtspannung inklusive Spannungsspitze F) zur mittleren Umfangsspannung (Membranspannung) des ungestörten Grundkörpers definiert. Die mit Hilfe der Spannungsindizes ermittelten Vergleichsspannungen und Vergleichsspannungsschwingbreiten sind nach Abschnitt 7 zu begrenzen.

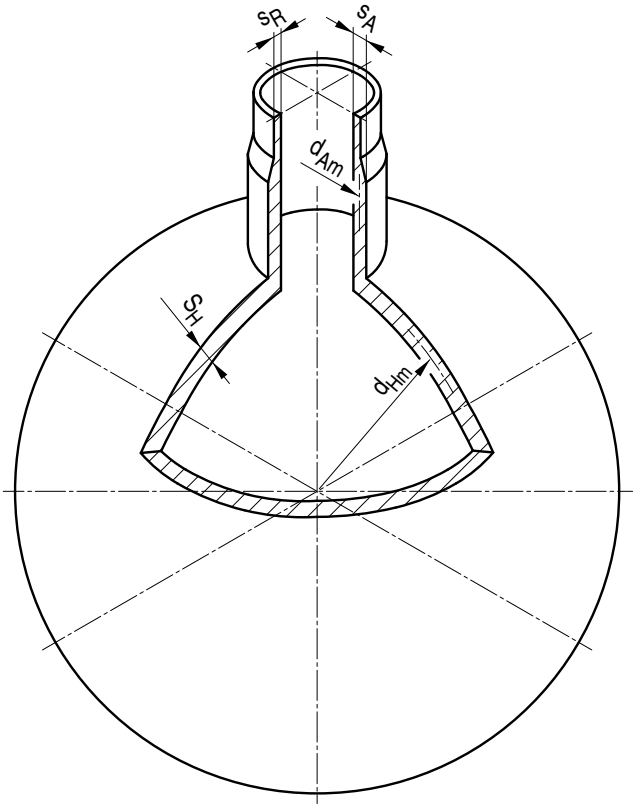


Bild 8.2-2: Stutzen an kugelförmiger Schale

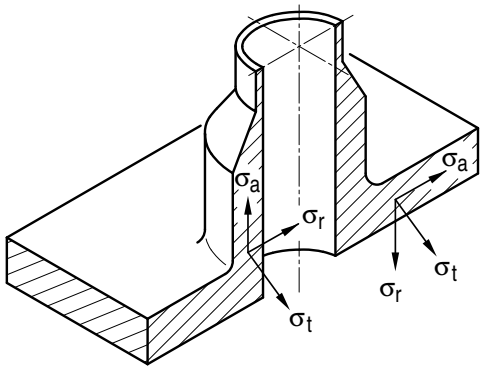


Bild 8.2-3: Richtungen der Spannungskomponenten

Stutzen in Kugelschalen und gewölbten Böden		
Spannung	Innenseite	Außenseite
σ_t	2,0	2,0
σ_a	- 0,2	2,0
σ_r	$- 4 \cdot s_c/d_i$	0
S	2,2	2,0

Stutzen in Zylinderschalen				
Spannung	Längsschnitt		Querschnitt	
	Innenseite	Außenseite	Innenseite	Außenseite
σ_t	3,1	1,2	1,0	2,1
σ_a	- 0,2	1,0	- 0,2	2,6
σ_r	$- 2 \cdot s_c/d_i$	0	$- 2 \cdot s_c/d_i$	0
S	3,3	1,2	1,2	2,6

Tabelle 8.2-3: Spannungsindizes für Stutzen

Wenn die konstruktiven Bedingungen des Abschnitts 5.2.6 erfüllt sind, dürfen die Spannungsindizes der **Tabelle 8.2-3** verwendet werden. Sie betreffen nur die maximalen Spannungen im Bereich des Stutzens unter innerem Überdruck. Gegebenenfalls ist auch die Wirkung von äußeren Lasten und Temperaturfeldern zu berücksichtigen. In solchen Fällen ist die Gesamtspannung für jede Spannungsrichtung durch Überlagerung zu bilden.

Bei Stutzen, die Schrägstellungen innerhalb der in Abschnitt 5.2.6 angegebenen Grenzen aufweisen, sind die Spannungsindizes für die Tangentialspannung an der Innenseite mit folgenden Werten zu multiplizieren:

$1 + 2 \cdot \sin^2\varphi$ bei schrägen Abzweigen in Kugeln oder Abzweigen in Zylindern, die in Längsrichtung geneigt sind

$1 + \tan^{4/3}\varphi$ bei Abzweigen in Zylindern, die in Umfangsrichtung geneigt sind.

8.2.2.4 Ermittlung von Spannungen infolge Rohranschlusslasten

Geeignete Verfahren zur Schnittlastermittlung dürfen aus

a) WRC Bulletin 297 [2]

und gegebenenfalls

b) WRC Bulletin 107 [3] und

c) PD 5500:2000 [4], Annex G

entnommen werden.

8.2.3 Überlagerung von Spannungen aus Innendruck und Rohranschlusslasten

(1) Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt 8.2.3

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
p	Betriebsüberdruck	MPa
$p_{zul\ s}$	zulässiger Druck im Übergangsbereich Grundschale/Stutzen bei gegebener Geometrie und bei Ausnutzung der zulässigen Spannung	MPa
F_{ax}	Axialkraft im Stutzen	N
$F_{ax\ zul}$	*)	N
$F_{c'}$ F_l	Querkräfte im Stutzen	N
M_b	Biegemoment am Stutzen	Nmm

Formel-zeichen	Berechnungsgröße	Einheit
$M_{b\,zul}$	*)	Nmm
M_c	Umfangsmoment am Stutzen	Nmm
M_l	Längsmoment am Stutzen	Nmm
M_t	Torsionsmoment am Stutzen	Nmm
$M_{t\,zul}$	*)	Nmm

*) Index „zul“ bedeutet hierbei zulässiger Wert, wenn diese Belastungsgröße allein wirkt und dabei die zulässige Beanspruchung voll ausnutzen würde.

(2) Bei den Verfahren 1 und 2 sind die Spannungskomponenten aus Innendruck den entsprechenden aus äußeren Lasten zu überlagern und danach die Vergleichsspannung oder die Vergleichsspannungsschwingbreite zu bilden. Die so gebildeten Vergleichsspannungen oder Vergleichsspannungsschwingbreiten aus Innendruck plus Rohrleitungslasten sind mit den zulässigen Werten nach Tabelle **6.7-1** oder **7.7-4** getrennt nach Beanspruchungsstufen abzusichern.

(3) Wirken am Stutzen Einzellasten, die jeweils kleiner sind als die rechnerisch zulässigen Grenzlasten, so können diese Einzellasten vereinfacht und konservativ überlagert werden. Die zulässige Beanspruchung von Stutzen und drucktragender Schale wird eingehalten, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

a) Stutzen in zylindrischen Schalen:

$$\frac{p}{p_{zul\,s}} + \frac{F_{ax}}{F_{ax\,zul}} + \frac{M_b}{M_{b\,zul}} \le 1 \qquad (8.2\text{-}3)$$

b) Stutzen in kugelförmigen Schalen:

$$\frac{p}{p_{zul\,s}} + \frac{F_{ax}}{F_{ax\,zul}} + \frac{M_b}{M_{b\,zul}} \le 1 \qquad (8.2\text{-}4)$$

$$\text{wobei } M_b = \sqrt{M_l^2 + M_c^2} \qquad (8.2\text{-}5)$$

Für a) und b) gilt als Zusatzbedingung:

$$M_t \le \min\begin{cases} M_{c\,zul} \\ M_{l\,zul} \end{cases}$$

und

$$F_l,\ F_c \le F_{ax\,zul}$$

8.2.4 Ermüdungsanalyse

Die Ermüdungsanalyse ist gemäß Abschnitt 7.8 durchzuführen.

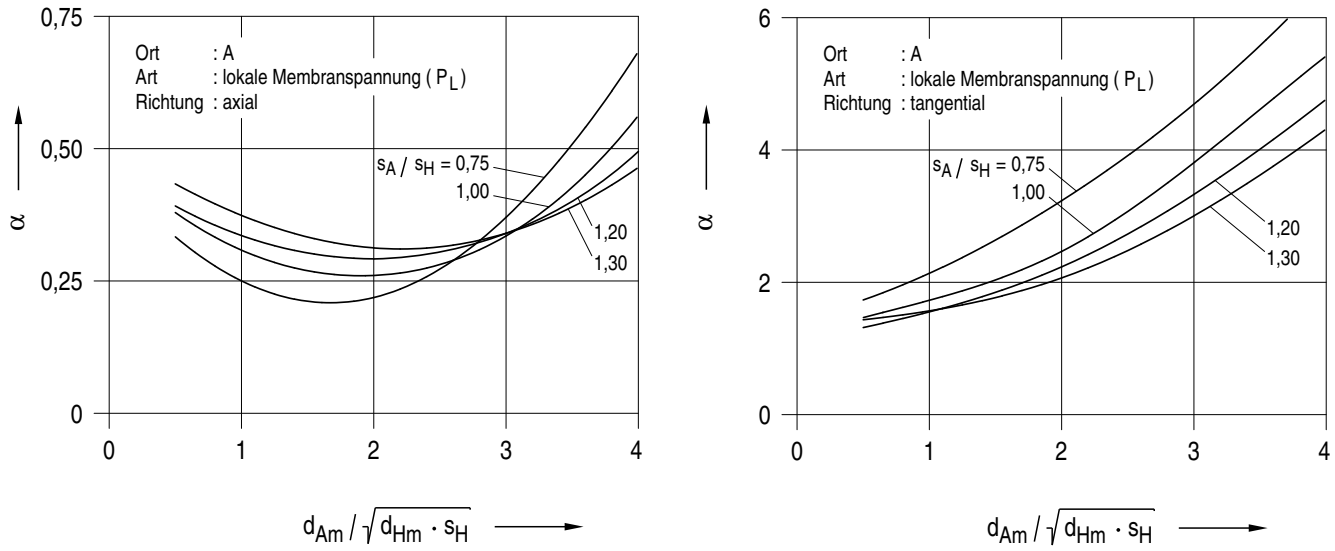


Bild 8.2-4: Spannungsbeiwert α für Stutzen in zylindrischer Schale unter Innendruck

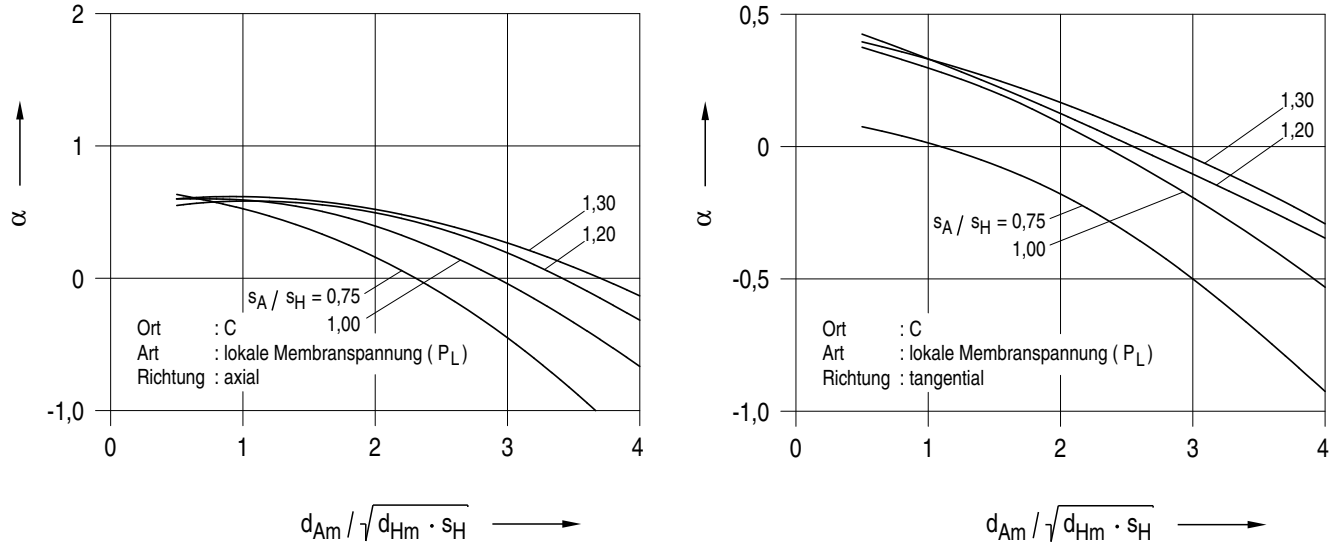


Bild 8.2-5: Spannungsbeiwert α für Stutzen in zylindrischer Schale unter Innendruck

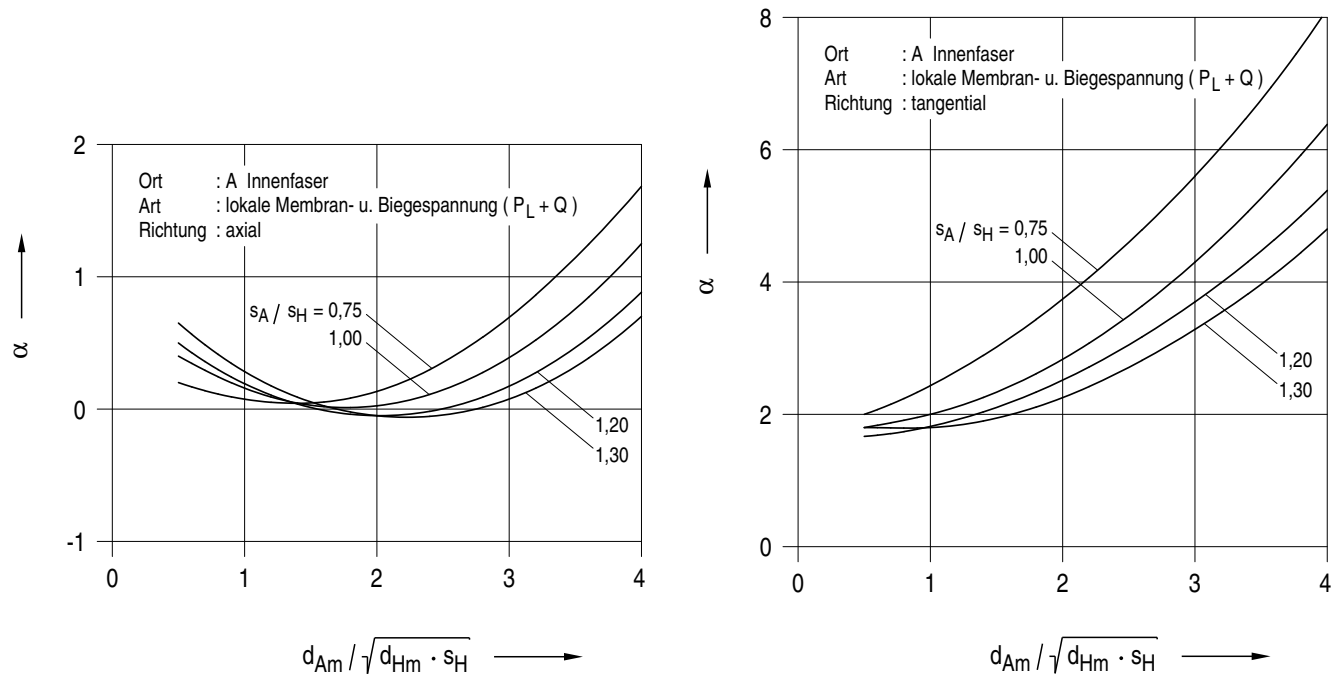


Bild 8.2-6: Spannungsbeiwert α für Stutzen in zylindrischer Schale unter Innendruck

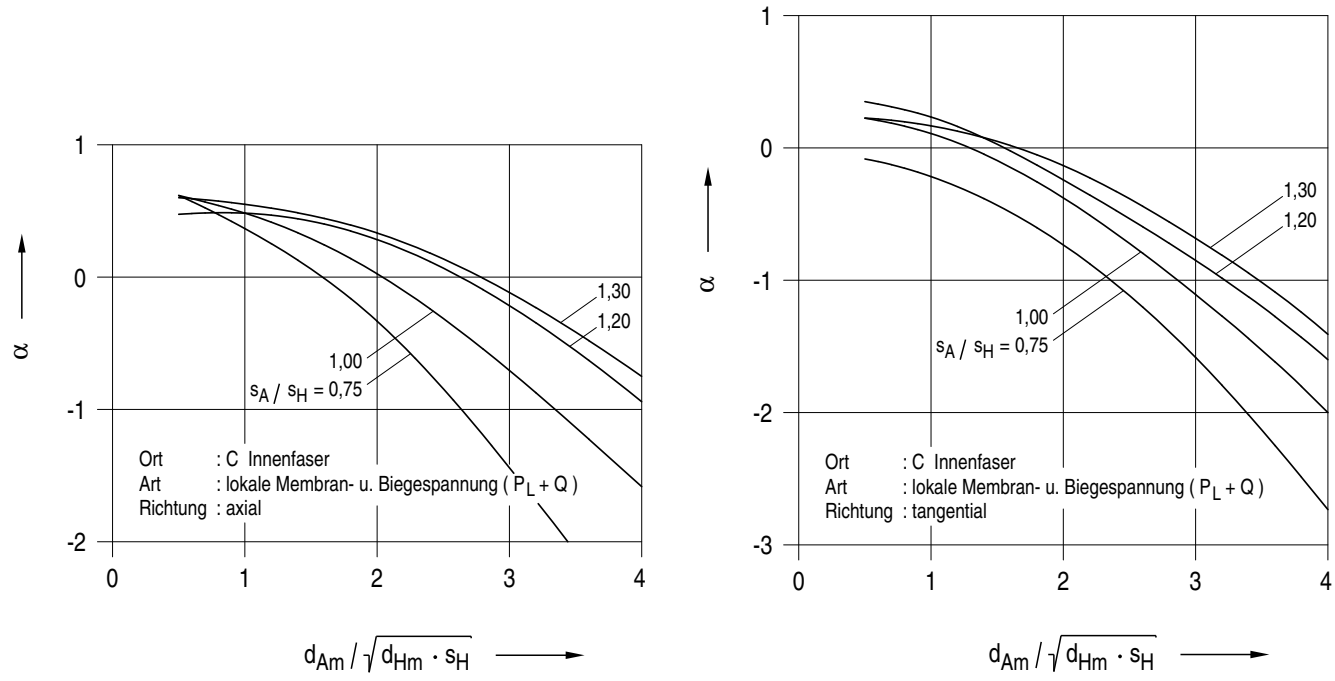


Bild 8.2-7: Spannungsbeiwert α für Stutzen in zylindrischer Schale unter Innendruck

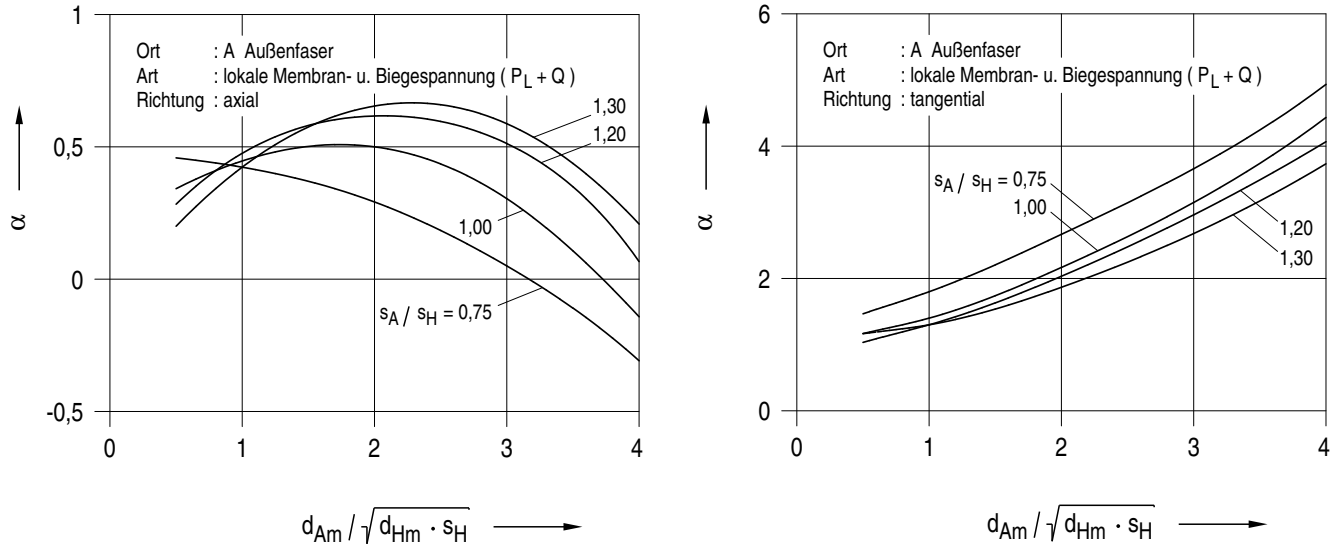


Bild 8.2-8: Spannungsbeiwert α für Stutzen in zylindrischer Schale unter Innendruck

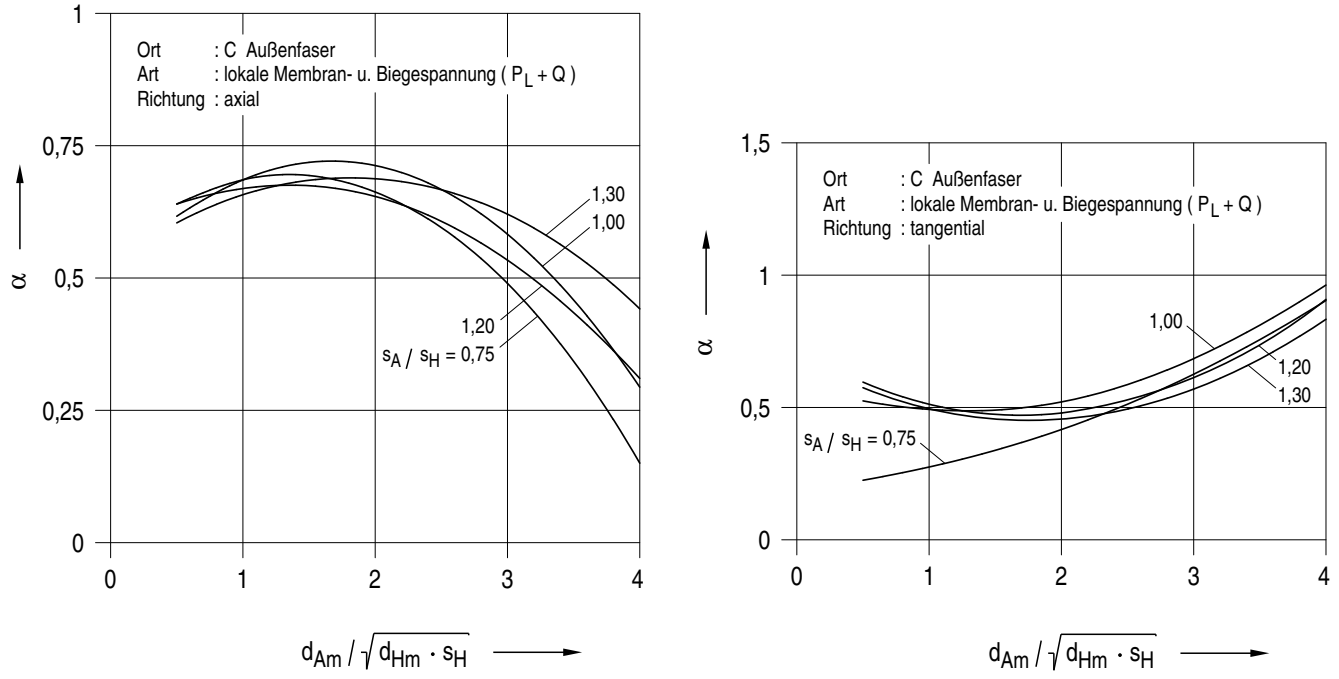
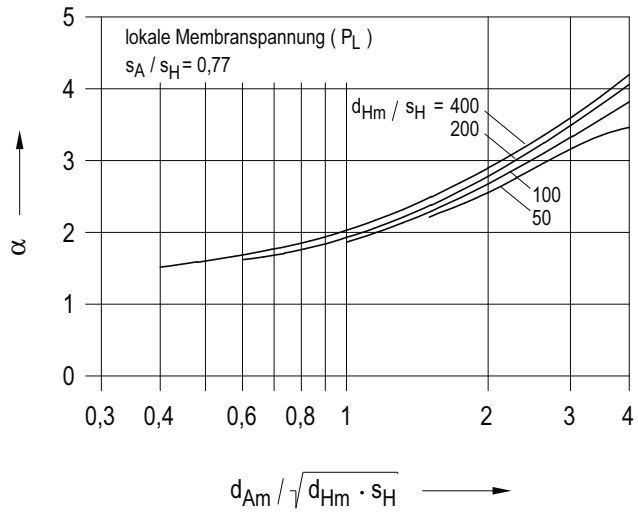
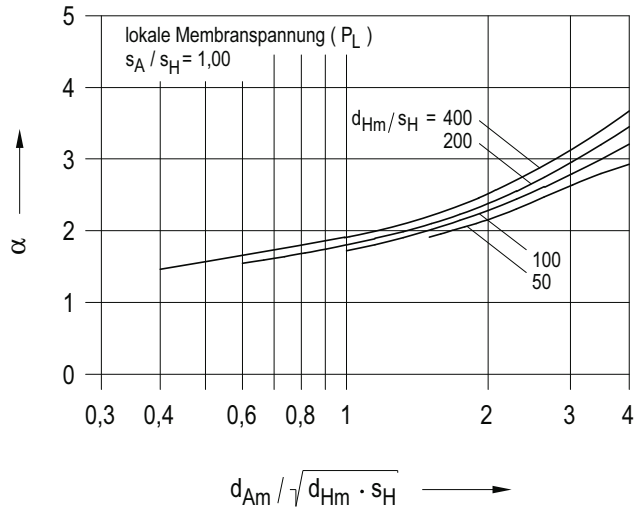


Bild 8.2-9: Spannungsbeiwert α für Stutzen in zylindrischer Schale unter Innendruck





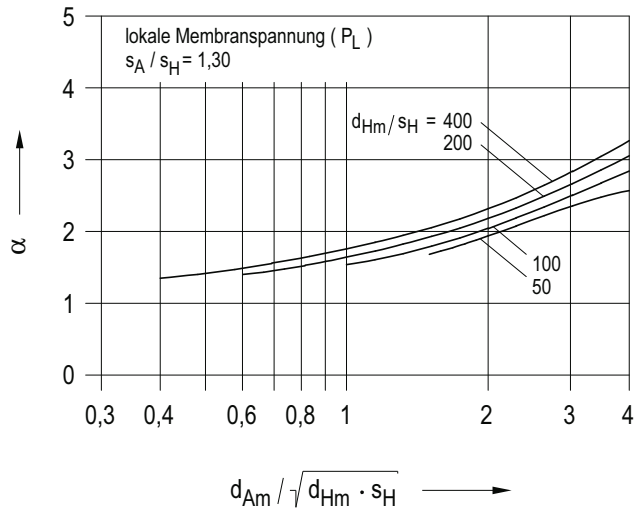
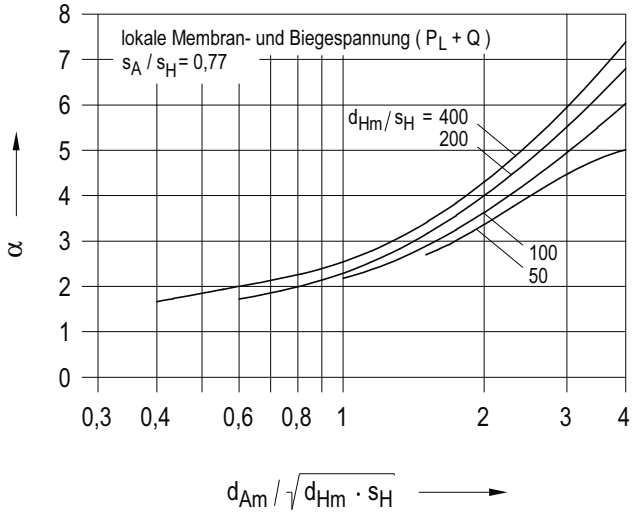
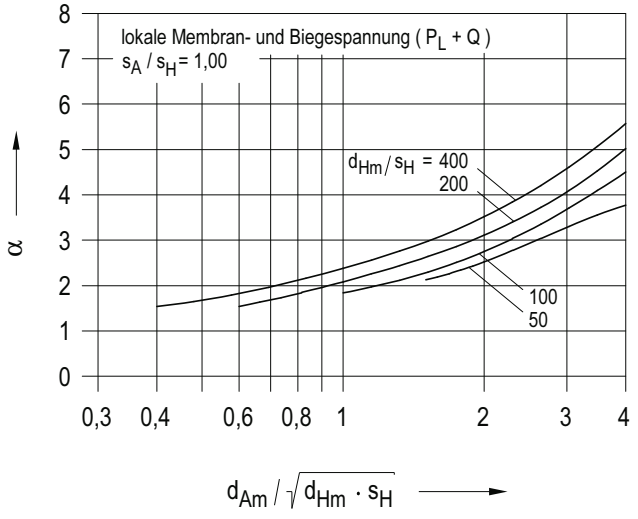


Bild 8.2-10: Spannungsbeiwert α für Stutzen in Kugelschale unter Innendruck für P_L





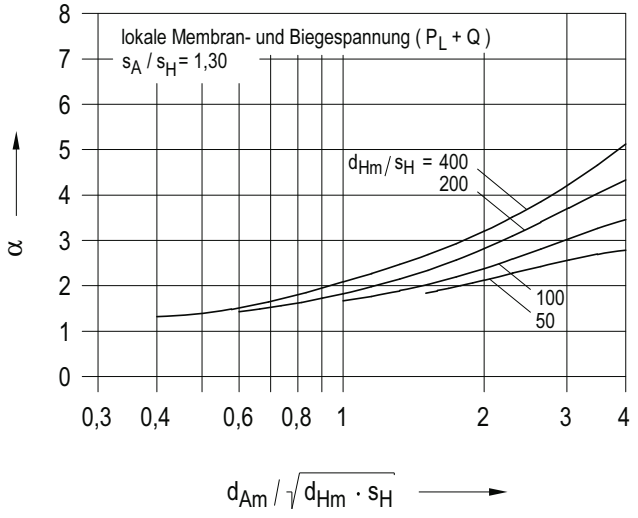


Bild 8.2-11: Spannungsbeiwert α für Stutzen in Kugel schale unter Innendruck für P_L + Q

8.2.5 Einwandige Balgkompensatoren für Behälter

8.2.5.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt 8.2.5

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
d, h, l, r, s	Abmessungen gemäß den Bildern 8.2-12 und 8.2-13	mm
f_l	Faktor zur Berücksichtigung des Wechselfestigkeitsverhaltens der Schweißverbindung nach Abschnitt 8.2.5.4.2.5	—
f_2	Faktor zur Berücksichtigung von teilplastischen Wechselverformungen nach Abschnitt 8.2.	—
$f_{2(w)'}$ $f_{2(\alpha,\lambda)}$	Faktor f_2 mit den C-Werten für Axialverschiebung oder Biegung gemäß Gleichung (8.2-17)	—
n	Stützziffern	—
n_i	Zahl der Lastspiele im Teilkollektiv i	—
p	Druck der jeweiligen Beanspruchungsstufe	MPa
p_{krs}	Instabilitätsdruck	MPa
Δp	Druckschwankungsbereich	N/mm²
w	Axialverformung einer Balgwelle	mm
z	Anzahl der Balgwellen	—
C_w	axiale Federkonstante	N/mm
C'_w	axiale Federkonstante	N/mm
C_α	Biegefederkonstante	Nm/grd
C'_α	Biegefederkonstante für mehrwellige Bälge	Nm/grd
C_λ	laterale Federsteifigkeit	N/mm
$C_{\alpha,\lambda}$	Biegesteifigkeit infolge einer lateralen Verformung	Nm/mm
D	Erschöpfungsgrad	—
E	Elastizitätsmodul	N/mm²
E_T	Elastizitätsmodul bei der höchsten Temperatur des betrachteten Lastfalles	N/mm²
L	Länge des gesamten Balges	mm
M_t	äußeres Torsionsmoment	Nmm
N	Bruchlastspielzahl	—
N_{zul}	zulässige Lastspielzahl	—
$N_{i\,zul}$	zulässige Zahl der Lastspiele im Teilkollektiv i	—
$R_{(Cw)}$	Rechenstützwert für Axialfederkonstante nach Tafeln 2 bis 13 aus AD 2000-Merkblatt B 13	—
$R_{(p)}$	Rechenstützwert für Druckbeanspruchung nach Tafeln 2 bis 25 aus AD 2000-Merkblatt B 13	—
$R_{p0,2}$	0,2%-Dehngrenze	N/mm²
$R_{p1,0}$	1,0%-Dehngrenze	N/mm²
$R_{p1,0T}$	1,0%-Dehngrenze bei Temperatur	N/mm²
$R_{p0,2T}$	0,2%-Dehngrenze der anschließenden Rohrleitung bei Auslegungstemperatur	—
S_L	Lastwechselsicherheit	—
S_m	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1	N/mm²
α	Angularverformung einer Balgwelle	grd
λ'	einseitiger Lateralweg eines Kompensators mit einem Balg oder mit zwei gleichen Bälgen und Zwischenrohr, gemessen von der geraden Lage aus, gemäß AD 2000-Merkblatt B13 Bild 6	m
σ_{um}	mittlere Umfangsspannung	N/mm²
$\sigma_{v(p)}$	größte Vergleichsspannung durch inneren oder äußeren Überdruck	N/mm²
$\sigma_{V(p)}$	Vergleichsspannungsschwingbreite infolge Druckbelastung	N/mm²
$\sigma_{V(w)}$	Vergleichsspannung infolge Axialverformung	N/mm²
$\sigma_{V(\alpha,\lambda)}$	Vergleichsspannung infolge Angular- oder Lateralverformung unter der Voraussetzung, dass nur ein Kompensatorbalg vorhanden ist.	N/mm²
$\Delta\sigma_{Vges}$	gesamte Vergleichsspannungsschwingbreite gemäß Abschnitt 8.2.5.4.2.3	N/mm²
τ	Vergleichsspannung infolge Torsion	N/mm²
$\Delta\tau$	Vergleichsspannungsschwingbreite infolge Torsion	N/mm²

8.2.5.2 Allgemeines

(1) Unter der Voraussetzung der konstruktiven Gestaltung der Kompensatoren nach Abschnitt 5.3.2.4 sind für Kompensatorbälge die nachfolgend beschriebenen Verfahren zur Dimensionierung und zur komponentenspezifischen Spannungs- und Ermüdungsanalyse zulässig.

Diese beziehen sich auf den gewellten Teil des Kompensatorbalges. Für den anschließenden zylindrischen Teil des Balges mit gleicher Wanddicke kann ein gesonderter Nachweis entfallen, wenn er eine Länge von $l = 0{,}5 \cdot \sqrt{s \cdot d_H / 2}$ (vergleiche **Bild 5.3-2**) nicht überschreitet.

In dem darüber hinausgehenden Bereich sind die für die anschließende Komponente zutreffenden Festlegungen zur Spannungskategorisierung und Begrenzung dieser Regel anzuwenden.

(2) Die nachfolgenden Verfahren gelten für einwandige Kompensatorbälge mit parallelen oder leicht lyraförmig gebogenen Wellenflanken (**Bilder 8.2-12** und **8.2-13**) in folgenden Grenzen:

$3 \leq d/h \leq 100$

$0{,}1 \leq r/h \leq 0{,}5$

$0{,}018 \leq s/h \leq 0{,}1$

(3) Sie behandeln die durch Druck, aufgeprägte Bewegung (axiale, angulare, laterale Verschiebung) und zusätzliche äußere Lasten hervorgerufenen Beanspruchungen.

(4) Im Hinblick auf den maßgebenden Einfluss von Wechselverformungen ist für Kompensatoren vorzugsweise die Prüfgruppe A1 zu wählen. Die nachfolgenden Festlegungen gelten für Prüfgruppe A1.

(5) Der Korrosion ist durch Wahl eines geeigneten Werkstoffes zu begegnen; ein Wanddickenzuschlag ist nicht zweckmäßig.

8.2.5.3 Dimensionierung

8.2.5.3.1 Allgemeines

(1) Die Dimensionierung ist unter Zugrundelegung der Belastungen und Beanspruchungsgrenzen der Auslegungsstufe (Stufe 0) gemäß Abschnitt 3.3.2 und unter Berücksichtigung der Belastungen und Beanspruchungsgrenzen der übrigen Beanspruchungsstufen gemäß Abschnitt 3.3, soweit diese dimensionierungsbestimmend sind, vorzunehmen.

(2) Hierbei sind die primären Spannungen aller Beanspruchungsstufen zu berücksichtigen und entsprechend der jeweils zulässigen Werte der **Tabelle 6.7-1** zu begrenzen.

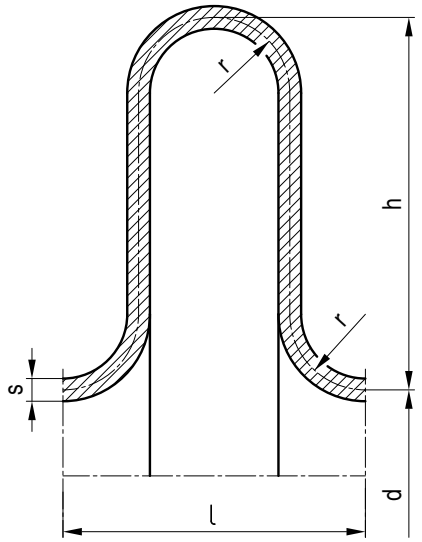


Bild 8.2-12: Parallele Wellenflanke eines Kompensatorbalges

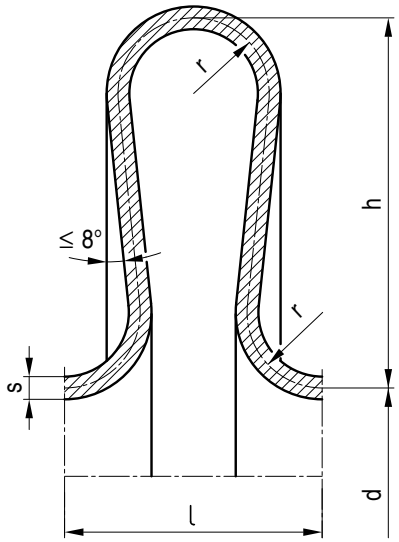


Bild 8.2-13: Leicht lyraförmig gebogene Wellenflanke eines Kompensatorbalges (Flankenwinkel ≤ 8°)

8.2.5.3.2 Berechnung des Balges gegen inneren und äußeren Überdruck

Zur Dimensionierungsberechnung ist eine aus fertigungs- und konstruktionstechnischen Gründen erforderliche Mindestwand vorzugeben und deren Verwendbarkeit mit folgenden Bedingungen zu überprüfen:

a) Mittlere Umfangsspannung aus Druckbelastung

$$\sigma_{um} = \frac{(d+h)\cdot l\cdot p}{4\cdot(1{,}14\cdot r+h)\cdot s} \le S_m \qquad (8.2\text{-}6)$$

b) Größte Vergleichsspannung aus Druckbelastung

$$\sigma_{v(p)} = 10\cdot R_{(p)}\cdot p \le n\cdot S_m \qquad (8.2\text{-}7)$$

Für ferritische Werkstoffe ist die Stützziffer

$n = 1{,}55 - 2{,}8\cdot 10^{-4}\cdot S_m$.

Für austenitische Werkstoffe ist die Stützziffer

$n = 1{,}55 - 2{,}8\cdot 10^{-4}\cdot S_m$, wenn $R_{p0,2}$ für die Bestimmung des S_m-Wertes maßgebend ist,

und

$n = 1{,}55$, wenn $R_{p1,0}$ für die Bestimmung des S_m-Wertes gemäß **Tabelle 6.6-1** ausschlaggebend ist.

8.2.5.3.3 Berücksichtigung von zusätzlichen äußeren Lasten

Zusätzliche äußere Lasten (z. B. Gewichtslasten) brauchen nicht berücksichtigt zu werden, wenn die Anforderungen gemäß Abschnitt 5.3.2.4 Absatz 4 erfüllt sind.

Andernfalls sind die hieraus resultierenden Beanspruchungen und Verformungen in die Berechnung einzubeziehen.

Es ist sicherzustellen, dass die Verformungen des Kompensators die Funktion von Kompensator, Komponente und Stützkonstruktion nicht beeinträchtigen.

8.2.5.4 Analyse des mechanischen Verhaltens

8.2.5.4.1 Allgemeines

Unter der Voraussetzung einer Dimensionierung nach Abschnitt 8.2.5.3 beschränkt sich die Analyse des mechanischen Verhaltens von Kompensatorbälgen auf einen Nachweis der Ermüdungssicherheit gemäß Abschnitt 8.2.5.4.2, sowie auf einen Stabilitätsnachweis gemäß Abschnitt 8.2.5.4.3.

8.2.5.4.2 Ermüdungsnachweis

8.2.5.4.2.1 Allgemeines

Der Ermüdungsnachweis ist unter Berücksichtigung der Belastungen der Beanspruchungsstufen gemäß Abschnitt 3.3, soweit diese ermüdungsrelevant sind, durchzuführen.

8.2.5.4.2.2 Bruchlastspielzahl

(1) Die zu erwartende Bruchlastspielzahl N (bis zum Beginn der Leckage) ergibt sich aus:

$$N = \left(\frac{E_T}{10\cdot\Delta\sigma_{Vges}\cdot f_1\cdot f_2}\right)^{3{,}45} \qquad (8.2\text{-}8)$$

(2) Die zulässige Lastspielzahl N_{zul} ergibt sich aus:

$$N_{zul} = \frac{N}{S_L} \qquad (8.2\text{-}9)$$

(für $N_{zul} > 10^6$ kann für die Erschöpfungsberechnung $N_{zul} = \infty$ gesetzt werden)

mit der Lastwechselsicherheit $S_L = 5{,}0$.

Wird zusätzlich durch eigene repräsentative Lebensdauerversuche für mindestens 25 geometrisch vergleichbare Kompensatoren mit gleichem Werkstoffverhalten und aus dem gleichen Herstellungsverfahren nachgewiesen, dass die Bruchlastspielzahl N gemäß Gleichung (8.2-8) erreicht wird, genügt eine Lastwechselsicherheit $S_L = 2{,}0$.

(3) Bei Lastkollektiven mit unterschiedlichen Amplituden und Lastspielzahlen sind neue, für die Ermüdung maßgebende Teilkollektive zu bilden (vergleiche Abschnitte 7.7.3.3 oder auch 8.4.6.3 (2)). Die Erschöpfungsgrade dieser Teilkollektive sind linear zu akkumulieren zu

$$D = \sum\frac{n_i}{N_{i\,zul}} \le 1 \qquad (8.2\text{-}10)$$

wobei n_i die Zahl der Lastspiele in den jeweiligen Teilkollektiven und $N_{i_{zul}}$ die dafür zu lässige Zahl ist.

8.2.5.4.2.3 Gesamte Vergleichsspannungsschwingbreite

(1) Die gesamte Vergleichsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{Vges}$ wird gebildet gemäß Abschnitt 7.7.3.3 und berücksichtigt die Beanspruchungen aus den veränderlichen Teilen der folgenden Belastungen:

a) Innendruck,

b) axiale, angulare, laterale Verschiebungen,

c) Torsionsmomente, soweit diese konstruktiv nicht vollständig vom Kompensator ferngehalten werden können.

(2) Die gesamte Vergleichsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{Vges}$ ist aus den einzelnen Spannungsschwingbreiten zu errechnen (Näherung):

$$\sigma_{Vges} = \sqrt{\left(\Delta\sigma_{V\,(p)} + \Delta\sigma_{V\,(w)} + \Delta\sigma_{V\,(\alpha,\lambda)}\right)^2 + 3\cdot\Delta\tau^2} \qquad (8.2\text{-}11)$$

Die einzelnen Spannungsschwingbreiten werden wie folgt ermittelt:

$\Delta\sigma_{V\,(p)}$ Spannungsschwingbreite infolge Druckbelastung

$$\Delta\sigma_{V\,(p)} = 10\cdot R_{(p)}\cdot\Delta p \qquad (8.2\text{-}12)$$

$\Delta\sigma_{V\,(w)}$ Spannungsschwingbreite infolge Axialverformung

$$\Delta\sigma_{V\,(w)} = 2{,}4\cdot 10^{-4}\cdot\frac{E_T}{h}\cdot R_{(w)}\cdot w \qquad (8.2\text{-}13)$$

$\Delta\sigma_{V\,(\alpha,\,\lambda)}$ Spannungsschwingbreite infolge Angular- und/oder Lateralverformung (nur gültig unter der Voraussetzung, dass nur ein Kompensatorbalg vorhanden ist).

$$\Delta\sigma_{V(\alpha,\lambda)} = 2{,}4\cdot 10^{-4}\cdot\frac{E_T}{h}\cdot R_{(w)}\cdot(d+2\cdot h)\cdot\left(\frac{\alpha}{114}+\frac{3}{z\cdot l}\cdot\frac{\lambda'}{z}\right) \qquad (8.2\text{-}14)$$

Spannungsschwingbreite infolge Torsion

$$\Delta\tau = \frac{2\cdot\Delta M_t}{\pi\cdot d^2\cdot s} \qquad (8.2\text{-}15)$$

(3) Es ist zu beachten, dass zur Bildung von $R_{(w)}$ aus Tafel 2-13 und Tafel 14-25 von AD 2000-Merkblatt B13 die maximale Wanddicke s (Nennwanddicke zuzüglich Plustoleranz) des Balges zu verwenden ist.

8.2.5.4.2.4 Berücksichtigung von teilplastischen Wechselverformungen

(1) Teilplastische Wechselverformungen treten nicht auf, wenn die Bedingung

$$\frac{\Delta\sigma_{Vges}}{R_{pT}} \le 2$$

erfüllt ist. Hierin ist $\Delta\sigma_{Vges}$ aus Gleichung (8.2-11) einzusetzen. Für R_{pT} ist $R_{p0,2T}$ bzw. $R_{p1,0T}$ heranzuziehen, je nachdem, welcher der beiden Werte zur Bildung des S_m-Wertes maßgebend wurde. In diesem Fall ist $f_2 = 1$ zur Errechnung der Bruchlastspielzahl nach Gleichung (8.2-8) anzusetzen.

(2) Teilplastische Wechselverformungen sind zu berücksichtigen, wenn die Bedingung

$$\frac{\Delta\sigma_{Vges}}{R_{pT}} > 2$$

zutrifft. In diesem Fall ist f_2 zu errechnen aus

$$f_2 = 1 + C\left(\frac{\Delta\sigma_{Vges}}{R_{pT}} - 2\right) + 0{,}1\cdot B \qquad (8.2\text{-}16)$$

mit

$$B = \max\left(\frac{\sigma_{V(p)}}{n\cdot\frac{R_{pT}}{1{,}2}};\frac{\sigma_{um}}{S_m}\right)$$

mit

$\sigma_{V(p)}$ nach Gleichung (8.2-7) und

σ_{um} nach Gleichung (8.2-6).

Die C-Werte für Axialverschiebung und Biegung sind **Tabelle 8.2-4** zu entnehmen.

Werkstoffgruppe	C (eingeklammerte Werte gelten für Biegung)		
	Bälge mit Rundnähten in hochbeanspruchter Zone	Bälge ohne Rundnähte in hochbeanspruchter Zone	
		kalt verfestigt	warm umgeformt oder normalisiert
Austenit	0,127 (0,101)	0,105 (0,86)	0,085 (0,067)
Ferrit	0,155 (0,127)	0,155 (0,127)	0,133 (0,109)

Tabelle 8.2-4: C-Werte

(3) Bei überlagerter Axialverformung, Biegung und Torsion wird $\Delta\sigma_{Vges}\cdot f_2$ wie folgt aufgeschlüsselt:

$$\Delta\sigma_{Vges}\cdot f_2 = \left\{\left[\left(\Delta\sigma_{V(p)}\cdot\frac{\Delta\sigma_{V(w)}}{\Delta\sigma_{V(w)}+\Delta\sigma_{V(\alpha,\lambda)}}+\Delta\sigma_{V(w)}\right)\cdot f_{2(w)} + \left(\Delta\sigma_{V(p)}\cdot\frac{\Delta\sigma_{V(\alpha)}}{\Delta\sigma_{V(w)}+\Delta\sigma_{V(\alpha,\lambda)}}+\sigma_{V(\alpha,\lambda)}\right)\cdot f_{2(\alpha,\lambda)}\right] + 3\cdot\left(\Delta\tau\cdot f_{2(w)}\right)^2\right\}^{1/2} \qquad (8.2\text{-}17)$$

$f_{2(w)}$ bzw. $f_{2(\alpha,\,\lambda)}$ sind die jeweiligen Faktoren f_2 mit den C-Werten für Axialverschiebung bzw. Biegung gemäß Gleichung (8.2-16).

8.2.5.4.2.5 Festlegungen zur Berechnung der höchstbeanspruchten Stelle des Balges unter Berücksichtigung der Wechselfestigkeit der Schweißnaht

Zur Ermittlung der Beanspruchungen an der höchstbeanspruchten Stelle sind die Rechenstützwerte der Tafel 2-13 von AD 2000-Merkblatt B13 in Verbindung mit dem Faktor $f_1 = 1{,}0$ zu verwenden.

Zusätzlich ist für die nachfolgend genannten Schweißnahtlagen mit Hilfe der Rechenstützwerte der Tafel 14-25 von AD 2000-Merkblatt B13 in Verbindung mit dem Schweißnahtfaktor $f_1 = 2{,}0$ zu überprüfen, ob die Schweißnaht für die Ermüdungsbetrachtung maßgebend wird. Diese zusätzliche Festlegung gilt für Schweißnähte

a) im Scheitel der Außenkrempe
b) im Scheitel der Innenkrempe
c) am Balgende als Verbindungsnaht zum Anschlussteil, wenn das zylindrische Ende zwischen Balginnenwelle und Schweißnaht kürzer ist als der größere Wert von $3\cdot s$, $0{,}25\cdot\sqrt{s\cdot d}$ oder 10 mm.

8.2.5.4.3 Stabilitätsnachweis

Die Überprüfung der ausreichenden Sicherheit gegen Stabilitätsversagen erfolgt für die Säulenstabilität mit

$$p_{KrS} = \frac{2\cdot\pi}{z\cdot L}\cdot C_w \ge 3\cdot p \qquad (8.2\text{-}18)$$

Hinweis:
Die Sicherheit gegen Welleninstabilität kann gemäß dem Verfahren, das in ASME Sect. III NC 3649 angegeben ist, nachgewiesen werden.

8.2.5.4.4 Federkonstanten

8.2.5.4.4.1 Allgemeines

Zur Bestimmung der Anschlusskräfte oder zur Verwendung in statischen und dynamischen Analysen für die Behälter ist die Kenntnis der Federsteifigkeiten des Kompensators erforderlich.

8.2.5.4.4.2 Axiale Federkonstante

Für die axiale Bewegung darf als Federkonstante verwendet werden:

$$C_w = 0{,}15 \cdot 10^{-4} \cdot R_{(cw)} \, (d + h) \cdot E \qquad (8.2\text{-}19)$$

Bei mehrwelligen Bälgen ist die Federkonstante für die axiale Bewegung

$$C_w' = \frac{C_w}{z} \qquad (8.2\text{-}20)$$

8.2.5.4.4.3 Biegefederkonstante

Für die Beanspruchung durch Biegung darf als Federkonstante verwendet werden:

$$C_\alpha = 2{,}2 \cdot 10^{-6} \cdot (d + 2 \cdot h)^2 \cdot C_w \qquad (8.2\text{-}21)$$

Bei mehrwelligen Bälgen ist die Biegefedersteifigkeit

$$C_\alpha' = \frac{C_\alpha}{z} \qquad (8.2\text{-}22)$$

8.2.5.4.4.4 Federkonstante für laterale Bewegung

(1) Eine laterale Bewegung des Kompensators ist nur möglich, wenn der Kompensatorbalg mindestens zweiwellig ausgeführt ist.

Die laterale Federsteifigkeit ergibt sich zu

$$C_\lambda = 1{,}5 \cdot \frac{(d+2\cdot h)^2}{(z\cdot l)^2} \cdot C_w' \qquad (8.2\text{-}23)$$

(2) Die Biegung im Balg infolge einer lateralen Verformung kann ebenfalls auf die maximale axiale Verformung zurückgeführt werden. Die Biegesteifigkeit errechnet sich dann zu

$$C_{\alpha,\,\lambda} = 0{,}75 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(d+2\cdot h)^2}{z\cdot l} \cdot C_w' \qquad (8.2\text{-}24)$$

8.2.6 Wärmetauscherböden

8.2.6.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt 8.2.6

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
a, b, c, d, e	Größen zur Bestimmung der Knicklänge L_K (Bild 8.2-18)	mm
d	Außendurchmesser der Wärmetauscherrohre	mm
d_h	Durchmesser der Bohrungen in der Rohrplatte	mm
e	Rohrbodendicke (ohne Zuschläge)	mm
e_{Bieg}	Wanddicke des Rohrbodens aus Bemessung für Biegung	mm
e_s	Mantelwanddicke (Nennwanddicke)	mm
e_{Schub}	Wanddicke des Rohrbodens aus Bemessung für Schub	mm
e_t	Rohrwanddicke (Nennwanddicke)	mm
f_s	Druckfaktor gemäß Gleichung (8.2-40)	—
f_t	Druckfaktor gemäß Gleichung (8.2-41)	—
p	Druck für den Rohrboden gemäß Abschnitt 8.2.6.4	MPa
p_1	mantelseitiger Druck des Wärmetauschers	MPa
p_1'	mantelseitiger, effektiver Druck für den Wärmetauscher mit festen Rohrböden gemäß Abschnitt 8.2.6.5.1	MPa
p_2	rohrseitiger Druck des Wärmetauschers	MPa
p_4	Berechnungsdruck gemäß Gleichung (8.2-43)	MPa
p_5	Berechnungsdruck gemäß Gleichung (8.2-44)	MPa
p_2'	rohrseitiger, effektiver Druck für den Wärmetauscher mit festen Rohrböden gemäß Abschnitt 8.2.6.5.1	MPa
p_e	Äquivalenter (fiktiver) Druck, resultierend aus der behinderten Wärmedehnung von Wärmetauschermantel und Wärmetauscherrohren gemäß Abschnitt 8.2.6.5.1	MPa
p_S'	mantelseitiger, effektiver Berechnungsdruck	MPa
p_t'	rohrseitiger, effektiver Berechnungsdruck	MPa
r	Trägheitsradius	mm
C	Berechnungsbeiwert	—
D	äußerer Rohrbündeldurchmesser	mm
D_o	äußerer Rohrbündeldurchmesser	mm
D_1	effektiver Durchmesser des Wärmetauschermantels auf den der mantelseitige Druck wirkt	mm
D_2	effektiver Durchmesser der Rohrbodenkammer auf den der rohrseitige Druck wirkt	mm
D_J	Durchmesser des größten druckbeaufschlagten Querschnitts im Kompensator	Nmm
E, E_s, E_t	Elastizitätsmodul des Rohrboden, des Wärmetauschermantels und der Wärmetauscherrohre	N/mm²
F	Faktor zur Berücksichtigung der Einspannung des Rohrbodens gemäß Bild 8.2-17	—
F_e	Faktor zur Berücksichtigung der Haftaufweitung	—
F_q	Hilfsgröße zur Berechnung äquivalenter Drücke bei Vorhandensein von Kompensatoren gemäß Gleichung (8.2-39)	—
F_r	Faktor zur Berücksichtigung der Verbindungsart Rohr/Rohrboden gemäß Tabelle 8.2-5	—
F_y	Faktor zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften	—
J	Ausdehnungsfaktor zur Berücksichtigung eines im Wärmetauschermantel vorhandenen Kompensators J = 1,0 sofern kein Kompensator vorhanden $J = \frac{1}{1+(\pi \cdot D \cdot E_s \cdot e_s \cdot S)/L}$ für Wärmetauschermantel mit Kompensator	—
K	mittleres Dehnungsverhältnis Rohrbündel/Mantel gemäß Gleichung (8.2-38)	—
L	Länge der Wärmetauscherrohre zwischen den Rohrböden	mm
L_K	Knicklänge gemäß Bild 8.2-18	mm
N	Anzahl der Wärmetauscherrohre bei Geradrohr-Wärmetauscher	—
P	Lochteilung	mm
P_m	allgemeine primäre Membranspannung aus **Tabelle 6.7-1**.	N/mm²

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
R_{pT}	Dehngrenze bei Temperatur	N/mm²
$R_{p0,2T}$	0,2%-Dehngrenze bei Temperatur	N/mm²
S	Flexibilität des Kompensators	mm/N
S_m	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1	N/mm²
α_s, α_t	Wärmeausdehnungskoeffizient des Mantel- oder Rohrmaterials	1/K
λ	geometrischer Verschwächungsbeiwert der Rohrplatte für Schubbeanspruchung	—
μ	geometrischer Verschwächungsbeiwert der Rohrplatte für Biegebeanspruchung	—
v, v*	Poisson´sche Zahl der ungelochten oder gelochten Rohrplatte	—
σ_L	Längsspannung im Rohr	N/mm²
σ_{zul}	zulässige Spannung	N/mm²
τ_{zul}	zulässige Schubspannung	N/mm²
Θ_s, Θ_t	mittlere Mantel- oder Rohrwandtemperatur	°C
Ω	Spannungsbeiwert	—

8.2.6.2 Geltungsbereich

(1) Der vorliegende Abschnitt beschreibt die Dimensionierung und komponentenspezifische Spannungsanalyse von Wärmetauscherböden und Wärmetauscherrohren nach Abschnitt 5.3.2.3. Eine schematische Darstellung der hier behandelten Wärmetauschertypen mit eingeschweißten (verspannten) Rohrböden gibt **Bild 8.2-14**. Dabei können die Wärmetauschermäntel mit oder ohne Kompensator ausgeführt sein. Die Anordnung der Rohre in der Rohrplatte ist in **Bild 8.2-16** dargestellt. Die Rohrbündel bestehen entweder aus Geradrohren oder aus U-Rohren.

(2) Den angegebenen Gleichungen liegen folgende Voraussetzungen zugrunde:

a) Rohr- und Mantelbereich werden durch Druck- und Temperaturverteilungen beansprucht.

b) Sämtliche Rohre haben gleiche Querschnittsabmessungen (Nennwanddicke, Nenndurchmesser).

c) Bei Wärmetauschern mit zwei Rohrböden müssen beide dieselbe Rohrbodendicke haben.

d) Der Rohrboden muss über dem gesamten Rohrfeld die gleiche Dicke aufweisen.

e) Die Berohrung der Wärmetauscherböden ist gleichmäßig und die berohrte Fläche ist kreisförmig oder näherungsweise kreisförmig.

f) Der unberohrte (äußere) Bereich des Rohrbodens ist ausreichend schmal, um ihn als Ring (ohne nennenswerte Querschnittsverformung) behandeln zu können. Dabei gilt zusätzlich die Bedingung:

$D_1, D_2 \leq = D_0 + 6 \cdot e$.

g) Die Rohrbodendicke (abzüglich Korrosionszuschlag) ist nicht kleiner als

ga) 0,75 · Rohraußendurchmesser d für Rohre mit d ≤ 25 mm

gb) 22 mm für Rohre mit 25 mm < d ≤ 30 mm

gc) 25 mm für Rohre mit 30 mm < d ≤ 40 mm

gd) 30 mm für Rohre mit 40 mm < d ≤ 50 mm

(3) Die Festigkeit von Wärmetauscherböden, die den Bedingungen in Absatz 2 nicht genügen, ist gesondert nachzuweisen.

(4) Sofern bei Wärmetauscherrohren nach **Bild 8.2-14** Ausführungsform b der Druck in den Rohren größer ist als der doppelte Wert des Druckes um die Rohre ($p_2 > 2 \cdot p_1$), muss nachgewiesen werden, dass der Mantel die daraus resultierende Axialkraft zusätzlich aufnehmen kann.

8.2.6.3 Charakteristische Größen für gelochte Rohrplatten

8.2.6.3.1 Geometrischer Verschwächungsbeiwert der Rohrplatte

Für Rohre, die auf mindestens 60 % der Rohrbodendicke eingewalzt oder durch Explosionsschweißung verbunden sind, gilt

$$\mu = \lambda = \frac{P - (d_h - e_t)}{P} \qquad (8.2\text{-}25)$$

Für andere Verbindungen von Rohr und Rohrboden gilt

$$\mu = \lambda = \frac{P - d_h}{P} \qquad (8.2\text{-}26)$$

8.2.6.3.2 Effektive elastische Materialkonstante der gelochten Platte

Die effektive elastische Materialkonstante ν* der gelochten Rohrplatte ergibt sich nach **Bild 8.2-15**. Dabei ist zwischen dünnen (e < 2 · P) und dickeren (e ≥ 2 · P) Rohrböden zu unterscheiden. Die Symbole □ und **Δ** repräsentieren die Anordnung der Rohre im Rohrboden (siehe **Bild 8.2-16**).

8.2.6.4 Rohrplatten für U-Rohr-Wärmetauscher

Die Wärmetauscherböden sind für den Druck

$$p = p_2 - p_1 \qquad (8.2\text{-}27)$$

zu bemessen. Dabei ist zu beachten, dass ein Druck möglicherweise allein wirken kann.

Die Mindestwand des Rohrbodens ergibt sich als der größere der beiden Werte für die Bemessung gegen Biegung bzw. Schub:

$$e_{Bieg} = C \cdot D_o \cdot \left(\frac{p}{\Omega \cdot \mu \cdot \sigma_{zul}} \right)^{1/2} \qquad (8.2\text{-}28)$$

$$e_{Schub} = 0{,}155 \cdot D_o \cdot \frac{p}{\lambda \cdot \tau_{zul}} \qquad (8.2\text{-}29)$$

mit

$C = 0{,}433$

$\Omega = 2{,}0$

$\tau_{zul} = 0{,}5 \cdot \sigma_{zul}$.

Für σ_{zul} ist der für die allgemeine primäre Membranspannung P_m (siehe **Tabelle 6.7-1**) zulässige und von der Prüfgruppe abhängige Wert S_m bzw. S einzusetzen.

8.2.6.5 Rohrplatten von Geradrohr-Wärmetauscher

8.2.6.5.1 Mindestwanddicke der Rohrböden

Die Mindestwanddicke der Rohrböden ergibt sich als der größere der beiden Werte für die Bemessung gegen Biegung bzw. Schub:

$$e_{Bieg} = \max \left[\frac{FD_1}{2} \left(\frac{p_1'}{\sigma_{zul}} \right)^{1/2} ; \frac{FD_2}{2} \left(\frac{p_2'}{\sigma_{zul}} \right)^{1/2} \right] \qquad (8.2\text{-}30)$$

Die F-Werte sind nach **Bild 8.2-17** zu ermitteln.

$$e_{Schub} = \max \left[\frac{0{,}155 \cdot D_o \cdot p_1'}{\lambda \cdot \tau_{zul}} ; \frac{0{,}155 \cdot D_o \cdot p_2'}{\lambda \cdot \tau_{zul}} \right] \qquad (8.2\text{-}31)$$

(σ_{zul}, τ_{zul} siehe Abschnitt 8.2.6.3)

mit

$$p_1' = \max \left(\frac{p_s' - p_e}{2} ; p_s' ; \frac{p_e}{2} \right) \qquad (8.2\text{-}32)$$

und

$$p_2' = \max \left(\frac{p_t' + p_e}{2} ; p_t' \right), \text{ sofern } p_s' > 0 \qquad (8.2\text{-}33)$$

oder

$$p_2' = \max\left(\frac{p_t' - p_s' + p_e}{2}; p_t' - p_s'\right), \text{ sofern } p_s' < 0 \quad (8.2\text{-}34)$$

Dabei ist

$$p_s' = p_1 \cdot \frac{0{,}4 \cdot J \cdot \left[1{,}5 + K \cdot (1{,}5 + f_s)\right] - \left[\left(\frac{1-J}{2}\right) \cdot \left(\frac{D_J^{\,2}}{D_1^{\,2}} - 1\right)\right]}{(1 + J \cdot K \cdot F_q)} \quad (8.2\text{-}35)$$

$$p_t' = p_2 \cdot \frac{1 + 0{,}4 \cdot J \cdot K \cdot (1{,}5 + f_t)}{(1 + J \cdot K \cdot F_q)} \quad (8.2\text{-}36)$$

und

$$p_e = \frac{4 \cdot J \cdot E_s \cdot e_s \cdot (\alpha_s \cdot \Theta_s - \alpha_t \cdot \Theta_t)}{(D - 3e_s) \cdot (1 + J \cdot K \cdot F_q)} \quad (8.2\text{-}37)$$

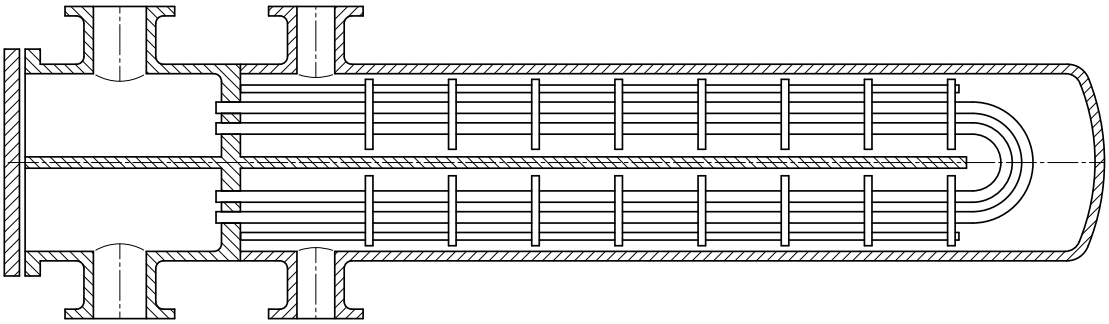
mit $K = \dfrac{E_s \cdot e_s \cdot (D - e_s)}{E_t \cdot e_t \cdot N \cdot (d - e_t)}$ (8.3-38)

$$F_q = \max\left\{1{,}0; 0{,}25 + (F - 0{,}6) \cdot \left[\frac{300 \cdot e_s \cdot E_s}{K \cdot L \cdot E} \cdot \left(\frac{D_1}{e}\right)^3\right]^{1/4}\right\} \quad (8.2\text{-}39)$$

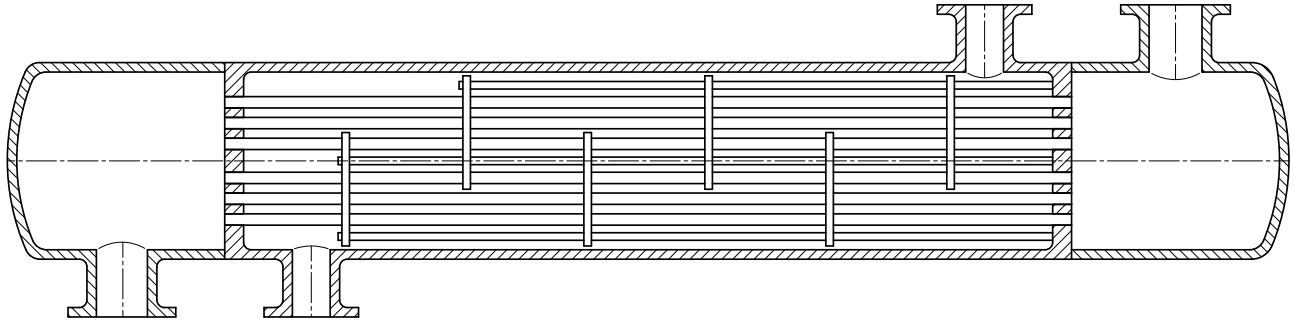
$$f_s = 1 - N \cdot \left(\frac{d}{D_1}\right)^2 \quad (8.2\text{-}40)$$

$$f_t = 1 - N \cdot \left[\frac{(d - 2 \cdot e_t)}{D_2}\right]^2 \quad (8.2\text{-}41)$$

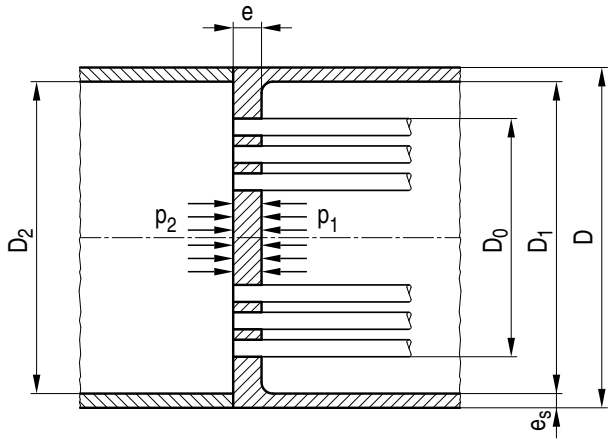
Hinweis:
Die vorstehenden Formeln können für Manteldurchmesser $D_1 > 1500$ mm zunehmend konservative Rohrbodendicken ergeben.



Ausführungsform a



Ausführungsform b
mit oder ohne Kompensator



Darstellung der geometrischen Verhältnisse
im Bereich des Wärmetauscher-Bodens

Bild 8.2-14: Beispiele häufig vorkommender Wärmetauschertypen (schematische Darstellung)

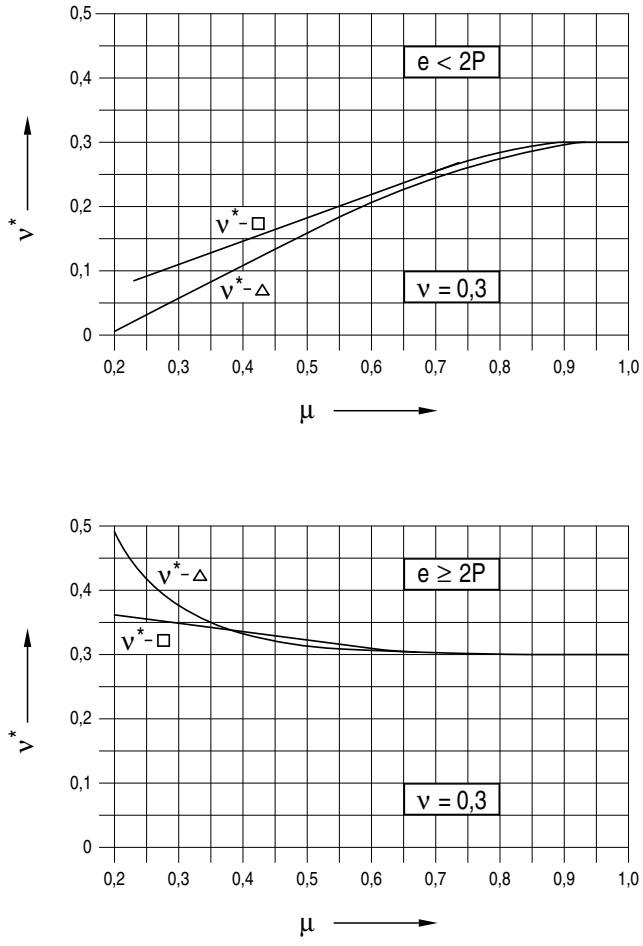


Bild 8.2-15: Effektive elastische Materialkonstanten der gelochten Rohrplatte

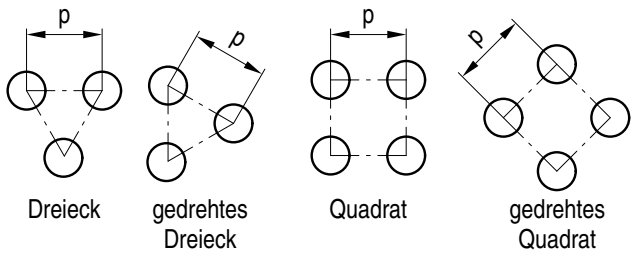


Bild 8.2-16: Anordnung der Rohre in der Rohrplatte

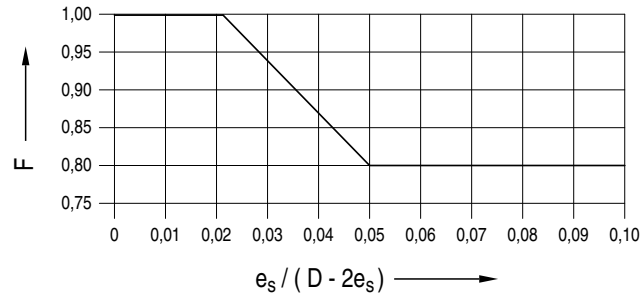


Bild 8.2-17: Ermittlung der F-Werte

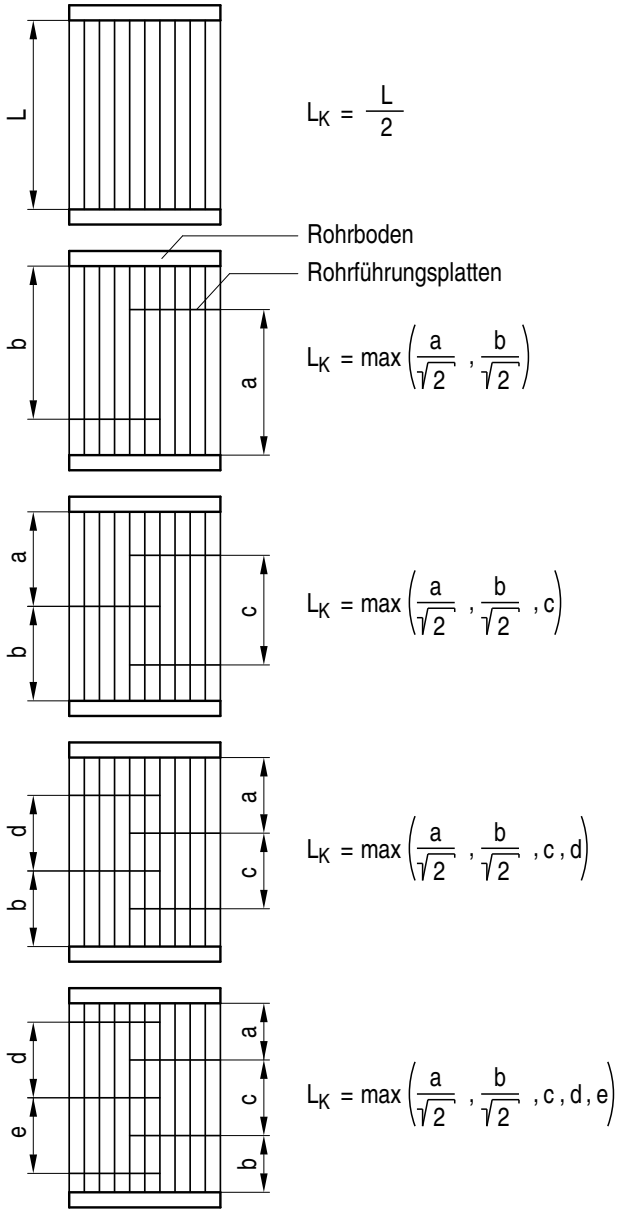


Bild 8.2-18: Bestimmung der Knicklänge L_K

8.2.6.5.2 Längsspannung in den Wärmetauscherrohren

Für die zu betrachtenden Lastfälle ist die in den Wärmetauscherrohren auftretende Längsspannung mit

$$\sigma_L = \frac{F_q \cdot p_t^{\,x} \cdot D_2^{\,2}}{4 \cdot N \cdot e_t \cdot (d - e_t)} \qquad (8.2\text{-}42)$$

zu ermitteln. Dabei ist $p_t^{\,x}$ als der größte positive Wert (resultierend in Zugspannungen) und der kleinste negative Wert (resultierend in Druckspannungen) der nachfolgenden Terme zu bestimmen:

a) $z \cdot (p_4 + p_e - p_5)$
b) $z \cdot p_e$
c) $p_4 - p_5$
d) $z\,(p_4 + p_e)$
e) p_4
f) $- p_5$
g) $z\,(p_e - p_5)$

mit

$z = 1{,}0$ für negatives $p_t^{\,x}$

$z = 0{,}5$ für positives $p_t^{\,x}$

und

$$p_4 = \left(p_t' - \frac{f_t}{F_q} \cdot p_2 \right) \qquad (8.2\text{-}43)$$

$$p_5 = \left(p_s' - \frac{f_s}{F_q} \cdot p_1 \right) \qquad (8.2\text{-}44)$$

8.2.6.6 Begrenzung der Längsspannungen in Wärmetauscherrohren

Die Zuglängsspannungen sind nach **Tabelle 6.7-1** zu begrenzen.

Um Rohrknicken von Rohren in Geradrohr-Wärmetauschern zu vermeiden, ist die Drucklängsspannung im Rohr wie folgt zu begrenzen:

$$\left|\sigma_L\right| \le \frac{\pi^2 \cdot r^2 \cdot E_t}{2 \cdot {L_K}^2}, \text{ sofern } C \le \frac{L_K}{r} \qquad (8.2\text{-}45)$$

bzw.

$$\left|\sigma_L\right| \le \frac{S_m \cdot y}{2} \cdot \left(1 - \frac{L_K}{2 \cdot r \cdot C}\right), \text{ sofern } C > \frac{L_K}{r} \qquad (8.2\text{-}46)$$

mit

$$r = 0{,}25 \cdot \sqrt{d^2 + \left(d - 2 \cdot e_t\right)^2}$$

y = 1,4 für ferritische Rohre

y = 1,1 für austenitische Rohre

$$C = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E_t}{y \cdot S_m}}$$

L_K = kritische Knicklänge siehe **Bild 8.2-18**

S_m = gemäß **Tabelle 6.6-1**

8.2.6.7 Zulässige Rohrverbindungskräfte

Die am häufigsten auftretenden Verbindungsarten von Rohr und Rohrboden sind in **Tabelle 8.2-5** zusammengestellt. Dabei ist jeder Verbindungsart ein entsprechender Sicherheitsfaktor F_r zugeordnet. Die dabei auftretenden Rohrlängsspannungen sollen die nachfolgenden Bedingungen erfüllen:

a) Verbindungsarten a, b und c

$$\sigma_L \le \sigma_{zul} \cdot F_r \qquad (8.2\text{-}47)$$

b) Verbindungsarten d, e und f

$$\sigma_L \le \sigma_{zul} \cdot F_e \cdot F_r \cdot F_y \qquad (8.2\text{-}48)$$

mit σ_{zul} als P_m-Wert nach **Tabelle 6.7-1**, jedoch nicht mehr als $R_{p0,2T}$.

F_r nach **Tabelle 8.2-5**

F_e Faktor zur Berücksichtigung der Haftaufweitung

F_e = 1 bei Rohreinwalzungen mit Rille oder wenn die Verbindung durch Explosionsschweißung erfolgt, sonst

$$F_e = \frac{\text{eingewalzte Rohrlänge}}{\text{Außendurchmesser des Rohres}} \le 1$$

$$F_y = \frac{R_{pT} \text{ des Rohrbodenmaterials}}{R_{pT} \text{ des Rohrmaterials}}$$

es muss gelten $F_y \le 1$

Einzelheiten der angegebenen Berechnungsverfahren dürfen der nachfolgend aufgeführten Literatur entnommen werden:

a) TEMA [5]

b) PD 5500: 2000 [4], Abschnitt 3.9

c) ASME Code, Section VIII, Division 1, Appendix AA [6]

Verbindungsart Rohr/Rohrboden	F_r
a) nur eingeschweißt; Schweißnahtdicke ≥ Rohrwanddicke	0,80
b) nur eingeschweißt; Schweißnahtdicke < Rohrwanddicke	0,55
c) eingewalzt und eingeschweißt Schweißnahtdicke ≤ Rohrwanddicke	0,80
d) eingewalzt und eingeschweißt Schweißnahtdicke < Rohrwanddicke	0,55
e) nur eingewalzt	0,50
f) explosionsverschweißt	0,80

Tabelle 8.2-5: F_r-Werte für typische Rohrverbindungsarten

8.2.7 Berücksichtigung äußerer Kräfte und Momente in Druckbehälterwandungen

8.2.7.1 Allgemeines

Die Berücksichtigung äußerer Kräfte und Momente in Druckbehälterwandungen darf nach den in Abschnitt 6.1 genannten Verfahren erfolgen.

8.2.7.2 Liegende Behälter auf Sätteln

Die Beanspruchungen sind in Behälterlängs- und Umfangsrichtung zu ermitteln.

Hinweis:
Geeignete Verfahren hierfür sind z. B. in British Standard 5500 (2000) „Specification for unfired fusion welded pressure vessels“, Annex G, und in AD 2000-Merkblatt S3/2 angegeben.

8.2.7.3 Behälter mit Tragpratzen

8.2.7.3.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt dient der Berechnung stehen der zylindrischer Behälter, deren Wandung durch Tragpratzen örtlich beansprucht wird. Zu untersuchen sind Beanspruchungen aus Radialkräften F, Querkräften Q, Längsmomenten M_l und Umfangsmomenten M_u (**Bild 8.2-19**). Diese Belastungen sind anteilig auf die Anschlussbleche zu verteilen.

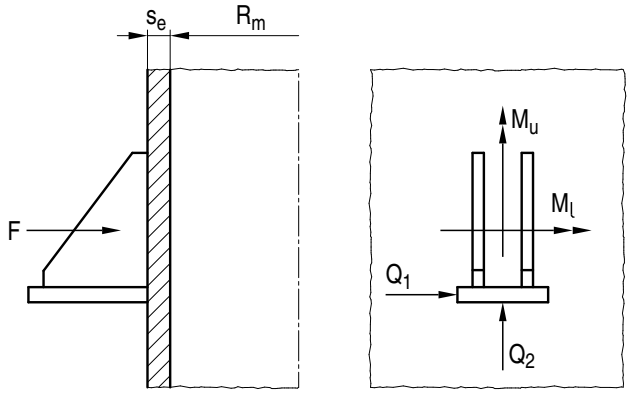


Bild 8.2-19: Behälter mit Tragpratzen

8.2.7.3.2 Berechnungsverfahren

(1) Geeignete Verfahren zur Berücksichtigung der Schnittlasten dürfen entnommen werden aus:

a) WRC Bulletin 297 [2]

und gegebenenfalls

b) WRC Bulletin 107 [3] und

c) PD 5500:2000 [4], Annex G

d) AD 2000-Merkblatt S3/4

(2) Spannungskategorisierung und Spannungsbegrenzung sind nach Abschnitt 7.7 und 7.8 vorzunehmen.

8.3 Pumpen

8.3.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt 8.3

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
a	Außenradius	mm
b	Innenradius	mm
r	Radius	mm
t	Plattendicke	mm
w	Verschiebung der Plattenmittelfaser	mm
A_j, A_0, A_1, A_2, A_3	Hilfsgrößen	—
D	Plattensteifigkeit	Nmm
E	Elastizitätsmodul	N/mm²
K_i, K_1, K_2, K_3, K_4	Integrationskonstanten	—
M	Biegemoment	Nmm
M_r	radiales Biegeschnittmoment	Nmm/mm
M_t	tangentiales Biegeschnittmoment	Nmm/mm
M_{rt}	Drillschnittmoment	Nmm/mm
Q_r	Querkraft im Radialschnitt	N/mm
Q_t	Querkraft imTangentialschnitt	N/mm
α	Neigungswinkel der Tangente an der Plattenmittelfaser	grd
ν	Querkontraktionszahl	—
ρ	bezogener Schnittkreisradius = r/a	—
σ_r	radiale Biegespannung	N/mm²
σ_t	tangentiale Biegespannung	N/mm²
τ_r	Schubspannung infolge Q_r	N/mm²
τ_{rt}	Schubspannung infolge M_{rt}	N/mm²
τ_t	Schubspannung infolge Q_t	N/mm²
ϕ	Schnittwinkel	grd
Ψ	Plattenkenngröße Ψ = b/a	—

8.3.2 Berechnung von Spannungen und Verformungen infolge äußerer Biegemomente auf Kreisringplatten

8.3.2.1 Allgemeines

Äußere Biegemomente auf Kreisringplatten, hier Deckel oder Böden, wie sie z. B. durch angeschlossene Rohrleitungen eingeleitet werden können, verursachen Zusatzspannungen und unsymmetrische Verformungen aus der Plattenebene heraus.

Das in diesem Abschnitt beschriebene Berechnungsverfahren dient der Nachprüfung der bereits für Innendruck und evtl. Axialkraft nach einschlägigen Regeln vordimensionierten Deckeln oder Böden. Die berechneten Ergebnisse sind den aus Innendruck und Axialkraft resultierenden Ergebnissen zu überlagern.

8.3.2.2 Berechnung

8.3.2.2.1 Allgemeines

Die folgenden Gleichungen sind unabhängig von der Art der Lagerung des Plattenaußenrandes. Für die Randbedingung eingespannt und frei aufliegend werden die jeweils zugehörigen Konstanten K_i in **Tabelle 8.3-1** angegeben.

In der **Tabelle 8.3-1** werden weiterhin Gleichungen angegeben, die eine rekursive Berechnung der Konstanten $K_i = f(\Psi)$ aus den Hilfsgrößen A_i ermöglichen. Sie können zu einer geschlossenen Programmierung der Formeln herangezogen werden.

Die nachstehenden Gleichungen beinhalten als Konstante die Querkontraktionszahl $\nu = 0{,}3$ und gelten für Geometrien im Bereich von $a - b < 3 \cdot t$.

Der Verlauf der Randkraft infolge des Biegemomentes M ist in **Bild 8.3-1** dargestellt.

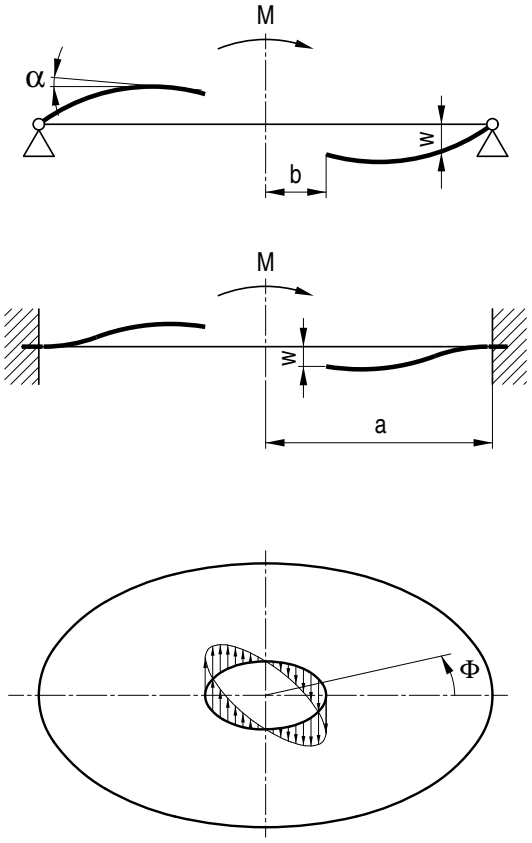


Bild 8.3-1: Verlauf der Randkraft infolge M
Berechnungsgrößen

8.3.2.2.2 Berechnung der Schnittgrößen und Schnittspannungen

(1) Die Kräfte und Momente im Schnitt können für jeden Punkt der Kreisringplatte mit Hilfe der folgenden Gleichungen ermittelt werden:

a) Radiales Biegemoment

$$M_r = -\frac{D}{a^2} \cdot \left(6{,}6 \cdot K_1 \cdot \rho + 1{,}3 \cdot K_3 \cdot \frac{1}{\rho} + 1{,}4 \cdot K_4 \cdot \frac{1}{\rho^3} \right) \cdot A_0 \cdot \cos\phi \qquad (8.3\text{-}1)$$

b) Tangentiales Biegemoment

$$M_t = -\frac{D}{a^2} \cdot \left(3{,}8 \cdot K_1 \cdot \rho + 1{,}3 \cdot K_3 \cdot \frac{1}{\rho} + 1{,}4 \cdot K_4 \cdot \frac{1}{\rho^3} \right) \cdot A_0 \cdot \cos\phi \qquad (8.3\text{-}2)$$

c) Drillmoment

$$M_{rt} = \frac{D}{a^2} \cdot \left(1{,}46 \cdot \left(K_1 \cdot \rho - K_4 \cdot \frac{1}{\rho^3} \right) + 0{,}7 \cdot K_3 \cdot \frac{1}{\rho} \right) \cdot A_0 \cdot \sin\phi \qquad (8.3\text{-}3)$$

d) Querkraft im Radialschnitt

$$Q_r = \frac{D}{a^3} \cdot \left(8 \cdot K_1 - 2 \cdot K_3 \cdot \frac{1}{\rho^2} \right) \cdot A_0 \cdot \cos\phi \qquad (8.3\text{-}4)$$

e) Querkraft im Tangentialschnitt

$$Q_t = + \frac{D}{a^3} \cdot \left(8 \cdot K_1 + 2 \cdot K_3 \cdot \frac{1}{\rho^2} \right) \cdot A_0 \cdot \sin\phi \qquad (8.3\text{-}5)$$

mit der Plattensteifigkeit

$$D = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot \left(1 - \upsilon^2 \right)} \qquad (8.3\text{-}6)$$

und der Hilfsgröße

$$A_0 = - \frac{a \cdot M}{\pi \cdot D \cdot \psi^2} \qquad (8.3\text{-}7)$$

(2) Daraus ergeben sich die folgenden Schnittspannungen:

a) Biegespannung infolge M_r

$$\sigma_r = \frac{6 \cdot M_r}{t^2} \qquad (8.3\text{-}8)$$

b) Biegespannung infolge M_t

$$\sigma_t = \frac{6 \cdot M_t}{t^2} \qquad (8.3\text{-}9)$$

c) Schubspannung infolge M_{rt}

$$\tau_{rt} = \frac{6 \cdot M_{rt}}{t^2} \qquad (8.3\text{-}10)$$

d) Schubspannung infolge Q_r

$$\tau_r = \frac{6 \cdot Q_r}{t} \qquad (8.3\text{-}11)$$

e) Schubspannung infolge Q_t

$$\tau_t = \frac{6 \cdot Q_t}{t} \qquad (8.3\text{-}12)$$

(3) Die Vergleichsspannungen sind an den Orten $\Phi = 0°$ und $\Phi = 90°$ nach der Festigkeitshypothese nach von Mises oder derjenigen nach Tresca zu ermitteln.

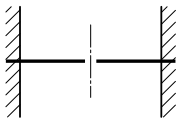
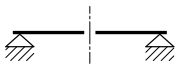
Einspannung	K_i/A_i	Formel	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
	K_1	$-(K_2 + K_4)$	0,001273	0,005331	0,012650	0,023150	0,035340	0,046610	0,054870	0,059740
	K_2	$\frac{1}{2} \cdot K_3 - 2 \cdot K_4$	- 0,001295	- 0,005662	- 0,014040	- 0,026300	- 0,039440	- 0,048220	- 0,048500	- 0,039470
	K_3	$\frac{A_2}{A_1 \cdot A_3}$	- 0,002500	- 0,010000	- 0,022500	- 0,040000	- 0,062500	- 0,090000	- 0,122500	- 0,160000
	K_4	$-\frac{1}{A_3}$	0,000023	0,000331	0,001397	0,003149	0,004095	0,001609	- 0,006375	- 0,020260
		$A_1 = -3{,}3 \cdot \psi + \frac{1{,}3}{\psi}$		$A_2 = 6{,}6 \cdot \psi + \frac{1{,}4}{\psi^3}$			$A_3 = -\frac{A_2}{A_1} \cdot \left(3{,}3 + \frac{2{,}7}{\psi^2} \right) - 6{,}6 - \frac{1{,}4}{\psi^4}$			
	K_1	$-(K_2 + K_4)$	0,000488	0,001894	0,004066	0,006792	0,009848	0,013030	0,016190	0,019220
	K_2	$\frac{1}{6{,}6} \cdot (1{,}3 \cdot K_3 - 5{,}2 \cdot K_4)$	- 0,000511	- 0,002251	- 0,005791	- 0,011920	- 0,021460	- 0,035160	- 0,053600	- 0,077200
	K_3	$\frac{A_2}{A_1 \cdot A_3}$	- 0,002500	- 0,010000	- 0,022500	- 0,040000	- 0,062500	- 0,090000	- 0,122500	- 0,160000
	K_4	$-\frac{1}{A_3}$	0,000023	0,000357	0,001725	0,005123	0,011610	0,022120	- 0,037410	- 0,057980
		$A_1 = -1{,}3 \cdot \left(\psi - \frac{1}{\psi} \right)$		$A_2 = -1{,}4 \cdot \left(\psi - \frac{1}{\psi^3} \right)$			$A_3 = -\frac{A_2}{A_1} \cdot \left(-1{,}3 - \frac{2{,}7}{\psi^2} \right) + 1{,}4 \cdot \left(1 - \frac{1}{\psi^4} \right)$			

Tabelle 8.3-1: Formeln und Werte für die Konstanten K_i und die Hilfsgrößen A_i

8.3.2.2.3 Berechnung der Verformungen

Die Verformungen können für jeden Punkt der Kreisringplatte mit Hilfe der folgenden Gleichungen ermittelt werden:

a) Die Verschiebung der Plattenmittelfaser

$$w = \left(K_1 \cdot \rho^3 + K_2 \cdot \rho + K_3 \cdot \rho \cdot \ln\rho + K_4 \cdot \frac{1}{\rho} \right) \cdot A_0 \cdot \cos\phi \qquad (8.3\text{-}13)$$

b) Der Neigungswinkel der Tangente an der Plattenmittelfaser

$$\alpha = \frac{1}{a} \left(3 \cdot K_1 \cdot \rho^2 + K_2 + K_3 (1 + \ln\rho) - K_4 \cdot \frac{1}{\rho^2} \right) \cdot A_0 \cdot \cos\phi \qquad (8.3\text{-}14)$$

mit D und A_0 aus den Gleichungen (8.3-6) und (8.3-7) sowie K_1, K_2, K_3 und K_4 aus der **Tabelle 8.3-1**.

8.3.3 Durchführung eines Funktionsfähigkeitsnachweises

8.3.3.1 Allgemeines

Hinweis:
Der Funktionsfähigkeitsnachweis des Gesamtaggregats muss ebenfalls Nachweise für Einbauteile wie z. B. Welle, Dichtungen und Lager sowie Hilfs- und Versorgungssysteme sowie die Nachweise hydraulischer und mechanischer Leistungsdaten beinhalten. Interaktionen zu den drucktragenden Teilen sind hierbei zu berücksichtigen. Solche Nachweise sind nicht im Geltungsbereich dieser Regel enthalten und deshalb zusätzlich zu den Nachweisen für die drucktragenden Wandungen abzuhandeln.

(1) In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an druckführende Gehäuse behandelt, die sich aus einer Aufgabenstellung „Funktionsfähigkeit“ für sicherheitstechnisch wichtige Pumpen ergeben können.

(2) Der Nachweis der Funktionsfähigkeit der druckführenden Gehäuse kann je nach Zweckmäßigkeit und Aussagekraft

rechnerisch oder experimentell oder als Kombination von beiden geführt werden.

(3) Für Pumpengehäuse wird dieser Nachweis üblicherweise durch die Funktionsprüfungen beim Hersteller und in der Anlage (Inbetriebsetzung) erbracht. Erforderlichenfalls sind ergänzende rechnerische Nachweise oder Analogiebetrachtungen zu erbringen.

8.3.3.2 Rechnerische Nachweise

8.3.3.2.1 Allgemeines

Rechnerische Nachweise zur Funktionsfähigkeit erfolgen mittels einer Spannungs- und/oder Verformungsanalyse und gegebenenfalls einer Stabilitätsanalyse.

8.3.3.2.2 Funktionsfähigkeit der Pumpe während des Lastfalls

Für die Teile des Pumpengehäuses, die für die Funktionsfähigkeit relevant sind, sind die aus den Beanspruchungen während des Lastfalles resultierenden Primärspannungen entsprechend der jeweiligen Beanspruchungsstufe, jedoch nicht über Beanspruchungsstufe B hinausgehend, zu begrenzen. Es ist zu prüfen, ob im Einzelfall ein Verformungsnachweis erfolgen muss. Die Spannungsbegrenzung darf entfallen, wenn nachgewiesen wird, dass die aus den Beanspruchungen während des Lastfalles resultierenden Verformungen von Gehäuseteilen die Funktionsfähigkeit nicht beeinträchtigen. Dies ist erfüllt, wenn z. B. ausreichende Spiele bzw. Querschnitte vorhanden bleiben. Bei zusammengepassten Teilen, zwischen denen eine Relativbewegung stattfindet (z. B. Spaltring), ist ein kurzzeitiges Anstreifen tolerierbar, wenn verschleißfeste und nicht zum Fressen neigende Werkstoffpaarungen gewählt werden.

8.3.3.2.3 Funktionsfähigkeit der Pumpe nach dem Lastfall

Für die Gehäuseteile, die für die Funktionsfähigkeit relevant sind, sind die aus den Beanspruchungen während des Lastfalles resultierenden Primärspannungen entsprechend der jeweiligen Beanspruchungsstufe, jedoch nicht über Beanspruchungsstufe C hinausgehend, zu begrenzen. Treten dabei bleibende Verformungen auf, ist nachzuweisen, dass diese keinen unzulässigen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit haben.

8.3.3.3 Experimentelle Nachweise

Experimentelle Nachweise zur Funktionsfähigkeit erfolgen u.a. durch eine Leistungsprüfung auf dem Prüfstand oder während der Inbetriebsetzung in der Anlage unter besonderen Versuchsbedingungen.

Voraussetzung für einen abdeckenden Nachweis ist die Übertragbarkeit der Versuchsbedingungen auf die im Betrieb und bei Störfällen auftretenden Funktionsanforderungen, Belastungen und sonstige Randbedingungen. Werden nicht alle Randbedingungen hinreichend genau realisiert, so ist der experimentelle Nachweis durch einen analytischen Nachweis zu ergänzen.

8.4 Armaturengehäuse

8.4.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt 8.4

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
d_{aA}	Nennaußendurchmesser der Armatur in Schnitt A-A ohne Berücksichtigung von Toleranzen	mm
d_{aR}	Nennaußendurchmesser der anschließenden Rohrleitung ohne Berücksichtigung von Toleranzen	mm
d_i	Nenninnendurchmesser gemäß Bild 8.4-1	mm
d_{iA}	Nenninnendurchmesser der Armatur in Schnitt A-A ohne Berücksichtigung von Toleranzen	mm
d_{iG}	Gehäuseinnendurchmesser gemäß Bild 8.4-5	mm
d_{iR}	Nenninnendurchmesser der anschließenden Rohrleitung ohne Berücksichtigung von Toleranzen	mm
e	mittragende Länge	mm
f	Faktor gemäß Tabelle 8.4-4	—
h	Höhe gemäß Bild 8.4-3	mm
m, n	Materialparameter gemäß Tabelle 7.8-1	—
p	Auslegungsdruck in der Stufe 0 oder jeweils auftretender Innendruck in den Beanspruchungsstufen A und B	MPa
p_B	Innendruck des jeweiligen Lastfalls	MPa
Δp_{fi}	Druckschwankungsbereich vom Normalbetrieb bis zum betrachteten Zustand	MPa
$p_{f(max)}$	maximaler Druckschwankungsbereich aus Δp_{fi}	MPa
r	mittlerer Radius im Schnitt A-A gemäß Bild 8.4-7	mm
r_2, r_4	Ausrundungsradius gemäß Bild 8.4-2	mm
r_3	Radius gemäß Bild 8.4-3	mm
r_t	Ausrundungsradius gemäß Bild 8.4-7	mm
s_A	Wanddicke des Abzweigs	mm
s_{An}	Wanddicke gemäß Bild 8.4-7	mm
s_{Hn}	Wanddicke gemäß Bild 8.4-7	mm
s_n	Wanddicke der Armatur (gemäß Abschnitt 7.1.4) im Schnitt A-A gemäß Bild 8.4-4 und Bild 8.4-5	mm
s_{ne}	Wanddicke gemäß Bild 8.4-5	mm
s_R	Wanddicke der anschließenden Rohrleitung gemäß Bild 8.4-4	mm
A	Querschnittsfläche der Armatur im Schnitt A-A gemäß Bild 8.4-4 und Bild 8.4-5	mm^2
A_p	drucktragende Fläche	mm^2
A_σ	tragende Querschnittsfläche	mm^2
C_a	Korrekturfaktor für Schrägsitzarmaturen gemäß Gleichung (8.4-14)	—
C_b	Spannungsbeiwert für die Biegespannung gemäß Gleichung (8.4-11)	—
C_2	Spannungsbeiwert für sekundäre Wärmespannungen infolge geometrischer Unstetigkeiten gemäß Bild 8.4-10	—
C_3	Beiwert für sekundäre Spannungen an Stellen geometrischer Unstetigkeiten infolge Temperaturänderungen des Mediums gemäß Bild 8.4-8	—
C_4	Faktor gemäß Bild 8.4-11	—
C_5	Spannungsbeiwert für die thermische Ermüdung gemäß Bild 8.4-12	—
C_6	Spannungsbeiwert für Wärmespannungen gemäß Gleichung (8.4-30)	$N \cdot mm^4$
D	Erschöpfungsgrad (Ausnutzungszahl)	—
D_{e1}	Durchmesser des größten Kreises, der sich im Verschneidungsbereich auf der einen Seite der Mittellinie einzeichnen lässt gemäß Bild 8.4-7	mm

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
D_{e2}	Durchmesser des größten Kreises, der sich im Verschneidungsbereich einzeichnen lässt	mm
E	Elastizitätsmodul bei der Auslegungstemperatur	N/mm²
F_{ax}	Axialkraft	N
F'_{ax}	Axialkraft aus der Rohrleitungsberechnung	N
M_b	Biegemoment	Nmm
M'_b	Biegemoment aus der Rohrleitungsberechnung	Nmm
M_R	resultierendes Moment	Nmm
M_t	Torsionsmoment	Nmm
M'_t	Torsionsmoment aus der Rohrleitungsberechnung	Nmm
N_i	zulässige Lastspielzahl	—
N_{ri}	spezifizierte Lastspielzahl	—
P_b	primäre Biegespannung nach Tabelle 7.7-5	N/mm²
P_{eb}	Spannung aus Rohrleitungslasten	N/mm²
$P_{eb\,max}$	sekundäre Spannung aus Rohrleitungslasten bei voller Ausnutzung der zulässigen Spannung	N/mm²
P_{lp}	lokale Membranspannung aus Innendruck gemäß Gleichung (8.4-5)	N/mm²
P_m	allgemeine primäre Membranspannung nach Tabelle 7.7-5	N/mm²
Q	resultierende Querkraft	N
Q'	Querkraft aus der Rohrleitungsberechnung	N
Q_p	Primär- plus Sekundärspannung aus Innendruck gemäß Gleichung (8.4-13)	N/mm²
Q_{T1}	Wärmespannung aus linearer Temperaturverteilung über der Wanddicke unter der Voraussetzung einer Temperaturänderung des Mediums ≤ 55 K/h	N/mm²
Q_{T3}	sekundäre Wärmespannungen aus geometrischer Unstetigkeit gemäß Gleichung (8.4-15)	N/mm²
R_{mT}	Mindestzugfestigkeit der anschließenden Rohrleitung bei Auslegungstemperatur	N/mm²
$R_{p0,2T}$	0,2%-Dehngrenze der anschließenden Rohrleitung bei Auslegungstemperatur	N/mm²
S	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1	N/mm²
S_a	halbe Spannungsschwingbreite	N/mm²
$S_{Armatur}$	Spannungsvergleichswert S oder S_m für den Werkstoff des Armaturengehäuses bei Auslegungstemperatur gemäß Tabelle 6.6-1	N/mm²
S_i	Spannungsspitze	N/mm²
S_m	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1	N/mm²
S_n	primäre plus sekundäre Spannungen für einen Lastzyklus	N/mm²
$S_{n(max)}$	maximale primäre plus sekundäre Spannungen gemäß Gleichung (8.4-32)	N/mm²
S_{p1}	pauschale maximale Gesamtspannung an der Gehäuseinnenseite	N/mm²
S_{p2}	pauschale maximale Gesamtspannung an der Gehäuseaußenseite	N/mm²

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
S_R	rechnerisch anzusetzender Beanspruchungsgrenzwert gemäß Tabelle 8.4-1	N/mm²
S_{Rohr}	Spannungsvergleichswert S oder S_m für den Werkstoff der anschließenden Rohrleitung bei Auslegungstemperatur gemäß Tabelle 6.6-1	N/mm²
T	Auslegungstemperatur	K
T_{De1}	Temperatur gemäß Bild 8.4-6	K
T_{sn}	Temperatur gemäß Bild 8.4-6	K
$\Delta T'$	maximale Temperaturdifferenz an maßgebenden Gehäusestellen (D_{e1}, s_n), resultierend aus einer Temperaturänderung des Mediums von 55 K/h gemäß Bild 8.4-9	K
ΔT_f	Änderung der Mediumtemperatur	K
ΔT_{fi}	Änderung der Mediumtemperatur im Kombinationsfall i	K
$\Delta T_{f(max)}$	maximale Änderung der Mediumtemperatur	K
ΔT_{f1}, ΔT_{f2}, ΔT_{f3}, ΔT_1, ΔT_2, ΔT_3	Änderung der Mediumtemperatur (Temperaturschwingbreiten)	K
$W_{Armatur}$	axiales Widerstandsmoment bei den Nennabmessungen der Armatur, bezogen auf den Schnitt A-A in Bild 8.4-4 und Bild 8.4-5 gemäß Gleichung (8.4-8)	mm³
W_{Rohr}	axiales Widerstandsmoment bei den Nennabmessungen der anschießenden Rohrleitung, bezogen auf die Nennabmessungen gemäß Gleichung (8.4-7)	mm³
W_t	polares Widerstandsmoment der Armatur im Schnitt A-A gemäß Bild 8.4-4 und Bild 8.4-5 ($W_t = 2 \cdot W_A$ für den Kreisquerschnitt mit konstanter Wanddicke)	mm³
α	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei der Auslegungstemperatur	1/K
α_1	Winkel zwischen der Durchflussrichtung im Armaturengehäuse und dem Aufbau (Spindel, Kegel) gemäß Bild 8.4-4	grd
σ_b	Spannung aus Biegemomenten	N/mm²
σ_L	Spannung aus Belastungen in Rohrachsrichtung	N/mm²
σ_V	Vergleichsspannung	N/mm²
$\tau_{a\,max}$	Spannung aus Querkräften	N/mm²
τ_t	Spannung aus Torsionsmoment	N/mm²

8.4.2 Allgemeines

(1) Bei Armaturen, die allen Anforderungen dieses Abschnittes entsprechen, liegt der Bereich der höchsten Spannung bei Innendruckbelastung am Übergang des Stutzens zum Durchflussbereich und ist durch Umfangsspannungen senkrecht zur Ebene der Mittellinien gekennzeichnet, deren Maximalwert bei der Innenwandung liegt. Die Bestimmungen des Abschnittes 8.4.3 dienen zur Überprüfung der allgemeinen primären Membranspannung im Bereich des Stutzens.

(2) Im Bereich des Stutzens wird die maximale primäre Membranspannung nach der Flächenvergleichsmethode entsprechend Abschnitt 8.4.3 ermittelt. Die Vorgehensweise ist in **Bild 8.4-1** dargestellt.

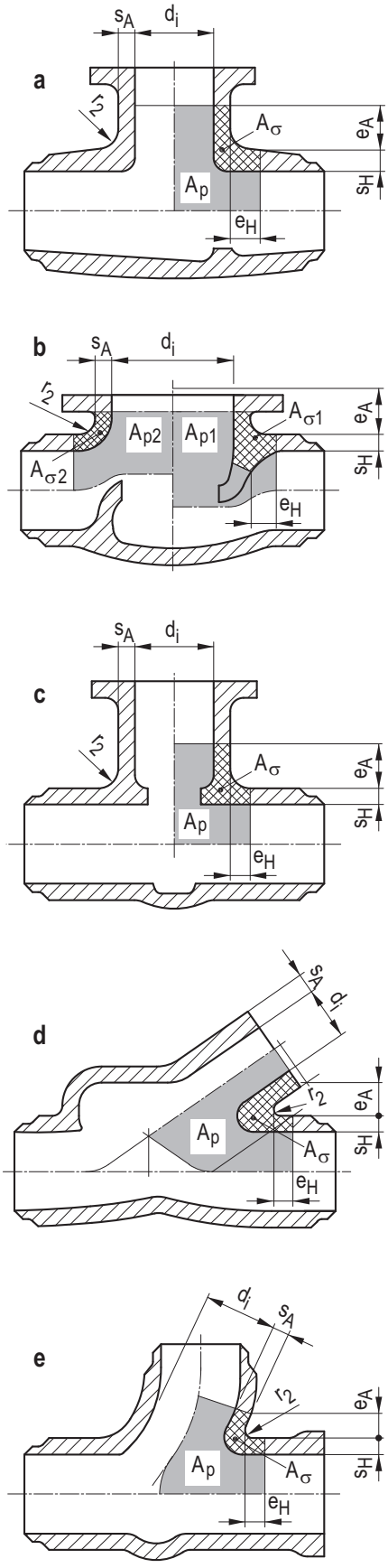


Bild 8.4-1: Flächenvergleichsmethode

(3) Der nach Abschnitt 8.4.3 berechnete Wert von P_m ist normalerweise der Größtwert der allgemeinen primären Membranspannung für übliche Armaturen. Bei abweichenden Bauformen sind die Bereiche außerhalb des Stutzens auf eventuell auftretende größere Spannungen zu untersuchen. Gefährdete Bereiche sind nach der Flächenvergleichsmethode entsprechend der jeweiligen örtlichen Gehäusekontur zu untersuchen.

(4) Die Anwendung der in den Abschnitten 8.4.4 und 8.4.5 beschriebenen Verfahren zur komponentenspezifischen Spannungsanalyse setzt die Erfüllung der in Abschnitt 8.4.3 enthaltenen Anforderungen für den Primärspannungsnachweis unter Innendruckbelastung voraus.

(5) Die Spannungsanalyse der Armaturengehäuse ist üblicherweise nach den Verfahren gemäß Abschnitt 8.4.4 oder 8.4.5 durchzuführen. Rohranschlusslasten werden dabei pauschal (d. h. nach Maßgabe des maximal möglichen Biegemoments der angeschlossenen Rohrleitung) berücksichtigt.

(6) Alternativ oder bei Nichteinhaltung der Bedingungen nach Abschnitt 8.4.4 oder 8.4.5 darf nach Abschnitt 8.4.6 vorgegangen werden.

8.4.3 Primäre Membranspannung infolge Innendruck

(1) Anhand einer maßstäblichen Zeichnung des Armaturengehäuses, die einen Schnitt im Bereich des Stutzens in der gemeinsamen Ebene der Mittellinien von Durchflusszone und Armaturenaufbau darstellt, bestimmt man die drucktragende Fläche A_p und die tragende Querschnittsfläche A_σ. A_p und A_σ werden von der Innenseite des Armaturenkörpers begrenzt, wobei der materialspezifische Abnutzungszuschlag von der Wanddicke abgezogen wird.

(2) Die Höhe der allgemeinen primären Membranspannung ist im Stutzen folgendermaßen zu berechnen:

$$P_m = \left(A_p / A_\sigma + 0{,}5\right) \cdot p \le S_m \qquad (8.4\text{-}1)$$

Die Bildung des Spannungsvergleichswertes S_m ist **Tabelle 6.6-1** zu entnehmen.

(3) Die Längen e_H und e_A, die die drucktragende Fläche und die tragende Querschnittsfläche eingrenzen, werden folgendermaßen ermittelt, siehe **Bild 8.4-1**:

$$e_H = \max.\left\{0{,}5 \cdot d_i - s_A ; s_H\right\} \qquad (8.4\text{-}2)$$

$$e_A = 0{,}5 \cdot r_2 + 0{,}354 \cdot \sqrt{s_A \cdot \left(d_i + s_A\right)} \qquad (8.4\text{-}3)$$

Bei der Festlegung geeigneter Werte für die obigen Parameter kann z. B. bei Kugelventilen und anderen Gehäusen mit unsymmetrischen Querschnittsformen eine zusätzliche Bewertung notwendig werden. In solchen Fällen werden die inneren Grenzen von A_p durch die Linien senkrecht zur Ebene von Anschlussenden und Spindel gebildet, die die jeweils größten inneren Gehäuseausdehnungen verbinden (siehe **Bild 8.4-1**, Darstellungen b, d und e).

(4) Übersteigen die errechneten Grenzen für die Flächen A_p und A_σ, die durch e_A und e_H gebildet werden, die Grenzen des Armaturengehäuses (**Bild 8.4-1**, Darstellung b, siehe auch **Bild A 4.1-8**), bilden die Grenzen des Armaturengehäuses die Begrenzung von A_p und A_σ. Dabei bleiben Flächen von angeschlossenen Rohrleitungen, die innerhalb der Grenzen von e_A und e_H liegen, unberücksichtigt. Falls ein Flansch innerhalb von A_σ liegt, bleibt die Fläche des Flanschblatts ebenfalls unberücksichtigt.

(5) Rippenartige Erweiterungen des Armaturenkörpers werden nur soweit der Fläche von A_σ zugerechnet, soweit die Wanddicke der Rippe der durchschnittlichen Wanddicke des Armaturenkörpers in diesem Bereich entspricht. Die verbleibende Rippenfläche wird zu A_p addiert (**Bild 8.4-1**, Darstellung b). Außerdem muss die A_σ zugeschlagene Fläche folgende Anforderung erfüllen: Eine Gerade senkrecht zur Ebene von Spindel und Anschlussrohrenden, die A_σ in jedem beliebigen Punkt durchstößt, darf nicht aus der Innenwandung heraustreten, sondern muss ununterbrochen innerhalb der Wandung des Gehäusekörpers verlaufen bis sie die äußere Oberfläche des Armaturengehäuses verlässt.

(6) Bei üblichen Gehäuseformen wird davon ausgegangen, dass der Bereich mit der größten Spannungsbelastung inner-

halb von A_σ entsprechend den verschiedenen Darstellungen nach **Bild 8.4-1** liegt. Im Falle sehr unregelmäßiger Armaturengehäuse ist es erforderlich, alle Bereiche des Abzweigs zu überprüfen, um sicherzustellen, dass der größte Wert für P_m sowohl für den Fall der geöffneten als auch für den der vollständig geschlossenen Armatur bestimmt wurde.

8.4.4 Pauschale Spannungsanalyse für die Prüfgruppe A1

(1) Das Verfahren ist nur anzuwenden, wenn die folgenden Geometriebedingungen eingehalten sind:

a) Radius $r_2 \geq 0{,}3 \cdot s_n$

b) Radius $r_3 \geq \max. \begin{cases} 0{,}05 \cdot s_n \\ 0{,}1 \cdot h \end{cases}$

c) Radius $r_4 < r_2$ ist zulässig

d) Kanten müssen gebrochen oder entgratet sein.

r_2 und r_4 sind für die verschiedenen Ausführungsformen in **Bild 8.4-2** dargestellt. r_3 und h sind in **Bild 8.4-3** erläutert. s_n ist die Nennwanddicke gemäß Abschnitt 7.1.4 und **Bild 8.4-4**.

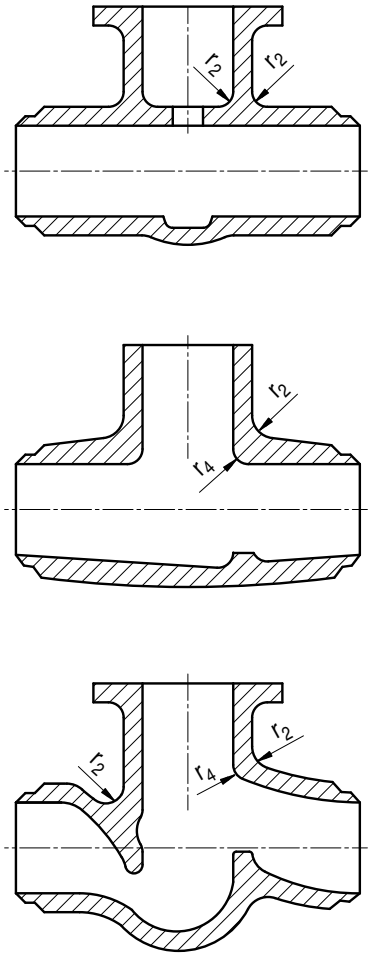


Bild 8.4-2: Ausrundungsradien

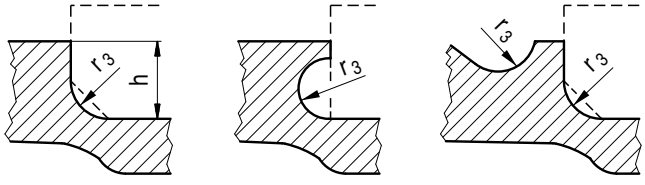


Bild 8.4-3: Zulässige Formen für Ausdrehungen

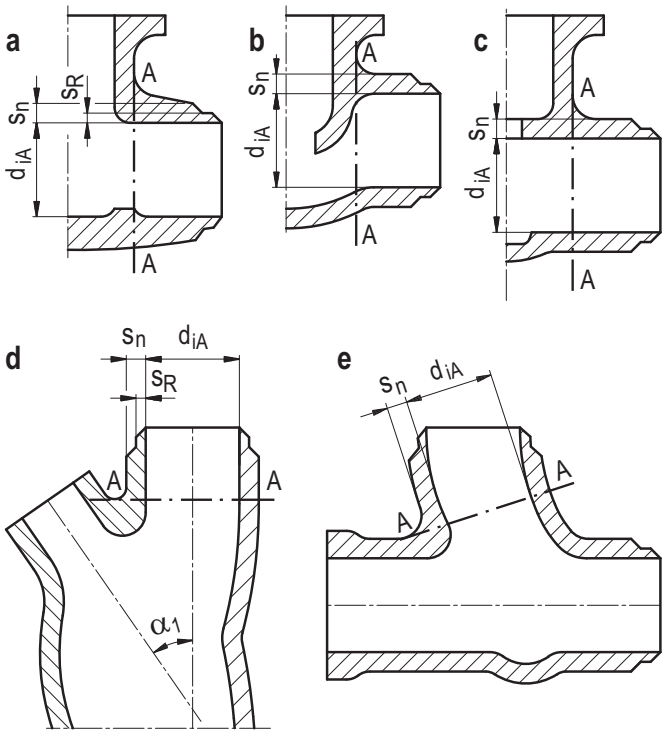


Bild 8.4-4: Maßgebende Schnitte an Armaturengehäusen

(2) Die Einhaltung der zulässigen primären Membran- plus Biegespannungen in den Beanspruchungsstufen A und B ist gemäß Gleichung (8.4-4) zu überprüfen.

$$P_{lp} + P_{eb} \leq 1{,}5 \cdot S_m \tag{8.4-4}$$

$$P_{lp} = 1{,}5 \cdot \left(\frac{d_{iA}}{2 \cdot s_n} + 0{,}5 \right) \cdot p \cdot C_a \tag{8.4-5}$$

mit

C_a gemäß Gleichung (8.4-14)

P_{eb} gemäß Gleichung (8.4-6).

(3) Für den Nachweis der Spannungsanteile aus den Schnittlasten der anschließenden Rohrleitung sind als wesentliche Beanspruchungsgrößen die Biegebeanspruchungen in den maßgebenden Querschnitten gemäß **Bilder 8.4-4** und **8.4-5** zu untersuchen.

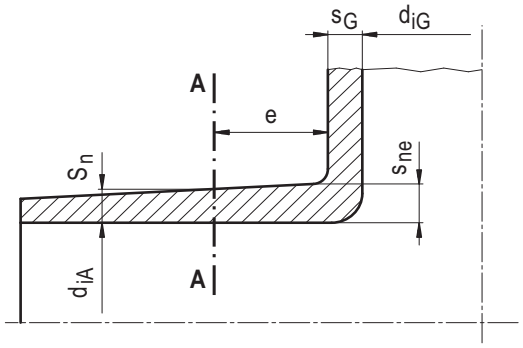


Bild 8.4-5: Maßgebender Schnitt an konischen Armaturengehäusen

(4) Die Biegespannungen werden ermittelt aus:

$$P_{eb} = \frac{C_b \cdot W_{Rohr} \cdot S_R}{W_{Armatur}} \tag{8.4-6}$$

mit

$$W_{Rohr} = \frac{\pi \cdot \left({d_{aR}}^4 - {d_{iR}}^4 \right)}{32 \cdot d_{aR}} \tag{8.4-7}$$

$$W_{Armatur} = \frac{\pi \cdot \left(d_{aA}{}^4 - d_{iA}{}^4\right)}{32 \cdot d_{aA}} \qquad (8.4\text{-}8)$$

wobei die Bedingung einzuhalten ist

$$W_{Armatur} \geq W_{Rohr} \qquad (8.4\text{-}9)$$

(5) Bei Armaturen mit konischem Ansatz gemäß **Bild 8.4-5** ist der Schnitt A-A unter Berücksichtigung der Abklinglänge e anzusetzen.

Es gilt:

$$e = 0{,}5 \cdot \sqrt{\frac{d_{iA} \cdot s_{ne}}{2}} \qquad (8.4\text{-}10)$$

mit d_{iA} und s_{ne} gemäß **Bild 8.4-5**

(6) Die Ermittlung des Spannungsbeiwertes C_b erfolgt aus:

$$C_b = \max \left\{ 0{,}335 \cdot \left(\frac{r}{s_n}\right)^{\frac{2}{3}} ; 1{,}0 \right\} \qquad (8.4\text{-}11)$$

mit r und s_n gemäß **Bild 8.4-4** und **Bild 8.4-5**.

(7) Der S_R-Wert in Gleichung (8.4-6) bezieht sich auf den Werkstoff der anschließenden Rohrleitung. Es sind die Werte gemäß **Tabelle 8.4-1** einzusetzen.

Beanspruchungsstufe	Werkstoffkombination			
	Rohrleitung	Armatur	Rohrleitung	Armatur
	Ferrit	Ferrit-Schmiedestahl	Austenit	Austenit-Schmiedestahl
	Ferrit	Ferrit-Guss	Austenit	Ferrit-Schmiedestahl
	Ferrit	Austenit-Schmiedestahl	Austenit	Austenit-Guss
	Ferrit	Austenit-Guss	Austenit	Ferrit-Guss
	S_R		S_R	
0	$R_{p0,2T}$		$1{,}35 \cdot R_{p0,2T}$	
A	$R_{p0,2T}$		$1{,}35 \cdot R_{p0,2T}$	
B	$R_{p0,2T}$		$1{,}35 \cdot R_{p0,2T}$	
C	$1{,}2 \cdot R_{p0,2T}$		$1{,}62 \cdot R_{p0,2T}$	
D	$\min. \begin{cases} 1{,}6 \cdot R_{p0,2T} \\ R_{mT} \end{cases}$		$\min. \begin{cases} 2{,}16 \cdot R_{p0,2T} \\ R_{mT} \end{cases}$	
$R_{p0,2T}$, R_{mT} : Festigkeitskennwerte der anschließenden Rohrleitung bei Auslegungstemperatur				

Tabelle 8.4-1: Zusammenstellung der rechnerisch anzusetzenden Beanspruchungsgrenzwerte S_R (Gleichung 8.4-6) des Rohranschlusses für die Werkstoffkombination von Rohrleitung und Armatur

(8) Es sind keine größeren Lasten an der Armatur zu berücksichtigen, als es das zulässige Spannungsniveau im Rohrleitungssystem erlaubt. Vorausgesetzt, dass gleiche Rohrleitungswerkstoffe, Durchmesser und Widerstandsmomente der Armatur im Berechnungsbereich vorliegen, und die Armatur selbst keinen Festpunkt darstellt, ist für die maximale Belastung der Armatur die Seite mit dem kleinsten Widerstandsmoment der Rohrleitung maßgebend. Andernfalls sind beide Gehäuseseiten zu überprüfen, um die maximal mögliche Belastung zu ermitteln.

(9) Für Gleichung (8.4-6) sind die zulässigen Spannungen in den einzelnen Beanspruchungsstufen gemäß **Tabelle 8.4-2** einzuhalten. Bei Anwendung der **Tabelle 8.4-2** gelten folgende konstruktive Voraussetzungen:

a) $d_{iA} \leq d_{iG}$ (siehe **Bild 8.4-5**)

b) $s_n \leq s_G$

c) bei Eckventilen ist zu überprüfen, dass keine gegenseitige Beeinflussung der Stutzen vorliegt; diese Überprüfung ist für prismatische Gehäuseformen nicht erforderlich.

Die Bildung des Spannungsvergleichswertes S_m ist **Tabelle 6.6-1** zu entnehmen.

Beanspruchungsstufe	zulässiger Wert für P_{eb}
A	$1{,}5 \cdot S_m$
B	$1{,}5 \cdot S_m$
C	$1{,}8 \cdot S_m$
D	$2{,}4 \cdot S_m$

Tabelle 8.4-2: Zulässige Spannung im Gehäuse aus Rohrleitungslasten

(10) Für die Berechnung der Summe von primären und sekundären Spannungen in den Beanspruchungsstufen A und B gilt:

$$S_n = Q_p + P_{eb} + 2\,Q_{T3} \qquad (8.4\text{-}12)$$

$$Q_p = 3{,}0 \cdot \left(\frac{d_{iA}}{2 \cdot s_n} + 0{,}5\right) \cdot p \cdot C_a \qquad (8.4\text{-}13)$$

mit

$$C_a = 0{,}2 + \frac{0{,}8}{\sin \alpha_1} \qquad (8.4\text{-}14)$$

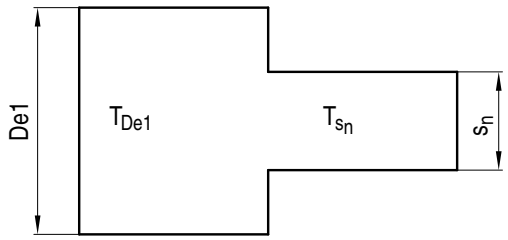
α_1 Winkel zwischen der Durchflussrichtung im Armaturengehäuse und dem Aufbau (Spindel, Kegel) gemäß **Bild 8.4-4**

P_{eb} ist gemäß Gleichung (8.4-6) einzusetzen.

d_{iA} und s_n sind den **Bildern 8.4-4** und **8.4-5** zu entnehmen.

Q_{T3} wird wie folgt ermittelt:

$$Q_{T3} = E \cdot \alpha \cdot C_3 \cdot \Delta T' \qquad (8.4\text{-}15)$$



$\Delta T' = (T_{De1} - T_{s_n})$

Bild 8.4-6: Ermittlung von $\Delta T'$

Die Ermittlung von D_{e1} und D_{e2} muss auf einer Detailskizze mit Hinweis auf die Originalzeichnung in einem geeigneten Maßstab erfolgen.

(11) Für die Beanspruchungsstufen C und D gilt:

$$S_n = P_{lp} + P_{eb} \qquad (8.4\text{-}16)$$

P_{lp} wird aus Gleichung (8.4-5) ermittelt; für p ist der jeweils auftretende Innendruck in den Beanspruchungsstufen C oder D einzusetzen.

(12) In den einzelnen Beanspruchungsstufen sind in den Gleichungen (8.4-12) und (8.4-16) die Spannungsgrenzwerte gemäß **Tabelle 8.4-3** einzuhalten. Die Bildung des Spannungsvergleichswertes S_m ist **Tabelle 6.6-1** zu entnehmen.

Beanspruchungsstufe	zulässiger Wert für S_n	
	Schmiedestahl	Stahlguss
A	$3 \cdot S_m$	$4 \cdot S_m$
B	$3 \cdot S_m$	$4 \cdot S_m$
C	$2{,}25 \cdot S_m$	$3 \cdot S_m$
D	$3 \cdot S_m$	$4 \cdot S_m$

Tabelle 8.4-3: Zulässige Spannungswerte für die Summe der primären plus sekundären Gehäusespannungen

(13) Der Nachweis für die Beanspruchungsstufen C und D ist nur zu führen, wenn die entsprechende Anforderung in den komponentenbezogenen Unterlagen aufgeführt ist.

(14) Armatur und Rohrleitungssystem können für bestimmte Lastfälle (siehe komponentenbezogene Unterlage) unterschiedlichen Beanspruchungsstufen zugeordnet werden. In diesem Fall ist der S_R-Wert für Gleichung (8.4-6) gemäß der Beanspruchungsstufe des Systems einzusetzen (siehe **Tabelle 8.4-1**).

(15) Der Nachweis mit den Gleichungen (8.4-1) bis (8.4-16) ist nur zulässig, wenn in der anschließenden Rohrleitung bei allen Lastfällen das zulässige Spannungsniveau eingehalten wird.

(16) Wird ein Rohrbruch unterstellt und liegt kein Rohrleitungsfestpunkt zwischen Bruchstelle und Armatur, dann muss, wenn für die Armatur Integrität oder Funktionsfähigkeit nach der komponentenbezogenen Unterlage gefordert wird, die Berechnung des Armaturengehäuses mit den tatsächlichen oder diese abdeckenden Rohrschnittlasten erfolgen.

8.4.5 Pauschale Spannungsanalyse für die Prüfgruppen A2 und A3

(1) Wenn folgende Bedingungen eingehalten sind, gilt der Spannungsnachweis als erbracht:

$$W_{Armatur} \geq 1{,}1 \cdot \frac{S_{Rohr}}{S_{Armatur}} \cdot W_{Rohr} \qquad (8.4\text{-}17)$$

und

$$W_{Armatur} \geq 1{,}5 \cdot W_{Rohr} \qquad (8.4\text{-}18)$$

(2) Die Gleichungen (8.4-17) und (8.4-18) gelten abdeckend für alle Beanspruchungsstufen. Sind Armatur und Rohrleitungssystem für bestimmte Lastfälle (siehe komponentenspezifische Unterlagen) unterschiedlichen Beanspruchungsstufen zugeordnet, so ist W_{Rohr} in Gleichung (8.4-17) gemäß **Tabelle 8.4-4** mit dem Faktor f zu multiplizieren.

(3) Wird ein Rohrbruch unterstellt und liegt kein Rohrleitungsfestpunkt zwischen Bruchstelle und Armatur, dann ist, wenn für die Armatur Integrität oder Funktionsfähigkeit nach der komponentenspezifischen Unterlage gefordert wird, Gleichung (8.4-23) unter Einhaltung der in diesem Fall zulässigen Spannungsgrenzen für $P_m + P_b$ nach **Tabelle 6.7-1** zu erfüllen. Zusätzlich ist in diesem Fall die Spannung S_n der Gleichung (8.4-16) nach **Tabelle 8.4-3** zu begrenzen, wobei in Gleichung (8.4-16) für P_{eb} der Wert von σ_V nach Gleichung (8.4-23) einzusetzen ist.

Die zulässigen Spannungen sind unter Verwendung von S anstatt S_m zu bilden.

(4) Alternativ zu dem in diesem Abschnitt beschriebenen Verfahren darf die Spannungsanalyse auch nach Abschnitt 8.4.4 erfolgen. Als Spannungsvergleichswert ist dann anstatt S_m weiterhin S zu verwenden.

Beanspruchungsstufe		f
Rohr	Armatur	
D	B	1,6
D	C	1,33
C	B	1,2

Tabelle 8.4-4: Bestimmung des Faktors f

8.4.6 Detaillierte Spannungsanalyse mit Schnittlasten aus der Rohrleitungsberechnung

(1) Der Nachweis nach diesem Abschnitt ist nur notwendig, wenn bei der pauschalen Spannungsanalyse gemäß Abschnitt 8.4.4 oder 8.4.5 nicht in jedem Fall die zulässige Spannung oder die geforderte Bedingung eingehalten werden kann. Er ist anwendbar auf Armaturen der Prüfgruppe A1, A2 und A3. Hierbei sind ebenfalls die Geometrie-Bedingungen gemäß Abschnitt 8.4.4 Absatz 1 und die konstruktiven Voraussetzungen gemäß Abschnitt 8.4.4 Absatz 9 einzuhalten. Lastfälle und Lastüberlagerung sind den komponentenbezogenen Unterlagen zu entnehmen.

(2) Aus der Rohrleitungsberechnung liegen für die beiden Schnittstellen der Armatur folgende Angaben für die einzelnen Lastfälle vor:

a) Axialkräfte F_{ax}'
b) Querkräfte Q'
c) Biegemomente M_b'
d) Torsionsmomente M_t'

Entsprechend dem Überlagerungsschema sind für jede Beanspruchungsstufe F_{ax}, Q, M_b und M_t zu ermitteln und die Spannungsanteile aus den Schnittlasten der anschließenden Rohrleitung wie folgt zu berechnen:

Spannung aus Belastungen in Rohrachsrichtung:

$$\sigma_L = \frac{d_{aA} \cdot p_B}{4 \cdot s_n} + \frac{F_{ax}}{A} \qquad (8.4\text{-}19)$$

Spannung aus Querkräften:

$$\tau_{a\,max} = \frac{2 \cdot Q}{A} \qquad (8.4\text{-}20)$$

Spannung aus Biegemomenten:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} \cdot C_b \qquad (8.4\text{-}21)$$

Spannung aus Torsionsmoment:

$$\tau_t = \frac{M_t}{W_t} \qquad (8.4\text{-}22)$$

Bei der Ermittlung von A, W_b und W_t ist zu beachten, dass die Wanddicke an der Gehäuseinnenseite um den Abnutzungszuschlag zu vermindern ist.

(3) Diese Einzelspannungen werden unter der konservativen Annahme, dass alle Maxima zeitgleich auftreten, vereinfacht zu einer Vergleichsspannung zusammengefasst:

$$\sigma_V = \sqrt{(\sigma_L + \sigma_b)^2 + 3 \cdot (\tau_{a_{max}} + \tau_t)^2} \qquad (8.4\text{-}23)$$

(4) Für Gleichung (8.4-23) sind in den einzelnen Beanspruchungsstufen und Prüfgruppen die Spannungsgrenzwerte für $P_m + P_b$ nach **Tabelle 6.7-1** einzuhalten.

Die Bildung der Spannungsvergleichswerte S_m und S ist **Tabelle 6.6-1** zu entnehmen.

(5) Die Ermittlung der primären und sekundären Spannungen erfolgt, wenn die Armatur in Prüfgruppe A1 eingestuft ist, gemäß Abschnitt 8.4.4.

Dabei ist in die Gleichungen (8.4-12) und (8.4-16) statt P_{eb} σ_V nach Gleichung (8.4-23) einzusetzen.

Für S_n gelten dann die zulässigen Spannungen nach **Tabelle 8.4-3**.

(6) Ist zum Zeitpunkt der Erstellung der Berechnung die konstruktive Ausführung der Armatur bereits festgelegt und liegen die Schnittlasten aus der Rohrleitungsberechnung noch nicht vor, dann können diese festgelegt werden. Dabei darf folgende Vorgehensweise gewählt werden:

a) Aus den Gleichungen (8.4-12) oder (8.4-16) für S_n erhält man bei voller Ausnutzung der zulässigen Spannung in den einzelnen Beanspruchungsstufen jeweils einen Wert $P_{eb\,max}$.

b) Falls dieser Wert ($P_{eb\,max}$) die zulässige Spannung für Gleichung (8.4-23) übersteigt, ist $P_{eb\,max}$ auf diesen Wert abzumindern.

c) Man setzt:

$$\sigma_L = \sigma_b = 2 \cdot (\tau_{a\,max} + \tau_t) \qquad (8.4\text{-}24)$$

und

$$\tau_{a\,max} = \tau_t = \frac{\sigma_b}{4} \qquad (8.4\text{-}25)$$

und

$$\sigma_V \le P_{eb\,max} \qquad (8.4\text{-}26)$$

Daraus wird

$$\sigma_b = \sigma_L = \frac{P_{eb\,max}}{\sqrt{5}} \qquad (8.4\text{-}27)$$

d) Mit diesen Werten ermittelt man die Vergleichsspannung σ_V nach Gleichung (8.4-23) und prüft deren Zulässigkeit.

e) Wird die zulässige Vergleichsspannung eingehalten, dann lässt sich aus den Werten in Absatz c direkt F_{ax}, Q, M_b und M_t ermitteln. Andernfalls müssen die Einzelspannungen in Absatz c gleichmäßig soweit abgemindert werden, bis die zulässige Vergleichsspannung eingehalten wird.

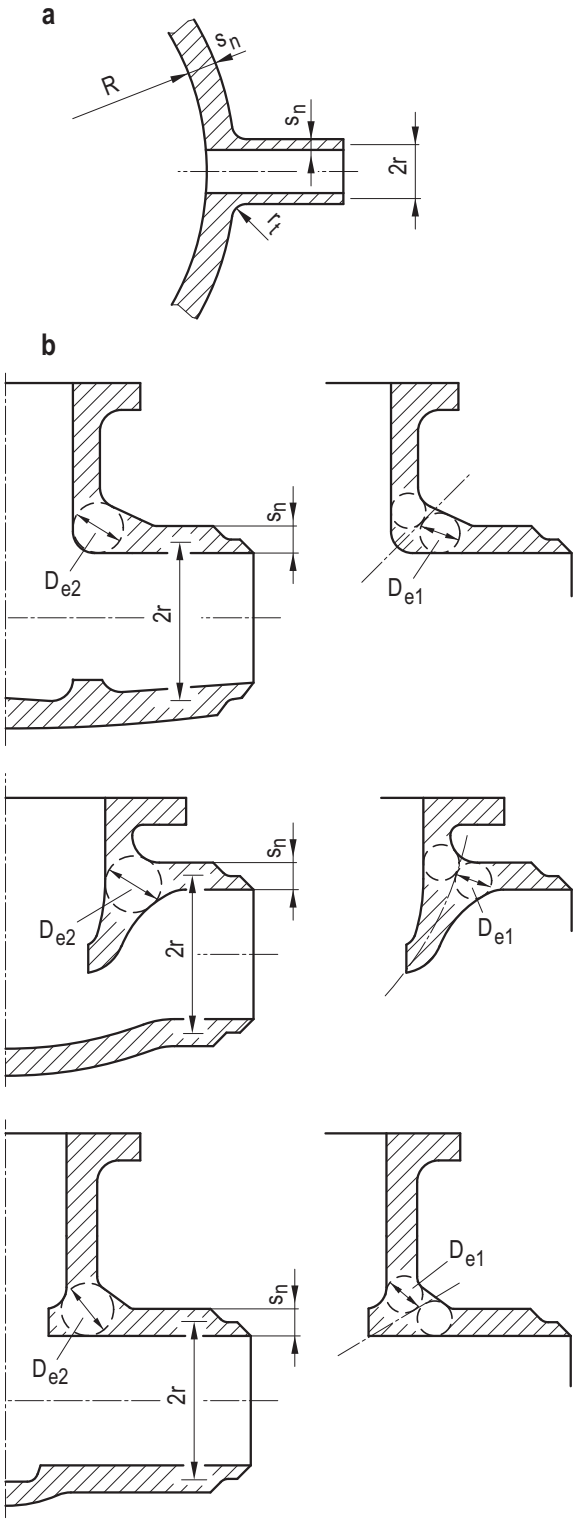
Diese Schnittlasten dürfen dann im Rahmen der Rohrleitungsberechnung nicht überschritten werden oder aber nur in der Weise variiert werden, dass sie nicht zu einer höheren Beanspruchung der Armaturen führen. Dabei ist außerdem zu beachten, ob gegenüber der Einstufung der Armatur laut komponentenbezogener Unterlage eine Umstufung zur Durchführung eines rechnerischen Funktionsfähigkeitsnachweises und damit auch eine andere Einstufung der Schnittlasten erforderlich sein kann.

8.4.7 Ermüdungsanalyse

8.4.7.1 Allgemeines

Eine Ermüdungsanalyse ist für alle Armaturen größer DN 50 in den Prüfgruppen A1 und A2 mit der spezifizierten Gesamtzyklenzahl (Lastspielzahl) - mindestens jedoch 1000 - durchzuführen. Die Ermüdungsanalyse entfällt für Prüfgruppe A3.

Hinweis:
Die nachfolgend beschriebenen Verfahren zur Ermüdungsanalyse beinhalten solche Konservativitäten, dass Spannungserhöhungen bei Gehäuseblöcken mit Mehreck-Außenkontur durch die Untersuchung des Schnittes, gemäß **Bild 8.4-7** abgedeckt sind.



D_{e1} : Durchmesser des größten Kreises, der sich im Verschneidungsbereich auf der einen Seite der Mittellinie einzeichnen lässt

D_{e2} : Durchmesser des größten Kreises, der sich im Verschneidungsbereich einzeichnen lässt

Für $D_{e1} < s_n$ gilt: $D_{e1} = s_n$

Bild 8.4-7: Modell für die Ermittlung von Sekundärspannungen in Armaturengehäusen

8.4.7.2 Pauschale Ermüdungsbetrachtung

Die pauschale Ermüdungsbetrachtung ist für die Beanspruchungsstufen A und B gemäß nachfolgend beschriebenem Verfahren durchzuführen und ersetzt eine Ermüdungsanalyse nach Abschnitt 8.4.7.3 oder 7.8, wenn die sich ergebende zulässige Lastwechselzahl größer als die spezifizierte Lastwechselzahl mindestens jedoch größer als 2000 ist.

Die pauschalen maximalen Gesamtspannungen S_{p1} an der Gehäuseinnenseite und S_{p2} an der Gehäuseaußenseite lassen sich unter der Voraussetzung einer Temperaturänderungsgeschwindigkeit des Mediums kleiner als oder gleich 55 K/h wie folgt ermitteln:

$$S_{p1} = \frac{2}{3} \cdot Q_p + \frac{P_{eb}}{2} + Q_{T3} + 1{,}3 \cdot Q_{T1} \qquad (8.4\text{-}28)$$

$$S_{p2} = 0{,}4 \cdot Q_p + P_{eb} + 2 \cdot Q_{T3} \qquad (8.4\text{-}29)$$

mit

$$Q_{T1} = C_6 \cdot (D_{e1})^2 \qquad (8.4\text{-}30)$$

$1{,}3 \cdot Q_{T1}$: Spannungsanteil aus der nichtlinearen Temperaturverteilung

C_6 : Spannungsbeiwert für Wärmespannungen
$4{,}06 \cdot 10^{-3}$ N/mm^4 für Austenit
$1{,}07 \cdot 10^{-3}$ N/mm^4 für Ferrit

Mit dem größeren Wert von S_{p1} und S_{p2} als S_a erhält man aus den Ermüdungskurven gemäß **Bild 7.8-1**, **Bild 7.8-2** oder **Bild 7.8-3** die zulässigen Lastspielzahlen. Dabei ist zu beachten, dass der Unterschied zwischen dem Elastizitätsmodul aus den Kurven und dem des Armaturenwerkstoffes bei Auslegungstemperatur berücksichtigt wird. Der S_a-Wert muss mit dem Verhältnis E-Kurve/E-Armatur bei Auslegungstemperatur multipliziert werden.

8.4.7.3 Detaillierte Ermüdungsanalyse

Hinweis:
Das nachfolgend beschriebene Verfahren kann bei Temperaturänderungsgeschwindigkeiten größer als 10 K/min zu nicht konservativen Ergebnissen führen.

(1) Zur Durchführung der detaillierten Ermüdungsanalyse müssen für alle spezifizierten Lastzyklen aus betrieblichen Vorgängen die Druckänderungen Δp_{fi} und die Temperaturänderungen ΔT_{fi} mit der zugehörigen Häufigkeit N_{ri} ermittelt werden.

(2) Für den Fall, dass während der Aufheiz- oder Abkühlvorgänge die Temperaturänderungsgeschwindigkeit 55 K/h überschreitet, muss die Temperaturschwingbreite mit der zugehörigen Zyklenzahl je Lastfall zusammengestellt werden:

Beispiel:
20 Vorgänge ΔT_1 = 250 K Aufheizen
10 Vorgänge ΔT_2 = 150 K Abkühlen
100 Vorgänge ΔT_3 = 100 K Abkühlen

Man kombiniert die Temperaturschwingbreiten jetzt derart, dass man die größtmöglichen Temperaturdifferenzen erhält.

10 Zyklen ΔT_{f1} = 150 K + 250 K = 400 K

10 Zyklen ΔT_{f2} = 250 K + 100 K = 350 K

90 Zyklen ΔT_{f3} = 100 K

(3) Druckschwankungen, die nicht durch die nachfolgende Bedingung unter a) ausgeschlossen sind, müssen in die Berechnung der Spannungsspitzen einfließen. Der volle Druckschwankungsbereich vom Normalbetrieb bis zum augenblicklich betrachteten Zustand wird mit Δp_{fi} bezeichnet.

Bei der Ermüdungsanalyse können folgende Lastanteile oder Lastzyklen unberücksichtigt bleiben:

a) Druckänderungen < 1/3 zulässiger Betriebsüberdruck bei Ferrit,

   Druckänderungen < 1/2 zulässiger Betriebsüberdruck bei Austenit,

b) Temperaturänderungsvorgänge mit Temperaturschwankungen < 17 K

c) Störfälle mit einer erwarteten Eintrittshäufigkeit < 5 während der Lebensdauer der Armatur

d) Temperaturänderungsgeschwindigkeiten bei An- und Abfahrvorgängen ≤ 55 K/h bei einer Lastspielzahl n ≤ 2000.

(4) Für die größten Druckänderungen max $\Delta p_{fi} = \Delta p_{f(max)}$ und Temperaturänderungen max $\Delta T_{fi} = \Delta T_{f(max)}$ muss die folgende Bedingung erfüllt werden:

$$Q_p \cdot \frac{p_{f(max)}}{p} + E \cdot \alpha \cdot C_2 \cdot C_4 \cdot \Delta T_{f(max)} \begin{cases} \leq 3 \cdot S_m \text{ für Schmiedestähle} \\ \leq 4 \cdot S_m \text{ für Stahlguss} \end{cases} \qquad (8.4\text{-}31)$$

Dabei ist Q_p nach Gleichung (8.4-13) zu ermitteln. Die Faktoren C_2 und C_4 sind den **Bildern 8.4-10** und **8.4-11** zu entnehmen. Der Spannungsvergleichswert S_m ist gemäß **Tabelle 6.6-1** zu bilden.

(5) $S_{n(max)}$ ist wie folgt zu bestimmen:

$$S_{n(max)} = Q_p \cdot \frac{\Delta p_{f(max)}}{p} + E \cdot \alpha \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot \Delta T_{f(max)} \qquad (8.4\text{-}32)$$

Der Spannungsbeiwert C_3 ist **Bild 8.4-8** zu entnehmen.

Die Gleichung (8.4-32) für $S_{n(max)}$ kann für jeden Lastzyklus separat berechnet werden. Es wird dann Δp_{fi} und ΔT_{fi} eingesetzt.

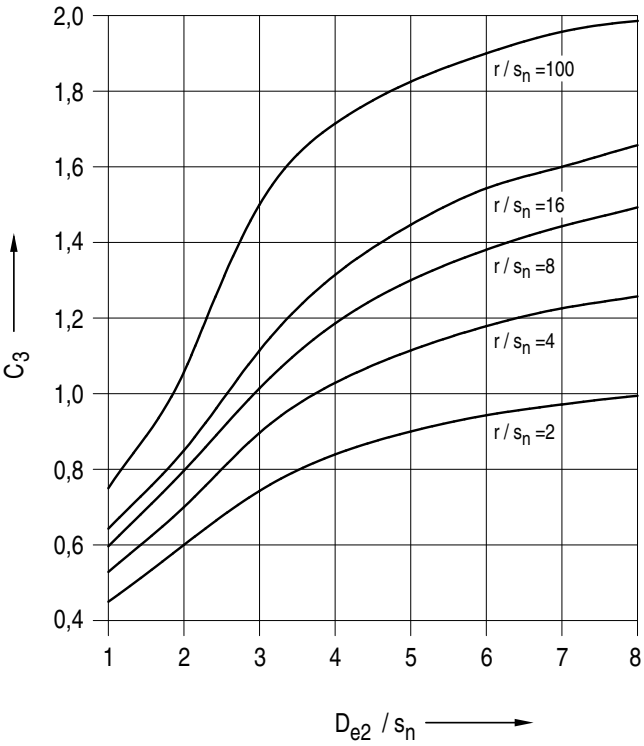


Bild 8.4-8: Beiwert für sekundäre Spannungen an Stellen geometrischer Unstetigkeiten infolge Temperaturänderungen des Mediums

(6) Die Spannungsspitzen S_i sind wie folgt zu berechnen:

$$S_i = \frac{4}{3} \cdot Q_p \cdot \frac{\Delta p_{fi}}{p} + E \cdot \alpha \cdot (C_3 \cdot C_4 + C_5) \cdot \Delta T_{fi} \qquad (8.4\text{-}33)$$

C_5 ist aus **Bild 8.4-12** zu entnehmen.

(7) Die halbe Spannungsschwingbreite S_a zur Ermittlung der zulässigen Lastspielzahl N_i ist wie folgt zu bestimmen:

a) für $S_{n(max)} \leq 3 \cdot S_m$

$$S_a = \frac{S_i}{2} \qquad (8.4\text{-}34)$$

b) für $3 \cdot S_m < S_{n(max)} \leq 3 \cdot m \cdot S_m$

$$S_a = \left[1 + \frac{1-n}{n \cdot (m-1)} \cdot \left(\frac{S_n}{3 \cdot S_m} - 1 \right) \right] \cdot \frac{S_i}{2} \qquad (8.4\text{-}35)$$

Dabei kann für S_n der Wert für $S_{n(max)}$ oder der für jeden Lastzyklus separat ermittelte S_n-Wert eingesetzt werden.

Wenn bei einzelnen Lastzyklen $S_n \leq 3 \cdot S_m$ bleibt, dann ist nach Absatz a vorzugehen. Die Materialparameter m und n sind der **Tabelle 7.8-2** zu entnehmen.

c) für $S_{n(max)} > 3 \cdot m \cdot S_m$

$$S_a = \frac{1}{n} \cdot \frac{S_i}{2} \qquad (8.4\text{-}36)$$

Für Stahlguss ist in den Bedingungen a bis c der Wert $3 \cdot S_m$ durch $4 \cdot S_m$ zu ersetzen.

Die zulässigen Lastspielzahlen N_i sind aus den Ermüdungskurven **Bild 7.8-1**, **Bild 7.8-2** oder **Bild 7.8-3** zu entnehmen. Dabei ist zu beachten, dass der Unterschied zwischen dem Elastizitätsmodul aus den Kurven und dem des Armaturenwerkstoffes bei zulässiger Betriebstemperatur (Auslegungstemperatur) berücksichtigt wird.

Der S_a-Wert muss mit dem Verhältnis E-Kurve/E-Armatur bei zulässiger Betriebstemperatur (Auslegungstemperatur) multipliziert werden.

(8) Der Erschöpfungsgrad (Ausnutzungszahl) D wird dann wie folgt bestimmt:

$$D = \sum \frac{N_{ri}}{N_i} \leq 1{,}0 \qquad (8.4\text{-}37)$$

Dabei ist N_i die zulässige Lastspielzahl und N_{ri} die spezifizierte Lastspielzahl gemäß komponentenbezogener Unterlage.

Wenn eine mediumbedingte Verringerung der Ermüdungsfestigkeit nicht auszuschließen ist, ist ab einer Aufmerksamkeitsschwelle D = 0,4 durch folgende Maßnahmen eine Berücksichtigung des Mediums auf die Ermüdung erforderlich:

a) Einbeziehung der betroffenen Bauteilbereiche in ein Überwachungsprogramm nach KTA 3211.4 oder
b) betriebsnahe Experimente oder
c) rechnerische Nachweise unter Berücksichtigung von mediumsbedingten Abminderungsfaktoren und realistischer Randbedingungen.

8.4.8 Weitere Verfahren zur Spannungs- und Ermüdungsanalyse

Wenn bei den Verfahren in den Abschnitten 8.4.4 bis 8.4.7 die zulässigen Grenzwerte überschritten werden, dann darf der Nachweis auch gemäß Abschnitt 7.7 und gegebenenfalls 7.8 geführt werden.

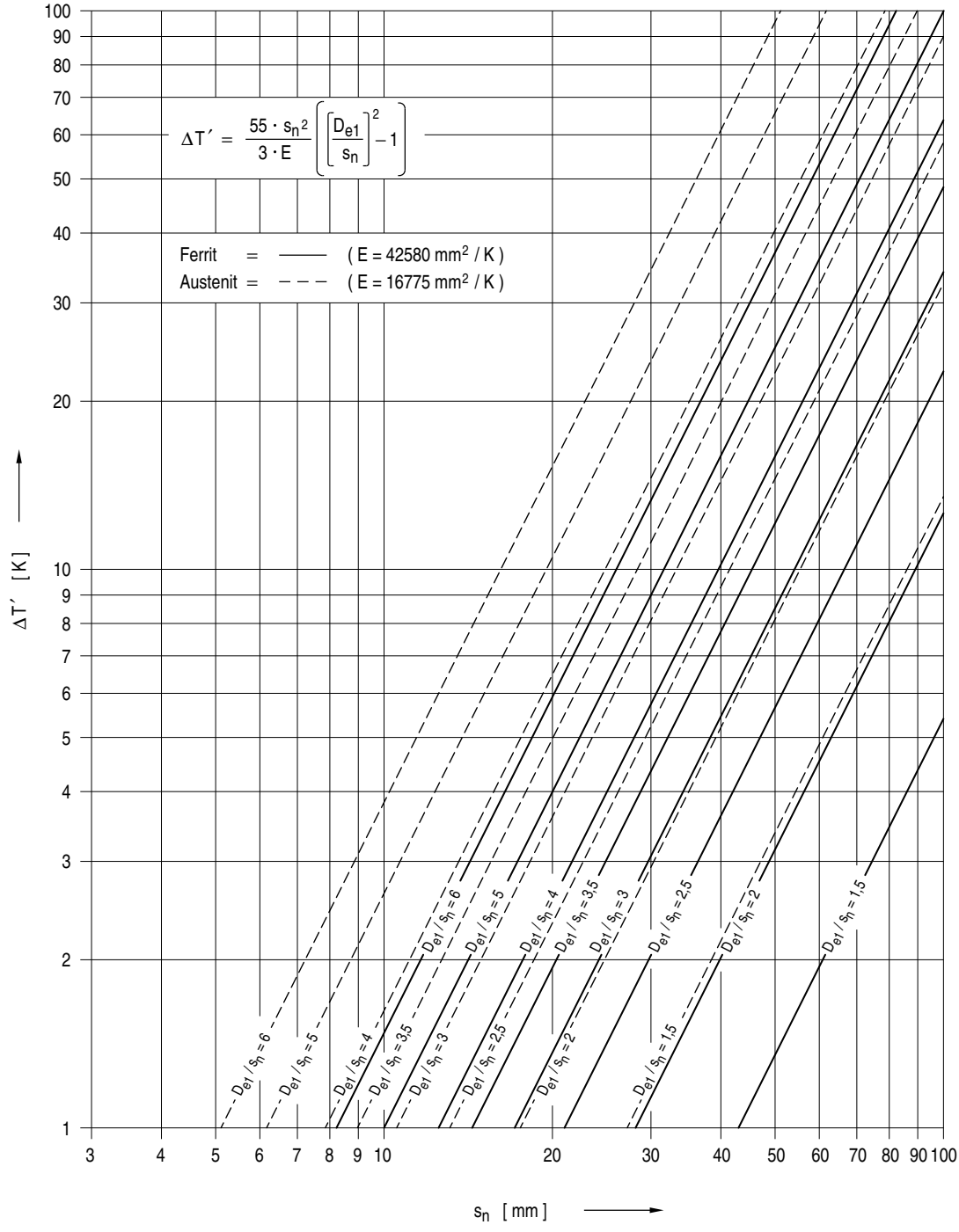


Bild 8.4-9: Maximale Temperaturdifferenz im Armaturengehäuse (Bereich D_{e1}/s_n), bezogen auf eine Temperaturänderungsgeschwindigkeit des Mediums von 55 K/h

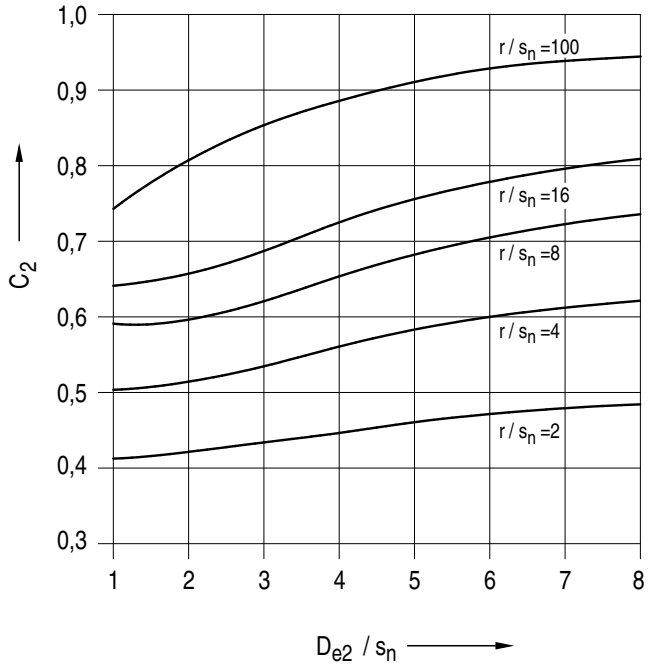


Bild 8.4-10: Spannungsbeiwert C_2 für sekundäre Wärmespannungen resultierend aus geometrischen Unstetigkeiten

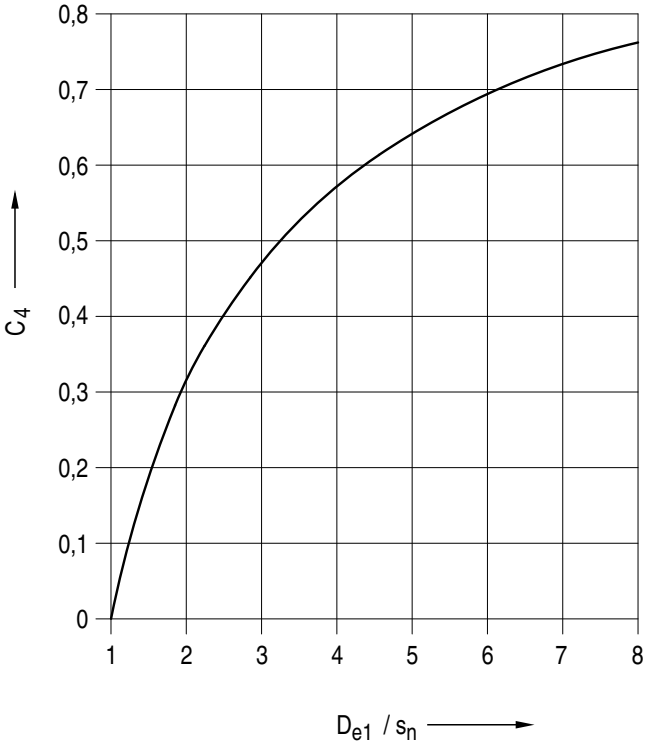


Bild 8.4-11: Maximalwert C_4 der Differenz der durchschnittlichen Wandtemperaturen für die Wanddicken D_{e1} und s_n, hervorgerufen durch schrittweises Ändern der Mediumtemperaturen ΔT_f

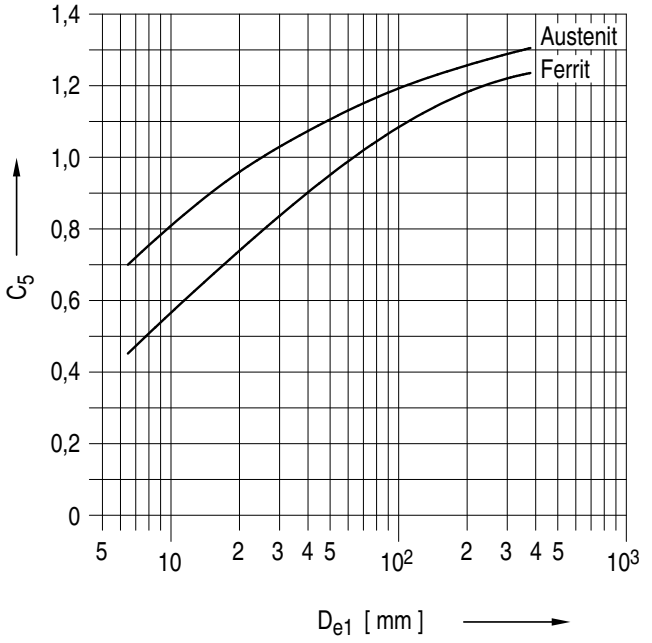


Bild 8.4-12: Spannungsbeiwert C_5 zur Berücksichtigung der Wärmespannungen hervorgerufen durch Wandtemperaturgradienten, die durch Änderung der Mediumtemperatur verursacht werden

8.5 Rohrleitungen

8.5.1 Allgemeines

(1) Unter der Voraussetzung der konstruktiven Gestaltung der Rohrleitungsbauteile nach Abschnitt 5.3.5 und der Dimensionierung der Rohrleitungsbauteile nach Abschnitt A 5 ist für Rohrleitungen die nachfolgend beschriebene komponentenspezifische Spannungs- und Ermüdungsanalyse zulässig.

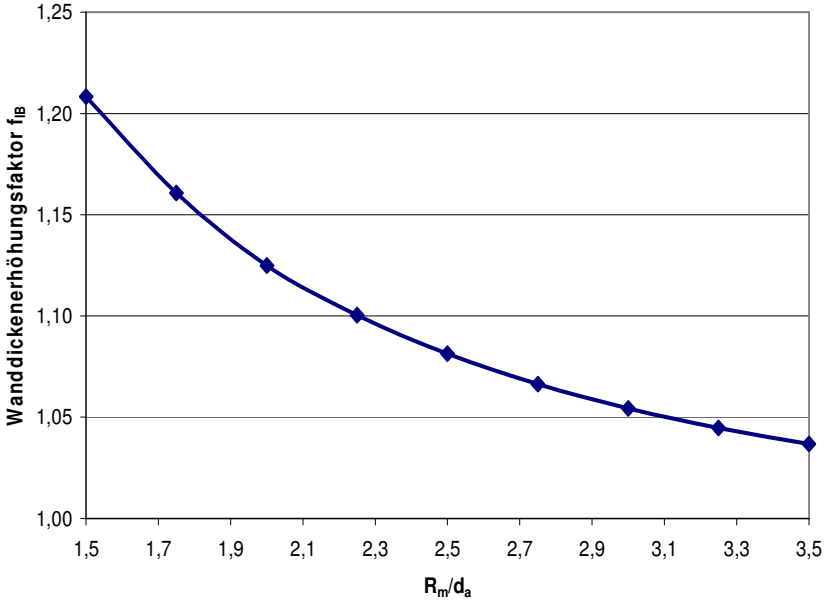
(2) Für Rohrleitungen der Prüfgruppe A1 ist die Spannungs- und Ermüdungsanalyse nach Abschnitt 8.5.2 durchzuführen. Für Rohrleitungen der Prüfgruppen A2 und A3 ist die Spannungs- und Ermüdungsanalyse nach Abschnitt 8.5.3 durchzuführen.

(3) Der Anwendungsbereich reicht bis zur rohrseitigen Grenze der mittragenden Länge e_A (siehe **Bild A 5-14**) des verstärkten oder unverstärkten Stutzens der angeschlossenen Komponente. Diese Grenze ist nicht maßgebend für die Modellabbildung der Systemanalyse nach Abschnitt 7.6.2.

(4) Aus der Analyse des mechanischen Verhaltens des Gesamtsystems sind die Schnittgrößen des Systems zu ermitteln. Hierbei sind die Wärmedehnungslastfälle mit dem E-Modul für Betriebstemperatur zu berechnen. Die Wärmedehnungsspannungen sind im Verhältnis E_k/E_w umzurechnen. Mit diesen müssen die einzelnen Rohrleitungselemente untersucht werden. Bei der Ermittlung der Spannungen sind zusätzlich zu den Kräften und Momenten aus der Analyse des mechanischen Verhaltens auch der Innendruck und bei Prüfgruppe A1 zusätzlich die axialen und radialen Temperaturverteilungen zu berücksichtigen.

(5) Anstelle der rechnerischen Nachweise für Rohrleitungen dürfen auch standardisierte Verfahren zur Verlegung von Rohrleitungen, die die Anforderungen der vorliegenden Regel einhalten, verwendet werden.

(6) Für Induktivbiegungen, die die Vorgaben an die Abmessungen nach KTA 3211.3 Abschnitt 9.3.3.4 (5) a) einhalten (Standardinduktivbiegung), ergibt sich die Berechnungswanddicke für Induktivbiegungen $s_{c,IB}$, die die Wanddickenaufstauchung berücksichtigt, aus der Beziehung $s_{c,IB} = s_c \cdot f_{IB}$, wobei der Faktor f_{IB} als Funktion von R_m/d_a aus **Bild 8.5-1** zu ermitteln ist. Bei R_m/d_a-Verhältnissen größer als 3,5 darf der Einfluss von Wanddickenaufstauchungen bei Einhaltung der Vorgaben von Bild 9-1 in KTA 3211.3 vernachlässigt werden.



$$f_{IB} = \sqrt{f_{IB,i} \cdot f_{IB,a}}$$

$f_{IB,i}$: Wanddickenerhöhungsfaktor an Bogeninnenseite

$f_{IB,a}$: Wanddickenreduzierungsfaktor an Bogenaußenseite

Für Induktivbiegungen gemäß KTA 3211.3 Bild 9-1 gilt:

$$f_{IB,i} = 0{,}9091 + 1{,}202 \cdot \left(\frac{R_m}{d_a}\right)^{-1{,}24}$$

$$f_{IB,a} = \left[\begin{array}{c} \text{für : } 1{,}5 \le \frac{R_m}{d_a} < 2 \Rightarrow 0{,}8925 \\ \text{für : } 2 \le \frac{R_m}{d_a} < 3{,}5 \Rightarrow 0{,}021 \cdot \frac{R_m}{d_a} + 0{,}8505 \end{array}\right]$$

Näherungsgleichung: $f_{IB} = -0{,}0197 \cdot \left(\frac{R_m}{d_a}\right)^3 + 0{,}1892 \cdot \left(\frac{R_m}{d_a}\right)^2 - 0{,}6434 \cdot \left(\frac{R_m}{d_a}\right) + 1{,}8134$

Bild 8.5-1: Wanddickenerhöhungsfaktoren f_{IB} für Standardinduktivbiegungen

8.5.2 Rohrleitungen der Prüfgruppe A1

8.5.2.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt 8.5.2

Formelzeichen	Berechnungsgrößen	Einheit
c_2	Wanddickenminderung infolge chemischer oder mechanischer Abnutzung	mm
d_1	großer Außendurchmesser am Reduzierstück gemäß Bild 8.5-5	mm
d_2	kleiner Außendurchmesser am Reduzierstück gemäß Bild 8.5-5	mm
d_a	Außendurchmesser des Rohres	mm
$\hat{d}_a$	größter Außendurchmesser des Querschnitts	mm
$\bar{d}_a$	kleinster Außendurchmesser des Querschnitts	mm
d_{an}	Nennaußendurchmesser des Rohres	mm
d_i	Innendurchmesser des Rohres	mm
d_{il}	Innendurchmesser an der Stelle l	mm
d_{in}	Nenninnendurchmesser des Rohres	mm
d_{ir}	Innendurchmesser an der Stelle r	mm
d_m	Durchmesser gemäß Abschnitt 8.5.2.8.3.4.4 (4)	mm
d_{Aa}	Außendurchmesser des Abzweiges	mm
d_{Ai}	Innendurchmesser des Abzweiges	mm
d_{Am}	mittlerer Durchmesser des Abzweiges	mm
d_{Ha}	Außendurchmesser des Hauptrohres	mm
d_{Hi}	Innendurchmesser des Hauptrohres	mm
d_{Hm}	mittlerer Durchmesser des Hauptrohres	mm
d_{Ra}	Außendurchmesser des Abzweigrohres	mm
d_{Ri}	Innendurchmesser des Abzweigrohres	mm
d_{Rm}	mittlerer Durchmesser des Abzweigrohres	mm
h	Rechengröße gemäß den Gleichungen 8.5-34 und 8.5-37	—
i	Spannungsbreite	—
i_1, i_2, i_3, i_4	Spannungsbreite für Rohrbögen unter Innendruckbelastung	—
i_{amy}, i_{amz}, i_{tby}, i_{tbz}, i_{tmz}	Spannungsbeiwerte für Rohrbögen unter Momentenbelastung	—
k	Flexibilitätsfaktor	—
k_N	Flexibilitätsfaktor für Normalkraftverformung	—
k_Q	Flexibilitätsfaktor für Querkraftverformung	—
k_T	Flexibilitätsfaktor für Torsionsverformung	—
k_x	Flexibilitätsfaktor für Biegung um die x-Achse	—
k_z	Flexibilitätsfaktor für die Biegung um die z-Achse	—
I	Flächenträgheitsmoment	mm^4
m,n	Materialparameter gemäß Tabelle 7.8-2	—
p	maximaler Druck bei den jeweils berücksichtigten Betriebszuständen	MPa
p_0	Schwingbreite des Betriebsdrucks	MPa
r	Radius	mm
r_1, r_2, r_3	Übergangsradien gemäß Bilder 8.5-5 und 8.5-7	mm
r_m	mittlerer Radius	mm
$\hat{s}_a$	größte Wanddicke innerhalb der Übergangszone bei Wanddickenübergangsstücken	mm
s_1	Wanddicke am weiten Ende des Reduzierstückes	mm
s_2	Wanddicken am engen Ende des Reduzierstückes	mm
s_{01}, s_{02}	Mindestwanddicken für das gerade Rohr gemäß Bild 8.5-5	mm
s_1	Wanddicke an der Stelle 1	mm
s_r	Wanddicke an der Stelle r	mm
s_m	Wanddicke gemäß Abschnitt 8.5.2.8.3.4.4(4)	mm

Formelzeichen	Berechnungsgrößen	Einheit
s_c	Wanddicke ohne Plattierung gemäß Abschnitt 7.1.4 oder gemessene Wanddicke abzüglich Korrosionszuschlag und Plattierung Bei Rohrbiegungen mit Wanddickenerhöhung an der Krümmungsinnenseite von mehr als 15 % ist die Aufstauchung zu berücksichtigen z. B. indem als Berechnungswanddicke s_c das arithmetische Mittel und bei Induktivbiegungen das geometrische Mittel aus der kleinsten und größten am Querschnitt in der Bogenmitte auftretenden Wanddicke verwendet wird. Bei Induktivbiegungen, die die Vorgaben an die Abmessungen nach KTA 3211.3 Abschnitt 9.3.3.4 (5) a) einhalten (Standardinduktivbiegung), sind die Festlegungen in Abschnitt 8.5.1 (6) zu berücksichtigen.	mm
S_n	Rechenwert für die Wanddicke	mm
s_{Ac}	Wanddicke des Abzweigs	mm
s_{Hc}	Wanddicke der Hauptleitung	mm
s_A^*	äquivalente Wanddicke für Abzweiganschluss	mm
s_H^*	äquivalente Wanddicke für Durchgangsanschluss	mm
x	allgemeine Rechengröße	—
x_1	Rechengröße gemäß Gleichung (8.5-62)	—
x_2	Rechengröße gemäß Gleichung (8.5-63)	—
x_3	Rechengröße gemäß Gleichung (8.5-64)	—
x_4	Rechengröße gemäß Gleichung (8.5-65)	—
x_K	Rechengröße gemäß Gleichung (8.5-73)	—
y	allgemeine Rechengröße	—
B	Primärspannungsbeiwert	—
B_1	Primärspannungsbeiwert für Innendruckbelastung	—
B_2	Primärspannungsbeiwert für Momentenbelastung	—
B_{2A}	Primärspannungsbeiwert für Abzweig infolge Momentenbelastung	—
B_{2H}	Primärspannungsbeiwert für Hauptleitung infolge Momentenbelastung	—
C	Primär- plus Sekundärspannungsbeiwert	—
C_1	Primär- plus Sekundärspannungsbeiwert infolge Innendruckbelastung	—
C_2	Primär- plus Sekundärspannungsbeiwert infolge Momentenbelastung	—
C_3	Spannungsbeiwert für Temperaturbelastung	—
C_4	Spannungsbeiwert für Temperaturbelastung	—
C_5	Spannungsbeiwert gemäß Gleichung (8.5-5)	—
C_{2A}	Primär- plus Sekundärspannungsbeiwert für Abzweig infolge Momentenbelastung	—
C_{2H}	Primär- plus Sekundärspannungsbeiwert für Hauptleitung infolge Momentenbelastung	—
C_x	Steifigkeit bezüglich Abzweigbiegemoment um die x-Achse	N/mm²
C_z	Steifigkeit bezüglich Abzweigbiegemoment um die z-Achse	N/mm²
D	Zulässiger Erschöpfungsgrad	—
E	Elastizitätsmodul bei Raumtemperatur	N/mm²
E_k	Elastizitätsmodul für den kalten Zustand	N/mm²
E_{rl}	Mittlerer Elastizitätsmodul der beiden betrachteten Seiten r und l einer struktur- oder materialbedingten Unstetigkeit bei Raumtemperatur	N/mm²

Formelzeichen	Berechnungsgrößen	Einheit
E_w	Elastizitätsmodul für den warmen Zustand	N/mm²
F_{1a}	Faktor zur Berücksichtigung von unrunden Querschnitten beim Spannungsbeiwert K_1	—
F_{1b}	Faktor zur Berücksichtigung von örtlichen Unrundheiten beim Spannungsbeiwert K_1	—
I_R	Trägheitsmoment des abzweigenden Rohres	mm⁴
K	Spitzenspannungsbeiwert	—
K_1	Spitzenspannungsbeiwert für Innendruckbelastung	—
K_2	Spitzenspannungsbeiwert für Momentenbelastung	—
K_3	Spitzenspannungsbeiwert für Temperaturbelastung	—
K_e	Plastifizierungsfaktor	—
K_{2A}	Spitzenspannungsbeiwert für Abzweig infolge Momentenbelastung	—
K_{2H}	Spitzenspannungsbeiwert für Hauptleitung infolge Momentenbelastung	—
L_1	Länge des zylindrischen Teils am weiten Ende des Reduzierstückes	mm
L_2	Länge des zylindrischen Teils am engen Ende des Reduzierstückes	mm
L_m	Länge gemäß Abschnitt 8.5.2.8.3.4.4 (4)	mm
M	Materialfaktor in Gleichung (8.5-17)	—
M_1, M_2, M_3	Momentenschwingbreiten der Richtungen 1, 2, 3 aus den betrachteten Lastfallkombinationen	Nmm
M_{1A}, M_{2A}, M_{3A}	Momente am Abzweig	Nmm
M_{1H}, M_{2H}, M_{3H}	Momente an der Hauptleitung	Nmm
M_A	resultierendes Moment auf den Abzweig	Nmm
M_H	resultierendes Moment auf die Hauptleitung	Nmm
M_b	Biegemoment	Nmm
M_{il}	resultierendes Moment, verursacht durch mechanische Lasten in Gleichung (8.5-1)	Nmm
M_{ill}	resultierende größte Momentenschwingbreite in Gleichung (8.5-2)	Nmm
M_{illl}	resultierende größte Momentenschwingbreite in Gleichung (8.5-3)	Nmm
M_{ilV}	größte Momentenschwingbreite aus Belastungen infolge behinderter Wärmedehnung und zyklischer Fest- und Teilfestpunktverschiebung infolge Temperatur in Gleichung (8.5-4)	Nmm
M_{iV}	größte Momentenschwingbreite unter Berücksichtigung der Momente M_{il} und M_{ill} ohne M_{ilV} in Gleichung (8.5-6)	Nmm
M_t	Torsionsmoment	Nmm
M_x	Torsionsmoment gemäß Bild 8.5-8	Nmm
M_y	Biegemoment gemäß Bild 8.5-8	Nmm
M_z	Biegemoment gemäß Bild 8.5-8	Nmm
$R_{p0,2T}$	0,2%-Dehngrenze bei Temperatur	N/mm²
$R_{p0,2PT}$	0,2%-Dehngrenze bei Prüftemperatur	N/mm²
S_a	zulässige halbe Vergleichsspannungsschwingbreite	N/mm²
S_m	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1	N/mm²
T	Temperatur	K
$\breve{T}$	minimale Temperatur innerhalb des betrachteten Lastspiels	K

Formelzeichen	Berechnungsgrößen	Einheit
$\hat{T}$	maximale Temperatur innerhalb des betrachteten Lastspiels	K
$T_k(y)$	Temperatur im Abstand y von der Wandmitte zur Zeit t = k	K
$T_j(y)$	Temperatur im Abstand y von der Wandmitte zur Zeit t = j	K
T_{mj}	Mittelwert der Temperatur über der Wanddicke s_c zum Zeitpunkt t = j	K
T_{mk}	Mittelwert der Temperatur über der Wanddicke s_c zum Zeitpunkt t = k	K
T_{mlj}, T_{mlk}	mittlere Wandtemperatur an der Seite l einer struktur- oder materialbedingten Unstetigkeit zum Zeitpunkt t = j, k	K
T_{mrj}, T_{mrk}	mittlere Wandtemperatur an der Seite r einer struktur- oder materialbedingten Unstetigkeit zum Zeitpunkt t = j, k	K
ΔT	Temperaturschwingbreite	K
ΔT_1	Schwingbreite der Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenwandung bei Annahme linearer Temperaturverteilungen, die in der Wand die gleiche Momentendifferenz wie die vorhandenen Temperaturverteilungen erzeugen	K
ΔT_{1k}, ΔT_{1j}	Anteil von T_1 zum Zeitpunkt t = j, k	K
ΔT_2	Schwingbreite der nichtlinearen Anteile der vorhandenen Temperaturverteilungen	K
ΔT_{2a}, ΔT_{2i}	Schwingbreite der nichtlinearen Anteile der vorhandenen Temperaturverteilungen auf der Außen-(Innen-)seite	K
$\Delta T(y)$	Temperaturschwingbreite für die Stelle y	K
ΔT_a, ΔT_i	Temperaturschwingbreite an der Außen-(Innen-)seite	K
ΔT_m	mittlere Temperaturschwingbreite als Differenz der mittleren Temperaturen T_{mk} und T_{mj}	K
ΔT_{ml}	Schwingbreite der mittleren Wandtemperatur an der Seite l einer struktur- oder materialbedingten Unstetigkeit	K
ΔT_{mr}	Schwingbreite der mittleren Wandtemperatur an der Seite r einer struktur- oder materialbedingten Unstetigkeit	K
W	Widerstandmoment	mm^3
Z_A, Z_H	Hilfsgrößen in den Gleichungen (8.5-40) bis (8.5-42)	mm^3
α	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei Raumtemperatur	1/K
α_r, α_l	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient der Seiten r, l einer struktur- oder materialbedingten Unstetigkeit bei Raumtemperatur	1/K
δ	zulässiger mittlerer Versatz an Stumpfnähten gemäß Bild 8.5-3	mm
δ_1	Kantenversatz am weiten Ende des Reduzierstücks	mm
δ_2	Kantenversatz am engen Ende des Reduzierstücks	mm
λ	Hilfsgröße gemäß Gleichung (8.5-60)	—
ν	Querkontraktionszahl	—
σ	Nennspannung infolge Belastung	N/mm^2
σ_a	Spannungskomponenten in axialer Richtung	N/mm^2
σ_e	ideal-elastische Spannung, Vergleichsspannung oder Vergleichsspannungsschwingbreite infolge Belastung	N/mm^2

Formelzeichen	Berechnungsgrößen	Einheit
σ_t	Spannungskomponente in Umfangsrichtung	N/mm^2
σ_r	Spannungskomponente in radialer Richtung	N/mm^2
σ_N	Nennspannung	N/mm^2
$\sigma_N (M_b)$	Nennspannung bei Belastung durch Biegemoment M_b	N/mm^2
$\sigma_N (p)$	Nennspannung bei Belastung durch Innendruck p	N/mm^2
σ_I	Vergleichsspannung aus primären Spannungen	N/mm^2
σ_{II}	Vergleichsspannungsschwingbreite aus primären und sekundären Spannung	N/mm^2
σ_{III}	Vergleichsspannungsschwingbreite aus primären und sekundären Spannungen sowie aus Spannungsspitzen	N/mm^2
σ_{IV}	Vergleichsspannungsschwingbreite aus sekundären Spannungen	N/mm^2
σ_V	Vergleichsspannungsschwingbreite aus primären und sekundären Membran- und Biegespannungen	N/mm^2
σ_{VI}	Vergleichsspannungsschwingbreite gemäß Gleichung (8.5-7)	N/mm^2
τ	Schubspannung	N/mm^2
τ_{at}, τ_{ta}	Schubspannungskomponenten in Umfangsrichtung und axialer Richtung	N/mm^2
τ_N	Nennschubspannung	N/mm^2
$\tau_N (M_t)$	Nennschubspannung bei Belastung infolge Torsionsmoment	N/mm^2
φ	Umfangswinkel gemäß Bild 8.5-8	grd
ψ	Hilfsgröße gemäß Gleichung (8.5-61)	—

8.5.2.2 Allgemeines

(1) Beim komponentenspezifischen Verfahren gemäß diesem Abschnitt ist bezüglich der Einstufung von Spannungen aus behinderten Wärmedehnungen der Abschnitt 7.7.2.3 zu beachten.

(2) In dem Fall der Überschreitung der zulässigen Spannungen oder des zulässigen Erschöpfungsgrades bei der Anwendung des komponentenspezifischen Verfahrens gemäß Abschnitt 8.5.2 ist zusätzlich zugelassen, dass eine detaillierte Spannungsanalyse gemäß Abschnitt 7.7 und gegebenenfalls eine Ermüdungsanalyse gemäß Abschnitt 7.8 durchgeführt wird.

Hinweis:
Die in Abschnitt 8.5 als Vergleichsspannung oder Vergleichsspannungsschwingbreite gekennzeichneten Spannungsgrößen σ_I bis σ_{VI} entsprechen nicht exakt den betreffenden Definitionen des Abschnittes 7.7.3, sondern stellen konservative Abschätzungen der jeweiligen Vergleichsspannung oder Vergleichsspannungsschwingbreite dar.

8.5.2.3 Auslegungsstufe (Stufe 0)

Für die Ermittlung und Begrenzung der Vergleichsspannung aus primären Spannungen gilt, außer bei einem einzelnen geraden Rohr, folgende Bedingung:

$$\sigma_I = B_1 \cdot \frac{d_a \cdot p}{2 \cdot s_c} + B_2 \cdot \frac{d_a}{2 \cdot I} \cdot M_{il} \le 1{,}5 \cdot S_m \qquad (8.5\text{-}1)$$

σ_I Vergleichsspannung aus primären Spannungen — N/mm^2

B_1, B_2 Spannungsbeiwerte, siehe Abschnitt 8.5.2.8 — —

S_m Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1 bei Auslegungstemperatur — N/mm^2

p	Auslegungsdruck	MPa
d_a	Außendurchmesser des Rohres Hierbei ist entweder $d_a = d_{an}$ oder $d_a = d_{in} + 2 \cdot s_c + 2\, c_2$ (siehe Abschnitt 6.5) zu setzen	mm
s_c	Wanddicke ohne Plattierung gemäß Abschnitt 7.1.4 oder gemessene Wanddicke abzüglich Korrosionszuschlag und Plattierung. Bei Rohrbiegungen mit Wanddickenerhöhung an der Krümmungsinnenseite von mehr als 15 % ist die Aufstauchung zu berücksichtigen z. B. indem als Berechnungswanddicke s_c das arithmetische Mittel und bei Induktivbiegungen das geometrische Mittel aus der kleinsten und größten am Querschnitt in der Bogenmitte auftretenden Wanddicke verwendet wird. Bei Induktivbiegungen, die die Vorgaben an die Abmessungen nach KTA 3211.3 Abschnitt 9.3.3.4 (5) a) einhalten (Standardinduktivbiegung), sind die Festlegungen in Abschnitt 8.5.1 (6) zu berücksichtigen.	mm
I	Flächenträgheitsmoment	mm^4
M_{il}	Resultierendes Moment, verursacht durch mechanische Lasten. In einer Kombination von Einzelbelastungen sind alle Schnittmomente richtungsgebunden zu ermitteln und zu addieren, bevor das resultierende Moment gebildet wird (Momente aus unterschiedlichen Lastfällen, die nicht gleichzeitig auftreten können, brauchen hierbei nicht gemeinsam in das resultierende Moment mit einbezogen zu werden.) Lässt die Methode zur Ermittlung von Momenten aus dynamischer Beanspruchung nur zu, Größen ohne algebraisches Vorzeichen zu ermitteln, so ist diejenige Kombination von richtungsgebundenen Momenten zu wählen, die das größte resultierende Moment ergibt.	Nmm

8.5.2.4 Stufen A und B

8.5.2.4.1 Allgemeines

(1) Für jeden Lastfall müssen Schnittmomente ermittelt werden, die immer auf einen Referenzzustand bezogen sind. Dasselbe gilt für die Lastfälle bei Innendruck und Temperaturdifferenzen.

(2) Ist für die Stufe B gemäß Abschnitt 3.3.3.3 ein Primärspannungsnachweis zu führen, so ist eine Vergleichsspannung nach der Gleichung (8.5-1) zu ermitteln und mit dem kleineren Wert von $1{,}8 \cdot S_m$ und $1{,}5 \cdot R_{p0,2T}$ zu begrenzen, wobei p der lastfallbezogene Betriebsdruck ist. Wenn der maximale Innendruck mehr als das 1,1fache des Auslegungsdrucks beträgt, ist die durch die Umfangsspannung infolge des Innendrucks p bedingte primäre Vergleichsspannung mit den Formeln des Anhangs A unter Berücksichtigung des jeweils zutreffenden Spannungsvergleichswertes nach Stufe B gemäß **Tabelle 7.7-4** zu begrenzen.

8.5.2.4.2 Ermittlung und Begrenzung der Vergleichsspannungsschwingbreite aus primären und sekundären Spannungen

Die Anwendung der Gleichungen dieses Abschnitts ergibt die Vergleichsspannungsschwingbreite, die durch die verschiedenen mechanischen oder thermischen Betriebstransienten hervorgerufen wird. Eine eventuelle Vorspannung bleibt hierbei unberücksichtigt. Folgende Bedingung soll erfüllt sein; anderenfalls ist nach Abschnitt 8.5.2.4.4 vorzugehen:

$$\sigma_{II} = C_1 \cdot \frac{d_a \cdot p_0}{2 \cdot s_c} + C_2 \cdot \frac{d_a}{2 \cdot I} \cdot M_{ill} + C_3 \cdot E_{rl} \cdot \left|\alpha_r \cdot \Delta T_{mr} - \alpha_l \cdot \Delta T_{ml}\right| \le 3 \cdot S_m \qquad (8.5\text{-}2)$$

σ_{II}	Vergleichsspannungsschwingbreite aus primären und sekundären Spannungen	N/mm^2
d_a, s_c	Siehe Abschnitt 8.5.2.3	
I	Flächenträgheitsmoment	mm^4
C_1, C_2, C_3	Spannungsbeiwerte, siehe Abschnitt 8.5.2.8	—
p_0	Schwingbreite des Betriebsdrucks	MPa
E_{rl}	mittlere Elastizitätsmodul der beiden betrachteten Seiten r und l einer struktur- oder materialbedingte Unstetigkeit, bei Raumtemperatur	N/mm^2
α_r, α_l	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient der Seite r (l) einer struktur- oder materialbedingten Unstetigkeit bei Raumtemperatur	1/K
M_{ill}	resultierende größte Momentenschwingbreite Bei der Kombination von Einzelbelastungen werden die richtungsgebundenen Anteile der Momentenschwingbreiten addiert und zur resultierenden Momentenschwingbreite zusammengefasst. Hierbei ist die Kombination der Anlagenzustände der Stufen A und B zu wählen, die die größten Werte von M_{ill} liefert. Sofern eine Kombination die Auswirkung von dynamischen Lasten einschließt, ist diejenige von den folgenden beiden Momentenschwingbreiten zugrunde zu legen, die höhere Werte für M_{ill} ergibt: - Die resultierende Momentenschwingbreite aller Lasten zweier Betriebszustände aus A und B, wobei die Hälfte der Schwingbreite aus dynamischen Lasten einbezogen werden muss. - Die resultierende Momentenschwingbreite aus dynamischen Lasten allein, wobei Momentenanteile aus Zwängungen infolge unterschiedlicher Gebäudebewegungen, die auf einen Rohrstrang wirken können, zu berücksichtigen sind. Belastungen infolge thermischer Schichtenströmung sind mit zu berücksichtigen. Beanspruchungen aus Gewichtskräften brauchen in der Gleichung (8.5-2) nicht berücksichtigt zu werden, da sie keine zyklische Belastung darstellen.	Nmm
S_m	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1 bei der Temperatur: $T = 0{,}25 \cdot \breve{T} + 0{,}75 \cdot \hat{T}$	N/mm^2
ΔT_{mr} (ΔT_{ml})	Schwingbreite der mittleren Wandtemperatur an der Seite r (l) einer struktur- oder materialbedingten Unstetigkeit (siehe Abschnitt 8.5.2.4.6).	

8.5.2.4.3 Ermittlung der Vergleichsspannungsschwingbreite aus primären und sekundären Spannungen sowie Spannungsspitzen

Die Vergleichsspannungsschwingbreite σ_{III} aus primären und sekundären Spannungen sowie aus Spannungsspitzen muss nach Gleichung (8.5-3) errechnet werden und dient der Ermittlung der Vergleichsspannungsschwingbreite σ_{VI} nach Glei-

chung (8.5-7). Beanspruchungen infolge thermischer Schichtenströmung sind hierbei in geeigneter Weise mit zu berücksichtigen.

Hinweis:
Literatur [7] enthält einen Vorschlag zur Berücksichtigung der thermischen Schichtenströmung.

$$\sigma_{III} = K_1 \cdot C_1 \cdot \frac{d_a \cdot p_0}{2 \cdot s_c} + K_2 \cdot C_2 \cdot \frac{d_a}{2 \cdot I} \cdot M_{iIII} + \frac{1}{2 \cdot (1-\nu)} \cdot K_3 \cdot E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_1| +$$

$$K_3 \cdot C_3 \cdot E_{rl} \cdot |\alpha_r \cdot \Delta T_{mr} - \alpha_l \cdot \Delta T_{ml}| + \frac{1}{1-\nu} \cdot E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_2| \qquad (8.5\text{-}3)$$

σ_{III}	Vergleichsspannungsschwingbreite aus primären und sekundären Spannungen sowie aus Spannungsspitzen	N/mm²
$d_a, S_c, I, p_0, E_{rl}, \alpha_r(\alpha_l), \Delta T_{mr}(\Delta T_{ml})$	siehe Abschnitt 8.5.2.4.2	
$M_{iIII}=M_{iII}$	siehe Abschnitt 8.5.2.4.2	
$C_1, C_2, C_3, K_1, K_2, K_3$	siehe Abschnitt 8.5.2.8	
ΔT_1, ΔT_2	siehe Abschnitt 8.5.2.4.6	
α	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei Raumtemperatur	1/K
E	Elastizitätsmodul bei Raumtemperatur	N/mm²
ν	Poisson'sche Zahl (hier 0,3)	—

8.5.2.4.4 Vereinfachtes Verfahren für elastoplastische Berechnungen

8.5.2.4.4.1 Bedingungen

Wenn die in der Gleichung (8.5-2) vorgeschriebene Spannungsbegrenzung nicht für alle Paare von Beanspruchungszuständen eingehalten werden kann, so sind für diese die nachfolgend aufgeführten Bedingungen a), b) und c) zu erfüllen:

a) Begrenzung der Vergleichsspannungsschwingbreite aus sekundären Spannungen:

$$\sigma_{IV} = C_2 \cdot \frac{d_a}{2 \cdot I} \cdot M_{iIV} \le 3 \cdot S_m \qquad (8.5\text{-}4)$$

σ_{IV}	Vergleichsspannungsschwingbreite aus sekundären Spannungen	N/mm²
C_2, d_a. I	siehe Abschnitt 8.5.2.4.2	
M_{iIV}	größte Momentenschwingbreite aus Belastungen infolge behinderter Wärmedehnung und zyklischer Fest- und Teilfestpunktverschiebung infolge Temperatur; Belastungen infolge thermischer Schichtenströmung sind mit zu berücksichtigen.	N/mm
S_m	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1 bei der Temperatur: $T = 0{,}25 \cdot \breve{T} + 0{,}75 \cdot \hat{T}$	N/mm²

b) Begrenzung der thermisch bedingten fortschreitenden Deformation:

Die Temperaturdifferenz ΔT_1 gemäß Abschnitt 8.5.2.4.6 muss folgender Relation genügen:

$$\Delta T_1 \le \frac{y \cdot R_{p0,2T}}{0{,}7 \cdot E \cdot \alpha} \cdot C_5 \qquad (8.5\text{-}5)$$

Dabei gelten abhängig von

$$x = \frac{p \cdot d_a}{2 \cdot s_c \cdot R_{p0,2T}}$$

folgende Werte für y:

x	y
0,3	3,33
0,5	2,0
0,7	1,2
0,8	0,8
Zwischenwerte sind linear zu interpolieren.	

mit

p	maximaler Druck bei den jeweils berücksichtigten Betriebszuständen	MPa
C_5	1,1 bei ferritischen und 1,3 bei austenitischen Stählen	—
α, E	wie für Gleichung (8.5-3) definiert	
$R_{p0,2T}$	0,2%-Dehngrenze bei der mittleren Temperatur der berücksichtigten Transienten	N/mm²

c) Begrenzung der Vergleichsspannungsschwingbreite aus primären und sekundären Membran- und Biegespannungen:

Die Vergleichsspannungsschwingbreite aus primären und sekundären Membran- und Biegespannungen ohne Spannungsanteile aus Momenten infolge behinderter Wärmedehnung im System ist nach Gleichung (8.5-6) zu begrenzen.

$$\sigma_v = C_1 \cdot \frac{p_0 \cdot d_a}{2 \cdot s_c} + C_2 \cdot \frac{d_a \cdot M_{iV}}{2 \cdot I} + C_4 \cdot E_{rl} \cdot$$

$$|\alpha_r \cdot \Delta T_{mr} - \alpha l \Delta T_{ml}| \le 3 \cdot S_m \qquad (8.5\text{-}6)$$

σ_V	Vergleichsspannsschwingbreite aus primären und sekundären Membran- und Biegespannungen	N/mm²
C_1, C_2, C_4	siehe Abschnitt 8.5.2.8	
$P_0, d_a, S_c, I, E_{rl}, \alpha_r, (\alpha_l), \Delta T_{mr}, (\Delta T_{ml})$	siehe Abschnitt 8.5.2.4.2	
M_{iV}	Momentenschwingbreite M_{iII} ohne M_{iIV} für die betrachteten Betriebszustände; falls M_{iII} als die Momentenschwingbreite der dynamischen Lasten eines Betriebszustandes gebildet wurde, ist zur Bildung von M_{iV} die halbe Schwingbreite des dynamischen Lastanteils von M_{iII} anzusetzen	Nmm
S_m	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1 bei der Temperatur: $T = 0{,}25 \cdot \breve{T} + 0{,}75 \cdot \hat{T}$	N/mm²

8.5.2.4.4.2 Vergleichsspannungsschwingbreite σ_{VI}

Mit der in der Gleichung (8.5-3) ermittelten Vergleichsspannungsschwingbreite aus primären und sekundären Spannungen sowie aus Spannungsspitzen für alle Paare von Bean-

spruchungszuständen lässt sich eine gegenüber σ_{III} erhöhte Vergleichsspannungsschwingbreite σ_{VI} bilden:

$$\sigma_{VI} = K_e \cdot \sigma_{III} \qquad (8.5\text{-}7)$$

σ_{VI} Vergleichsspannungsschwingbreite N/mm²

K_e Plastifizierungsfaktor —

Die Größe von K_e hängt von der Größe der Vergleichsspannungsschwingbreite σ_{II} gemäß Gleichung (8.5-2) ab und ergibt sich beispielsweise aus folgender Zuordnung:

a) $\sigma_{II} \le 3 \cdot S_m \qquad K_e = 1$

b) $3 \cdot S_m < \sigma_{II} < 3 \cdot m \cdot S_m \qquad K_e = 1 + \left(\frac{(1-n)}{n \cdot (m-1)}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{II}}{3 \cdot S_m} - 1\right)$

c) $\sigma_{II} \ge 3 \cdot m \cdot S_m \qquad K_e = \frac{1}{n}$

wobei die Materialparameter m und n bis zu der Temperatur T gültig sind (siehe **Tabelle 7.8-2**).

K_e-Werte, die nicht nach b) oder c) ermittelt werden, sind rechnerisch oder experimentell nachzuweisen oder der Literatur zu entnehmen. Die Anwendbarkeit ist zu zeigen.

8.5.2.4.5 Ermüdungsanalyse

8.5.2.4.5.1 Detaillierte Ermittlung des Erschöpfungsgrades

Die aus der Gleichung (8.5-3) ermittelten Vergleichsspannungsschwingbreiten σ_{III} oder die aus Gleichung (8.5-7) ermittelten Vergleichsspannungsschwingbreiten σ_{VI} sind zur Bestimmung des Erschöpfungsgrades nach Abschnitt 7.8 heranzuziehen, wobei S_a gleich $\sigma_{III}/2$ oder $\sigma_{VI}/2$ ist (S_a= halbe Vergleichsspannungsschwingbreite). Dabei sind die Ermüdungskurven aus den **Bildern 7.8-1** bis **7.8-3** zugrunde zu legen.

8.5.2.4.5.2 Konservative Ermittlung des Erschöpfungsgrades

(1) Im Rahmen des komponentenspezifischen Verfahrens zur Ermittlung und Bewertung von Spannungen darf die Ermüdungsanalyse nach dem folgenden Verfahren durchgeführt werden. Dieses Verfahren ist zur konservativen Beurteilung eines Bauteils anzuwenden. Sollte sich nach diesem Verfahren keine Überschreitung des zulässigen Erschöpfungsgrades D ergeben, so braucht keine detaillierte Ermüdungsanalyse durchgeführt zu werden.

(2) Die Ermittlung der Vergleichsspannungsschwingbreite $2 \cdot S_a = \sigma_{III}$ oder σ_{VI} (siehe Abschnitt 8.5.2.4.3 oder 8.5.2.4.4) muss mit Hilfe der Gleichung (8.5-3) bei Verwendung der nachfolgend definierten Schwingbreite der Belastungen erfolgen:

a) als Schwingbreite für den Innendruck sind die jeweiligen größten Druckdifferenzen der betrachteten Lastfallkombinationen einzusetzen,

b) als Schwingbreite der Schnittmomente M_{iIII} sind die größten resultierenden Momentenschwingbreiten der betrachteten Lastfallkombinationen zu verwenden,

   Hierbei ist M_{iIII} wie folgt zu ermitteln:

$$M_{iIII} = \sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_3^2} \qquad (8.5\text{-}8)$$

   $M_{1,2,3}$ Momentenschwingbreite der Richtungen 1, 2, 3 aus den betrachteten Lastfallkombinationen,

c) als Schwingbreite der Spannungen aus Temperaturdifferenzen (ΔT_1, $\Delta T_{mr} - \Delta T_{ml}$, ΔT_2) muss die Differenz der größten und kleinsten Werte (unter Beachtung des Vorzeichens) für die betrachtete Lastfallkombination angesetzt werden. Dies gilt ebenfalls für die Spannungen aus der absoluten Differenz der Produkte $|\alpha_r \cdot \Delta T_{mr} - \alpha_l \cdot \Delta T_{ml}|$,

d) als konservative Abschätzung muss zur Definition der anzuwendenden Lastspielzahl die Summe der Häufigkeiten sämtlicher Lastfallspiele nach Betriebskollektiv gebildet werden. Die Bestimmung der zulässigen Lastspielzahlen erfolgt anhand der **Bilder 7.8-1** bis **7.8-3**.

(3) Der Erschöpfungsgrad D ergibt sich als Verhältnis der vorhandenen zur so ermittelten zulässigen Anzahl von Lastspielen. Liegt der Erschöpfungsgrad D unterhalb 1, so braucht keine weitere Betrachtung für diese Stelle im Rohrleitungssystem mehr angestellt zu werden.

Wenn eine mediumbedingte Verringerung der Ermüdungsfestigkeit nicht auszuschließen ist, ist ab einer Aufmerksamkeitsschwelle D = 0,4 durch folgende Maßnahmen eine Berücksichtigung des Mediums auf die Ermüdung erforderlich:

a) Einbeziehung der betroffenen Bauteilbereiche in ein Überwachungsprogramm nach KTA 3211.4 oder

b) betriebsnahe Experimente oder

c) rechnerische Nachweise unter Berücksichtigung von mediumsbedingten Abminderungsfaktoren und realistischer Randbedingungen.

8.5.2.4.6 Ermittlung der Temperaturschwingbreiten

(1) Bei der Ermittlung der Temperaturschwingbreiten ΔT_m, ΔT_1 und ΔT_2 ist von den vorhandenen Temperaturverteilungen über der Wanddicke s_c zu den relevanten Zeitpunkten auszugehen. Dabei ist eine zeit- und ortsabhängige Betrachtung zugelassen.

(2) Die Temperaturschwingbreite $\Delta T(y)$ für die Stelle y ergibt sich zu

$$\Delta T(y) = T_k(y) - T_j(y) \qquad (8.5\text{-}9)$$

mit

y radialer Abstand von der Wandmitte, nach außen gerichtet positiv
$-s_c/2 \le y \le s_c/2$

$T_j(y)$ Temperatur im Abstand y von der Wandmitte zur Zeit t = j

$T_k(y)$ Temperatur im Abstand y von der Wandmitte zur Zeit t = k

(3) Die vollständige Temperaturschwingbreite setzt sich gemäß **Bild 8.5-2** aus drei Anteilen zusammen. Der Index a bezeichnet hierbei die Außenseite, der Index i die Innenseite.

(4) Für die Ermittlung der zugehörigen Spannungsschwingbreiten sind die nachfolgenden Beziehungen maßgebend:

a) Mittlere Schwingbreite ΔT_m als Differenz der mittleren Temperaturen T_{mk} und T_{mj}

$$\Delta T_m = \frac{1}{s_c} \int_{-s_c/2}^{s_c/2} \left[T_k(y) - T_j(y)\right] \cdot dy$$

$$= \frac{1}{s_c} \int_{-s_c/2}^{s_c/2} \Delta T(y) \cdot dy \; = \; T_{mk} - T_{mj} \qquad (8.5\text{-}10)$$

   mit

   T_{mj}, T_{mk} Mittelwert der Temperatur über der Wanddicke s_c zum Zeitpunkt t = j, k

   ΔT_m darf zur Ermittlung der Momentenschwingbreiten M_i aus behinderter Wärmedehnung im System verwendet werden. Die Beziehung (8.5-10) gilt mit entsprechenden Indizes auch für die Schwingbreiten der mittleren Wandtemperaturen an den Seiten r, l einer struktur- oder materialbedingten Unstetigkeit:

$$\left.\begin{aligned} \Delta T_{mr} &= T_{mrk} - T_{mrj} \\ \Delta T_{ml} &= T_{mlk} - T_{mlj} \end{aligned}\right\} \text{ zum Zeitpunkt t = j, k}$$

   Diese Größen dürfen in den Gleichungen (8.5-2) und (8.5-3) eingesetzt werden. Für zylindrische Formen sollen T_{mrj}, T_{mrk} zum Zeitpunkt t = j, k über einer Länge von $(d_{ir} \cdot s_r)^{1/2}$ und T_{mlj}, T_{mlk} zum Zeitpunkt t = j, k über einer Länge von $(d_{il} \cdot s_l)^{1/2}$ gemittelt werden.

Hierbei bedeuten d_{ir} (d_{il}) Innendurchmesser an der Stelle r(l) einer struktur- oder materialbedingten Unstetigkeit, s_r (s_l) mittlere Wanddicke innerhalb der Länge von $(d_{ir} \cdot s_r)^{1/2}$ oder $(d_{il} \cdot s_l)^{1/2}$.

b) Schwingbreite ΔT_1 der Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenwandung bei Annahme linearer Temperaturverteilungen, die in der Wand die gleiche Momentendifferenz wie die vorhandenen Temperaturverteilungen erzeugen.

$$\Delta T_1 = \frac{12}{s_c^{\,2}} \cdot \int_{-s_c/2}^{s_c/2} y \cdot \left[T_k(y) - T_j(y) \right] \cdot dy = \Delta T_{lk} - \Delta T_{lj} \qquad (8.5\text{-}11)$$

c) Schwingbreite ΔT_2 der nichtlinearen Anteile der vorhandenen Temperaturverteilungen

$$\Delta T_2 = \max. \begin{cases} \Delta T_{2a} = \left| \Delta T_a - \Delta T_m \right| - \left| \dfrac{\Delta T_1}{2} \right| \\ \Delta T_{2i} = \left| \Delta T_i - \Delta T_m \right| - \left| \dfrac{\Delta T_1}{2} \right| \\ 0 \end{cases} \qquad (8.5\text{-}12)$$

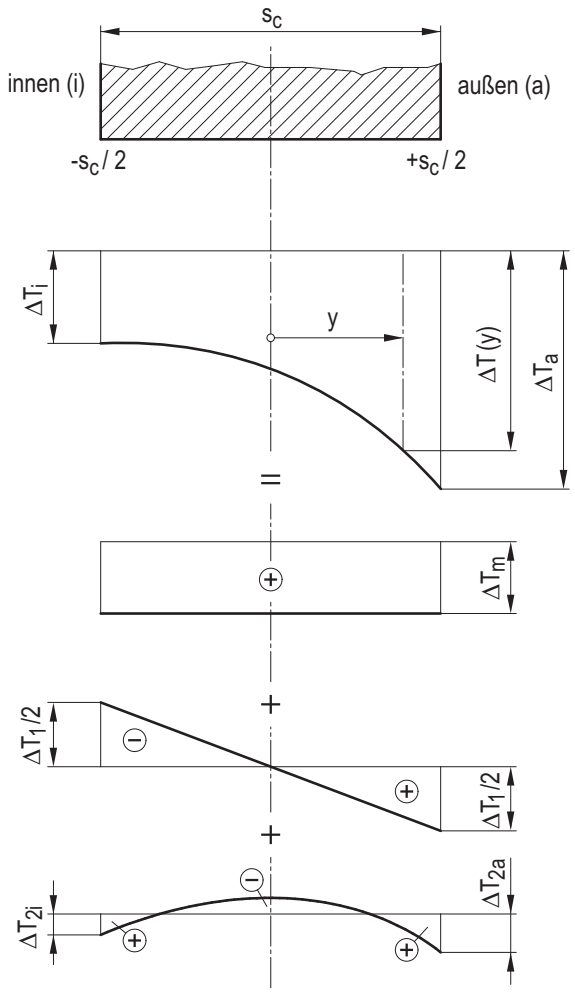


Bild 8.5-2: Aufteilung der Temperaturschwingbreite

8.5.2.5 Stufe P

(1) Die Nachweise für die Stufe P sind in Anlehnung an die Forderungen nach Abschnitt 3.3.3.6 festzulegen.

(2) Die Spannungen werden mit der Gleichung (8.5-1) ermittelt und mit $1{,}35 \cdot R_{p0,2PT}$ begrenzt. Nur bei mehr als 10 Lastspielen sind auch die Spannungen mit der Gleichung (8.5-3) zu ermitteln und die zugehörigen Lastwechsel müssen als Anteil der Gesamterschöpfung des Werkstoffs in der Ermüdungsanalyse berücksichtigt werden.

8.5.2.6 Stufen C und D

(1) Für die Nachweise der Stufen C und D gelten die Forderungen der Abschnitte 3.3.3.4 und 3.3.3.5.

(2) Bei der Stufe C werden die primären Spannungen nach Gleichung (8.5-1) ermittelt, aber mit $2{,}25 \cdot S_m$, jedoch nicht höher als $1{,}8 \cdot R_{p0,2T}$, abgesichert. Hierbei ist für p der jeweilige Druck einzusetzen. Wenn der maximale Innendruck mehr als das 1,5-fache des Auslegungsdrucks beträgt, ist die durch die Umfangsspannung infolge des Innendrucks p bedingte primäre Vergleichsspannung mit den Formeln des Anhangs A unter Berücksichtigung des jeweils zutreffenden Spannungsvergleichswertes nach Stufe C gemäß **Tabelle 7.7-4** zu begrenzen.

(3) Bei der Stufe D werden die primären Spannungen nach Gleichung (8.5-1) ermittelt, aber mit $3 \cdot S_m$, jedoch nicht größer als $2 \cdot R_{p0,2T}$, abgesichert. Hierbei ist für p der jeweilige Druck einzusetzen. Wenn der maximale Innendruck mehr als das 2-fache des Auslegungsdrucks beträgt, ist die durch die Umfangsspannung infolge des Innendrucks bedingte primäre Vergleichsspannung mit den Formeln des Anhangs A unter Berücksichtigung des jeweils zutreffenden Spannungsvergleichswertes nach Stufe D gemäß **Tabelle 7.7-4** zu begrenzen.

8.5.2.7 Beanspruchungsstufen von Sonderlastfällen

Bei der Durchführung von Festigkeitsnachweisen ist Abschnitt 3.1 zu beachten. Die primären Spannungen gemäß Gleichung (8.5-1) sind so zu begrenzen, dass keine Schädigung der Rohrleitung und ihrer Komponenten eintritt.

8.5.2.8 Spannungsbeiwerte

8.5.2.8.1 Allgemeines

(1) Die anzuwendenden Spannungsbeiwerte (B-, C- und K-Zahlen), die in den Gleichungen (8.5-1) bis (8.5-4) und (8.5-6) dieses Abschnitts zu verwenden sind, werden in **Tabelle 8.5-1** angegeben.

(2) In der **Tabelle 8.5-1** sind Spannungsbeiwerte für einige Rohrleitungsteile und -verbindungen angegeben. Bei besonderem Nachweis dürfen auch kleinere Spannungsbeiwerte als die in der **Tabelle 8.5-1** angegebenen verwendet werden.

(3) Für Rohrleitungsteile, die in **Tabelle 8.5-1** nicht aufgeführt sind, oder für die die angegebenen Voraussetzungen nicht eingehalten werden, sind Spannungsbeiwerte durch Versuchsauswertung zu ermitteln oder durch theoretischen Nachweis zu erbringen.

(4) Spannungsbeiwerte dürfen auch nach anderen anerkannten Vorschriften, Richtlinien und Normen bestimmt werden.

8.5.2.8.2 Definition der Spannungsbeiwerte

(1) Der allgemeine Ausdruck für einen Spannungsbeiwert infolge von mechanischer Belastung ist

$$B, C, K = \frac{\sigma_e}{\sigma} \qquad (8.5\text{-}13)$$

mit

σ_e	ideal-elastische Spannung, Vergleichsspannung oder Vergleichspannungsschwingbreite infolge mechanischer Belastung	N/mm²
σ	Nennspannung infolge mechanischer Belastung	N/mm²

(2) Die B-Faktoren sind aus Traglastbetrachtungen abgeleitet. Für die C- oder K-Zahlen stellt σ_e die maximale Vergleichsspannung oder Vergleichsspannungsschwingbreite der betrachteten Struktur infolge Belastung dar. Die Nennspannung σ ist im Einzelnen in den Gleichungen (8.5-1) bis (8.5-4) und (8.5-6) dargestellt.

Rohrleitungsteil oder Verbindung	Innendruck-belastung			Momenten-belastung			Temperatur-belastung		
	B_1	C_1	K_1	B_2	C_2	K_2	C_3	K_3	C_4
Gerades Rohr ohne Schweißnähte und andere Störstellen [1]	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,6	1,0	0,5
Stumpfgeschweißte Umfangsnähte zwischen geraden Rohren oder Rohr und stumpfgeschweißtem Bauteil									
a) bearbeitet [1]	0,5	1,0	1,1	1,0	1,0	1,1	0,6	1,1	0,5
b) unbearbeitet [2]	0,5	1,0	1,2	1,0	1,0 [2]	1,8	0,6	1,7	0,5
Stumpfgeschweißte Längsnähte in geraden Rohren [1] [2]									
a) bearbeitet	0,5	1,0	1,1	1,0	1,0	1,1	1,0	1,1	0,5
b) unbearbeitet $s_c > 5$ mm	0,5	1,1	1,2	1,0	1,2	1,3	1,0	1,2	0,5
c) unbearbeitet $s_c \leq 5$ mm	0,5	1,4	2,5	1,0	1,2	1,3	1,0	1,2	0,5
Wanddickenübergangsstücke [1]									
a) bearbeitet oder keine Umfangsnaht näher als $(d_{Rm}/2 \cdot s_{Rc})^{1/2}$	0,5	[3]	1,2	1,0	[3]	1,1	[3]	1,1	1,0
b) unbearbeitet	0,5	[3]	1,2	1,0	[3]	1,8	[3]	1,7	1,0
Stumpfgeschweißte Reduzierstücke [1] nach **Bild 8.5-5**	1,0 [4]	[4]	[4]	1,0	[4]	[4]	1,0	1,0	0,5
Bögen oder Biegungen [1]	[5]	[5]	1,0	[5]	[5]	1,0	1,0	1,0	0,5
Abzweige [1] [6] nach Abschnitt A 2.8	0,5	[7]	2,0	[7]	[7]	[7]	1,8	1,7	1,0
Einschweiß-T-Stücke [1] [6] nach Abschnitt A 5.2.4	0,5	1,5	4,0	[8]	[8]	[8]	1,0	1,0	0,5

Die Verwendung der Spannungsbeiwerte ist nur erlaubt, wenn die Forderungen der Dimensionierung gemäß Anhang A erfüllt sind. Außerdem sind die B-Werte nur anwendbar, falls $d_a/s_c \leq 50$, die C- und K-Werte, falls $d_a/s_c \leq 100$ ist. Für $50 < d_a/s_c \leq 100$ bleiben die B_1-Werte gültig, die B_2-Werte sind mit dem Faktor $1/(X \cdot Y)$ zu multiplizieren, wobei

$X = 1{,}3 - 0{,}006 \cdot (d_a/s_c)$ und

$Y = 1{,}0224 - 0{,}000594 \cdot T$ mit $Y \leq 1{,}0$ für ferritische und $Y = 1{,}0$ für andere Werkstoffe.

T : Auslegungstemperatur in °C

[1] siehe Abschnitt 8.5.2.8.3.1
[2] siehe Abschnitt 8.5.2.8.3.2
[3] siehe Abschnitt 8.5.2.8.3.3
[4] siehe Abschnitt 8.5.2.8.3.4
[5] siehe Abschnitt 8.5.2.8.3.5
[6] siehe Abschnitt 8.5.2.8.3.6
[7] siehe Abschnitt 8.5.2.8.3.6.2
[8] siehe Abschnitt 8.5.2.8.3.6.3

Tabelle 8.5-1: Spannungsbeiwerte zur Verwendung in den Gleichungen 8.5-1 bis 8.5-4 und 8.5-6

(3) Der allgemeine Ausdruck für einen Spannungsbeiwert infolge einer Temperaturbelastung ist:

$$C,K = \frac{\sigma_e}{E \cdot \alpha \cdot \Delta T} \qquad (8.5\text{-}14)$$

mit

σ_e	ideal-elastische Spannung, Vergleichsspannung oder Vergleichsspannungsschwingbreite infolge Temperaturbelastung	N/mm²
E	Elastizitätsmodul	N/mm²
α	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	1/K
ΔT	Temperaturdifferenz oder Temperaturschwingbreite	K

8.5.2.8.3 Bedingungen zur Verwendung der Spannungsbeiwerte

8.5.2.8.3.1 Allgemeines

(1) Die hier und in **Tabelle 8.5-1** angegebenen Spannungsbeiwerte einschließlich der im folgenden aufgeführten Einschränkungen sind in Verbindung mit den Bedingungen der Abschnitte 8.5.2.2 bis 8.5.2.7 anzuwenden.

(2) Für die Ermittlung der Spannungsbeiwerte und der Spannung gemäß Gleichung (8.5-1) bis (8.5-7) sind die Nennabmessungen zu verwenden, wobei zwischen Außen- und Innendurchmesser die Beziehung

$$d_i = d_a - 2 \cdot s_c \qquad (8.5\text{-}15)$$

mit

s_c	Wanddicke des Rohres gemäß Abschnitt 8.5.2.3	mm

zu beachten ist.

Für Einschweißteile sind die Nennabmessungen des äquivalenten Rohres zu verwenden.

(3) Für Rohrleitungsformstücke wie Reduzierungen und kegelige Übergangsstücke sollen die Nennabmessungen des weiteren oder engeren Endes verwendet werden, je nachdem, welche die größeren d_a/s_c-Werte ergeben.

(4) Belastungen, für die Spannungserhöhungsfaktoren angegeben sind, umfassen: Innendruck, Biege- und Torsionsmomente sowie Temperaturdifferenzen. Die Erhöhungsfaktoren sind hinreichend konservativ anzunehmen, so dass sie auch die Einflüsse der Querkräfte abdecken, die normalerweise in einem flexiblen Rohrsystem auftreten. Wenn jedoch Normal- oder Querkräfte signifikante Belastungsgrößen in einem Rohrleitungsbauteil darstellen, so soll der Einfluss dieser Kräfte in den Spannungsnachweis einbezogen werden. Die Kräfte und Momente sollen mit Hilfe einer Rohrsystemberechnung ermittelt werden.

(5) Die Spannungsbeiwerte für Schweißnähte sind nicht anwendbar, wenn die radiale Schweißnahtschrumpfung größer als $0{,}25 \cdot s_c$ ist.

(6) Die in **Tabelle 8.5-1** angegebenen Spannungsbeiwerte gelten nur dann für stumpfgeschweißte Umfangsnähte, wenn die Wanddicken der benachbarten Bauteile innerhalb eines Abstandes von $\sqrt{d_a \cdot s_c}$, von der Schweißnaht aus gemessen, zwischen $0{,}875 \cdot s_c$ und $1{,}1 \cdot s_c$ liegen.

(7) Für Bauteile mit stumpfgeschweißten Längsnähten müssen die ausgewiesenen K_1-, K_2- und K_3-Indizes mit 1,1 für bearbeitete oder mit 1,3 für unbearbeitete Nähte multipliziert werden. An der Schnittstelle einer Längsnaht im geraden Rohr mit einer Umfangsstumpf- oder -kehlnaht werden die

C_1-, K_1-, C_2-, K_2- und K_3-Indizes als Produkt der entsprechenden Indizes ermittelt.

(8) Im Allgemeinen, und wenn nicht anders spezifiziert, wird keine Produktbildung der Spannungsbeiwerte für zwei aneinandergeschweißte Bauteile (z. B. T-Stücke und Reduzierung, T-Stück und Rundnaht) gefordert. Das Bauteil und die Schweißnaht werden getrennt nachgewiesen.

(9) Bei Biegung oder Bogen, die miteinander unmittelbar verschweißt oder durch ein gerades Rohrstück, dessen Länge kleiner ist als der Durchmesser, verbunden sind, werden die Spannungsbeiwerte als Produkt der Beiwerte für Biegungen oder Bogen und derjenigen für die Umfangsstumpfnaht angesetzt. Ausgenommen hiervon sind die Spannungsindizes B_1 und C_4.

(10) Die Spannungsbeiwerte in **Tabelle 8.5-1** sind anwendbar für Bauteile und Schweißnähte mit einer Unrundheit $\hat{d}_a - \check{d}_a$ kleiner oder gleich $0{,}08 \cdot s_c$. Für gerade Rohre, Biegungen, Längsnähte im geraden Rohr, Rundnähte und Wanddickenübergangsstücke, die diese Forderung nicht erfüllen, werden die Spannungsbeiwerte wie weiter unten angeführt modifiziert.

a) Wenn der Querschnitt unrund, jedoch ohne Unstetigkeit im Radius (z. B. ein elliptischer Querschnitt) ist, dann erhält man einen erlaubten K_1-Wert durch Multiplikation des ausgewiesenen Wertes mit dem Faktor

$$F_{1a} = 1 + \frac{\hat{d}_a - \check{d}_a}{s_c} \cdot \left[\frac{1{,}5}{1 + 0.455 \cdot \left(d_a / s_c\right)^3 \cdot (p / E)} \right] \qquad (8.5\text{-}16)$$

b) Sind örtliche Unrundheiten vorhanden, z. B. eine flache Stelle und ist $\hat{d}_a - \check{d}_a$ nicht größer als $0{,}08 \cdot d_a$, dann darf ein zulässiger Wert für K_1 gefunden werden durch Multiplizieren der K_1-Zahlen aus der Tabelle 8.5-1 mit dem Faktor F_{1b}:

$$F_{1b} = 1 + \frac{2 \cdot s_c \cdot M \cdot \check{R}_{p0,2T}}{d_a \cdot p} \qquad (8.5\text{-}17)$$

mit

M=2 für ferritische Stähle und Nichteisenwerkstoffe mit Ausnahmen von Nickel-Basis-Legierungen

M=2,7 für austenitische Stähle und Nickel-Basis-Legierungen

8.5.2.8.3.2 Schweißnähte

(1) Die in **Tabelle 8.5-1** angegebenen Spannungsbeiwerte gelten für stumpfgeschweißte Längsnähte in geraden Rohren, für stumpfgeschweißte Umfangsnähte bei angeschlossenen Bauteilen gleicher Nennwanddicke mit Ausnahme der im Folgenden definierten Abweichungen.

(2) Schweißverbindungen werden entweder als bearbeitet oder unbearbeitet bezeichnet, wenn sie die jeweiligen Anforderungen in den nachfolgenden Festlegungen erfüllen.

a) Schweißnähte gelten dann als bearbeitet, wenn sie die nachfolgenden Bedingungen erfüllen:

Die Schweißnahtüberhöhung darf insgesamt auf der Innen- und Außenoberfläche nicht größer als $0{,}1 \cdot s_c$ sein. Es darf weder auf der inneren noch auf der äußeren Oberfläche ein Nahteinfall auftreten.

Ebenso darf die fertige Kontur an keiner Stelle eine größere Neigung als 10 Grad aufweisen (siehe **Bild 8.5-3**).

b) Schweißnähte gelten als unbearbeitet, wenn sie nicht die Anforderungen für bearbeitete Nähte erfüllen.

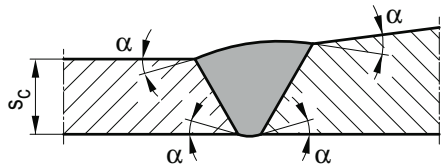


Bild 8.5-3: Zulässige Kontur der Schweißnaht

(3) Für unbearbeitete Schweißnähte, die Bauteile mit Nennwanddicken kleiner als 6 mm verbinden, gilt folgender Faktor C_2:

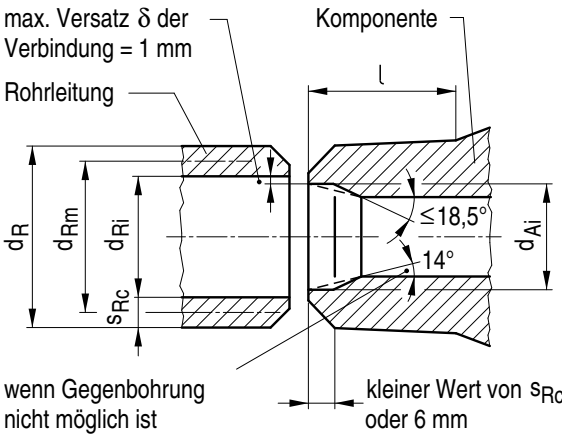
$$C_2 = 1{,}0 + 3 \cdot \left(\delta / s_c\right) \qquad (8.5\text{-}18)$$

jedoch nicht größer als 2,1

mit

δ zulässiger mittlerer Versatz an Stumpfnähten gemäß **Bild 8.5-4**. Für δ darf ein kleinerer Wert als 0,8 mm eingesetzt werden, sofern ein kleinerer Wert für die Herstellung spezifiziert ist. Es kann auch der gemessene Kantenversatz verwendet werden. Für bearbeitete Schweißnähte darf $\delta = 0$ gesetzt werden. — mm

a) konzentrische Anordnung



b) örtlicher Versatz

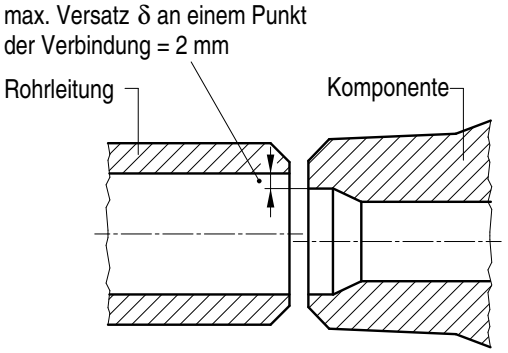


Bild 8.5-4: Ausrichtungstoleranzen für Stumpfschweißungen und zulässige Neigungswinkel für ungleiche Innen- und Außendurchmesser, wenn Bearbeitung oder Gegenschweißen von innen nicht möglich ist

8.5.2.8.3.3 Wanddickenübergangsstücke

(1) Die in **Tabelle 8.5-1** angegebenen Spannungsbeiwerte gelten für stumpfgeschweißte Umfangsnähte zwischen einem Rohr, dessen Wanddicke innerhalb eines Abstandes $\sqrt{d_a \cdot s_c}$ vom Schweißende in einem Toleranzfeld von $0{,}875 \cdot s_c$ bis $1{,}1 \cdot s_c$ liegt, und dem Übergangsbeginn zu einem dickwandigeren zylindrischen Bauteil (Rohr, Anschlussstutzen, Flansch) mit größerem oder gleichem Außendurchmesser und kleinerem oder gleichem Innendurchmesser.

(2) Für Übergangsstücke, die an der Außenseite mindestens über eine Länge $1{,}5 \cdot s_c$ vom Schweißende her eine Neigung ≤ 30 Grad und anschließend mindestens über eine Länge $0{,}5 \cdot s_c$ eine Neigung ≤ 45 Grad sowie an der Innenseite mindestens über eine Länge $2 \cdot s_c$ vom Schweißende her eine Neigung ≤ 1 : 3 aufweisen, gilt für die Beiwerte C_1, C_2, C_3:

$$C_1 = 0{,}5 + 0{,}33 \cdot \left(d_a / s_c\right)^{0{,}3} + 1{,}5 \cdot \left(\delta / s_c\right) \quad (8.5\text{-}19)$$

aber nicht größer als 1,8

$$C_2 = 1{,}7 + 3{,}0 \cdot \left(\delta / s_c\right) \quad (8.5\text{-}20)$$

aber nicht größer als 2,1

$$C_3 = 1{,}0 + 0{,}03 \cdot \left(d_a / s_c\right) \quad (8.5\text{-}21)$$

aber nicht größer als 2,0

(3) Für Übergangsstücke, die an der Außenseite, der Innenseite oder beiden Seiten mindestens über einer Länge $\sqrt{d_a \cdot s_c}$ vom Schweißende her eine Neigung $\leq 1:3$ aufweisen, gilt für die Beiwerte C_1, C_2, C_3:

$$C_1 = 1{,}0 + 1{,}5 \cdot \left(\delta / s_c\right) \quad (8.5\text{-}22)$$

aber nicht größer als 1,8

$$C_2 = \hat{s} / s_c + 3 \cdot \left(\delta / s_c\right) \quad (8.5\text{-}23)$$

aber nicht größer als der kleinere Wert von

$\left[1{,}33 + 0{,}04 \cdot \sqrt{d_a / s_c} + 3 \cdot \left(\delta / s_c\right)\right]$ und 2,1

$$C_3 = 0{,}35 \cdot \left(\hat{s} / s_c\right) \quad (8.5.24)$$

aber nicht größer als 2,0

(4) Für die Wanddickenübergangsstücke nach diesem Abschnitt ist δ gemäß **Bild 8.5-4** zu wählen. Für bearbeitete Schweißnähte und für unbearbeitete Schweißnähte zwischen Bauteilen mit $s_c > 6$ mm kann $\delta = 0$ gesetzt werden.

(5) $\hat{s}$ ist die größte Wanddicke innerhalb der Übergangszone. Ist $\hat{s} / s_c \leq 1{,}1$, so können die Beiwerte für Rundnähte verwendet werden.

8.5.2.8.3.4 Reduzierstücke

8.5.2.8.3.4.1 Allgemeines

Die in **Tabelle 8.5-1** angegebenen Spannungsbeiwerte sind unter Berücksichtigung der nachfolgend aufgeführten Einschränkungen auf konzentrische Reduzierstücke anwendbar.

a) $\alpha \leq 60°$

b) Die Wanddicke an allen Stellen des Reduzierstückes ist nicht kleiner als s_{01}. Davon ausgenommen ist der zylindrische Teil am engen Ende und der diesem unmittelbar benachbarte Bereich, der nicht dünner als s_{02} sein darf. s_{01} und s_{02} sind die Mindestwanddicken für das gerade Rohr am weiten oder engen Ende des Reduzierstückes.

8.5.2.8.3.4.2 Primärspannungsbeiwerte

$B_1 = 0{,}5$ für $\alpha \leq 30°$

$B_1 = 1$ für $30° < \alpha \leq 60°$

8.5.2.8.3.4.3 Primär- plus Sekundärspannungsbeiwerte

(1) Für Reduzierstücke mit r_1 und $r_2 \geq 0{,}1 \cdot d_1$:

$$C_1 = 1{,}0 + 0{,}0058 \cdot \alpha \cdot \sqrt{d_n / s_n} \quad (8.5\text{-}25)$$

$$C_2 = 1{,}0 + 0{,}36 \cdot \alpha^{0{,}4} \left(d_n / s_n\right)^{0{,}4 \cdot \left(d_2/d_1 - 0{,}5\right)} \quad (8.5\text{-}26)$$

(2) Für Reduzierstücke mit r_1 und/oder $r_2 < 0{,}1 \cdot d_1$:

$$C_1 = 1{,}0 + 0{,}00465 \cdot \alpha^{1{,}285} \cdot \left(d_n / s_n\right)^{0{,}39} \quad (8.5\text{-}27)$$

$$C_2 = 1{,}0 + 0{,}0185 \cdot \alpha \cdot \sqrt{d_n / s_n} \quad (8.5\text{-}28)$$

(3) Dabei ist d_n/s_n der größere Wert von d_1/s_1 und d_2/s_2 und α der Neigungswinkel in Grad gemäß **Bild 8.5-5**.

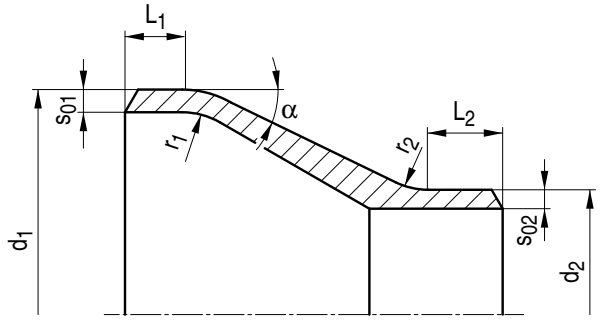


Bild 8.5-5: Konzentrisches Reduzierstück

8.5.2.8.3.4.4 Spitzenspannungsbeiwerte

(1) Die nachfolgend angegebenen Beiwerte K_1 und K_2 sollen abhängig von der Art der Anschlussschweißnaht, der Größe des Kantenversatzes und der Dickenverhältnisse verwendet werden.

(2) Für Reduzierstücke, die mit dem Rohr durch bearbeitete Rundnähte (siehe Abschnitt 8.5.2.8.3.2) verbunden sind:

$$K_1 = 1{,}1 - 0{,}1 \cdot L_m / \sqrt{d_m \cdot s_m} \quad (8.5\text{-}29)$$

jedoch nicht kleiner als 1,0

$K_2 = K_1$

(3) Für Reduzierstücke, die mit dem Rohr durch unbearbeitete Rundnähte (siehe Abschnitt 8.5.2.8.3.2) verbunden sind, wobei s_1 oder s_2 nicht größer als 5 mm und δ_1 / s_1 oder δ_2 / s_2 größer als 0,1 sind:

$$K_1 = 1{,}2 - 0{,}2 \cdot L_m / \sqrt{d_m \cdot s_m} \quad (8.5\text{-}30)$$

jedoch nicht kleiner als 1,0

$$K_2 = 1{,}8 - 0{,}8 \cdot L_m / \sqrt{d_m \cdot s_m} \quad (8.5\text{-}31)$$

jedoch nicht kleiner als 1,0

(4) Für Reduzierstücke, die mit dem Rohr durch unbearbeitete Rundnähte (siehe Abschnitt 8.5.2.8.3.2) verbunden sind, wobei s_1 oder s_2 nicht größer als 5 mm oder δ_1 / s_1 oder δ_2 / s_2 größer als 0,1 sind:

$$K_1 = 1{,}2 - 0{,}2 \cdot L_m / \sqrt{d_m \cdot s_m} \quad (8.5\text{-}32)$$

jedoch nicht kleiner als 1,0

$$K_2 = 2{,}5 - 1{,}5 \cdot L_m / \sqrt{d_m \cdot s_m} \quad (8.5\text{-}33)$$

jedoch nicht kleiner als 1,0

$L_m / \sqrt{d_m \cdot s_m}$ ist der kleinere Wert von

$L_1 / \sqrt{d_1 \cdot s_1}$ oder $L_2 / \sqrt{d_2 \cdot s_2}$

δ_1, δ_2 ist der Kantenversatz am weiten oder engen Ende der Reduzierung (siehe Abschnitt 8.5.2.8.3.2 und **Bild 8.5-4**).

8.5.2.8.3.5 Bögen oder Biegungen

Die Spannungsbeiwerte nach **Tabelle 8.5-1** gelten mit folgenden Ergänzungen für Einschweißbögen oder Biegungen.

a) Primärspannungsbeiwert

$$B_1 = -0{,}1 + 0{,}4 \cdot h \quad (8.5\text{-}34)$$

jedoch weder kleiner als Null, noch größer als 0,5

$$B_2 = 1{,}3 / h^{2/3} \quad (8.5\text{-}35)$$

jedoch nicht kleiner als 1,0

b) Primär- plus Sekundärspannungsbeiwerte

$$C_1 = \frac{\left(2 \cdot r - r_m\right)}{2 \cdot \left(r - r_m\right)} \quad (8.5\text{-}36)$$

$$C_2 = \frac{1{,}95}{h^{2/3}} \text{ jedoch nicht kleiner als 1,5} \quad (8.5\text{-}37)$$

mit

$r_m = d_m / 2$

$d_m = d_a - s_c$

r = Biegeradius

$$h = \frac{4 \cdot s_c \cdot r}{d_m^2}$$

8.5.2.8.3.6 Abzweige und Einschweiß-T-Stücke

8.5.2.8.3.6.1 Allgemeines

(1) Für die Spannungsermittlung nach den Gleichungen (8.5-1) bis (8.5-4) und (8.5-6) sind bei Abzweigbauteilen die nachfolgend beschriebenen Festlegungen zu beachten.

(2) Die Momente sind für den Schnittpunkt zwischen Hauptleitung und Abzweig zu berechnen.

Für M_A:

$$M_A = \left(M_{x3}^2 + M_{y3}^2 + M_{z3}^2\right)^{1/2} = \text{ resultierendes Moment auf den Abzweig} \qquad (8.5\text{-}38)$$

Für M_H:

$$M_H = \left(M_x^2 + M_y^2 + M_z^2\right)^{1/2} = \text{ resultierendes Moment auf die Hauptleitung} \qquad (8.5\text{-}39)$$

worin M_x, M_y und M_z wie folgt zu berechnen sind:

Haben die richtungsgebundenen Momente M_x, M_y oder M_z der Hauptleitung des mit den Momenten von **Bild 8.5-6** ins Momentengleichgewicht gebrachten Abzweigs an den Schnittufern 1 und 2 gleiche Vorzeichen, so sind die betreffenden Anteile zur Bildung des resultierenden Moments M_H nach Gleichung (8.5-39) gleich Null. Andernfalls ist jeweils der kleinere der Absolutwerte an den Schnittufern 1 und 2 zur Bildung von M_H heranzuziehen.

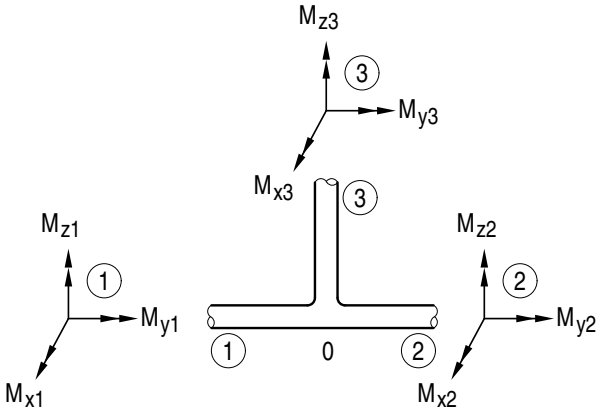


Bild 8.5-6: Bezeichnung der Momente am Abzweig

(3) Für Abzweige sind die Terme, die M_i enthalten, in den Gleichungen (8.5-1), (8.5-2), (8.5-3), (8.5-4) und (8.5-6) wie folgt zu ersetzen:

In Gleichung (8.5-1)

$$B_{2A} \cdot \frac{M_A}{Z_A} + B_{2H} \cdot \frac{M_H}{Z_H} \qquad (8.5\text{-}40)$$

in den Gleichungen (8.5-2), (8.5-4) und (8.5-6)

$$C_{2A} \cdot \frac{M_A}{Z_A} + C_{2H} \cdot \frac{M_H}{Z_H} \qquad (8.5\text{-}41)$$

in Gleichung (8.5-3)

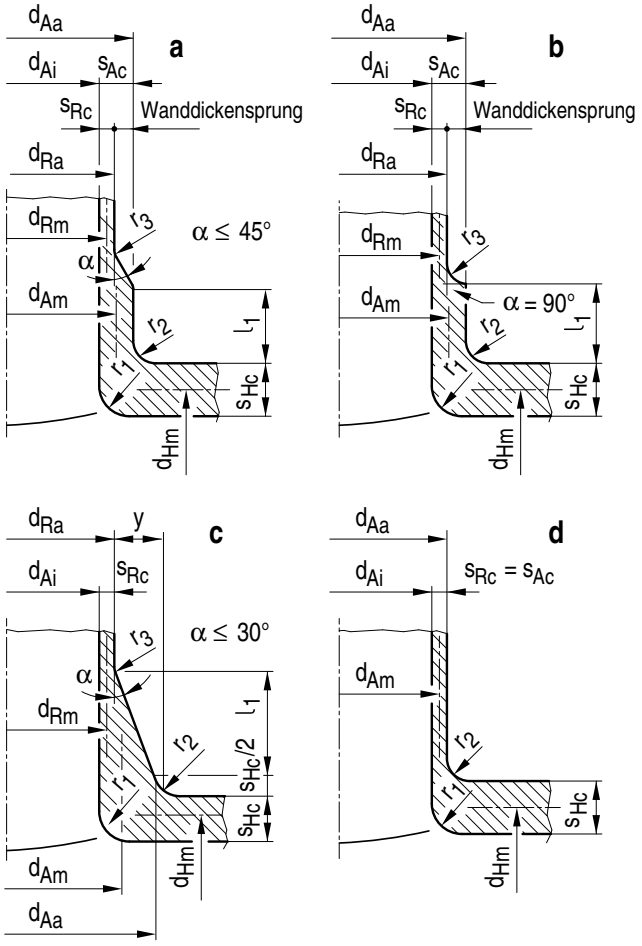
$$C_{2A} \cdot K_{2A} \cdot \frac{M_A}{Z_A} + C_{2H} \cdot K_{2H} \cdot \frac{M_H}{Z_H} \qquad (8.5\text{-}42)$$

dabei gilt in allen Fällen

$$Z_A = \frac{\pi}{4} \cdot d_{Rm}^2 \cdot S_{Rc}$$

$$Z_H = \frac{\pi}{4} \cdot d_{Hm}^2 \cdot S_{Hc}$$

(4) Für Abzweige nach Abschnitt A 2.8:
d_{Rm}, s_{Rc}, d_{Hm} und s_{Hc} sind in **Bild 8.5-7** angegeben.



$s_{Ac} = s_{Rc} + 0{,}667 \cdot y$

Ist $l_1 \geq 0{,}5 \sqrt{\frac{d_{Ai}}{2} \cdot s_{Ac}}$, dann kann d_{Rm} als Durchmesser bis zur Mitte von s_{Ac} verwendet werden.

Bild 8.5-7: Stutzenabmessungen

8.5.2.8.3.6.2 Spannungsbeiwerte für Abzweige nach Abschnitt A 5.2.5

(1) Voraussetzungen für die Anwendbarkeit

Die angegebenen Spannungsbeiwerte gelten für Abzweiganschlüsse, wenn die nachfolgenden Bedingungen a) bis h) erfüllt sind:

a) Abzweigdurchmesserverhältnis
$d_{Am}/d_{Hm} \leq 0{,}5$

b) Das Durchmesser-Wanddickenverhältnis in Rohren ist wie folgt eingeschränkt:
$d_{Hm}/s_{Hc} \leq 50$

c) Die Achse des Abzweigs muss senkrecht auf der Hauptleitungswand stehen.

d) Die Vorschriften für Verstärkungsflächen nach Abschnitt A 5.2.5 sind eingehalten.

e) Der innere Rundungsradius r_1 (siehe **Bild 8.5-7**) liegt zwischen 0,1 und 0,5 · s_{Hc}.

f) Der äußere Rundungsradius r_2 (siehe **Bild 8.5-7**) ist mindestens der größere Wert aus $s_{Ac}/2$ oder $(s_{Ac} + y)/2$ (siehe **Bild 8.5-7 c**) und $s_{Hc}/2$.

g) Der äußere Rundungsradius r_3 (siehe **Bild 8.5-7**) ist nicht kleiner als der größere Wert von $0{,}002 \cdot \alpha \cdot d_{Aa}$ oder $2 \cdot (\sin \alpha)^3$ multipliziert mit dem Wanddickensprung, wie er in **Bild 8.5-7 a** und **Bild 8.5-7 b** dargestellt ist.

h) Bei mehreren Abzweigen in einem Rohr darf die Bogenlänge zwischen den Mitten benachbarter Abzweige an der Außenfläche der Hauptleitung in Längsrichtung nicht kleiner als das 1,5-fache der Summe ihrer Innendurchmesser und in Umfangsrichtung nicht kleiner als die Summe ihrer Innendurchmesser sein.

(2) Spannungsbeiwerte für Primärspannungen

$$B_{2A} = 0{,}5 \cdot C_{2A} \geq 1{,}0 \qquad (8.5\text{-}43)$$

$$B_{2H} = 0{,}75 \cdot C_{2H} \geq 1{,}0 \qquad (8.5\text{-}44)$$

(3) Spannungsbeiwerte für Primär- plus Sekundärspannungen

Die Beiwerte C_1, C_{2A} und C_{2H} können aus folgenden Beziehungen bestimmt werden:

$$C_1 = 1{,}4 \cdot \left(\frac{d_{HM}}{s_{Hc}}\right)^{0{,}182} \cdot \left(\frac{d_{Rm}}{d_{Hm}}\right)^{0{,}367} \cdot \left(\frac{s_{Hc}}{s_{Rc}}\right)^{0{,}382} \cdot \left(\frac{S_{Rc}}{r_2}\right)^{0{,}148} \qquad (8.5\text{-}45)$$

jedoch nicht kleiner als 1,2.

Für r_2/s_{Rc} größer als 12 ist zur Bestimmung von C_1 $r_2/s_{Rc} = 12$ zu setzen.

$$C_{2A} = 3 \cdot \left(\frac{d_{Hm}}{2s_{Hc}}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{d_{Rm}}{d_{Hm}}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{s_{Rc}}{s_{Hc}}\right) \cdot \left(\frac{d_{Rm}}{d_{Aa}}\right) \qquad (8.5\text{-}46)$$

jedoch nicht kleiner als 1,5

$$C_{2H} = 1{,}15 \cdot \left[\left(\frac{d_{Hm}}{2s_{Hc}}\right) \cdot \left(\frac{d_{Rm}}{d_{Hm}}\right) \cdot \left(\frac{s_{Hc}}{s_{Rc}}\right)\right]^{1/4} \qquad (8.5\text{-}47)$$

jedoch nicht kleiner als 1,5.

(4) Spannungsbeiwerte für Spitzenspannungen

Die Beiwerte K_{2A} und K_{2H} für Momentenbelastungen können wie folgt gesetzt werden:

$K_{2A} = 1{,}0$

$K_{2H} = 1{,}75$

wobei das Produkt $K_{2H} \cdot C_{2H} \geq 2{,}65$ sein soll.

8.5.2.8.3.6.3 Spannungsbeiwerte für Einschweiß-T-Stücke

(1) Die in **Tabelle 8.5-1** sowie die nachfolgend angegebenen Spannungsbeiwerte für Einschweiß-T-Stücke sind anwendbar, wenn diese den Anforderungen gemäß Abschnitt A 5.2.4.1 oder A 5.2.4.2 genügen.

(2) Zur Ermittlung der Spannungen aus Innendruck und Momenten sowie der Spannungsbeiwerte sind die Anschlussdurchmesser (d_{Ha}, d_{Aa}) und die äquivalenten Anschlusswanddicken $\left(s_H^+, s_A^+\right)$ gemäß Abschnitt A 5.2.4.1.5 oder A 5.2.4.2.4 zu verwenden.

(3) Spannungsbeiwerte für Primärspannungen

Die Beiwerte B_{2A} und B_{2H} können wie folgt bestimmt werden:

$$B_{2A} = 0{,}4 \cdot \left(\frac{d_{Ha}}{2 \cdot s_H^+}\right)^{2/3} \qquad (8.5\text{-}48)$$

jedoch nicht kleiner als 1,0

$$B_{2H} = 0{,}5 \cdot \left(\frac{d_{Ha}}{2 \cdot s_H^+}\right)^{2/3} \qquad (8.5\text{-}49)$$

jedoch nicht kleiner als 1,0

(4) Spannungsbeiwerte für Primär- plus Sekundärspannungen

Die Spannungsbeiwerte für Momentenbelastungen C_{2A} und C_{2H} betragen:

$$C_{2A} = 0{,}67 \cdot \left(\frac{d_{Ha}}{2 \cdot s_H^+}\right)^{2/3} \qquad (8.5\text{-}50)$$

jedoch nicht kleiner als 2,0

$$C_{2H} = C_{2A} \qquad (8.5\text{-}51)$$

(5) Spannungsbeiwerte für Spitzenspannungen

Die Spannungsbeiwerte für Momentenbelastungen K_{2A} und K_{2H} betragen:

$$K_{2A} = K_{2H} = 1 \qquad (8.5\text{-}52)$$

8.5.2.9 Detaillierte Spannungsanalyse

8.5.2.9.1 Allgemeines

(1) Anstelle der Spannungsanalyse nach den Abschnitten 8.5.2.3 bis 8.5.2.6 darf eine detaillierte Spannungsanalyse gemäß diesem Abschnitt durchgeführt werden.

(2) Zur Ermittlung einer Normalspannung σ gilt mit σ_N als Nennspannung und i als Spannungsbeiwert die Beziehung

$$\sigma = i \cdot \sigma_N$$

Entsprechend gilt für Schubspannungen:

$$\tau = i \cdot \tau_N$$

(3) In diesem Abschnitt gelten für die Nennspannungen folgende Definitionen:

Bei Belastung durch Innendruck p

$$\sigma_N(p) = p \cdot d_i / (2 \cdot s_c) \qquad (8.5\text{-}53)$$

Bei Belastung durch Biegemoment M_b

$$\sigma_N(M_b) = M_b / W \qquad (8.5\text{-}54)$$

Bei Belastung durch Torsionsmoment M_t

$$\tau_N(M_t) = M_t / (2 \cdot W) \qquad (8.5\text{-}55)$$

(4) Für die Spannungskomponenten am Rohrquerschnitt gelten entsprechend Abschnitt 8.2.2 und **Bild 8.5-8** folgende Definitionen:

σ_a : Spannungskomponente in axialer Richtung

σ_t : Spannungskomponente in Umfangsrichtung

σ_r : Spannungskomponente in radialer Richtung

$\tau_{at} = \tau_{ta}$: Schubspannungskomponenten in Umfangsrichtung und axialer Richtung

(5) Mit diesen Spannungskomponenten sind für die untersuchten Stellen die Vergleichsspannungen zu ermitteln und gemäß **Tabelle 7.7-4** zu begrenzen.

8.5.2.9.2 Rohrbögen und Biegungen

(1) Die Spannungsbeiwerte der **Tabellen 8.5-2** und **8.5-3** gelten für Rohrbögen und Biegungen unter der Voraussetzung, dass die untersuchten Stellen ausreichend weit von Umfangsnähten, Längsnähten und anderen lokalen Störstellen entfernt sind. Anderenfalls sind zusätzliche theoretische oder experimentelle Untersuchungen erforderlich. Die Anwendbarkeit der Spannungsbeiwerte für Biegungen mit Wanddickenaufstauchungen größer als 15 %, bezogen auf die Nennwanddicke, (Induktivbiegungen) ist im Einzelfall nachzuweisen.

(2) Die bei den Spannungsbeiwerten verwendeten Bezeichnungen gehen aus **Bild 8.5-8** hervor. Dabei sind die Momentenkomponenten wie folgt definiert:

M_x : Torsionsmoment

M_y : Biegemoment, das den Bogen aus der Krümmungsebene E_z heraus verformt

M_z : Biegemoment, das den Bogen in der Krümmungsebene E_y verformt

Umfangsort	Rohrwandort	Spannungs-richtung	Spannungsbeiwert
runder Querschnitt			
φ	außen	σ_t	$i_1 - 0{,}5 \cdot i_4$
	Mitte		i_1
	innen		$i_1 + 0{,}5 \cdot i_4$
jeder	außen	σ_a	i_2
	Mitte		i_2
	innen		i_2
unrunder Querschnitt			
φ	außen	σ_t	$i_1 - i_3 - 0{,}5 \cdot i_4$
	Mitte		i_1
	innen		$i_1 + i_3 + 0{,}5 \cdot i_4$
	außen	σ_a	$i_2 - 0{,}3 \cdot i_3$
	Mitte		i_2
	innen		$i_2 + 0{,}3 \cdot i_3$
runder und unrunder Querschnitt			
jeder	außen	σ_r	0
	Mitte		$- 0{,}5 \cdot i_4$
	innen		$- i_4$

Tabelle 8.5-2: Spannungsbeiwerte für Rohrbögen unter Innendruckbelastung

Umfangsort	Rohrwandort	Spannungs-richtung	Spannungsbeiwert
für Torsionsmoment M_x			
jeder	außen	τ_{at}	1
	Mitte		1
	innen		1
für Biegemomente M_y			
φ	außen	σ_t	i_{tby}
	Mitte		0
	innen		$- i_{tby}$
	außen	σ_a	$i_{amy} + \nu \cdot i_{tby}$
	Mitte		i_{amy}
	innen		$i_{amy} - \nu \cdot i_{tby}$
für Biegemomente M_z			
φ	außen	σ_t	$i_{tmz} + i_{tbz}$
	Mitte		i_{tmz}
	innen		$i_{tmz} - i_{tbz}$
	außen	σ_a	$i_{amz} + \nu \cdot i_{tbz}$
	Mitte		i_{amz}
	innen		$i_{amz} - \nu \cdot i_{tbz}$

Tabelle 8.5-3: Spannungsbeiwerte für Rohrbögen unter Momentenbelastung

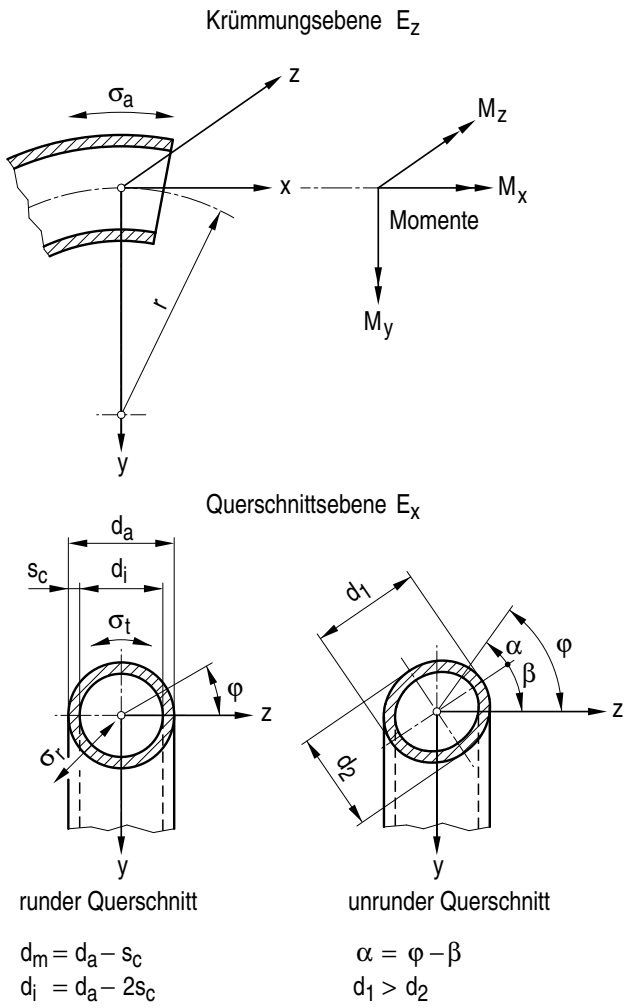


Bild 8.5-8: Bezeichnung am Rohrbogen für detaillierte Spannungsanalyse

(3) Die in **Tabelle 8.5-2** für Innendruckbelastung angeführten Spannungsbeiwerte haben folgende Größen:

$$i_1 = \frac{r + 0{,}25 \cdot d_{i.} \cdot \sin\varphi}{r + 0{,}5 \cdot d_m \cdot \sin\varphi} \tag{8.5-56}$$

$$i_2 = 0{,}5 \cdot d_i \,/\, d_m \tag{8.5-57}$$

$$i_3 = \frac{d_1 - d_2}{s_c} \frac{1{,}5}{1 + 0{,}5 \cdot \left(1 - \nu^2\right) \cdot \left(d_m / s_c\right)^3 \cdot p / E} \cdot \cos 2\alpha \tag{8.5-58}$$

$$i_4 = \frac{2 \cdot s_c}{d_i} \tag{8.5-59}$$

(4) Die in **Tabelle 8.5-3** für Momentenbelastung angeführten Spannungsfaktoren haben mit

$$\lambda = 4 \cdot r \cdot s_c \,/\, \left(d_m{}^2 \cdot \sqrt{1 - \nu^2}\right) \tag{8.5-60}$$

$$\psi = 2 \cdot p \cdot r^2 \,/\, \left(E \cdot d_m \cdot s_c\right) \tag{8.5-61}$$

$$x_1 = 5 + 6 \cdot \lambda^2 + 24 \cdot \psi \tag{8.5-62}$$

$$x_2 = 17 + 600 \cdot \lambda^2 + 480 \cdot \psi \tag{8.5-63}$$

$$x_3 = x_1 \cdot x_2 - 6{,}25 \tag{8.5-64}$$

$$x_4 = \left(1 - \nu^2\right) \cdot \left(x_3 - 4{,}5 \cdot x_2\right) \tag{8.5-65}$$

die nachfolgend angeführten Größen und gelten nur bei $\lambda \geq 0{,}2$.

In die Gleichung für ψ darf für p nicht mehr als der jeweilige Innendruck eingesetzt werden.

Für Biegemoment M_y gilt:

$$i_{amy} = \cos\varphi + \left[\left(1{,}5 \cdot x_2 - 18{,}75\right) \cdot \cos 3\varphi + 11{,}25 \cdot \cos 5\varphi\right] / x_4 \quad (8.5\text{-}66)$$

$$i_{tby} = -\lambda \cdot \left(9 \cdot x_2 \cdot \sin 2\varphi + 225 \cdot \sin 4\varphi\right) / x_4 \quad (8.5\text{-}67)$$

Für Biegemoment M_z gilt:

$$i_{amz} = \sin\varphi + \left[\left(1{,}5 \cdot x_2 - 18{,}75\right) \cdot \sin 3\varphi + 11{,}25 \cdot \sin 5\varphi\right] / x_4 \quad (8.5\text{-}68)$$

$$i_{tbz} = \lambda \cdot \left(9 \cdot x_2 \cdot \cos 2\varphi + 225 \cdot \cos 4\varphi\right) / x_4 \quad (8.5\text{-}69)$$

$$i_{tmz} = -0{,}5 \cdot \left(d_m / r\right) \cdot \cos\varphi \cdot \left(\cos\varphi + \left[\left(0{,}5 \cdot x_2 - 6{,}25\right) \cdot \cos 3\varphi + 2{,}25 \cdot \cos 5\varphi\right] / x_4\right) \quad (8.5\text{-}70)$$

(5) Für die Einstufung der mit den hier angeführten Spannungsbeiwerten ermittelten Spannungen in die Spannungskategorien entsprechend Abschnitt 7.7.2 gilt **Tabelle 8.5-4**.

Spannungsursache	Spannungsart [1]	Spannungskategorie
Innendruck	Membranspannungen	P_m
	Biegespannungen	Q
Momente infolge äußerer Lasten	Membran- und Torsionsspannungen	P_l
	75 % der Biegespannungen	P_b
	25 % der Biegespannungen	Q
Momente infolge behinderter Wärmedehnung und Randpunktverschiebungen	Membran-, Biege- und Torsionsspannungen	Q

[1] Bezogen auf Verlauf über die Wanddicke

Tabelle 8.5-4: Spannungskategorien für Rohrbögen bei detaillierter Spannungsanalyse

8.5.2.9.3 Abzweige nach Abschnitt A 5.2.5

Für die Abzweige nach Abschnitt A 5.2.5 darf die Ermittlung der Spannungen infolge Innendruck nach Abschnitt 8.2.2.3 und der Spannungen infolge der Kräfte und Momente nach Abschnitt 8.2.2.4 erfolgen, wenn die zugehörigen geometrischen Bedingungen eingehalten sind.

8.5.2.10 Flexibilitäts- und Spannungserhöhungsfaktoren

8.5.2.10.1 Allgemeines

(1) Einzelne Rohrleitungselemente weisen unter Biegebeanspruchung durch Verformung des Rohrquerschnitts und dadurch bedingter Spannungserhöhung im Vergleich zum geraden Rohr eine erhöhte Flexibilität auf.

(2) Sofern die Systemanalyse für die Rohrleitung nach der Balkentheorie (gerader Balken mit Kreisringquerschnitt) durchgeführt wird, ist diesem erhöhten Verformungsverhalten durch Werte k größer als oder gleich 1 für die Flexibilitätsfaktoren und C größer als oder gleich 1 für die Spannungserhöhungsfaktoren Rechnung zu tragen.

(3) Torsionsmomente sowie Normal- und Querkräfte bewirken im Vergleich zum geraden Rohr keine erhöhte Flexibilität und keine erhöhte Beanspruchung.

8.5.2.10.2 Gerade Rohre

(1) Für die Ermittlung der Verformungen gerader Rohre durch Biege- und Torsionsmomente sowie Normal- und Querkräfte gilt die Balkentheorie.

(2) Für die Analyse gerader Rohre sind alle Flexibilitätsfaktoren mit k = 1 und der Spannungserhöhungsfaktor mit C = 1 anzusetzen.

8.5.2.10.3 Bögen und Biegungen

(1) Für Bögen und den Krümmungsbereich von Biegungen sind die sich nach der Balkentheorie durch Biegemomente (M_y oder M_z entsprechend **Bild 8.5-9**) ergebenden Verformungen mit den Flexibilitätsfaktoren k_y oder k_z zu multiplizieren. Dabei kann die Systemanalyse entweder mit mittleren Werten oder mit ortsabhängigen Werten für die Flexibilitätsfaktoren durchgeführt werden.

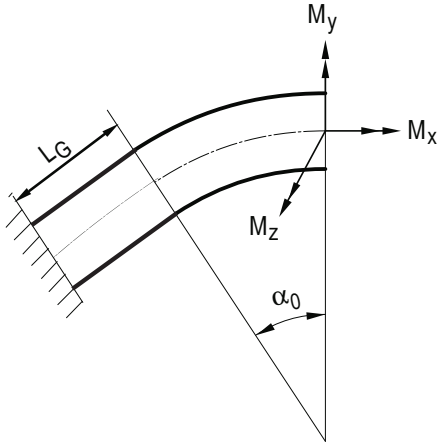


Bild 8.5-9: Definition der Momentenrichtung

(2) Für die Ermittlung der Verformungen infolge Torsionsmomente sowie Normal- und Querkräfte gilt weiterhin die Balkentheorie.

(3) Der nachfolgende Wert für den mittleren Flexibilitätsfaktor $k_m = k_y = k_z$ größer als oder gleich 1,0 gilt, sofern für die Bögen und Biegungen die folgenden Bedingungen eingehalten sind:

a) r/d_m größer als oder gleich 0,85,

b) Bogenlänge größer als oder gleich d_m,

c) weder am Krümmungsanfang noch am Krümmungsende sind Flansche oder ähnliche Versteifungen in einer Entfernung L_G kleiner als oder gleich $2 \cdot d_m$ vorhanden.

$$k_m = k_p \cdot \frac{1{,}65}{h} \text{ ; aber} \geq 1 \quad (8.5\text{-}71)$$

$$\text{mit } k_p = \frac{1}{1 + \frac{p \cdot d_m \cdot X_k}{2 \cdot E \cdot s_c}} \quad (8.5\text{-}72)$$

$$X_k = 6 \cdot \left(\frac{d_m}{2 \cdot s_c}\right)^{4/3} \cdot \left(\frac{2 \cdot r}{d_m}\right)^{1/3} \quad (8.5\text{-}73)$$

$$h = \frac{4 \cdot r \cdot s_c}{{d_m}^2} \quad (8.5\text{-}74)$$

(4) Sind Flansche oder ähnliche Versteifungen in einer Entfernung L_G kleiner als oder gleich $d_m/2$ vom Krümmungsanfang oder -ende vorhanden, ist für derartige Bögen und Biegungen $k_m = k_y = k_z = 1{,}0$ anzusetzen oder k´ gemäß **Tabelle 8.5-5** Fußnote 5 zu verwenden.

(5) Sind Flansche oder ähnliche Versteifungen in einer Entfernung L_G kleiner als oder gleich $2 \cdot d_m$ vom Krümmungsanfang oder -ende vorhanden, ist für derartige Bögen und Biegungen zwischen $k_m = k_y = k_z = 1{,}0$ oder k´ gemäß **Tabelle 8.5-5** Fußnote 5 und dem Ergebnis der Gleichung (8.5-71) in Abhängigkeit vom Verhältnis L_G/d_m linear zu interpolieren.

(6) Bei Systemanalysen mit mittleren Flexibilitätsfaktoren sind die mittleren Spannungsbeiwerte C_2 entsprechend Abschnitt 8.5.2.8.3.5 zu verwenden.

(7) Bei der Spannungsanalyse wird in den Gleichungen (8.5-1) bis (8.5-6) die Biegespannung aus einem resultierenden Moment infolge der Biege- und Torsionsmomente mit dem mittleren Spannungsbeiwert ermittelt.

(8) Die nachfolgenden Werte für die ortsabhängigen Flexibilitätsfaktoren $k_x \neq k_y \neq k_z$ gelten für die Bögen und Biegungen, die an beiden Enden gerade Rohre mit der Abmessung des Bogens aufweisen, und deren Abstand zum nächsten Bogen mindestens zweimal den Außendurchmesser beträgt:

$$k_x = 1{,}0 \tag{8.5-75}$$

$$k_y = k_p \cdot \frac{1{,}25}{h} \text{ ; aber} \geq 1 \tag{8.5-76}$$

$$k_z = k_p \cdot \frac{k_\alpha}{h} \text{ ; aber} \geq 1 \tag{8.5-77}$$

mit k_p entsprechend Gleichung (8.5-72)

h entsprechend Gleichung (8.5-74)

$k_\alpha = 1{,}65$ für $\alpha_0 \geq 180°$

$k_\alpha = 1{,}30$ für $\alpha_0 = 90°$

$k_\alpha = 1{,}10$ für $\alpha_0 = 45°$

$k_\alpha = h$ für $\alpha_0 = 0°$

Die Werte für k_z dürfen im Bereich zwischen 180° und 0° linear interpoliert werden.

(9) Bei Systemanalysen mit ortsabhängigen Flexibilitätsfaktoren dürfen nachfolgende orts- und momentabhängige Spannungsbeiwerte C_{2m} verwendet werden:

$$C_{2x} = 1{,}0 \tag{8.5-78}$$

$$C_{2y} = 1{,}71/h^{0{,}53} \quad \text{aber} \geq 1 \tag{8.5-79}$$

$$C_{2z} = 1{,}95/h^{2/3} \quad \text{für } \alpha_0 \geq 90° \tag{8.5-80}$$

$$= 1{,}75/h^{0{,}58} \quad \text{für } \alpha_0 = 45° \tag{8.5-81}$$

$$= 1{,}0 \quad \text{für } \alpha_0 = 0° \tag{8.5-82}$$

Die Werte für C_{2z} dürfen im Bereich zwischen 90° und 0° linear interpoliert werden, jedoch darf kein Wert mit α_0 kleiner als 30° verwendet werden; C_{2z} ist immer größer als oder gleich 1 anzusetzen.

(10) Sind Flansche oder ähnliche Versteifungen in einer Entfernung L_G kleiner als oder gleich $2 \cdot d_a$ vom Krümmungsanfang oder -ende vorhanden, ist für derartige Bögen und Biegungen zwischen k_y und k_z der Gleichungen (8.5-76) und (8.5-77) und $k''_{y,z}$ gemäß Absatz 11 in Abhängigkeit vom Verhältnis L_G/d_a linear zu interpolieren.

(11) Rohrbögen und Biegungen, bei denen in einer Entfernung L_G kleiner als oder gleich $d_a/2$ vom Krümmungsanfang oder -ende Flansche oder ähnliche Versteifungen vorhanden sind, müssen k_y durch k''_y und k_z durch k''_z ersetzt werden, wobei gilt:

$k''_y = c \cdot k_y$, aber ≥ 1

$k''_z = c \cdot k_z$, aber ≥ 1,

mit

$c = h^{1/6}$ bei einseitiger Versteifung und

$c = h^{1/3}$ bei beidseitiger Versteifung.

(12) Bei der Systemanalyse mit ortsabhängigen Flexibilitätsfaktoren darf bei der Spannungsanalyse in den Gleichungen (8.5-1) bis (8.5-6) die Biegespannung aus den Biege- und Torsionsmomenten mit den orts- und momentabhängigen Spannungsbeiwerten ermittelt werden. Hierzu sind die resultierenden Größen wie folgt zu ersetzen:

- statt $B_2 \cdot M_{il}$ nunmehr

$$\max\left\{1{,}0 \cdot M_{il} \,;\, 0{,}67 \cdot \sqrt{(C_{2x} \cdot M_x)^2 + (C_{2y} \cdot M_y)^2 + (C_{2z} \cdot M_z)^2}\right\} \tag{8.5-83}$$

- statt $C_2 \cdot M_{i(II\text{-}V)}$ nunmehr

$$\max\left\{1{,}5 \cdot M_{i(II-V)} \,;\, 1{,}0 \cdot \sqrt{(C_{2x} \cdot M_x)^2 + (C_{2y} \cdot M_y)^2 + (C_{2z} \cdot M_z)^2}\right\} \tag{8.5-84}$$

8.5.2.10.4 Abzweige nach Abschnitt A 5.2.5 mit $d_{Ai}/d_{Hi} \leq 0{,}5$

(1) Das Verformungsverhalten von Abzweigen nach Abschnitt A 5.2.5 kann entsprechend **Bild 8.5-10** mit folgendem Modell erfasst werden:

a) Balken in Grundrohrachsrichtung mit Grundrohrabmessung bis zum Achsenschnittpunkt,

b) starre Verbindung im Achsenschnittpunkt von Grundrohr und Abzweig,

c) starrer Balken der Länge $0{,}5 \cdot d_{Ha}$ vom Achsenschnittpunkt bis zum Schnittpunkt der Abzweigachse mit der Grundrohraußenkontur,

d) Federelement im Schnittpunkt der Abzweigachse mit der Grundrohraußenkontur.

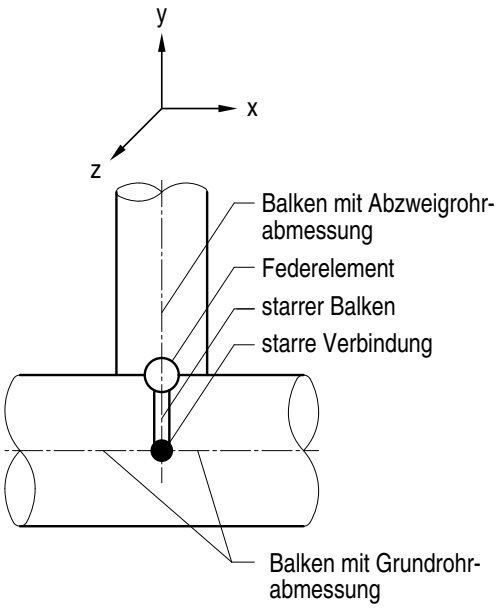


Bild 8.5-10: Modellabbildung für Abzweige

(2) Die Steifigkeiten (Momenteneinheit pro rad) des Federelementes bezüglich der Abzweigbiegemomente können näherungsweise wie folgt angesetzt werden:

a) Für Biegung um die x-Achse

$$C_x = \frac{E \cdot I_R}{k_x \cdot d_{Ra}} \text{ mit} \tag{8.5-85}$$

$$k_x = 0{,}1 \cdot \left(\frac{d_{Ha}}{s_{Hc}}\right)^{1{,}5} \cdot \left(\frac{s_{Hc}}{s_n} \cdot \frac{d_{Ra}}{d_{Ha}}\right)^{0{,}5} \cdot \frac{s_{Rc}}{s_{Hc}} \tag{8.5-86}$$

b) Für Biegung um die z-Achse

$$C_z = \frac{E \cdot I_R}{k_z \cdot d_{Ra}} \text{ mit} \tag{8.5-87}$$

$$k_z = 0{,}2 \cdot \frac{d_{Ha}}{s_{Hc}} \cdot \left(\frac{s_{Hc}}{s_n} \cdot \frac{d_{Ra}}{d_{Ha}}\right)^{0{,}5} \cdot \frac{s_{Rc}}{s_{Hc}} \tag{8.5-88}$$

Für die Bezeichnungen gilt **Bild 8.5-7** mit den zusätzlichen Definitionen

I_R : Trägheitsmoment des abzweigenden Rohres,

$$I_R = \pi \cdot \left(d_{Ra}{}^4 - d_{Ri}{}^4\right) / 64 \tag{8.5-89}$$

s_n : Rechenwert für Stutzenwanddicke, und zwar:

Für Ausführung (a) und (b) von **Bild 8.5-7**:

$s_n = s_{Ac}$, wenn $L_1 \geq 0{,}5 \cdot \sqrt{(d_{Ai} + s_A) \cdot s_A}$

$s_n = s_{Rc}$, wenn $L_1 < 0{,}5 \cdot \sqrt{(d_{Ai} + s_A) \cdot s_A}$

Für Ausführung (c) von **Bild 8.5-7**:

$s_n = s_{Rc} + (2/3) \cdot y$, wenn $\alpha \leq 30°$

$s_n = s_{Rc} + 0{,}385 \cdot L_1$, wenn $\alpha > 30°$

Für Ausführung (d) von **Bild 8.5-7**:

$s_n = s_{Rc}$

(3) Bezüglich der Torsions-, Normalkraft- und Querkraftverformung ist das Federelement als starr zu betrachten.

8.5.2.10.5 Abzweige mit $d_{Ai}/d_{Hi} > 0{,}5$ und Einschweiß-T-Stücke

Abzweige mit $d_{Ai}/d_{Hi} > 0{,}5$ und Einschweiß-T-Stücke sind ebenfalls nach Abschnitt 8.5.2.10.4 und **Bild 8.5-10** zu modellieren, jedoch unter Wegfall des Federelementes.

8.5.3 Rohrleitungen der Prüfgruppen A2 und A3

8.5.3.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt 8.5.3

Formelzeichen	Berechnungsgrößen	Einheit
c_2	Wanddickenminderung infolge chemischer oder mechanischer Abnutzung	mm
d_a	Außendurchmesser des Rohres	mm
d_i	Innendurchmesser des Rohres	mm
d_{in}	Nenninnendurchmesser des Rohres	mm
d_m	mittlerer Durchmesser	mm
d_{Am}	mittlerer Durchmesser des Abzweiges	mm
d_{Rm}	mittlerer Durchmesser des Abzweigrohres	mm
f	Reduktionsfaktor der Vergleichsspannungsschwingbreite bei Wechselbelastung gemäß Tabelle 8.5-5	—
h	Formfaktor aus Tabelle 8.5-5	—
i	Spannungsfaktor gemäß Tabelle 8.5-5	—
k	Flexibilitätsfaktor	—
l	Länge des Segmentes	mm
p	Auslegungsdruck	MPa
p_{max}	höchster Betriebsdruck	MPa
r	Radius	mm
r_1,r_2,r_3	Übergangsradien gemäß Tabelle 8.5-5	mm
s	Wanddicke	mm
s_1	Wanddicke am weiten Ende des Reduzierstückes	mm
s_2	Wanddicke des konischen Teils des Reduzierstückes	mm
s_3	Wanddicke am engen Ende des Reduzierstückes	mm
s_x,s_{x1}, s_{x2}	Wanddicke gemäß Tabelle 8.5-5	mm
s_A	Wanddicke des Abzweiges	mm
s_R	Wanddicke des Abzweigrohres	mm
s_c	Wanddicke ohne Plattierung gemäß Abschnitt 7.1.4 oder gemessene Wanddicke abzüglich Korrosionszuschlag c_2 (siehe Abschnitt 6.4) und Plattierung Bei Rohrbiegungen mit Wanddickenerhöhung an der Krümmungsinnenseite von mehr als 15 % ist die Aufstauchung zu berücksichtigen, z. B. indem als Berechnungswanddicke s_c das arithmetische Mittel und bei Induktivbiegungen das geometrische Mittel aus der kleinsten und größten am Querschnitt in der Bogenmitte auftretenden Wanddicke verwendet wird. Bei Induktivbiegungen, die die Vorgaben an die Abmessungen nach KTA 3211.3 Abschnitt 9.3.3.4 (5) a) einhalten (Standardinduktivbiegung), sind die Festlegungen in Abschnitt 8.5.1 (6) zu berücksichtigen.	mm
y	allgemeine Rechengröße	—
B_1	Primärspannungsbeiwert für Innendruckbelastung (siehe Abschnitt 8.5.2.8)	—
B_2	Primärspannungsbeiwert für Momentenbelastung (siehe Abschnitt 8.5.2.8)	—
C_2	Primär- plus Sekundärspannungsbeiwert infolge Momentenbelastung	—
E_{20}	Elastizitätsmodul bei 20 °C	N/mm²
E	Elastizitätsmodul bei Temperatur	N/mm²
K_2	Spitzenspannungsbeiwert für Momentenbelastung	—
M_{il}	resultierende Moment, verursacht durch Eigengewicht und andere ständige Lasten	Nmm
M_{ill}	resultierendes Moment aus gelegentlich auftretenden Lasten wie Druckstoß, Erdbeben, Flugzeugabsturz usw.	Nmm
M_{illl}	Momentenschwingbreite aus dem Lastfall „behinderte Wärmedehnung“	Nmm
M_{ilV}	resultierendes Moment infolge einer einmaligen Randpunktbewegung	Nmm
N	Anzahl der Lastwechsel bezogen auf die maximale Momentenschwingbreite	—
N_0	Anzahl der Lastwechsel für die maximale Temperaturdifferenz	—
N_1,N_2, bis N_n	Anzahl der Lastwechsel mit kleineren Temperaturdifferenzen als bei N_0	—
P_l	örtliche primäre Membranspannung	N/mm²
P_m	allgemeine primäre Membranspannung	N/mm²
Q	sekundäre Membran- oder Biegespannung	N/mm²
S	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1	N/mm²
S_{RT}	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1 bei Raumtemperatur	N/mm²
S_A	zulässige Vergleichsspannungsschwingbreite für Wärmedehnungsspannungen (siehe Abschnitt 8.5.3.7)	N/mm²
W	Widerstandsmoment	mm³
α	Winkel gemäß Tabelle 8.5-5	
δ	zulässiger mittlerer Versatz an Stumpfnähten gemäß Tabelle 8.5-5	mm
σ_I	Vergleichsspannung aus primären Spannungen entsprechend Abschnitt 8.5.3.3	N/mm2
σ_{II}	Vergleichsspannung aus primären Spannungen entsprechend Abschnitt 8.5.3.4	N/mm²

Formel-zeichen	Berechnungsgrößen	Einheit
σ_{III}	Vergleichsspannung aus behinderter Wärmedehnung	N/mm²
σ_{IV}	Vergleichsspannung infolge einmaliger Randpunktbewegung	N/mm²
σ_V	Vergleichspannung durch Innendruck, Eigengewicht, andere ständige Lasten und behinderte Wärmedehnung	N/mm²

8.5.3.2 Allgemeines

Beim komponentenspezifischen Verfahren gemäß diesem Abschnitt ist bezüglich der Einstufung von Spannungen aus behinderten Wärmedehnungen der Abschnitt 7.7.2.3 zu beachten.

Hinweis:
Die in Abschnitt 8.5 als Vergleichsspannung oder Vergleichsspannungsschwingbreite gekennzeichneten Spannungsgrößen σ_I - σ_V entsprechen nicht exakt den betreffenden Definitionen des Abschnittes 7.7.3, sondern stellen konservative Abschätzungen der jeweiligen Vergleichsspannung oder Vergleichsspannungsschwingbreite dar.

8.5.3.3 Auslegungsstufe (Stufe 0)

Für die Ermittlung und Begrenzung der Vergleichsspannung aus primären Spannungen gilt, außer bei einem einzelnen geraden Rohr, folgende Bedingung:

$$\sigma_I = B_1 \cdot \frac{d_a \cdot p}{2 \cdot s_c} + B_2 \frac{M_{il}}{W} \le 1{,}5 \cdot S \qquad (8.5\text{-}90)$$

σ_I	Vergleichspannung aus primären Spannungen	N/mm²
B_1, B_2	Spannungsbeiwerte, siehe Abschnitt 8.5.2.8	N/mm²
S	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1	N/mm²
p	Auslegungsdruck	MPa
d_a	Außendurchmesser des Rohres gegebenenfalls $d_a = d_{in} + 2 \cdot s_c + 2 \cdot c_2$, siehe Abschnitt 6.5	mm
s_c	Wanddicke ohne Plattierung gemäß Abschnitt 7.1.4 oder gemessene Wanddicke abzüglich Korrosionszuschlag c_2 (siehe Abschnitt 6.4) und Plattierung. Bei Rohrbiegungen mit Wanddickenerhöhung an der Krümmungsinnenseite von mehr als 15 % ist die Aufstauchung zu berücksichtigen z. B. indem als Berechnungswanddicke s_c das arithmetische Mittel und bei Induktivbiegungen das geometrische Mittel aus der kleinsten und größten am Querschnitt in der Bogenmitte auftretenden Wanddicke verwendet wird. Bei Induktivbiegungen, die die Vorgaben an die Abmessungen nach KTA 3211.3 Abschnitt 9.3.3.4 (5) a) einhalten (Standardinduktivbiegung), sind die Festlegungen in Abschnitt 8.5.1 (6) zu berücksichtigen.	mm
W	Widerstandsmoment des Rohres	mm³
M_{il}	Resultierendes Moment, verursacht durch Eigengewicht und andere ständige Lasten. In einer Kombination von Einzelbelastungen sind alle Schnittmomente richtungsgebunden zu ermitteln und zu addieren, bevor das resultierendes Moment gebildet wird (Momente aus unterschiedlichen Lastfällen, die nicht gleichzeitig auftreten können, brauchen hierbei nicht gemeinsam in das resultierende Moment mit einbezogen zu werden). Lässt die Methode zur Ermittlung von Momenten aus dynamischer Beanspruchung nur zu, Größen ohne algebraisches Vorzeichen zu ermitteln, so ist diejenige Kombination von richtungsgebunden Momenten zu wählen, die das größte resultierende Moment ergibt.	N/mm²

8.5.3.4 Stufen A und B

8.5.3.4.1 Allgemeines

Für jeden Lastfall müssen Schnittmomente ermittelt werden, die immer auf einen Referenzzustand bezogen sind.

8.5.3.4.2 Ermittlung und Begrenzung der Vergleichsspannung aus primären Spannungen

Für die Ermittlung der Vergleichsspannung aus der Belastung durch Innendruck, Eigengewicht, andere ständige und gelegentliche Lasten einschließlich Einwirkungen von außen gilt folgende Bedingung:

$$\sigma_{II} = B_1 \cdot \frac{d_a \cdot p_{max}}{2 \cdot s_c} + B_2 \cdot \frac{M_{il} + M_{ill}}{W} \le 1{,}8 \cdot S \qquad (8.5\text{-}91)$$

jedoch nicht größer als $1{,}5 \cdot R_{p0,2T}$

σ_{II}	Vergleichspannung aus primären Spannungen	N/mm²
S	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1 bei der zugehörigen Temperatur T	N/mm²
p_{max}	Höchster Betriebsdruck	MPa
M_{ill}	resultierendes Moment aus gelegentlich auftretenden Lasten wie: Druckstoß, Erdbeben, Flugzeugabsturz usw. Bei dynamischer Belastung ist die halbe Schwingbreite einzusetzen. Belastungen aus dynamischen Randpunktbewegungen dürfen hier weggelassen werden, müssen dann aber in Gleichung (8.5-92) und (8.5-94) berücksichtigt werden.	N/mm²

Alle anderen Bezeichnungen wie unter 8.5.3.3

8.5.3.4.3 Ermittlung und Begrenzung der Vergleichsspannungsschwingbreite aus sekundären Spannungen

(1) Gleichung (8.5-92) oder Gleichung (8.5-94) muss erfüllt sein.

a) Behinderte Wärmedehnung

$$\sigma_{III} = i \cdot \frac{M_{iIII}}{W} \le S_A \qquad (8.5\text{-}92)$$

σ_{III}	Vergleichsspannung aus behinderter Wärmedehnung	N/mm²

M_{iIII} Momentenschwingbreite aus dem Lastfall „behinderte Wärmedehnung“ Wenn der Lastfall „dynamische Randpunktbewegung“ in Gleichung (8.5-91) vernachlässigt wurde, ist die Momentenschwingbreite hier ebenfalls einzusetzen. Nmm

S_A Zulässige Vergleichsspannungsschwingbreite, siehe Abschnitt 8.5.3.7, für Wärmedehnungsspannungen N/mm^2

i Spannungsfaktor gemäß **Tabelle 8.5-5** —

b) Einmalige Randpunktbewegung (z. B. Gebäudesetzung)

$$\sigma_{IV} = i \cdot \frac{M_{iIV}}{W} \le 3{,}0 \cdot S \qquad (8.5\text{-}93)$$

M_{iIV} Resultierendes Moment infolge einer einmaligen Randpunktbewegung Nmm

S Spannungsvergleichswert bezogen auf Raumtemperatur N/mm^2

i Spannungsfaktor gemäß **Tabelle 8.5-5** —

c) Die Beanspruchungen durch Innendruck, Eigengewicht, andere ständige Lasten und behinderte Wärmedehnung sollen die folgende Gleichung erfüllen:

$$\sigma_V = \frac{p \cdot d_a}{4 \cdot s_c} + 0{,}75 \cdot i \cdot \frac{M_{iI}}{W} + i \cdot \frac{M_{iIII}}{W} \le S + S_A \qquad (8.5\text{-}94)$$

i Spannungsfaktor gemäß **Tabelle 8.5-5** —

Das Produkt 0,75 · i darf nicht kleiner als 1,0 sein.

(2) Wenn Gleichung (8.5-92) und (8.5-93) eingehalten sind, braucht Gleichung (8.5-94) nicht mehr nachgewiesen zu werden.

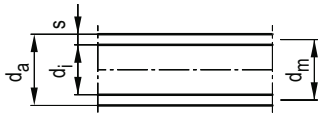
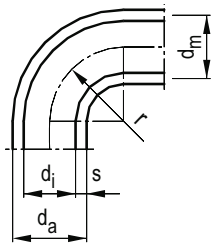
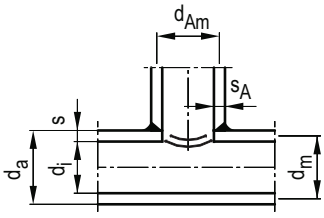
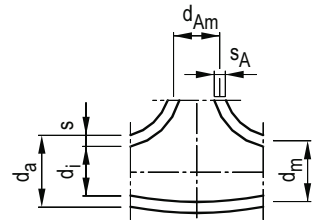
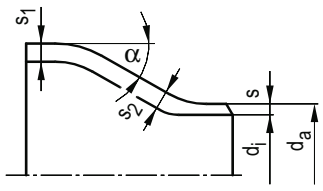
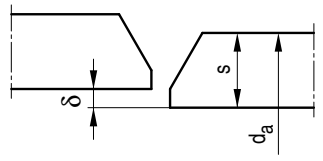
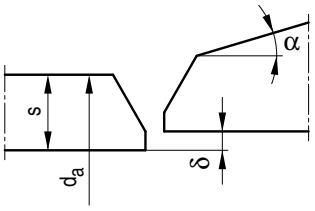
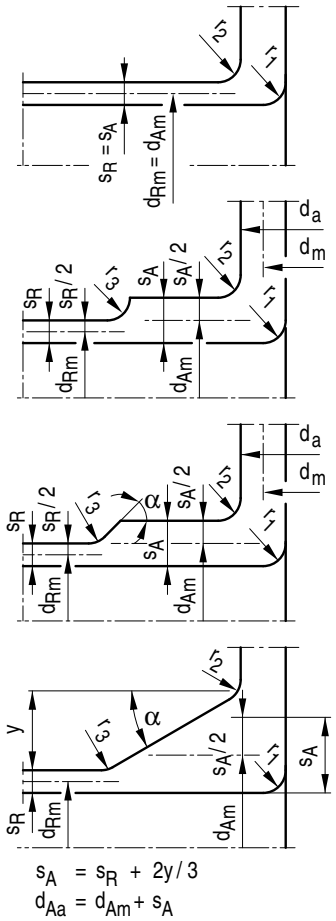
Bezeichnung	Skizze	Formfaktor h und Formbedingungen [1]	Flexibilitätsfaktor k (k ≥ 1) [2]	Spannungsfaktor i (i ≥ 1) [3]	Widerstandsmoment [4]
1. Gerades Rohr		—	1	1	$\frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_a^4 - d_i^4}{d_a}$
2. Glattrohrbogen [5]		$\frac{4 \cdot r \cdot s}{d_m^2}$	$\frac{1{,}65}{h}$	$\frac{0{,}9}{h^{2/3}}$	
3. T-Stück mit aufgeschweißtem, eingeschweißtem oder ausgehalstem Stutzen		$\frac{2 \cdot s}{d_m}$	1	$\frac{0{,}9}{h^{2/3}}$ min. 2,1	für Grundrohr: $\frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_a^4 - d_i^4}{d_a}$ für Stutzen: $\frac{\pi}{4} \cdot d_{Am}^2 \cdot s_x$ mit s_x als kleinerem Wert von $s_{x1} = s$ und $s_{x2} = i \cdot s_A$
4. gepresstes Einschweiß-T-Stück mit s und s_A als Anschlusswanddicken		$\frac{8{,}8 \cdot s}{d_m}$	1	$\frac{0{,}9}{h^{2/3}}$	
5. Reduzierung		Formbedingungen $\alpha \le 60$ grd $s \ge d_a/100$ $s_2 \ge s_1$	1	$0{,}5 + \frac{\alpha}{100} \cdot \sqrt{\frac{d_a}{s}}$ max 2,0 (α in grd)	$\frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_a^4 - d_i^4}{d_a}$
6. Stumpfnaht		$s \ge 5$ mm und $\delta \le 0{,}1 \cdot s$	1	1,0	$\frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_a^4 - d_i^4}{d_a}$
		$s < 5$ mm oder $\delta > 0{,}1 \cdot s$	1	bearbeitet: 1,0 unbearbeitet: 1,8	

Tabelle 8.5-5: Form-, Flexibilitäts-, Spannungsfaktoren und Widerstandsmomente (Fortsetzung siehe Folgeseite)

Bezeichnung	Skizze	Formfaktor h und Formbedingungen [1]	Flexibilitätsfaktor k ($k \geq 1$) [2]	Spannungsfaktor i ($i \geq 1$) [3]	Widerstandsmoment [4]
7. Wanddickenübergang		$\alpha \leq 30°$	1	$1{,}3 + 0{,}0036 \cdot \frac{d_a}{s} + 3{,}6 \cdot \frac{\delta}{s}$ max. 1,9	
8. T-Stück mit besonderen Formbedingungen [6]	 $s_A = s_R + 2y/3$ $d_{Aa} = d_{Am} + s_A$	$\frac{d_{Rm}}{d_m} \leq 0{,}5$ [7] $\frac{d_m}{s} \leq 100$ $0{,}1 \cdot s \leq r_1 \leq 0{,}5 \cdot s$ $r_2 \geq \max\left\{\frac{s_A}{2}, \frac{s}{2}, \frac{s_R + y}{2}\right\}$ $\alpha \leq 45°$ $r_3 \geq \max\left\{\alpha \cdot \frac{d_{Rm} + s_R}{500}, 2\sin^3\alpha \cdot (d_{Am} + s_A - d_{Rm} - s_R)\right\}$ Bei Stutzen unter DN 100 entfallen obige Bedingungen für r_1. Bei Bedingungen für r_3 ist α in grd einzusetzen.	1	für Grundrohr [7]: $i = 0{,}4 \cdot \left(\frac{d_m}{2 \cdot s}\right)^{2/3} \cdot \frac{d_{Rm}}{d_m}$ mindestens aber $i = 1{,}5$ für Stutzen: $i = 1{,}5 \cdot \left(\frac{d_m}{2 \cdot s}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{d_{Rm}}{d_m}\right)^{1/2} \cdot \frac{S_R}{s} \cdot \frac{d_{Rm}}{d_{Am} + s_A}$	für Grundrohr [7]: $\frac{\pi}{4} \cdot d_m^2 \cdot s$ für Stutzen: $\frac{\pi}{4} \cdot d_{Rm}^2 \cdot s_R$

[1] Die bei der Systemanalyse zu verwendenden Flexibilitätsfaktoren k und die bei der Spannungsermittlung zu verwendenden Spannungsfaktoren i sind von dem Formfaktor h abhängig und gelten nur bei Einhaltung der angeführten Formbedingungen.

[2] Der Flexibilitätsfaktor k gibt an, wie sich die wirkliche Verformung eines Rohrleitungsbauteils durch Biegemomente zu derjenigen Verformung verhält, die sich nach der Biegetheorie des geraden oder schwach gekrümmten Balkens ergeben würde. In keinem Fall ist k kleiner als 1 anzusetzen. In **Tabelle 8.5-5** sind lediglich für Rohrbogen von 1 abweichende k-Werte angegeben. Diese sind über die jeweilige Bogenlänge für biegende Verformung in der Krümmungsebene und aus der Krümmungsebene heraus anzusetzen. Für Torsions-, Normalkraft- und Querkraftverformung gilt jedoch weiterhin die normale Balkentheorie. Die örtliche Nachgiebigkeit der Stutzenanschlüsse an T-Stücken kann bei entsprechendem Nachweis durch innere Federelemente am Anfang des abzweigenden Stranges erfasst werden.

[3] Der Spannungsfaktor i korrigiert die sich für ein gerades Rohr aus Momentenbelastung ergebende Vergleichsspannung auf bauteilbezogene Werte zum Vergleich mit den in den Abschnitten 8.5.3.3 bis 8.5.3.6 angeführten Spannungsgrenzen. In keinem Fall ist i kleiner als 1 anzusetzen. Voraussetzung für die Anwendung der Spannungsfaktoren i ist die ausreichende Dimensionierung der Bauteile nach Abschnitt A5.

[4] Hier sind die in Verbindung mit dem Spannungsfaktor i zu verwendenden Widerstandsmomente W angeführt.

[5] Für Rohrbögen, die in einem kleineren Abstand als $d_m/2$ vom Krümmungsbeginn oder -ende durch einen Flansch oder ähnliches versteift sind, müssen k und i durch $k' = c \cdot k$ und $i' = c \cdot i$ ersetzt werden. Dabei gilt: $c = h^{1/6}$ bei einseitiger Versteifung; $c = h^{1/3}$ bei beidseitiger Versteifung sowie $k', i' \geq 1$.

[6] Es sind vier verschiedene Stutzenformen dargestellt (a, b, c, d), siehe **Bild 8.5-7**.

[7] Werden die Bedingungen für r_2 nicht eingehalten, dann ist für Grundrohr und Stutzen mit dem doppelten sich nach den Formeln ergebenden Spannungsfaktor, mindestens jedoch mit i = 2,1 zu rechnen.

Tabelle 8.5-5: Form-, Flexibilitäts-, Spannungsfaktoren und Widerstandsmomente (Fortsetzung)

8.5.3.5 Stufe C

(1) Bei der Stufe C werden die primären Spannungen nach der Gleichung (8.5-91) ermittelt.

Belastungen aus dynamischen Randpunktbewegungen infolge Erdbeben und aus anderen sekundären Einflussgrößen brauchen in der Berechnung nicht berücksichtigt zu werden.

(2) Für die Gleichung (8.5-91) gilt ein zulässiger Spannungsvergleichswert von $2{,}25 \cdot S$, der aber nicht größer als $1{,}8 \cdot R_{p0,2T}$ sein darf.

8.5.3.6 Stufe D

(1) Bei der Stufe D werden die primären Spannungen nach der Gleichung (8.5-91) ermittelt.

Belastungen aus dynamischen Randpunktbewegungen infolge Erdbeben und aus anderen sekundären Einflussgrößen brauchen in der Berechnung nicht berücksichtigt zu werden.

(2) Für die Gleichung (8.5-91) gilt ein zulässiger Spannungsvergleichswert von $3{,}0 \cdot S$, der nicht größer als $2{,}0 \cdot R_{p0,2T}$ sein darf.

8.5.3.7 Bestimmung der zulässigen Vergleichsspannungsschwingbreite S_A

(1) Die zulässige Vergleichsspannungsschwingbreite ist

$$S_A = f \cdot \left(1{,}25 \cdot S_{RT} + 0{,}25 \cdot S\right) \qquad (8.5\text{-}95)$$

f Reduktionsfaktor der Vergleichsspannungsschwingbreite bei Wechselbelastung.

f bezieht sich auf die gesamte Anzahl der Lastwechsel mit maximaler Momentenschwingbreite über die gesamte erwartete Betriebszeit der Rohrleitung.

f ist folgender Tabelle zu entnehmen:

N				f
		bis	7 000	1,0
über	7 000	bis	14 000	0,9
über	14 000	bis	22 000	0,8
über	22 000	bis	45 000	0,7
über	45 000	bis	100 000	0,6
über	100 000			0,5

N : Anzahl der Lastwechsel bezogen auf die maximale Momentenschwingbreite

Treten Lastwechsel mit kleinerer Temperaturdifferenz auf, so errechnet sich N wie folgt:

$$N = N_0 + \left(\frac{M_{1III}}{M_{0III}}\right)^5 \cdot N_1 + \left(\frac{M_{2III}}{M_{0III}}\right)^5 \cdot N_2 + .. + \left(\frac{M_{nIII}}{M_{0III}}\right)^5 \cdot N_n \qquad (8.5\text{-}96)$$

N_0 Anzahl der Lastwechsel für die maximale Temperaturdifferenz

$N_1, N_2, ...,N_n$ Anzahl der Lastwechsel mit kleineren Temperaturdifferenzen als bei N_0

(2) Der Reduktionsfaktor f gilt für korrosionsfreien Betrieb und für korrosionsfeste Werkstoffe.

8.5.3.8 Systemanalyse

(1) Anforderungen an die Systemanalyse sind Abschnitt 7.6 zu entnehmen.

(2) Für Rohrleitungssysteme gilt im Besonderen:

a) In der System-Geometrie sind alle Komponenten und Bauteile, die das Verhalten des Systems wesentlich beeinflussen, zu erfassen. Die Stützbedingungen der Halterungen sind zu berücksichtigen.

b) Flexibilitätsfaktoren und Spannungsbeiwerte sind **Tabelle 8.5-5** zu entnehmen. Für Komponenten, die nicht in Tabelle 8.5-5 aufgeführt sind, können die Spannungsbeiwerte folgendermaßen errechnet werden:

$$i = \frac{C_2 \cdot K_2}{2} \qquad (8.5\text{-}97)$$

Hierin bedeuten C_2 und K_2 die Spannungsbeiwerte für Komponenten, die in **Tabelle 8.5-1** enthalten sind.

c) Vereinfachende Annahmen dürfen gemacht werden, wenn sichergestellt ist, dass dadurch Kräfte, Momente und Spannungen nicht unterschätzt werden.

d) Die Abmessungen von Rohren und Rohrleitungsbauteilen sollten die mittlere Wanddicke s_c (siehe Abschnitt 7.1.4) berücksichtigen.

e) Vorspannung

Wird eine Rohrleitung vorgespannt, dann ist die Wirkung der Vorspannung prinzipiell für alle Lastfälle, immer jedoch für den Montageendzustand und die normalen Betriebsfälle zu untersuchen. Dabei ist zu beachten:

- Die Vorspannung hat keinen Einfluss auf die Größe der Spannungsschwingbreite σ_{III} nach Abschnitt 8.5.3.4.3.
- die für den Vorspannzustand mit E_{20} ermittelten Vorspannlasten ändern sich für die Betriebsfälle im Verhältnis E_ϑ / E_{20}.

Soll der Einfluss der Vorspannung rechnerisch möglichst genau gefasst werden, dann muss der Berechnungsablauf dem Montageablauf entsprechen. Dazu ist jeder Montagevorgang zu erfassen, der Verformungen und damit Spannungen im Gesamtsystem oder auch anfangs nur in Teilsystemen hervorruft. Dabei sind zu beachten:

- Ort der kraftschlüssigen Verbindungen,
- Größe und Richtung der Klaffungen,
- Einleitungsstellen, Richtung, Größe und Art der die Vorspannung erzeugenden Lasten (Kräfte, Eigengewicht),
- Bewegungen der noch freien Enden.

Näherungsweise kann die Berechnung der Vorspannung durch Ansetzen von Vorspannbeträgen oder negativen Prozentanteilen der Wärmedehnung einschließlich zugehöriger Anschlussbewegung auf das geschlossen gedachte Gesamtsystem erfolgen.

Wegen der sich dabei ergebenden Ungenauigkeiten dürfen die entlastenden Wirkungen der Vorspannung dann nur mit 2/3 ihrer Größe berücksichtigt werden (z. B. im Volllastbetrieb). Die belastenden Wirkungen sind jedoch in voller Größe anzusetzen (z. B. im Montageendzustand).

8.5.3.9 Örtliche Überdehnung

Bei der Systemanalyse von Rohrleitungen gemäß Abschnitt 8.5 wird elastisches Verhalten des gesamten Systems vorausgesetzt. Diese Annahme ist auch noch erlaubt bei Systemen, in denen an vielen Stellen oder in großen Bereichen (z. B. infolge von $P_m + Q$ oder $P_l + Q$ größer gleich $3 \cdot S_m$) plastische Verformungen auftreten. Sie ist jedoch nicht mehr zutreffend, wenn nur kleine Bereiche plastische Verformungen erfahren.

Dies ist z. B. der Fall

a) wenn kurze, relativ hoch beanspruchte Rohrleitungen an steiferen bzw. größeren Leitungen angehängt sind,

b) bei einer lokal begrenzten Reduktion des Rohrquerschnittes oder lokal begrenzter Verwendung eines weicheren Werkstoffs,

c) in Rohrleitungssystemen mit konstanten Abmessungen und Werkstoffen, wenn diese Systeme im Wesentlichen

gestreckt verlegt sind, so dass zur Kompensation der Ausdehnungen entlang der Rohrachse nur wenige kurze Dehnschenkel zur Verfügung stehen.

In diesen Fällen können sich an Stellen geringerer Steifigkeit oder höherer Beanspruchung unzulässige Dehnungskonzentrationen (elastic follow up) ergeben. Derartige Dehnungskonzentrationen können durch geeignete Rohrleitungsführung mit entsprechendem Abstützkonzept bei Berücksichtigung der oben genannten Punkte vermieden werden. Als unterstützende Maßnahmen können an Stellen möglicher Dehnungskonzentration höherfeste Werkstoffe sowie gegebenenfalls Federn zur Entlastung eingesetzt werden. Die Maßnahmen zur Vermeidung von Dehnungskonzentrationen sind insbesondere wichtig für austenitische Rohrleitungen wegen ihres nichtlinearen Spannungs-Dehnungsverhaltens.

Hinweis:
Literatur zum Problem des „elastic follow up“ siehe z. B. F.V. Naugle „Design Guidance for Elastic Follow up“ Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME Vol. 106, No. 1 February 1984.

8.5.3.10 Bestimmung der resultierenden Momente

Die resultierenden Momente M_{iI} bis M_{iIV} in den Gleichungen (8.5-91) bis (8.5-94) errechnen sich aus der Wurzel der Quadratensumme der einzelnen Momentenkomponenten.

$$M_i = \sqrt{M_{xi}^2 + M_{yi}^2 + M_{zi}^2} \qquad (8.5\text{-}98)$$

Bei T-Stücken sind die resultierenden Momente für Grundrohr und Stutzen jeweils für sich zu bestimmen. Die Momente werden auf den Schnittpunkt der Rohrachsen bezogen (siehe **Bild 8.5-11**).

Bei T-Stücken mit einem Durchmesserverhältnis $d_{Rm}^+/d_{Hm} < 0{,}5$ kann das Stutzenmoment auf die äußere Oberfläche des Grundrohres bezogen werden.

Alle weiteren Bezeichnungen siehe **Bild 8.5-11**.

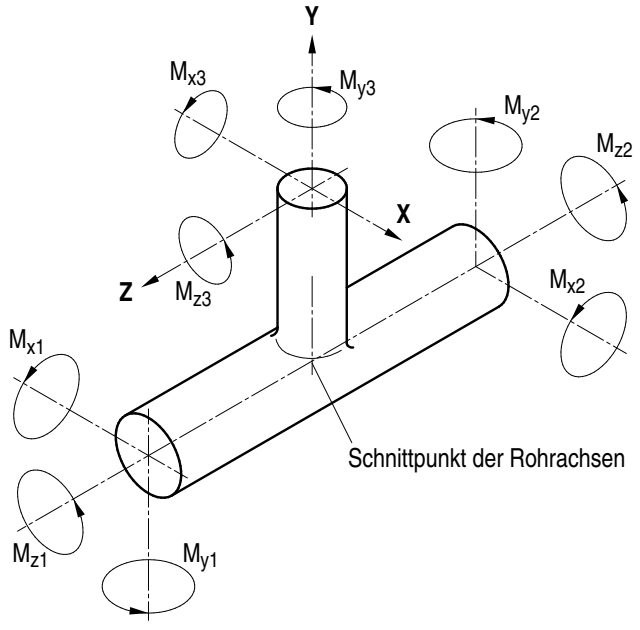


Bild 8.5-11: Momente am T-Stück

8.6 Integrale Bereiche von Komponentenstützkonstruktionen

8.6.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt gilt für die Berechnung der integralen Bereiche von Komponentenstützkonstruktionen.

Komponentenstützkonstruktionen sind Konstruktionen zur Lastabtragung. Die integralen Bereiche von Komponentenstützkonstruktionen sind an die druckführende Fläche angeschweißt, angeschmiedet, angegossen oder aus dem Vollen gearbeitet. Deshalb steht der unmittelbar an die Wand der Komponente angrenzende Teil der Komponentenstützkonstruktion in Wechselwirkung mit der Komponente (Einflussbereich).

8.6.2 Abgrenzung

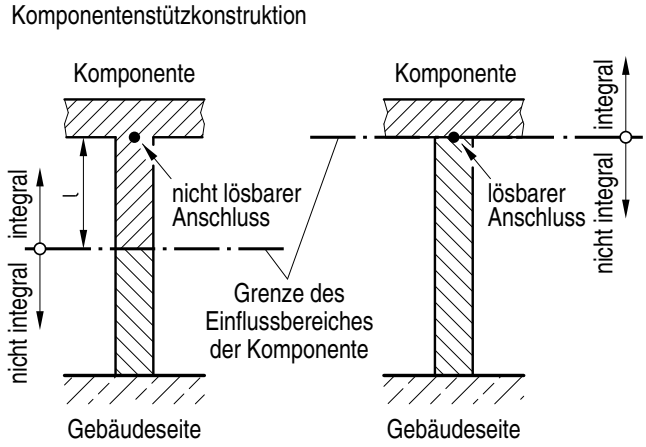
(1) Die Abgrenzung des integralen Bereichs der Komponentenstützkonstruktionen ist im **Bild 8.6-1** dargestellt. Der Abstand l wird wie folgt berechnet:

a) Schalen (z. B. Zargen, rohrförmige Stutzen)

$$l = 0{,}5 \cdot (r \cdot s_c)^{1/2} \qquad (8.6\text{-}1)$$

r mittlerer Radius der Komponentenstützkonstruktionsschale

s_c Dicke der Komponentenstützkonstruktionsschale gemäß Abschnitt 7.1.4



l : Abklinglänge

Bild 8.6-1: Anschlussarten der Komponentenstützkonstruktion

b) Stangen oder Profile

$$l = \frac{0{,}5 \cdot r}{\sqrt{2}} \qquad (8.6\text{-}2)$$

r Radius der Stange oder die Hälfte der größten Querschnittsdimension des Profils

c) Andere Formen

$$l = 0{,}5 \cdot (r \cdot s_c)^{1/2} \qquad (8.6\text{-}3)$$

r Hälfte der größten Abmessung eines Flansches, T-Profils, Blechs oder Rundprofils oder Hälfte der größten Schenkelbreite eines Winkelprofils

s_c Flanschdicke von Profilen oder Blechdicke gemäß Abschnitt 7.1.4

(2) Befindet sich jedoch innerhalb des Abstands l ein lösbarer Anschluss, so ist an dieser Stelle die Grenze zwischen dem integralen und nichtintegralen Bereich der Komponentenstützkonstruktion anzusetzen.

8.6.3 Berechnung

(1) Integrale Bereiche von Komponentenstützkonstruktionen sind als Teil der zu unterstützenden Komponente anzusehen. Es sind sämtliche gleichzeitig auftretende Belastungen zu berücksichtigen. Für die Komponentenstützkonstruktionen sind folgende Kräfte und Momente zu ermitteln:

a) Normalkraft F_N,

b) Querkraft F_Q,

c) Torsionsmomente M_t,

d) Biegemomente M_b,

(2) Der Einfluss der äußeren Kräfte und Momente auf die Wandung der Komponente ist nach Abschnitt 7 oder für Behälter nach Abschnitt 8.2.7 zu berücksichtigen.

(3) Die Beurteilung der Spannungen ist dem entsprechend nach Abschnitt 7 oder für Behälter nach Abschnitt 8.2.7 vorzunehmen. Das Stabilitätsverhalten ist zu überprüfen.

9 Art und Umfang der vorzulegenden Festigkeitsnachweise und zugehörige Unterlagen

(1) Für die Prüfung durch den Sachverständigen nach § 20 AtG sind folgende Festigkeitsnachweise für die druck- und aktivitätsführenden Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises zu erstellen und in Form eines Berichtes einzureichen:

a) Dimensionierung für A1-, A2- und A3-Komponenten,

b) Analyse des mechanischen Verhaltens für A1-Komponenten.

(2) Bei Berechnung, Bericht und Prüfung sind die einschlägigen Abschnitte der Teile von KTA 3211 zugrunde zu legen.

(3) Jeder Bericht über eine Berechnung soll die nachfolgenden Angaben in dem Umfang enthalten, wie dies zur Prüfung der Festigkeitsnachweise notwendig ist:

a) Erläuterung der Vorgehensweise bei der Berechnung, insbesondere Erläuterung getroffener Annahmen,

b) Angabe der Berechnungsverfahren, der theoretischen Grundlagen und der verwendeten Programme,

c) Belastungsdaten, Lastkombinationen sowie deren Klassifizierung,

d) Geometrische Daten,

e) Verwendete Werkstoffkennwerte,

f) Eingabedaten,

g) Ergebnisse einschließlich der Angabe des Erschöpfungsgrades,

h) Beurteilung der Ergebnisse und Vergleich mit zulässigen Werten,

i) Folgerungen aus den Ergebnissen,

j) Referenzen, Literaturhinweise, Quellenangaben.

Anhang A

Dimensionierung

A 1 Allgemeines

(1) Die nachstehenden Berechnungsregeln gelten für die Dimensionierung der Komponenten und ihrer Bauteile gemäß Abschnitt 6 unter Auslegungsdruck und zusätzlichen Auslegungslasten bei Auslegungstemperatur.

(2) Für die Spannungsbegrenzung ist in der Prüfgruppe A1 der Spannungsvergleichswert S_m und in den Prüfgruppen A2 und A3 der Spannungsvergleichswert S maßgebend (siehe **Tabelle 6.6-1**).

(3) In den Gleichungen ist aus Gründen der Vereinfachung jeweils nur S_m aufgeführt.

(4) Die Berechnungsgrößen und Berechnungseinheiten sind für jeden Abschnitt getrennt aufgeführt.

(5) Die Nachrechnung von der mit der Nennwanddicke s_n ausgeführten Bauteilen ist innerhalb dieses Anhangs A mit der Wanddicke $s_{0n} = s_n - c_1 - c_2$ mit $s_n \geq s_0 + c_1 + c_2$ durchzuführen. Hinsichtlich der Zuschläge gilt Abschnitt 6.4.

(6) Die Bilder dieses Anhangs berücksichtigen nicht die Zuschläge.

(7) Die in Abschnitt A 2 enthaltenen Festlegungen für allgemeine Bauteile der drucktragenden Wand sind unter Beachtung der jeweiligen Voraussetzungen auch anwendbar auf spezifische Bauteile von Pumpen, Armaturen und Rohrleitungen gemäß den Abschnitten A 3 bis A 5, wenn dort keine anderslautenden Regelungen getroffen sind.

(8) Berechnungsgrößen und Einheiten

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
b	Breite	mm
c	Zuschlag zur Wanddicke	mm
d	Durchmesser	mm
h	Höhe	mm
l	Länge	mm
p	Auslegungsdruck	MPa
p'	Prüfdruck	MPa
r, R	Radien	mm
s	Wanddicke	mm
s_0	rechnerisch erforderliche Wanddicke gemäß Bild 7.1-1	mm

A 2 Dimensionierung von Bauteilen der drucktragenden Wand

A 2.1 Allgemeines

Die in den Abschnitten A 2.2 bis A 2.11 angegebenen Gleichungen für die Dimensionierung gelten nur zur Ermittlung der erforderlichen Wanddicke der einzelnen Bauteile unter Innen- oder Außendruck jedoch ohne Berücksichtigung des elastischen Zusammenhangs der gesamten Struktur. Die Beanspruchungen der Druckbehälterwandung durch äußere Kräfte und Momente werden in Abschnitt 8.2.7 erfasst.

A 2.2 Zylinderschalen

A 2.2.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt A 2.2

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
d_a	äußerer Durchmesser der Zylinderschale	mm
d_i	innerer Durchmesser der Zylinderschale	mm
f_k	Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen	—
f_v	zusätzlicher Sicherheitsbeiwert gegen plastisches Verformen	—
l	Beullänge	mm
n	Anzahl der Einbeulwellen	—
p	Auslegungsdruck	MPa
$p_{zul.}$	zulässiger Druck	MPa
s_0	rechnerisch erforderliche Wanddicke gemäß Bild 7.1-1	mm
s_{0n}	Nennwanddicke der Schale abzüglich Zuschläge gemäß Abschnitt 6.5	mm
Z	Rechengröße: $Z = 0{,}5 \cdot \pi \cdot d_a/l$	—
E	Elastizitätsmodul	N/mm²
S_m	Spannungsvergleichswert für die Komponenten der Prüfgruppe A1	N/mm²
U	Unrundheit	%
ν	Querkontraktionszahl	—
σ_a	axiale Spannung	N/mm²
$\bar{\sigma}_V$	mittlere Vergleichsspannung	N/mm²

A 2.2.2 Zylinderschalen unter innerem Überdruck

A 2.2.2.1 Geltungsbereich

Die nachstehende Berechnung gilt für Zylinderschalen unter innerem Überdruck, bei denen das Verhältnis $d_a/d_i \leq 1{,}7$ ist. Durchmesserverhältnisse $d_a/d_i \leq 2$ sind zulässig, wenn die Wanddicke $s_{0n} \leq 80$ mm ist. Die Berechnung von Ausschnittsverstärkungen in Zylinderschalen unter innerem Überdruck ist gemäß Abschnitt A 2.8 durchzuführen.

A 2.2.2.2 Berechnung

(1) Für die Berechnung der erforderlichen Wanddicke des Grundkörpers gilt:

$$s_0 = \frac{d_a \cdot p}{2 \cdot S_m + p} \qquad \text{(A 2.2-1)}$$

oder

$$s_0 = \frac{d_i \cdot p}{2 \cdot S_m - p} \qquad \text{(A 2.2-2)}$$

(2) Für die Nachrechnung bei vorgegebener Wanddicke gilt:

$$\bar{\sigma}_V = p \cdot \left(\frac{d_i}{2 \cdot s_{on}} + 0{,}5 \right) \leq S_m \qquad \text{(A 2.2-3)}$$

A 2.2.3 Zylinderschalen unter äußerem Überdruck

A 2.2.3.1 Geltungsbereich

Die nachstehende Berechnung gilt für Zylinderschalen unter äußerem Überdruck, bei denen das Verhältnis $d_a/d_i \leq 1{,}7$ ist.

A 2.2.3.2 Sicherheitsbeiwerte

(1) Der zusätzliche Sicherheitsbeiwert gegen plastisches Verformen ist unabhängig vom Werkstoff mit $f_v = 1{,}2$ anzusetzen.

(2) Der Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen ist unabhängig vom Werkstoff mit $f_k = 3{,}0$ anzusetzen. Wird ein höherer Prüfdruck als $1{,}3 \cdot p$ gefordert, so muss f_k mindestens 2,2 betragen.

A 2.2.3.3 Berechnung

A 2.2.3.3.1 Allgemeines

(1) Es ist durch Berechnung nachzuweisen, dass ausreichende Sicherheit gegen elastisches Einbeulen und plastische Verformung besteht. Es sind die nachfolgenden Gleichungen zu verwenden. Der errechnete kleinste Wert für p_{zul} ist maßgebend.

(2) Die Beullänge l ist die Länge des Mantels. Bei Behältern mit gewölbten Böden beginnt die Beullänge am Übergang vom zylindrischen Bord zur Krempe.

A 2.2.3.3.2 Berechnung gegen elastisches Einbeulen

(1) Die Berechnung erfolgt nach folgender Gleichung:

$$p_{zul} = \frac{E}{f_k} \cdot \left[\frac{2}{\left(n^2-1\right) \cdot \left[1+\left(\frac{n}{z}\right)^2\right]^2} \cdot \frac{s_{0n}}{d_a} + \right.$$

$$\left. + \frac{2}{3 \cdot \left(1-\nu^2\right)} \cdot \left(n^2 - 1 + \frac{2 \cdot n^2 - 1 - \nu}{1+(\frac{n}{z})^2} \right) \cdot \left(\frac{s_{0n}}{d_a}\right)^3 \right] \qquad \text{(A 2.2-4)}$$

wobei für $Z = 0{,}5 \cdot \pi \cdot d_a/l$ einzusetzen ist; n ist eine ganze Zahl und muss den Bedingungen $n \geq 2$ und $n > z$ genügen und ist so zu wählen, dass p zum kleinsten Wert wird. n bedeutet die Anzahl der Einbeulwellen, die beim Versagen auf dem Umfang auftreten können.

Die Anzahl der Einbeulwellen darf nach folgender Näherungsgleichung abgeschätzt werden:

$$n = 1{,}63 \cdot \sqrt[4]{\frac{{d_a}^3}{l^2 \cdot s_{0n}}} \qquad \text{(A 2.2-5)}$$

(2) Die erforderliche Wanddicke s_{0n} darf nach **Bild A 2.2-1** für gebräuchliche Abmessungen bestimmt werden. Dieses Bild gilt für eine Querkontraktionszahl = 0,3. Bei wesentlich anderen Querkontraktionszahlen ist nach Gleichung (A 2.2-4) zu rechnen.

A 2.2.3.3.3 Berechnung gegen plastisches Verformen

(1) Bei $d_a/l \leq 5$ gilt:

$$p_{zul} = \frac{2 \cdot S_m}{f_v} \cdot \frac{s_{0n}}{d_a} \cdot \frac{1}{1+\frac{1{,}5 \cdot U \cdot (1-0{,}2 \cdot d_a/l) \cdot d_a}{100 \cdot s_{0n}}} \qquad \text{(A 2.2-6)}$$

Die erforderliche Wanddicke s_{0n} darf nach **Bild A 2.2-2** für gebräuchliche Abmessungen und mit U = 1,5% unmittelbar bestimmt werden.

(2) Bei $d_a/l > 5$ ist der größere der nach den folgenden Gleichungen ermittelten Drücke für die Festlegung des zulässigen äußeren Überdrucks maßgebend:

$$p_{zul} = \frac{3 \cdot S_m}{f_v} \cdot \frac{s_{0n}}{d_a} \geq p \qquad \text{(A 2.2-7)}$$

$$p_{zul} = \frac{3 \cdot S_m}{f_v} \cdot \left(\frac{s_{0n}}{l}\right)^2 \geq p \qquad \text{(A 2.2-8)}$$

(3) Die Gleichung (A 2.2-8) gilt hauptsächlich bei kleinen Beullängen. Die Gleichungen (A 2.2-6) bis (A 2.2-8) gelten nur dann, wenn im Zylinder keine positiven Primär-Längsspannungen σ_a auftreten. In den Gleichungen (A 2.2-6) bis (A 2.2-8) ist S_m zu ersetzen durch $(S_m - \sigma_a)$, wenn $\sigma_a > 0$.

A 2.3 Kugelschalen

A 2.3.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt A 2.3

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
d_a	äußerer Durchmesser der Kugelschale	mm
d_i	innerer Durchmesser der Kugelschale	mm
f_k	Sicherheitsbeiwert gegen elastische Einbeulen	—
f_k'	Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen bei erhöhtem Prüfdruck	—
f_v	zusätzlicher Sicherheitsbeiwert gegen plastisches Verformen	—
l	Beullänge	mm
n	Anzahl der Einbeulwellen	—
p	Auslegungsdruck	MPa
p_{zul}	zulässiger Druck	MPa
s_0	rechnerisch erforderliche Wanddicke gemäß Bild 7.1-1	mm
s_{0n}	Nennwanddicke der Schale abzüglich Zuschläge gemäß Abschnitt 6.5	mm
Z	Rechengröße: $Z = 0{,}5 \cdot \pi \cdot d_a/l$	—
C_k	Berechnungsbeiwert gemäß Gleichung (A 2.3-3)	—
E	Elastizitätsmodul	N/mm²
S_m	Spannungsvergleichswert für die Komponenten der Prüfgruppe A 1	N/mm²
U	Unrundheit	%
ν	Querkontraktionszahl	—
σ_a	axiale Spannung	N/mm²
σ_k	Spannung bei der Nachrechnung gegen elastisches Einbeulen	N/mm²
σ_v	Vergleichsspannung	N/mm²
$\overline{\sigma}_V$	mittlere Vergleichsspannung	N/mm²

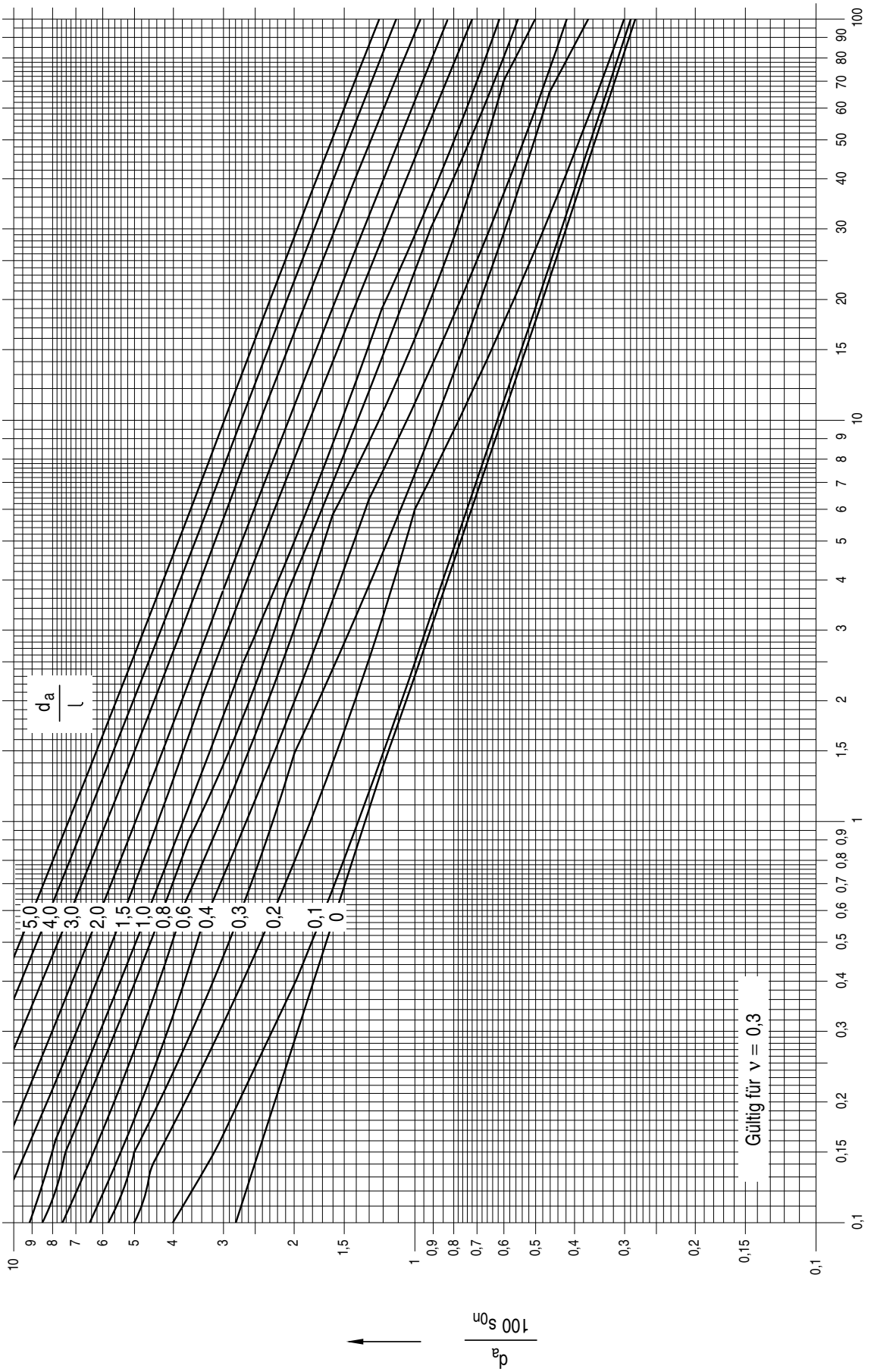


Bild A 2.2-1: Erforderliche Wanddicke s_{0n} von Zylinderschalen, Rohren und Rohrbögen bei Berechnung gegen elastisches Einbeulen

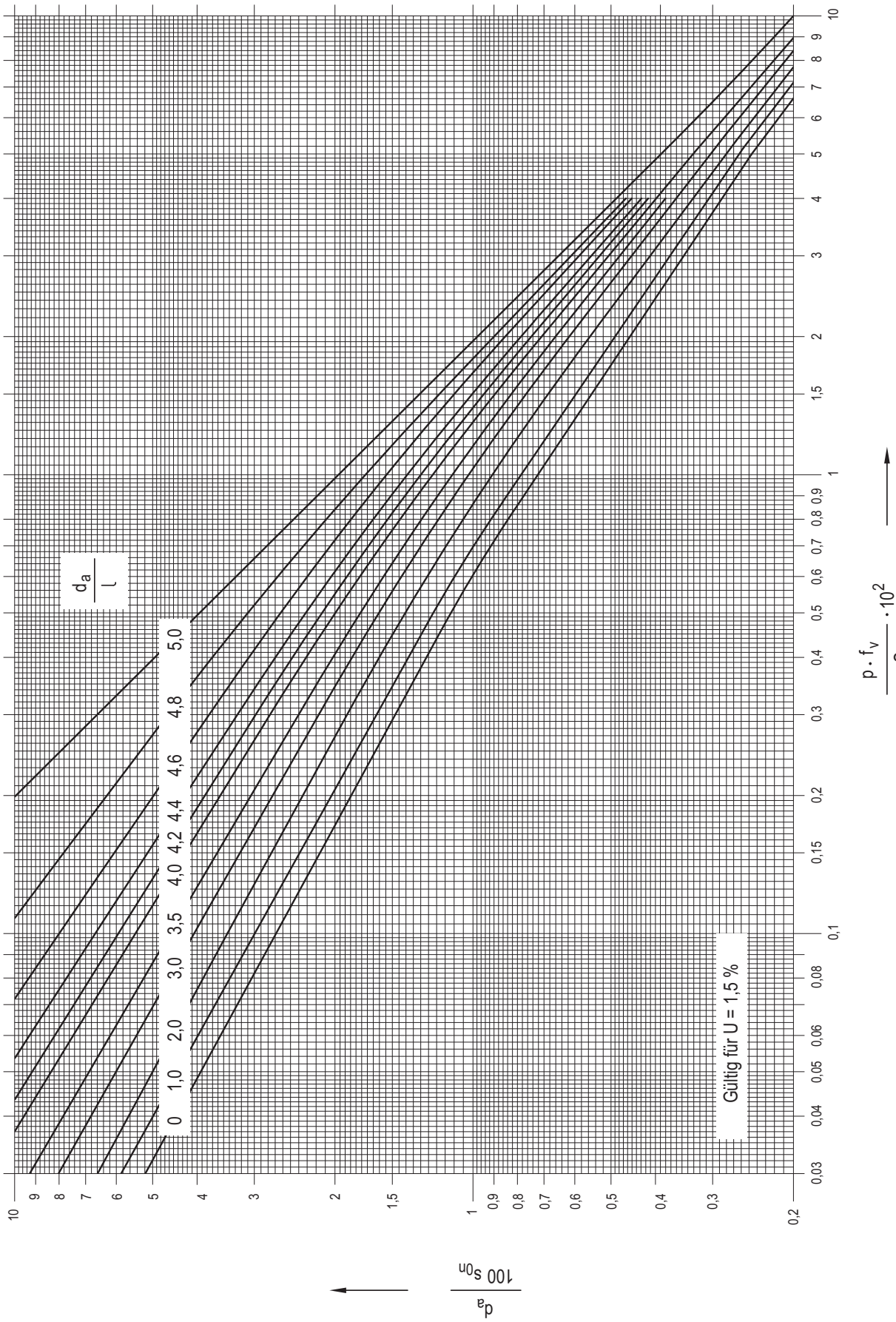


Bild A 2.2-2: Erforderliche Wanddicke s_{0n} von Zylinderschalen, Rohren und Rohrbögen bei Berechnung gegen plastisches Verformen

A 2.3.2 Kugelschalen unter innerem Überdruck

A 2.3.2.1 Geltungsbereich

Die nachstehende Berechnung gilt für Kugelschalen ohne Ausschnitte unter innerem Überdruck, bei denen das Verhältnis $d_a/d_i \leq 1{,}5$ ist. Die Berechnung von Kugelschalen mit Ausschnitten unter innerem Überdruck ist gemäß Abschnitt A 2.8 durchzuführen.

A 2.3.2.2 Berechnung

(1) Für die Berechnung der erforderlichen Wanddicke s_0 für Kugelschalen mit dem Verhältnis $s_{0n}/d_i > 0{,}05$ gelten wahlweise:

$$s_0 = \frac{d_a}{2} \cdot \frac{C_k - 1}{C_k} \qquad \text{(A 2.3-1)}$$

oder

$$s_0 = \frac{d_i}{2} \cdot \left(C_k - 1\right) \qquad \text{(A 2.3-2)}$$

mit

$$C_k = \sqrt{1 + \frac{2 \cdot p}{2 \cdot S_m - p}} \qquad \text{(A 2.3-3)}$$

(2) Für die Berechnung der erforderlichen Wanddicke dünnwandiger Kugelschalen mit dem Verhältnis $s_{0n}/d_i \leq 0{,}05$ gilt:

$$s_0 = \frac{d_a \cdot p}{4 \cdot S_m} \qquad \text{(A 2.3-4)}$$

$$s_0 = \frac{d_i \cdot p}{4 \cdot S_m - 2 \cdot p} \qquad \text{(A 2.3-5)}$$

(3) Für die Nachrechnung bei vorgegebener Wanddicke gilt:

$$\sigma_V = p \cdot \left[\frac{d_i^2}{4 \cdot \left(d_i + s_{0n}\right) \cdot s_{0n}} + 0{,}5 \right] \leq S_m \qquad \text{(A 2.3-6)}$$

A 2.3.3 Kugelschalen unter äußerem Überdruck

A 2.3.3.1 Geltungsbereich

Die nachstehende Berechnung gilt für Kugelschalen unter äußerem Überdruck, bei denen das Verhältnis $d_a/d_i \leq 1{,}5$ ist.

A 2.3.3.2 Sicherheitsbeiwerte

(1) Der zusätzliche Sicherheitsbeiwert gegen plastisches Verformen beträgt unabhängig vom Werkstoff $f_v = 1{,}2$.

(2) Der Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen ist unabhängig vom Werkstoff der **Tabelle A 2.3-1** zu entnehmen. Wird ein höherer Prüfdruck als $1{,}3 \cdot p$ gefordert, dann ist für den Prüfdruck der Nachweis mit f_k' aus der **Tabelle A 2.3-1** zusätzlich zu erbringen.

$\frac{2 \cdot s_0}{d_i}$	f_k	f_k'
0,001	5,5	4,0
0,003	4,0	2,9
0,005	3,7	2,7
0,010	3,5	2,6
$\geq 0{,}1$	3,0	2,2
Zwischenwerte sind linear zu interpolieren.		

Tabelle A 2.3-1: Sicherheitsbeiwerte gegen elastisches Einbeulen

A 2.3.3.3 Berechnung

(1) Allgemeines

Es ist durch Berechnung nachzuweisen, dass ausreichende Sicherheit gegen elastisches Einbeulen und plastische Verformung besteht. Es sind die nachfolgenden Gleichungen zu verwenden. Der größere sich aus den Absätzen (2) und (3) ergebende Wert für s_0 ist der jeweils maßgebliche.

(2) Berechnung gegen elastisches Einbeulen

Die erforderliche Wanddicke ergibt sich aus der folgenden Gleichung:

$$s_0 = d_a \cdot \sqrt{\frac{p \cdot f_k}{1{,}464 \cdot E}} \qquad \text{(A 2.3-7)}$$

Für die Nachrechnung bei vorgegebener Wanddicke gilt:

$$\sigma_k = \frac{p}{1{,}464} \cdot \left(\frac{d_a}{s_{0n}}\right) \leq \frac{E}{f_k} \qquad \text{(A 2.3-8)}$$

(3) Berechnung gegen plastisches Verformen

Die erforderliche Wanddicke ergibt sich aus:

$$s_0 = \frac{d_a}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot p \cdot f_v}{2 \cdot S_m + p \cdot f_v}}\right) \qquad \text{(A 2.3-9)}$$

Für Kugelschalen mit dem Verhältnis $s_0/d_a \leq 0{,}05$ darf die erforderliche Wanddicke näherungsweise aus

$$s_0 = \frac{p \cdot d_a \cdot f_v}{4 \cdot S_m} \qquad \text{(A 2.3-10)}$$

ermittelt werden.

Bei Nachrechnung mit vorgegebener Wanddicke gilt:

$$\overline{\sigma}_V = p \cdot \left[\frac{{d_a}^2}{4 \cdot \left(d_a - s_{0n}\right) \cdot s_{0n}} - 0{,}5 \right] \leq \frac{S_m}{f_v} \qquad \text{(A 2.3-11)}$$

A 2.3.4 Wanddicke der ungestörten Kugelschale und des Übergangsbereiches Flansch/Kugelschale bei Innendruckbelastung

(1) Die Wanddicke s_0 der ungestörten Kugelschale ergibt sich aus den Gleichungen (A 2.6-3) bis (A 2.6-6).

(2) Für die Wanddicke s_e' am Übergang vom Flansch zur Kugelschale gilt:

$$s_e \geq s_e' = s_0 \cdot \beta \qquad \text{(A 2.3-12)}$$

Bei dem Berechnungsbeiwert β wird berücksichtigt, dass bei dem großen Anteil Biegespannungen mit einer Erhöhung der Tragfähigkeit bei überelastischer Beanspruchung gerechnet werden kann. Geht man von dem die Tragfähigkeit kennzeichnenden Dehngrenzenverhältnis δ von gewölbten Böden aus, so kann bei Flanschen mit innen liegender Dichtung entsprechend **Bild A 2.6-1** und **Bild A 2.6-2** $\beta = 3{,}5$ gesetzt werden, was sich als Näherung aus **Bild A 2.3-1** für $\beta = \alpha/\delta$ ergibt.

A 2.3.5 Ausschnittsverstärkung am Stoffbuchsraum von Armaturen bei Innendruckbelastung

Die Berechnung erfolgt nach dem Flächenausgleichsverfahren wie bei Böden mit Ausschnitten. Die Festigkeitsbedingung lautet:

$$p \cdot \left(\frac{A_p}{A_\sigma} + \frac{1}{2}\right) \leq S_m \qquad \text{(A 2.3-13)}$$

Die mittragenden Längen sind:

$$l_0 = \sqrt{(2 \cdot r + s_0') \cdot s_0'} \qquad \text{(A 2.3-14)}$$

$$l_1 = \sqrt{(d_A + s_A) \cdot s_A} \qquad \text{(A 2.3-15)}$$

mit s_0' als ausgeführte Wanddicke im kugeligen Bereich abzüglich der Zuschläge c.

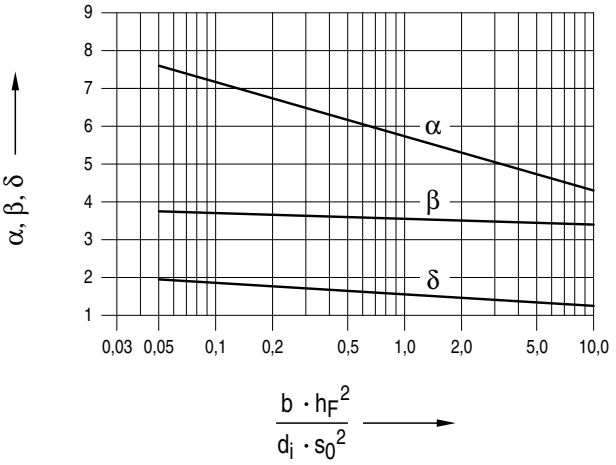


Bild A 2.3-1: Berechnungsbeiwert ß für den Übergang Flansch/Kugelschale

A 2.4 Kegelschalen

A 2.4.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt A 2.4

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
d_a	Außendurchmesser der Kugelschale	mm
d_{a1}	Außendurchmesser am weiten Ende des Kegels	mm
d_{a2}	Außendurchmesser am engen Ende des Kegels	mm
d_i	Innendurchmesser der Kegelschale	mm
d_{i1}	Innendurchmesser am weiten Ende des Kegels	mm
d_{i2}	Innendurchmesser am engen Ende des Kegels	mm
e_1	Störbereichslänge des weiten Teils des Kegels	mm
e_2	Störbereichslänge des engen Teils des Kegels	mm
e	Störbereichslänge gemäß Bild A 2.4-3	mm
p	Auslegungsdruck	MPa
r	Übergangsradius	mm
s	Wanddicke	mm
s_0	rechnerisch erforderliche Wanddicke	mm
s_{0n}	Nennwanddicke der Schale abzüglich Zuschläge gemäß Abschnitt 6.5	mm
s_1	Wanddicke des weiten Teils des Kegels	mm
s_2	Wanddicke des engen Teils des Kegels	mm
A_p	drucktragende Fläche	mm^2
A_σ	tragende Querschnittsfläche	mm^2
S_m	Spannungsvergleichswert für die Komponenten der Prüfgruppe A1	N/mm^2
β	Berechnungsbeiwert gemäß Tabelle A 2.4-1	—
φ	halber Öffnungswinkel des Kegels	grd
φ_1	halber Öffnungswinkel des weiten Teils des Kegels	grd
φ_2	halber Öffnungswinkel des engen Teils des Kegels	grd
Ψ	absolute Differenz der halben Öffnungswinkel φ_1 und φ_2	grd
σ_1	Spannung in Längsrichtung	N/mm^2
σ_v	Vergleichsspannung	N/mm^2
$\overline{\sigma}_v$	mittlere Vergleichsspannung	N/mm^2

A 2.4.2 Kegelschalen unter innerem Überdruck

A 2.4.2.1 Geltungsbereich

Die nachstehende Berechnung gilt für Kegelschalen unter innerem Überdruck ohne Ausschnitte, bei denen am weiten Ende die Bedingung $0{,}005 \le s_{0n}/d_a \le 0{,}2$ eingehalten ist. Die Berechnung von Kegelschalen mit Ausschnitten unter innerem Überdruck ist gemäß Abschnitt A 2.8 durchzuführen.

Hinweis:
Dem Wert $s_{0n}/d_a = 0{,}2$ entspricht für $d_a - d_i = 2 \cdot s_{0n}$ der Wert $d_a/d_i = 1{,}67$.

A 2.4.2.2 Allgemeines

(1) Kegelschale mit Eckschweißungen

Kegelschalen dürfen untereinander oder mit Zylinderschalen und dergleichen ohne Krempe durch Schweißung entsprechend Abschnitt 5.2.3 verbunden werden.

(2) Störbereichslänge

Bei Kegelschalen mit nach innen gekrümmten Übergängen muss die nach Abschnitt A 2.4.2.3 Absatz 2 oder 4 geforderte Wanddicke über dem durch die Störbereichslänge e begrenzten Krempenbereich vorhanden sein (siehe **Bild A 2.4-1**).

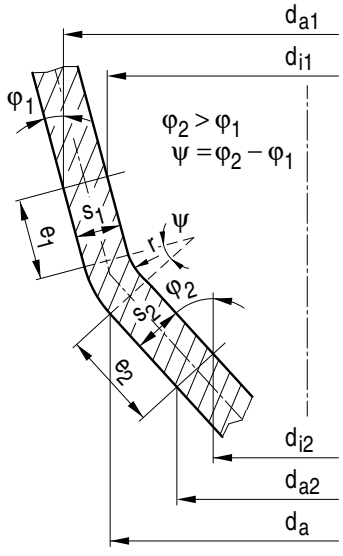


Bild A 2.4-1: Störbereichslängen e_1 und e_2

Es gilt:

$$e_1, e_2 = (r + s_{0n}) \cdot \tan\frac{\Psi}{2} + 0{,}8 \cdot \sqrt{d_a \cdot s_{0n}} \qquad \text{(A 2.4-1)}$$

Bei veränderlicher Wanddicke innerhalb des Störbereichs ist für die Ermittlung der Längen e_1 und e_2 nach Gleichung (A 2.4-1) jeweils die Wanddicke am Auslauf der Krümmung maßgebend.

A 2.4.2.3 Berechnung

(1) Wanddickenberechnung für den ungestörten Bereich einer Kegelschale mit $\varphi \leq 70°$.

Die erforderliche Wanddicke des ungestörten Bereichs einer Kegelschale (siehe Bild A 2.4-2) ergibt sich wahlweise aus:

$$s_0 = \frac{d_a \cdot p}{(2 \cdot S_m + p) \cdot \cos\varphi} \qquad \text{(A 2.4-2)}$$

$$s_0 = \frac{d_i \cdot p}{(2 \cdot S_m - p) \cdot \cos\varphi} \qquad \text{(A 2.4-3)}$$

Für die Nachrechnung bei vorgegebener Wanddicke gilt:

$$\overline{\sigma}_v = p \cdot \left(\frac{d_i}{2 \cdot s_0 \cdot \cos\varphi} + 0{,}5 \right) \leq S_m \qquad \text{(A 2.4-4)}$$

Für d_a und d_i sind in den Gleichungen (A 2.4-2), (A 2.4-3) und (A 2.4-4) jeweils die Maße am weiten Ende des ungestörten Bereichs der Kegelschale einzusetzen.

Zwischen d_a und d_i besteht die Beziehung:

$$d_i = d_a - 2 \cdot s_{0n} \cdot \cos\varphi \qquad \text{(A 2.4-5)}$$

Bei mehreren untereinander verbundenen kegelförmigen Mänteln mit gleichem Öffnungswinkel ist die Berechnung nach Gleichung (A 2.4-2) oder (A 2.4-3) für sämtliche Mäntel durchzuführen.

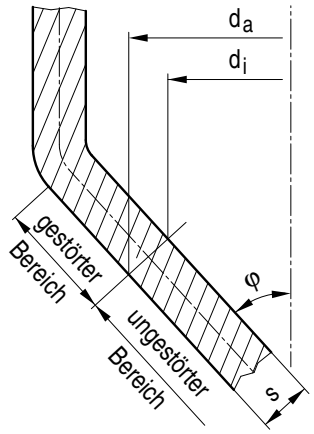


Bild A 2.4-2: Ungestörter Bereich einer Kegelschale

(2) Wanddickenberechnung für den gestörten Bereich von Kegelschalen mit nach innen gekrümmten Übergängen und $\varphi \leq 70°$.

Die Bemessung erfolgt getrennt für die

a) Umfangsbeanspruchung im äußeren Krempenteil,

b) Umfangsbeanspruchung im inneren Krempenteil und

c) Beanspruchung längs der Mantellinie.

Die größte sich nach a), b) und c) ergebende Wanddicke ist für die Bemessung maßgebend.

Im Hinblick auf die Umfangsspannung ist bei nach innen gekrümmten Übergängen (**Bild A 2.4-1**) die erforderliche Wanddicke nach den Gleichungen (A 2.4-2) oder (A 2.4-3) für beide Seiten des Übergangs zu ermitteln.

Hinsichtlich der Längsspannungen ergibt sich die erforderliche Wanddicke aus:

$$s_0 = \frac{d_a \cdot p \cdot \beta}{4 \cdot S_m} \qquad \text{(A 2.4-6)}$$

Der Berechnungswert ß ist dabei in Abhängigkeit vom Winkel Ψ und dem Verhältnis r/d_a der **Tabelle A 2.4-1** zu entnehmen. Zwischenwerte dürfen dabei linear interpoliert werden.

Der größere Wert aus den Gleichungen (A 2.4-2) oder (A 2.4-3) und (A2.4-6) ist maßgebend. Für die Nachrechnung bei vorgegebener Wanddicke gilt:

$$\sigma_1 = \frac{d_a \cdot p \cdot \beta}{4 \cdot s_{0n}} \leq S_m \qquad \text{(A 2.4-7)}$$

Der Winkel Ψ ergibt sich aus der absoluten Differenz der halben Öffnungswinkel φ_1 und φ_2:

$$\Psi = \left| \varphi_1 - \varphi_2 \right| \qquad \text{(A 2.4-8)}$$

Bei veränderlicher Wanddicke innerhalb der Abklinglänge (z. B. Schmiedestücke, Drehteile) ist für die Ermittlung der Längen e_1 und e_2 nach Gleichung (A 2.4-1) jeweils die Wanddicke am Auslauf der Krümmung maßgebend.

(3) Wanddickenberechnung für den gestörten Bereich von Kegelschalen mit nach außen gekrümmten Übergängen und $\varphi \leq 70°$.

Bei nach außen gekrümmten Übergängen (**Bild A 2.4-3**) gelten grundsätzlich alle Bedingungen und Beziehungen wie bei den nach innen gekrümmten Übergängen.

Zusätzlich ist jedoch wegen der erhöhten Umfangsspannung die folgende Bedingung zu erfüllen:

$$\sigma_v = p \cdot \left(\frac{A_p}{A_\sigma} + 0{,}5 \right) \leq S_m \qquad \text{(A 2.4-9)}$$

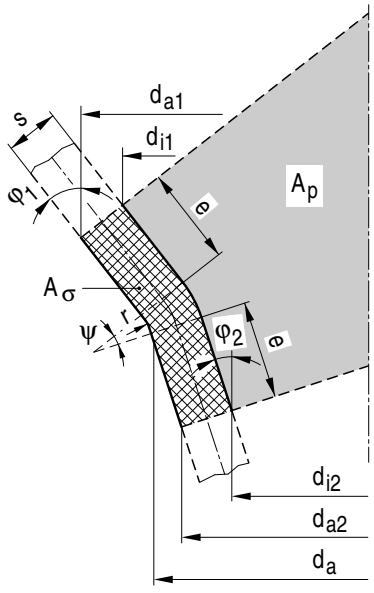


Bild A 2.4-3: Kegelschale mit nach außen gekrümmtem Übergang

(4) Wanddickenberechnung für den gestörten Bereich von flachen Kegelschalen mit Krempe und $\varphi > 70°$.

Bei sehr flachen Kegeln, deren Neigungswinkel zur Behälterachse $\varphi > 70°$ ist, darf die Bemessung nach Gleichung (A 2.4-10) erfolgen, auch wenn sich geringere Wanddicken als nach den Gleichungen (A 2.4-2), (A 2.4-3) und (A 2.4-6) ergeben:

$$s_0 = 0{,}3 \cdot (d_a - r) \frac{\varphi}{90°} \cdot \sqrt{\frac{p}{S_m}} \qquad \text{(A 2.4-10)}$$

A 2.4.3 Kegelschalen unter äußerem Überdruck

Bei Beanspruchung durch äußeren Überdruck ist die Berechnung nach Abschnitt A 2.4.2.3 durchzuführen. Für $d_a > 50$ mm ist zu der Wanddicke nach Gleichung (A 2.4-6) der Zuschlag c_4 zu addieren

$$c_4 = 2 \cdot \left(1 - \frac{50\,\text{mm}}{d_a}\right) \cdot \text{mm} \qquad \text{(A 2.4-11)}$$

wobei für d_a der Zahlenwert in mm einzusetzen ist. Bei Kegelschalen mit φ kleiner oder gleich 45° ist zusätzlich nachzuprüfen, ob der Kegel gegen elastisches Einbeulen sicher ist. Diese Nachprüfung erfolgt nach Abschnitt A 2.2.3.3.2, wobei der Kegel einem Zylinder gleichzusetzen ist, dessen Durchmesser wie folgt bestimmt wird:

$$d_a = \frac{d_{a1} + d_{a2}}{2 \cdot \cos\varphi} \qquad \text{(A 2.4-12)}$$

mit

d_{a1} Durchmesser am weiten Ende des Kegels,

d_{a2} Durchmesser am engen Ende des Kegels.

Als Länge ist dabei die axiale Länge des Kegels und der gegebenenfalls anschließenden Zylinder einzusetzen, es sei denn, dass die Zylinder am Übergang entsprechend Abschnitt A 2.2.3 ausreichend verstärkt sind.

Ψ	r/d_a											
	≤ 0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50
0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
10	1,4	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
20	2,0	1,8	1,7	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
30	2,7	2,4	2,2	2,0	1,8	1,7	1,6	1,4	1,3	1,1	1,1	1,1
45	4,1	3,7	3,3	3,0	2,6	2,4	2,2	1,9	1,8	1,4	1,1	1,1
60	6,4	5,7	5,1	4,7	4,0	3,5	3,2	2,8	2,5	2,0	1,4	1,1
70	10,0	9,0	8,0	7,2	6,0	5,3	4,9	4,2	3,7	2,7	1,7	1,1
75	13,6	11,7	10,7	9,5	7,7	7,0	6,3	5,4	4,8	3,1	2,0	1,1

Tabelle A 2.4-1: Berechnungsbeiwert β in Abhängigkeit vom Verhältnis r/d_a und Ψ

A 2.5 Gewölbte Böden

A 2.5.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt A 2.5

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
d_a	Außendurchmesser eines gewölbten Bodens	mm
d_i	Innendurchmesser eines gewölbten Bodens	mm
d_{Ai}	Innendurchmesser eines Ausschnitts	mm
f_k	Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen	—
f_k'	Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen bei erhöhtem Prüfdruck	—
h_1	Höhe des zylindrischen Bords	mm
h_2	Höhe des gewölbten Bodens	mm
r	Radius	mm
s_0	rechnerisch erforderliche Wanddicke gemäß Bild 7.1-1	mm
s_{0n}	Nennwanddicke der Schale abzüglich Zuschläge gemäß Abschnitt 6.5	mm
p	Auslegungsdruck	MPa
p'	Prüfdruck	MPa
p_B	Beuldruck	MPa
x	Abstand der Schweißnaht von der Krempe	mm
E	Elastizitätsmodul	N/mm²
R	Wölbungsradius	mm
S	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1	N/mm²
S_m	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1	N/mm²
β	Berechnungsbeiwert	—

A 2.5.2 Gewölbte Böden unter innerem Überdruck

A 2.5.2.1 Geltungsbereich

Die nachstehende Berechnung gilt für gewölbte Böden in Klöpper-, Korbbogen- und Halbkugelform unter innerem Überdruck, wenn folgende Beziehungen und Grenzen eingehalten sind (siehe **Bild A 2.5-1**):

a) Klöpperböden

$R = d_a$

$r = 0{,}1 \cdot d_a$

$h_2 = 0{,}1935 \cdot d_a - 0{,}455 \cdot s_{0n}$

$0{,}001 \le s_{0n}/d_a \le 0{,}1$

b) Korbbogenböden

$R = 0{,}8 \cdot d_a$

$r = 0{,}154 \cdot d_a$

$h_2 = 0{,}255 \cdot d_a - 0{,}635 \cdot s_{0n}$

$0{,}001 \le s_{0n}/d_a \le 0{,}1$

c) Halbkugelböden

$d_a/d_i \le 1{,}5$

d) gewölbte Böden von Armaturen

allgemeine Bedingungen für gewölbte Böden

$R \le d_a$

$r \ge 0{,}1\ d_a$

$0{,}005 \le s_v/d_a \le 0{,}10$

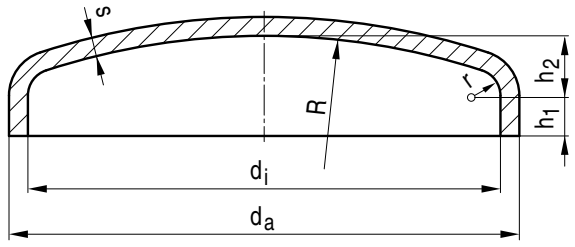


Bild A 2.5-1: Gewölbter Vollboden

A 2.5.2.2 Allgemeines

(1) Höhe des zylindrischen Bordes

Bei Klöpperböden soll die Bordhöhe grundsätzlich $h_1 \geq 3{,}5 \cdot s_{0n}$, bei Korbbogenböden $h_1 \geq 3{,}0 \cdot s_{0n}$ betragen. Sie braucht jedoch folgende Maße nicht zu überschreiten:

Wanddicke s_{0n} in mm	Bordhöhe h_1 in mm
$s_{0n} \leq 50$	150
$50 < s_{0n} \leq 80$	120
$80 < s_{0n} \leq 100$	100
$100 < s_{0n} \leq 120$	75
$120 < s_{0n}$	50

Bei Halbkugelböden ist kein zylindrischer Bord erforderlich.

(2) Wird ein gewölbter Boden aus einem Krempen- und einem Kalottenteil zusammengeschweißt, so muss die Verbindungsnaht einen ausreichenden Abstand von der Krempe haben. Als ausreichender Abstand x gilt: (siehe **Bild A 2.5-2**)

a) bei unterschiedlicher Wanddicke des Krempen- und Kalottenteils:

$$x = 0{,}5 \cdot \sqrt{R \cdot s_{0n}}$$

wobei s_{0n} die Nennwanddicke des Krempenteils abzüglich der Zuschläge darstellt.

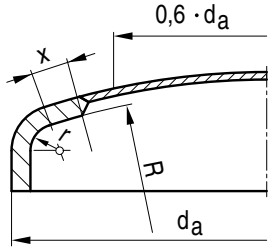


Bild A 2.5-2: Boden mit unterschiedlicher Wanddicke des Krempen- und Kalottenteils

b) bei gleicher Wanddicke des Krempen- und Kalottenteils:

$x = 3{,}5 \cdot s_{0n}$ bei Klöpperböden,

$x = 3{,}0 \cdot s_{0n}$ bei Korbbogenböden.

Der Abstand x soll jedoch mindestens 100 mm betragen.

c) Bei der Bestimmung des Übergangs von der Krempe zum Kalottenteil ist vom Innendurchmesser auszugehen. Bei dünnwandigen Klöpperböden nach DIN 28011 liegt der Übergang ungefähr bei $0{,}89 \cdot d_i$ und bei dünnwandigen Korbbogenböden nach DIN 28013 ungefähr bei $0{,}86 \cdot d_i$. Mit zunehmender Dickwandigkeit verringern sich die Faktoren.

A 2.5.2.3 Verschwächung durch Ausschnitte

(1) Ausschnitte im Scheitelbereich $0{,}6 \cdot d_a$ von Klöpper- und Korbbogenböden und im gesamten Bereich von Halbkugelböden sind nach Abschnitt A 2.8 auf ausreichende Verstärkung ohne Berücksichtigung der ß-Werte zu überprüfen.

(2) Ausschnitte im Bereich außerhalb von $0{,}6 \cdot d_a$ werden durch Erhöhung des Berechnungsbeiwertes ß nach den **Bildern A 2.5-4** und **A 2.5-5** berücksichtigt.

(3) Ausschnitte im Bereich der geometrischen Krempe sind nur in Ausnahmefällen zulässig. Dabei hat die Dimensionierung durch die Analyse des mechanischen Verhaltens zu erfolgen.

(4) Wenn der Steg zwischen zwei benachbarten Ausschnitten nicht vollständig innerhalb $0{,}6 \cdot d_a$ liegt, muss diese Stegbreite mindestens gleich der Summe der halben Ausschnittdurchmesser, gemessen auf der Verbindungslinie der Mittelpunkte dieser Ausschnitte, sein.

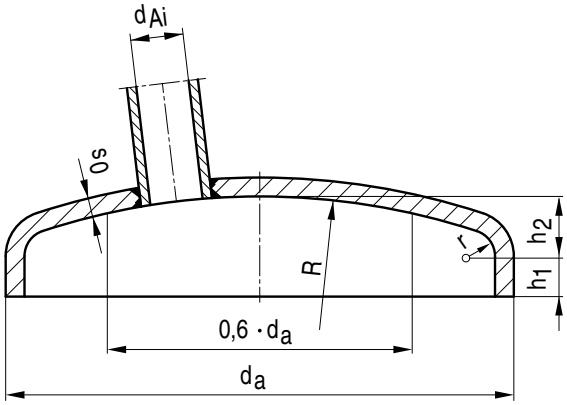


Bild A 2.5-3: Gewölbter Boden mit Stutzen

A 2.5.2.4 Berechnung

(1) Berechnung der erforderlichen Wanddicke der Krempe bei Beanspruchung durch inneren Überdruck

Für die Berechnung der erforderlichen Wanddicke der Krempe gilt:

$$s_0 = \frac{d_a \cdot p \cdot \beta}{4 \cdot S_m} \qquad \text{(A 2.5-1)}$$

Die Wanddicke des Kalottenteils ist nach Abschnitt A 2.3.2.2 zu bestimmen.

(2) Die Berechnungsbeiwerte ß sind für gewölbte Böden (Vollböden und Böden mit Ausschnitten)

a) in Klöpperform dem **Bild A 2.5-4**,

b) in Korbbogenform dem **Bild A 2.5-5**

in Abhängigkeit von s_0/d_a und d_{Ai}/d_a zu entnehmen.

Die Berechnungsbeiwerte ß basieren auf der von-Mises-Hypothese.

Hierbei gelten die Kurven mit $d_{Ai}/d_a > 0$ für unverstärkte Ausschnitte im gesamten Bereich von Kugelkalotte und Krempe.

Für Vollböden in Halbkugelform gilt unabhängig von der Wanddicke im Bereich

$$x = 0{,}5 \cdot \sqrt{R \cdot s_0} \qquad \text{(A 2.5-2)}$$

neben der Anschlussnaht der Berechnungsbeiwert ß = 1,1.

(3) Armaturenspezifische Ausführungsformen

Bei den armaturenspezifischen Ausführungsformen nach **Bild A 2.5-6** bis **Bild A 2.5-8** kann der Verschwächung des Grundkörpers durch folgende Maßnahmen Rechnung getragen werden:

a) durch eine gegenüber dem ungeschwächten Boden vergrößerte Wanddicke, die mindestens bis zur Länge

$l_0 = \sqrt{(2 \cdot R_i + s_{V0}) \cdot s_{V0}}$ vorhanden sein muss (siehe **Bild A 2.5-6**).

b) durch rohrförmige Verstärkungen ohne oder in Verbindung mit einer Wanddickenvergrößerung des Grundkörpers. Ein nach innen überstehender Teil des Abzweigs kann nur mit dem Anteil der Länge $l_{A2} \le 0{,}5 \cdot l_1 \le 0{,}5 \cdot \sqrt{(d_1 + s_{V1}) \cdot s_{V1}}$ als tragend in die Rechnung einbezogen werden. Das Wanddickenverhältnis s_{V1}/s_{V0} soll den Wert 1 nicht wesentlich überschreiten (siehe **Bild A 2.5-7**).

c) durch Aushalsung in Verbindung mit einer Wanddickenvergrößerung des Grundkörpers. Werden dabei die drucktragenden Flächen A_p und die tragenden Querschnittsflächen A_σ wie bei rohrförmigen Verstärkungen ermittelt, d. h. ohne Berücksichtigung der Aushalsungsradien und Querschnittsverluste, ist in die Rechnung für A_σ der Wert $A''_\sigma = 0{,}9 \cdot A_\sigma$ einzusetzen (siehe **Bild A 2.5-8**).

A 2.5.3 Gewölbte Böden unter äußerem Überdruck

Für die Berechnung der erforderlichen Wanddicke der Krempe bei Beanspruchung durch äußeren Überdruck gelten die Forderungen des Abschnittes A 2.5.2 mit folgenden zusätzlichen Forderungen:

Die erforderliche Wanddicke s_0 der Krempe ist aus Gleichung (A 2.5-1) zu berechnen. Bei der Berechnung der erforderlichen Wanddicke s_0 ist der zulässige Spannungsvergleichswert S_m bzw. S in Abhängigkeit von der Prüfgruppe um 20 % zu erniedrigen. Zusätzlich ist nachzuprüfen, dass der Boden im Bereich der Kalottenteile gegen elastisches Einbeulen ausreichend bemessen ist.

Dies ist der Fall, wenn

$$p \le 0{,}366 \cdot \frac{E}{f_k} \cdot \left(\frac{s_{0n}}{R}\right)^2 \qquad \text{(A 2.5-3)}$$

ist.

Der Sicherheitsbeiwert f_k ist der **Tabelle A 2.5-1** zu entnehmen. Wird ein höherer Prüfdruck als $p' = 1{,}3 \cdot p$ gefordert, so ist ein gesonderter Nachweis gegen elastisches Einbeulen zu führen. In diesem Fall darf der Sicherheitsbeiwert f'_k beim Prüfdruck den in der **Tabelle A 2.5-1** angegebenen Wert nicht unterschreiten.

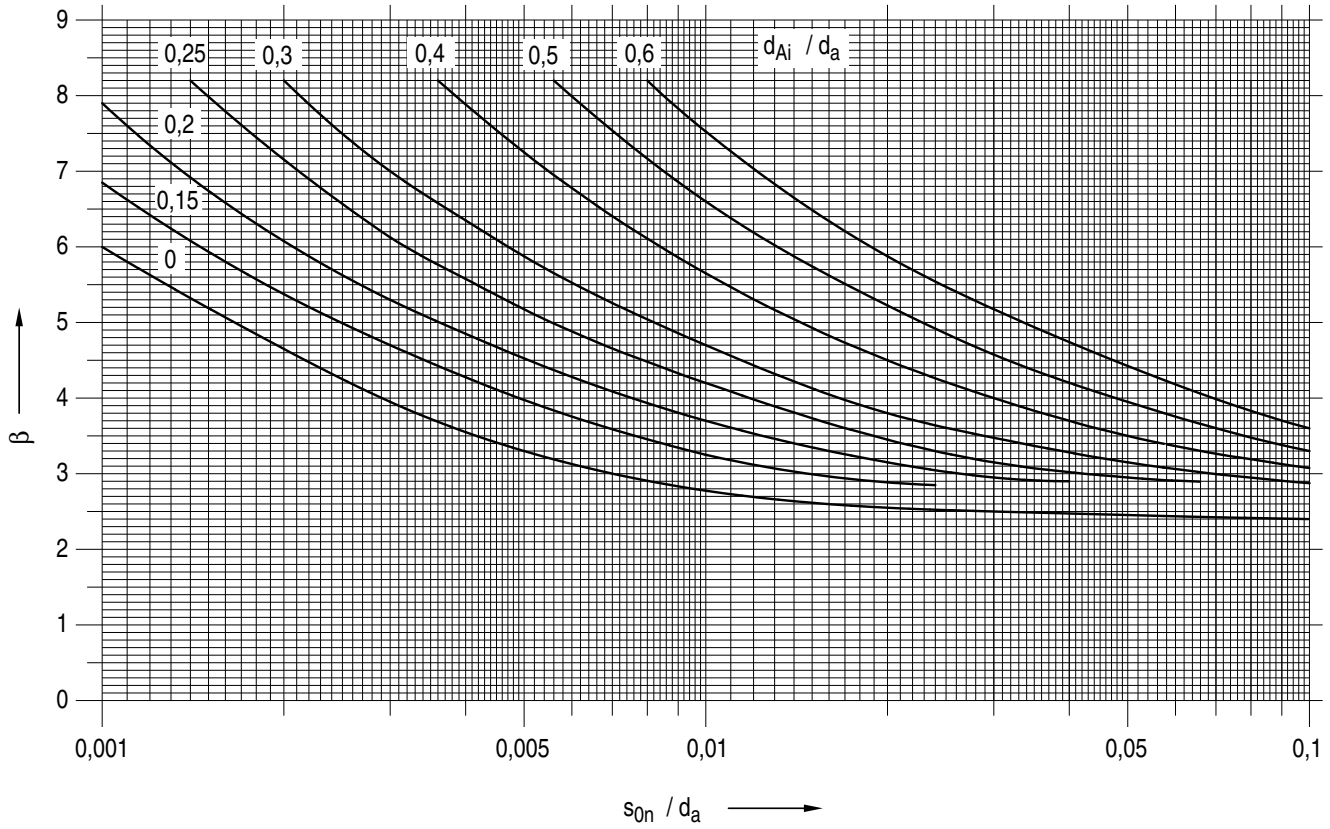


Bild A 2.5-4: Berechnungsbeiwerte ß für gewölbte Böden in Klöpperform

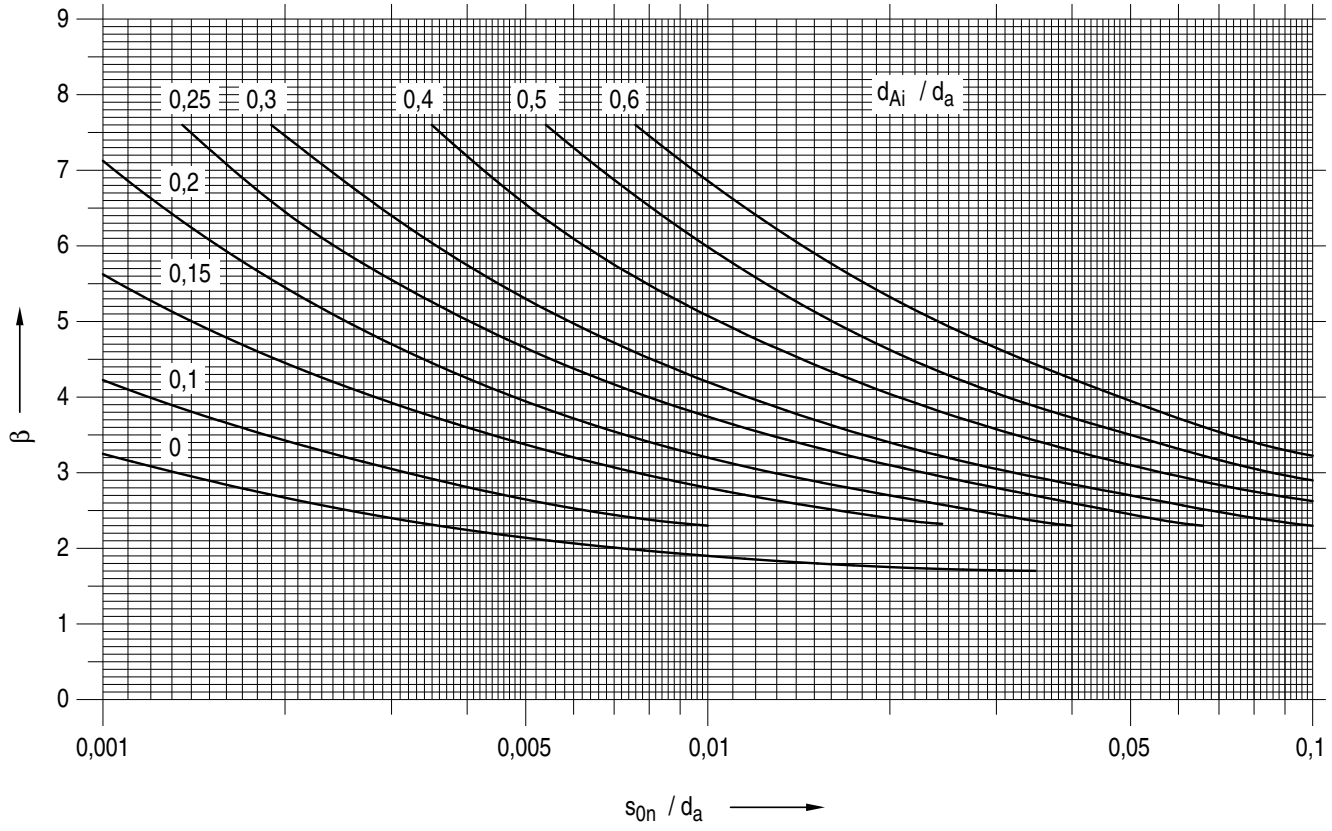


Bild A 2.5-5: Berechnungsbeiwerte ß für gewölbte Böden in Korbbogenform

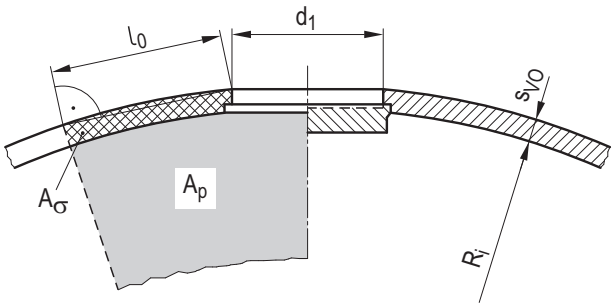


Bild A 2.5-6: Gewölbter Boden mit Ausschnitt

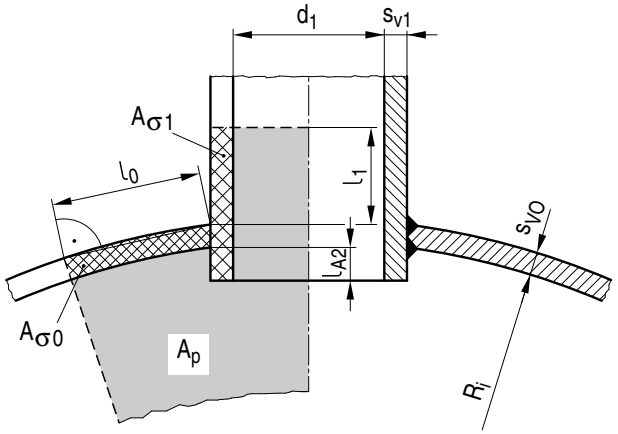


Bild A 2.5-7: Gewölbter Boden mit Abzweig (eingeschweißte rohrförmige Verstärkung)

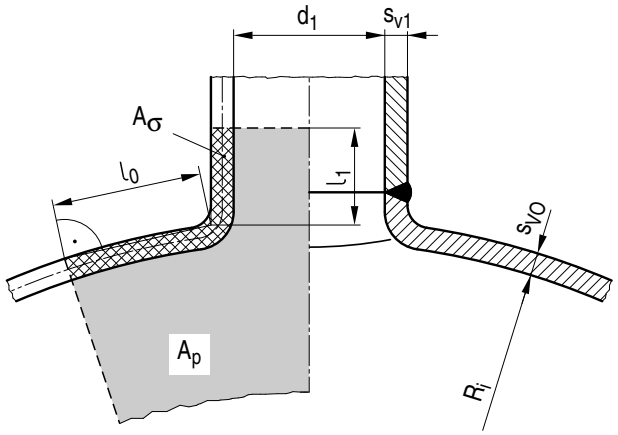


Bild A 2.5-8: Gewölbter Boden mit ausgehalstem Ausschnitt

$\frac{s_{0n}}{R}$	f_k	f_k'
0,001	5,5	4,0
0,003	4,0	2,9
0,005	3,7	2,7
0,010	3,5	2,6
0,1	3,0	2,2
Zwischenwerte sind linear zu interpolieren.		

Tabelle A 2.5-1: Sicherheitsbeiwerte gegen elastisches Einbeulen bei äußerem Überdruck

A 2.6 Tellerböden

A 2.6.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt A 2.6

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
a_1, a_2, a_D a_F, a_H, a_S, a_V	Hebelarme gemäß Bild A 2.6-1	mm
b	tragende Breite des Flansches	mm
c_1	Zuschlag zur Wanddicke zur Berücksichtigung von Fertigungstoleranzen	mm
c_2	Zuschlag zur Wanddicke zur Berücksichtigung der Wanddickenminderung infolge chemischer oder mechanischer Abnutzung	mm
d_1	Durchmesser im Schnittpunkt Flanschblatt mit Kugelschale	mm
d_a	Außendurchmesser des Flansches	mm
d_a'	Durchmesser der äußeren Kugelschale	mm
d_D	mittlerer Durchmesser oder Durchmesser des Berührungskreises einer Dichtung	mm
d_i	Innendurchmesser des Flansches	mm
d_i'	Durchmesser der inneren Kugelschale	mm
d_L	Schraubenlochdurchmesser	mm
d_L'	Berechnungsdurchmesser eines Schraubenloches	mm
d_p	Schwerpunktdurchmesser	mm
d_t	Lochkreisdurchmesser	mm
h_F	Höhe des Flanschblattes	mm
r_a'	Radius der äußeren Kugelschale	mm
r_i'	Radius der inneren Kugelschale	mm
s_n	Nennwanddicke	mm
s_0	Wanddicke der Kugelschale	mm
F_D	Dichtungskraft	N
F_{DB}	Betriebsdichtungskraft	N
$F_{DBU/L}$	erforderliche Dichtungskraft für den Betriebszustand bei Krafthauptschlussverbindungen	N
F_{DV}	Dichtungskraft im Einbauzustand	N
F_F	Ringflächenkraft	N
F_H	Horizontalkraft	N
F_S	Schraubenkraft	N
$F_{SBU/L}$	Mindestwert der Schraubenkraft für den Betriebszustand bei Krafthauptschlussverbindungen	N
F_{S0}	Schraubenkraft im Einbauzustand	N
F_V	Vertikalkraft	N
M_a	Moment der äußeren Kräfte	Nmm
M_{aB}	Moment der äußeren Kräfte im Betriebszustand	Nmm
M_{a0}	Moment der äußeren Kräfte im Einbauzustand	Nmm
M_b	Biegemoment	Nmm
M_t	Torsionsmoment	Nmm
S_m	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1	N/mm²
Q	Querkraft	N
σ_{BO}	oberer Grenzwert der zulässigen Dichtungsflächenpressung im Betrieb	N/mm²
σ_{VO}	oberer Grenzwert der Flächenpressung für die Vorverformung der Dichtung	N/mm²
σ_{VU}	unterer Grenzwert der Flächenpressung für die Vorverformung der Dichtung	N/mm²
$\sigma_{VU/L}$	Mindestflächenpressung im Einbauzustand gemäß Abschnitt A 2.11	N/mm²
μ	Reibbeiwert	—

A 2.6.2 Allgemeines

(1) Tellerböden, die z. B. zum Abschluss von Armaturengehäusen verwendet werden, bestehen aus einer flach- oder tiefgewölbten Kugelschale und einem anschließenden Flanschring. Die Festigkeitsberechnung umfasst daher die Berechnung des Flanschringes und die der Kugelschale.

(2) Entsprechend der geometrischen Verhältnisse wird unterschieden zwischen Ausführung I nach **Bild A 2.6-1** als flachgewölbte Kugelschale ($y > 0$) und Ausführung II nach **Bild A 2.6-2** als tiefgewölbte Kugelschale ($y = 0$).

A 2.6.3 Berechnung des Flanschringes

(1) Die Festigkeitsbedingungen für den Flanschring lauten:

$$\frac{F_H}{2 \cdot \pi \cdot b \cdot h_f} \le S_m \qquad \text{(A 2.6-1)}$$

$$\frac{M_a}{2 \cdot \pi \cdot \left[\frac{b}{4} \cdot h_F^2 + \frac{d_1}{8} \cdot \left(s_e^2 - s_0^2\right)\right]} + \frac{F_H}{3 \cdot \pi \cdot b \cdot h_F} \le S_m \qquad \text{(A 2.6-2)}$$

mit

$s_e = s_n - c_1 - c_2$

Die Wanddicke s_0 der Kugelschale ohne Zuschläge beträgt bei einem Durchmesserverhältnis $d_a'/d_i' \le 1{,}2$

$$s_0 = \frac{r_i' \cdot p}{2 \cdot S_m - p} \qquad \text{(A 2.6-3)}$$

oder

$$s_0 = \frac{r_a' \cdot p}{2 \cdot S_m} \qquad \text{(A 2.6-4)}$$

mit $d_a' = 2 \cdot r_a'$ und $d_i' = 2 \cdot r_i'$

Bei $1{,}2 \le d_a'/d_i' \le 1{,}5$ sind folgende Gleichungen für die Wanddicke s_0 der Kugelschale anzuwenden:

$$s_0 = r_i' \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{2p}{2 \cdot S_m - p}} - 1\right) \qquad \text{(A 2.6-5)}$$

$$s_0 = r_a' \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{2 \cdot p}{2 \cdot S_m - p}} - 1}{\sqrt{1 + \frac{2 \cdot p}{2 \cdot S_m - p}}} \qquad \text{(A 2.6-6)}$$

Die Gleichungen (A 2.6-3) bis (A 2.6-6) liefern gleiche Ergebnisse, wenn $r_i' = r_a' - s_0$ gesetzt wird.

(2) Das auf den Schwerpunkt P_S des Flansches bezogene Moment M_a der äußeren Kräfte beträgt für den Betriebszustand:

$$M_{aB} = F_S \cdot a_S + \left(F_V + F_{ax} + \frac{4 \cdot M_B}{d_1}\right) \cdot a_V + F_F \cdot a_F + F_D \cdot a_D + F_H \cdot a_H \qquad \text{(A 2.6-7)}$$

Die Dichtkraft F_D wird bei Übertragung der Querkraft durch Reibschluss ermittelt aus:

$$F_D = \max\left(\frac{Q}{\mu} + \frac{2 \cdot M_t}{\mu \cdot d_D} - \frac{2 \cdot M_b}{d_D};\ F_{DB}\right) \qquad \text{(A 2.6-8)}$$

Die Dichtkraft F_D wird bei Übertragung der Querkraft durch Formschluss ermittelt aus:

$$F_D = \max\left[\frac{2\cdot M_t}{\mu\cdot d_D} - \max\left(\frac{2\cdot M_b}{d_D};\frac{4\cdot M_b}{d_t}\right);\ F_{DB}\right] \qquad \text{(A 2.6-9)}$$

Das Moment M_a beträgt für den Einbauzustand:

$$M_{a0} = F_{S0}\,(a_S + a_D) \qquad \text{(A 2.6-10)}$$

Die im Uhrzeigersinn drehenden Momente sind in den Gleichungen (A 2.6-7) und (A 2.6-10) mit negativem Vorzeichen einzusetzen. Die Festigkeitsbedingung in Gleichung (A 2.6-2) ist mit beiden Momenten M_{aB} und M_{a0} zu rechnen, wobei für den Einbauzustand $s_0 = 0$ einzusetzen ist.

(3) Die Kräfte ergeben sich aus folgenden Gleichungen:

a) Schraubenkraft im Betriebszustand

$$F_{SBU/L} = F_V + F_F + F_{DBU/L}\cdot S_D + F_{ax} + \frac{4\cdot M_b}{d_D} + F_Z \qquad \text{(A 2.6-11)}$$

Für S_D ist mindestens der Wert 1,2 einzusetzen.

Beim Spannungsnachweis der Schrauben darf anstelle des Dichtungsdurchmessers d_D der Lochkreisdurchmesser d_t eingesetzt werden.

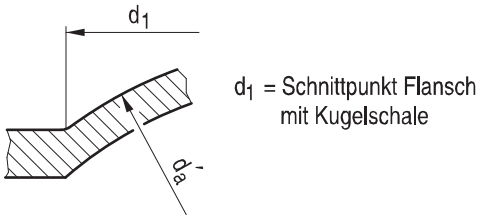
F_Z wird bei Übertragung der Querkraft durch Reibschluss ermittelt aus:

$$F_Z = \max\left\{0;\frac{Q}{\mu} + \frac{2\cdot M_t}{\mu\cdot d_D} - F_{DBU/L} - \frac{2\cdot M_b}{d_D}\right\} \qquad \text{(A 2.6-12)}$$

F_Z wird bei Übertragung der Querkraft durch Formschluss ermittelt aus:

$$F_Z = \max\left\{0;\frac{2\cdot M_t}{\mu\cdot d_D} - F_{DBU/L} - \max\left(\frac{2\cdot M_b}{d_D};\frac{4\cdot M_b}{d_t}\right)\right\} \qquad \text{(A 2.6-13)}$$

Festlegung von d_1 :



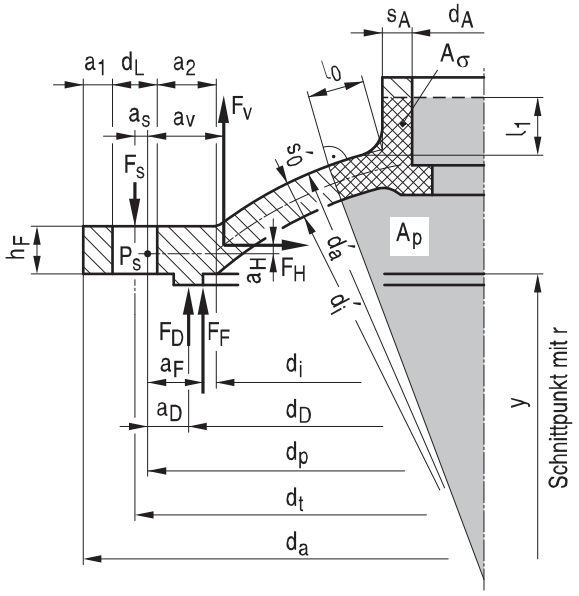


Bild A 2.6-1: Tellerboden mit flachgewölbter Kugelschale (Ausführung I, y > 0)

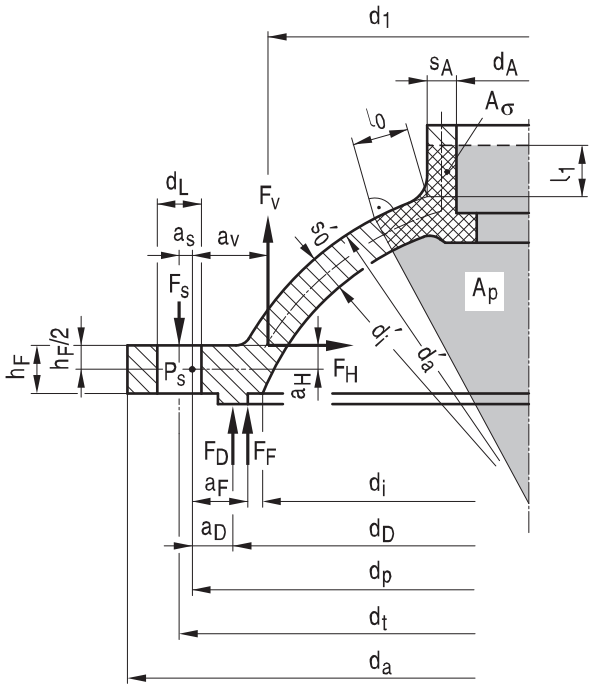


Bild A 2.6-2: Tellerboden mit tiefgewölbter Kugelschale (Ausführung II, y = 0)

b) die Vertikalkomponente der Bodenkraft

$$F_V = p\cdot\frac{\pi}{4}\cdot d_i^2 \qquad \text{(A 2.6-14)}$$

c) die Ringflächenkraft

$$F_F = p\cdot\frac{\pi}{4}\cdot\left(d_D{}^2 - d_i{}^2\right) \qquad \text{(A 2.6-15)}$$

d) die Dichtungskraft im Betriebszustand

$$F_{DBU/L} = \pi\cdot d_D\cdot b_D\cdot\sigma_{BU/L} \qquad \text{(A 2.6-16)}$$

Die zulässige (maximal ertragbare) Standkraft der Dichtung im Betriebszustand beträgt

$F_{DBO} = \pi \cdot d_D \cdot b_D \cdot \sigma_{BO}$

mit

b_D, $\sigma_{BU/L}$ und σ_{BO} gemäß Abschnitt A 2.11.

e) die Horizontalkomponente der Bodenkraft

$$F_H = p\cdot\frac{\pi}{2}\cdot d_1\cdot\sqrt{r^2 - \frac{d_i^2}{4}} \qquad \text{(A 2.6-17)}$$

mit

$$r = \frac{d_i'}{2}$$

Für den Einbauzustand gilt als Schraubenkraft F_{S0U}

$$F_{SOU} = \max.\ \left\{F_{DVU/L}\cdot S_D;\ F_{SBU/L}\cdot 1{,}1\right\} \qquad \text{(A 2.6-18)}$$

mit

$F_{DVU} = \pi \cdot d_D \cdot b_D \cdot \sigma_{VU/L}$

S_D mindestens 1,2

Im Einbauzustand darf die Dichtung höchstens mit

$F_{DVO} = \pi \cdot d_D \cdot b_D \cdot \sigma_{VO}$

belastet werden.

$\sigma_{VU/L}$ und σ_{VO} gemäß Abschnitt A 2.11.

(4) Die Hebelarme der Kräfte in den Momentengleichungen (A 2.6-7) und (A 2.6-10) ergeben sich aus **Tabelle A 2.6-1**.

(5) Die tragende Breite des Flansches beträgt:

$$b = 0{,}5\cdot(d_a - d_i - 2\cdot d_L') \qquad \text{(A 2.6-19)}$$

mit $d_L' = v \cdot d_L$

Für Innendurchmesser $d_i \geq 500$ mm ist $v = 0{,}5$ und für $d_i < 500$ mm gilt $v = 1 - 0{,}001 \cdot d_i$ (d_i in mm).

(6) Der Schwerpunktdurchmesser d_p ergibt sich aus:

$$d_p = d_a - 2 \cdot S_a \qquad \text{(A 2.6-20)}$$

mit

$$S_a = \frac{0{,}5 \cdot a_1^2 + a_2 \cdot (a_1 + d_L + 0{,}5 \cdot a_2)}{a_1 + a_2} \qquad \text{(A 2.6-21)}$$

und

$$a_1 = 0{,}5 \cdot (d_a - d_t - d_L) \qquad \text{(A 2.6-22)}$$

$$a_2 = 0{,}5 \cdot (d_t - d_i - d_L) \qquad \text{(A 2.6-23)}$$

Hebelarm	Tellerboden	
	Ausführung 1	Ausführung 2
a_S	$0{,}5\ (d_t - d_p)$	
a_V	$0{,}5\ (d_p - d_1)$	
a_D	$0{,}5\ (d_p - d_D)$	
a_H	graphisch ermitteln	$0{,}5 \cdot h_F$
a_F	$a_D + 0{,}5\ (d_D - d_i)$	

Tabelle A 2.6-1: Hebelarme für die Gleichungen (A 2.6-7) und (A 2.6-10)

A 2.6.4 Berechnung der Kugelschale unter innerem Überdruck

Die Berechnung der Kugelschale erfolgt nach Abschnitt A 2.3.4.

A 2.7 Ebene Platten

A 2.7.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt A 2.7

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
a_D	Hebelarm	mm
d_A	Ausschnittdurchmesser	mm
d_D	mittlerer Durchmesser oder Durchmesser des Berührungskreises einer Dichtung	mm
d_i	Innendurchmesser	mm
d_t	Lochkreisdurchmesser	mm
p	Innendruck	MPa
S_m	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1	N/mm²
s_0	rechnerisch erforderliche Wanddicke	mm
s_{0n}	Nennwanddicke der Wand abzüglich Zuschläge	mm
s_{RO}	erforderliche Plattendicke am Rand	mm
E	Elastizitätsmodul	N/mm²
F_D	Maximale Dichtungskraft unter Berücksichtigung der durch das Anzugsverfahren bedingten Schraubenkraftstreuung	N

Die Berechnungswerte und weitere Formelzeichen werden bei den zugehörigen Gleichungen erläutert.

A 2.7.2 Geltungsbereich

Die nachstehenden Berechnungsregeln gelten für ebene Platten mit und ohne Randmoment unter Druckbelastung im Bereich

$$0{,}543 \cdot \sqrt[4]{\frac{p}{E}} \leq \frac{s_{0n,Pl}}{d_i} \leq \frac{1}{3}$$

A 2.7.3 Berechnung

A 2.7.3.1 Mit zylindrischem Schuss fest verbundene runde ebene Platte

(1) Bei der mit einem zylindrischen Schuss verbundenen Platte nach **Bild A 2.7-1** sind Platte und Zylinder gemeinsam zu betrachten.

(2) Entsprechend **Tabelle 7.7-1** Fußnote 1) bestehen zwei Dimensionierungsmöglichkeiten für die Verbindung ebene Platte/Zylinder.

Hinweis:
Alternative 2 erlaubt gegenüber Alternative 1 dünnere ebene Platten bei größeren Zylinderwanddicken.

a) Alternative 1:

Vordimensionierung der Platte

$$s_{0,\,Pl} = 0{,}45 \cdot d_i \cdot \sqrt{\frac{p}{S_m}} \qquad \text{(A 2.7-1)}$$

Vordimensionierung des Zylinders entsprechend Abschnitt A 2.2.

Kontrolle der Spannungen im Zylinder:

$$3 \cdot S_m \geq p \cdot \left[6 \cdot B_1^2 \cdot \frac{0{,}82 + 0{,}85 \cdot \frac{B_2}{B_3^2} \cdot \sqrt{B_1}}{6{,}56 + 3{,}31 \cdot \frac{B_2^2}{B_3} \cdot \sqrt{B_1}} + \frac{1}{2} \cdot B_1 + 1 \right] \qquad \text{(A 2.7-2)}$$

mit $B_1 = \frac{d_i + s_{0n,Zyl}}{2 \cdot s_{0n,Zyl}}$ (A 2.7-3)

$$B_2 = \frac{s_{0n,Pl}}{s_{0n,Zyl}} \qquad \text{(A 2.7-4)}$$

$$B_3 = \frac{d_i + s_{0n,Zyl}}{2 \cdot s_{0n,Pl}} \qquad \text{(A 2.7-5)}$$

b) Alternative 2:

Vordimensionierung der Platte

$$s_{0,Pl} = \left(0{,}45 - 0{,}1 \cdot \frac{s_{0n,Zyl}}{s_{0n,Pl}} \right) \cdot d_i \cdot \sqrt{\frac{p}{S_m}} \qquad \text{(A 2.7-6)}$$

Vordimensionierung des Zylinders entsprechend Abschnitt A 2.2.

Kontrolle der Spannungen im Zylinder:

$$1{,}5 \cdot S_m \geq p \cdot \left[6 \cdot B_1^2 \cdot \frac{0{,}82 + 0{,}85 \cdot \frac{B_2}{B_3^2} \cdot \sqrt{B_1}}{6{,}56 + 3{,}31 \cdot \frac{B_2^2}{B_3} \cdot \sqrt{B_1}} + \frac{1}{2} \cdot B_1 + 1 \right] \qquad \text{(A 2.7-7)}$$

mit $B_1 = \frac{d_i + s_{0n,Zyl}}{2 \cdot s_{0n,Zyl}}$ (A 2.7-8)

$$B_2 = \frac{s_{0n,Pl}}{s_{0n,Zyl}} \qquad \text{(A 2.7-9)}$$

$$B_3 = \frac{d_i + s_{0n,Zyl}}{2 \cdot s_{0n,Pl}} \qquad \text{(A 2.7-10)}$$

Bei beiden Alternativen kann es erforderlich sein, die bei der Vordimensionierung erhaltenen Wanddicken für Platte oder Zylinder oder in Kombination für Platte und Zylinder zu vergrößern und die Kontrolle der Spannungen im Zylinder am Übergang zur Platte nach Gleichung (A 2.7-2) oder (A 2.7-7) zu wiederholen.

(3) Ausschnitte in ebenen Platten nach dem **Bild A 2.7-1** sind entsprechend Abschnitt A 2.8.2.3 zu verstärken. Alternativ darf das Verfahren nach Abschnitt A 3.3.5 Gleichung (A 3.3-4) verwendet werden.

(4) Nichtmittige Ausschnitte dürfen wie zentrale Ausschnitte behandelt werden.

(5) Bei einem Durchmesserverhältnis $d_A/d_i > 0{,}7$ ist die Platte als Flansch nach Abschnitt A 2.10 zu berechnen.

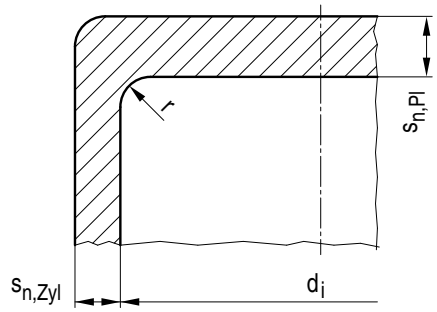


Bild A 2.7-1: Mit einem zylindrischen Schuss fest verbundene ebene Platte (konstruktive Ausführung siehe Bild 5.2-7)

A 2.7.3.2 Unverankerte runde Platten mit zusätzlichem Randmoment

(1) Bei ebenen, am Rande verschraubten und mit einem Dichtelement versehenen Platten ist neben der Festigkeitsberechnung nach Gleichung (A 2.7-11) eine Verformungsbetrachtung nach Gleichung (A 2.7-14) durchzuführen, damit ein Dichtbleiben der Verbindung sichergestellt ist, wobei der Einbauzustand, der Prüfzustand und der Betriebszustand in Betracht zu ziehen sind.

(2) Die erforderliche Wanddicke s_0 unverankerter runder Platten mit zusätzlichem gleichsinnigen Randmoment nach **Bild A 2.7-2** beträgt

$$s_0 = C \cdot d_D \cdot \sqrt{\frac{p}{S_m}} \qquad \text{(A 2.7-11)}$$

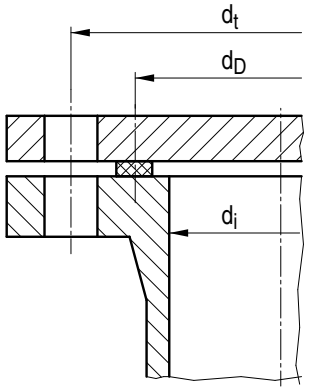


Bild A 2.7-2: Runde ebene Platten mit zusätzlichem Randmoment

Der C-Wert ist in Abhängigkeit vom Verhältnis d_t/d_D und dem Wert δ aus **Bild A 2.7-3** zu entnehmen. Hierbei beträgt das Verhältnis der erforderlichen Schraubenkraft zur Innendruckkraft

$$\delta = 1 + 4 \cdot \frac{\frac{\sigma_{BU/L}}{p} \cdot b_D \cdot S_D}{d_D} \qquad \text{(A 2.7-12)}$$

wobei in der Regel $S_D = 1{,}2$ eingesetzt wird. b_D ist die Dichtungsbreite gemäß Abschnitt A 2.11.

Das gleiche Ergebnis für den C-Wert wie **Bild A 2.7-3** liefert die Gleichung

$$C = \left\{ 0{,}063 \cdot \left(\frac{0{,}7}{d_t / d_D} + 2{,}6 \right) + 0{,}125 \cdot \delta \cdot \left[0{,}7 \cdot \left(1 - \frac{1}{d_t / d_D} \right) + 2{,}6 \cdot \ln\left(d_t / d_D \right) \right] \right\}^{1/2} \qquad \text{(A 2.7-13)}$$

Die Durchbiegung der Platte mit der Wanddicke s_0 nach Gleichung (A 2.7-11) sollte im Hinblick auf Dichtheitsanforderungen mit Hilfe der Gleichung (A 2.7-14) überprüft werden.

Bei Begrenzung der Durchbiegung auf z. B. $w = 0{,}001 \cdot d_D$ ist in Gleichung (A 2.7-14) $x = 0{,}001$ einzusetzen.

$$s_0 \geq \sqrt[3]{\frac{0{,}0435 \cdot p \cdot {d_D}^3}{x \cdot E} + \frac{1{,}05 \cdot F_D \cdot a_D}{\pi \cdot x \cdot E}} \qquad \text{(A 2.7-14)}$$

mit der Dichtungskraft F_D nach Abschnitt A 2.9 und dem Hebelarm

$$a_D = \frac{d_t - d_D}{2} \qquad \text{(A 2.7-15)}$$

A 2.7.3.3 Unverankerte runde Platte mit Ausschnitt und zusätzlichem Randmoment

Die nachfolgenden Gleichungen gelten für einseitigen Innendruck p und ein gleichsinniges Randmoment aus der zugehörigen Schraubenkraft. Sie sind auf den Auslegungs- und auf den Prüfzustand anzuwenden. Das Maximum der sich ergebenden erforderlichen Plattendicke s_0 ist für die Dimensionierung maßgebend.

Die erforderliche Wanddicke beträgt:

$$s_0 = C \cdot C_{A1} \cdot d_D \cdot \sqrt{\frac{p}{S_m}} \qquad \text{(A 2.7-16)}$$

mit

C	Berechnungsbeiwert aus Bild A 2.7-3	—
C_{A1}	Ausschnittbeiwert aus Bild A 2.7-4	—
d_D	Dichtungsdurchmesser	mm
p	Innendruck, entweder als p_A (Auslegungsdruck) oder p_P (Prüfdruck) einsetzen	MPa

Die erforderliche Plattendicke am Rand ergibt sich hieraus zu:

$$s_{R0} = 0{,}7 \cdot s_0 \qquad \text{(A 2.7-17)}$$

Der Berechnungsbeiwert C ist aus **Bild A 2.7-3** in Abhängigkeit von d_t/d_D und

$$\delta = 1 + 4 \cdot \frac{\frac{\sigma_{BU/L}}{p} \cdot b_D \cdot S_D}{d_D} \qquad \text{(A 2.7-18)}$$

zu entnehmen.

mit

b_D	Dichtungsbreite gemäß Abschnitt A 2.11	mm
S_D	Sicherheitsbeiwert für die Dichtung, entweder als SDP = 1,0 für den Prüfzustand (Stufe P) oder als SDA = 1,2 für den Auslegungszustand (Stufe 0)	—
d_t	Teilkreisdurchmesser	mm
d_D	Dichtungsdurchmesser	mm
$\sigma_{BU/L}$	Mindestflächenpressung im Betriebszustand gemäß Abschnitt A 2.11	N/mm^2

Der Berechnungsbeiwert C_{A1} ergibt sich aus **Bild A 2.7-4** in Abhängigkeit von d_i/d_D und d_t/d_D sowie den Ausführungsformen mit und ohne rohrförmige Verstärkung.

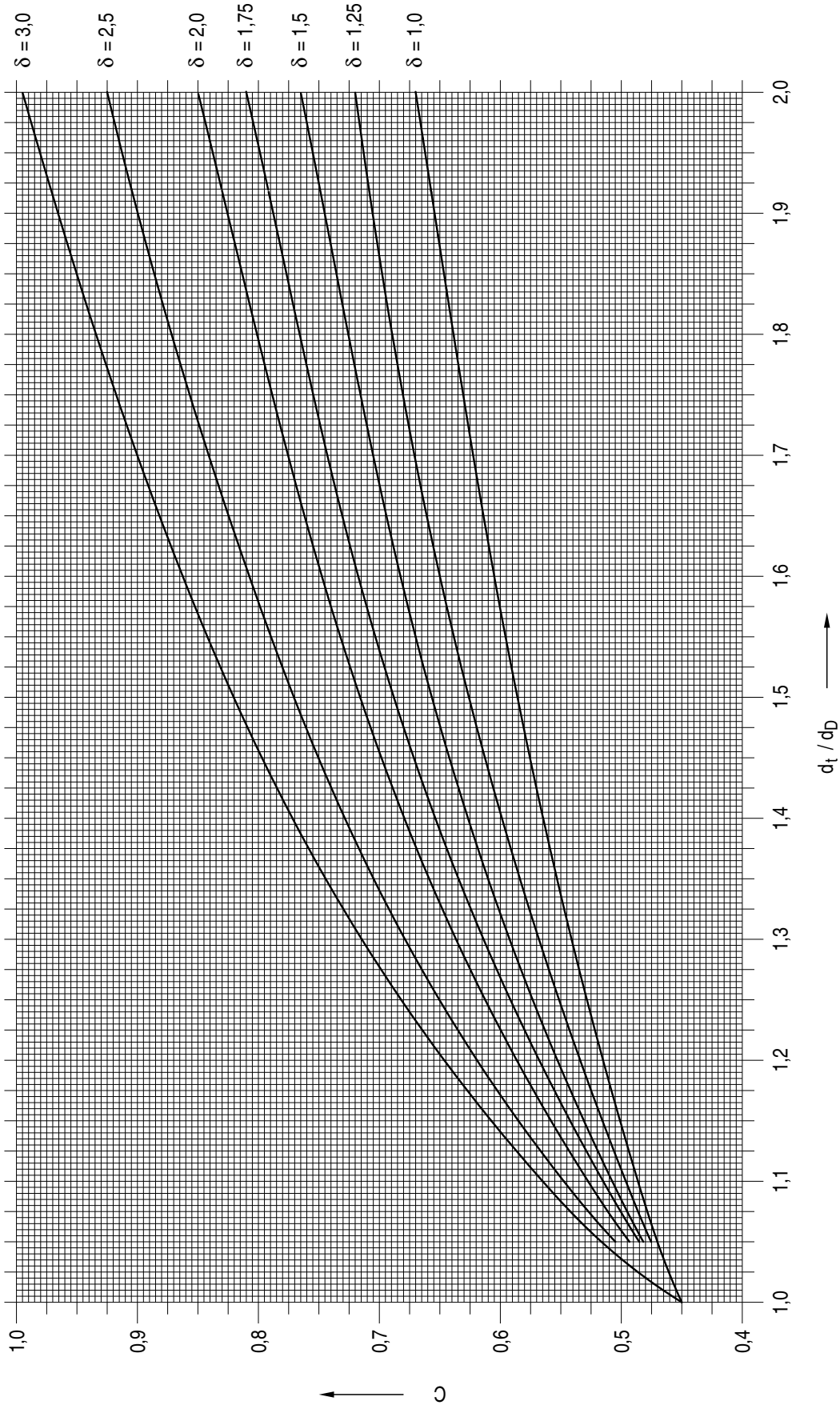


Bild A 2.7-3: Berechnungsbeiwert C von ebenen runden Platten mit gleichsinnigem zusätzlichem Randmoment (nach Gleichung A 2.7-13)

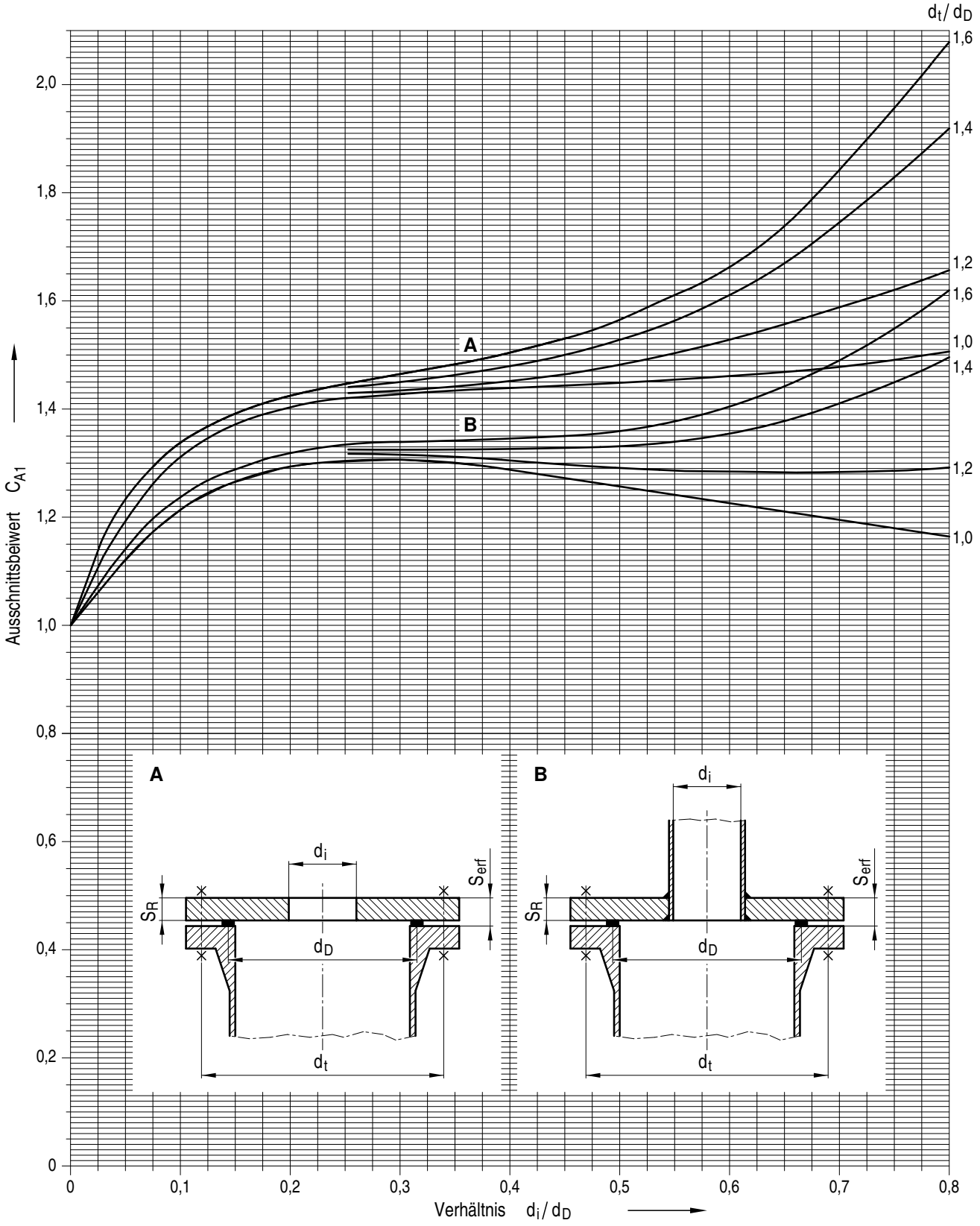


Bild A 2.7-4: Berechnungsbeiwert C_{A1} für unverankerte runde Platten mit Ausschnitt und zusätzlichem Randmoment

A 2.7.3.4 Von innen vorgelegte runde Platte mit Ausschnitt

Die nachfolgende Gleichung gilt für einseitigen Innendruck p. Sie ist auf den Auslegungs- und auf den Prüfzustand anzuwenden. Das Maximum der sich hieraus ergebenden erforderlichen Plattendicke s_0 ist für die Dimensionierung maßgebend.

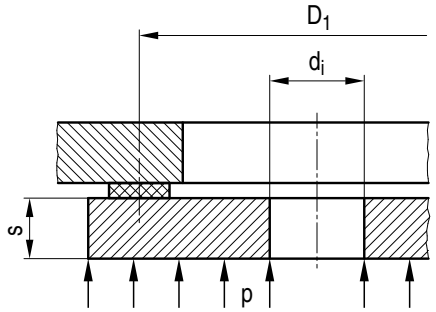


Bild A 2.7-5: Von innen vorgelegte runde Platte mit Ausschnitt

Die erforderliche Wanddicke beträgt:

$$s_0 = C \cdot C_A \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p}{S_m}} \qquad \text{(A 2.7-19)}$$

mit

C	Berechnungsbeiwert = 0,4	—
C_A	Ausschnittbeiwert aus Bild A 2.7-6	—
D_1	Dichtungsdurchmesser	mm
p	Innendruck, entweder als p_A (Auslegungsdruck) oder p_P (Prüfdruck) einsetzen	MPa

Ersatzweise darf der Berechnungsbeiwert C_A aus **Bild A 2.7-6** in Abhängigkeit von d_i/D_1 für Fall A ermittelt werden.

mit

d_i	Innendurchmesser des Ausschnitts	mm
D_1	Durchmesser der Platte	mm

A 2.7.3.5 Verschraubte rechteckige und elliptische Platten mit Ausschnitt

Die nachfolgenden Gleichungen gelten für einseitigen Innendruck p und ein gleichsinniges Randmoment aus der zugehörigen Schraubenkraft. Sie sind auf den Auslegungs- und auf den Prüfzustand anzuwenden. Das Maximum der sich hieraus ergebenden erforderlichen Plattendicke s_0 ist für die Dimensionierung maßgebend.

Die erforderliche Wanddicke beträgt:

$$s_0 = C \cdot C_{A1} \cdot C_E \cdot f \cdot \sqrt{\frac{p}{S_m}} \qquad \text{(A 2.7-20)}$$

mit

C	Berechnungsbeiwert aus Bild A 2.7-3	—
C_{A1}	Ausschnittbeiwert aus Bild A 2.7-4	—
C_E	Berechnungsbeiwert aus Bild A 2.7-7	—
f	kleinster Dichtungsdurchmesser	mm
e	größter Dichtungsdurchmesser	mm
p	Innendruck, entweder als p_A (Auslegungsdruck) oder p_P (Prüfdruck) einsetzen	MPa

Die erforderliche Plattendicke am Rand ergibt sich hieraus zu:

$$s_{R0} = 0{,}7 \cdot s_0 \qquad \text{(A 2.7-21)}$$

Der Berechnungsbeiwert C ist aus **Bild A 2.7-3** in Abhängigkeit von d_t/d_D und

$$\delta = 1 + 4 \cdot \frac{\frac{\sigma_{VU/L}}{p} \cdot b_D \cdot S_D}{f} \qquad \text{(A 2.7-22)}$$

zu entnehmen.

mit

b_D	Dichtungsbreite gemäß Abschnitt A 2.11	mm
S_D	Sicherheitsbeiwert für die Dichtung, entweder als SDP = 1,0 für den Prüfzustand (Stufe P) oder als SDA = 1,2 für den Auslegungszustand (Stufe 0)	—
$\sigma_{VU/L}$	Mindestflächenpressung im Einbauzustand gemäß Abschnitt A 2.11	N/mm^2
d_t	kleinster einbeschriebener Teilkreisdurchmesser	mm

Der Berechnungsbeiwert C_{A1} ergibt sich aus **Bild A 2.7-4** in Abhängigkeit d_i/f anstelle von D_i/d_D und d_t/f anstelle von d_t/d_D sowie den Ausführungsformen mit und ohne rohrförmige Verstärkung.

Für rechteckige und elliptische Platten kann der Berechnungsbeiwert C_E aus **Bild A 2.7-7** in Abhängigkeit der rechteckig oder elliptisch angeordneten Dichtung ermittelt werden.

A 2.7.3.6 Fest eingespannte ebene Böden

Die nachfolgenden Gleichungen gelten für einseitigen Innendruck p. Sie sind auf den Auslegungs- und auf den Prüfzustand anzuwenden. Die größte Spannung tritt als radiale Biegespannung am Rand auf:

$$\sigma_r = \frac{3 \cdot p \cdot r_a^{\,2}}{4 \cdot s_0^{\,2}} \le 1{,}5 \cdot S_m \qquad \text{(A 2.7-23)}$$

Das Maximum der sich hieraus ergebenden erforderlichen Plattendicke s_0 ist für die Dimensionierung maßgebend:

$$s_0 = \frac{r_a}{2} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot p}{1{,}5 \cdot S_m}} \qquad \text{(A 2.7-24)}$$

mit

r_a	Radius der Platte	mm
p	Innendruck, entweder als p_A (Auslegungsdruck) oder p_P (Prüfdruck) einsetzen	MPa

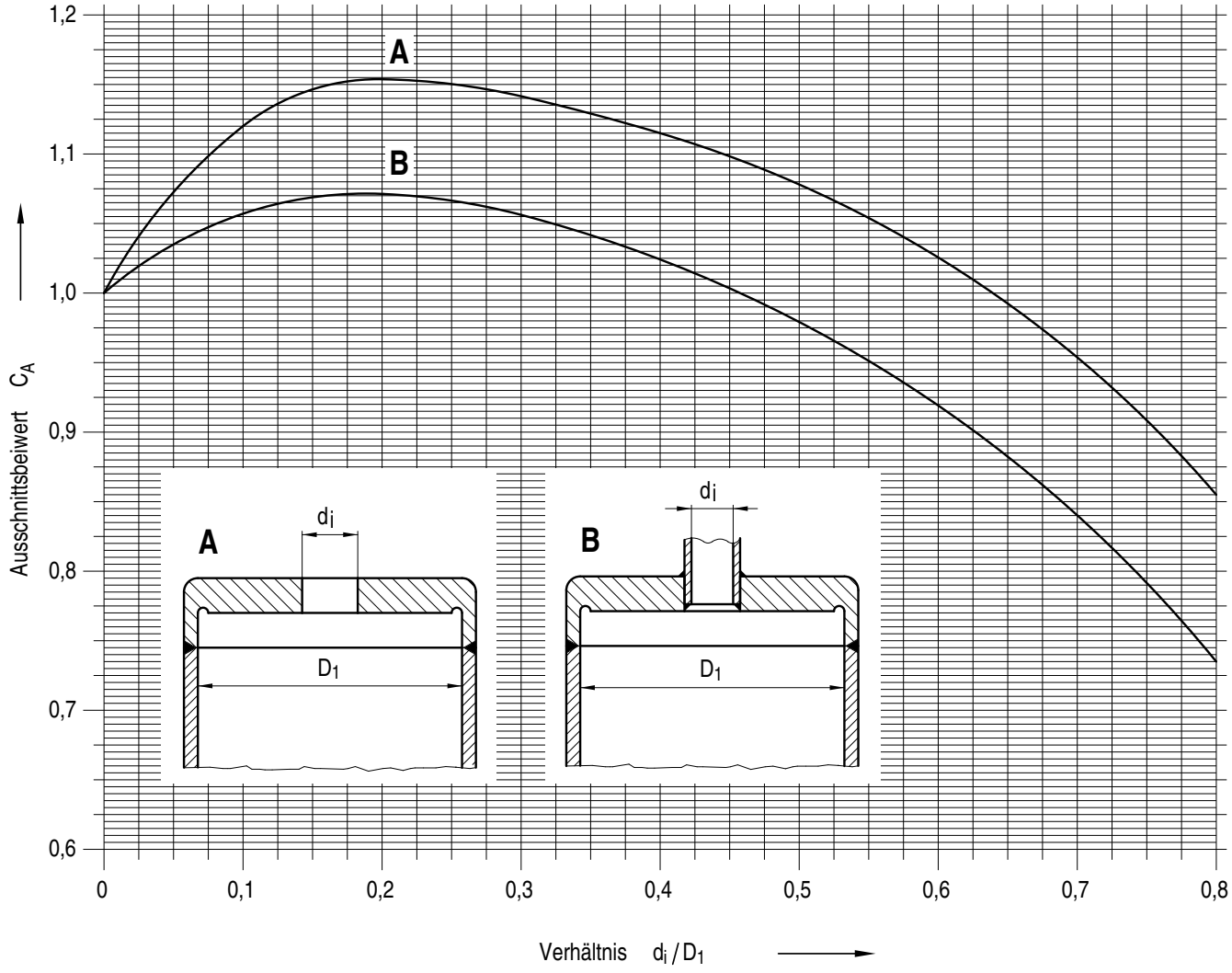


Bild A 2.7-6: Ausschnittbeiwert C_A für verankerte runde Platte mit Ausschnitt

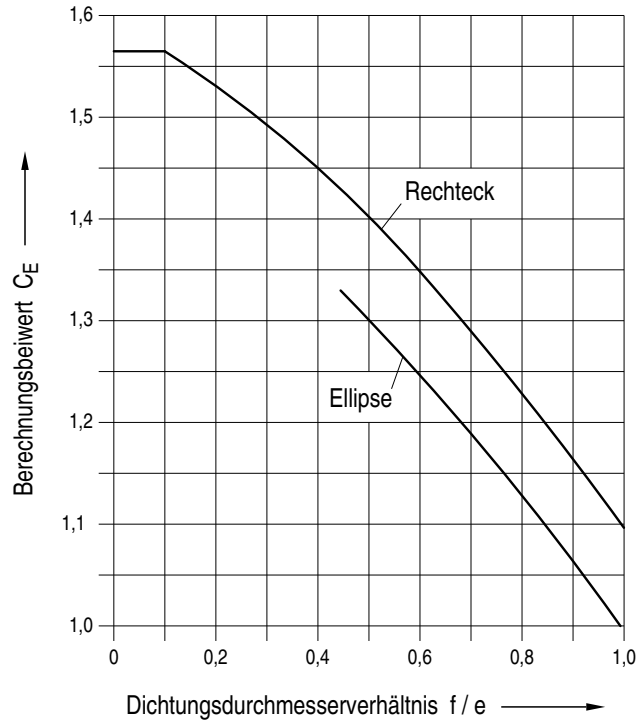


Bild A 2.7-7: Berechnungsbeiwert C_E für rechteckige und elliptische Platten

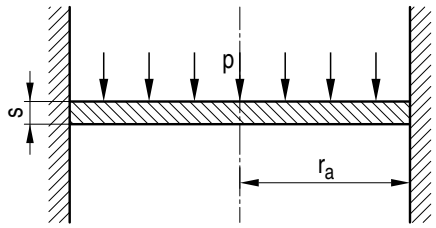


Bild A 2.7-8: Eingespannter ebener Boden

A 2.7.3.7 Gehäusedeckel mit Spindeldurchführung und Ausschnittverstärkung für Armaturen

(1) Der Gehäusedeckel gemäß **Bild A 2.7-9** wird als frei aufliegende Kreisplatte mit dem Außendurchmesser d_t und dem Innendurchmesser d_i abgebildet. Der Innenrand wird als geführt angenommen.

(2) Die Belastung infolge Innendruck p wird aus der Superposition gemäß **Bild A 2.7-10** ermittelt. Ferner wirken die Lasten $F_{s2} = F_{sp} + F_E$ und die Betriebsdichtungskraft F_D, die als gleichmäßig verteilt auf Kreisringen angenommen werden.

(3) Die Spannung infolge Innendruck wird ermittelt aus:

$$\sigma_p = \frac{6}{s^2} \cdot M_p \qquad \text{(A 2.7-25)}$$

Aus der Superposition gemäß **Bild A 2.7-10** ergibt sich

$$M_p = M_{d_t} - M_{(d_t - d_D)} \qquad \text{(A 2.7-26)}$$

Hinweis:
Die nachstehenden Gleichungen für M_{d_t} und $M_{(d_t - d_D)}$ wurden entnommen aus Formulars for Stress and Strain, 5. Ausgabe, R.J. Roark, W.C. Young, Verlag: McGraw-Hill; New York, 1975, Fall 2 b Seite 339.

mit

$$M_{d_t} = \frac{p \cdot d_t^2}{4 \cdot C_8} \cdot L'_{17} \qquad \text{(A 2.7-27)}$$

$$M_{(d_t - d_D)} = \frac{p \cdot d_t^2}{4 \cdot C_8} \cdot L''_{17} \qquad \text{(A 2.7-28)}$$

$$C_8 = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \nu + (1 - \nu) \cdot \left(\frac{d_i}{d_t} \right)^2 \right] \qquad \text{(A 2.7-29)}$$

$$L'_{17} = \frac{1}{4} \cdot \left(1 - \frac{1-\nu}{4} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_t} \right)^4 \right] - \left(\frac{d_i}{d_t} \right)^2 \cdot \left[1 + (1+\nu) \cdot \ln \frac{d_t}{d_i} \right] \right) \qquad \text{(A 2.7-30)}$$

$$L''_{17} = \frac{1}{4} \cdot \left(1 - \frac{1-\nu}{4} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_D}{d_t} \right)^4 \right] - \left(\frac{d_D}{d_t} \right)^2 \cdot \left[1 + (1+\nu) \cdot \ln \frac{d_t}{d_D} \right] \right) \qquad \text{(A 2.7-31)}$$

mit

d_t	Teilkreisdurchmesser	mm
d_d	Dichtungsdurchmesser	mm
d_i	Innendurchmesser der Spindelführung	mm
p	Innendruck. entweder als p_A (Auslegungsdruck) oder p_P (Prüfdruck) einsetzen	MPa
ν	Querkontraktionszahl	—

(4) Die Spannungen infolge Kraftangriff von F_{s2} auf dem Kreisring mit dem Durchmesser k und von F_D am Kreisring mit dem Durchmesser d_D werden ermittelt aus:

$$\sigma_{F_{s2}} = \frac{6}{s^2} \cdot M_K \qquad \text{(A 2.7-32)}$$

$$\sigma_{F_D} = \frac{6}{s^2} \cdot M_{d_D} \qquad \text{(A 2.7-33)}$$

mit

Hinweis:
Die nachstehenden Gleichungen für M_K und M_{d_D} wurden entnommen aus Formulas for Stress and Stain, 5. Ausgabe, R.J. Roark, W.C. Young, Verlag: McGraw-Hill; New York, 1975, Fall 1b Seite 335.

$$M_K = \frac{F_{s2} \cdot d_t \cdot L'_9}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot C_8} \qquad \text{(A 2.7-34)}$$

$$L'_9 = \frac{k}{d_t} \cdot \left(\frac{1+\nu}{2} \cdot \ln \frac{d_t}{k} + \frac{1-\nu}{4} \cdot \left[1 - \left(\frac{k}{d_t} \right)^2 \right] \right)$$

$$M_{d_D} = \frac{F_D \cdot d_t \cdot L'_9}{2 \cdot \pi \cdot d_D \cdot C_8} \qquad \text{(A 2.7-35)}$$

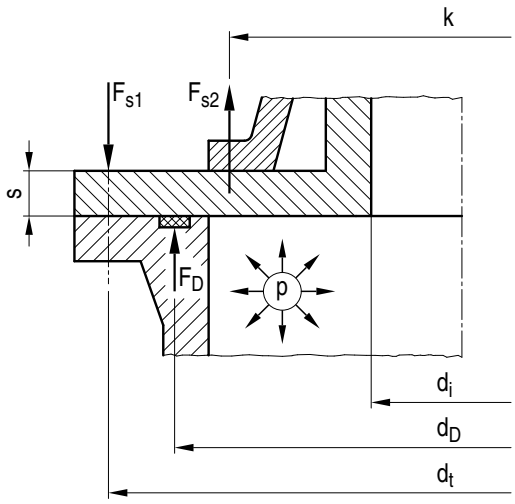
$$L'_9 = \frac{d_D}{d_t} \cdot \left(\frac{1+\nu}{2} \cdot \ln \frac{d_t}{d_D} + \frac{1-\nu}{4} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_D}{d_t} \right)^2 \right] \right)$$

mit

F_{s2}	resultierende Kraft aus F_{sp} (Stellkraft) und F_E (resultierende Kraft z. B. aus Erdbeben)	N
F_D	Betriebsdichtungskraft (= F_{DB})	N
d_t	Teilkreisdurchmesser	mm
d_d	Dichtungsdurchmesser	mm
k	Durchmesser für den Angriff der äußeren Kräfte	mm
ν	Querkontraktionszahl	—

(5) Die Festigkeitsbedingung für den Gehäusedeckel lautet:

$$\sigma_{ges} = \sigma_p + \sigma_F + \sigma_{FD} \leq 1{,}5 \cdot S_m \qquad \text{(A 2.7-36)}$$



$F_{s1} = F_D + F_p + F_{s2}$

$F_{s2} = F_{sp} + F_E$

Bild A 2.7-9: Gehäusedeckel mit Spindeldurchführung und Ausschnittverstärkung

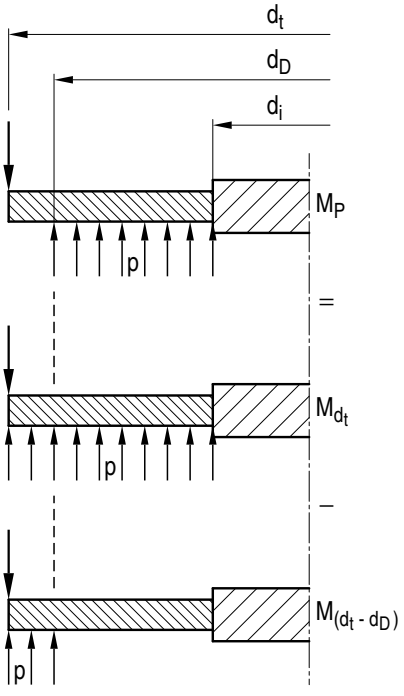
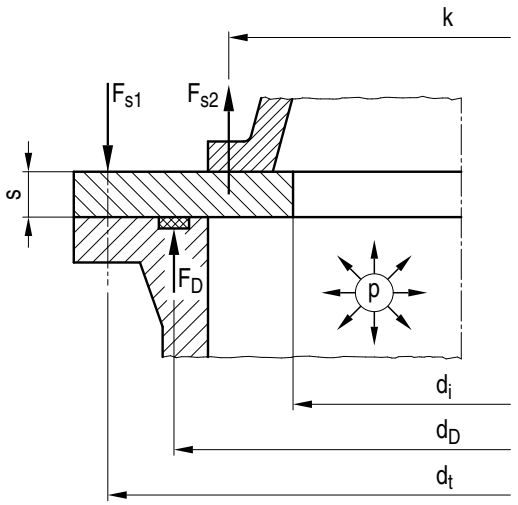


Bild A 2.7-10: Superposition für Innendruck

A 2.7.3.8 Gehäusedeckel mit Spindeldurchführung ohne rohrförmige Ausschnittsverstärkung

(1) Der Gehäusedeckel gemäß **Bild A 2.7-11** wird als frei aufliegende Kreisplatte mit dem Außendurchmesser d_t und dem Innendurchmesser d_i abgebildet. Der Innenrand wird als frei angenommen.



$$F_{s1} = F_D + F_p + F_{s2}$$
$$F_{s2} = F_{sp} + F_E$$

Bild A 2.7-11: Gehäusedeckel mit Spindeldurchführung ohne Ausschnittsverstärkung

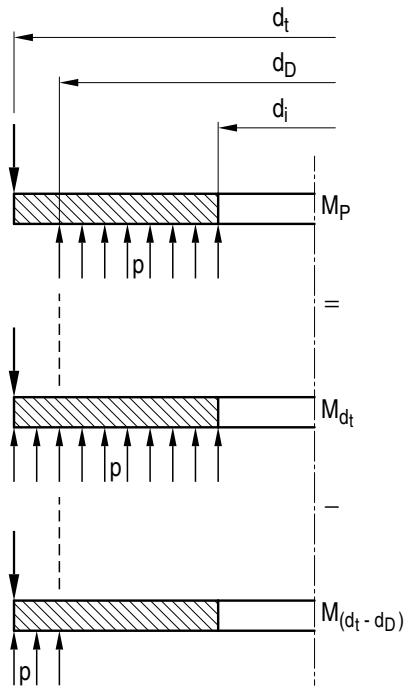


Bild A 2.7-12: Superposition für Innendruck

(2) Die Belastung infolge Innendruck p wird aus der Superposition gemäß **Bild A 2.7-12** ermittelt. Ferner wirken die Lasten $F_{s2} = F_{sp} + F_E$ und die Betriebsdichtungskraft F_D, die als gleichmäßig verteilt auf Kreisringen aufgenommen werden.

(3) Die Spannung infolge Innendruck wird ermittelt aus:

$$\sigma_p = \frac{6}{s^2} \cdot M_p \qquad \text{(A 2.7-37)}$$

Aus der Superposition gemäß **Bild A 2.7-12** er gibt sich

$$M_p = M_{d_t} - M_{(d_t - d_D)} \qquad \text{(A 2.7-38)}$$

Hinweis:
Die nachstehenden Gleichungen für

M_{d_t} und $M_{(d_t - d_D)}$

wurden entnommen aus Formulas for Stress and Strain, 5. Ausgabe, R.J. Roark, W.C. Young, Verlag: McGraw-Hill; New York, 1975, Fall 2a Seite 339.

$$M_{d_t} = \frac{p \cdot d_t^3 \cdot \left(1 - \nu^2\right)}{4 \cdot d_i \cdot C_7} \cdot L'_{17} \qquad \text{(A 2.7-39)}$$

$$M_{(d_t - d_D)} = \frac{p \cdot d_t^3 \cdot \left(1 - \nu^2\right)}{4 \cdot d_i \cdot C_7} \cdot L'_{17} \qquad \text{(A 2.7-40)}$$

$$C_7 = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \nu^2\right) \cdot \left(\frac{d_t}{d_i} - \frac{d_i}{d_t}\right) \qquad \text{(A 2.7-41)}$$

$$L'_{17} = \frac{1}{4} \cdot \left(1 - \frac{1-\nu}{4}\left[1 - \left(\frac{d_i}{d_t}\right)^4\right] - \left(\frac{d_i}{d_t}\right)^2 \cdot \left[1 + (1+\nu) \cdot \ln\frac{d_t}{d_i}\right]\right) \qquad \text{(A 2.7-42)}$$

$$L''_{17} = \frac{1}{4} \cdot \left(1 - \frac{1-\nu}{4} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_D}{d_t}\right)^4\right] - \left(\frac{d_D}{d_t}\right)^2 \cdot \left[1 + (1+\nu) \cdot \ln\frac{d_t}{d_D}\right]\right) \qquad \text{(A 2.7-43)}$$

mit

d_t	Teilkreisdurchmesser	mm
d_d	Dichtungsdurchmesser	mm
d_i	Innendurchmesser der Spindelführung	mm
p	Innendruck, entweder als p_A (Auslegungsdruck) oder p_P (Prüfdruck) einsetzen	MPa
ν	Querkontraktionszahl	—

(4) Die Spannungen infolge Kraftangriff von F_D auf dem Kreisring mit dem Durchmesser d_D und von F_{s2} auf dem Kreisring mit dem Durchmesser k wurden ermittelt aus:

$$\sigma_{F_{s2}} = \frac{6}{s^2} \cdot M_K \qquad \text{(A 2.7-44)}$$

$$\sigma_{F_D} = \frac{6}{s^2} \cdot M_{d_D} \qquad \text{(A 2.7-45)}$$

mit

Hinweis:
Die nachstehenden Gleichungen für M_K und M_{d_D} wurden entnommen aus Formulas for Stress and Strain, 5. Ausgabe, R.J. Roark, W.C. Young, Verlag: McGraw-Hill; New York, 1975, Fall 1a Seite 335.

$$M_K = \frac{F_{s2} \cdot d_t \cdot L'_9}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot d_i} \cdot \left(\frac{1 - \nu^2}{C_7}\right) \qquad \text{(A 2.7-46)}$$

$$L'_9 = \frac{k}{d_t} \cdot \left\{\frac{1+\nu}{2} \cdot \ln\frac{d_t}{k} + \frac{1-\nu}{4} \cdot \left[1 - \left(\frac{k}{d_t}\right)^2\right]\right\}$$

$$M_{d_D} = \frac{F_D \cdot {d_t}^2 \cdot}{2 \cdot \pi \cdot d_D \cdot d_i} \cdot \frac{L''_9}{C_7} \cdot \left(1 - \nu^2\right) \qquad \text{(A 2.7-47)}$$

$$L''_9 = \frac{d_D}{d_t} \cdot \left\{\frac{1+\nu}{2} \cdot \ln\frac{d_t}{d_D} + \frac{1-\nu}{4} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_D}{d_t}\right)^2\right]\right\}$$

mit

F_{s2}	resultierende Kraft aus F_{sp} (Stellkraft) und F_E (resultierende Kraft z. B. aus Erdbeben)	N
F_D	Betriebsdichtungskraft (= F_{DB})	N
d_t	Teilkreisdurchmesser	mm
d_D	Dichtungsdurchmesser	mm
k	Durchmesser für den Angriff der äußeren Kräfte	mm
ν	Querkontraktionszahl	—

(5) Die maximale Spannung ergibt sich dabei als tangentiale Biegespannung aus:

$$\sigma_{ges} = \sigma_p + \sigma_F + \sigma_{FD} \leq 1{,}5 \cdot S_m \qquad \text{(A 2.7-48)}$$

A 2.7.3.9 Dichtplatten ohne Ausschnitt mit Belastung durch einseitigen Druck ohne äußeres Randmoment

Die Dichtplatte wird als frei aufliegende Kreisplatte mit dem Durchmesser d_D abgebildet (siehe **Bild A 2.7-13**). Als Belastung wirkt der gleichmäßig über der ganzen Platte verteilte Druck p.

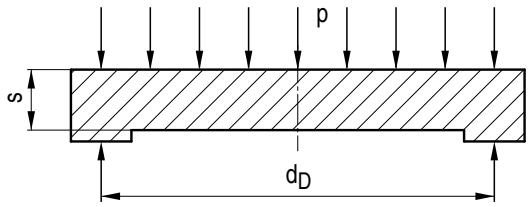


Bild A 2.7-13: Runde ebene Platte

Die maximale Beanspruchung ergibt sich in der Plattenmitte zu

$$\sigma_r = \sigma_t = \frac{3 \cdot d_D^2 \cdot p}{32 \cdot s^2}(3+\nu) \qquad \text{(A 2.7-49)}$$

mit ν = 0,3 folgt hieraus die Festigkeitsbedingung

$$\sigma_r = \sigma_t = 0{,}31 \cdot p \cdot \left(\frac{d_D}{s}\right)^2 \leq 1{,}5 \cdot S_m \qquad \text{(A 2.7-50)}$$

mit

d_D	Dichtungsdurchmesser	mm
s	Plattendicke	mm

A 2.7.3.10 Dichtkegel von Ventilen als Kreisplatte

Der Dichtkegel wird als frei aufliegende Kreisplatte mit dem Durchmesser d_D (siehe **Bild A 2.7-14**) abgebildet. Als Belastung wirkt der gleichmäßig über der ganzen Platte verteilte Druck p und die Last F, die auf einem Kreisring mit dem Durchmesser d_s gleichmäßig verteilt ist.

Die maximale Beanspruchung ergibt sich in der Plattenmitte zu

$$\sigma_r = \sigma_t = \sigma_1 + \sigma_2 \qquad \text{(A 2.7-51)}$$

wobei die maximale Spannung aus dem Innendruck p

$$\sigma_1 = \frac{3 \cdot {d_2}^2 \cdot p}{32 \cdot s^2} \cdot (3+\nu) \qquad \text{(A 2.7-52)}$$

beträgt.

Mit ν = 0,3 folgt hieraus

$$\sigma_1 = 0{,}31 \cdot p \cdot \left(\frac{d_D}{s}\right)^2 \qquad \text{(A 2.7-53)}$$

Die maximale Spannung infolge F beträgt:

$$\sigma_2 = \frac{3 \cdot F}{2 \cdot \pi \cdot s^2} \cdot B_1 \qquad \text{(A 2.7-54)}$$

mit

$$B_1 = 0{,}5 \cdot (1-\nu) + (1+\nu) \cdot \ln\frac{d_D}{d_s} - (1-\nu) \cdot \frac{{d_s}^2}{2 \cdot {d_D}^2} \qquad \text{(A 2.7-55)}$$

mit

d_D	Dichtungsdurchmesser	mm
s	Plattendicke	mm
d_s	wirksamer Durchmesser des Angriffs der Stellkräfte	mm

Die Festigkeitsbedingung lautet

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \leq 1{,}5 \cdot S_m \qquad \text{(A 2.7-56)}$$

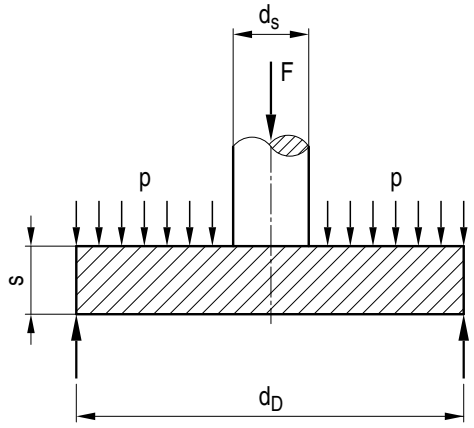


Bild A 2.7-14: Dichtkegel von Ventilen als Kreisplatte

A 2.7.3.11 Dichtkegel von Ventilen als Kreisringplatte

Der Dichtkegel wird als frei aufliegende Kreisringplatte mit freiem Innenrand abgebildet. Der Außendurchmesser ist d_D der Innendurchmesser d_s (siehe **Bild A 2.7-15**). Als Belastung wirken der gleichmäßig über der Kreisringplatte verteilte Druck p und die Last F, die am Innenrand der Kreisringplatte gleichmäßig verteilt ist.

Die maximale Biegespannung ergibt sich am Innenrand als Umfangsspannung zu:

$$\sigma_t = \sigma_1 + \sigma_2 \qquad \text{(A 2.7-57)}$$

wobei die maximale Umfangsspannung aus dem Druck p

$$\sigma_1 = \frac{3 \cdot p}{\left(d_D^2 - d_s^2\right) \cdot s^2} \cdot B_1 \qquad \text{(A 2.7-58)}$$

$$B_1 = \left(\frac{d_D}{2}\right)^4 \cdot (1+\nu) + \left(\frac{d_s}{2}\right)^4 \cdot (1-\nu) - 4 \cdot \left(\frac{d_D}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{d_s}{2}\right)^2 - 4 \cdot (1-\nu) \cdot \left(\frac{d_D}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{d_s}{2}\right)^2 \cdot \ln\frac{d_D}{d_s} \qquad \text{(A 2.7-59)}$$

(frei aufliegende Kreisringplatte mit freiem Innenrand) und die maximale Umfangsspannung aus der Last F

$$\sigma_2 = \frac{3 \cdot F}{2 \cdot \pi \cdot s^2} \cdot B_2 \qquad \text{(A 2.7-60)}$$

$$B_2 = \frac{2 \cdot {d_D}^2 \cdot (1+\nu)}{{d_D}^2 - {d_s}^2} \cdot \ln\frac{d_D}{d_s} + (1-\nu) \qquad \text{(A 2.7-61)}$$

(frei aufliegende Kreisringplatte mit freiem Innenrand und auf Kreisring verteilter Belastung) beträgt.

Die Festigkeitsbedingung lautet

$$\sigma_t = \sigma_1 + \sigma_2 \leq 1{,}5 \cdot S_m \qquad \text{(A 2.7-62)}$$

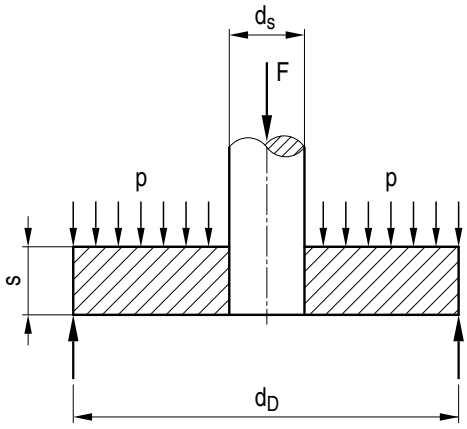


Bild A 2.7-15: Dichtkegel von Ventilen als Kreisringplatte

A 2.8 Ausschnittverstärkungen

A 2.8.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt A 2.8

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
d_{Aa}	Außendurchmesser des Abzweigs	mm
d_{Ae}	Innendurchmesser des Ausschnittes des doppelten Korrosionszuschlages c_2	mm
d_{Ai}	Innendurchmesser der Ausschnittverstärkung zuzüglich des doppelten Korrosionszuschlages c_2	mm
d_{Am}	mittlerer Durchmesser des Stutzens	mm
d_{Hi}	innerer Durchmesser des Grundkörpers	mm
d_{Hm}	mittlerer Durchmesser des Grundkörpers an der Ausschnittstelle	mm
e_A	Bereich der Verstärkung senkrecht zur Wand des Grundkörpers gemessen	mm
e_H	halbe Breite des Verstärkungsbereichs längs der Mittelebene des Grundkörpers gemessen	mm
e'_H	halbe Breite des Bereichs, in dem 2/3 der Verstärkung liegen sollen	mm
l	(siehe Bild 2.8-10)	mm
r_1, r_2, r_3	Rundungsradien	mm
s_A	Nennwanddicke des Stutzens mit Berücksichtigung der Verstärkung, jedoch abzüglich der Zuschläge c_1 und c_2	mm
s_{A0}	rechnerisch erforderliche Wanddicke des Stutzens	mm
s_H	Nennwanddicke der Schale des Behälters oder des Bodens an der Ausschnittstelle mit Berücksichtigung der Verstärkung, jedoch abzüglich der Zuschläge c_1 und c_2	mm
s_{H0}	rechnerisch erforderliche Wanddicke des Grundkörpers	mm
s_R	Nennwanddicke der angeschlossenen Rohrleitung abzüglich der Zuschläge c_1 und c_2	mm
x	Breite des Neigungsversatzes	mm
A_e	Querschnittsfläche der erforderlichen Verstärkung eines Ausschnitts	mm^2
A_1, A_2, A_3	nutzbare Verstärkungsfläche	mm^2
F	Korrekturfaktor gemäß Bild A 2.8-1	—
β	Abzweigwinkel	grd
δ_5	Bruchdehnung	—
φ	Kegelwinkel	grd

A 2.8.2 Dimensionierung von Ausschnittverstärkungen in Behältern

A 2.8.2.1 Geltungsbereich

(1) Der Geltungsbereich nachstehender Berechnungsregeln entspricht den in den Anhängen A 2.2, bis A 2.5, A 2.7 und A 5.2.4 aufgeführten Bereichen.

(2) Die Berechnungsregeln berücksichtigen nur durch inneren Überdruck hervorgerufene Beanspruchungen. Zusätzliche Kräfte und Momente müssen gesondert berücksichtigt werden.

(3) Der Abzweigwinkel β muss größer als oder gleich 60 Grad sein.

A 2.8.2.2 Allgemeines

(1) Ausschnitte sollen rund oder elliptisch sein. Weitere Anforderungen ergeben sich bei Anwendung der Spannungsindex-Methode nach Abschnitt 8.2.2.3. Außer dem dort angegebenen Geltungsbereich sind in diesem Falle die konstruktiven Voraussetzungen für die Spannungsindex-Methode gemäß Abschnitt 5.2.6 einzuhalten.

(2) Die Verstärkung eines Ausschnittes in einem Grundkörper darf wie folgt vorgenommen werden:

a) durch Wahl einer größeren Wanddicke für den Grundkörper als dies für den unverschwächten Grundkörper erforderlich wäre. Diese Wanddicke darf bis zu einer Länge e_H, von der Ausschnittachse gemessen, als Verstärkung berücksichtigt werden,

b) durch Stutzen, die auf einer Länge e_A, von der Außenwand des Grundkörpers gemessen, dickwandiger ausgeführt sind, als dies für die Innendruckbelastung erforderlich wäre. Der als Verstärkung erforderliche Werkstoff ist gleichmäßig auf den Umfang des Stutzens zu verteilen,

c) durch Kombination der unter a) und b) aufgeführten Maßnahmen.

Im Hinblick auf eine beanspruchungsgerechte Formgebung ist die Ausführung c) zu bevorzugen.

(3) Bei der Verstärkung eines Ausschnittes sind folgende Durchmesser- und Wanddickenverhältnisse einzuhalten:

Ein Wanddickenverhältnis s_A/s_H ist bis maximal 2 zulässig für d_{Ai} gleich oder kleiner als 50 mm. Dies gilt auch für Stutzen mit d_{Ai} größer als 50 mm, sofern das Durchmesserverhältnis d_{Ai}/d_{Hi} gleich oder kleiner als 0,2 ist.

Bei Stutzen mit einem Durchmesserverhältnis d_{Ai}/d_{Hi} größer als 0,2 soll grundsätzlich s_A/s_H den Wert 1,3 nicht überschreiten. Größere Werte sind erlaubt, wenn

a) die über vorgenanntes Wanddickenverhältnis hinausgehende zusätzliche Wanddicke des Stutzens nicht zur Verstärkung des Stutzenausschnitts herangezogen, sondern aus konstruktiven Gründen gewählt wird, oder

b) der Stutzen mit verkürztem Verstärkungsbereich ausgeführt wird (z. B. Stutzen, die aus Gründen der verbesserten Prüfbarkeit des Rohrleitungsanschlusses konisch ausgebildet sind), wobei die durch die verkürzte Einflusslänge fehlende Verstärkungsfläche im verkürzten Einflussbereich zusätzlich untergebracht werden darf.

Stutzen größer als oder gleich 120 mm Innendurchmesser sind mit mindestens der 2fachen Wanddicke wie die anschließenden Rohrleitungen auszuführen, wobei sich der Faktor auf die rechnerische Rohrwanddicke bezieht. Auf die Istwanddicke bezogen, muss der Faktor mindestens 1,5 betragen.

(4) Eine Ausschnittverstärkung ist nicht erforderlich, und der Nachweis für Ausschnitte nach A 2.8.2.3 muss nicht geführt werden, falls:

a) ein einzelner Ausschnitt einen Durchmesser hat, der gleich oder kleiner $0{,}2 \cdot \sqrt{0{,}5 \cdot d_{Hm} \cdot s_H}$ ist, oder wenn zwei oder mehrere Ausschnitte innerhalb eines Kreises mit dem Durchmesser $2{,}5 \cdot \sqrt{0{,}5 \cdot d_{Hm} \cdot s_H}$ angeordnet sind, wobei die Summe der Durchmesser solcher unverstärkter Ausschnitte einen Wert von $0{,}25 \cdot \sqrt{0{,}5 \cdot d_{Hm} \cdot s_H}$ nicht überschreiten darf und

b) zwei unverstärkte Ausschnitte keine kleineren Mittenabstände, gemessen auf der Innenseite des Grundkörpers aufweisen als das 1,5fache der Summe ihrer Durchmesser und

c) wenn die Mitte eines unverstärkten Ausschnittes nicht näher als $2{,}5 \cdot \sqrt{0{,}5 \cdot d_{Hm} \cdot s_H}$ von dem Rand einer geometrischen Störstelle entfernt liegt.

(5) Bestehen Grundkörper und Stutzen aus Werkstoffen unterschiedlicher zulässiger Spannung, so ist, wenn der Grundkörperwerkstoff die kleinere zulässige Spannung aufweist, diese für die Berechnung der gesamten Konstruktion maßgebend.

Wenn der Stutzenwerkstoff eine geringere zulässige Spannung aufweist, so sind die im Bereich der geringeren zulässigen Spannungen anzuordnenden Verstärkungsflächen im Verhältnis der zulässigen Spannungen zu vergrößern.

Haben Grundkörperwerkstoff und Stutzenwerkstoff unterschiedlich spezifizierte Wärmedehnungszahlen, so darf ihre Differenz 15 % der Wärmedehnungszahl des Hauptleitungswerkstoffs nicht überschreiten.

A 2.8.2.3 Berechnung

A 2.8.2.3.1 Erforderliche Verstärkung

(1) Die gesamte Querschnittsfläche A der erforderlichen Verstärkung eines Ausschnittes in Zylinder-, Kugel-, Kegelschalen und gewölbten Böden unter Innendruck muss der folgenden Bedingung genügen:

$$A \geq d_{Ae} \cdot s_{H0} \cdot F \qquad \text{(A 2.8-1)}$$

wobei der Faktor F für rechtwinkelige Stutzen gilt und gleich 1 in allen dimensionierungsbestimmenden Ebenen ist. Bei Zylinder- oder Kegelschalen ist F für eine nicht dimensionierungsbestimmende Ebene in Abhängigkeit von deren Winkellage zu der betrachteten Ebene dem **Bild A 2.8-1** zu entnehmen.

(2) Ausschnitte in ebenen Böden, die den halben Bodendurchmesser nicht überschreiten, müssen mindestens folgende Verstärkungsfläche aufweisen:

$$A \geq 0{,}5 \cdot d_{Ae} \cdot s_{H0} \qquad \text{(A 2.8-2)}$$

A 2.8.2.3.2 Mittragende Längen

(1) Vorhandene Radien oder Abschrägungen am Übergang Stutzen/Grundschale gemäß Abschnitt 5.2.6 dürfen in der Gleichung (A 2.8-7) bei der Ermittlung der mittragenden Länge mit berücksichtigt werden.

(2) Die mittragende Länge des Grundkörpers ist wie folgt zu ermitteln:

$$e_H = d_{Ae} \qquad \text{(A 2.8-3)}$$

oder

$$e_H = 0{,}5 \cdot d_{Ae} + s_H + s_A \qquad \text{(A 2.8-4)}$$

Der größere der beiden Werte ist der Berechnung zugrunde zu legen. Zusätzlich gilt, dass 2/3 der Verstärkungsfläche innerhalb eines Bereiches der Länge $2 \cdot e'_H$ liegen müssen (**Bilder A 2.8-8 bis A 2.8-10**), wobei e'_H der größere Wert ist von entweder

$$e'_H = 0{,}5 \cdot \left(d_{Ae} + \sqrt{0{,}5 \cdot d_{Hm} \cdot s_H}\right) \qquad \text{(A 2.8-5)}$$

oder

$$e'_H = 0{,}5 \cdot d_{Ae} + 2/3 \cdot \left(s_H + s_A\right) \qquad \text{(A 2.8-6)}$$

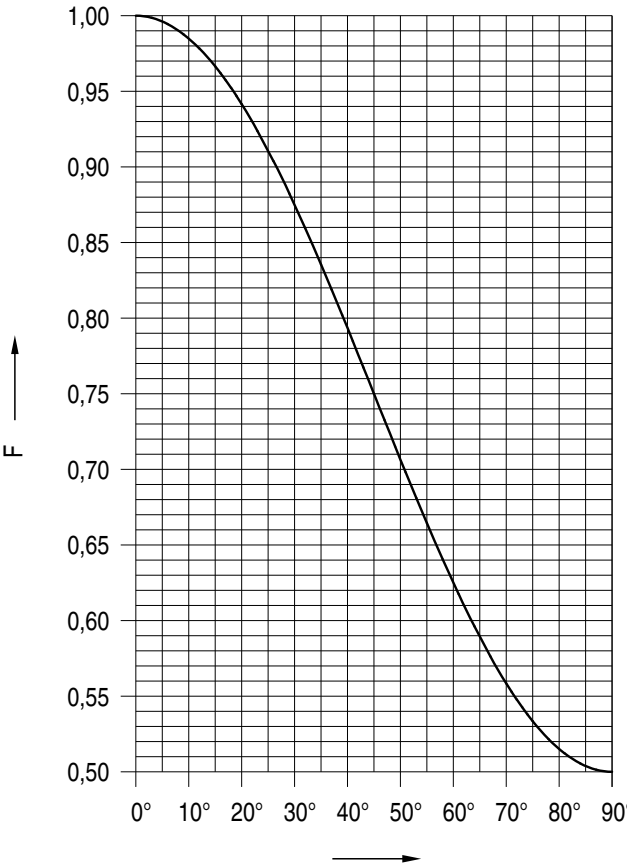


Bild A 2.8-1: Ermittlung des Korrekturfaktors F für rechtwinklige Stutzen in Zylinder- oder Kegelschalen

(3) Die mittragende Länge für Stutzen gemäß den **Bildern A 2.8-2, A 2.8-3, A 2.8-5, A 2.8-6** ist wie folgt zu ermitteln:

$$e_A = 0{,}5 \cdot \left(\sqrt{0{,}5 \cdot d_{Am} \cdot s_A} + r_2\right) \qquad \text{(A 2.8-7)}$$

worin

$$d_{Am} = d_{Ai} + s_A \qquad \text{(A 2.8-8)}$$

ist.

Im Falle eines Stutzens mit konischer Innenfläche nach **Bild A 2.8-6** ist die mittragende Länge unter Verwendung der d_{Ai}- und s_A-Werte an der Stelle des äußeren Durchmessers des Grundkörpers zu bestimmen.

(4) Die mittragende Länge für Stutzen gemäß den **Bildern A 2.8-4 und A 2.8-7** ist wie folgt zu bestimmen:

$$e_A = 0{,}5 \cdot \sqrt{0{,}5 \cdot d_{Am} \cdot s_A} \qquad \text{(A 2.8-9)}$$

wobei $d_{Am} = d_{Ai} + s_A$ (A 2.8-10)

und zusätzlich für Ausschnittverstärkungen gemäß **Bild A 2.8-4**

$$s_A = s_R + 0{,}667 \cdot x \qquad \text{(A 2.8-11)}$$

ist.

Im Fall eines Stutzens mit konischer Innenfläche gemäß **Bild A 2.8-7** ist die obere Grenzlinie der Verstärkungsfläche gegebenenfalls iterativ unter Verwendung der d_{Ai}- und s_A-Werte im Schwerpunkt dieser Stutzenverstärkungsfläche zu bestimmen.

A 2.8.2.3.3 Beanspruchungsschema für nutzbare Verstärkungsflächen

(1) Die für die Erfüllung der Gleichung (A 2.8-1) nutzbaren Verstärkungsflächen A_1, A_2, A_3 sind in den **Bildern A 2.8-8** bis **A 2.8-11** dargestellt, sie müssen die Bedingungen $A_1 + A_2 + A_3$ größer als oder gleich A erfüllen.

(2) Eine gegenseitige Beeinflussung von Stutzenausschnitt und Übergang Kegel - Zylinder ist nur dann zu berücksichtigen, wenn

$$l < 2{,}5 \cdot \sqrt{(d_{Hm}/2) \cdot s_H} \qquad \text{(A 2.8-12)}$$

ist.

Dabei ist

$$d_{Hm} = d_{Hi} + s_H \qquad \text{(A 2.8-13)}$$

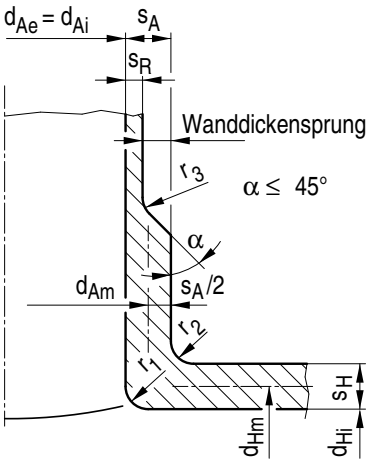


Bild A 2.8-2

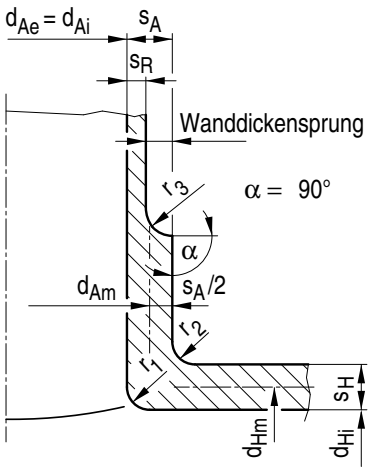


Bild A 2.8-3

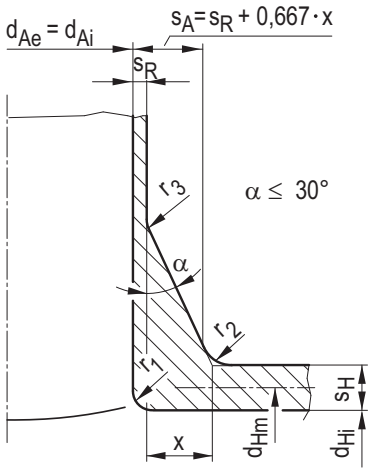


Bild A 2.8-4

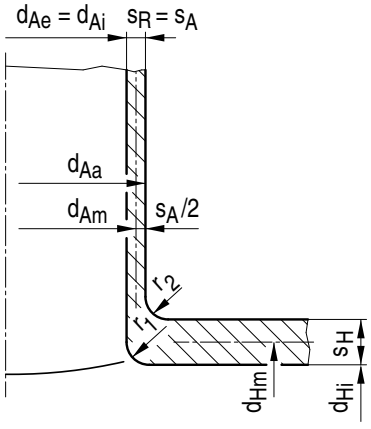


Bild A 2.8-5

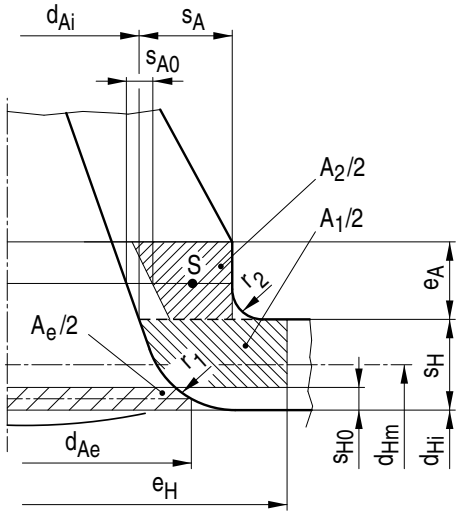


Bild A 2.8-6

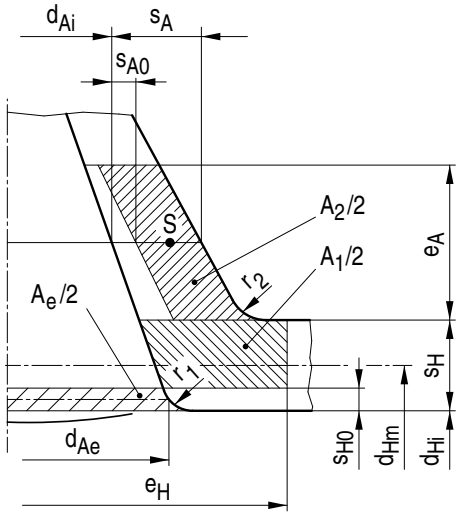


Bild A 2.8-7

Bilder A 2.8-2 bis **A 2.8-7:** Zulässige Stutzenformen

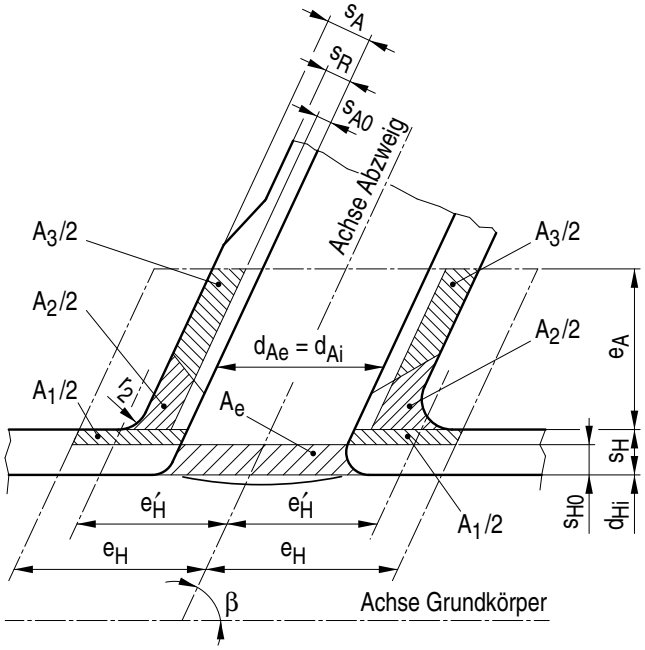


Bild A 2.8-8: Schräger zylindrischer Abzweig

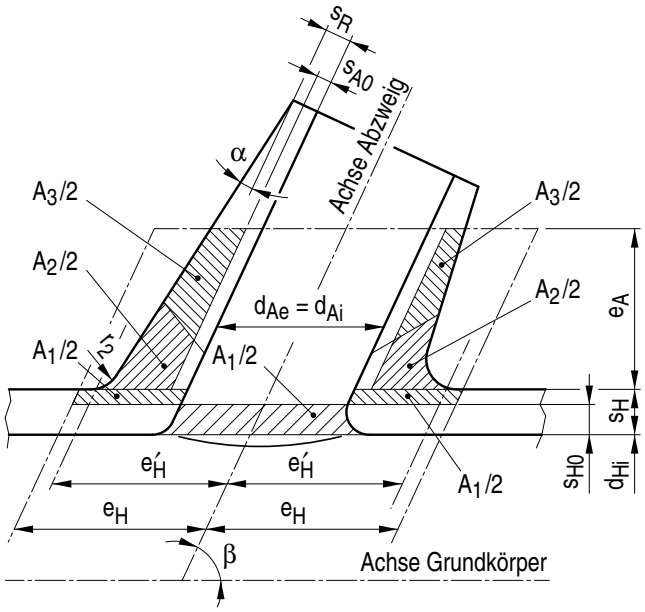


Bild A 2.8-9: Schräger konischer Abzweig

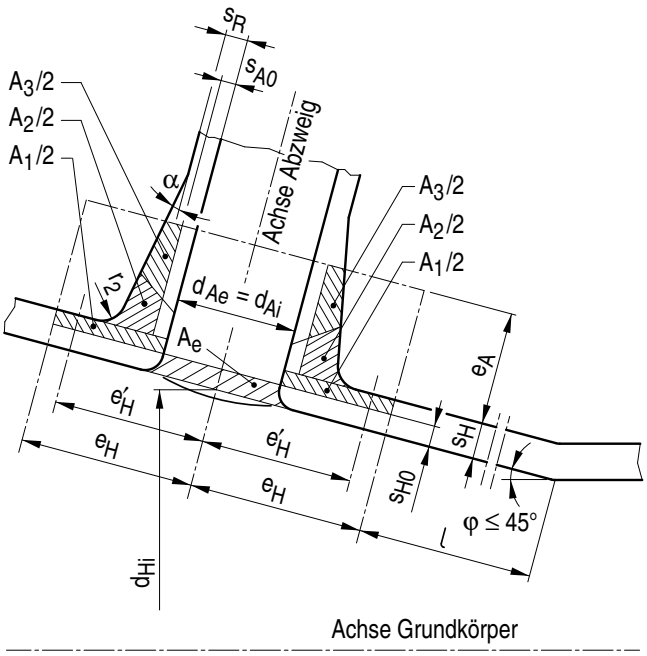


Bild A 2.8-10: Kegelschale mit Ausschnittsverstärkung

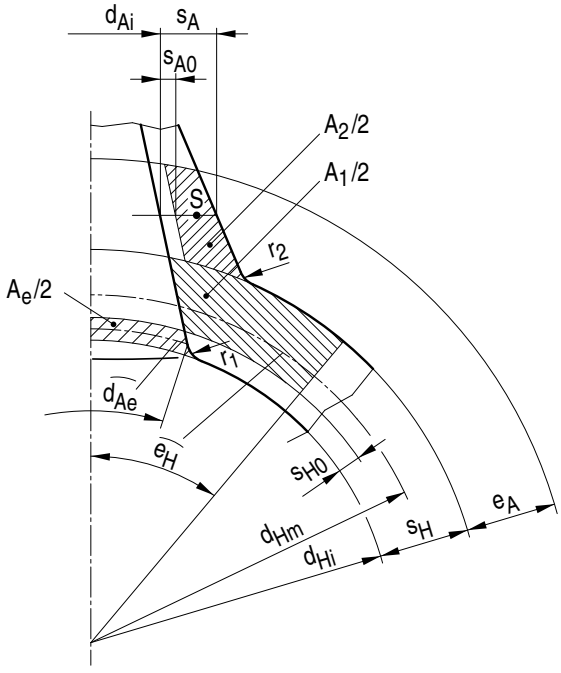


Bild A 2.8-11: Konischer Abzweig in einer Kugelschale

A 2.9 Schraubenverbindungen

A 2.9.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt A 2.8.

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
a, b, c	geometrische Größen bei Bolzen- und Muttergewinde gemäß Bilder A 2.9-3 und A 2.9-4	mm
b_D	Dichtungsbreite gemäß Abschnitt A 2.11	mm
c	Konstruktionszuschlag	mm
d	Schraubendurchmesser = Gewindeaußendurchmesser	mm
d_2	Flankendurchmesser des Schraubengewindes	mm
d_i	Rohr-(Mantel)innendurchmesser	mm
d_{iL}	Durchmesser einer Innenbohrung einer Schraube	mm
d_D	mittlerer Dichtungsdurchmesser	mm
d_{D1}, d_{D2}	mittlerer Dichtungsdurchmesser bei Metall-O-Ringdichtungen	mm
d_k	Gewindekerndurchmesser	mm
d_M	äußerer Durchmesser der Kontaktstelle der beiden Flansche im Kraftnebenschluss	mm
d_s	Schaftdurchmesser einer Dehnschraube	mm
d_t	Lochkreisdurchmesser	mm
k_1^*,k_{11}^*, k_{12}^*	Dichtungskennwerte für Metall-O-Ringdichtungen	N/mm
l	effektive Einschraubtiefe oder Mutterhöhe	mm
l_B	Länge des fertigungsbedingten konisch auslaufenden Muttergewindeendes	mm
l_{eff}	(Bild A 2.9-5) vergleiche „l“	mm
l_{ges}	Gesamt-Einschraubtiefe oder -Mutterhöhe	mm
n	Anzahl der Schraubenlöcher	—
p	Auslegungsdruck	MPa
p’	Prüfdruck	MPa
A_0	Querschnittsfläche des Dehnschaftes	mm²
A_S	Spannungsquerschnitt	mm²
$A_{SG\ Bolzen}$	Scherfläche des Bolzengewindes	mm²
$A_{SG\ Bi}$	Ebene der Bolzenscherflächenabschnitte	mm²
$A_{SG\ Mutter}$	Scherfläche des Muttergewindes	mm²
$A_{SG\ Mi}$	Ebene der Mutterscherflächenabschnitte	mm²
$A_{SG\ Sackloch}$	Scherfläche des Sackloches	mm²
C_1, C_2, C_3	Festigkeitsminderungsfaktoren	—
D	Muttergewinde/Sacklochgewinde - Außendurchmesser	mm
D_1	Muttergewinde/Sacklochgewinde - Kerndurchmesser	mm
D_2	Muttergewinde/Sacklochgewinde - Flankendurchmesser	mm
D_c	innerer Durchmesser der Mutterauflagefläche, Durchmesser der Aussenkung	mm
D_m	mittlerer Durchmesser des konisch auslaufenden Muttergewindeendes	mm
D_{max}	maximaler Durchmesser des konisch auslaufenden Muttergewindeendes	mm
$D_{1\ max}$	(siehe Bild A 2.9-4)	mm
F_{DBO}	zulässige Standkraft der Dichtung im Betriebszustand bei Krafthauptschlussverbindungen	N
$F_{DBU/L}$	erforderliche Dichtungskraft für den Betriebszustand bei Krafthauptschlussverbindungen	N
F_{DKU}	erforderliche Dichtungskraft zum Erreichen der Blocklage	N
F_{DKUx}	erforderliche Dichtungskraft zum Erreichen der Blocklage unter Berücksichtigung der Betriebstemperatur und Setzungen der Dichtung	N
F_{DVO}	zulässige Standkraft der Dichtung im Einbauzustand bei Krafthauptschlussverbindungen	N
$F_{DVU/L}$	Vorverformungskraft	N
F_F	Ringflächenkraft im Auslegungszustand	N
F'_F	Ringflächenkraft im Prüfzustand	N
$F_{max\ Bolzen}$	Bruchkraft des freien belasteten Bolzengewindes oder des Dehnschaftes	N
$F_{max\ G\ Bolzen}$	Bruchkraft des im Eingriff befindlichen Bolzengewindes	N
$F_{max\ G\ Mutter}$	Bruchkraft des im Eingriff befindlichen Muttergewindes	N
F_R	gesamte Rohrkraft	N
F_{RM}	zusätzliche Rohrkraft aus dem Rohrmoment	N
F_{RM0}	zusätzliche Rohrkraft aus dem Rohrmoment im Einbauzustand	N
F'_{RM}	Zusätzliche Rohrkraft aus dem Rohrmoment für den Prüfzustand	N
F_{RP}	Rohrkraft infolge Innendruck	N
F_{RZ}	zusätzliche Rohrlängskraft	N
F_{RZ0}	zusätzliche Rohrlängskraft im Einbauzustand	N
F'_{RZ}	zusätzliche Rohrlängskraft für den Prüfzustand	N
F_{R0}	im Rohrsystem vorhandene Rohrkraft im Einbauzustand	N
F_S	Schraubenkraft (allgemein)	N
F_{S0U}	Schraubenkraft für den Einbauzustand (untere Grenze)	N
F_{SB}	Schraubenkraft für den Betriebszustand bei Kraftnebenschlussverbindungen	N
F_{SBU}	Schraubenkraft für den Betriebszustand bei Kraftnebenschlussverbindungen (untere Grenze)	N

Formel-zeichen	Berechnungsgröße	Einheit
$F_{SBU/L}$	Mindestwert der Schraubenkraft für den Betriebszustand bei Krafthauptschlussverbindungen	N
F_{SBX}	Schraubenkraft für den Betriebszustand bei Krafthauptschlussverbindungen	N
F_{SKU}	Mindestwert der Schraubenkraft zum Erreichen der Blocklage bei Kraftnebenschlussverbindungen	N
F_{S0}	Schraubenkraft für den Einbauzustand	N
F'_S	Schraubenkraft für den Prüfzustand	N
F_{SPU}	Schraubenkraft für den Prüfzustand (untere Grenze)	N
F_{Zx}	axiale Zusatzkraft zur Übertragung von Querkräften und Torsionsmomenten im Reibschluss beim Betriebszustand	N
F_{Z0}	axiale Zusatzkraft zur Übertragung von Querkräften und Torsionsmomenten im Reibschluss beim Einbauzustand	N
F'_Z	axiale Zusatzkraft zur Übertragung von Querkräften und Torsionsmomenten im Reibschluss beim Prüfzustand	N
M_B	Biegemoment im Rohr	N·mm
M_t	Torsionsmoment im Rohr	N·mm
P	Steigung des Gewindes	mm
Q	Querkraft im Rohr	N
R_{mB}	Zugfestigkeit des Schraubenbolzenwerkstoffes	N/mm²
R_{mM}	Zugfestigkeit des Mutterwerkstoffes	N/mm²
R_{mS}	Zugfestigkeit des Sacklochwerkstoffes	N/mm²
$R_{p0,2T}$	0,2%-Dehngrenze bei Betriebs- bzw. Prüftemperatur	N/mm²
$R_{p0,2RT}$	0,2%-Dehngrenze bei Raumtemperatur	N/mm²
R_S	Festigkeitsverhältnis	—
S_D	Sicherheitsbeiwert	—
SW	Schlüsselweite	mm
α	Flankenwinkel	Grad
μ_D	Reibwert der Dichtung	—
μ_M	Reibwert der metallischen Kontaktfläche	—
σ_{DB}	Vorhandene mittlere Flächenpressung der Dichtung im Betriebszustand	N/mm²
σ_{BO}	Oberer Grenzwert σ_{DB}	N/mm²
σ_{BU}	Unterer Grenzwert σ_{DB}	N/mm²
$\sigma_{BU/L}$	Mindestflächenpressung im Betriebszustand für Krafthauptschlussverbindungen	N/mm²
σ_{KNS}	Mindestflächenpressung für Kraftnebenschlussverbindungen	N/mm²
σ_V	Vorhandene mittlere Flächenpressung der Dichtung beim Vorverformen	N/mm²
σ_{VO}	Oberer Grenzwert σ_V	N/mm²
σ_{VU}	Unterer Grenzwert σ_V	N/mm²
$\sigma_{VU/L}$	Mindestflächenpressung im Einbauzustand für Krafthauptschlussverbindungen	N/mm²
σ_{zul}	zulässige Spannung nach Tabelle 6.7-2	N/mm²

A 2.9.2 Geltungsbereich

Die nachstehenden Berechnungsregeln gelten für Schrauben mit kreisförmiger Anordnung in gleichem Abstand als kraftschlüssige Verbindungselemente von druckführenden Teilen. Die in den einzelnen Betriebszuständen erforderlichen Kräfte (Schraubenkraft, Dichtungskraft) werden für Flanschverbindungen mit der Dichtung im Krafthauptschluss (KHS) und Kraftnebenschluss (KNS) bestimmt (siehe **Bild A 2.9-1** und Abschnitt A 2.9.4). Voraussetzung für die Anwendung von Flanschverbindungen mit der Dichtung im Kraftnebenschluss ist eine hinreichende Steifigkeit und damit begrenzte Flanschblattneigung. Die Berechnungsregeln berücksichtigen vorwiegend ruhende Zugbeanspruchung. Schub- und Biegebeanspruchungen in den Schrauben, die z. B. aus den Verformungen von Flanschen und Deckeln, aus thermischen Einflüssen (z. B. örtlichen und zeitlichen Temperaturgradienten, unterschiedlichen Wärmedehnzahlen) stammen, sind in diesem Abschnitt nicht erfasst.

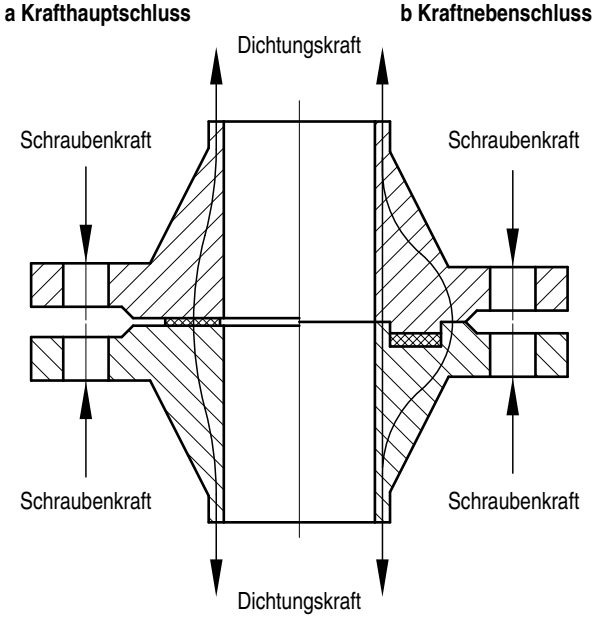


Bild A 2.9-1: Darstellung einer Flanschverbindung mit der Dichtung im KHS und im KNS (schematisch)

A 2.9.3 Allgemeines

(1) Für verschraubte Flanschverbindungen müssen Dichtheits- und Festigkeitsnachweise durchgeführt werden (siehe Ablaufschema in **Bild A 2.9-2**). Beim Dichtheitsnachweis ist im Wesentlichen die Höhe der Vorspannung zu bestimmen, die zur Gewährleistung der Dichtheit der Verbindung bei den Betriebs- und Prüffällen erforderlich ist. Beim Festigkeitsnachweis ist die Einhaltung der zulässigen Spannungen für Flansche, Schrauben und Dichtungen nachzuweisen.

(2) Im ersten Schritt sind die Komponenten der Flanschverbindung auszuwählen. Die in den Abschnitten A 2.9.4, A 2.10.4 und A 2.10.5 angegebenen vereinfachten Verfahren sind hierfür geeignet. Dabei werden aus den spezifizierten Belastungen, der gewählten Dichtung (z. B. Abmessungen, Dichtheitsklasse, Dichtungskennwerte) sowie den zulässigen Spannungen der Komponenten der Flanschverbindung die erforderlichen Abmessungen sowie die erforderliche Vorspannkraft der Schrauben bestimmt.

(3) Im zweiten Schritt erfolgen die Dichtheits- und Festigkeitsnachweise und eine Überprüfung der Abtragbarkeit der Schnittlasten (auch Querkraft und Torsionsmoment). Das Schraubenanzugsverfahren (z. B. Anzugsfaktor) ist beim Festigkeitsnachweis der Flansche und Schrauben zu berücksichtigen.

Der Dichtheitsnachweis ist mit der minimalen rechnerischen Schraubenkraft zu führen. Bei Kraftnebenschlussverbindungen mit einer Schraubenanzahl n gleich oder größer als 8 darf abweichend hiervon der Nachweis mit einer mittleren rechnerischen Schraubenkraft geführt werden.

Die Festigkeitsnachweise des Flansches und bei Krafthauptschlussverbindungen der Dichtung sind im Einbauzustand mit der maximalen rechnerischen Schraubenkraft zu führen, bei den Festigkeitsnachweisen im Betriebszustand darf die mittlere rechnerische Schraubenkraft zugrunde gelegt werden.

Für den Festigkeitsnachweis der Schrauben ist die maximale Schraubenkraft anzusetzen.

(4) Können die Dichtheits- und Festigkeitsnachweise nicht erbracht werden, ist eine iterative Vorgehensweise mit einer Wiederholung der Nachweise erforderlich, bis die Bedingungen erfüllt sind.

(5) Der Festigkeitsnachweis der Schraubenverbindungen bei genormten Rohrleitungsflanschen kann entfallen, wenn bei Rohrleitungsflanschen nach DIN EN 1092-1 mit PN ≤ 25 bei Belastung aus Innendruck allein die nächsthöhere Nenndruckstufe, bei Belastung aus Innendruck und äußeren Kräften die übernächst höhere Nenndruckstufe gewählt wird.

(6) Als Dehnschrauben werden solche Schrauben bewertet, deren Schaftdurchmesser kleiner als oder gleich dem 0,9fachen des Kerndurchmessers ist und deren Dehnschaftlänge mindestens das Zweifache, möglichst aber das Vier fache des Schaftdurchmessers beträgt oder solche Schrauben, deren Abmessungen DIN 2510-1 bis DIN 2510-4 entsprechen. Als Dehnschrauben dürfen auch Schaftschrauben mit vergrößerter Dehnlänge und einem Schaftdurchmesser kleiner oder gleich dem Kerndurchmesser verwendet werden, wenn deren Nachgiebigkeit bezüglich der Längung und deren Nachgiebigkeit bezüglich der Biegung unter den gegebenen Randbedingungen der Nachgiebigkeit einer Dehnschraube gemäß vorstehender Definition mit gleichem Gewindekerndurchmesser und minimaler Dehnschaftlänge gemäß oben getroffener Festlegung entspricht.

Bei Schraubenverbindungen nach DIN EN ISO 898-1, DIN EN ISO 898-2, DIN EN ISO 3506-1, DIN EN ISO 3506-2, DIN EN ISO 3506-3, DIN 267-13 und DIN 2510-1 bis DIN 2510-4 darf unter Beachtung der angegebenen Mutterhöhen oder Einschraubtiefen auf eine Nachrechnung der Gewindebeanspruchung verzichtet werden.

Andernfalls ist die Berechnung nach Abschnitt A 2.9.4 oder nach VDI 2230 durchzuführen.

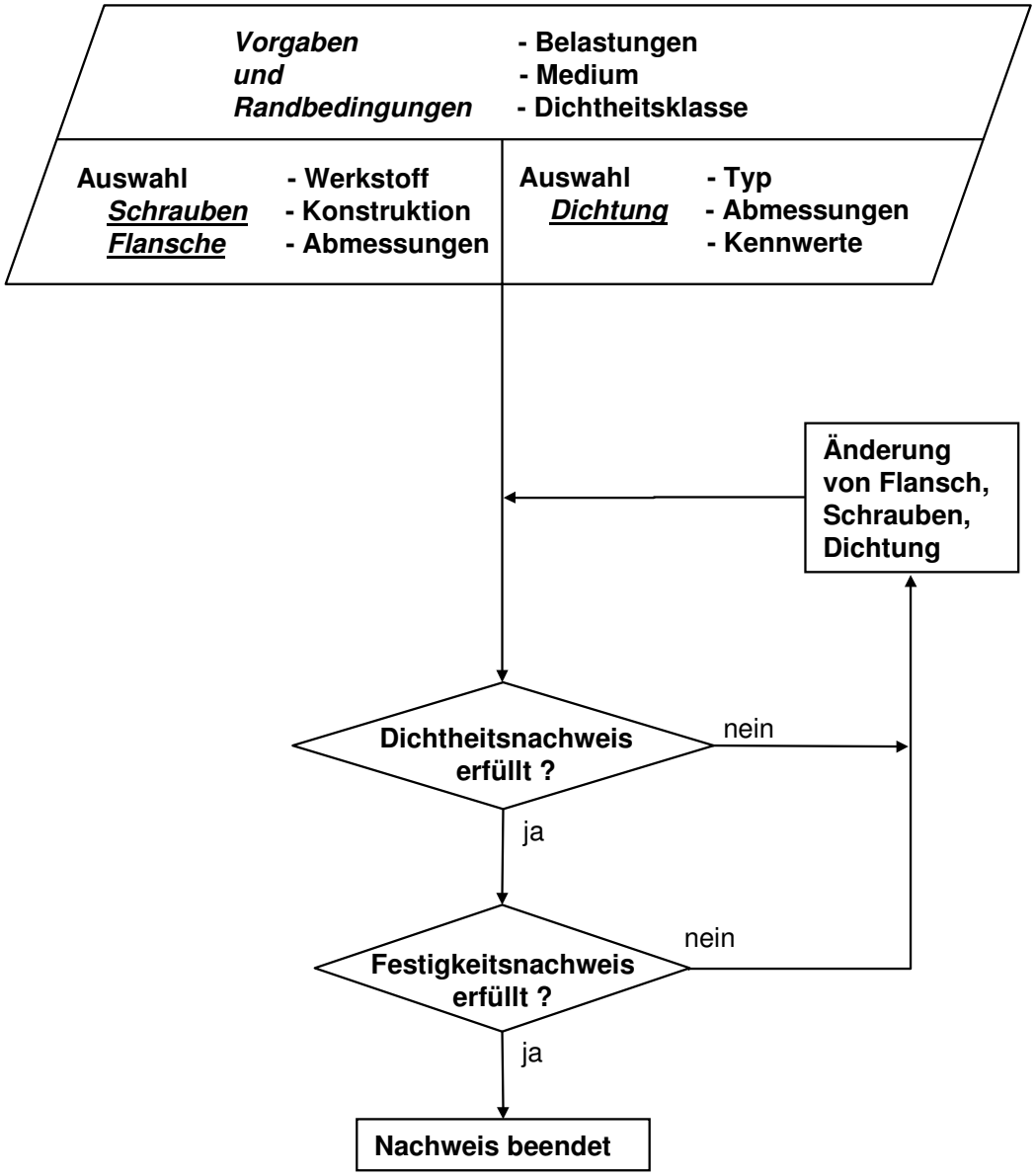


Bild A 2.9-2: Allgemeines Ablaufschema für die Berechnung von Flanschen

A 2.9.4 Dimensionierung von Schrauben

A 2.9.4.1 Schraubenkraft für Krafthauptschluss

Die Schraubenkraft (F_S) ist zu ermitteln für den Betriebszustand (F_{SBx}), für den Prüfzustand (F'_S) und für den Einbauzustand (F_{S0}).

a) Erforderliche Schraubenkraft für den Betriebszustand

$$F_{SBU/L} = F_R + F_{DBU/L} + F_F + F_Z \quad \text{(A 2.9-1)}$$

Als Rohrkraft F_R ist die vom Rohr oder Mantel auf die Flanschverbindung übertragene Kraft zu verstehen. Die Rohrkraft ergibt sich bei geschlossenen Rohren oder Mänteln nach folgender Gleichung:

$$F_R = F_{RP} + F_{RZ} + F_{RM} \quad \text{(A 2.9-2)}$$

dabei ist

$$F_{RP} = \frac{d_i^2 \cdot \pi \cdot p}{4} \quad \text{(A 2.9-3)}$$

Die zusätzlichen Rohrkräfte F_{RZ} und F_{RM} berücksichtigen Rohrlängskräfte F_{RZ} und Rohrbiegemomente M_B, wobei

$$F_{RM} = \frac{4 \cdot M_B}{d_D} \quad \text{(A 2.9-4)}$$

Auf Grundlage der vorhandenen Steifigkeitsverhältnisse darf anstelle des Dichtungsdurchmessers d_D der wirksame Durchmesser verwendet werden.

Beim Spannungsnachweis der Schrauben darf anstelle des Dichtungsdurchmessers d_D der Lochkreisdurchmesser d_t eingesetzt werden.

F_{RZ} und M_B müssen gegebenenfalls der statischen oder dynamischen Rohrleitungssystemanalyse entnommen werden.

F_{RZ} und M_B sind gleich 0 bei Flanschverbindungen in Behältern und Rohrleitungen, an die keine oder nur Rohrleitungen ohne zusätzliche Längskraft F_{RZ} und ohne zusätzliches Rohrbiegemoment M_B angeschlossen sind.

Die erforderliche Dichtungskraft für den Betriebszustand ($F_{DBU/L}$) ermittelt sich aus:

$$F_{DBU/L} = \pi \cdot d_D \cdot b_D \cdot \sigma_{BU/L} \cdot S_D \quad \text{(A 2.9-5)}$$

Für S_D ist mindestens der Wert 1,2 einzusetzen.

Die erforderliche Dichtungskraft im Betriebszustand $F_{DBU/L}$ ist notwendig, um dauerndes Dichthalten (Dichtheitsklasse L) im Betrieb zu gewährleisten. Die Dichtungskennwerte werden in Abschnitt A 2.11 behandelt.

Bei Schweißlippendichtungen ist zur Sicherstellung der Lagestabilität eine axiale Druckkraft auf die Stirnflächen der Flansche vorzuhalten. Für $F_{DBU/L}$ ist hierfür mindestens der Wert 0,15 (F_{RP}+F_F) zu setzen.

Die zulässige (maximal ertragbare) Standkraft der Dichtung im Betriebszustand beträgt

$$F_{DBO} = \pi \cdot d_D \cdot b_D \cdot \sigma_{BO} \quad \text{(A 2.9-6)}$$

Die Ringflächenkraft F_F beträgt

$$F_F = \frac{\pi}{4} \cdot \left(d_D^2 - d_i^2\right) \cdot p \quad \text{(A 2.9-7)}$$

Die Ringflächenkraft F_F wird hervorgerufen durch den Innendruck p und lastet auf der Ringfläche, die durch den Dichtungskreis d_D und den Innendurchmesser d_i gebildet wird. Als Dichtungsdurchmesser d_D muss der mittlere Durchmesser der Dichtung angesetzt werden. Bei Schweißlippendichtungen ist der mittlere Durchmesser der Schweißnaht einzusetzen. Bei konzentrischen Doppeldichtungen ist der mittlere Durchmesser der äußeren Dichtung zu verwenden.

Um in der Flanschverbindung eine Querkraft Q (senkrecht zur Rohrachse) und ein Torsionsmoment M_t durch Reibschluss übertragen zu können, muss an der Dichtung erforderlichenfalls eine zusätzliche Kraft F_Z angreifen.

F_Z beträgt:

aa) für seitlich verschiebbare Flansche, bei denen Querkräfte nur durch Reibschluss übertragen werden können

$$F_Z = \max\left\{0; \frac{Q}{\mu_D} + \frac{2 \cdot M_t}{\mu_D \cdot d_D} - F_{DBU/L} - \frac{2 \cdot M_B}{d_D}\right\} \quad \text{(A 2.9-8)}$$

ab) für seitlich nicht verschiebbare Flansche, bei denen Querkräfte durch Formschluss übertragen werden

$$F_Z = \max\left\{0; \frac{2 \cdot M_t}{\mu_D \cdot d_D} - F_{DBU/L} - F_{RM}\right\} \quad \text{(A 2.9-9)}$$

Falls keine anderslautenden Versuchsergebnisse vorliegen, sind die Reibbeiwerte wie folgt einzusetzen:

$\mu_D = 0{,}05$ bei Dichtungen auf PTFE-Basis

$\mu_D = 0{,}1$ bei graphitbeschichteten Dichtungen

$\mu_D = 0{,}15$ bei metallischen Auflagen mit glatter Oberfläche

$\mu_D = 0{,}25$ bei unbeschichteten Dichtungen auf Faserbasis

b) Erforderliche Schraubenkraft für den Prüfzustand

$$F_{SPU} = \frac{p'}{p} \cdot \left(F_{RP} + \frac{F_{DBU/L}}{S_D} + F_F\right) + F'_{RZ} + F'_{RM} + F'_Z \quad \text{(A 2.9-10)}$$

Die Größen F'_{RZ} und F'_{RM} entsprechen den zusätzlichen Rohrkräften im Prüfzustand. F'_Z ist entsprechend den Gleichungen (A 2.9-8) und (A 2.9-9) unter Berücksichtigung des Prüfzustandes zu ermitteln.

c) Erforderliche Schraubenkraft für den Einbauzustand

Die Schraubenverbindung ist so anzuziehen, dass beim Einbau die notwendige Vorverformung der Dichtung erreicht wird, so dass die Verbindung im Prüfzustand und im Betriebszustand dicht bleibt und etwaige im Rohrsystem vorhandene Rohrkräfte F_{R0} aufgenommen werden können.

Um diese Bedingungen zu erfüllen, ist zu fordern:

$$F_{S0U} \geq F_{DVU/L} + F_{RZ0} + F_{RM0} \quad \text{(A 2.9-11)}$$

mindestens jedoch

für den Prüfzustand

$$F_{S0U} \geq F'_S \quad \text{(A 2.9-12)}$$

und für den Betriebszustand

$$F_{S0U} \geq F_{SBU/L} \quad \text{(A 2.9-13)}$$

Dabei ist $F_{DVU/L}$ die Vorverformungskraft der Dichtung, die erforderlich ist, um ein ausreichendes Anpassen der Dichtung an die Dichtflächen (Dichtheitsklasse L) zu erreichen.

$$F_{DVU/L} = \pi \cdot d_D \cdot b_D \cdot \sigma_{VU/L} \quad \text{(A 2.9-14)}$$

Im Einbauzustand darf die Dichtung höchstens mit

$$F_{DVO} = \pi \cdot d_D \cdot b_D \cdot \sigma_{VO} \quad \text{(A 2.9-15)}$$

belastet werden.

A 2.9.4.2 Schraubenkraft für Kraftnebenschluss

Die Schraubenkraft (F_S) ist zu ermitteln für das Erreichen der Blocklage (F_{SKU}), für den Prüfzustand (F'_S) und für den Betriebszustand (F_{SB}). Das Erreichen der Blocklage wird über Gleichung (A 2.10-25) indirekt kontrolliert.

a) Erforderliche Schraubenkraft für das Erreichen der Blocklage

$$F_{SKU} = F_{DKU} + F_{R0} \quad \text{(A 2.9-16)}$$

Die erforderliche Dichtungskraft für die Blocklage ermittelt sich für Dichtungen außer Metall-O-Ring-Dichtungen aus:

$$F_{DKU} = \pi \cdot d_D \cdot b_D \cdot \sigma_{KNS} \qquad \text{(A 2.9-17)}$$

für eine einfache Metall-O-Ring-Dichtung aus:

$$F_{DKU} = \pi \cdot d_D \cdot k_1^* \qquad \text{(A 2.9-18)}$$

und für doppelte Metall-O-Ring-Dichtung aus:

$$F_{DKU} = \pi \cdot (d_{D1} \cdot k_{11}^* + d_{D2} \cdot k_{12}^*) \qquad \text{(A 2.9-19)}$$

Für einfache Metall-O-Ring-Dichtungen ist der Dichtungskennwert k_1^* und für doppelte Metall-O-Ring-Dichtungen die Dichtungskennwerte k_{11}^* und k_{12}^* nach den Unterlagen des Herstellers zu verwenden.

b) Erforderliche Schraubenkraft für das Einhalten der Blocklage im Betriebszustand

$$F_{SBU} = F_{DKU} + F_R + F_F + F_Z \qquad \text{(A 2.9-20)}$$

Als Rohrkraft F_R ist die vom Rohr oder Mantel auf die Flanschverbindung übertragene Kraft zu verstehen. Die Rohrkraft ergibt sich bei geschlossenen Rohren oder Mänteln nach folgender Gleichung:

$$F_R = F_{RP} + F_{RZ} + F_{RM} \qquad \text{(A 2.9-21)}$$

dabei ist

$$F_{RP} = \frac{d_i^2 \cdot \pi \cdot p}{4} \qquad \text{(A 2.9-22)}$$

Die zusätzlichen Rohrkräfte F_{RZ} und F_{RM} berücksichtigen Rohrlängskräfte F_{RZ} und Rohrbiegemomente M_B, wobei

$$F_{RM} = \frac{4 \cdot M_B}{\frac{(2 \cdot d_M + d_d + b_D)}{3}} \qquad \text{(A 2.9-23)}$$

F_Z beträgt:

aa) für seitlich verschiebbare Flansche, bei denen Querkräfte nur durch Reibschluss übertragen werden können

$$F_Z = \max \left\{ \begin{array}{l} 0; \dfrac{Q}{\mu_M} + \dfrac{2 \cdot M_t}{\mu_M \cdot \left[\dfrac{(2 \cdot d_M + d_d + b_D)}{3} \right]} - \dfrac{\mu_D}{\mu_M} F_{DKU} \\ - \dfrac{2 \cdot M_B}{\dfrac{(2 \cdot d_M + d_d + b_D)}{3}} \end{array} \right\} \qquad \text{(A 2.9-24)}$$

ab) für seitlich nicht verschiebbare Flansche, bei denen Querkräfte durch Formschluss übertragen werden

$$F_Z = \max \left\{ 0; \frac{2 \cdot M_t}{\mu_M \cdot \dfrac{(2 \cdot d_M + d_D + b_D)}{3}} - \frac{\mu_D}{\mu_M} F_{DKU} - F_{RM} \right\} \qquad \text{(A 2.9-25)}$$

Falls keine anderslautenden Versuchsergebnisse vorliegen, sind folgende Reibbeiwerte einzusetzen:

$\mu_D = 0{,}10$ bei graphitbeschichteten Dichtungen

$\mu_M = 0{,}15$ bei metallischen Auflagen mit glatter Oberfläche

c) Erforderliche Schraubenkraft für das Einhalten der Blocklage im Prüfzustand

$$F_{SPU} = \frac{p'}{p} \cdot (F_{RP} + F_F) + F_{DKU} + F'_{RZ} + F'_{RM} + F'_Z \qquad \text{(A 2.9-26)}$$

Die Größen F'_{RZ} und F'_{RM} entsprechen den zusätzlichen Rohrkräften im Prüfzustand. F'_Z ist entsprechend den Gleichungen (A 2.9-24) und (A 2.9-25) unter Berücksichtigung des Prüfzustandes zu ermitteln.

d) Erforderliche Schraubenkraft für den Einbauzustand

Die Schraubenverbindung ist so anzuziehen, dass beim Einbau die notwendige Schraubenkraft aufgebracht wird, um die Blocklage im Einbauzustand zu erreichen und um die Blocklage weder im Prüfzustand noch im Betriebszustand wieder zu verlassen.

Um diese Bedingungen zu erfüllen, ist zu fordern:

$$F_{S0U} \geq \max (F_{SKU} + F_{Z0}; F_{SBU}; F_{SPU}) \qquad \text{(A 2.9-27)}$$

Hierbei ist F_{Z0} die zum Abtragen der Querkraft oder eines Torsionsmomentes im Einbauzustand erforderliche zusätzliche Kraft, die nach den Gleichungen (A 2.9-24) oder (A 2.9-25) zu ermitteln ist, wobei die Kräfte und Momente für den Einbauzustand einzusetzen sind.

A 2.9.4.3 Vorspannen von Schraubenverbindungen

(1) Die Einbauschraubenkraft ist in kontrollierter Weise aufzubringen. Je nach Schraubenanzugsverfahren erstreckt sich diese Kontrolle z. B. auf das Drehmoment, die Längung der Schrauben, die Dehnung der Schrauben oder die Temperaturdifferenz zwischen Schraube und Flansch. Hierbei sind - abhängig vom Anzugsverfahren - z. B. folgende Einflussgrößen zu beachten: Reibbeiwert, Oberflächengüte, Schmierungszustand, Setzerscheinungen.

(2) Erfolgt das Anziehen der Schrauben mittels Drehmomentenschlüssel, so ist das Anzugsmoment nach einem geeigneten, rechnerischen oder experimentellen Verfahren zu bestimmen, z. B. nach VDI-Richtlinie 2230 Blatt 1.

A 2.9.4.4 Schraubendurchmesser

(1) Der erforderliche Gewindekerndurchmesser d_k einer Starrschraube oder der Schaftdurchmesser d_s einer Dehnschraube (mit oder ohne Innenbohrung) in einer Schraubenverbindung mit n Schrauben ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$d_k \text{ oder } d_s = \sqrt{\frac{4 \cdot F_S}{\pi \cdot n \cdot \sigma_{zul}} + {d_{iL}}^2} + c \qquad \text{(A 2.9-28)}$$

mit σ_{zul} gemäß **Tabelle 6.7-2**.

(2) Hierbei sind folgende Lastfälle zu berücksichtigen:

a) die Lastfälle der Beanspruchungsstufen 0, A, B, C, D gemäß den Zeilen 1 und 2 der **Tabelle 6.7-2**,

b) der Lastfall der Beanspruchungsstufe P gemäß Zeile 3 der **Tabelle 6.7-2**,

c) die Einbauzustände gemäß Zeile 4 der **Tabelle 6.7-2** (zur Berücksichtigung der vom Anzugsverfahren abhängigen Streuung der Krafteinleitung sind die diesbezüglichen Angaben in der VDI-Richtlinie 2230 Blatt 1 zu beachten).

(3) Als Konstruktionszuschlag c ist einzusetzen für Dehnschrauben c = 0 mm, für Starrschrauben gilt für die Belastungen der Beanspruchungsstufe 0 in den Zeilen 1 und 2 der **Tabelle 6.7-2**:

$$c = 3 \text{ mm, wenn } \sqrt{\frac{4 \cdot F_S}{\pi \cdot n \cdot \sigma_{zul}}} \leq 20 \text{ mm} \qquad \text{(A 2.9-29)}$$

oder

$$c = 1 \text{ mm, wenn } \sqrt{\frac{4 \cdot F_S}{\pi \cdot n \cdot \sigma_{zul}}} \geq 50 \text{ mm} \qquad \text{(A 2.9-30)}$$

Im Zwischenbereich ist linear zu interpolieren gemäß

$$c = \frac{65 - \sqrt{\frac{4 \cdot F_S}{\pi \cdot n \cdot \sigma_{zul}}}}{15} \qquad \text{(A 2.9-31)}$$

Für die Lastfälle der übrigen Beanspruchungsstufen ist c = 0 mm zu setzen.

A 2.9.4.5 Erforderliche Einschraubtiefe

A 2.9.4.5.1 Allgemeines

(1) Bei der Ermittlung der erforderlichen Einschraubtiefe in einer zylindrischen Mutter oder im Sackloch soll davon ausgegangen werden, dass die auf der Abstreiffestigkeit beruhende Tragfähigkeit sowohl des Bolzengewindes als auch des Muttergewindes größer ist als die auf der Zugfestigkeit beruhende Tragfähigkeit des freien belasteten Gewindeteils oder des Schaftes bei Dehnschrauben. Die Tragfähigkeit der einzelnen Bereiche berechnet sich wie folgt:

frei belastetes Gewinde:

$$F_{max\ Bolzen} = R_{m\ Bolzen} \cdot A_S \qquad \text{(A 2.9-32)}$$

Dehnschaft:

$$F_{max\ Bolzen} = R_{m\ Bolzen} \cdot A_0 \qquad \text{(A 2.9-33)}$$

eingeschraubtes Bolzengewinde:

$$F_{max\ G\ Bolzen} = R_{m\ Bolzen} \cdot A_{SG\ Bolzen} \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot 0{,}6 \qquad \text{(A 2.9-34)}$$

eingeschraubtes Muttergewinde:

$$F_{max\ G\ Mutter} = R_{m\ Mutter} \cdot A_{SG\ Mutter} \cdot C_1 \cdot C_3 \cdot 0{,}6 \qquad \text{(A 2.9-35)}$$

(2) Die Berechnung der Einschraubtiefe ist für den Fall kleinster Flankenüberdeckung gemäß den nachfolgenden Abschnitten vorzunehmen. Hierzu sind bei der Berechnung der tragenden Querschnitte die Bolzenkleinstmaße und die Mutterngrößtmaße einzusetzen.

(3) Bei gegebener Einschraubtiefe oder Mutterhöhe ist nachzuweisen, dass die Tragfähigkeit des freien belasteten Gewindeteils oder des Dehnschaftes kleiner ist als die der ineinandergreifenden Bolzen- und Muttergewindegänge. Bei verringerter Ausnutzung der Schraubenfestigkeit darf die Schraubenkraft F_S entsprechend den Abschnitten A 2.9.4.1 oder A 2.9.4.2 zugrunde gelegt werden. Der Nachweis der erforderlichen Einschraubtiefe ist dann gemäß Abschnitt A 2.9.4.5.5 zu erbringen.

(4) Von der Berechnung der Einschraubtiefe gemäß den nachfolgenden Abschnitten ausgenommen sind genormte Schraubenverbindungen. Die Berechnung der Einschraubtiefe gemäß den nachfolgenden Abschnitten einschließlich des Abschnitts A 2.9.4.5.5 gilt nicht für Schraubenverbindungen mit Sägezahn- und Trapezgewinde.

(5) Ergeben sich aus repräsentativen Versuchen kleinere erforderliche Einschraubtiefen als die gemäß den nachfolgenden Abschnitten berechneten, so dürfen diese angewendet werden.

A 2.9.4.5.2 Schraubenverbindungen mit Sackloch oder zylindrischer Mutter ohne Aussenkung

Die erforderliche Einschraubtiefe l_{ges} für Schraubverbindungen mit Sackloch oder zylindrischer Mutter ist als Maximum aus den nachstehend aufgeführten Gleichungen zu ermitteln

a) Aus der Forderung nach Abstreiffestigkeit des Schraubengewindes ergibt sich die Bedingung (siehe **Bild A 2.9-3**):

$$l_{ges} \geq \frac{A_S \cdot P}{0{,}6 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot \left[\frac{P}{2} + (d_2 - D_1) \cdot \tan\frac{\alpha}{2}\right]} + 2{,}0 \cdot P \qquad \text{(A 2.9-36)}$$

Bei Dehnschrauben darf anstelle des Spannungsquerschnittes A_S der Dehnschaftquerschnitt A_0 eingesetzt werden.

Für Spitzgewinde mit Flankenwinkel = 60° beträgt

$$\tan\frac{\alpha}{2} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{3} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

b) Aus der Forderung nach Abstreiffestigkeit des Mutter- oder Sacklochgewindes ergibt sich die Bedingung (siehe **Bild A 2.9-3**)

$$l_{ges} \geq \frac{R_{mB} \cdot A_S \cdot P}{R_{mM} \cdot 0{,}6 \cdot C_1 \cdot C_3 \cdot \pi \cdot d \cdot \left[\frac{P}{2} + (d - D_2) \cdot \tan\frac{\alpha}{2}\right]} + 2{,}0 \cdot P \qquad \text{(A 2.9-37)}$$

Im Falle eines Sacklochs ist anstelle R_{mM} die Zugfestigkeit R_{mS} einzusetzen.

c) Weiterhin muss folgende Bedingung erfüllt sein:

$$l_{ges} \geq 0{,}8 \cdot d \qquad \text{(A 2.9-38)}$$

Die Größen C_1, C_2 und C_3 sind gemäß Abschnitt A 2.9.4.5.4 zu bestimmen.

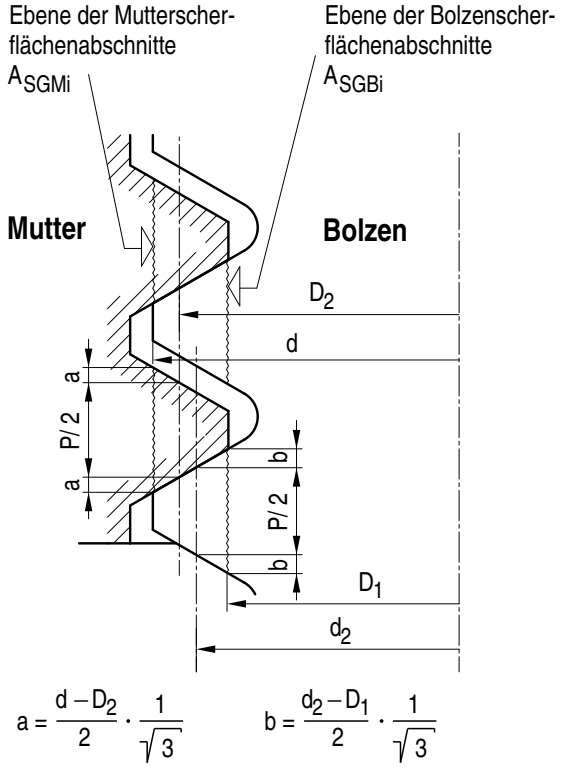


Bild A 2.9-3: Darstellung der Größen bei Bolzen- und Muttergewinde

A 2.9.4.5.3 Schraubenverbindungen mit konischem Gewindebereich der Mutter ohne Aussenkung

Die erforderliche Einschraubtiefe l_{ges} für Schraubenverbindung mit konischem Gewindebereich der Mutter ist als Maximum aus den nachstehend aufgeführten Gleichungen zu ermitteln.

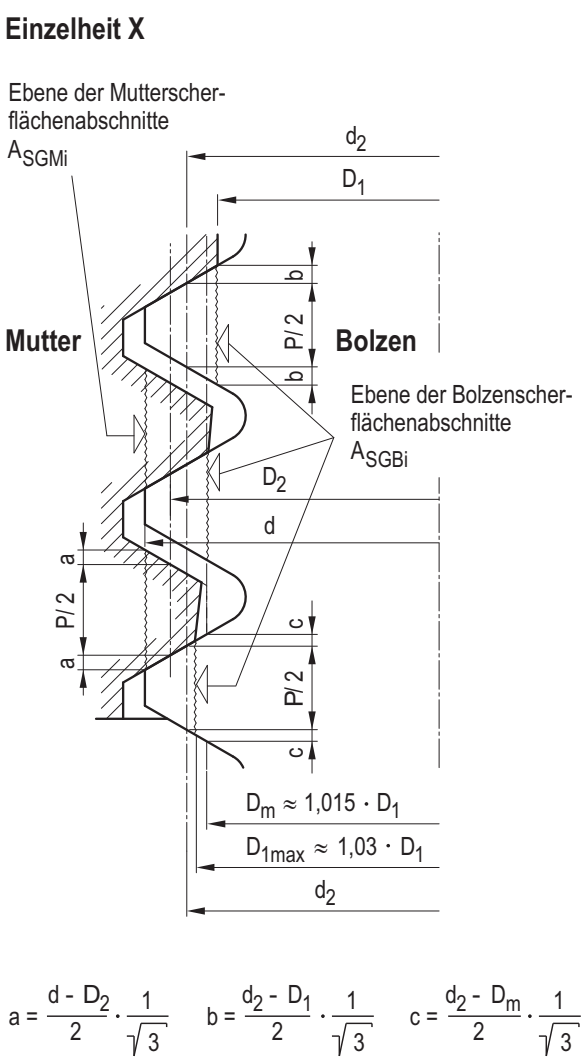
a) Aus der Forderung nach Abstreiffestigkeit des Schraubengewindes ergibt sich die Bedingung (siehe die **Bilder A 2.9-4** und **A 2.9-5**):

$$l_{ges} \geq l_B + \frac{A_S \cdot P - 0{,}6 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot l_B \cdot \pi \cdot D_m \cdot \left[\frac{P}{2} + (d_2 - D_m) \cdot \tan\frac{\alpha}{2}\right]}{0{,}6 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot \left[\frac{P}{2} + (d_2 - D_1) \cdot \tan\frac{\alpha}{2}\right]} + 2{,}0 \cdot P \qquad \text{(A 2.9-39)}$$

b) Aus der Forderung nach Abstreiffestigkeit des Muttergewindes ergibt sich die erforderliche Einschraubtiefe l_{ges} (siehe die **Bilder A 2.9-4** und **A 2.9-5**) gemäß Gleichung (A 2.9-37).

c) Die Einschraubtiefe l_{ges} muss der Gleichung (A 2.9-38) genügen.

Die Größen C_1, C_2, C_3 sind gemäß Abschnitt A 2.9.4.5.4 zu bestimmen.



$$a = \frac{d - D_2}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \qquad b = \frac{d_2 - D_1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \qquad c = \frac{d_2 - D_m}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

Bild A 2.9-4: Darstellung der Größen bei Bolzen- und Muttergewinde (konisches Muttergewinde)

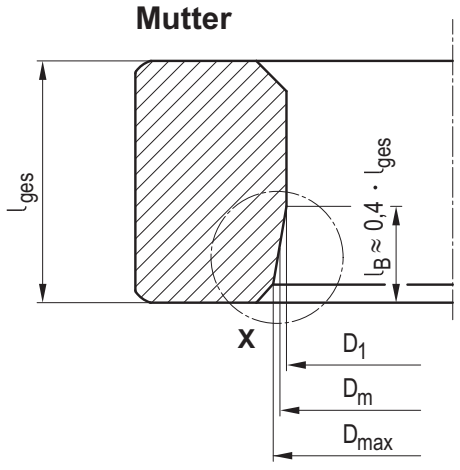


Bild A 2.9-5: Darstellung der Größen bei der Mutter (mit konischem Teil)

A 2.9.4.5.4 Berechnungsbeiwerte C_1, C_2, C_3

(1) Der Berechnungsbeiwert C_1 ist gemäß der nachfolgenden Gleichung

$$C_1 = \left[-\left(\frac{SW}{d}\right)^2 + 3{,}8 \cdot \left(\frac{SW}{d}\right) - 2{,}61 \right] \qquad \text{(A 2.9-40)}$$

für $1{,}4 \le \frac{SW}{d} \le 1{,}9$

oder nach **Bild A 2.9-6** zu bestimmen.

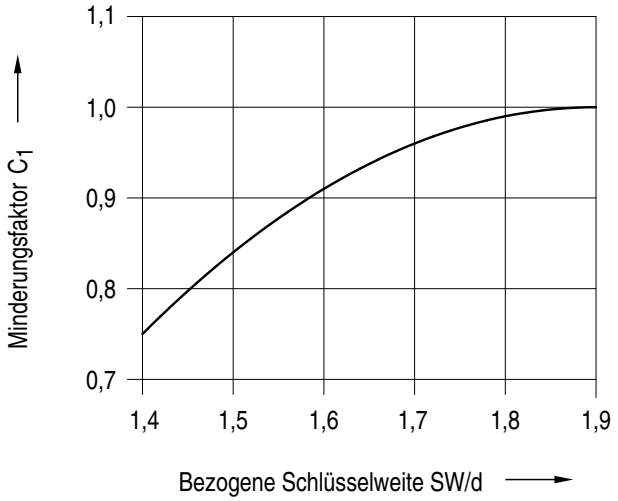


Bild A 2.9-6: Faktor C_1 zur Kennzeichnung der Verminderung der Abstreiffestigkeit von Bolzen- und Muttergewinde infolge Mutteraufweitung

Im Falle verzahnter Muttern ist anstelle der Schlüsselweite SW ein äquivalenter Wert einzusetzen.

(2) Der Berechnungsbeiwert C_2 lässt sich gemäß der Gleichung (A 2.9-46) oder nach **Bild A 2.9-7** bestimmen.

Die hierzu erforderlichen Größen berechnen sich wie folgt:

Festigkeitsverhältnis R_S

$$R_S = \frac{(R_m \cdot A_{SG})_{Mutter/Sackloch}}{(R_m \cdot A_{SG})_{Bolzen}} \qquad \text{(A 2.9-41)}$$

Hinweis:
Bei der Ermittlung des Festigkeitsverhältnisses ist der Quotient der Scherflächen $A_{SG\ Mutter/Sackloch}$ und $A_{SG\ Bolzen}$ zu bilden, so dass sich die Einschraubtiefe l herauskürzt.

Die Scherfläche A_{SG} des Mutter- oder Sacklochgewindes ist

$$A_{SGMutter/Sackloch} = \frac{l}{P} \cdot \pi \cdot d \cdot \left[\frac{P}{2} + (d - D_2) \cdot \tan\frac{\alpha}{2} \right] \qquad \text{(A 2.9-42)}$$

Die Größe der Scherfläche $A_{SG\ Bolzen}$ des Bolzens ist davon abhängig, ob es sich um eine Schraubverbindung mit Sackloch oder Mutter mit zylindrischem Gewinde oder um eine Schraubverbindung mit einer Mutter handelt, die einen konischen Gewindeteil besitzt.

Demnach lautet die Gleichung der Scherfläche $A_{SG\ Bolzen}$ bei Schraubverbindungen mit Sackloch oder zylindrischer Mutter:

$$A_{SGBolzen} = \frac{l}{P} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot \left[\frac{P}{2} + (d_2 - D_1) \cdot \tan\frac{\alpha}{2} \right] \qquad \text{(A 2.9-43)}$$

Die Größe der Scherfläche $A_{SG\,Bolzen}$ eines Bolzens bei Schraubverbindungen mit Mutter mit konischem Gewindeteil nach **Bild A 2.9-5** und unter Berücksichtigung der Beziehung $l_B = 0{,}4\ l$ lautet:

$$A_{SG\,Bolzen} = \frac{0{,}6 \cdot l}{P} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot \left[\frac{P}{2} + (d_2 - D_1) \cdot \tan\frac{\alpha}{2}\right] + \\ + \frac{l_B}{P} \cdot \pi \cdot D_m \cdot \left[\frac{P}{2} + (d_2 - D_m) \cdot \tan\frac{\alpha}{2}\right] \quad \text{(A 2.9-44)}$$

D_m errechnet sich aus $D_m = 1{,}015 \cdot D_1$ (A 2.9-45)

C_2 errechnet sich für $1 < R_S \leq 2{,}2$ aus der Gleichung

$$C_2 = 5{,}594 - 13{,}682 \cdot R_S + 14{,}107 \cdot {R_S}^2 - 6{,}057 \cdot {R_S}^3 + 0{,}9353 \cdot {R_S}^4 \quad \text{(A 2.9-46)}$$

und für $R_S \leq 1$ zu $C_2 = 0{,}897$

C_2 kann auch aus **Bild A 2.9-7** bestimmt werden.

(3) Der Berechnungsbeiwert C_3 berechnet sich für $0{,}4 \leq R_S < 1$ aus der Gleichung

$$C_3 = 0{,}728 + 1{,}769 \cdot R_S - 2{,}896 \cdot {R_S}^2 + 1{,}296 \cdot {R_S}^3 \quad \text{(A 2.9-47)}$$

und für $R_S \geq 1$ zu $C_3 = 0{,}897$

C_3 kann auch aus **Bild A 2.9-7** bestimmt werden.

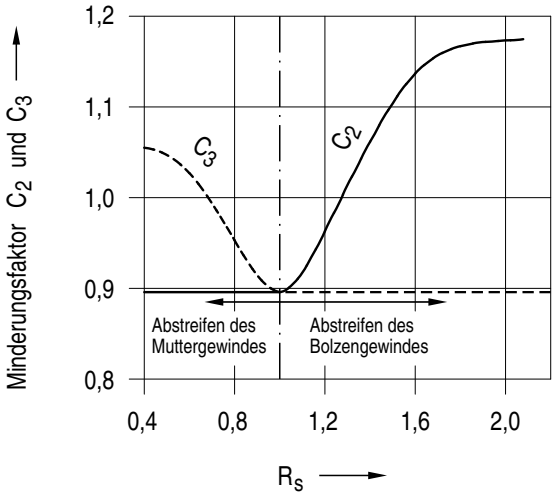


Bild A 2.9-7: Faktor zur Kennzeichnung der Verminderung der Abstreiffestigkeit von Bolzen- und Muttergewinde als Folge plastischer Gewindeverformung

A 2.9.4.5.5 Erforderliche Einschraubtiefe für Armaturengehäuse

(1) Alternativ zum Verfahren nach Abschnitt A 2.9.4.5.1 bis A 2.9.4.5.4 darf bei Armaturen die Einschraubtiefe wie folgt überprüft werden. Der Nachweis gilt als erbracht, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

a) $l \geq 0{,}8 \cdot d$ (A 2.9-48)

und

b) $$l \geq \frac{2 \cdot F_S}{n \cdot \pi \cdot d_2 \cdot S_m} \quad \text{(A 2.9-49)}$$

mit l = Einschraublänge

n = Anzahl der Schrauben

d, d_2 gemäß **Bild A 2.9-8**

S_m (S bei Armaturengehäusen der Prüfgruppen A2 oder A3) ist der kleinere Spannungsvergleichswert der zu verschraubenden Werkstoffe nach **Tabelle 6.6-1**.

(2) Der Einbauzustand und die Betriebszustände sind getrennt nachzuweisen.

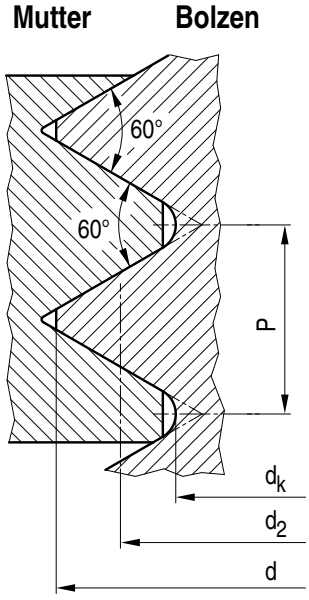


Bild A 2.9-8: Gewindeabmessungen

A 2.10 Flansche

A 2.10.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt A 2.10

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
a	Hebelarm allgemein	mm
a_1	Abstand von der Mitte der Schraube zur Schnittstelle C-C	mm
a_D	Abstand von der Mitte der Schraube zum Angriffspunkt der Dichtungskraft F_D	mm
a_F	Abstand von der Mitte der Schraube zum Angriffspunkt der Ringflächenkraft F_F	mm
a_M	Abstand von der Mitte der Schraube zur äußeren Kontaktstelle der beiden Flansche	mm
a_R	Abstand von der Mitte der Schraube zum Angriffspunkt der Rohrkraft F_R	mm
a_{Reib}	$a_{Reib} = 0{,}5 \cdot [d_t - 0{,}5 \cdot (d_{Fa} + d_D + b_D)]$	mm
b	Breite des Flanschringquerschnittes	mm
b_D	Dichtungsbreite gemäß Abschnitt A 2.11	mm
c_B	Federsteifigkeit eines Blinddeckels	N/mm
c_D	Federsteifigkeit der Dichtung	N/mm
$c_{D,KNS}$	Federsteifigkeit der Dichtung im Kraftnebenschluss (bei Rückverformung)	N/mm
c_S	Federsteifigkeit der Schrauben	N/mm
d_1	Los-Flanschring-Innendurchmesser	mm
d_2	Los-Flanschring-Außendurchmesser	mm
d_D	mittlerer Durchmesser oder Durchmesser des Berührungskreises einer Dichtung	mm
d_{D1}, d_{D2}	mittlerer Durchmesser bei doppelter O-Ring-Dichtung	mm
d_F	Flansch- oder Bund-Außendurchmesser	mm
d_{FA}	äußerer Flanschauflagedurchmesser	mm
$d_{Kontakt}$	Durchmesser der Krafteinleitung ($F_{Kontakt}$) bei Kraftnebenschlussverbindungen	mm

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
d_M	Äußerer Durchmesser der Kontaktstelle der beiden Flansche im Kraftnebenschluss	mm
d_L	Schraubenlochdurchmesser	mm
d_L'	Berechnungsdurchmesser eines Schraubenloches	mm
d_i	Innendurchmesser von Rohr-, Mantel- oder Flanschring	mm
d_t	Lochkreisdurchmesser	mm
d_t^*	fiktiver Auflagedurchmesser von Losflanschen auf Losbunden (siehe Bilder A 2.10-3, A 2.10-5, A 2.10-6)	mm
e_1, e_2	Schwerpunktabstand	mm
f	Höhe einer Dichtleiste	mm
g_{KNS}	Relaxationsfaktor	—
h	Höhe des Flanschblatts	mm
h_A	Höhe des kegeligen Ansatzes	mm
h_B	wirksamer Anteil der Flanschzarge an der Steifigkeit des Flanschanschlusses	mm
h_D	Höhe der Dichtung	mm
h_F	wirksame Höhe des Flanschblatts	mm
h_L	Höhe eines losen Flanschrings	mm
h_S	Flanschblattdicke zur Aufnahme der Schubspannung im Schnitt C-C	mm
n	Anzahl der Schraubenlöcher	—
p	Auslegungsdruck	MPa
p'	Prüfdruck	MPa
$p_{KNS/L}$	abdichtbarer Druck bei Kraftnebenschlussverbindungen	MPa
r, r_1	Übergangsradius siehe Abschnitt 5.2.4 (3)	mm
s_1	erforderliche Rohr- oder Mantelwanddicke zur Aufnahme der Längskraft	mm
s_F	Dicke des Flanschansatzes am Übergang zum Flanschblatt	mm
s_R	Rohr- oder Mantelwanddicke	mm
s_x	zum Schnitt X-X gehörige Wandstärke	mm
t	Schraubenteilung	mm
x_S	Schraubenlängung	mm
A	Querschnittsfläche	mm^2
A_1, A_2	Teilquerschnittsflächen gemäß **Bild A 2.10-1**	mm^2
C_F	Drehfedersteifigkeit des Flansches	$\frac{N \cdot mm}{rad}$
E_B, E_D, E_F, E_S	Elastizitätsmodul des Blinddeckel-, Dichtungs-, Flansch- und Schraubenwerkstoffs	N/mm^2
E_{FT}	Elastizitätsmodul des Flanschwerkstoffs bei Temperatur	N/mm^2
F_{BZ}	Zusatzkraft am Blinddeckel	N
F_D	Dichtungskraft	N
F_{DB}	Betriebsdichtungskraft	N
F_F	Ringflächenkraft infolge Innenkraft	N
F_i	Innendruckkraft	N
$F_{Kontakt}$	Kraft an der metallischen Auflage bei Kraftnebenschlussverbindungen	N
F_R	Rohrkraft	N
F_{RP}	Rohrkraft infolge Innendruck	N
F_S	Schraubenkraft	N
F_{S0}	Schraubenkraft im Einbauzustand	N
$F_{S0\,max}$	aufgrund des Anziehverfahrens maximal mögliche Schraubenkraft im Einbauzustand, Bestimmung z. B. nach VDI 2230 Blatt 1	N
F_{S0U}	Schraubenkraft für den Einbauzustand (untere Grenze)	N
F_{SB}	der jeweiligen Beanspruchungsstufe zugeordnete Schraubenkraft im Betriebszustand	N
K, L	Berechnungsbeiwerte	—
M	äußeres Stülpmoment beim betrachteten Lastfall	Nmm
M_E	äußeres Stülpmoment bei Kraftnebenschlussverbindungen im Einbauzustand	Nmm
S, S_m	Spannungsvergleichswert gemäß Tabelle 6.6-1	N/mm^2
S_{P1}, S_{P2}	Schwerpunkte der Teilfläche $A_1 = A_2$	—
W	Flanschwiderstand	mm^3
W_A	Flanschwiderstand für den Querschnitt A-A	mm^3
W_B	Flanschwiderstand für den Querschnitt B-B	mm^3
W_{erf}	erforderlicher Flanschwiderstand	mm^3
W_{vorh}	vorhandener Flanschwiderstand	mm^3
W_X	Flanschwiderstand für den Querschnitt X-X	mm^3
α	Wärmeausdehnungskoeffizient	$°C^{-1}$
γ_{zul}	zulässiger Neigungswinkel des Flanschblatts gegen die Ebene senkrecht zur Flanschachse	Grad
λ	spezifische Leckagerate	mg/(s·m)
σ_{Vx}	Flächenpressung	N/mm^2
σ_{zul}	zulässige Spannung gemäß **Tab. A 2.10-1**	N/mm^2
Δh	für die jeweilige Druckstufe und Dichtheitsklasse zulässige Rückfederung aus der Blocklage gemäß **Formblatt A 2.11-2**	mm
$\Delta s_{1,2}$	anteilige Spaltvergrößerung (Flansch 1 und Flansch 2) aufgrund der Flanschblattneigung bei Kraftnebenschlussverbindungen	mm

Mit dem Index „0" wird der Einbauzustand, mit dem Index „x" der jeweils betrachtete Zustand (Betriebszustand, Prüfzustand) bezeichnet.

A 2.10.2 Allgemeines

(1) Die nachstehende Berechnung gilt für die Dimensionierung und die Festigkeitsnachweise kreisförmiger Flansche aus Stahl, die als kraftschlüssige Verbindungselemente mit Dichtungen im Krafthauptschluss (KHS) und mit Dichtungen im Kraftnebenschluss (KNS) innendruckbeansprucht sind. Voraussetzung für Flanschverbindungen mit der Dichtung im Kraftnebenschluss ist eine hinreichende Steifigkeit und damit eine begrenzte Spalthöhe im Bereich der Dichtung. Unter Flanschen werden im Folgenden Vorschweißflansche, Vorschweißbunde, Losflansche und Deckelflansche verstanden.

(2) Der Dichtheitsnachweis ist mit der minimalen rechnerischen Schraubenkraft zu führen. Bei Kraftnebenschlussverbindungen mit einer Schraubenanzahl n gleich oder größer als 8 darf abweichend hiervon der Nachweis mit einer mittleren rechnerischen Schraubenkraft geführt werden. Bei Kraftnebenschlussverbindungen mit einer Schraubenanzahl n kleiner als 8 ist die Spaltvergrößerung an der Dichtung mit der maximalen Schraubenkraft zu überprüfen.

Die Festigkeitsnachweise des Flansches und der Dichtung im Einbauzustand sind mit der maximalen rechnerischen Schraubenkraft zu führen, bei den Festigkeitsnachweisen im Be-

triebszustand darf die mittlere rechnerische Schraubenkraft zugrunde gelegt werden.

(3) Ist für Flanschverbindungen der Nachweis einer ausreichenden Dichtheit in den Beanspruchungsstufen C und D erforderlich, so darf dieser durch eine Nachprüfung der Kraft- und Verformungsverhältnisse nach Abschnitt A 2.10.6 oder A 2.10.7 erfolgen.

A 2.10.3 Ausführung und Schweißung

(1) Behälterflansche dürfen geschmiedet oder nahtlos gewalzt werden.

(2) Schweißen und gegebenenfalls notwendige Wärmebehandlungen richten sich nach den komponentenbezogenen Vorschriften.

(3) Für Flanschverbindungen an Stutzen und in Rohrleitungen sollen Vorschweißflansche nach DIN-Normen oder Vorschweißflansche mit Normabmessungen eingesetzt werden. Der rechnerische Nachweis darf bei Normflanschen nach DIN EN 1092-1 für PN ≤ 25 entfallen, sofern die folgenden Maßnahmen getroffen werden:

a) Bei alleiniger Belastung durch Innendruck ist die nächsthöhere Nenndruckstufe zu wählen.

b) Bei zusätzlicher Belastung durch äußere Kräfte und/oder Momente sind die Flansche eine weitere Nenndruckstufe höher zu wählen.

A 2.10.4 Dimensionierung der Flansche bei Krafthauptschlussverbindungen

A 2.10.4.1 Allgemeines

(1) Die Berechnung besteht aus der Dimensionierung und dem Dichtheits-/Festigkeitsnachweis gemäß Abschnitt A 2.10.6. Die Flanschverbindung muss so bemessen sein, dass sie die Kräfte beim Zusammenbau (Vorverformen der Dichtung), bei der Druckprüfung, im Betrieb bei den An- und Abfahrvorgängen sowie bei eventuellen Störfällen aufnehmen kann.

Ist der Prüfdruck $p' > p \cdot \frac{\sigma_{zul,\,Prüfzustand}}{\sigma_{zul,\,Betriebszustand}}$

so ist die Berechnung auch für diesen Belastungsfall durchzuführen. Die Bedingung ist sowohl für den Flansch- als auch für den Schraubenwerkstoff zu überprüfen.

(2) Die Flansche sind nach den in den folgenden Abschnitten angeführten Gleichungen zu berechnen. Der Einfluss äußerer Kräfte und Momente ist zu berücksichtigen und nachzuweisen.

(3) Die dem rechnerischen Nachweis zugrunde gelegte Höhe h_F oder h_L des Flanschblatts muss am ausgeführten Bauteil vorhanden sein. Nuten für normale Feder-, Nut- oder Ring-Joint-Verbindungen brauchen nicht berücksichtigt zu werden.

(4) Maßgebend für die Auslegung der Flansche ist der erforderliche Flanschwiderstand W_{erf}.

(5) Für die Ermittlung des erforderlichen Flanschwiderstands im Betriebszustand für Flansche der Abschnitte A 2.10.4.2 und A 2.10.4.3 in den Schnitten A-A und B-B und für Flansche nach Abschnitt A 2.10.4.4 im Schnitt A-A gilt:

$$W_{erf} = \frac{(F_{DBU/L} + F_Z)\cdot a_D + F_R \cdot a_R + F_F \cdot a_F}{\sigma_{zul}} \qquad \text{(A 2.10-1)}$$

Für die genannten Flansche im Schnitt C-C gilt:

$$W_{erf} = \frac{F_{SBU/L} \cdot a_1}{\sigma_{zul}} \qquad \text{(A 2.10-2)}$$

Für die Flansche des Abschnitte A 2.10.4.5 gilt

$$W_{erf} = \frac{F_{SBU/L} \cdot a_D}{\sigma_{zul}} \qquad \text{(A 2.10-3)}$$

Im Einbauzustand gilt für die Flansche der Abschnitte A 2.10.4.2 bis A 2.10.4.5 ohne Rücksicht auf die Schnitte

$$W_{erf} = \frac{F_{S0U} \cdot a_D}{\sigma_{zul}} \qquad \text{(A 2.10-4)}$$

mit σ_{zul} zulässige Spannung nach **Tabelle A 2.10-1**.

Hinweis:
Die Berücksichtigung der maximalen Einbauschraubenkraft F_{S0max} erfolgt im Rahmen des Festigkeitsnachweises, siehe **Tabelle A 2.10-1** lfd. Nr. 3.

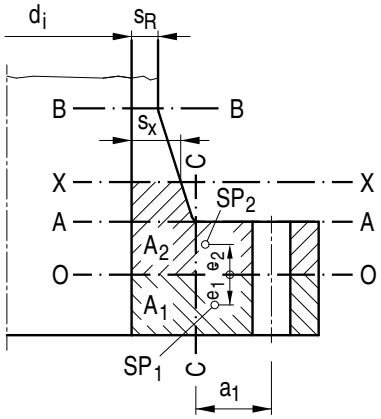


Bild A 2.10-1: Flanschquerschnitt

Die Gleichungen (A 2.10-1) bis (A 2.10-3) dürfen sinngemäß auf die Prüffälle angewendet werden.

Die Kräfte F sind nach Abschnitt A 2.9 zu ermitteln.

Die Hebelarme für Dichtungen im Krafthauptschluss betragen:

$$a_D = \frac{d_t - d_D}{2} \qquad \text{(A 2.10-5)}$$

$$a_R = \frac{d_t - d_i - s_R}{2} \qquad \text{(A 2.10-6)}$$

$$a_F = \frac{2\cdot d_t - d_D - d_i}{4} \qquad \text{(A 2.10-7)}$$

Bei Vorschweißbunden ist anstelle d_t der Teilkreisdurchmesser d_t^* einzusetzen (siehe **Bilder A 2.10-3** und **A 2.10-5**).

Für Losflansche gilt:

$$a = a_D = \frac{d_t - d_t^*}{2} \qquad \text{(A 2.10-8)}$$

Für die Berechnung des Flansches stellt die Verwendung von

$$d_t^* = \frac{d_1 + 2\cdot r + d_F}{2}$$

und für die Berechnung des Bundes die Verwendung von

$$d_t^* = d_F$$

einen konservativen Ansatz dar.

d_t^* darf in Abhängigkeit von den Steifigkeitsverhältnissen des Bundes und des Flansches den realen Gegebenheiten angepasst werden.

(6) Der Flanschwiderstand muss allgemein für einen beliebigen Schnitt X-X (**Bild A 2.10-1**) der Bedingung

$$W_x = 2\cdot\pi\cdot\left[A_1\cdot(e_1+e_2) + \frac{1}{8}\cdot(d_i+s_x)\cdot\left(s_x{}^2 - s_1{}^2\right)\right] \qquad \text{(A 2.10-9)}$$

genügen.

Dabei ist s_1 die infolge der Längskräfte im Flanschansatz erforderliche Wanddicke.

Sie errechnet sich aus folgender Gleichung:

$$s_1 = \frac{F_R}{\pi \cdot (d_i + s_R) \cdot \sigma_{zul}} \qquad \text{(A 2.10-10)}$$

σ_{zul} ist nach **Tabelle A 2.10-1** zu bestimmen. Der Faktor Φ darf für Gleichung A 2.10-10 entfallen.

Mit e_1 und e_2 werden die Schwerpunktabstände der Teilquerschnittsflächen $A_1 = A_2$ (im **Bild A 2.10-1** durch verschiedene Schraffuren gekennzeichnet) von der für die im angenommenen vollplastischen Zustand geltenden neutralen Linie 0-0 bezeichnet. Der Schwächung des Flanschblatts durch die Schraubenlöcher muss durch den Berechnungsdurchmesser d'_L in der nachfolgenden Gleichung Rechnung getragen werden:

Für Flansche mit $d_i \geq 500$ mm ist

$$d'_L = d_L/2 \qquad \text{(A 2.10-11)}$$

und für Flansche mit $d_i < 500$ mm ist

$$d'_L = d_L \cdot (1 - d_i/1000) \qquad \text{(A 2.10-12)}$$

A 2.10.4.2 Vorschweißflansche mit innenliegender Dichtung und konischem Ansatz nach Bild A 2.10-2

Der Flansch ist in den Querschnitten A-A, B-B und C-C zu überprüfen, wobei der kleinste Flanschwiderstand für das Festigkeitsverhalten maßgebend ist.

Der vorhandene Flanschwiderstand im Querschnitt bei A-A ergibt sich aus:

$$W_A = \frac{\pi}{4} \cdot \left[(d_F - d_i - 2 \cdot d'_L) \cdot h_F^2 + (d_i + s_F) \cdot \left(s_F^2 - s_1^2 \right) \right] \geq W_{erf} \qquad \text{(A 2.10-13)}$$

Die Gleichung (A 2.10-13) darf auch zur Bestimmung von h_F verwendet werden.

Der vorhandene Flanschwiderstand im Querschnitt bei B-B ergibt sich aus:

$$W_B = \pi \cdot \left[2 \cdot (d_F - d_i - 2 \cdot d'_L) \cdot e_1 \cdot (e_1 + e_2) + \frac{1}{4} \cdot (d_i + s_R) \cdot \cdot \left(s_R^2 - s_1^2 \right) \right] \geq W_{erf} \qquad \text{(A 2.10 -14)}$$

Die Schwerpunktabstände e_1 und e_2 bei Flanschen mit konischem Ansatz betragen:

$$e_1 = \frac{1}{4} \cdot \left(h_F + \frac{h_A \cdot (s_F + s_R)}{d_F - d_i - 2 \cdot d'_L} \right) \qquad \text{(A 2.10-15)}$$

$$e_2 = \frac{K}{L} \qquad \text{(A 2.10-16)}$$

dabei ist

$$K = 0{,}5 \cdot (d_F - d_i - 2 \cdot d'_L) \cdot (h_F - 2 \cdot e_1)^2 + + h_A \cdot (h_F - 2 \cdot e_1) \cdot (s_F + s_R) + \frac{h_A^2}{3} \cdot (s_F + 2 \cdot s_R) \qquad \text{(A 2.10-17)}$$

$$L = (d_F - d_i - 2 \cdot d'_L)(h_F - 2 \cdot e_1) + h_A \cdot (s_F + s_R) \qquad \text{(A 2.10-18)}$$

Die zur Aufnahme der Schubbeanspruchung erforderliche Blattdicke h_S ergibt sich wie folgt:

im Einbauzustand

$$h_{S0} = \frac{2 \cdot F_{S0}}{\pi \cdot (d_i + 2 \cdot s_F) \cdot \sigma_{zul}} \qquad \text{(A 2.10-19)}$$

im Betriebszustand

$$h_{SB} = \frac{2 \cdot F_{SB}}{\pi \cdot (d_i + 2 \cdot s_F) \cdot \sigma_{zul}} \qquad \text{(A 2.10-20)}$$

mit σ_{zul} : zulässige Spannung nach **Tabelle 2.10-1**.

Der Flanschwiderstand im Querschnitt C-C ergibt sich dann aus:

$$W_C = \frac{\pi}{4} \cdot \left[h_F^2 \cdot (d_F - 2 \cdot d'_L) - h_S^2 \cdot (d_i + 2 \cdot s_F) \right] \qquad \text{(A 2.10-21)}$$

Das äußere Moment beträgt in diesem Fall

$$M_C = F_s \cdot a_1 \qquad \text{(A 2.10-22)}$$

mit $F_S = F_{S0U}$ im Einbauzustand
$F_S = F_{SBU/L}$ im Betriebszustand.

Die Anwendung der Gleichung A 2.10-21 kann zu sehr konservativen Ergebnissen führen, z. B. im Falle d_D größer als $(d_i + 2 \cdot s_F)$. Detailliertere Betrachtungen unter Berücksichtigung der Hebelarm- und Geometrieverhältnisse sind zulässig.

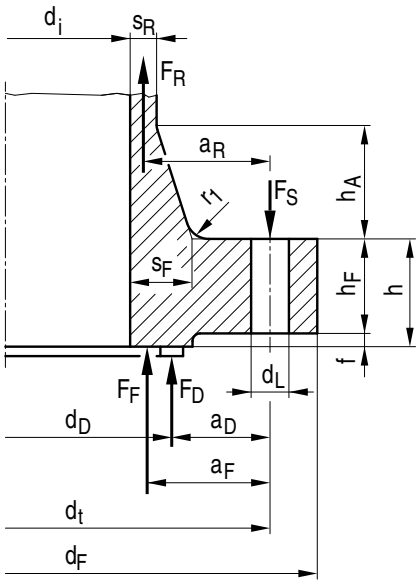


Bild A 2.10-2: Vorschweißflansch mit konischem Ansatz

A 2.10.4.3 Vorschweißbunde mit konischem Ansatz nach Bild A 2.10-3

Die Berechnung erfolgt nach Abschnitt A 2.10.4.2 mit $d'_L = 0$.

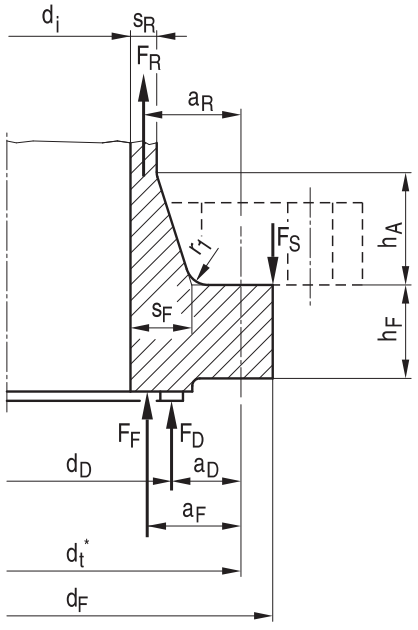


Bild A 2.10-3: Vorschweißbund mit konischem Ansatz

A 2.10.4.4 Flansche und Bunde mit innenliegender Dichtung und zylindrischem Ansatz nach Bild A 2.10-4 und Bild A 2.10-5

Der Flansch ist in den Querschnitten A-A und C-C zu überprüfen. Der vorhandene Flanschwiderstand im Schnitt A-A ergibt sich aus

$$W_A = \frac{\pi}{4} \cdot \left[\left(d_F - d_i - 2 \cdot d_L' \right) \cdot h_F^{\,2} + \left(d_i + s_R \right) \cdot \left(s_R^{\,2} - s_1^{\,2} \right) \right] \geq W_{erf} \qquad \text{(A 2.10-23)}$$

Der vorhandene Flanschwiderstand im Schnitt C-C ergibt sich entsprechend Abschnitt A 2.10.4.2.

Bei der Berechnung von Vorschweißbunden ist $d_L' = 0$ zu setzen.

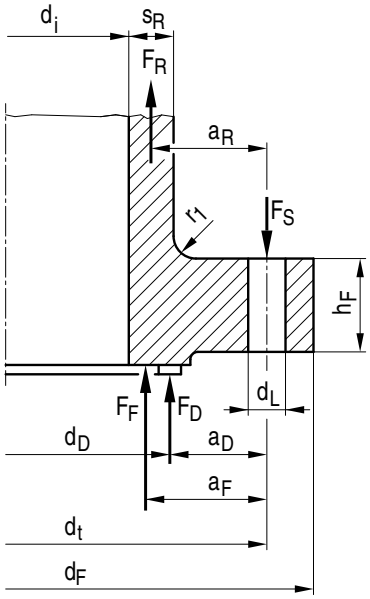


Bild A 2.10-4: Vorschweißflansch mit zylindrischem Ansatz

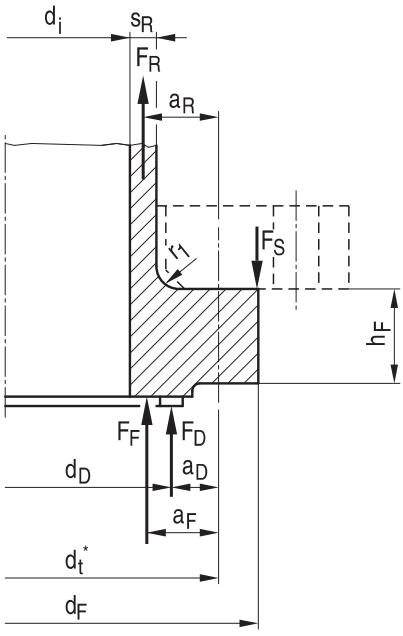


Bild A 2.10-5: Vorschweißbund mit zylindrischem Ansatz

A 2.10.4.5 Losflansche nach Bild A 2.10-6

Die erforderliche Höhe des Flanschblatts beträgt

$$h_L = \sqrt{\frac{4 \cdot W_{erf}}{\pi \cdot \left(d_2 - d_1 - 2 \cdot d_L' \right)}} \qquad \text{(A 2.10-24)}$$

mit W_{erf} nach Gleichung (A 2.10-3).

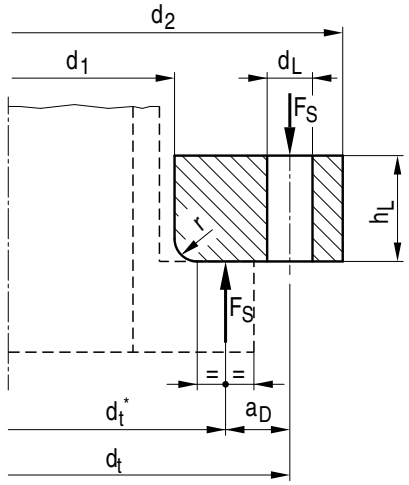


Bild A 2.10-6: Losflansch

A 2.10.5 Dimensionierung der Flansche bei Kraftnebenschlussverbindungen

(1) Bei Flanschverbindungen mit der Dichtung im Kraftnebenschluss ist eine hinreichende Steifigkeit und damit eine begrenzte Spalthöhe im Bereich der Dichtung erforderlich.

(2) Der für eine hinreichende Steifigkeit erforderliche Flanschwiderstand berechnet sich zu

$$W_{erf} = \frac{0{,}75 \cdot M \cdot \left(d_F + d_i \right)}{E_{FT} \cdot \left(h_F + h_B \right) \cdot \gamma_{zul}} \cdot \frac{180°}{\pi} \cdot \frac{1}{f_{C_F}} \qquad \text{(A 2.10-25)}$$

Hierbei sind

$$\gamma_{zul} = \frac{\Delta s_{1,2} \cdot 180°}{\left(a_D - a_M \right) \cdot \pi} \qquad \text{(A 2.10-26)}$$

f_{C_F}: Verhältnis der tatsächlichen Drehsteifigkeit des Flansches zu der nach Gleichung A 2.10-37 ermittelten rechnerischen Drehsteifigkeit

Sofern keine anderen Werte vorliegen, sind für f_{C_F} folgende Werte anzunehmen:

$f_{C_F} = 0{,}8$ bei Flanschen mit zylindrischem Ansatz

$f_{C_F} = 0{,}9$ bei Flanschen mit konischem Ansatz

Das Stülpmoment M wird für die zu betrachtenden Fälle wie folgt bestimmt:

a) Einbauzustand,

$$M = M_E = F_{DKU} \cdot a_D + F_{R0} \cdot a_R + F_{Z0} \cdot a_{Reib} \qquad \text{(A 2.10-27)}$$

b) normaler und anomaler Betrieb sowie Prüfzustand

$$M = F_{DKU} \cdot g_{KNS} \cdot a_D + F_{Rx} \cdot a_R + F_F \cdot a_F + F_{Zx} \cdot a_{Reib} \qquad \text{(A 2.10-28)}$$

Die Summe der Werte für die maximalen Spaltvergrößerungen beider Flanschblätter $\Delta s_1 + \Delta s_2$ muss kleiner sein als die in **Formblatt A 2.11-2** vom Hersteller für die jeweilige Dichtheitsklasse angegebene zulässige Rückfederung aus der Blocklage Δh.

Bei Flanschen mit kegeligem Ansatz ist der vorhandene Flanschwiderstand $W = W_A$ nach Gleichung (A 2.10-13) zu bestimmen. Ferner gilt

$$h_B = 0{,}58 \cdot \left(\frac{d_i}{s_F} \right)^{0{,}29} \cdot h_A \qquad \text{(A 2.10-29)}$$

Für Anschweißflansche, bei denen das Rohr oder der Mantel ohne kegeligen Übergang an das Flanschblatt anschließt, ist der vorhandene Flanschwiderstand $W = W_A$ nach Gleichung (A 2.10-23) zu bestimmen. Ferner gilt

$$h_B = 0{,}9 \cdot \sqrt{\left(d_i + s_R \right) \cdot s_R} \qquad \text{(A 2.10-30)}$$

(3) Der für eine hinreichende Festigkeit erforderliche Flanschwiderstand berechnet sich zu

$$W_{erf} = \frac{M}{\sigma_{zul}} \qquad \text{(A 2.10-31)}$$

A 2.10.6 Dichtheits- und Festigkeitsnachweise für Krafthauptschlussverbindungen

A 2.10.6.1 Allgemeines

(1) In der In- und Außerbetriebnahme ändert sich der Verspannungszustand infolge von Innendruck, betriebsunabhängigen Zusatzkräften und Zusatzmomenten, temperaturbedingter Änderung der E-Moduln, unterschiedlicher Wärmedehnung, Setzen von Dichtungen, insbesondere von Weichstoffdichtungen.

(2) Ausgehend von der gewählten Vorspannkraft sind unter Beachtung des elastischen Verformungsverhaltens der Flanschverbindung die Schraubenkraft und die Restdichtungskraft unter Berücksichtigung abzutragender Torsionsmomente und Querkräfte für jeden maßgebenden Lastfall zu überprüfen.

Der Mutternweg stellt bei paarigen Flanschen die Summe der Federwege der Flansche $2 \cdot \Delta F$, der Schrauben ΔS, der Dichtung ΔD, im Falle von Temperatureinwirkung der unterschiedlichen Wärmedehnung von Flansch und Schraube ΔW sowie im Falle von Setzvorgängen in der Schraubenverbindung und in der Dichtung ΔV dar. Unter Berücksichtigung dieser Größen bleibt der Mutternweg im Einbauzustand E für jeden beliebigen Betriebszustand x konstant:

$$2 \cdot \Delta F_E + \Delta S_E + \Delta D_E = 2 \cdot \Delta F_x + \Delta S_x + \Delta D_x + \Delta W_x + \Delta V_x \qquad \text{(A 2.10-32)}$$

Bei nicht paarigen Flanschen tritt an die Stelle von $2 \cdot \Delta F$ die Summe der Federwege der unterschiedlichen Einzelflansche $\Delta F_1 + \Delta F_2$, bei Flansch-Deckel-Verbindungen tritt an die Stelle von $2 \cdot \Delta F$ die Summe der Federwege von Flansch und Deckel $\Delta F + \Delta B$.

Bei Flanschverbindungen mit Dehnhülsen sind auch deren Steifigkeiten zu berücksichtigen.

(3) Mit den sich aus der Nachprüfung der Kraft- und Verformungsverhältnisse der maßgebenden Lastfälle maximal ergebenden Schrauben- und Dichtungskräften ist der Festigkeitsnachweis der gesamten Flanschverbindung (Flansch, Blinddeckel, Schrauben und Dichtung) zu kontrollieren.

(4) Die zulässigen Spannungen für Flansche sind der **Tabelle A 2.10-1** lfd. Nr. 4 zu entnehmen. Bei der Bestimmung der Widerstandmomente sind neben diesen zulässigen Spannungen in der Gleichung A 2.10-10 die Kraft F_{Rx} und in der Gleichung A 2.10-20 die Kraft F_{SBx} zugrunde zu legen.

(5) Eine allgemeine Vorgehensweise für die Führung der Dichtheits- und Festigkeitsnachweise für Flanschverbindungen mit der Dichtung im Krafthauptschluss zeigt **Bild A 2.10-8**.

(6) Die für die Berechnung der betrieblichen Belastungen erforderliche Vorspannkraft der Schrauben ist zuerst nach Abschnitt A 2.9.4.1 zu bestimmen ($F_{S0} = F_{S0U}$), auch wenn keine Dimensionierung erforderlich ist.

(7) Für die Vorspannkraft der Schrauben ist die Dichtungsflächenpressung im Einbauzustand σ_v zu berechnen, mit der die Mindestflächenpressung im Betriebszustand für die geforderte Dichtheitsklasse $\sigma_{BU/L}$ bestimmt wird, siehe Abschnitt A 2.11.2.

(8) Werden die einzelnen Bedingungen in **Bild A 2.10-8** nicht erfüllt, dann ist entsprechend iterativ vorzugehen.

A 2.10.6.2 Vereinfachtes Verfahren zur Nachprüfung der Kraft- und Verformungsverhältnisse

A 2.10.6.2.1 Allgemeines

(1) In den folgenden Abschnitten sind für einige Fälle der Einwirkung von Innendruck, Zusatzkräften und Zusatzmomenten, temperaturbedingter Änderung der E-Moduln, unterschiedlicher Wärmedehnung in Flansch und Schrauben sowie Setzvorgängen in der Dichtung Gleichungen zur angenäherten Ermittlung der Schraubenkräfte F_S, der Dichtungskräfte F_D, sowie der Verformungen ΔF, ΔS und ΔD in den betreffenden Zuständen angegeben.

(2) Alternativ hierzu darf zur detaillierteren Erfassung

a) der Drehsteifigkeit der Flansche,

b) des radialen Innendruckes,

c) des effektiven Schraubenkreisdurchmessers,

d) des effektiven Dichtungsdurchmessers und der effektiven Dichtungsbreite

eine angenäherte Nachprüfung des Kraft- und Verformungsverhaltens nach anderen Verfahren erfolgen.

A 2.10.6.2.2 Berechnung der Federsteifigkeiten

A 2.10.6.2.2.1 Schrauben

Die elastische Längung der Schrauben darf berechnet werden aus

$$\Delta S = \frac{F_S}{c_S} \qquad \text{(A 2.10-33)}$$

Für Starrschrauben gilt annähernd

$$c_S = \frac{n \cdot \pi \cdot E_S \cdot {d_N}^2}{4 \cdot (l + 0{,}8 \cdot d_N)} \qquad \text{(A 2.10-34)}$$

Für Dehnschrauben gilt

$$c_S = \frac{n \cdot \pi \cdot E_S}{4} \cdot \frac{{d_K}^2 \cdot {d_S}^2}{{d_K}^2 \cdot l_S + {d_S}^2 \cdot (l' + l'' + 0{,}8 \cdot d_N)} \qquad \text{(A 2.10-35)}$$

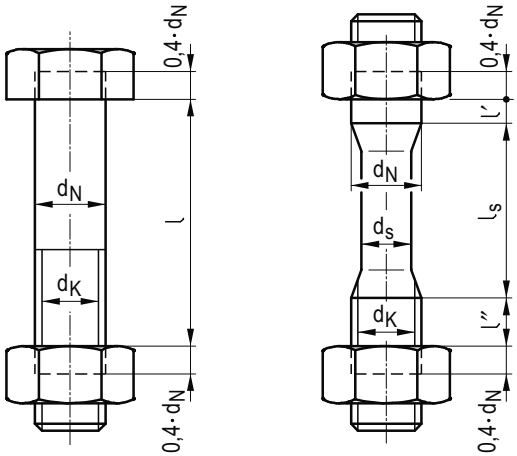


Bild A 2.10-7: Schrauben

A 2.10.6.2.2 Flansche

Die elastische Durchbiegung ΔF des Einzelflansches beträgt im Schraubenlochkreis

$$\Delta F = \frac{M \cdot a_D}{C_F} \qquad \text{(A 2.10-36)}$$

Bei der Berechnung der Verspannung paariger Flansche muss ΔF stets doppelt eingesetzt werden.

$$C_F = \frac{4 \cdot E_F \cdot (h_F + h_B) \cdot W}{3 \cdot (d_F + d_i)} \qquad \text{(A 2.10-37)}$$

Bei Flanschen mit kegeligem Ansatz ist $W = W_A$ nach Gleichung (A 2.10-13).

Hinweis:
Von einem kegeligen Ansatz wird ausgegangen, wenn die Bedingungen

$$0{,}2 \le \frac{s_F - s_R}{h_A} \le 0{,}5 \text{ und } \frac{h_A}{h_F} \ge 0{,}5$$

eingehalten sind.

Ferner gilt

$$h_B = 0{,}58 \cdot \left(\frac{d_i}{s_F}\right)^{0{,}29} \cdot h_A \qquad \text{(A 2.10-38)}$$

Für Anschweißflansche, bei denen das Rohr oder der Mantel ohne kegeligen Übergang an das Flanschblatt anschließt, gilt

$$W = \frac{\pi}{4} \cdot \left[\left(d_F - d_i - 2 \cdot d_L'\right) \cdot h_F{}^2 + \left(d_i + s_R\right) \cdot \left(s_R{}^2 - s_1{}^2\right)\right] \qquad \text{(A 2.10-39)}$$

Ferner gilt

$$h_B = 0{,}9 \cdot \sqrt{\left(d_i + s_R\right) \cdot s_R} \qquad \text{(A 2.10-40)}$$

Für Losflansche gilt

$$W = \frac{\pi}{4} \left(d_2 - d_1 - 2 \cdot d_L'\right) \cdot h_L{}^2 \qquad \text{(A 2.10-41)}$$

und $h_B = 0$

A 2.10.6.2.2.3 Blinddeckel

Die elastische Durchbiegung ΔB des Blinddeckels beträgt im Schraubenlochkreis für den Einbauzustand 0:

$$\Delta B_0 = \frac{F_{S0}}{c_{B0}} \qquad \text{(A 2.10-42)}$$

mit $F_{S0} = F_{D0}$ Einbauschraubenkraft

und c_{B0} Federsteifigkeit im Einbauzustand

und für den Betriebszustand x:

$$\Delta B_x = \frac{p \cdot \frac{d_D{}^2 \cdot \pi}{4} + F_{BZ}}{c_{Bxp}} + \frac{F_{Dx}}{c_{BxF_D}} \qquad \text{(A 2.10-43)}$$

wobei die Deckelkraft F_{Bx}

$$F_{Bx} = p \cdot \frac{d_D{}^2 \cdot \pi}{4} + F_{BZ} = F_{RP} + F_F + F_{RZ} \qquad \text{(A 2.10-44)}$$

sein muss und

c_{Bxp} = Federsteifigkeit für die Belastung durch die Deckelkraft

und

$c_{BxF_D} = c_{B,0} \cdot \frac{E_{BT}}{E_{BRT}}$ = Federsteifigkeit für die Belastung durch die Dichtungskraft F_{Dx}

Die Federsteifigkeiten für die unterschiedlichen Belastungsarten der Blinddeckel dürfen z. B.

a) Markus [8],
b) Warren C. Young, Fall 2 a Seite 339 [9],
c) Kantorowitsch [10]

entnommen oder mittels geeigneter Methode ermittelt werden.

A 2.10.6.2.2.4 Dichtungen

Der elastische Anteil der Zusammendrückung (Rückfederung) der Dichtung D kann für Flachdichtungen wie folgt angenommen werden

$$\Delta D = \frac{F_D}{c_D} \qquad \text{(A 2.10-45)}$$

wobei

$$c_D = \frac{E_D \cdot \pi \cdot d_D \cdot b_D}{h_D} \qquad \text{(A 2.10-46)}$$

Hierbei ist je nach Lastfall E_D der E-Modul des Dichtungswerkstoffes bei Einbau- oder Betriebstemperatur.

Bei Metalldichtungen aller Art ist die Rückfederung im Vergleich zur Durchbiegung der Flansche so gering, dass sie vernachlässigt werden kann.

A 2.10.6.2.2.5 Wärmedehnungsunterschiede und Setzbeträge

In den Gleichungen zur Berechnung der Schrauben- und Dichtungskräfte gemäß Abschnitt A 2.10.6.2.3 können auch Wärmedehnungsunterschiede zwischen Flansch, Blinddeckel, Schrauben und Dichtung sowie Setzbeträge berücksichtigt werden:

$$\Delta W_x = l_k \cdot \alpha_S \cdot \left(T_{Sx} - 20°\right) - h_{F1} \cdot \alpha_{F1} \cdot \left(T_{F1x} - 20°\right) - h_{F2} \cdot \alpha_{F2} \cdot \left(T_{F2x} - 20°\right) - h_D \cdot \alpha_D \cdot \left(T_{Dx} - 20°\right) \qquad \text{(A 2.10-47)}$$

mit

$(\Delta W)_x$: Differenz der thermischen Längenänderungen von Flansch, Blinddeckel, Schrauben und Dichtung. Die Indizes 1 und 2 beziehen sich auf den Flansch und den zugehörigen Gegenflansch oder Blinddeckel

l_k : Klemmlänge der Schrauben

$(\Delta h_D)_x$: Setzbetrag der Dichtung (ist nur bei Weichstoffdichtungen und Metall-Weichstoffdichtungen zu berücksichtigen; hierbei ist von den Angaben des Herstellers auszugehen.)

A 2.10.6.2.3 Berechnung der Schrauben- und Dichtungskräfte

A 2.10.6.2.3.1 Paarige Flanschverbindungen

Für paarige Flanschverbindungen gilt:

$$F_{DBx} = \frac{1}{\frac{1}{c_{Sx}} + \frac{2 \cdot a_D{}^2}{C_{Fx}} + \frac{1}{c_{Dx}}} \cdot \left[F_{S0} \cdot \left(\frac{1}{c_{S0}} + \frac{2 \cdot a_D{}^2}{C_{F0}} + \frac{1}{c_{D0}}\right) - F_{Rx} \cdot \left(\frac{1}{c_{Sx}} + \frac{a_R}{a_D} \cdot \frac{2 \cdot a_D{}^2}{C_{Fx}}\right) - F_{Fx} \cdot \left(\frac{1}{c_{Sx}} + \frac{a_F}{a_D} \cdot \frac{2 \cdot a_D{}^2}{C_{Fx}}\right) - \Delta W_x - \Delta h_{D_X} \right] \qquad \text{(A 2.10-48)}$$

und

$$F_{SBx} = F_{DBx} + F_{Rx} + F_{Fx} \qquad \text{(A 2.10-49)}$$

A 2.10.6.2.3.2 Nichtpaarige Flanschverbindungen

Für Flanschverbindungen mit nichtpaarigen Flanschen 1 und 2 gilt:

$$F_{DBx} = \frac{1}{\frac{1}{c_{Sx}} + \frac{a_D{}^2}{C_{F1x}} + \frac{a_D{}^2}{C_{F2x}} + \frac{1}{c_{Dx}}} \cdot \left[F_{S0} \cdot \left(\frac{1}{c_{S0}} + \frac{a_D{}^2}{C_{F10}} + \frac{a_D{}^2}{C_{F20}} + \frac{1}{c_{D0}}\right) - F_{R1x} \cdot \left(\frac{1}{c_{Sx}} + \frac{a_{R1}}{a_D} \cdot \frac{a_D{}^2}{C_{F1x}}\right) - F_{R2x} \cdot \frac{a_{R2}}{a_D} \cdot \frac{a_D{}^2}{C_{F2x}} - F_{F1x} \cdot \left(\frac{1}{c_{Sx}} + \frac{a_{F1}}{a_D} \cdot \frac{a_D{}^2}{C_{F1x}}\right) - F_{F2x} \cdot \frac{a_{F2}}{a_D} \cdot \frac{a_D{}^2}{C_{F2x}} - \Delta W_x - \Delta h_{D_X} \right] \qquad \text{(A 2.10-50)}$$

$$F_{SBx} = F_{DBx} + F_{Rx} + F_{Fx} \qquad \text{(A 2.10-51)}$$

und

$$F_{R1x} + F_{F1x} = F_{R2x} + F_{F2x} \qquad \text{(A 2.10-52)}$$

A 2.10.6.2.3.3 Flansch-Blinddeckel

Für die Verbindung Flansch-Blinddeckel gilt

$$F_{DBx} = \frac{1}{\frac{1}{c_{Sx}} + \frac{a_D{}^2}{C_{Fx}} + \frac{1}{c_{BxFD}} + \frac{1}{c_{Dx}}} \cdot \left[F_{S0} \cdot \left(\frac{1}{c_{S0}} + \frac{a_D{}^2}{C_{F0}} + \frac{1}{c_{B0}} + \frac{1}{c_{D0}}\right) - F_{Rx} \cdot \left(\frac{1}{c_{Sx}} + \frac{a_R}{a_D} \cdot \frac{a_D{}^2}{C_{Fx}}\right) - F_{Fx} \cdot \left(\frac{1}{c_{Sx}} + \frac{a_F}{a_D} \cdot \frac{a_D{}^2}{C_{Fx}}\right) - F_{Bx} \cdot \frac{1}{c_{Bxp}} - \Delta W_x - \Delta h_{D_X} \right] \qquad \text{(A 2.10-53)}$$

und

$$F_{Sx} = F_{DBx} + F_{Rx} + F_{Fx} \qquad \text{(A 2.10-54)}$$

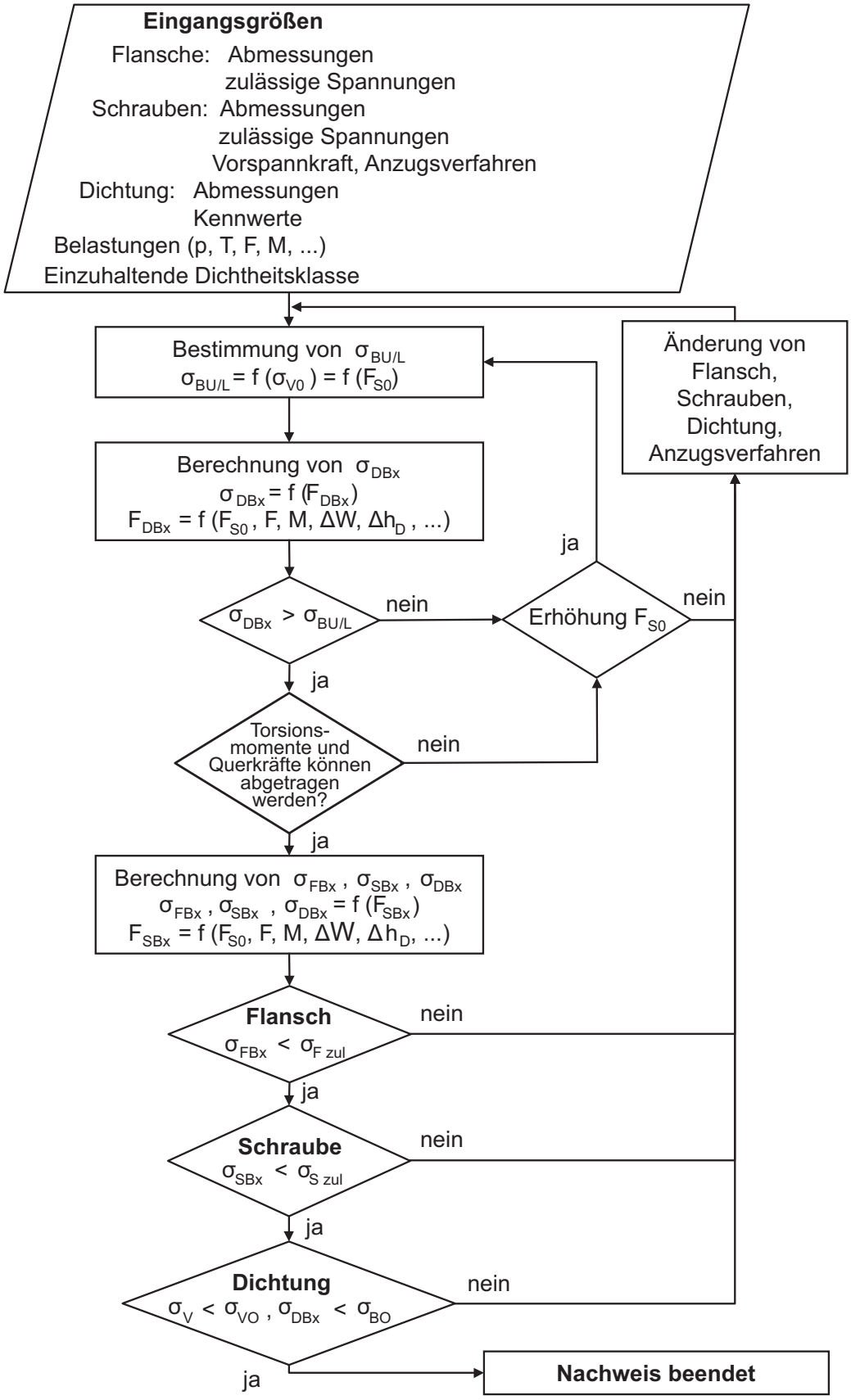


Bild A 2.10-8: Nachweisführung für Flanschverbindungen mit Dichtungen im Krafthauptschluss (schematisch)

A 2.10.7 Dichtheits- und Festigkeitsnachweise für Kraftnebenschlussverbindungen

A 2.10.7.1 Allgemeines

(1) Zur Gewährleistung der geforderten Eigenschaften der Flanschverbindung mit der Dichtung im Kraftnebenschluss muss die Blocklage bei allen relevanten Belastungen beibehalten werden ($F_{Kontakt} \geq 0$).

(2) Die Dichtung überträgt nur einen Teil der Vorspannkraft.

(3) Abhängig von der geometrischen Gestaltung kann es zwischen Erreichen der Blocklage und den Betriebszuständen zu einer Vergrößerung des Spalts im Dichtungsbereich kommen. Diese Vergrößerung muss durch das Rückfederungsvermögen der Dichtung Δh (siehe **Formblatt A 2.11-2**) kompensiert werden können.

Hinweis:
Die Bewertung der Vergrößerung der Spalthöhe erfolgt auf der Grundlage einer für den gewählten Dichtungstyp repräsentativen Rückverformungskurve. Die Vergrößerung der Spalthöhe zwischen dem Einbauzustand (Erreichen der Blocklage) und den Betriebszuständen wird bei Dichtungsdicken von 4,5 mm und Nuttiefen von 3,3 mm üblicherweise mit 0,1 mm begrenzt (sofern in **Formblatt A 2.11-2** keine anderen Angaben enthalten sind), da das Abdichtverhalten von Spiraldichtungen und Graphit-Profilringen bis zu einer Rückfederung der Dichtung dieser Größe nur unwesentlich beeinträchtigt ist (siehe Literatur [11] und [12]).

(4) Bei Änderungen des Spalts (z. B. durch unterschiedliche Wärmedehnungen der verspannten Teile oder durch oder Rohrleitungslasten) kann ein Entlasten der Dichtung hervorgerufen werden. Die dadurch bedingte Änderung der Leckagerate darf mit der errechneten Entlastung nach **Bild A 2.11-5** und den Angaben entsprechend **Formblatt A 2.11-2** bestimmt werden.

(5) Eine allgemeine Vorgehensweise für die Führung der Dichtheits- und Festigkeitsnachweise für Flanschverbindungen mit der Dichtung im Kraftnebenschluss zeigt **Bild A 2.10-9**.

(6) Die Leckagerate der Verbindung ist mit der errechneten Dichtungsflächenpressung σ_{DB} nach **Bild A 2.11-1** zu bestimmen. Diese Leckagerate muss kleiner sein als die der geforderten Dichtheitsklasse L zugeordnete, sonst ist eine andere Dichtung zu wählen, und die vorherigen Schritte (Steifigkeitsnachweis, Bestimmung der Schraubenkraft) sind zu wiederholen.

(7) Werden die einzelnen Bedingungen in **Bild A 2.10-9** nicht erfüllt, dann ist entsprechend iterativ vorzugehen.

A 2.10.7.2 Vereinfachtes Verfahren zur Nachprüfung der Kraft- und Verformungsverhältnisse

A 2.10.7.2.1 Allgemeines

(1) In den folgenden Abschnitten sind für einige Fälle der Einwirkung von Innendruck, Zusatzkräften und Zusatzmomenten, temperaturbedingter Änderung der E-Moduln, unterschiedlicher Wärmedehnung in Flansch und Schrauben sowie Setzvorgängen Gleichungen zur angenäherten Ermittlung der Schraubenkräfte F_S, der Dichtungskräfte F_D, der Flanschmomente M sowie der Spaltvergrößerung Δs in den betreffenden Zuständen angegeben.

(2) Alternativ hierzu darf zur detaillierteren Erfassung

a) der Drehsteifigkeit der Flansche,

b) des radialen Innendruckes,

c) des effektiven Schraubenkreisdurchmessers

eine angenäherte Nachprüfung des Kraft- und Verformungsverhaltens nach anderen Verfahren erfolgen.

A 2.10.7.2.2 Eingabewerte

(1) Die Bestimmung der Wärmedehnungsunterschiede ΔW_x (mit Ausnahme der Dichtung) sowie die Bestimmung der Federsteifigkeiten für Schrauben und Blinddeckel hat nach Abschnitt A 2.10.6.2.2 zu erfolgen. Die Federsteifigkeiten für Flansche sind nach Abschnitt A 2.10.6.2.2.2 unter Berücksichtigung der Abminderungsfaktoren f_{C_F} (siehe Abschnitt A 2.10.5 Absatz 2) zu berechnen.

(2) Die erforderliche Kraft zum Erreichen der Blocklage F_{DKU} ist nach Gleichung (A 2.9-17) zu bestimmen.

(3) Die Federsteifigkeit der Kraftnebenschlussdichtung ist aus der Rückfederungskurve der Dichtung oder dem **Formblatt A 2.11-2** wie folgt abzuleiten:

$$c_{D_{KNS}} = \pi \cdot d_D \cdot b_D \cdot E_{D_{KNS}}/h_D \qquad \text{(A 2.10-55)}$$

Hierbei ist je nach Lastfall $E_{D_{KNS}}$ der E-Modul des Dichtungswerkstoffes bei Einbau- oder Betriebstemperatur.

(4) Als Hebelarm der Kontaktkräfte $a_{Kontakt}$ darf der Abstand von Schraubenmitte zur äußeren Kontaktstelle der beiden Flansche a_M angesetzt werden. Beim Losflansch ist dies der Abstand von Schraubenmitte bis zum Bundaußendurchmesser d_F. Eine genauere Berechnung nach folgender Berechnungsgleichung ist zulässig (iteratives Vorgehen mit dem Anfangswert $a_{Kontakt} = a_M$ bei der Bestimmung der Kraft $F_{Kontakt,0}$):

$$a_{Kontakt} = a_M + \frac{F_{Kontakt\ 0}}{2 \cdot d_M \cdot \pi \cdot R_{mRT}} \qquad \text{(A 2.10-56)}$$

Bei ungleichen Flanschwerkstoffen ist als Zugfestigkeit R_{mRT} die Zugfestigkeit des schwächeren Flanschwerkstoffs einzusetzen.

A 2.10.7.2.3 Paarige Flanschverbindungen

A 2.10.7.2.3.1 Einbauzustand

$$x_{S0} = F_{S0} / c_{S0} \qquad \text{(A 2.10-57)}$$

$$\gamma_{F_{KNS}} = F_{DKU} \cdot a_D / C_{F_0} \qquad \text{(A 2.10-58)}$$

$$F_{Kontakt\ 0} = \frac{F_{S0} - F_{DKU} + (a_D - a_{Kontakt}) \cdot a_D \cdot c_{D_{KNS_0}} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot (F_{S0} - F_{DKU})}{C_{F_0}} \right\}}{1 + (a_D - a_{Kontakt})^2 \cdot c_{D_{KNS_0}} \cdot \left(\frac{2}{C_{F_0}} \right)} \qquad \text{(A 2.10-59)}$$

$$\gamma_{F,0} = \frac{F_{S0} \cdot a_D}{C_{F_0}} - \frac{F_{Kontakt\ 0}}{C_{F_0}} \cdot (a_D - a_{Kontakt}) \qquad \text{(A 2.10-60)}$$

$$F_{D_0} = F_{DKU} - \{2 \cdot (\gamma_{F_0} - \gamma_{F_{KNS}})\}\ (a_D - a_{Kontakt}) \cdot c_{D_{KNS_0}} \qquad \text{(A 2.10-61)}$$

Spaltvergrößerung am Dichtungsdurchmesser d_D:

$$\Delta s_0 = 2 \cdot (a_D - a_{Kontakt}) \cdot (\gamma_{F_0} - \gamma_{F_{KNS}}) \qquad \text{(A 2.10-62)}$$

Flanschmoment:

$$M_0 = \gamma_{F_0} \cdot C_{F_0} \qquad \text{(A 2.10-63)}$$

A 2.10.7.2.3.2 Betriebszustand

$$\gamma_{F_x} = \frac{(a_2 \cdot d_1 - d_2)}{(a_2 \cdot b_1 - b_2)} \qquad \text{(A 2.10-64)}$$

$$F_{Kontakt_x} = -\gamma_{F_x} \cdot b_1 + d_1 \qquad \text{(A 2.10-65)}$$

mit den Koeffizienten

$$b_1 = 2 \cdot c_{S_x} \cdot a_{Kontakt} - 2 \cdot (a_D - a_{Kontakt}) \cdot c_{D_{KNS_x}} \qquad \text{(A 2.10-66)}$$

$$d_1 = 2 \cdot c_{S_x} \cdot a_{Kontakt} \cdot \gamma_{F_0} - g_{KNS} \cdot F_{DKU} - 2 \cdot \gamma_{F_{KNS}} \cdot (a_D - a_{Kontakt}) \cdot c_{D_{KNS_x}} - F_{R1} - F_{F1} + c_{S_x} \cdot (x_{S0} - \Delta W_x) \qquad \text{(A 2.10-67)}$$

$$a_2 = a_D - a_{Kontakt} \quad \text{(A 2.10-68)}$$

$$b_2 = C_{F1_x} + 2 \cdot c_{S_x} \cdot a_{Kontakt} \cdot a_D \quad \text{(A 2.10-69)}$$

$$d_2 = c_{S_x} \cdot 2 \cdot \gamma_{F_0} \cdot a_{Kontakt} \cdot a_D + F_R \cdot (a_R - a_D) + + F_F \cdot (a_F - a_D) + c_{S_x} \cdot (x_{S_0} - \Delta W_x) \cdot a_D \quad \text{(A 2.10-70)}$$

$$F_{D_x} = g_{KNS} \cdot F_{DKU} - \{2 \cdot (\gamma_{F_x} - \gamma_{F_{KNS}})\} \cdot (a_D - a_{Kontakt}) \cdot \cdot c_{D_{KNS_x}} \quad \text{(A 2.10-71)}$$

$$F_{S_x} = F_{Kontakt_x} + F_{D_x} + F_R + F_F \quad \text{(A 2.10-72)}$$

Spaltvergrößerung am mittleren Dichtungsdurchmesser d_D:

$$\Delta s_x = 2 \cdot (a_D - a_{Kontakt}) \cdot (\gamma_{F_x} - \gamma_{F_{KNS}}) \quad \text{(A 2.10-73)}$$

Flanschmoment:

$$M_x = \gamma_{F_x} \cdot C_{F_x} \quad \text{(A 2.10-74)}$$

A 2.10.7.2.4 Nicht paarige Flanschverbindungen

A 2.10.7.2.4.1 Einbauzustand

$$x_{S_0} = F_{S0} / c_{S_0} \quad \text{(A 2.10-75)}$$

$$\gamma_{F1_{KNS}} = F_{DKU} \cdot a_D / C_{F1_0} \quad \text{(A 2.10-76)}$$

$$\gamma_{F2_{KNS}} = F_{DKU} \cdot a_D / C_{F2_0} \quad \text{(A 2.10-77)}$$

$$F_{Kontakt\ 0} = \frac{F_{S0} - F_{DKU} + (a_D - a_{Kontakt}) a_D \cdot c_{D_{KNS_0}} \left\{ \frac{F_{S0} - F_{DKU}}{C_{F1_0}} + \frac{F_{S0} - F_{DKU}}{C_{F2_0}} \right\}}{1 + (a_D - a_{Kontakt})^2 \cdot c_{D_{KNS_0}} \left(\frac{1}{C_{F1_0}} + \frac{1}{C_{F2_0}} \right)} \quad \text{(A 2.10-78)}$$

$$\gamma_{F1_0} = \frac{F_{S0} \cdot a_D}{C_{F1_0}} - \frac{F_{Kontakt\ 0}}{C_{F1_0}} (a_D - a_{Kontakt}) \quad \text{(A 2.10-79)}$$

$$\gamma_{F2_0} = \frac{F_{S0} \cdot a_D}{C_{F2_0}} - \frac{F_{Kontakt\ 0}}{C_{F2_0}} (a_D - a_{Kontakt}) \quad \text{(A 2.10-80)}$$

$$F_{D0} = F_{DKU} - \{(\gamma_{F1_0} - \gamma_{F1_{KNS}}) + (\gamma_{F2_0} - \gamma_{F2_{KNS}})\} \cdot \cdot (a_D - a_{Kontakt}) \cdot c_{D_{KNS_0}} \quad \text{(A 2.10-81)}$$

Spaltvergrößerung am Dichtungsdurchmesser d_D:

$$\Delta s_0 = (a_D - a_{Kontakt}) \cdot \{(\gamma_{F1_0} - \gamma_{F1_{KNS}}) + (\gamma_{F2_0} - \gamma_{F2_{KNS}})\} \quad \text{(A 2.10-82)}$$

Flanschmomente:

$$M_{1_0} = \gamma_{F1_0} \cdot C_{F1_0} \quad \text{(A 2.10-83)}$$

$$M_{2_0} = \gamma_{F2_0} \cdot C_{F2_0} \quad \text{(A 2.10-84)}$$

A 2.10.7.2.4.2 Betriebszustand

$$\gamma_{F2_x} = \frac{(b_2 - c_2) \cdot (a_2 \cdot d_1 - d_2) - (a_2 \cdot b_1 - b_2) \cdot (d_2 - d_3)}{(b_2 - c_2) \cdot (a_2 \cdot b_1 - c_2) - (a_2 \cdot b_1 - b_2) \cdot (c_2 - c_3)} \quad \text{(A 2.10-85)}$$

$$\gamma_{F1_x} = -\gamma_{F2_x} \cdot \frac{(a_2 \cdot b_1 - c_2)}{(a_2 \cdot b_1 - b_2)} + \frac{(a_2 \cdot d_1 - d_2)}{(a_2 \cdot b_1 - b_2)} \quad \text{(A 2.10-86)}$$

$$F_{Kontakt_x} = -\gamma_{F1_x} \cdot b_1 - \gamma_{F2_x} \cdot b_1 + d_1 \quad \text{(A 2.10-87)}$$

mit den Koeffizienten

$$b_1 = c_{S_x} \cdot a_{Kontakt} - (a_D - a_{Kontakt}) \cdot c_{D_{KNS_x}} \quad \text{(A 2.10-88)}$$

$$d_1 = c_{S_x} \cdot a_{Kontakt} (\gamma_{F1_0} + \gamma_{F2_0}) - g_{KNS} \cdot F_{DKU} - \gamma_{F1_{KNS}} \cdot \cdot (a_D - a_{Kontakt}) \cdot c_{D_{KNS_x}} - \gamma_{F2_{KNS}} \cdot (a_D - a_{Kontakt}) \cdot \cdot c_{D_{KNS_x}} - F_{R1} - F_{F1} + c_{S_x} \cdot (x_{S_0} - \Delta W_x) \quad \text{(A 2.10-89)}$$

$$a_2 = a_D - a_{Kontakt} \quad \text{(A 2.10-90)}$$

$$b_2 = C_{F1_x} + c_{S_x} \cdot a_{Kontakt} \cdot a_D \quad \text{(A 2.10-91)}$$

$$c_2 = c_{S_x} \cdot a_{Kontakt} \cdot a_D \quad \text{(A 2.10-92)}$$

$$d_2 = c_{S_x} \cdot (\gamma_{F1_0} + \gamma_{F2_0}) \cdot a_{Kontakt} \cdot a_D + F_{R1} \cdot (a_{R1} - a_D) + + F_{F1} \cdot (a_{F1} - a_D) + c_{S_x} \cdot (x_{S_0} - \Delta W_x) \cdot a_D \quad \text{(A 2.10-93)}$$

$$c_3 = C_{F2_x} + c_{S_x} \cdot a_{Kontakt} \cdot a_D \quad \text{(A 2.10-94)}$$

$$d_3 = c_{S_x} \cdot (\gamma_{F1_0} + \gamma_{F2_0}) \cdot a_{Kontakt} \cdot a_D + F_{R2} \cdot (a_{R2} - a_D) + + F_{F2} \cdot (a_{F2} - a_D) + c_{S_x} \cdot (x_{S_0} - \Delta W_x) \cdot a_D \quad \text{(A 2.10-95)}$$

$$F_{D_x} = g_{KNS} \cdot F_{DKU} - \{(\gamma_{F1_x} - \gamma_{F1_{KNS}}) + (\gamma_{F2_x} - \gamma_{F2_{KNS}})\} \cdot \cdot (a_D - a_{Kontakt}) \cdot c_{D_{KNS_x}} \quad \text{(A 2.10-96)}$$

$$F_{S_x} = F_{Kontakt_x} + F_{D_x} + F_{R1} + F_{F1} \quad \text{(A 2.10-97)}$$

Spaltvergrößerung am Dichtungsdurchmesser d_D:

$$\Delta s_x = (a_D - a_{Kontakt}) \cdot \{(\gamma_{F1_x} - \gamma_{F1_{KNS}}) + (\gamma_{F2_x} - \gamma_{F2_{KNS}})\} \quad \text{(A 2.10-98)}$$

Flanschmomente:

$$M_{1_x} = \gamma_{F1_x} \cdot C_{F1_x} \quad \text{(A 2.10-99)}$$

$$M_{2_x} = \gamma_{F2_x} \cdot C_{F2_x} \quad \text{(A 2.10-100)}$$

A 2.10.7.2.5 Flansch-Blinddeckel-Verbindungen

Es gelten (mit Ausnahme der Bestimmungsgleichungen für die Flanschmomente am 2. Flansch) die Gleichungen für nicht paarige Flanschverbindungen gemäß Abschnitt A 2.10.7.2.4 mit den nachfolgenden Ersatzgrößen zur Abbildung des Blinddeckels als 2. Flansch.

$$C_{F2_0} = c_{B_0} \cdot a_D^2 \quad \text{(A 2.10-101)}$$

$$C_{F2,x} = (E_\vartheta / E_{20}) \cdot c_{B_0} \cdot a_D^2 \quad \text{(A 2.10-102)}$$

$$F_{R2} = p \cdot \tfrac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_D^2 + F_{BZ} \quad \text{(A 2.10-103)}$$

$$a_{R2} = \frac{a_D \cdot c_{BxFD}}{c_{Bxp}} \quad \text{(A 2.10-104)}$$

$$F_{F2} = 0 \quad \text{(A 2.10-105)}$$

Die Überprüfung der Festigkeit des Blinddeckels erfolgt mit den Lasten F_{D_0} und $F_{Kontakt_0}$ im Einbauzustand sowie $F_{Kontakt_x}$, F_{D_x}, p und F_{BZ} im Betriebszustand.

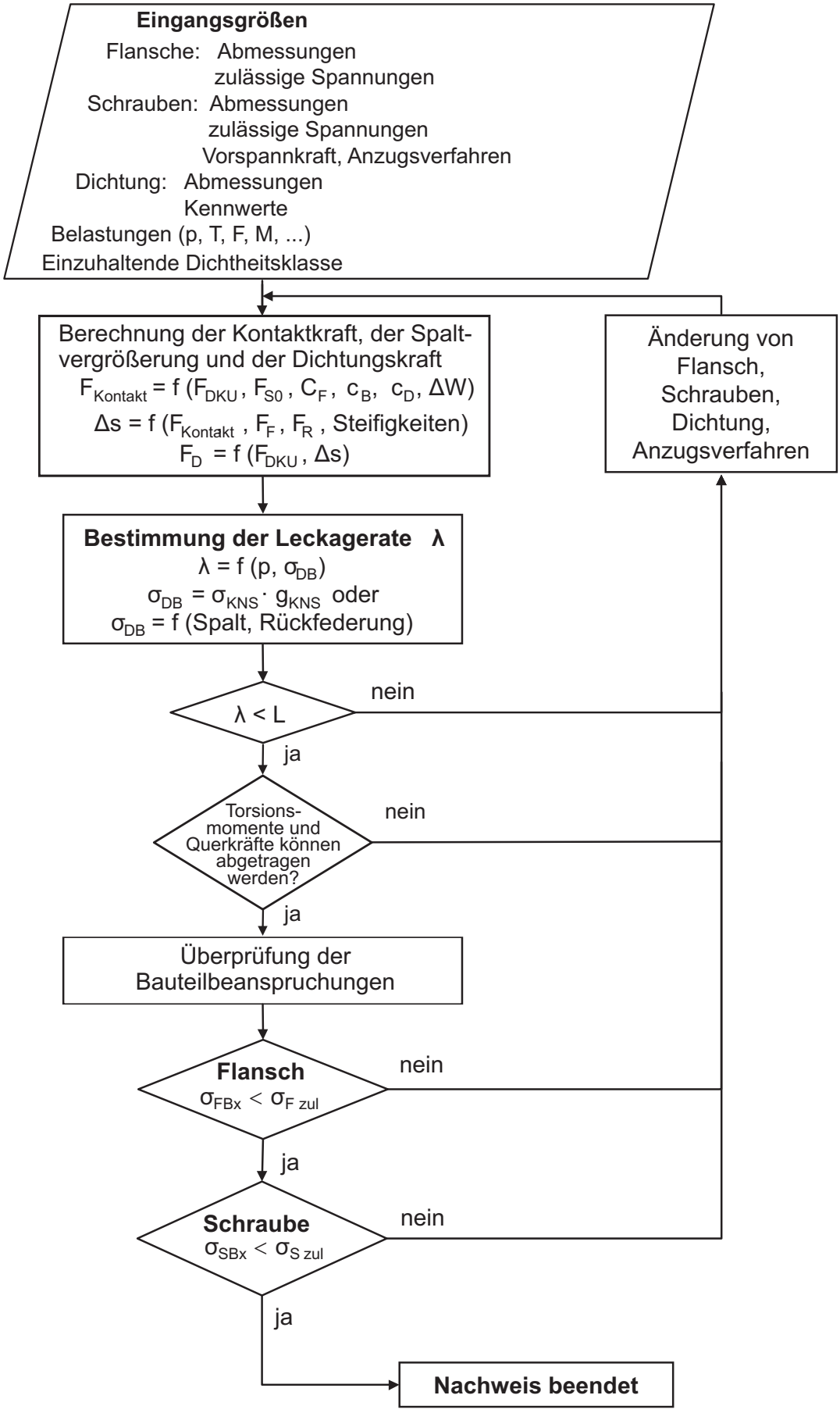


Bild A 2.10-9: Nachweisführung für Flanschverbindungen mit Dichtungen im Kraftnebenschluss (schematisch)

Lfd. Nr.	Spannungsart [1]	Einbau-zustand	Beanspruchungsstufen			
			0	A, B	P	C, D
1	Spannung aus Innendruck, erforderlicher Dichtungskraft und äußeren Lasten [2] $F_S = F_{RP} + F_F + F_{DB} + F_{RZ} + F_{RM}$	—	S_m oder S [3]	S_m oder S [3]	—	$\frac{1}{1{,}1} \cdot R_{p0,2T}$ [8][9]
2	Spannung im Prüfzustand [2] $F_{SP} = F'_{RP} + F'_{RZ} + F'_{RM} + F'_F + F'_{DB}$	—	—	—	$\frac{1}{1{,}1} \cdot R_{p0,2T}$ [8]	—
3	Spannung im Einbauzustand [4][5] F_{S0}	$\frac{1}{1{,}1} \cdot R_{p0,2RT}$ [8]	—	—	—	—
4	Spannung aus Innendruck, äußeren Lasten, Restdichtungskraft und ggf. unterschiedlicher Wärmedehnung [6] unter Berücksichtigung des Verspannungszustandes [5][7]	—	—	$\frac{1}{1{,}1} \cdot R_{p0,2T}$ [8]	—	—

Bei Durchmesserverhältnissen $d_F/d_i > 2$ sind alle Spannungsgrenzen um den Faktor $\Phi = 0{,}6 + \frac{1}{\sqrt{5{,}25 + \left(\frac{d_F}{d_i} - 1\right)^2}}$ abzumindern.

1) Bedeutung der verwendeten Formelzeichen siehe Abschnitt A 2.10.1.

2) Bei Anwendung der Gleichungen (A 2.10-1) bis (A 2.10-3).

3) S_m bei Prüfgruppe A1, S bei den Prüfgruppen A2 und A3.

4) Bei Anwendung der Gleichung (A 2.10-4) im Rahmen der Dimensionierung ist F_{S0U}, im Rahmen des Festigkeitsnachweises ist F_{S0max} zu verwenden.

5) Unter Berücksichtigung der Festlegungen in Abschnitt A 2.9.3 (3).

6) Berücksichtigung unterschiedlicher Wärmedehnung bei einer Auslegungstemperatur > 120 °C. Die Temperaturbegrenzung gilt nicht für die Werkstoffpaarung Austenit/Ferrit in Flansch und Schrauben.

7) Bei Berechnung nach Abschnitt A 2.10.6.

8) Bei Stahlguss $0{,}75 \cdot R_{p0,2T}$ anstelle $R_{p0,2T}/1{,}1$.

9) Sind für die Beanspruchungsstufen C, D Dichtheitsnachweise zu führen, so ist wie für die Stufen A, B gemäß lfd. Nr. 4 vorzugehen.

Tabelle A 2.10-1: Zulässige Spannungen σ_{zul} für drucktragende Flanschverbindungen aus Stahl oder Stahlguss

A 2.11 Dichtungen

A 2.11.1 Allgemeines

(1) Für die Berechnungsgrößen und Einheiten gelten die Festlegungen in den Abschnitten A 2.9.1 und A 2.10.1.

(2) Die Dichtungskennwerte sind gemäß den **Formblättern A 2.11-1** und **A 2.11-2** bereitzustellen.

Hinweis:
Verfahren zur Ermittlung der Dichtungskennwerte sind in [13] enthalten.

A 2.11.2 Berechnungskennwerte für KHS-Verbindungen

Hinweis:
Die Definition der Dichtungskennwerte ist in DIN 28090-1 (1995-09) und in DIN EN 13555 (2005-02) enthalten.

A 2.11.2.1 Mindestflächenpressung im Einbauzustand $\sigma_{VU/L}$

Die Mindestflächenpressung $\sigma_{VU/L}$ ist die Flächenpressung, die von der Einbauschraubenkraft F_{S0} auf die wirksame Dichtfläche (gepresste Dichtungsfläche) $A_D = \pi \cdot d_D \cdot b_D$ ausgeübt werden muss, damit sich durch Anpassung an die Flanschrauheiten und Verkleinern innerer Hohlräume die geforderte Dichtheit im Betriebszustand ergibt. Ein Beispiel für die Bestimmung der Kennwerte für die Abdichteigenschaften ($\sigma_{VU/L}$, $\sigma_{BU/L}$) zeigt **Bild A 2.11-1.**

Die dem Kennwert $\sigma_{VU/L}$ zugrundeliegende Dichtheitsklasse wird im Index genannt, z. B. $\sigma_{VU/0,1}$ für die Dichtheitsklasse $L_{0,1}$ mit einer spezifischen Leckagerate $\lambda \leq 0{,}1$ mg/(s · m).

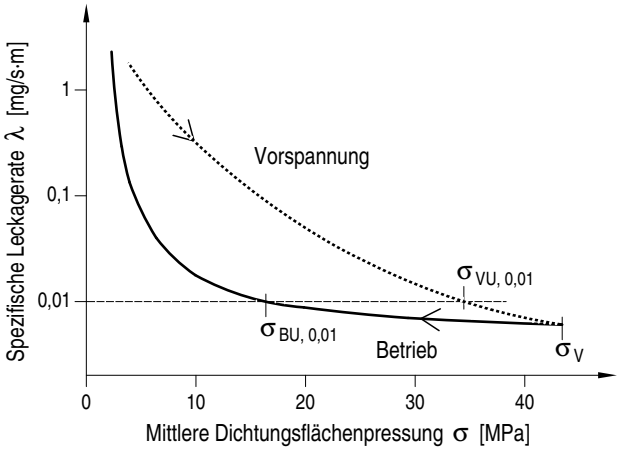
$\sigma_{VU/L}$ bestimmt somit die minimal erforderliche Dichtungskraft im Einbauzustand $F_{DVU} = A_D \cdot \sigma_{VU/L}$ für eine bestimmte Dichtheitsklasse L. Eine mögliche Zuordnung der Dichtheitsklassen zum verwendeten Medium zeigt **Tabelle A 2.11-1.**

Hinweis:
(1) Zur Bestimmung der wirksamen Dichtungsfläche siehe die **Bilder A 2.11-2** und **A 2.11-3**.

(2) Die Dichtungsbreite von Schmiegungsdichtungen nach **Bild A 2.11-3** ermittelt sich aus Berechnungsansätzen nach DIN EN 1591-1 (2009-10) „Flansche und Flanschverbindungen - Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen und Dichtung - Teil 1: Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 1591-1:2001+A1:2009“, DIN 2696 (1999-08) „Flanschverbindungen mit Dichtlinse“ oder Herstellerangaben unter Verwendung der zum jeweiligen Berechnungsverfahren gehörenden Dichtungskennwerte.

A 2.11.2.2 Höchstflächenpressung im Einbauzustand σ_{VO}

Die Höchstflächenpressung im Einbauzustand σ_{VO} ist die maximale Flächenpressung, die von der Einbauschraubenkraft F_{S0} auf die wirksame Dichtfläche $A_D = \pi \cdot d_D \cdot b_D$ ausgeübt werden darf, um eine unzulässige Entspannung der Dichtverbindung durch Zerstörung (Stauchversuch) oder durch Fließen bzw. Kriechen (Druckstandversuch) der Dichtung zu vermeiden. Sie bestimmt die maximal zulässige Dichtungskraft im Einbauzustand $F_{DVO} = A_D \cdot \sigma_{VO}$ bei Raumtemperatur.



σ_{BU} : Mindestflächenpressung im Betrieb
σ_{VU} : Mindestflächenpressung beim Vorspannen
σ_V : Tatsächlich erreichte Flächenpressung beim Vorspannen
L : Dichtheitsklasse, max. zulässiger Wert für λ (hier: λ = 0,01)

Bild A 2.11-1: Bestimmung der Kennwerte zur Beurteilung der Abdichteigenschaften (schematisch)

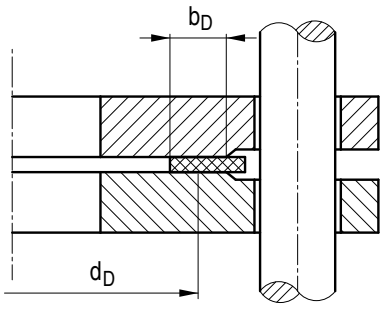


Bild A 2.11-2: Darstellung der Dichtungsbreite b_D

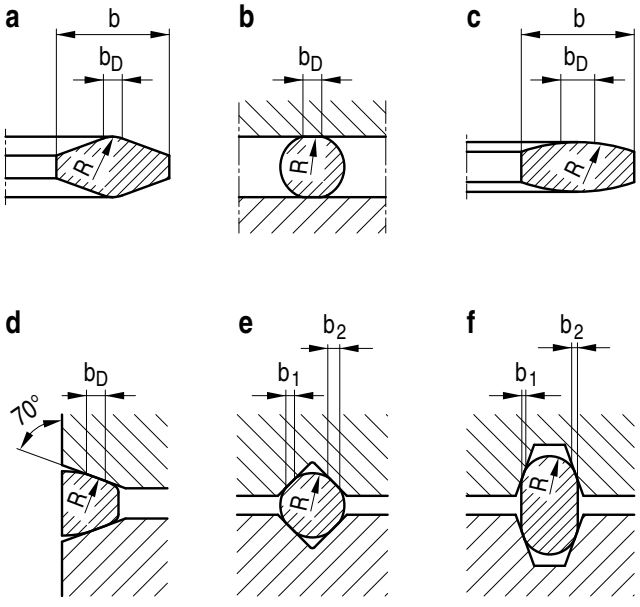


Bild A 2.11-3: Dichtungsprofile für Schmiegungsdichtungen

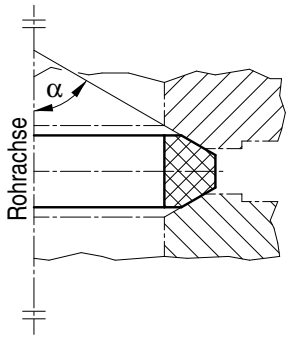


Bild A 2.11-4: Winkel α bei Schmiegungsdichtungen, dargestellt am Beispiel einer Linsendichtung

A 2.11.2.3 Mindestflächenpressung im Betriebszustand $\sigma_{BU/L}$

Die Mindestflächenpressung im Betriebszustand $\sigma_{BU/L}$ ist die Flächenpressung, die im Betriebszustand auf die wirksame Dichtfläche $A_D = \pi \cdot d_D \cdot b_D$ ausgeübt werden muss, um die angestrebte Dichtheitsklasse bei gegebenem Medium, Innendruck und gegebener Temperatur zu erreichen.

Der Kennwert $\sigma_{BU/L}$ ist in Abhängigkeit von der Dichtungsflächenpressung im Einbauzustand zu bestimmen.

Die dem Kennwert $\sigma_{BU/L}$ zugrundeliegende Dichtheitsklasse wird im Index genannt, z. B. $\sigma_{BU/0,1}$ für die Dichtheitsklasse $L_{0,1}$ mit einer spezifischen Leckagerate $\lambda \leq 0{,}1$ mg/(s · m).

$\sigma_{BU/L}$ bestimmt somit die minimal erforderliche Dichtungskraft im Betriebszustand $F_{DBU} = A_D \cdot \sigma_{BU/L}$ für eine bestimmte Dichtheitsklasse.

A 2.11.2.4 Höchstflächenpressung im Betriebszustand σ_{BO}

Die Höchstflächenpressung im Betriebszustand σ_{BO} ist die maximale Flächenpressung, die unter allen möglichen Betriebsbedingungen auf die wirksame Dichtfläche $A_D = \pi \cdot d_D \cdot b_D$ ausgeübt werden darf, um eine unzulässige Entspannung der Dichtverbindung durch Strukturschädigung oder Kriechen der Dichtung zu vermeiden. σ_{BO} bestimmt die maximal zulässige Dichtungskraft $F_{DBO} = A_D \cdot \sigma_{BO}$ bei Betriebstemperatur.

A 2.11.2.5 Setzbetrag Δh_D und Dichtungskennwert P_{QR}

(1) Der Setzbetrag Δh_D ist die Dickenänderung einer Dichtung unter Betriebsbedingungen nach abgeschlossenem Einbau.

Hinweis:
Bei bekannter Steifigkeit des verspannten Systems lässt sich mittels Δh_D der Dichtkraftverlust abschätzen.

(2) Der Dichtungskennwert P_{QR} ist ein Faktor zur Berücksichtigung des Relaxationseinflusses auf die Dichtungsbelastung nach dem Anziehen der Schrauben und der Langzeitwirkung der Betriebstemperatur.

(3) Zur Nachprüfung des Kraft- und Verformungsverhältnisses gemäß Abschnitt A 2.10.6 ist der Kennwert P_{QR} gemäß DIN EN 13555 Abschnitt 8.6 in einen Setzbetrag Δh_D umzurechnen.

A 2.11.2.6 Ersatz-Elastizitätsmodul E_D

Der Ersatz-Elastizitätsmodul E_D beschreibt das Rückverformungsverhalten der Dichtung. Bei Dichtungen mit nichtlinearer Rückverformung wird E_D definiert als Sekantenmodul der Rückverformungskurve. Die in der Berechnung verwendeten Werte für den Ersatz-Elastizitätsmodul E_D müssen auf die Ausgangsdicke der Dichtung bezogen sein (wie nach DIN 28090-1).

A 2.11.3 Berechnungskennwerte für KNS-Verbindungen

A 2.11.3.1 Mindestflächenpressung für KNS

Die Mindestflächenpressung σ_{KNS} ist die Flächenpressung, die von der Einbauschraubenkraft ausgeübt werden muss, um KNS einzustellen.

A 2.11.3.2 Abdichtbarer Druck bei KNS

Der abdichtbare Druck $p_{KNS/L}$ ist der Innendruck, der bei KNS abgedichtet werden kann, ohne dass eine vorzugebende Leckagerate überschritten wird.

A 2.11.3.3 Relaxationsfaktor bei KNS

Der Relaxationsfaktor g_{KNS} gibt an, um wieviel Prozent die Flächenpressung bei KNS für die gegebene Betriebstemperatur und eine für die Betriebszeit repräsentative Zeitdauer abfällt.

Hinweis:
Siehe auch **Bild A 2.11-5**.

A 2.11.3.4 Ersatzelastizitätsmodul $E_{D,KNS}$

Der Ersatz-Elastizitätsmodul $E_{D,KNS}$ beschreibt das Rückverformungsverhalten der Dichtung für verschiedene Rückfederungen der Dichtung aus der Blocklage. $E_{D,KNS}$ wird definiert als Sekantenmodul der Rückverformungskurve. Die in der Berechnung verwendeten Werte für den Ersatz-Elastizitätsmodul $E_{D,KNS}$ müssen auf die Ausgangsdicke der Dichtung bezogen sein.

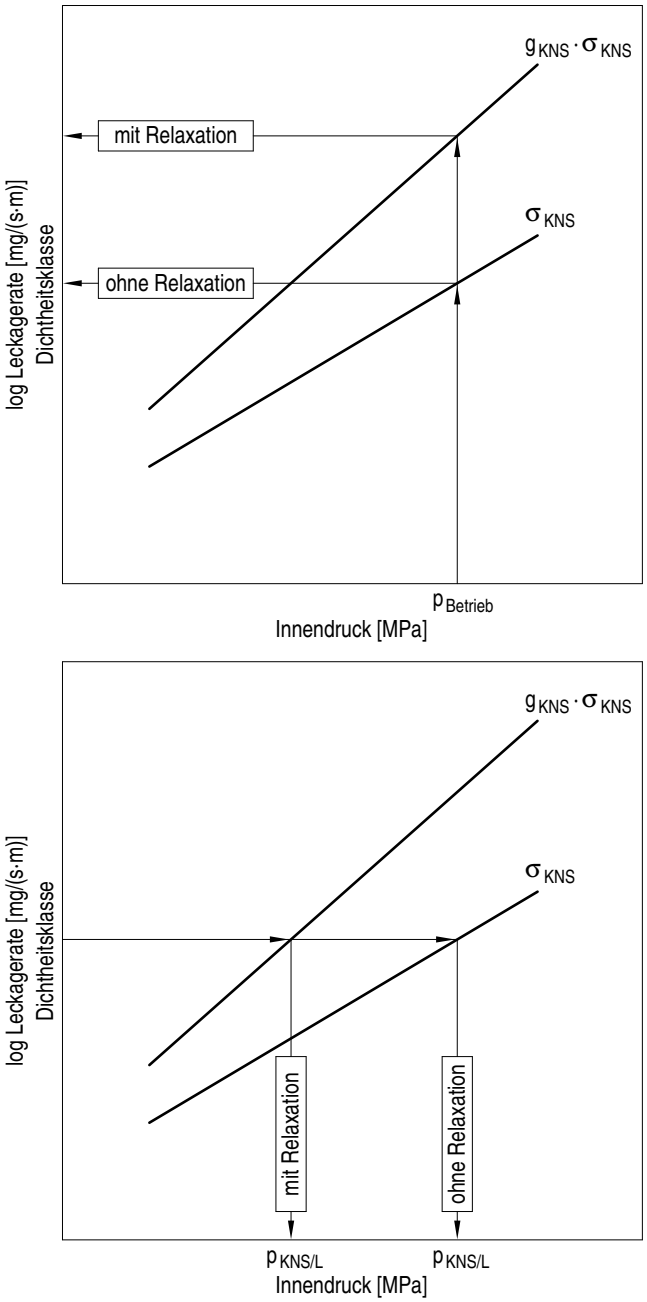


Bild A 2.11-5: Bestimmung der Leckagerate (oben) und des abdichtbaren Drucks (unten) für Flanschverbindungen mit der Dichtung im Kraftnebenschluss (schematisch)

Dichtheitsklasse L	Leckagerate bei der Dichtungsprüfung mit den Prüfmedien He oder N_2 mg/(m·s)	Medium
$L_{1,0}$	1	Wasser ohne Aktivität
$L_{0,1}$	10^{-1}	a) Wasser aktivitätsführend b) Wasserdampf ohne Aktivität c) Druckluft
$L_{0,01}$	10^{-2}	Wasserdampf aktivitätsführend

Tabelle A 2.11-1: Beispiele für die Zuordnung der Dichtheitsklassen und der Medien

Dichtungskennwerte für Dichtungen [1] im Krafthauptschluss

Hersteller:	Bezeichnung:

Abdichteigenschaften ($\sigma_{VU/L}$, $\sigma_{BU/L}$)

Abmessung der Prüflinge:

Prüfmedium [2]	. . . . .		. . . . .		. . . . .		. . . . .	
Dichtheitsklasse	. . . . .		. . . . .		. . . . .		. . . . .	
Innendruck in MPa [3]	. . . . .		. . . . .		. . . . .		. . . . .	
Kennwerte in MPa [4]	$\sigma_{VU/L}$; σ_V	$\sigma_{BU/L}$	$\sigma_{VU/L}$; σ_V	$\sigma_{BU/L}$	$\sigma_{VU/L}$; σ_V	$\sigma_{BU/L}$	$\sigma_{VU/L}$; σ_V	$\sigma_{BU/L}$

Verformungseigenschaften (σ_{VO}, σ_{BO}, E_D, Δh_D)

Abmessung der Prüflinge:

	RT	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C
σ_{VO} bzw. σ_{BO} in MPa [5]					
E_D (σ_V = ... MPa)					
E_D (σ_V = ... MPa)					
E_D (σ_V = ... MPa)					
E_D (σ_V = ... MPa)					

MUSTER

Abmessung der Prüflinge:

	σ in MPa [6]	RT		100 °C		200 °C		300 °C		400 °C	
		C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2
Δh_D in mm											

C : Steifigkeiten von Druckstandsprüfeinrichtungen C_1 = kN/mm C_2 = kN/mm

[1] Bei Dichtungsplatten sind noch Angaben zu dem Einfluss von Dichtungsabmessungen (h_D, b_D) erforderlich.

[2] Als Prüfmedium ist Stickstoff oder Helium zu wählen. Die Dichtheitsklasse und die Innendruckstufe ist nach Anforderung des Anwenders zu wählen.

[3] Die Innendruckstufen sind vorzugsweise 1, 2, 4, 8 und 16 MPa. Bei Zwischenwerten sind stets die Dichtungskennwerte der nächsthöheren Druckstufe zu verwenden.

[4] $\sigma_{BU/L}$ ist in Abhängigkeit von $\sigma_V \geq \sigma_{VU/L}$ anzugeben. Alternativ dürfen auch grafische Darstellungen angegeben werden.

[5] Bei Dichtungen, bei denen das Kriechrelaxationsverhalten einen wesentlichen Einfluss hat, können diese Kennwerte nur in Zusammenhang mit Δh_D betrachtet werden.

[6] Ausgangsflächenpressung

Formblatt A 2.11-1: Zusammenstellung der Dichtungskennwerte

Dichtungskennwerte für Dichtungen im Kraftnebenschluss

Hersteller:	Bezeichnung:

Abdichteigenschaften ($p_{KNS/L}$)

Abmessung der Prüflinge:	Abmessungen der Nut:

Prüfmedium:

Innendruck [1] in MPa	Leckagerate λ in mg/(m·s)			
	σ_{KNS} = ... MPa und Δh = ... mm	0,8 • σ_{KNS} = ... MPa und Δh = ... mm	... • σ_{KNS} = ... MPa und Δh = ... mm	. . .
1				
2				
4				
8				
16				

Verformungseigenschaften (σ_{KNS}, g_{KNS}, $E_{D_{KNS}}$)

Abmessung der Prüflinge:	Abmessungen der Nut:

	RT
σ_{KNS} in MPa	

MUSTER

Abmessung der Prüflinge:	Abmessungen der Nut:

	RT	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C
g_{KNS}					

Abmessung der Prüflinge:	Abmessungen der Nut:

Rückfederung Δh in mm	$E_{D_{KNS}}$ (RT) in MPa	$E_{D_{KNS}}$ (100 °C) in MPa	$E_{D_{KNS}}$ (200 °C) in MPa	$E_{D_{KNS}}$ (300 °C) in MPa	$E_{D_{KNS}}$ (400 °C) in MPa

Δh : Rückfederung aus der Blocklage

[1] Es sind stets die Dichtungskennwerte der nächsthöheren Druckstufe zu verwenden.

Formblatt A 2.11-2: Zusammenstellung der Dichtungskennwerte

A 3 Pumpen

A 3.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt A 3

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
b	mittragende Länge	mm
c_1, c_2	Zuschläge (siehe Abschnitt 6.4)	mm
d	Durchmesser der Gehäusebohrung	mm
d_A	Ausschnittdurchmesser des ebenen Kreisringbodens	mm
d_i	Innendurchmesser des Ausschnittes	mm
d_{i1}, d_{i2}	Innendurchmesser des benachbarten Ausschnittes	mm
d_t	Teilkreisdurchmesser	mm
e	Randabstand	mm
l	Stegbreite zwischen zwei Abschnitten	mm
p	Auslegungsdruck	MPa
s	Wanddicke im unverschwächten Zylinder	mm
s_A	erforderliche Wanddicke am Ausschnittsrand	mm
s_e	vorhandene Wanddicke am Ausschnittsrand	mm
s_{pl}	Wanddicke des ebenen Kreisringbodens	mm
t	Dicke des Gehäusedeckels	mm
A_p	drucktragende Fläche	mm^2
A_σ, $A_{\sigma 0}$, $A_{\sigma 1}$	tragende Querschnittsfläche	mm^2
B_1, B_2, B_3	Rechenhilfsgrößen	—
C_A	Ausschnittsbeiwert	—
C_1	Rechenhilfsgröße	1/mm
C_2, C_3, C_4	Rechenhilfsgrößen	—
D_a	Außendurchmesser des Zylinders	mm
D_i	Innendurchmesser des Zylinders	mm
F'_R	Rohrkraft bezogen auf Teilkreisdurchmesser d_t	N/mm^2
S	Spannungsvergleichswert gemäß Abschnitt 6.6	N/mm^2
S_m	Spannungsvergleichswert gemäß Abschnitt 6.6	N/mm^2
σ_1	lokale Membranspannung	N/mm^2
σ_b	Biegespannung	N/mm^2
β	Rechengröße gemäß Gleichung A 3.2-9)	—

A 3.2 Allgemeines

Die in der komponentenspezifischen Analyse für Pumpen behandelten Gehäusebauformen und Bauteile sind für einige typische Fälle aus den **Bildern A 3.2-1, A 3.2-2** und **A 3.2-3** ersichtlich. **Bild A 3.2-1** zeigt das Beispiel einer einstufigen Ringraumgehäusepumpe mit geschmiedetem Gehäuse, **Bild A 3.2-2** mit gegossenem Gehäuse. **Bild A 3.2-3** zeigt das Beispiel einer mehrstufigen Topfgehäusepumpe mit geschmiedetem Zylinder. Charakteristisch für die geschmiedeten Gehäuse ist die Überdimensionierung des ungeschwächten Zylinders gegenüber Innendruck. Dimensionierungsbestimmend sind in diesen Fällen die abgeflachten Bereiche für den Druck- bzw. Saugflansch, wofür im Abschnitt A 3.3 Berechnungsgrundlagen angegeben werden.

Für die in **Bild A 3.2-2** gezeigte Bauform einer gegossenen Ringraumgehäusepumpe sind spezifische Dimensionierungsverfahren nicht angebbar. Die Berechnung kann z. B. nach der Biegetheorie der Rotationsschalen erfolgen.

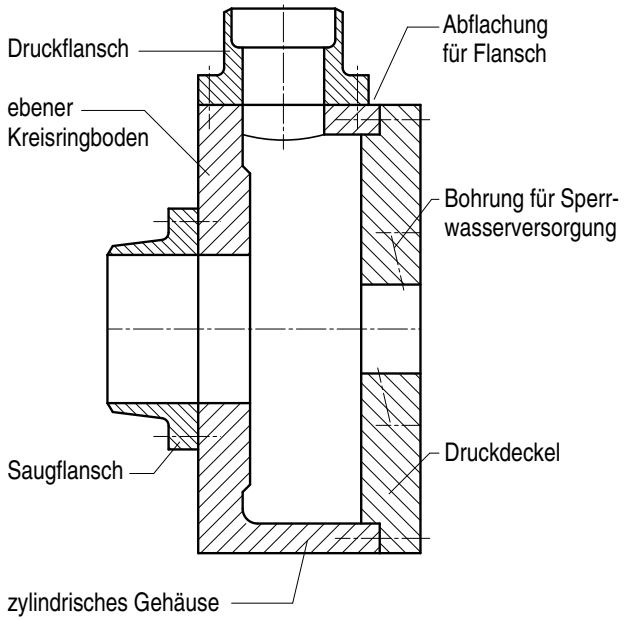


Bild A 3.2-1: Beispiel einer einstufigen Ringraumgehäusepumpe mit geschmiedetem Gehäuse

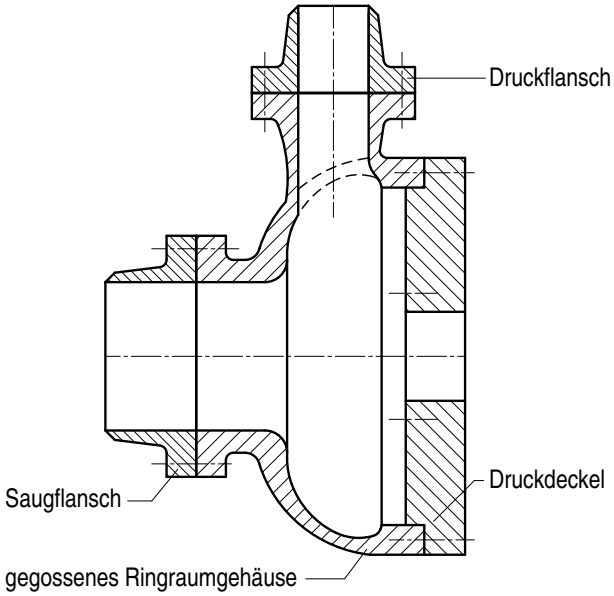


Bild A 3.2-2: Beispiel einer einstufigen Ringraumgehäusepumpe mit gegossenem Gehäuse

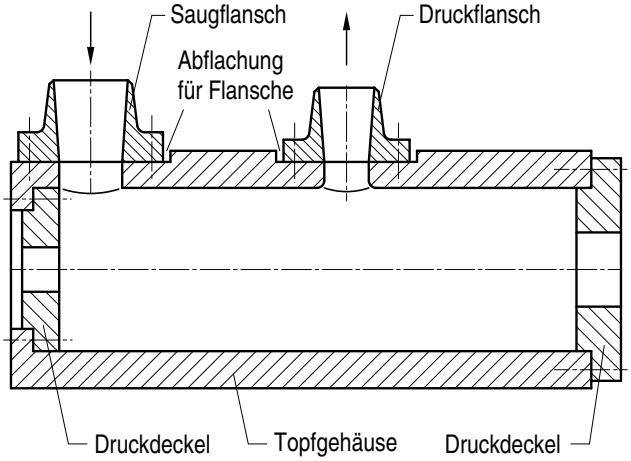


Bild A 3.2-3: Beispiel einer mehrstufigen Topfgehäusepumpe mit geschmiedetem Gehäuse

A 3.3 Dimensionierung von Ausschnitten in zylindrischen Pumpenkörpern mit Abflachung

A 3.3.1 Geltungsbereich

(1) Es werden nur Ausschnittformen an Pumpenkörpern behandelt, die nicht in den Geltungsbereich der Regeln im Abschnitt A 2.8.2 fallen.

(2) Die nachstehenden Berechnungsregeln gelten für zylindrische Pumpenkörper, die im Bereich des Ausschnittes mit einer Abflachung versehen sind (siehe **Bilder A 3.3-1** bis **A 3.3-5**) innerhalb folgender Grenzen:

$$0{,}002 \le \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} \le 0{,}1$$

und

$$D_a/D_i \le 1{,}7$$

Das Durchmesserverhältnis d_i/D_i ist auf ≤ 0,6 begrenzt.

Bei Anwendung der Gleichungen nach Abschnitt A 3.3.5 sind für die Kreisringplatte zusätzlich folgende Grenzen einzuhalten:

$$s_{pl}/D_i \le 1/3 \quad \text{und} \quad d_A/D_i \le 0{,}7$$

(3) Zusätzliche äußere Kräfte und Momente sind in dieser Berechnungsregel nicht erfasst und müssen daher gegebenenfalls gesondert berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit besteht z. B. darin, mit einem ausreichend erhöhten Innendruck zu rechnen.

A 3.3.2 Verstärkungsformen

(1) Das Verfahren setzt voraus, dass die im Bereich der Abflachung vorhandene Wanddicke s_e groß genug ist, um die durch die Abflachung und den Ausschnitt entstehende Schwächung zu kompensieren.

(2) Für geschmiedete Gehäuse muss dazu für den zylindrische Grundkörper entweder eine größere Wanddicke gewählt werden als für die ungeschwächte Zylinderschale erforderlich ist, oder eine exzentrische Gehäuseform gewählt werden.

(3) Bei Gussgehäusen dürfen angegossene Stutzen oder örtliche Verstärkungen zur Flächenkompensation herangezogen werden.

A 3.3.3 Festigkeitskennwerte

Es ist je nach Prüfgruppe A1, A2 oder A3 der Spannungsvergleichswert S_m oder S nach **Tabelle 6.6-1** einzusetzen.

A 3.3.4 Dimensionierungsberechnung

A 3.3.4.1 Erforderliche Wanddicke

Die Berechnung der erforderlichen Wanddicke s_A erfolgt mit der Beziehung

$$p \cdot \left(\frac{A_p}{A_\sigma} + \frac{1}{2} \right) \le S_m \quad \text{oder} \quad S, \qquad \text{(A 3.3-1)}$$

die auf einer Gleichgewichtsbetrachtung zwischen der druckbelasteten Fläche und der tragenden Querschnittsfläche beruht. Die in Gleichung (A 3.3-1) einzusetzende drucktragende Fläche A_p sowie die tragende Querschnittsfläche $A_\sigma = A_{\sigma 0} + A_{\sigma 1}$ ergeben sich aus den **Bildern A 3.3-1** bis **A 3.3-5**.

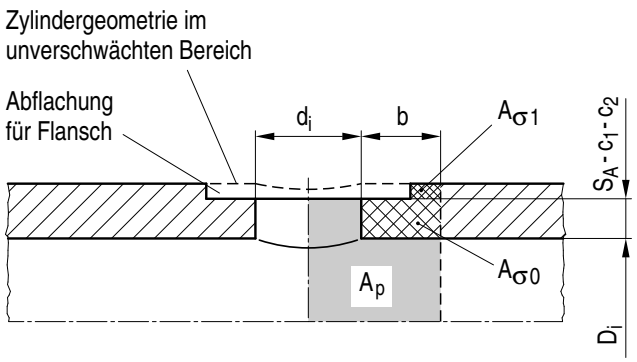


Bild A 3.3-1: Berechnungsschema für Topfgehäuse mit Abflachung und mit in Zylinderlängsrichtung benachbarten Ausschnitten

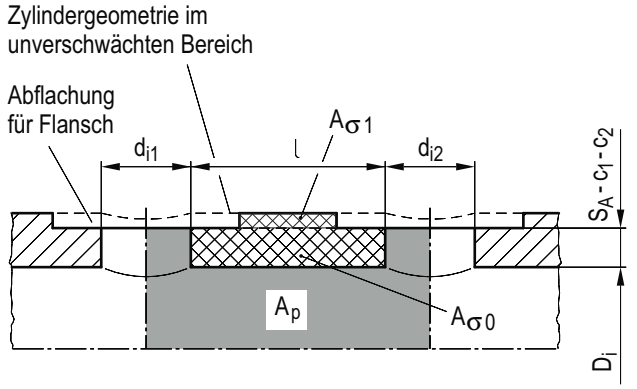


Bild A 3.3-2: Berechnungsschema für Topfgehäuse mit Abflachung und mit in Zylinderlängsrichtung benachbarten Ausschnitten

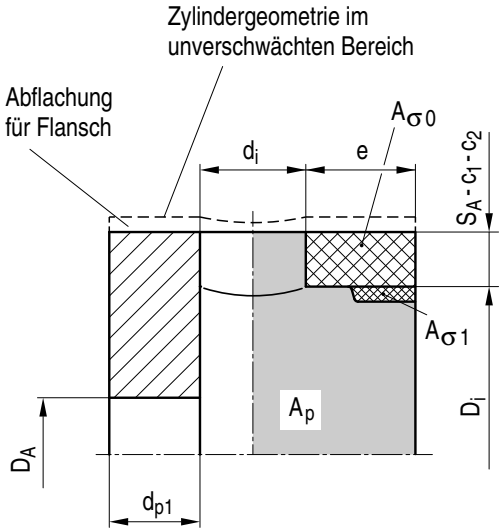


Bild A 3.3-3: Berechnungsschema für Ringraumgehäuse mit Abflachung und Ausschnitt

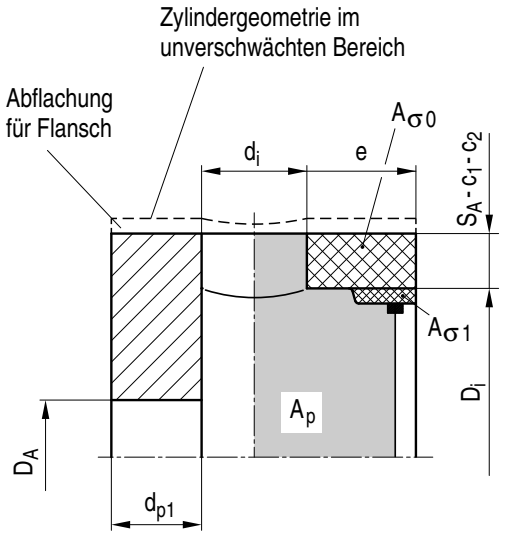


Bild A 3.3-4: Berechnungsschema für Ringraumgehäuse mit Abflachung und Ausschnitt; Dichtung liegt an der Innenseite des Zylinders

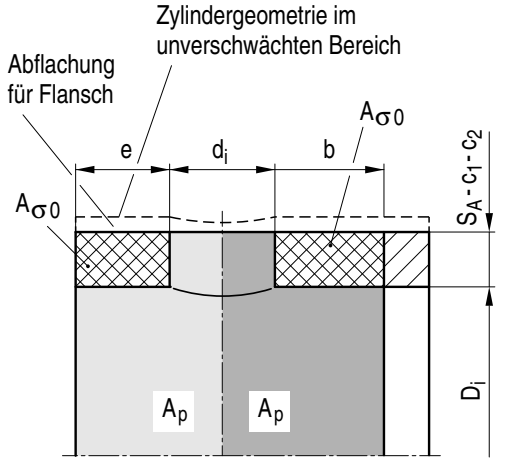


Bild A 3.3-5: Berechnungsschema für Rohrgehäuse mit Abflachung und Ausschnitt

A 3.3.4.2 Mittragende Länge

Als mittragende Länge darf höchstens b nach Gleichung (A 3.3-2) eingesetzt werden

$$b = \sqrt{(D_i + s_A - c_1 - c_2) \cdot (s_A - c_1 - c_2)} \qquad \text{(A 3.3-2)}$$

Liegt ein Ausschnitt so nahe am Zylinderende, dass der Randabstand e kleiner ist als b, so darf nur die tatsächlich vorhandene Länge eingesetzt werden.

A 3.3.4.3 Gegenseitige Beeinflussung von Ausschnitten

(1) Eine gegenseitige Beeinflussung kann vernachlässigt werden, wenn der Abstand

$$l \geq 2 \cdot \sqrt{(D_i + s_A - c_1 - c_2) \cdot (s_A - c_1 - c_2)} \qquad \text{(A 3.3-3)}$$

ist.

(2) Genügt der Abstand l nicht der Gleichung (A 3.3-3), so ist zu prüfen, ob der zwischen den Ausschnitträndern verbleibende Restquerschnitt die auf ihn entfallende Belastung zu tragen vermag. Dies ist der Fall, wenn Gleichung (A 3.3-1) erfüllt ist.

A 3.3.4.4 Einfluss von Bohrungen

Liegen in der betrachteten Schnittebene oder innerhalb eines Winkels von 22,5 Grad Bohrungen, so sind diese entsprechend **Bild A 3.3-6** von der drucktragenden Fläche A_σ abzuziehen.

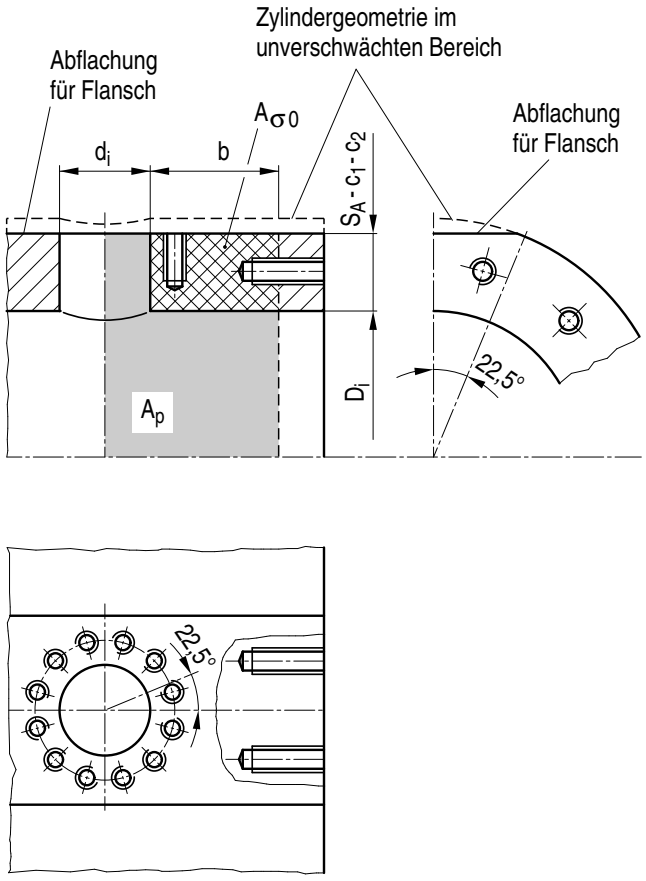


Bild A 3.3-6: Berechnungsschema zur Berücksichtigung von Bohrungen

A 3.3.5 Einfluss von ebenen Böden auf zylindrische Gehäuse

(1) Für Ringraumgehäuse, wie in **den Bildern A 3.3-3** und **A 3.3-4** dargestellt, ist ein Spannungsnachweis für den Übergangsbereich vom Zylinder zum ebenen Boden im Bereich der Abflachung und des Stutzenausschnittes nicht erforderlich, wenn

a) die Wanddicke des ebenen Kreisringbodens

$$s_{pl} = 0{,}4 \cdot C_A \cdot D_i \cdot \sqrt{\frac{p}{S_m}} \qquad \text{(A 3.3-4)}$$

beträgt.

Der Ausschnittsbeiwert C_A ist **Bild A 3.3-7** zu entnehmen.

b) die lokalen Membran- und Biegespannungen im unverschwächten Zylinder am Übergang zum ebenen Kreisringboden die Bedingung

$$(\sigma_1 + \sigma_b) \leq 1{,}5 \cdot S_m \qquad \text{(A 3.3-5)}$$

erfüllen.

c) das Verhältnis der Wanddicke im unverschwächten Bereich des Zylinders s zur Wanddicke im Bereich der Abflachung s_e

$s/s_e \leq 2$

beträgt.

Wenn s/s_e größer als 2 ist, ist nachzuweisen, dass die lokalen Membran- und Biegespannungen im unverschwächten Zylinder am Übergang zum ebenen Kreisringboden die folgende Bedingung erfüllen:

$$\frac{s}{s_e}\cdot\left(\sigma_1+\sigma_b\right)\le 3\cdot S_m \qquad \text{(A 3.3-6)}$$

(2) Die Ermittlung der lokalen Membran- und Biegespannungen im unverschwächten Zylinder kann auf analytischem Wege, mittels Stufenkörpermethode oder FE-Methode erfolgen (siehe Abschnitt 8.3).

Zur analytischen Ermittlung von σ_l und σ_b können folgende Beziehungen verwendet werden (die geometrischen Größen sind in **Bild A 3.3-8** dargestellt):

$$\sigma_l=\frac{p\cdot\left(D_i^2-d_a^2\right)}{\left(D_i+s\right)\cdot 4\cdot s}+\frac{F_R'\cdot d}{\left(D_i+s\right)\cdot s} \qquad \text{(A 3.3-7)}$$

$$\sigma_b=\frac{16{,}85\cdot p\cdot {B_1}^3+6{,}3\cdot {B_3}^3\cdot\left(10{,}4\cdot F_R'\cdot C_1+p\cdot C_2\right)\cdot\left(2{,}57\cdot\sqrt{{B_1}^3}+B_3\cdot C_3\cdot C_4\right)}{10{,}92\cdot {B_1}^2+\frac{B_3\cdot C_4}{{B_2}^2}\cdot\left(30{,}85\cdot\frac{\sqrt{{B_1}^3}}{1-\beta^2}+8{,}5\cdot\sqrt{B_1}\cdot C_3\cdot {B_2}^2+12\cdot\frac{B_3\cdot C_3\cdot C_4}{1-\beta^2}\right)} \qquad \text{(A 3.3-8)}$$

mit

$$\beta=\frac{d_A}{D_i+s} \qquad \text{(A 3.3-9)}$$

$$B_1=\frac{D_i+s}{2\cdot s} \qquad \text{(A 3.3-10)}$$

$$B_2=\frac{s_{pl}}{s} \qquad \text{(A 3.3-11)}$$

$$B_3=\frac{D_i+s}{2\cdot s_{pl}} \qquad \text{(A 3.3-12)}$$

$$C_1=\frac{d_t}{2\cdot\left(D_i+s\right)^2\cdot\left[\left(D_i+s\right)^2-{d_A}^2\right]}\cdot\left(\left[\left(D_i+s\right)^2+1{,}86\cdot {d_A}^2\right]\cdot 2\cdot\ln\frac{D_i+s}{d_t}+\left(1-\frac{d_t^2}{\left(D_i+s\right)^2}\right)\cdot\left[\left(D_i+s\right)^2\cdot 0{,}54+{d_A}^2\right]\right)-\frac{d_t}{2\cdot\left(D_i+s\right)^2}\cdot\left(\frac{{d_t}^2}{\left(D_i+s\right)^2}+2\cdot\ln\frac{D_i+s}{d_t}-1\right) \qquad \text{(A 3.3-13)}$$

$$C_2=1-2\cdot\beta^2+\beta^2\cdot\left(4{,}71+7{,}43\cdot\frac{\beta^2\cdot\ln\beta}{1-\beta^2}\right) \qquad \text{(A 3.3-14)}$$

$$C_3=\frac{\left(D_i+s\right)^2}{\left(D_i+s\right)^2-{d_A}^2} \qquad \text{(A 3.3-15)}$$

$$C_4=0{,}7+1{,}3\cdot\beta^2 \qquad \text{(A 3.3-16)}$$

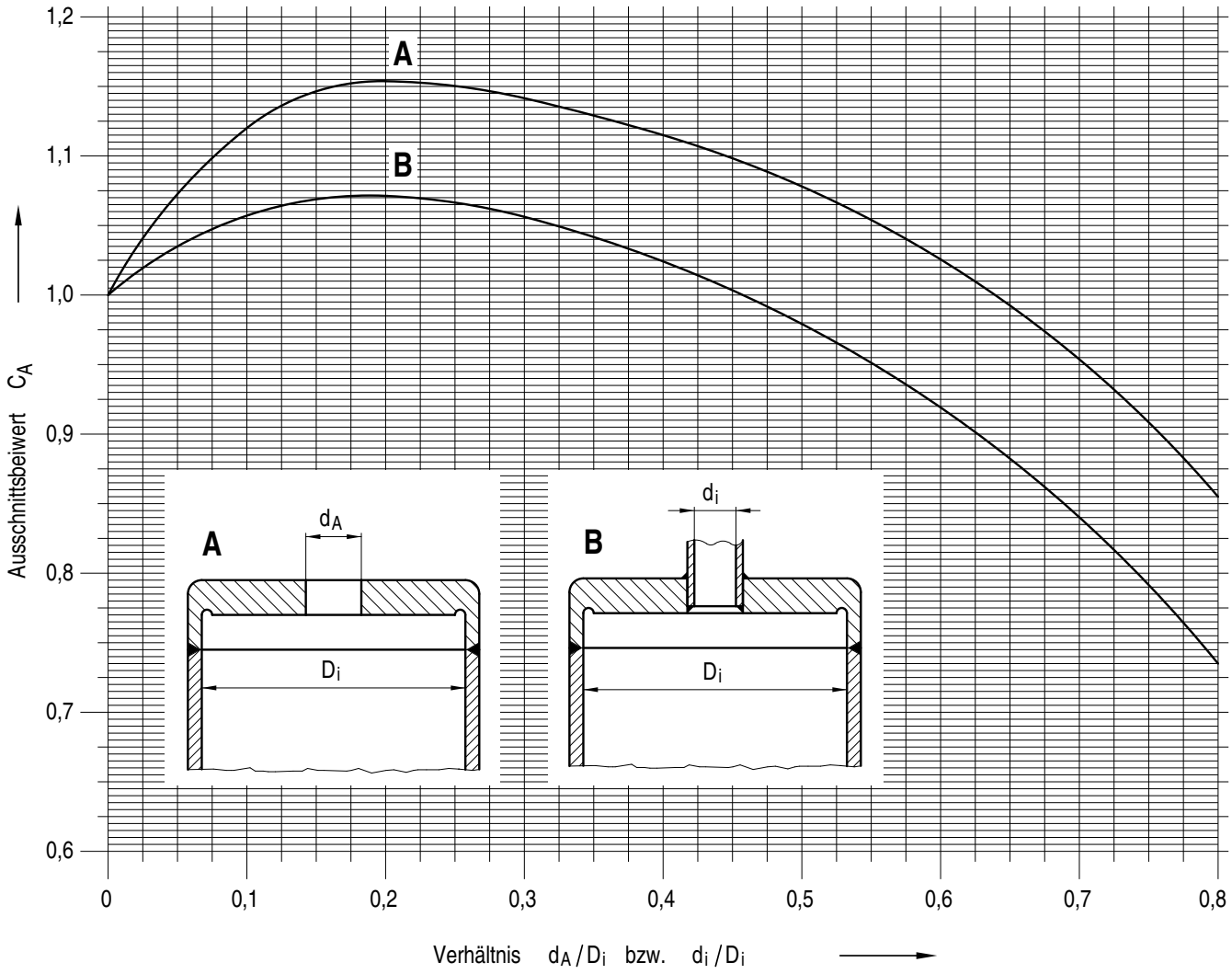


Bild A 3.3-7: Ausschnittsbeiwert C_A

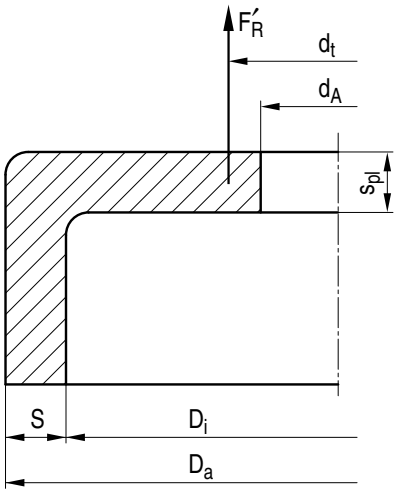


Bild A 3.3-8: Übergangsbereich vom Zylinder zum ebenen Boden

A 3.4 Verschwächung durch Bohrungen

A 3.4.1 Bohrungen in Gehäusedeckeln

Zu berücksichtigen sind Versorgungsbohrungen für Gleitringdichtungen, wassergeschmierte Lager usw. Normalerweise sind mehrere Bohrungen über den Deckel verteilt vorhanden.

Ist der Bohrungsdurchmesser kleiner als 20 % der Mindestwanddicke und liegt nicht mehr als eine Bohrung in einer Meridianebene, so braucht die Verschwächung bei der Festigkeitsberechnung nicht berücksichtigt werden.

Ist die Bohrung größer als 20 % der betrachteten Wandstärke oder liegen mehrere Bohrungen in einer Meridianebene, kann diese Stelle unter Berücksichtigung von $1,5 \cdot S_m$ dimensioniert werden.

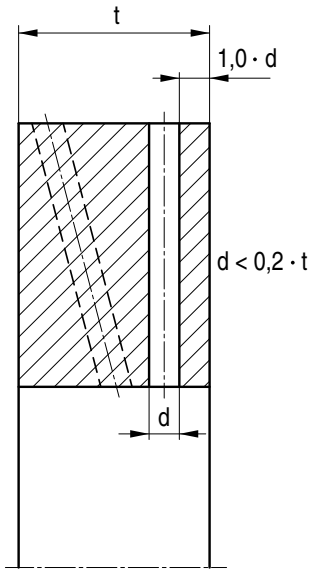


Bild A 3.4-1: Bohrungen im Gehäusedeckel

A 3.4.2 Bohrungen in zylindrischen Mänteln

Ist der Gehäusemantel mit dem 50 N/mm²-Kriterium ausgelegt, ist eine Verschwächung durch eine axiale Bohrung (z. B. Entlastungswasserbohrung) zulässig.

Diese Stelle ist beim Festigkeitsnachweis mit folgender Gleichung zu berücksichtigen:

$$P_m \geq \frac{p \cdot D_i}{2 \cdot s - d} < S_m \qquad \text{(A 3.4-1)}$$

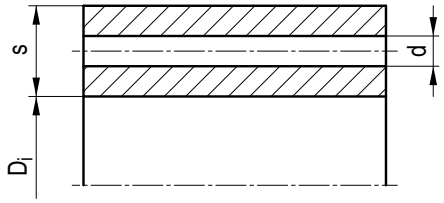


Bild A 3.4-2: Bohrung im zylindrischen Mantel

A 3.5 Erforderliche Einschraubtiefe

Es gelten die Festlegungen des Abschnitts A 2.9.4.3.

A 3.6 Unterlegscheiben und Dehnhülsen für hochfeste Schraubenverbindungen

A 3.6.1 Unterlegscheiben

Wenn die Schraubenverbindung den DIN-Abmessungen entspricht, sind auch nach DIN genormte Unterlegscheiben zu verwenden. Die Festigkeit der Unterlegscheibe muss auf die Festigkeit des Muttern- und Schraubenwerkstoffes abgestimmt sein. Kann dies nicht eingehalten werden, ist ein gesonderter Nachweis erforderlich.

Wird ein Korrosionsschutz verlangt, sind Unterlegscheiben galvanisch zu verzinken und gemäß DIN EN ISO 2081 Code D zu chromatieren.

A 3.6.2 Dehnhülsen

Die Ausführung hat nach DIN 2510-7 zu erfolgen. Als Werkstoff wird der Schraubenwerkstoff empfohlen (DIN 267-13). Wenn notwendig, ist ein Korrosionsschutz wie bei Unterlegscheiben vorzusehen.

A 4 Armaturen

A 4.1 Armaturengehäuse

A 4.1.1 Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt A 4.1

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
a, a_1, a_2	Abstand	mm
b, b_2	lichte Weite unrunder Querschnitte	mm
c_1, c_2	Zuschläge zur Wanddicke	mm
d_{Ai}	Innendurchmesser des Ausschnittes	mm
d_{Hi}	Innendurchmesser des Hauptkörpers	mm
l	Länge des Übergangsbereiches vom kreisförmigen zum elliptischen Querschnitt	mm
e, l'	Störbereichslänge	mm
e_A	mittragende Länge im Ausschnitt	mm
e_H	mittragende Länge im Hauptkörper	mm
s_0	rechnerisch erforderliche Wanddicke ohne Zuschläge	mm
s_{A0}	rechnerisch erforderliche Wanddicke eines Abzweiges ohne Zuschläge	mm
s_{An}	Nennwanddicke des Abzweiges	mm
s_{H0}	rechnerisch erforderliche Wanddicke des Grundkörpers ohne Zuschläge	mm
s_{Hn}	Nennwanddicke des Hauptkörpers	mm
s'_H	Wanddicke am Übergang vom Flansch zur Kugelschale	mm
s_n	Nennwanddicke	mm
s_{Rn}	Nennwanddicke des Rohres	mm
y	zylindrischer Anteil in Ovalkörpern	mm
A_p	drucktragende Fläche	mm²
A_σ	tragende Querschnittsfläche	mm²
B_n	Berechnungsbeiwert für ovalförmige Querschnitte	—
C_K	Berechnungsbeiwert	—
C	Wirksamkeit einer Randverstärkung	—
α	Winkel zwischen Grundkörper- und Abzweigachse	grd

Fußzeiger			
b	Biegung	u	Umfang
l	längs	m	mittel
r	radial	B	Betrieb
t	Verdrehung	0	Einbauzustand

A 4.1.2 Geltungsbereich

Die nachstehende Berechnung gilt für Armaturengehäuse unter innerem Überdruck. Durch äußere Kräfte oder Momente hervorgerufene Beanspruchungen sind gemäß Abschnitt 8.4 zu berücksichtigen.

A 4.1.3 Berechnung der Gehäusekörper bei vorwiegend ruhender Innendruckbeanspruchung

A 4.1.3.1 Allgemeines

(1) Die Gehäusekörper können als Grundkörper aus einer geometrisch bestimmbaren Struktur mit Ausschnitten oder Abzweigen und Abzweigdurchdringungen aufgefasst werden. Die Berechnung der Wanddicken umfasst daher einmal den außerhalb des vom Ausschnitt beeinflussten Bereiches liegenden Grundkörperteil und zum anderen den Ausschnittsbereich selbst. Als Grundkörper des Gehäusekörpers wird dabei der Teil angesehen, der den größeren Durchmesser aufweist, so dass gilt

$$d_{Hi} \geq d_{Ai} \quad \text{oder} \quad b_2 \geq d_{Ai}.$$

(2) Die Übergänge unterschiedlicher Wanddicken sollen sprung- und knickfrei verlaufen, um ein abgestimmtes Verformungsverhalten zu erzielen. In Abhängigkeit von dem gewählten Nachweisverfahren der Spannungs- und Ermüdungsanalyse sind zusätzliche Konstruktionsanforderungen zu erfüllen, z. B. hinsichtlich der Übergangsradien (siehe Abschnitt 8.4).

Die Angleichung der Gehäusegrundkörperwanddicke s_{Hn} und der Abzweigwanddicke s_{An} an die anschließende Rohrwanddicke s_{Rn} soll mindestens auf einer Länge von $2 \cdot s_{Hn}$ oder $2 \cdot s_{An}$ erfolgen. Für die Ausführungen des Übergangsberei-

ches sind zusätzlich die Festlegungen gemäß Abschnitt 5.1.4.2 zu berücksichtigen.

(3) Für die Gesamtwanddicke mit Zuschlägen gilt:

$$s_{Hn} \geq s_{H0} + c_1 + c_2 \qquad \text{(A 4.1-1)}$$

und

$$s_{An} \geq s_{A0} + c_1 + c_2 \qquad \text{(A 4.1-2)}$$

wobei s_{Hn} und s_{H0} für den Grundkörper und s_{An} und s_{A0} für anschließende Abzweige gilt.

(4) Für die Nachrechnung ausgeführter Bauteile ist zu setzen

$$s_{H0} \leq s_{Hn} - c_1 - c_2 \qquad \text{(A 4.1-3)}$$

und

$$s_{A0} \leq s_{An} - c_1 - c_2. \qquad \text{(A 4.1-4)}$$

A 4.1.3.2 Berechnung der Grundkörper außerhalb der Ausschnitts- oder Abzweigbereiche und ohne Randeinflüsse

A 4.1.3.2.1 Allgemeines

Die geometrische Struktur der Grundkörper der Armaturengehäuse kann zylindrisch, kugelig, kegelförmig oder oval sein. Entsprechend lassen sich die Wanddicken im ungestörten Bereich der Körper ermitteln.

A 4.1.3.2.2 Ermittlung der erforderlichen Wanddicke s_0 von zylinderförmigen Grundkörpern

Die Ermittlung der erforderlichen Wanddicke s_0 von zylinderförmigen Grundkörpern ist gemäß Abschnitt A 2.2.2 durchzuführen.

A 4.1.3.2.3 Ermittlung der erforderlichen Wanddicke s_0 von kugelförmigen Grundkörpern

Die Ermittlung der erforderlichen Wanddicke s_0 von kugelförmigen Grundkörpern ist gemäß Abschnitt A 2.3.2 durchzuführen.

A 4.1.3.2.4 Ermittlung der erforderlichen Wanddicke s_0 von kegelförmigen Grundkörpern

Die Ermittlung der erforderlichen Wanddicke s_0 von kegelförmigen Grundkörpern ist gemäß Abschnitt A 2.4.2 durchzuführen.

A 4.1.3.2.5 Ermittlung der erforderlichen Wanddicke s_0 von ovalförmigen Grundkörpern

(1) Bei ovalförmigen Querschnitten (**Bild A 4.1-1**) sind die in den Wandungen auftretenden zusätzlichen Biegebeanspruchungen zu berücksichtigen.

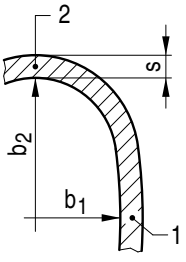


Bild A 4.1-1: Ovalförmiger Gehäusekörper

(2) Die theoretische Mindestwanddicke für solche Körper unter Innendruckbeanspruchung errechnet sich aus:

$$s_0' = \frac{p \cdot b_2}{2 \cdot s_m} \cdot \sqrt{B_0^{\,2} + \frac{4 \cdot S_m}{p} \cdot B_n} \qquad \text{(A 4.1-5)}$$

(3) Die Berechnung muss bei ovalförmigen Querschnitten für die in **Bild A 4.1-1** gekennzeichneten Stellen 1 und 2 durchgeführt werden, da hier die das Festigkeitsverhalten im Wesentlichen beeinflussenden Biegemomente Größtwerte aufweisen.

(4) Der von den Normalkräften abhängende Berechnungsfaktor B_0 beträgt

für die Stelle 1: $B_0 = b_1/b_2$

für die Stelle 2: $B_0 = 1$

(5) B_n ist dem **Bild A 4.1-2** zu entnehmen.

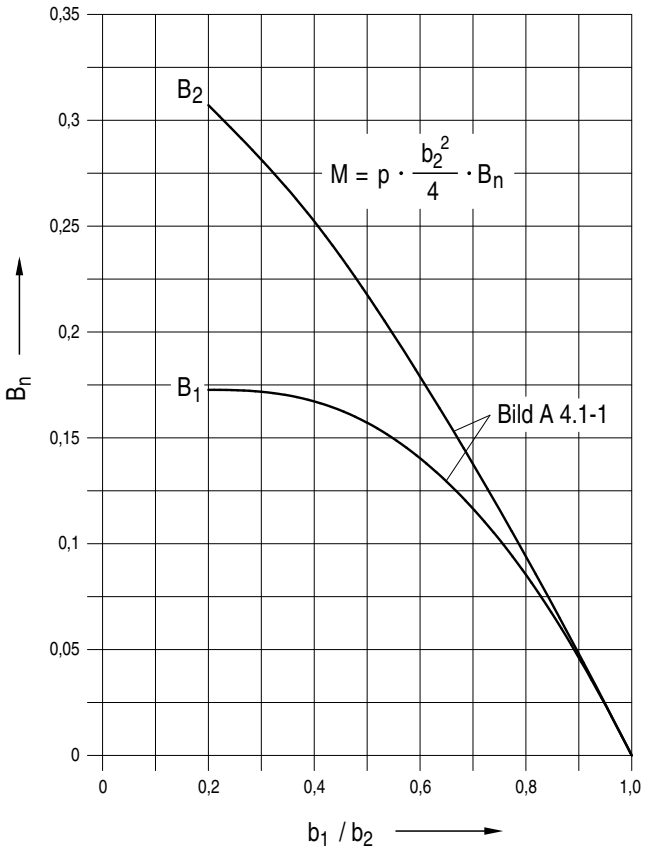


Bild A 4.1-2: Berechnungsbeiwert B_n für ovalförmige Querschnitte

(6) Die von den Biegemomenten abhängenden Berechnungsbeiwerte B_n sind für ovalförmige Querschnitte für die Stellen 1 und 2 abhängig von b_1/b_2 in **Bild A 4.1-2** dargestellt. Die Kurven entsprechen folgenden Gleichungen:

$$B_1 = \frac{1 - k_E^{\,2}}{6} \cdot \frac{K'}{E'} - \frac{1 - 2 \cdot k_E^{\,2}}{6} \qquad \text{(A 4.1-6)}$$

$$B_2 = \frac{1 + k_E^{\,2}}{6} - \frac{1 - k_E^{\,2}}{6} \cdot \frac{K'}{E'} \qquad \text{(A 4.1-7)}$$

$$\text{mit } k_E^{\,2} = 1 - \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^2 \qquad \text{(A 4.1-8)}$$

Hinweis:
K´ und E´ sind die vollständigen elliptischen Integrale, deren Werte abhängig von dem Modul des Integrals k_E aus Tabellenbüchern entnommen werden können, z. B. Hütte I, Theoretische Grundlagen, 28. Auflage, Verlag: W. Ernst u. Sohn, Berlin.

(7) Für die Berechnungsbeiwerte können für $b_1/b_2 \geq 0{,}5$ auch folgende Näherungsgleichungen benutzt werden:

$$B_1 = \left(1 - \frac{b_1}{b_2}\right) \cdot \left[0{,}625 - 0{,}435 \cdot \sqrt{1 - \frac{b_1}{b_2}}\right] \qquad \text{(A 4.1-9)}$$

$$B_2 = \left(1 - \frac{b_1}{b_2}\right) \cdot \left[0{,}5 - 0{,}125 \cdot \left(1 - \frac{b_1}{b_2}\right)\right] \qquad \text{(A 4.1-10)}$$

(8) Die Berechnungsbeiwerte gelten auch für Querschnittsveränderungen in ovalen Grundkörpern, z. B. bei Schiebern nach **Bild A 4.1-3**. Ausführung a und Ausführung b, bei denen die Seitenlänge b_1 von der Scheitelzone des Einlaufstutzens (abgeflachtes Oval) über die Länge l bis auf den Wert b_2 (Kreisform) zunimmt. Für die Ermittlung von B_n ist dann der Wert b_1 im Querschnitt B-B bei 1/2 maßgebend. Dabei ergibt sich l aus

$$l = H - y - \left(\frac{d_H}{2} + s_H\right) - l' \qquad \text{(A 4.1-11)}$$

mit H als Konstruktionsmaß nach **Bild A 4.1-3**.

Für die vom Einlaufstutzen beeinflusste Länge l´ gilt:

$$l' = 1{,}25 \cdot \sqrt{d'_m \cdot s_n} \qquad \text{(A 4.1-12)}$$

mit

$$d'_m = \frac{b'_1 + b_2}{2} \qquad \text{(A 4.1-13)}$$

wobei b'_1, und b_2 am Querschnitt A-A im Abstand l´ vom Einlaufstutzen zu ermitteln sind. s_n ist die bei l´ vorhandene Wanddicke. Hierbei sind b'_1 und l´ im Allgemeinen iterativ zu ermitteln.

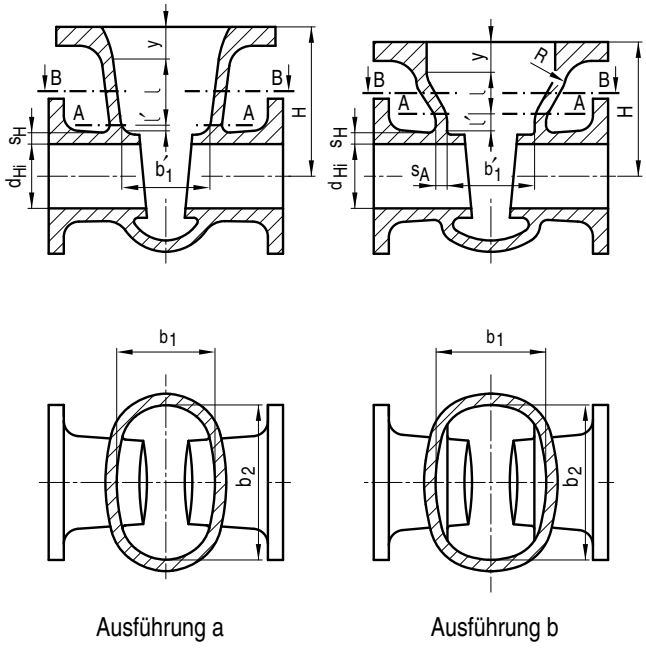


Bild A 4.1-3: Beispiele für Querschnittsveränderungen in ovalen Grundkörpern

(9) Bei kurzen Gehäusekörpern (z. B. **Bild A 4.1-3** Ausführung a oder Ausführung b) mit der ungestörten, der Berechnungsgeometrie entsprechenden Länge l kann die Stützwirkung der an den Enden anschließenden Bauelemente (z. B. Flansche, Böden, Deckel) mit in Rechnung gestellt werden. Damit ergibt sich mit Gleichung (A 4.1-5) die erforderliche Mindestwanddicke aus:

$$s_0 = s'_0 \cdot k \qquad \text{(A 4.1-14)}$$

(10) Der Korrekturfaktor k ergibt sich in Anlehnung an das Abklingverhalten der Beanspruchungen in Zylinderschalen unter Berücksichtigung experimenteller Untersuchungsergebnisse an nichtkreisförmigen Gehäusen aus:

$$k = 0{,}48 \cdot \sqrt[3]{\frac{l^2}{d_m \cdot s'_0}} \qquad \text{(A 4.1-15)}$$

mit $0{,}6 \leq k \leq 1$

Die Funktion ist in **Bild A 4.1-4** abhängig von $\frac{l^2}{d_m \cdot s'_0}$ dargestellt.

(11) Für d_m ist $d_m = (b_1 + b_2)/2$ zu setzen und s'_0 entspricht Gleichung (A 4.1-5). Bei Querschnittsveränderungen über der Länge l, z. B. nach **Bild A 4.1-3** Ausführung a oder Ausführung b, sind die Maße b_1 und b_2 im Querschnitt B-B (bei l/2) zu entnehmen. Örtliche Abweichungen von der Gehäuseform, seien sie konvexer oder konkaver Art, können in der Regel vernachlässigt werden.

(12) Dem Festigkeitskriterium ist genüge geleistet, wenn die erforderliche Wanddicke örtlich vorhanden ist, vorausgesetzt, dass Übergänge der Wanddicken sanft erfolgen.

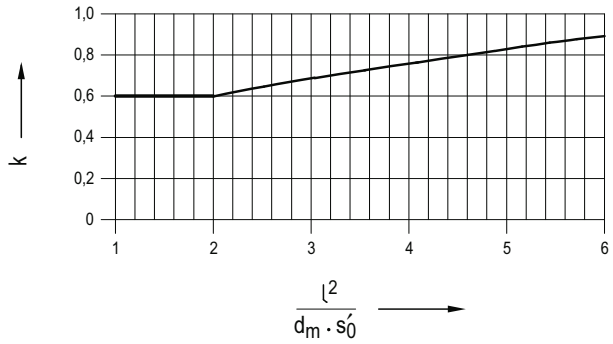


Bild A 4.1-4: Korrekturfaktor k für kurze Gehäusekörper

A 4.1.3.3 Gehäusekörper mit Abzweig

(1) Die Festigkeitsberechnung des Gehäusekörpers mit Abzweig erfolgt aufgrund einer Gleichgewichtsbetrachtung zwischen den äußeren und inneren Kräften für die höchstbeanspruchten Zonen. Als solche werden die Übergangsstellen der zylindrischen, kugeligen oder nichtkreisförmigen Grundkörper zum Abzweig angesehen. Dem Grundkörper ist dabei der Durchmesser d_H und die Wanddicke s_H und dem Abzweig der Durchmesser d_A und die Wanddicke s_A zugeordnet. Es muss gelten: $d_{Hi} > d_{Ai}$.

(2) Bei zylindrischen Grundkörpern, siehe **Bild A 4.1-5**, weist in der Regel die im Längsschnitt durch die Hauptachse gelegene Schnittstelle I mit der mittleren Hauptspannung $\overline{\sigma}_I$ die größte Beanspruchung auf. Bei Verhältnissen von Stutzenöffnung zur Grundkörperöffnung $\geq 0{,}7$ sind jedoch die im Querschnitt zur Hauptachse (Schnittstelle II) auftretenden Biegebeanspruchungen nicht mehr zu vernachlässigen, d. h. es ist dann auch diese Richtung zu berechnen.

(3) Eine Nachrechnung für den Schnitt II kann entfallen, falls die Wanddickenunterschiede innerhalb der Abklinglänge dieses Schnittes und im Vergleich zu Schnitt I kleiner als oder gleich 10 % sind.

(4) Bei nichtkreisförmigen Gehäusekörpern mit Abzweigen und allgemein bei zusätzlichen Kraftwirkungen in Richtung der Hauptachse kann die größte Beanspruchung auch im Querschnitt mit der mittleren Hauptspannungsrichtung σ_{II} (Schnitt II) liegen.

(5) In diesen Fällen ist die Rechnung sowohl für den Schnitt I als auch für den Schnitt II durchzuführen.

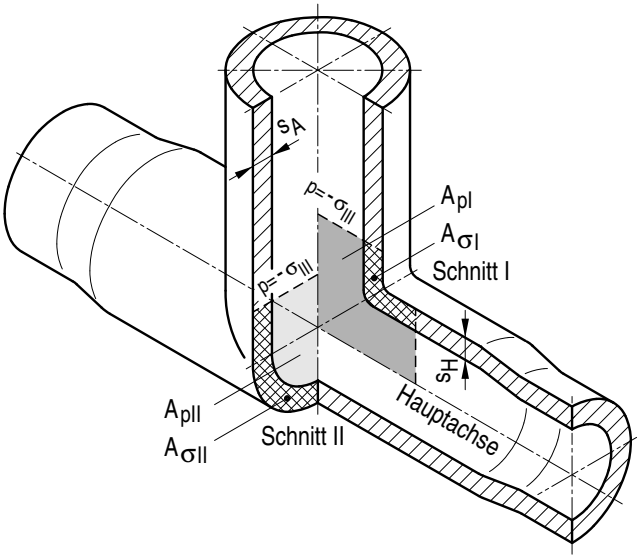


Bild A 4.1-5: Berechnungsschnitte für Gehäusekörper mit Abzweig

(6) Das nachfolgende Berechnungsverfahren ist für Armaturengehäuse mit senkrechtem Abzweig, siehe **Bilder A 4.1-6** bis **A 4.1-12**, sowie mit schrägem Abzweig, wenn der Winkel α gleich oder größer als 45 Grad ist (siehe **Bild A 4.1-14**), zulässig. Dabei ist vorausgesetzt, dass s_A kleiner als oder gleich s_H ist. Ist bei Konstruktionen die Einhaltung dieser Bedingungen nicht möglich, kann nur die kleinere Wanddicke s_H für die Berechnung der mittragenden Länge und der tragenden Querschnittsfläche A_σ verwendet werden.

Hinweis:
In den **Bildern A 4.1-5** bis **A 4.1-14** ist die dargestellte Wanddicke die Nennwanddicke abzüglich der Zuschläge c_1 und c_2.

(7) Für das Kräftegleichgewicht im Längsschnitt gemäß den **Bildern A 4.1-6** bis **A 4.1-12** gilt die Beziehung

$$p \cdot A_{pl} = \overline{\sigma}_l \cdot A_{\sigma l} \qquad \text{(A 4.1-16)}$$

wobei $p \cdot A_{pl}$ die äußere Gesamtkraft darstellt, die auf der drucktragenden Fläche A_{pl} (gerastert) wirkt, während als innere Kraft $\overline{\sigma}_l \cdot A_{\sigma l}$ die in der höchstbeanspruchten Zone der Wandung mit der Querschnittsfläche $A_{\sigma l}$ (kreuzschraffiert) und im Querschnitt der mittleren Hauptspannung $\overline{\sigma}_l$ wirksame Kraft anzusehen ist.

(8) Die nach der Schubspannungs-Hypothese zu fordernde Festigkeitsbedingung lautet:

$$\sigma_{VI} = \overline{\sigma}_l - \overline{\sigma}_m = p \cdot \frac{A_{pl}}{A_{\sigma l}} + \frac{p}{2} \le S_m \qquad \text{(A 4.1-17)}$$

(9) Bei nichtkreisförmigen Gehäusekörpern mit Abzweigen sind zur Berücksichtigung der Biegespannungen, die über die bei der Ermittlung der Wanddicken nach den Gleichungen (A 4.1-5) oder (A 4.1-14) bereits erfassten hinausgehen, folgende Festigkeitsbedingungen anzuwenden:

$$\sigma_{VI} = \overline{\sigma}_l - \overline{\sigma}_m = p \cdot \frac{A_{pl}}{A_{\sigma l}} + \frac{p}{2} \le \frac{S_m}{1{,}2} \qquad \text{(A 4.1-18)}$$

(10) In den Gleichungen (A 4.1-17) und (A 4.1-18) wird die senkrecht zur Wandung wirkende Spannung σ_{III} als kleinste Hauptspannung betrachtet, die auf der druckbeaufschlagten Seite $\sigma_{III} = -p$ und auf der drucklosen Seite $\sigma_{III} = 0$, also im Mittel $\sigma_{III} = -p/2$ ist.

Sinngemäß gilt für das Kräftegleichgewicht im Querschnitt II (siehe **Bild A 4.1-6**)

$$p \cdot A_{pII} = \overline{\sigma}_{II} \cdot A_{\sigma II} \qquad \text{(A 4.1-19)}$$

Die Festigkeitsbedingung lautet in diesem Falle

$$\sigma_{VII} = \overline{\sigma}_{II} - \overline{\sigma}_{III} = p \cdot \frac{A_{pII}}{A_{\sigma II}} + \frac{p}{2} \le S_m \qquad \text{(A 4.1-20)}$$

und bei nichtkreisförmigen Gehäusekörpern

$$\sigma_{VII} \le \frac{S_m}{1{,}2} \qquad \text{(A 4.1-21)}$$

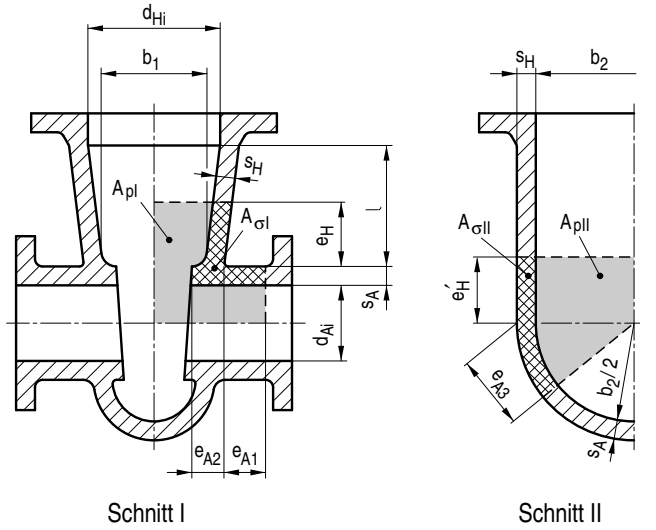


Bild A 4.1-6: Gehäusekörper

(11) Bei zylindrischen Gehäusekörpern mit $d_{Ai}/d_{Hi} \ge 0{,}7$ und gleichzeitig auch $s_{A0}/s_{H0} < d_A/d_H$ ist im Querschnitt II zusätzlich folgende Bedingung zu erfüllen:

$$p \cdot \left[\frac{d_{Hi} + s_{H0}}{2 \cdot s_{H0}} + 0{,}2 \cdot \frac{d_{Ai} + s_{A0}}{s_{A0}} \cdot \sqrt{\frac{d_{Hi} + s_{H0}}{s_{H0}}} \right] \le 1{,}5 \cdot S_m \qquad \text{(A 4.1-22)}$$

(12) Für nichtkreisförmige Gehäusekörper lautet die Bedingung:

$$p \cdot \left[\frac{b_2 + s_{H0}}{2 \cdot s_{H0}} + 0{,}25 \cdot \frac{d_{Ai} + s_{A0}}{s_{A0}} \cdot \sqrt{\frac{b_2 + s_{H0}}{s_{H0}}} \right] \le 1{,}5 \cdot S_m \qquad \text{(A 4.1-23)}$$

(13) Für die in den **Bildern A 4.1-7 bis A 4.1-14** dargestellten Fällen gilt allgemein die Festigkeitsbedingung:

$$\sigma = p \cdot \left(\frac{A_p}{A_\sigma} + 0{,}5 \right) \le S_m \qquad \text{(A 4.1-24)}$$

Die drucktragenden Flächen A_p und die tragenden Querschnittsflächen A_σ werden rechnerisch oder durch Planimetrieren (maßstabliche Zeichnung) bestimmt.

Die mittragenden Längen der zu betrachtenden Querschnittsflächen A_p und A_σ müssen wie folgt bestimmt werden (ausgenommen kugelförmige Gehäusekörper nach **Bild A 4.1-11** und Abzweige mit schrägen Stutzen nach **Bild A 4.1-14**):

$$e_H = \sqrt{(d_{Hi} + s_{H0}) \cdot s_{H0}} \qquad \text{(A 4.1-25)}$$

$$e_A = 1{,}25 \cdot \sqrt{(d_{Ai} + s_{A0}) \cdot s_{A0}} \qquad \text{(A 4.1-26)}$$

(14) Für die Darstellung in **Bild A 4.1-6**, Schnitt I gilt:

$$e_H = \sqrt{(b_1 + s_{H0}) \cdot s_{H0}} \qquad \text{(A 4.1-27)}$$

$$e_{A1} = 1{,}25 \cdot \sqrt{(d_{Ai} + s_{A0}) \cdot s_{A0}} \qquad \text{(A 4.1-28)}$$

e_{A2} gemäß Absatz (21).

Für Schnitt II gilt:

$$e'_H = \sqrt{(b_2 + s_{H0}) \cdot s_{H0}} \qquad \text{(A 4.1-29)}$$

$$e_{A3} = 1{,}25 \cdot \sqrt{(b_2 + s_{A0}) \cdot s_{A0}} \qquad \text{(A 4.1-30)}$$

(15) Bei Verhältnissen Stutzenöffnung zu Grundkörperöffnung größer als 0,8 entfällt in den Gleichungen (A 4.1-26), (A 4.1-28) und (A 4.1-30) der Faktor vor der Wurzel.

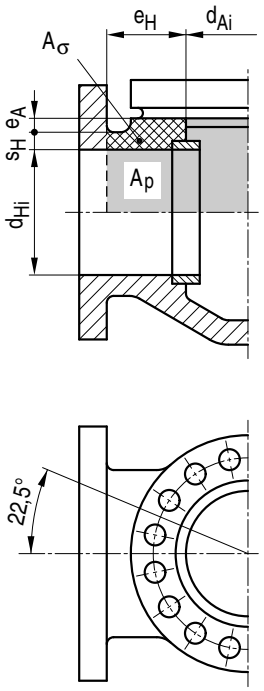


Bild A 4.1-7: Gehäusekörper

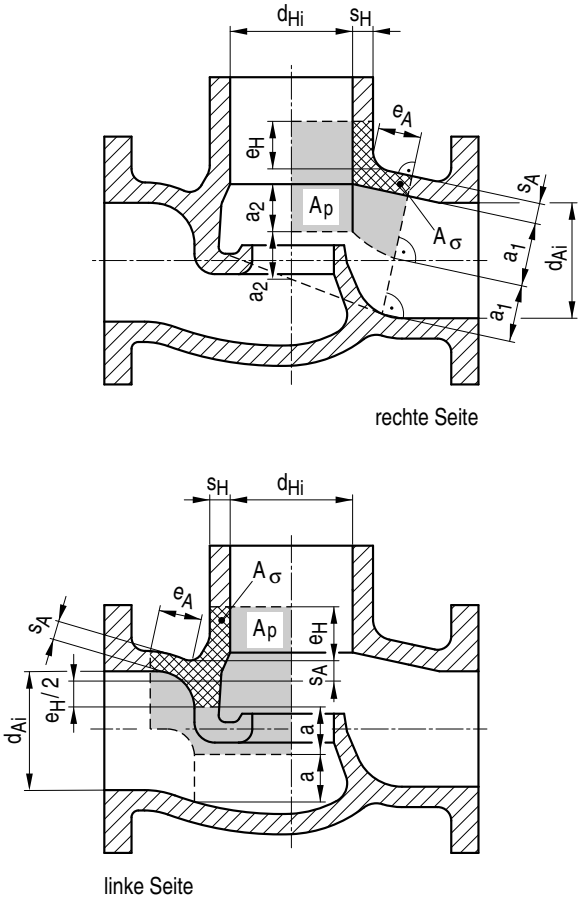


Bild A 4.1-8: Zylindrischer Gehäusekörper

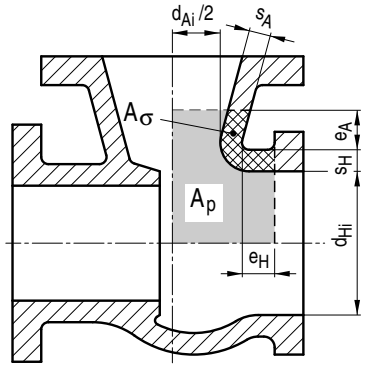


Bild A 4.1-9: Gehäusekörper in Eckform

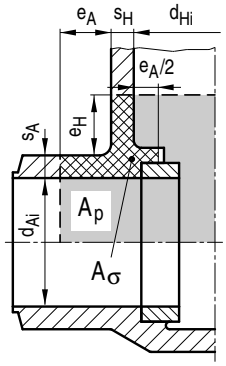


Bild A 4.1-10: Gehäusekörper

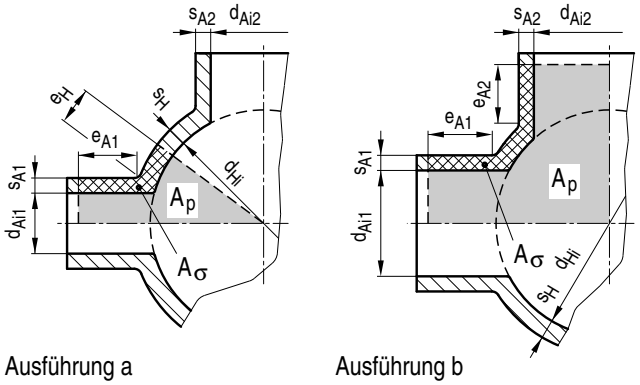


Bild A 4.1-11: Kugelförmige Gehäusekörper

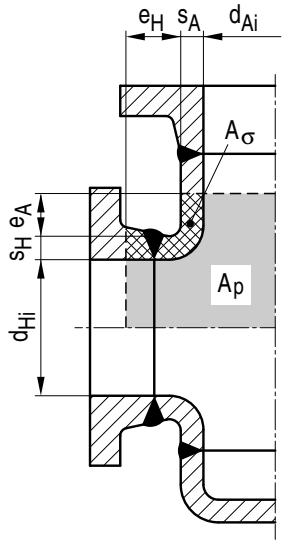


Bild A 4.1-12: Gehäusekörper

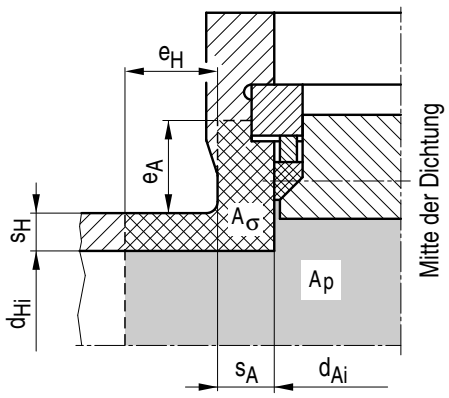


Bild A 4.1-13: Verschlussbeispiel

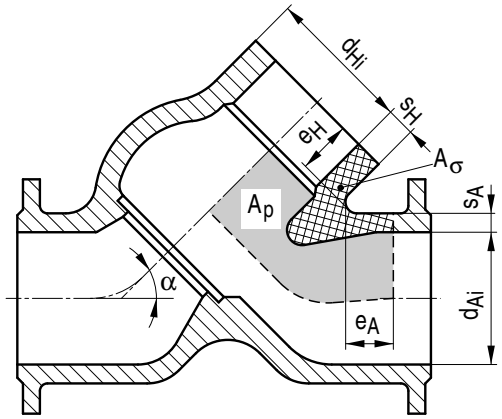


Bild A 4.1-14: Zylindrischer Gehäusekörper mit schrägem Abzweig

(16) Für Abzweige in kugelförmigen Grundkörpern mit Verhältnissen d_{Ai1}/d_{Hi} oder $d_{Ai2}/d_{Hi} \leq 0{,}5$ kann die mittragende Länge im Kugelbereich gemäß **Bild A 4.1-11** Ausführung a angesetzt werden mit:

$$e_H = \sqrt{(d_{Hi} + s_{H0}) \cdot s_{H0}} \qquad \text{(A 4.1-31)}$$

jedoch nicht größer, als es sich durch die Winkelhalbierende zwischen den Mittellinien beider Stutzen ergibt.

Für die mittragende Länge im Stutzen gilt

$$e_A = \sqrt{(d_{Ai} + s_{A0}) \cdot s_{A0}} \qquad \text{(A 4.1-32)}$$

Bei Verhältnissen d_{Ai1}/d_{Hi} oder $d_{Ai2}/d_{Hi} > 0{,}5$ wird wie in **Bild A 4.1-11** Ausführung b vorgegangen, wobei e_{A1} oder e_{A2} gemäß Gleichung (A 4.1-32) zu ermitteln sind.

(17) Armaturengehäuse mit schrägem Stutzen ($\alpha \geq 45°$) dürfen ebenfalls nach Gleichung (A 4.1-17) berechnet werden, wobei die Aufteilung der druckbelasteten Fläche (gerastert) und der drucktragenden Querschnittsfläche (kreuzschraffiert) nach **Bild A 4.1-14** erfolgt.

Dabei sind die mittragenden Längen wie folgt definiert:

$$e_H = \sqrt{(d_{Hi} + s_{H0}) \cdot s_{H0}} \qquad \text{(A 4.1-33)}$$

$$e_A = \left(1 + 0{,}25 \cdot \frac{\alpha}{90°}\right) \cdot \sqrt{(d_{Ai} + s_{A0}) \cdot s_{A0}} \qquad \text{(A 4.1-34)}$$

Auch bei schrägen Abzweigen soll die Begrenzungsfläche der Druckfläche der Strömungsmittellinie folgen. Bei Verhältnissen Abzweigöffnung zu Grundkörperöffnung größer als 0,8 entfällt in Gleichung (A 4.1-34) der Faktor vor der Wurzel.

(18) Sollten Flansche oder Teile davon innerhalb der errechneten mittragenden Länge liegen, so sind diese, wie in den **Bildern A 4.1-6, A 4.1-7, A 4.1-9, A 4.1-12** angegeben, als nicht mittragend anzusehen.

(19) Wenn mittragende Längen der Ausschnittsverstärkungen in den konischen Teil des Flanschansatzes hineinreichen, so darf nur der zylindrische Teil bei der Bestimmung der tragenden Fläche des Ausschnittes berücksichtigt werden.

(20) Sind im Bereich der tragenden Querschnittsfläche A_σ oder im Einflussbereich von 22,5 Grad zur Schnittfläche Bohrungen (Schraubenlöcher) vorhanden, so sind diese Querschnittsflächen von A_σ abzuziehen.

(21) Nach innen überstehendes Material darf bis zu einer Höchstlänge von $e_H/2$ oder $e_A/2$ in die tragende Querschnittsfläche A_σ einbezogen werden.

(22) Bei Ausführungen nach **Bild A 4.1-13**, bei denen durch die Anordnung einer Dichtung sichergestellt ist, dass die drucktragende Fläche A_p kleiner ist, als es der Abklinglänge e_H oder e_A entspricht, kann die Mitte der Dichtung als Begrenzung der Fläche A_p zugrunde gelegt werden, während die Materialfläche A_σ durch die berechnete Länge e_H oder e_A begrenzt wird.

Bei Ausführungen mit druckdichtendem Deckelverschluss, bei denen der geteilte Segmentring innerhalb der Abklinglänge angeordnet ist, darf e_H bzw. e_A für die Bestimmung der tragenden Querschnittsfläche A_σ bis höchstens Mitte Segmentring angesetzt werden, um die durch die Dichtung eingeleiteten Radialkräfte und die im Nutgrund auftretenden Biegebeanspruchungen zu begrenzen.

A 4.2 Gehäuseabschlüsse

A 4.2.1 Tellerböden

Die Berechnung von Tellerböden erfolgt nach Abschnitt A 2.6.

A 4.2.2 Gewölbte Böden

Die Berechnung von gewölbten Böden erfolgt nach Abschnitt A 2.5.

A 4.2.3 Ebene Platten

A 4.2.3.1 Allgemeines

Abschlüsse in Form von ebenen Platten werden als äußere und innere Abschlüsse von Armaturengehäusen vielfach verwendet. Vornehmlich handelt es sich dabei um ebene Kreisplatten und Kreisringplatten wie sie in den Abschnitten A 2.7.3.2 bis A 2.7.3.7 aufgezeigt sind. Andere Plattenformen (z. B. rechteckig oder elliptisch) sind Sonderfälle, die der einschlägigen Literatur zu entnehmen sind. Bei Armaturen können überlagerte Lastfälle auftreten, die sich aus der Innendruckbelastung und zusätzlichen Kräften zusammensetzen. Die Lastfälle lassen sich dann in der angegebenen Weise auf Einzelbelastungen zurückführen und durch Summation der Momente erfassen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Maximalmomente der Einzelbelastungen nicht in jedem Fall das maximale Gesamtmoment ergeben. In diesem Fall muss die Lage und Größe des Maximums aus dem Verlauf der Belastungsfälle bestimmt werden.

Die Festigkeitsbedingung ist entweder in den Wanddickenformeln enthalten oder lautet explizit

$$\sigma_r, \sigma_t = \frac{6 \cdot M_{max}}{s^2} \leq 1{,}5 \cdot S_m \qquad \text{(A 4.2-1)}$$

Die Dimensionierung von ebenen Platten erfolgt nach Abschnitt A 2.7.

A 4.3 Schrauben für Armaturen

Schrauben für Armaturen werden nach Abschnitt A 2.9 berechnet.

A 4.4 Selbstdichtende Verschlüsse

(1) Berechnungsgrößen und Einheiten zu Abschnitt A 4.4

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
a	Breite der Auflagerstelle	mm
b	Breite des Distanzringes	mm
b_D	Breite der Dichtleiste	mm
d_a	Außendurchmesser des Gehäuses	mm
d_0	Innendurchmesser des Gehäuses	mm
d_1	Innendurchmesser der Gehäusenut	mm
d_2	Durchmesser des Verschlussdeckels	mm
h_0	Mindestkopfhöhe der Auflagerleiste	mm
h_D	Mindesthöhe der Dichtleiste	mm
h_v	Höhe des Verschlussdeckels	mm
h_1	Höhe des Einlegeringes R	mm
s_1	Gehäusewanddicke in Höhe der Nut	mm
F_{ax}	Axialkraft	N
F_B	gleichmäßig über den Umfang verteilte Axialkraft	N
F_Z	zusätzliche Axialkraft	N
M_b	Biegemoment	Nmm
S_m	Spannungsvergleichswert	N/mm²

(2) Die Festigkeitsberechnung hat die Untersuchung des schwächsten Querschnittes zum Ziel (Schnitt I-I oder II-II in **Bild A 4.4-1**). Gleichzeitig werden die wichtigsten Hauptabmessungen des Verschlusses nach elementaren Verfahren berechnet, z. B. der in die Nut eingelegte geteilte Ring R. Bei von **Bild A 4.4-1** abweichenden geometrischen Verhältnissen dürfen die nachstehenden Formeln sinngemäß angewendet werden.

(3) Die gleichmäßig über den Umfang verteilte Axialkraft errechnet sich aus:

$$F_B = p \cdot \frac{\pi}{4} d_0^{\,2} + F_Z \qquad \text{(A 4.4-1)}$$

F_Z ist eine zusätzliche, gleichgerichtete Axialkraft (Gleichung A 4.4-3 bis A 4.4-8 über Verschlussstück eingeleitet; Gleichung A 4.4-9 und A 4.4-10 über Gehäuse eingeleitete Zusatzlasten, z. B. Axialkraft, Biegemoment). Im Falle eines Biegemomentes und einer Axialkraft wird F_Z folgendermaßen bestimmt:

$$F_Z = F_{ax} + \frac{4 \cdot M_B}{d_1 + s_1} \qquad \text{(A 4.4-2)}$$

(4) Die Mindestbreite der Druckflächen an der Auflagerstelle und am Distanzring ergeben sich unter Berücksichtigung der Reibungsverhältnisse und der Dichtungsanforderungen zu:

$$a, b \geq \frac{F_B}{1{,}5 \cdot \pi \cdot d_0 \cdot S_m} \qquad \text{(A 4.4-3)}$$

(5) Die Mindesthöhe des Einlegeringes R ergibt sich aus der Berechnung auf Abscheren und auf Biegung. Der dabei erhaltene größte Wert ist einzusetzen.

Hinsichtlich Abscheren gilt:

$$h_1 \geq \frac{2 \cdot F_B}{\pi \cdot d_0 \cdot S_m} \qquad \text{(A 4.4-4)}$$

Hinsichtlich Biegung gilt:

$$h_1 \geq 1{,}38 \cdot \sqrt{\frac{F_B \cdot (a + b_D)/2}{d_0 \cdot S_m}} \qquad \text{(A 4.4-5)}$$

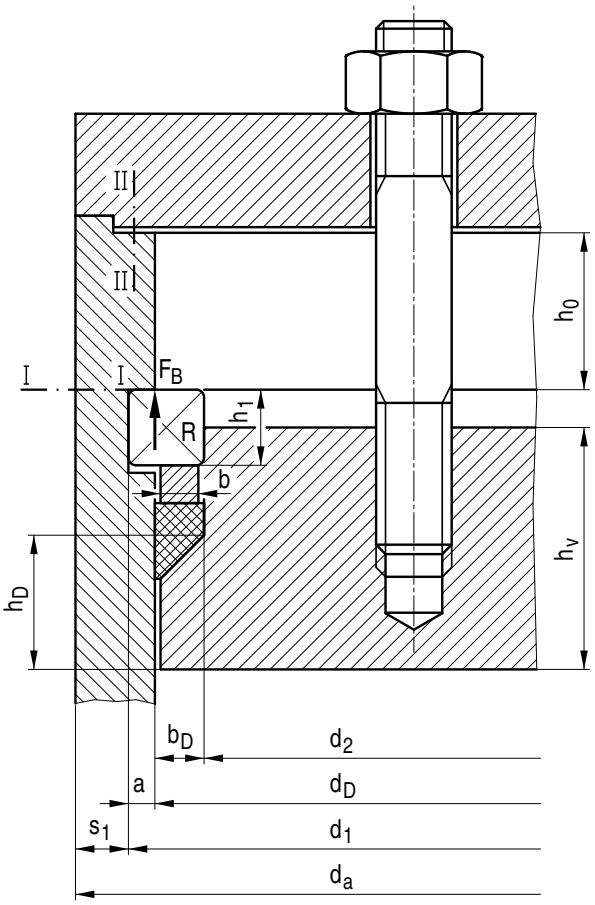


Bild A 4.4-1: Selbstdichtende Verschlüsse

(6) Die Mindestkopfhöhe der Auflagerleiste (Querschnitt II-II) ergibt sich aus der Berechnung auf Abscheren:

$$h_0 \geq \frac{2 \cdot F_B}{\pi \cdot d_1 \cdot S_m} \qquad \text{(A 4.4-6)}$$

und gegen Biegung

$$h_0 \geq 1{,}13 \cdot \sqrt{\frac{F_B \cdot a}{d_1 \cdot S_m}} \quad \text{mit} \quad a = \frac{d_1 - d_0}{2} \qquad \text{(A 4.4-7)}$$

(7) Für die Mindesthöhe der Dichtleiste gilt:

$$h_D \geq 1{,}13 \cdot \sqrt{\frac{F_B \cdot \frac{b_D}{2}}{d_2 \cdot S_m}} \qquad \text{(A 4.4-8)}$$

(8) Die Mindesthöhe des Verschlussdeckels h_v kann durch Idealisierung als frei aufliegende Kreisplatte oder Kreisringplatte (Fall 1, Fall 7 oder Fall 8 aus Tabelle 5 von DIN EN 12516-2) ermittelt werden.

(9) Festigkeitsbedingung für Schnitt I-I

$$F_B \cdot \left(a + \frac{s_1}{2}\right) \leq \frac{\pi}{4} \cdot \left[h_0^{\,2} \cdot (d_a - d_0) + (d_a - s_1) \cdot \left(s_1^{\,2} - s_2^{\,2}\right)\right] \cdot S_m \qquad \text{(A 4.4-9)}$$

und

$$s_2 = \frac{F_B}{\pi \cdot (d_a - s_1) \cdot S_m} \leq s_1 \qquad \text{(A 4.4-10)}$$

A 4.5 Armaturenflansche

Armaturenflansche werden nach Abschnitt A 2.10 berechnet.

A 5 Rohrleitungen

A 5.1 Allgemeines

(1) Die nachstehenden Berechnungsregeln gelten für die Dimensionierung einzelner Rohrleitungsbauteile bei Belastung durch inneren Überdruck, dessen Höhe sich aus dem Auslegungsdruck ergibt. Zusatzbelastungen, zum Beispiel äußere Kräfte und Momente sind gesondert zu erfassen und zu berücksichtigen, wobei für Rohrleitungsbauteile die in Abschnitt 8.5 enthaltenen Regelungen herangezogen werden können.

(2) Die Dimensionierungsregeln sind abhängig von der Prüfgruppe zusammengefasst im Abschnitt A 5.2 für die Prüfgruppe A1 sowie in Abschnitt A 5.3 für die Prüfgruppen A2 und A3. Die allgemeinen Berechnungsgrößen und Berechnungseinheiten sind im Absatz (5) aufgeführt. Weitere Berechnungsgrößen und Berechnungseinheiten sind in den einzelnen Abschnitten enthalten.

(3) Wird im Rahmen der Dimensionierung eine Nachrechnung von der mit der Nennwanddicke s_n ausgeführten Bauteilen durchgeführt, so ist innerhalb dieses Anhangs A 5 mit der Wanddicke $s_{0n} = s_n - c_1 - c_2$ zu rechnen.

(4) Die Bilder dieses Anhangs berücksichtigen nicht die Zuschläge.

(5) Berechnungsgrößen und Einheiten

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
b	Breite	mm
c	Zuschlag zur Wanddicke	mm
d	Durchmesser	mm
h	Höhe	mm
l	Länge	mm
p	Auslegungsdruck	MPa
p'	Prüfdruck	MPa
r, R	Radien	mm
s	Wanddicke	mm
s_0	rechnerisch erforderliche Wanddicke gemäß Bild 7.1-1	mm
s_{0n}	Nennwanddicke abzüglich der Zuschläge c_1 und c_2 gemäß Bild 7.1-1	mm
s_n	Nennwanddicke gemäß Bild 7.1-1	mm
v	Verschwächungsbeiwert	—
A	Fläche	mm^2
E	Elastizitätsmodul	N/mm^2
F	Kraft	N
I	Flächenträgheitsmoment	mm^4
M	Moment	N/mm
S	Sicherheitsbeiwert	—
φ	Winkel	Grad
q	Abflachung	mm
W	Widerstandsmoment	mm^3
U	Unrundheit	%
T	Temperatur	°C
ν	Querkontraktionszahl = 0,3 für Stahl	—
σ	Spannung	N/mm^2
σ_l	Spannung in Längsrichtung	N/mm^2
σ_r	Spannung in Radialrichtung	N/mm^2
σ_u	Spannung in Umfangsrichtung	N/mm^2
σ_V	Vergleichsspannung	N/mm^2
S_m	Schubspannungsvergleichswert	N/mm^2
τ	Schubspannung	N/mm^2

Zeichen	Bedeutung
Kopfzeiger ˆ	Maximalwert, z. B. $\hat{p}$
Kopfzeiger ˘	Minimalwert, z. B. $\breve{p}$
Kopfzeiger ¯	Mittelwert, z. B. $\bar{\sigma}$
Kopfzeiger ~	schwellend, z. B. $\tilde{\sigma}$
Kopfzeiger ´	zur Druckprüfung gehörend, z. B. p´
Fußzeiger	Zahlenindex, z. B. n_i

A 5.2 Prüfgruppe A1

A 5.2.1 Zylinderschalen unter innerem Überdruck

Die Berechnung erfolgt nach Abschnitt A 2.2.2.

A 5.2.2 Rohrbogen und Rohrbiegungen unter innerem Überdruck

A 5.2.2.1 Geltungsbereich

Die nachstehende Berechnung gilt für Bogen und Biegungen unter innerem Überdruck, bei denen das Verhältnis $d_a/d_i \leq 1{,}7$ ist. Durchmesserverhältnisse $d_a/d_i \leq 2$ sind zulässig, wenn die Wanddicke $s_{0n} \leq 80$ mm ist.

A 5.2.2.2 Zulässige Faltenbildung

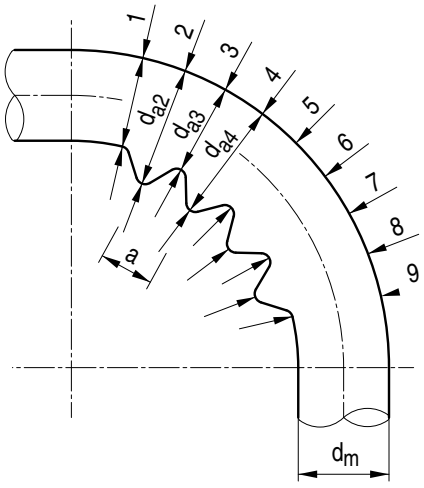


Bild A 5-1: Falten am Rohrbogen

Hinweis:
Die Falten in Bild A 5-1 sind der Deutlichkeit wegen überhöht dargestellt.

Falten, die in ihren Abmessungen die folgenden Bedingungen erfüllen, bedürfen keiner rechnerischen Nachprüfung:

a) Faltenhöhe

$$h_m = \frac{d_{a2} + d_{a4}}{2} - d_{a3} \leq 0{,}03 \cdot d_m \qquad \text{(A 5-1)}$$

b) Verhältnis Faltenabstand a zu Faltenhöhe h_m

$$\frac{a}{h_m} \geq 12 \qquad \text{(A 5-2)}$$

A 5.2.2.3 Berechnungsgrößen und Einheiten

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
d	mittlerer Durchmesser (siehe **Bild A 5-1**)	mm
d_i	innerer Durchmesser	mm
d_a	äußerer Durchmesser	mm
r, R	Radien	mm
s	Wanddicke	mm
s_{0i}	rechnerisch erforderliche Wanddicke der Bogeninnenseite	mm
s_{0a}	rechnerisch erforderliche Wanddicke der Bogenaußenseite	mm
B_i	Berechnungsbeiwert zur Ermittlung der Wanddicke der Bogeninnenseite	—
B_a	Berechnungsbeiwert zur Ermittlung der Wanddicke der Bogenaußenseite	—
$\overline{\sigma}_i$	mittlere Spannung an der Bogeninnenseite	N/mm²
$\overline{\sigma}_a$	mittlere Spannung an der Bogenaußenseite	N/mm²
h_m	Faltenhöhe	mm
a	Abstand zweier benachbarter Falten	mm

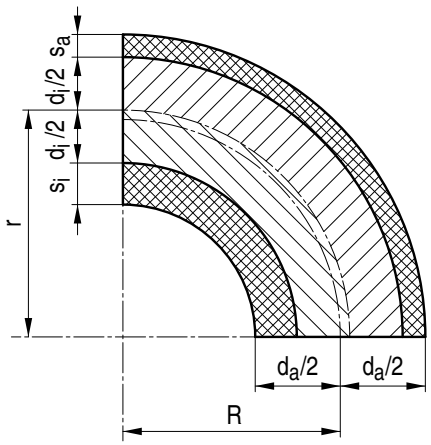


Bild A 5-2: Bezeichnungen am Rohrbogen

A 5.2.2.4 Berechnung

(1) Für die Wanddickenberechnung des Bogens oder der Biegung unter innerem Überdruck gelten die Anforderungen des Abschnitts A 2.2.2, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Beanspruchung an der Innenseite um den Berechnungsbeiwert B_i größer und an der Außenseite um B_a kleiner ist als bei den geraden Zylinderschalen.

(2) Die rechnerisch erforderliche Wanddicke an der Bogeninnenseite ergibt sich aus:

$$s_{0i} = s_0 \cdot B_i \qquad \text{(A 5-3)}$$

(3) Die rechnerisch erforderliche Wanddicke an der Bogenaußenseite ergibt sich aus:

$$s_{0a} = s_0 \cdot B_a \qquad \text{(A 5-4)}$$

(4) Ermittlung des Berechnungsbeiwerts B_i

Für Bogen und Biegung mit vorgegebenem Innendurchmesser gilt:

$$B_i = \frac{r}{s_0} - \frac{d_i}{2\cdot s_0} - \sqrt{\left(\frac{r}{s_0} - \frac{d_i}{2\cdot s_0}\right)^2 - 2\cdot\frac{r}{s_0} + \frac{d_i}{2\cdot s_0}} \qquad \text{(A 5-5)}$$

Der Berechnungsbeiwert B_i darf auch in Abhängigkeit von r/d_i und s_0/d_i aus **Bild A 5-3** entnommen werden.

Für Bogen und Biegung mit vorgegebenem Außendurchmesser gilt:

$$B_i = \frac{d_a}{2\cdot s_0} + \frac{r}{s_0} - \left(\frac{d_a}{2\cdot s_0} + \frac{r}{s_0} - 1\right)\cdot\sqrt{\frac{\left(\frac{r}{s_0}\right)^2 - \left(\frac{d_a}{2\cdot s_0}\right)^2}{\left(\frac{r}{s_0}\right)^2 - \frac{d_a}{2\cdot s_0}\cdot\left(\frac{d_a}{2\cdot s_0} - 1\right)}} \qquad \text{(A 5-6)}$$

Der Berechnungsbeiwert B_i darf auch in Abhängigkeit von R/d_a und s_0/d_a aus **Bild A 5-4** entnommen werden.

(5) Ermittlung des Berechnungsbeiwertes B_a

Für Bogen und Biegung mit vorgegebenem Innendurchmesser gilt:

$$B_a = \sqrt{\left(\frac{r}{s_0} + \frac{d_i}{2\cdot s_0}\right)^2 + 2\cdot\frac{r}{s_0} + \frac{d_i}{2\cdot s_0}} - \frac{d_i}{2\cdot s_0} - \frac{r}{s_0} \qquad \text{(A 5-7)}$$

Der Berechnungsbeiwert B_a darf auch in Abhängigkeit von r/d_i und s_0/d_i aus **Bild A 5-5** entnommen werden.

Für Bogen und Biegung mit vorgegebenem Außendurchmesser gilt:

$$B_a = \frac{d_a}{2\cdot s_0} - \frac{r}{s_0} - \left(\frac{d_a}{2\cdot s_0} - \frac{r}{s_0} - 1\right)\cdot\sqrt{\frac{\left(\frac{r}{s_0}\right)^2 - \left(\frac{d_a}{2\cdot s_0}\right)^2}{\left(\frac{r}{s_0}\right)^2 - \frac{d_a}{2\cdot s_0}\cdot\left(\frac{d_a}{2\cdot s_0} - 1\right)}} \qquad \text{(A 5-8)}$$

Der Berechnungsbeiwert B_a kann in Abhängigkeit von R/d_a und s_0/d_a aus **Bild A 5-6** entnommen werden.

(6) Berechnung der Spannungen

In den Gleichungen (A 5-9) bis (A 5-12) sind entweder die Nenndurchmesser d_{an} und d_{in} in Verbindung mit den Wanddicken s_{0na} und s_{0ni} oder ausgeführte Durchmesser in Verbindung mit ausgeführten Wanddicken abzüglich der Zuschläge c_1 und c_2 zu verwenden.

Die Festigkeitsbedingung für die Bogeninnenseite bei vorgegebenem Innendurchmesser lautet:

$$\overline{\sigma}_i = \frac{p\cdot d_i}{2\cdot s_{0i}}\cdot\frac{2\cdot r - 0{,}5\cdot d_i}{2\cdot r - d_i - s_{0i}} + \frac{p}{2} \le S_m \qquad \text{(A 5-9)}$$

Die Festigkeitsbedingung für die Bogeninnenseite bei vorgegebenem Außendurchmesser lautet:

$$\overline{\sigma}_i = \frac{p\cdot(d_a - s_{0i} - s_{0a})}{2\cdot s_{0i}}\cdot\frac{2\cdot R - 0{,}5\cdot d_a + 1{,}5\cdot s_{0i} - 0{,}5\cdot s_{0a}}{2\cdot R - d_a + s_{0i}} + \frac{p}{2} \le S_m \qquad \text{(A 5-10)}$$

Die Festigkeitsbedingung für die Bogenaußenseite bei vorgegebenem Innendurchmesser lautet:

$$\overline{\sigma}_a = \frac{p\cdot d_i}{2\cdot s_{0a}}\cdot\frac{2\cdot r + 0{,}5\cdot d_i}{2\cdot r + d_i + s_{0a}} + \frac{p}{2} \le S_m \qquad \text{(A 5-11)}$$

Die Festigkeitsbedingung für die Bogenaußenseite bei vorgegebenem Außendurchmesser lautet:

$$\overline{\sigma}_a = \frac{p\cdot(d_a - s_{0i} - s_{0a})}{2\cdot s_{0a}}\cdot\frac{2\cdot R + 0{,}5\cdot d_a + 1{,}5\cdot s_{0i} - 1{,}5\cdot s_{0a}}{2\cdot R + d_a - s_{0a}} + \frac{p}{2} \le S_m \qquad \text{(A 5-12)}$$

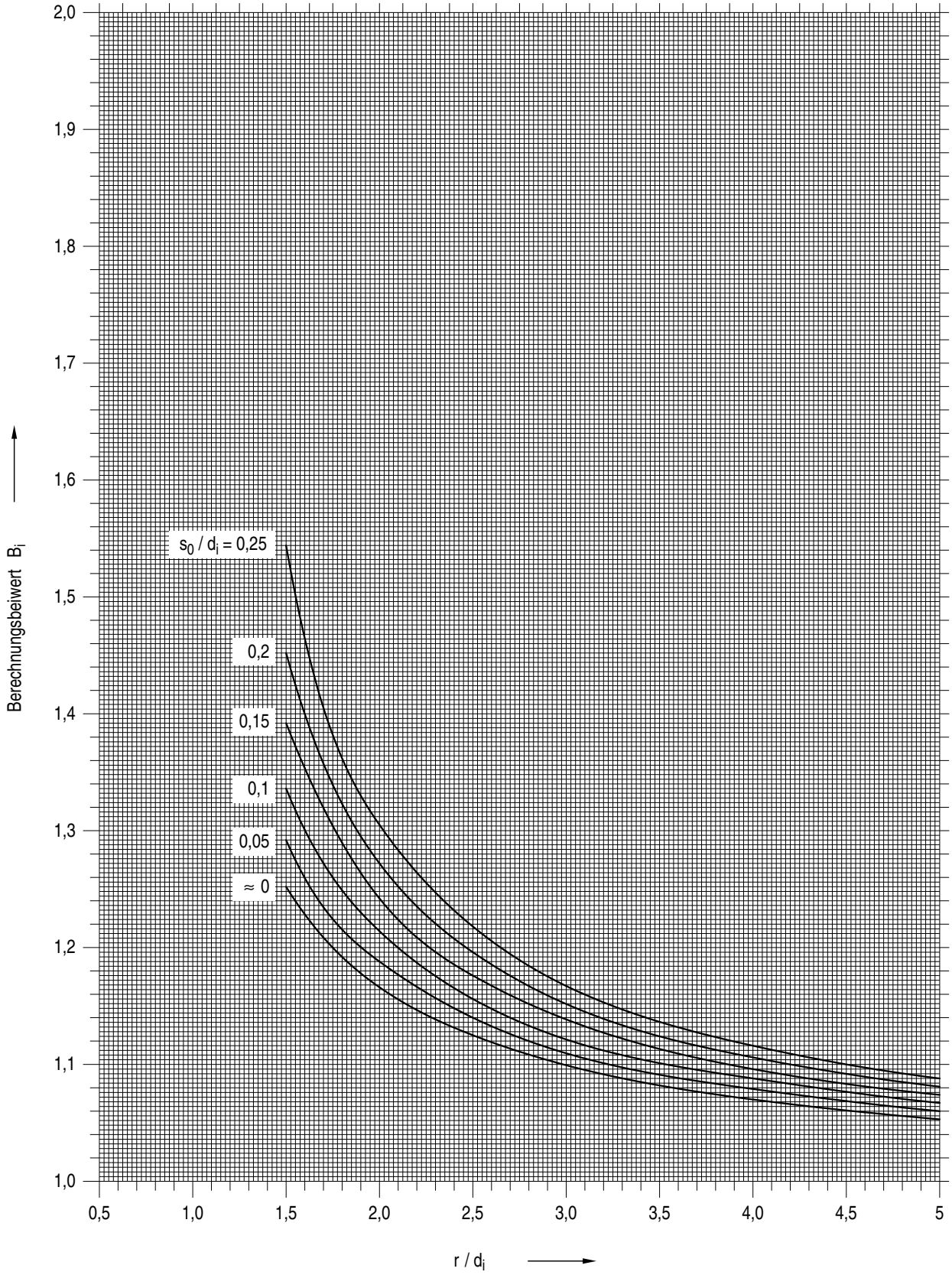


Bild A 5-3: Berechnungsbeiwert B_i für die Bogeninnenseite bei vorgegebenem Innendurchmesser

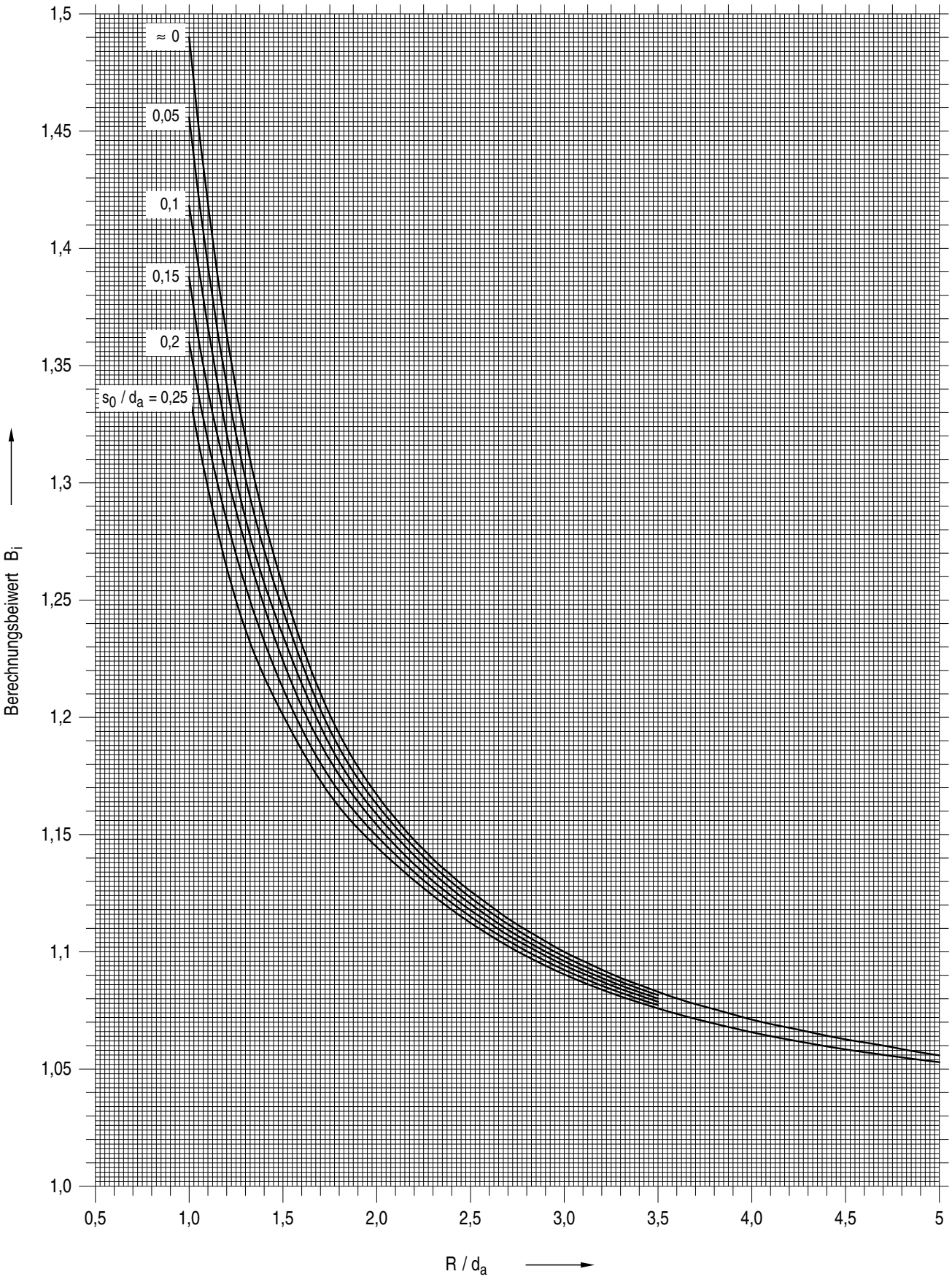


Bild A 5-4: Berechnungsbeiwert B_i für die Bogeninnenseite bei vorgegebenem Außendurchmesser

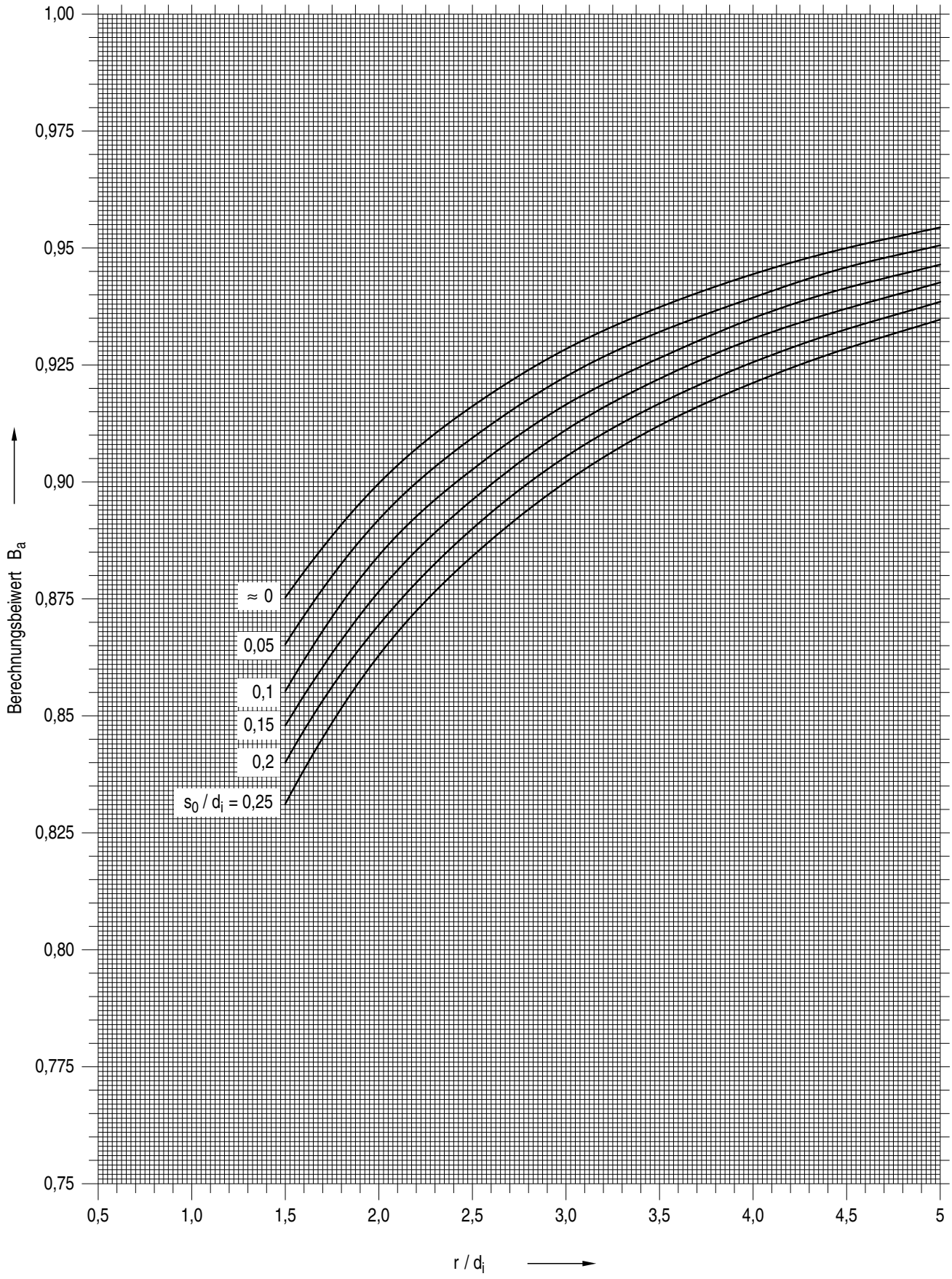


Bild A 5-5: Berechnungsbeiwert B_a für die Bogenaußenseite bei vorgegebenem Innendurchmesser

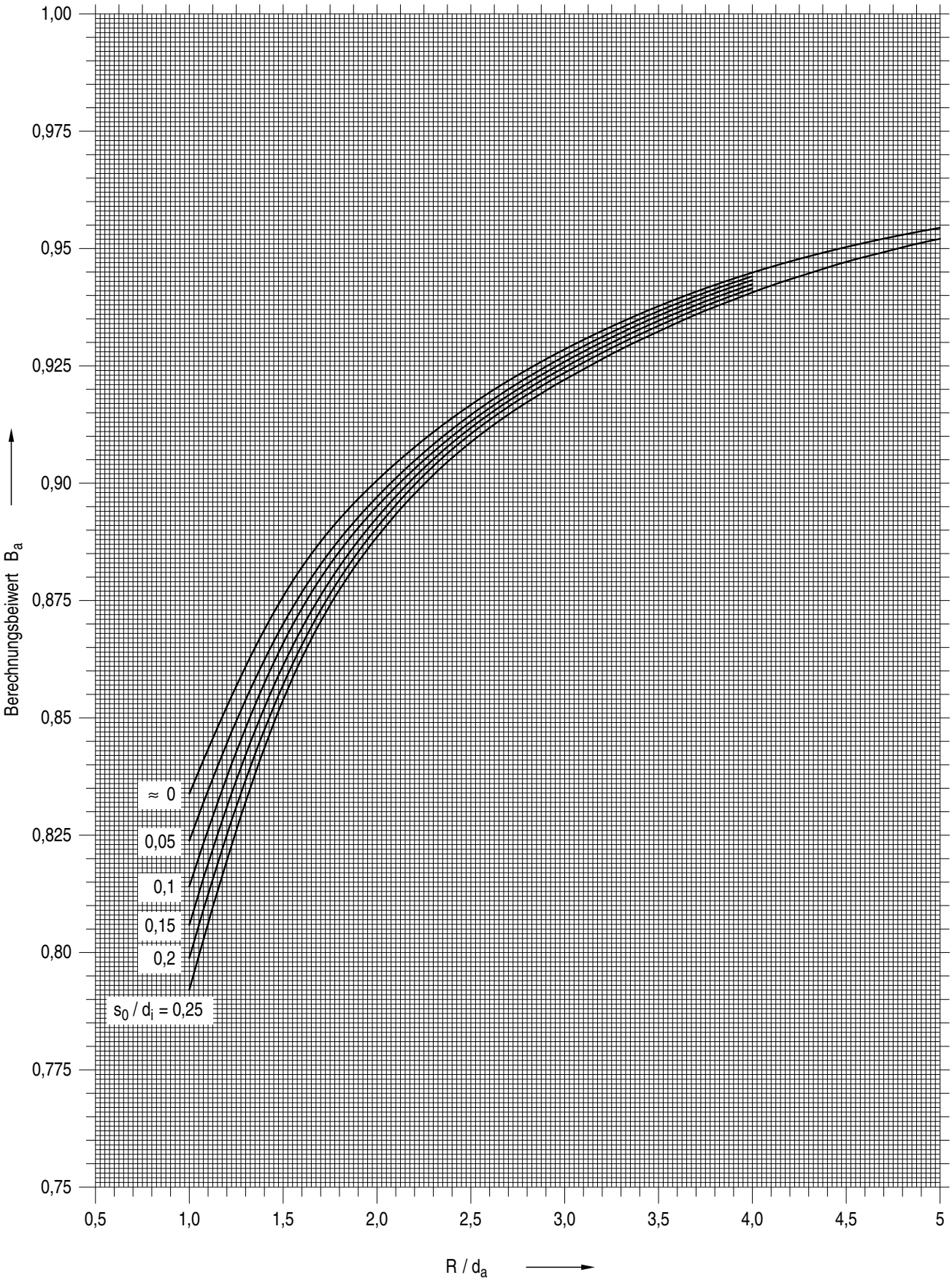


Bild A 5-6: Berechnungsbeiwert B_a für die Bogenaußenseite bei vorgegebenem Außendurchmesser

A 5.2.3 Reduzierstücke

Die Berechnung erfolgt nach den Festlegungen des Abschnitts A 2.4.2.

A 5.2.4 Einschweiß-T-Stücke

A 5.2.4.1 Aus dem Vollen geschmiedete Einschweiß-T-Stücke

A 5.2.4.1.1 Geltungsbereich

(1) Diese Berechnungsregeln gelten für aus dem Vollen geschmiedete, gebohrte und gedrehte Einschweiß-T-Stücke kleiner als oder gleich DN 100. Sie berücksichtigen nur die durch Innendruck hervorgerufenen Beanspruchungen. Zusätzliche Kräfte und Momente müssen gesondert berücksichtigt werden.

(2) Die Maße a und b dürfen die in DIN EN 10253-2 und DIN EN 10253-4 angegebenen Werte für F und G nicht unterschreiten.

(3) Der äußere Rundungsradius r_2 muss mindestens $0{,}1 \cdot d_{Aa}$ betragen.

(4) Ein Wanddickenverhältnis s_A/s_H ist bis maximal 2 zulässig für d_{Ai} kleiner als oder gleich 50 mm. Dies gilt auch für Abzweige mit d_{Ai} größer als 50 mm, sofern das Durchmesserverhältnis d_{Ai}/d_{Hi} kleiner als oder gleich 0,2 ist. Bei Abzweigen mit einem Durchmesserverhältnis d_{Ai}/d_{Hi} größer als 0,2 soll s_A/s_H grundsätzlich den Wert 1,3 nicht überschreiten. Größere Werte sind erlaubt, wenn

a) die über vorgenanntes Wanddickenverhältnis hinausgehende zusätzliche Wanddicke des Stutzens nicht zur Verstärkung des Stutzenausschnittes herangezogen, sondern aus konstruktiven Gründen gewählt wird

oder

b) der Stutzen mit verkürztem Verstärkungsbereich ausgeführt wird (z. B. Stutzen, die aus Gründen der verbesserten Prüfbarkeit des Rohrleitungsanschlusses konisch ausgebildet sind), wobei die durch die verkürzte Einflusslänge fehlende Verstärkungsfläche im verkürzten Einflussbereich zusätzlich untergebracht werden darf

oder

c) das Verhältnis von Stutzendurchmesser zum Durchmesser des Grundkörpers kleiner als oder gleich 1:10 ist.

A 5.2.4.1.2 Allgemeines

Die Verschwächung des Grundkörpers darf durch Wanddickenvergrößerung der hoch beanspruchten Zone im Ausschnittbereich (siehe **Bild A 5-7**), wie es durch Schmieden und spanabhebende Bearbeitung erfolgen kann, ausgeglichen werden.

A 5.2.4.1.3 Berechnungsgrößen und Einheiten

Berechnungsgrößen und Einheiten siehe Abschnitt A 5.2.5.3 und **Bild A 5-7**. Zusätzlich gilt:

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
d_{Ha}	Außennenndurchmesser für Durchgangsanschluss	mm
d_{Aa}	Außennenndurchmesser für Abzweiganschluss	mm
s_1	Nennwanddicke für Durchgangsanschluss	mm
s_2	Nennwanddicke für Abzweiganschluss	mm
s_A^+	Äquivalente Wanddicke für Abzweiganschluss	mm
s_H^+	Äquivalente Wanddicke für Durchgangsanschluss	mm
p^+	zulässiger Innendruck des T-Stückes	N/mm²

A 5.2.4.1.4 Berechnung

(1) Für die Berechnung der mittragenden Längen des Grundkörpers und des Abzweiges gilt der Abschnitt A 5.2.5.4.2.

(2) Die Ermittlung der erforderlichen Verstärkungsfläche muss nach Abschnitt A 5.2.5.4.1 erfolgen.

A 5.2.4.1.5 Äquivalente Anschlusswanddicken

Die für die Spannungsanalyse nach Abschnitt 8.5 benötigten äquivalenten Anschlusswanddicken s_H^+ und s_A^+ sind als diejenigen Wanddicken definiert, die sich für Rohre mit den Außendurchmessern d_{Ha} und d_{Aa} ergeben, wenn sie mit dem für das T-Stück als zulässig ermittelten Innendruck p^+ dimensioniert werden. Es gilt demnach:

$$s_H^+ = \frac{p^+ \cdot d_{Ha}}{2 \cdot S_m + p} \qquad \text{(A 5-13)}$$

$$s_A^+ = s_H^+ \cdot d_{Aa} / d_{Ha} \qquad \text{(A 5-14)}$$

Vereinfachend kann $p^+ = p$ gesetzt werden.

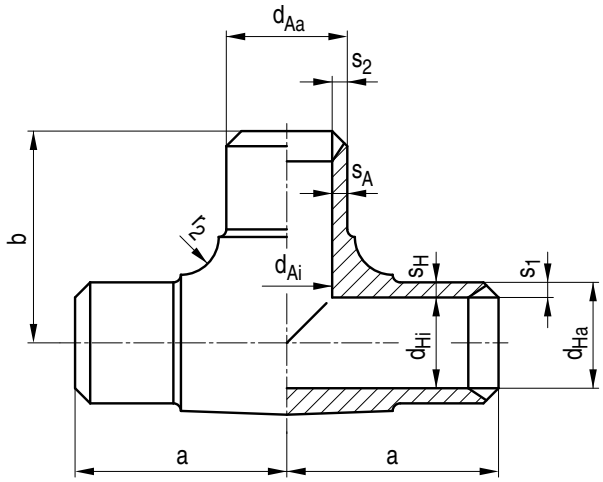


Bild A 5-7: Abzweigstück aus dem Vollen geschmiedet, gebohrt und gedreht

A 5.2.4.2 Gesenkgepresste Einschweiß-T-Stücke

A 5.2.4.2.1 Geltungsbereich

(1) Diese Berechnungsregeln gelten für nahtlose T-Stücke, die durch Pressen im Gesenk aus nahtlosen, gewalzten oder geschmiedeten Rohren hergestellt werden (siehe **Bild A 5-8**).

(2) Die Maße a und b dürfen die in DIN EN 10253-2 und DIN EN 10253-4 angegebenen Werte für F und G nicht unterschreiten. Für T-Stücke mit Nennweiten größer als DN 300 gelten für die Maße a und b die nachfolgenden Gleichungen:

$$a \geq 0{,}75\ d_{Ha} \qquad \text{(A 5-15)}$$

und

$$b \geq 0{,}5\ d_{Ha} + 0{,}25\ d_{Aa} \qquad \text{(A 5-16)}$$

(3) Der äußere Rundungsradius r_2 muss mindestens $0{,}1 \cdot d_{Aa}$ betragen.

(4) Die Wanddicke soll an keiner Stelle des T-Stückes mehr als das Doppelte und nicht weniger als das 0,875fache der

Anschlussnennwanddicke s_1 betragen. Lediglich am Abzweiganschluss darf die Wanddicke über eine maximale Länge von $2 \cdot s_2$ auf den Wert $0{,}875 \cdot s_2$ absinken.

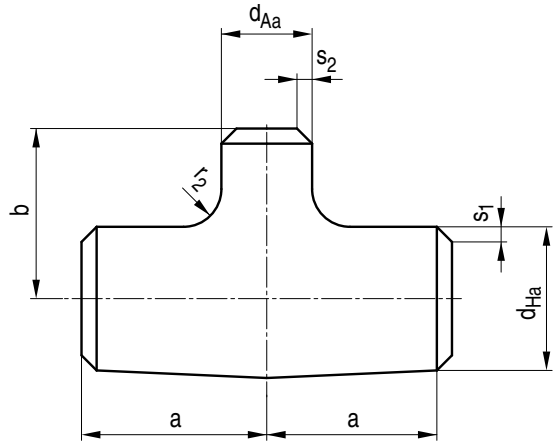


Bild A 5-8: Gepresstes Einschweiß-T-Stück

A 5.2.4.2.2 Berechnungsgrößen und Einheiten

Berechnungsgrößen und Einheiten siehe Abschnitt A 5.2.5.3 und **Bild A 5-8**. Zusätzlich gilt:

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
A_p	drucktragende Flächen entsprechend **Bild A 5-9**	mm^2
A_σ	tragende Querschnittflächen entsprechend Bild A 5-9 nach Abzug der Wanddicke	mm^2
d_{Ha}	Außennenndurchmesser für Durchgangsanschluss	mm^2
d_{Aa}	Außennenndurchmesser für Abzweiganschluss	mm
s_H^+	Äquivalente Wanddicke für Durchgangsanschluss	mm
s_A^+	Äquivalente Wanddicke für Abzweiganschluss	mm
s_1	Nennwanddicke für Durchgangsanschluss	mm
s_2	Nennwanddicke für Abzweiganschluss	mm
α	Winkel entsprechend **Bild A 5-9**	Grad

A 5.2.4.2.3 Berechnung

(1) Mit e_H als größtem Wert von

$$e_H = d_{Ai} \quad \text{(A 5-17)}$$

$$e_H = 0{,}5 \cdot d_{Ai} + s_H + s_A \quad \text{(A 5-18)}$$

$$e_H = 0{,}5 \cdot d_{Ai} + s_A + r_2\,(1 - \sin\alpha) \quad \text{(A 5-19)}$$

jedoch maximal $e_H = a$, und mit e_A als größerem Wert von

$$e_A = 0{,}5 \cdot \left(\sqrt{0{,}5 \cdot d_{Am} \cdot s_A} + r_2\right) \quad \text{(A 5-20)}$$

$$e_A = r_2 \cdot \cos\alpha \quad \text{(A 5-21)}$$

jedoch maximal

$$e_A = b - (r_2 + s_H) \cdot \cos\alpha - 0{,}5 \cdot d_{Hi} \quad \text{(A 5-22)}$$

ist die Bedingung

$$\sigma_v \le p \cdot \left(\frac{A_{p1} / \cos\alpha + A_{p2} + A_{p3} + A_{p4}}{A_\sigma} + 0{,}5 \right) \le S_m \quad \text{(A 5-23)}$$

einzuhalten.

(2) Mit e'_H, als größtem Wert von

$$e'_H = 0{,}5 \cdot \left(d_{Ai} + \sqrt{0{,}5 \cdot d_{Hm} \cdot s_H}\right) \quad \text{(A 5-24)}$$

$$e'_H = 0{,}5 \cdot d_{Ai} + \frac{2}{3} \cdot (s_H + s_A) \quad \text{(A 5-25)}$$

$$e'_H = 0{,}5 \cdot d_{Ai} + s_A + r_2 \cdot (1 - \sin\alpha) \quad \text{(A 5-26)}$$

jedoch maximal $e'_H = a$, und mit e_A wie vor ist zusätzlich die Bedingung

$$\sigma'_V \le p \cdot \left(\frac{A'_{p1} / \cos\alpha + \frac{2}{3} \cdot A_{p2} + A_{p3} + A_{p4}}{A'_\sigma} + 0{,}5 \right) \le S_m \quad \text{(A 5-27)}$$

zu erfüllen.

Die Flächen A_p und A_σ sind in **Bild A 5-9** dargestellt.

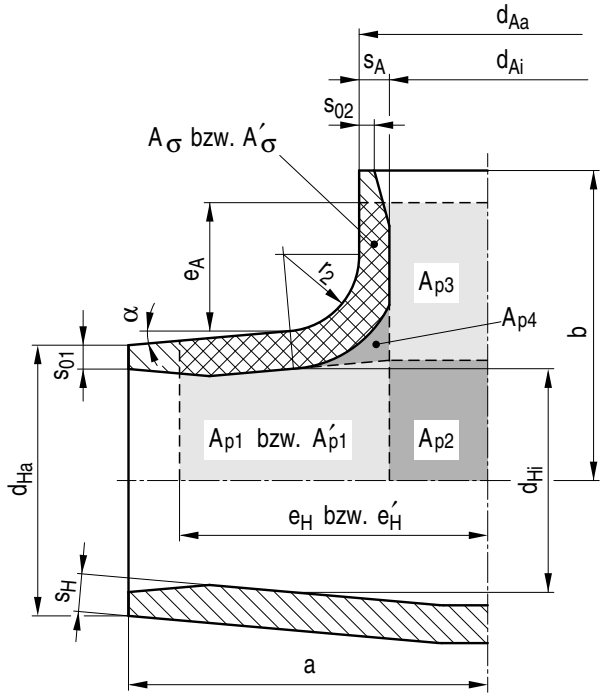


Bild A 5-9: Dimensionierungsflächen für Einschweiß-T-Stück

A 5.2.4.2.4 Äquivalente Anschlusswanddicken

(1) Die für die Spannungsanalyse nach Abschnitt 8.5 benötigten äquivalenten Anschlusswanddicken s_H^+ und s_A^+ ergeben sich mit S als größerem Wert von σ_V und σ'_V, (siehe Abschnitt A 5.2.4.2.3) zu

$$s_H^+ = \frac{p \cdot d_{Ha}}{2 \cdot S + p} \quad \text{(A 5-28)}$$

$$s_A^+ = \frac{p \cdot d_{Aa}}{2 \cdot S + p} = s_H^+ \cdot \frac{d_{Aa}}{d_{Ha}} \quad \text{(A 5-29)}$$

(2) Da bedingungsgemäß S kleiner als oder gleich S_m ist, können s_H^+ und s_A^+ auch mit S_m statt S ermittelt werden.

A 5.2.5 Ausschnittverstärkungen in Rohrleitungen

A 5.2.5.1 Geltungsbereich

(1) Der Geltungsbereich der nachstehenden Berechnungsregeln ist der unter Abschnitt A 2.2.2.1 aufgeführte Bereich.

(2) Die Berechnungsregeln berücksichtigen die durch inneren Überdruck hervorgerufenen Beanspruchungen. Zusätzli-

che Kräfte und Momente müssen gesondert berücksichtigt werden.

A 5.2.5.2 Allgemeines

(1) Ausschnitte sollen rund oder elliptisch sein. Weitere Anforderungen ergeben sich bei Anwendung der Spannungsbeiwerte nach Abschnitt 8.5.

(2) Der Winkel β (siehe **Bild A 2.8-8**) zwischen Stutzenachse und Grundkörperachse soll nicht kleiner als 60 Grad oder größer als 120 Grad sein.

(3) Die Verstärkung eines Ausschnittes in einer Hauptleitung darf wie folgt vorgenommen werden:

a) durch Wahl einer größeren Wanddicke für die Hauptleitung, als es für die unverschwächte Hauptleitung erforderlich wäre. Diese Wanddicke muss mindestens bis zu einer Länge e_H, von der Ausschnittsachse gemessen, vorhanden sein.

b) Durch Abzweige, die auf einer Länge e_A, von der Außenwand des Grundkörpers gemessen, dickwandiger ausgeführt sind als es für die Innendruckbelastung erforderlich wäre. Der als Verstärkung erforderliche Werkstoff ist gleichmäßig auf den Umfang des Abzweigs zu verteilen.

c) Durch Kombination der unter a) und b) aufgeführten Maßnahmen.

Im Hinblick auf eine beanspruchungsgerechte Formgebung ist die Ausführung c) zu bevorzugen.

(4) Bei mehreren benachbarten Ausschnitten sind die Bedingungen für Verstärkungsflächen für alle Schnittebenen, die durch die Mitte des Ausschnitts und senkrecht zur Oberfläche der Hauptleitung gehen, zu erfüllen.

(5) Bei der Verstärkung eines Ausschnittes sind folgende Durchmesser- und Wanddickenverhältnisse einzuhalten:

Ein Wanddickenverhältnis s_A/s_H ist bis maximal 2 zulässig für d_{Ai} kleiner als oder gleich 50 mm. Dies gilt auch für Abzweige mit d_{Ai} größer als 50 mm, sofern das Durchmesserverhältnis d_{Ai}/d_{Hi} kleiner als oder gleich 0,2 ist. Bei Abzweigen mit einem Durchmesserverhältnis d_{Ai}/d_{Hi} größer als 0,2 soll s_A/s_H grundsätzlich den Wert 1,3 nicht überschreiten. Größere Werte sind erlaubt, wenn

a) die über vorgenanntes Wanddickenverhältnis hinausgehende, zusätzliche Wanddicke des Abzweigs nicht zur Verstärkung des Stutzenausschnittes herangezogen, sondern aus konstruktiven Gründen gewählt wird oder

b) der Abzweig mit verkürztem Verstärkungsbereich ausgeführt wird (z. B. Abzweige, die aus Gründen der verbesserten Prüfbarkeit des Rohrleitungsanschlusses konisch ausgebildet sind), wobei die durch die verkürzte Einflusslänge fehlende Verstärkungsfläche im verkürzten Einflussbereich zusätzlich untergebracht werden darf oder

c) das Verhältnis von Abzweigdurchmesser zum Durchmesser der Hauptleitung kleiner oder gleich 1 : 10 ist.

(6) Eine Ausschnittverstärkung ist nicht erforderlich, und der Nachweis für Ausschnitte nach A 5.2.5.4 muss nicht geführt werden, falls

a) ein einzelner Ausschnitt einen Durchmesser hat, der gleich oder kleiner $2{,}5 \cdot \sqrt{0{,}5 \cdot d_{Hm} \cdot s_H}$ ist, oder wenn zwei oder mehrere Ausschnitte innerhalb eines Kreises mit dem Durchmesser $2{,}5 \cdot \sqrt{0{,}5 \cdot d_{Hm} \cdot s_H}$ angeordnet sind, wobei eine Summe der Durchmesser solcher unverstärkten Ausschnitte den Wert von $0{,}25 \cdot \sqrt{0{,}5 \cdot d_{Hm} \cdot s_H}$ nicht überschreiten darf, und

b) zwei unverstärkte Ausschnitte keine kleineren Mittenabstände, gemessen auf der Innenseite der Hauptleitung, aufweisen als die Summe ihrer Durchmesser, und

c) die Mitte eines unverstärkten Ausschnitts nicht näher als $2{,}5 \cdot \sqrt{0{,}5 \cdot d_{Hm} \cdot s_H}$ vom Rand einer geometrischen Störstelle entfernt liegt.

Hinweis:
Definition eines örtlich beanspruchten Bereichs siehe Abschnitt 7.7.2.2.

(7) Bestehen Hauptleitung und Abzweig aus Werkstoffen unterschiedlicher zulässiger Spannung, so ist, wenn der Werkstoff der Hauptleitung die kleinere zulässige Spannung aufweist, diese für die Berechnung der gesamten Konstruktion maßgebend.

Wenn der Abzweigwerkstoff eine geringere zu lässige Spannung aufweist, so sind die im Bereich der geringeren zulässigen Spannungen anzuordnenden Verstärkungsflächen im Verhältnis der zulässigen Spannungen zu vergrößern.

Haben Hauptleitungswerkstoff und Abzweigwerkstoff unterschiedliche spezifizierte Wärmedehnungszahlen, so darf ihre Differenz 15 % der Wärmedehnungszahl des Hauptleitungswerkstoffs nicht überschreiten.

A 5.2.5.3 Berechnungsgrößen und Einheiten

(siehe auch die Bilder A 2.8-2 bis A 2.8-11 und A 5-10 bis A 5-13)

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
d_{Ai}	Innendurchmesser des Ausschnitts zuzüglich des doppelten Korrosionszuschlages c_2	mm
d_{Am}	mittlerer Durchmesser des Abzweigs	mm
d_{Hi}	Innendurchmesser der Hauptleitung	mm
d_{Hm}	mittlerer Durchmesser der Hauptleitung	mm
d_n	Nenndurchmesser des konischen Abzweigs	mm
r_1	Innenradius zwischen Abzweig und Hauptleitung	mm
r_2	Mindestradius gemäß Abschnitt 5.2.6	mm
s_A	Nennwanddicke des Abzweigs mit Berücksichtigung der Verstärkung, jedoch abzüglich der Zuschläge c_1 und c_2	mm
s_{A0}	rechnerisch erforderliche Wanddicke des Abzweigs	mm
s_H	Nennwanddicke der Hauptleitung mit Berücksichtigung der Verstärkung, jedoch abzüglich der Zuschläge c_1 und c_2	mm
s_{H0}	rechnerisch erforderliche Wanddicke der Hauptleitung	mm
s_R	Nennwanddicke der Abzweigleitung abzüglich der Zuschläge c_1 und c_2	mm
s_{R0}	rechnerisch erforderliche Wanddicke der Abzweigleitung	mm
α	Neigungswinkel (siehe auch die Bilder A 5-10, A 5-11 und A 5-13)	grd
y	Maß bei kegeligem Ansatz	mm

Die folgenden Bezeichnungen gehen aus den **Bildern A 2.8-8** und **A 2.8-9** hervor.

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
A_1, A_2, A_3	für Ausschnittsverstärkungen nutzbare Werkstoffflächen	mm^2
e_A	Grenze der Verstärkung senkrecht zur Wand der Hauptleitung	mm
e_H	halbe Breite des Verstärkungsbereichs, längs der Mittelebene der Hauptleitung gemessen	mm

Formel-zeichen	Berechnungsgröße	Einheit
e'_H	halbe Breite des Bereichs, in dem 2/3 der Verstärkung liegen sollen	mm
β	Winkel zwischen den Achsen des Abzweigs und der Hauptleitung	Grad

A 5.2.5.4 Berechnung

A 5.2.5.4.1 Erforderliche Verstärkung

(1) Die gesamte Querschnittsfläche A einer Verstärkung, die in jeder Ebene für ein Rohr unter Innendruck erforderlich ist, muss der folgenden Bedingung genügen:

$$A \geq d_{Ai} \cdot s_{H0} \cdot (2\text{-}\sin\beta) \qquad \text{(A 5-30)}$$

(2) Mindestens die Hälfte der erforderlichen Verstärkungsfläche muss auf jeder Seite der Stutzenachse vorhanden sein.

A 5.2.5.4.2 Zulässige mittragende Längen

(1) Vorhandene Radien oder Abschrägungen am Übergang Stutzen/Grundschale gemäß Abschnitt 5.2.6 dürfen in der Gleichung (A 5-35) bei der Ermittlung der mittragenden Länge mit berücksichtigt werden.

(2) Die mittragende Länge der Hauptleitung ist wie folgt zu ermitteln:

$$e_H = d_{Ai} \qquad \text{(A 5-31)}$$

oder

$$e_H = 0{,}5 \cdot d_{Ai} + s_H + s_A \qquad \text{(A 5-32)}$$

Der größere der beiden Werte ist der Berechnung zugrunde zu legen. Zusätzlich gilt, dass 2/3 der Verstärkungsfläche innerhalb eines Bereiches der Länge $2 \cdot e'_H$ liegen müssen (**Bilder A 2.8-8** und **A 2.8-9**), wobei e'_H der größere Wert ist von

$$e'_H = 0{,}5 \cdot [d_{Ai} + (0{,}5 \cdot d_{Hm} \cdot s_H)^{1/2}] \qquad \text{(A 5-33)}$$

und

$$e'_H = 0{,}5 \cdot d_{Ai} + s_A/\sin\beta + s_H \qquad \text{(A 5-34)}$$

(2) Die mittragende Länge des zylindrischen Abzweigs ist wie folgt zu ermitteln:

$$e_A = 0{,}5 \cdot [(0{,}5 \cdot d_{Am} \cdot s_A)^{1/2} + r_2] \qquad \text{(A 5-35)}$$

worin

$$d_{Am} = d_{Ai} + s_A \qquad \text{(A 5-36)}$$

ist.

Siehe auch die **Bilder A 5-10, A 5-11, A 5-12**.

(3) Die mittragende Länge des konischen Abzweigs ist wie folgt zu ermitteln:

$$e_A = 0{,}5 \cdot (0{,}5 \cdot d_n \cdot s_A)^{1/2} \qquad \text{(A 5-37)}$$

worin

$$d_n = d_{Ai} + s_R + y \cdot \cos\alpha \qquad \text{(A 5-38)}$$

ist.

Siehe auch **Bild A 5-13**.

Für die Abzweige mit konischem Innendurchmesser ist d_n iterativ zu ermitteln.

A 5.2.5.4.3 Beanspruchungsschema für nutzbare Verstärkungsflächen

Die für die Erfüllung der Gleichung (A 5-30) nutzbaren Verstärkungsflächen A_1, A_2, A_3 sind in den **Bildern A 2.8-8** und **A 2.8-9** dargestellt; sie müssen die Bedingung $A_1 + A_2 + A_3$ größer als oder gleich A erfüllen.

A 5.2.6 Rohrleitungsflansche

Die Dimensionierung der Rohrleitungsflansche der Prüfgruppe A1 ist gemäß Abschnitt A 2.10 durchzuführen.

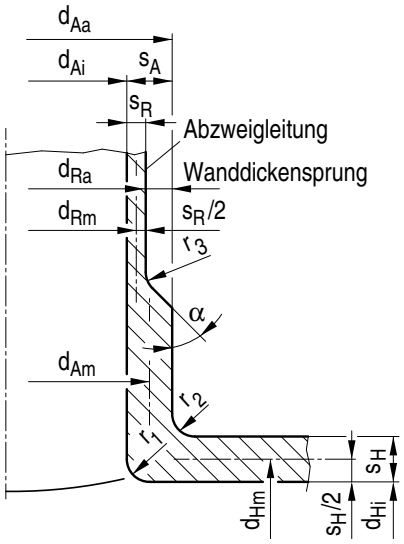


Bild A 5-10: Abzweig

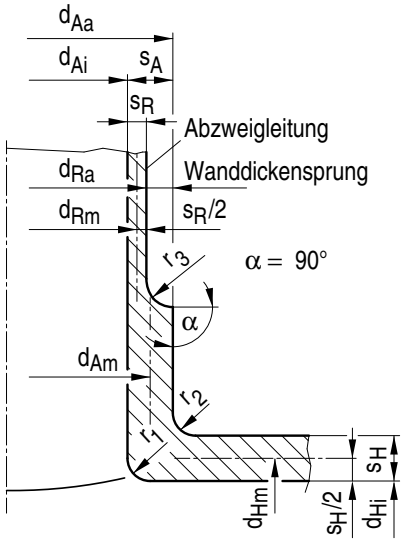


Bild A 5-11: Abzweig

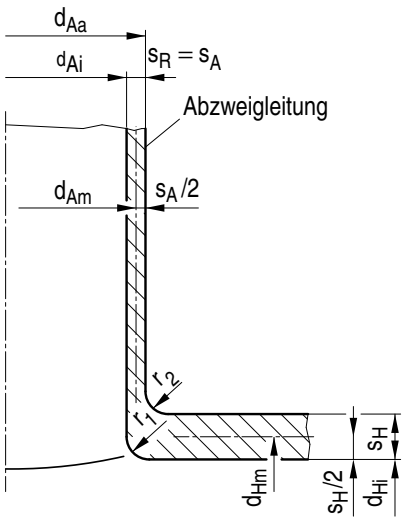


Bild A 5-12: Abzweig

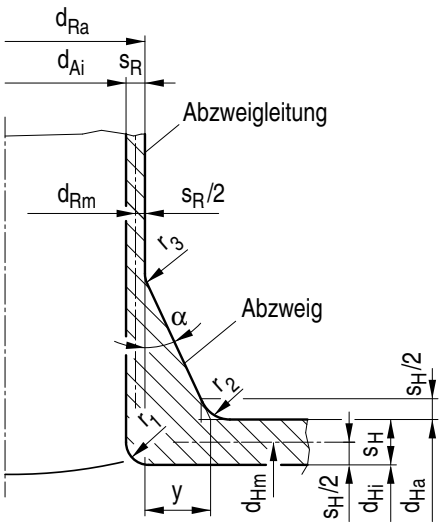


Bild A 5-13: Abzweig

A 5.3 Prüfgruppe A2 und A3

A 5.3.1 Zylinderschalen unter innerem Überdruck

Die Berechnung erfolgt nach den Regelungen in Abschnitt A 5.2.1, wobei anstelle von S_m der Spannungsvergleichswert S gemäß Abschnitt 6.7 in die Rechengleichung einzusetzen ist.

A 5.3.2 Rohrbogen und Rohrbiegungen unter innerem Überdruck

Die Berechnung erfolgt nach den Regelungen in Abschnitt A 5.2.2, wobei anstelle von S_m der Spannungsvergleichswert S gemäß Abschnitt 6.7 in die Rechengleichungen einzusetzen ist.

A 5.3.3 Reduzierstücke

Die Berechnung erfolgt nach den Festlegungen in Abschnitt A 2.4, wobei anstelle von S_m der Spannungsvergleichswert S gemäß Abschnitt 6.7 in die Gleichungen einzusetzen ist.

A 5.3.4 Geschmiedete Rohrleitungsformstücke

Die Regelungen des Abschnittes A 5.2.4 gelten auch für die Prüfgruppen A2 und A3.

A 5.3.5 Ausschnittverstärkungen in Rohrleitungen

A 5.3.5.1 Geltungsbereich

(1) Die nachstehende Berechnung gilt für Zylinderschalen unter innerem Überdruck, bei denen das Verhältnis d_a/d_i gleich oder kleiner als 1,7 ist. Durchmesserverhältnisse d_a/d_i gleich oder kleiner als 2 sind zulässig, wenn die Wanddicke s_0 gleich oder kleiner als 80 mm ist.

(2) Die Berechnungsregeln berücksichtigen die durch inneren Überdruck hervorgerufenen Beanspruchungen. Zusätzliche Kräfte und Momente müssen gesondert berücksichtigt werden.

A 5.3.5.2 Allgemeines

(1) Ausschnitte sollen rund oder elliptisch sein. Bei elliptischen Ausschnitten wird vorausgesetzt, dass das Verhältnis von großer Achse zu kleiner Achse 1,5 nicht übersteigt.

Zur Berechnung ist der Durchmesser heranzuziehen, der in Richtung der Mantellinie liegt. Weitere Anforderungen ergeben sich bei Anwendung der Spannungsbeiwerte nach Abschnitt 8.5.2.8.

(2) Der Winkel β (siehe **Bild A 2.8-8**) zwischen Stutzenachse und Grundkörperachse soll nicht kleiner als 60 Grad oder größer als 120 Grad sein.

(3) Die Verstärkung eines Ausschnittes in einer Hauptleitung darf wie folgt vorgenommen werden:

a) durch Wahl einer größeren Wanddicke für die Hauptleitung, als es für die unverschwächte Hauptleitung erforderlich wäre. Diese Wanddicke muss mindestens bis zu einer Länge e_H, von der Ausschnittsachse gemessen, vorhanden sein.

b) durch Abzweige, die auf einer Länge e_A, von der Außenwand des Grundkörpers gemessen, dickwandiger ausgeführt sind als es für die Innendruckbelastung erforderlich wäre. Der als Verstärkung erforderliche Werkstoff ist gleichmäßig auf den Umfang des Abzweigs zu verteilen.

c) Durch Kombination der unter a) und b) aufgeführten Maßnahmen.

Im Hinblick auf eine beanspruchungsgerechte Formgebung ist die Ausführung c) zu bevorzugen.

(4) Bei mehreren benachbarten Ausschnitten sind die Bedingungen für Verstärkungsflächen für alle Schnittebenen, die durch die Mitte des Ausschnitts und senkrecht zur Oberfläche der Hauptleitung gehen, zu erfüllen.

(5) Bei der Verstärkung eines Ausschnittes sind folgende Durchmesser- und Wanddickenverhältnisse einzuhalten:

Ein Wanddickenverhältnis s_A/s_H ist bis maximal 2 zulässig für d_{Ai} kleiner als oder gleich 50 mm. Dies gilt auch für Abzweige mit d_{Ai} größer als 50 mm, sofern das Durchmesserverhältnis d_{Ai}/d_{Hi} kleiner als oder gleich 0,2 ist. Bei Abzweigen mit einem Durchmesserverhältnis d_{Ai}/d_{Hi} größer als 0,2 soll s_A/s_H grundsätzlich den Wert 1,0 nicht überschreiten. Größere Werte sind erlaubt, wenn

a) die über vorgenanntes Wanddickenverhältnis hinausgehende, zusätzliche Wanddicke des Abzweigs nicht zur Verstärkung des Stutzenausschnittes herangezogen, sondern aus konstruktiven Gründen gewählt wird oder

b) der Abzweig mit verkürztem Verstärkungsbereich ausgeführt wird (z. B. Abzweige, die aus Gründen der verbesserten Prüfbarkeit des Rohrleitungsanschlusses konisch ausgebildet sind), wobei die durch die verkürzte Einflusslänge fehlende Verstärkungsfläche im verkürzten Einflussbereich zusätzlich untergebracht werden darf oder

c) das Verhältnis von Abzweigdurchmesser zum Durchmesser der Hauptleitung kleiner oder gleich 1 : 10 ist.

(6) Eine Ausschnittverstärkung ist nicht erforderlich und der Nachweis für Ausschnitte nach A 5.3.5.4 muss nicht geführt werden, falls

a) ein einzelner Ausschnitt einen Durchmesser hat, der gleich oder kleiner $0{,}2 \cdot \sqrt{0{,}5 \cdot d_{Hm} \cdot s_H}$ ist, oder wenn zwei oder mehrere Ausschnitte innerhalb eines Kreises mit dem Durchmesser $2{,}5 \cdot \sqrt{0{,}5 \cdot d_{Hm} \cdot s_H}$ angeordnet sind, wobei eine Summe der Durchmesser solcher unverstärkten Ausschnitte den Wert von $0{,}25 \cdot \sqrt{0{,}5 \cdot d_{Hm} \cdot s_H}$ nicht überschreiten darf, und

b) zwei unverstärkte Ausschnitte keine kleineren Mittenabstände, gemessen auf der Innenseite der Hauptleitung, aufweisen als die Summe ihrer Durchmesser, und

c) die Mitte eines unverstärkten Ausschnitts nicht näher als $2{,}5 \cdot \sqrt{0{,}5 \cdot d_{Hm} \cdot s_H}$ vom Rand einer geometrischen Störstelle entfernt liegt.

(7) Bestehen Hauptleitung und Abzweig aus Werkstoffen unterschiedlicher zulässiger Spannung, so ist, wenn der

Werkstoff der Hauptleitung die kleinere zulässige Spannung aufweist, diese für die Berechnung der gesamten Konstruktion maßgebend. Wenn der Abzweigwerkstoff eine geringere zulässige Spannung aufweist, so sind die im Bereich der geringeren zulässigen Spannungen anzuordnenden Verstärkungsflächen im Verhältnis der zulässigen Spannungen zu vergrößern.

Haben Hauptleitungswerkstoff und Abzweigwerkstoff unterschiedlich spezifizierte Wärmedehnungszahlen, so darf ihre Differenz 15 % der Wärmedehnungszahl des Hauptleitungswerkstoffs nicht überschreiten.

A 5.3.5.3 Berechnungsgrößen und Einheiten

(siehe auch die **Bilder A 2.8-8** und **A 5-10** bis **A 5-13**)

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
d_{Ai}	Innendurchmesser des Ausschnitts zuzüglich des doppelten Korrosionszuschlages c_2	mm
d_{Am}	mittlerer Durchmesser des Abzweigs	mm
d_{Hi}	Innendurchmesser der Hauptleitung	mm
d_{Hm}	mittlerer Durchmesser der Hauptleitung	mm
d_n	Nenndurchmesser des konischen Abzweigs	mm
r_1	Innenradius zwischen Abzweig und Hauptleitung	mm
r_2	Mindestradius gemäß Abschnitt 5.2.6	mm
s_A	Nennwanddicke des Abzweigs mit Berücksichtigung der Verstärkung, jedoch abzüglich der Zuschläge c_1 und c_2	mm
s_H	Nennwanddicke der Hauptleitung mit Berücksichtigung der Verstärkung, jedoch abzüglich der Zuschläge c_1 und c_2	mm
s_R	Nennwanddicke der Abzweigleitung abzüglich der Zuschläge c_1 und c_2	mm
α	Neigungswinkel (siehe auch die **Bilder A 5-10**, **A 5-11** und **A 5-13**)	grd
y	Maß bei kegeligem Ansatz	mm

Die folgenden Bezeichnungen gehen aus den **Bildern A 2.8-8** und **A 2.8-9** hervor.

Formelzeichen	Berechnungsgröße	Einheit
A_1, A_2, A_3	für Ausschnittsverstärkungen nutzbare Werkstoffflächen	mm^2
e_A	Grenze der Verstärkung senkrecht zur Wand der Hauptleitung	mm
e'_H	halbe Breite des Bereichs, in dem 2/3 der Verstärkung liegen sollen	mm
e_H	halbe Breite des Verstärkungsbereiches, längs der Mittelebene der Hauptleitung gemessen	mm
β	Winkel zwischen den Achsen des Abzweigs und der Hauptleitung	Grad

A 5.3.5.4 Berechnung

A 5.3.5.4.1 Allgemeines

Eine unmittelbare Berechnung der Wanddicke des Grundkörpers ist im allgemeinen Falle des schrägen Abzweiges ohne und mit zusätzlich aufgebrachter Verstärkung wegen der verschiedenen Einflussgrößen nicht möglich. Die Wanddicke s_H muss zunächst auf Grund der Erfahrung angenommen und die Richtigkeit der Annahme nachgeprüft werden.

A 5.3.5.4.2 Festigkeitsberechnung

Mit der drucktragenden Fläche A_p (einfach schraffiert) sowie mit den tragenden Querschnittsflächen A_σ (kreuzschraffiert) lautet die Festigkeitsbedingung für den Bereich I (**Bild A 5-14**)

$$\overline{\sigma} \le p \cdot \left(\frac{A_{pI}}{A_{\sigma I} + A'_{\sigma I}} + \frac{1}{2} \right) \le S_m \qquad \text{(A 5-39)}$$

für den Bereich II (**Bild A 5-14**)

$$\overline{\sigma} \le p \cdot \left(\frac{A_{pII}}{A_{\sigma II} + A'_{\sigma II}} + \frac{1}{2} \right) \le S_m \qquad \text{(A 5-40)}$$

Die mittragenden Längen dürfen höchstens eingesetzt werden für den Grundkörper mit

$$e_H = \sqrt{(d_{Hi} + s_H) \cdot s_H} \qquad \text{(A 5-41)}$$

und für Stutzen mit

$$e_A = \left(1 + 0{,}25 \cdot \frac{\Psi_A}{90} \right) \cdot \sqrt{(d_{Ai} + s_A) \cdot s_A} \qquad \text{(A 5-42)}$$

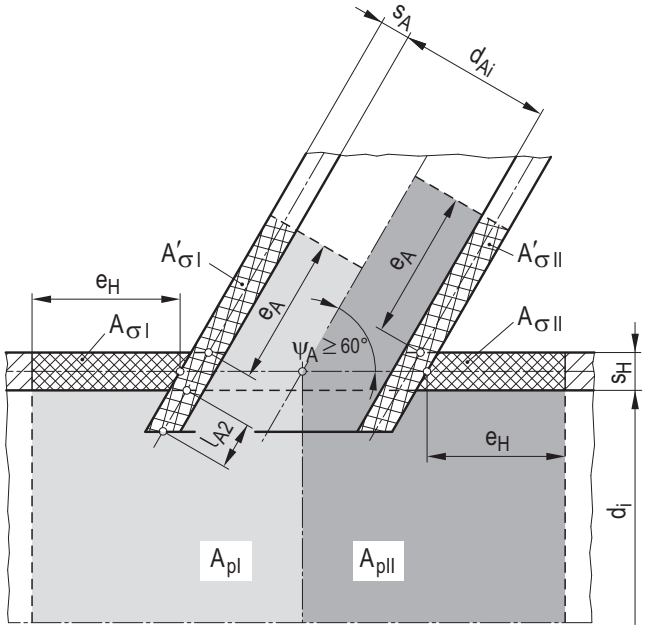


Bild A 5-14: Beanspruchungsschema für eine Zylinderschale mit schrägem Abzweig

Bei einem nach innen überstehenden Stutzenteil kann nur der Anteil $l_{A2} \le 0{,}5 \cdot e_A$ als tragend in die Rechnung einbezogen werden. Hat der Werkstoff des Abzweigs eine kleinere zulässige Spannung als der Grundkörper mit S so kann die Bemessung auf Grund der Festigkeitsbedingung für den Bereich I

$$\left(S - \frac{p}{2} \right) \cdot A_{\sigma I} + \left(S' - \frac{p}{2} \right) \cdot A'_{\sigma I} \ge p \cdot A_{pI} \qquad \text{(A 5-43)}$$

und für den Bereich II sinngemäß durchgeführt werden.

A 5.3.5.4.3 Abzweigstücke mit $d_{Ai}/d_{Hi} \ge 0{,}7$

Bei Abzweigstücken mit $d_{Ai}/d_{Hi} \ge 0{,}7$ und gleichzeitig $s_A/s_H < d_{Ai}/d_{Hi}$ ist im Querschnitt senkrecht zur Achse des Grundkörpers im Übergangsbereich Grundkörper/Abzweig zusätzlich folgende Bedingung zu erfüllen:

$$\frac{p}{1{,}5} \cdot \left(\frac{d_{Hi} + s_H}{2 \cdot s_H} + 0{,}2 \cdot \frac{d_{Ai} + s_A}{s_A} \sqrt{\frac{d_{Hi} + s_H}{s_H}} \right) \le S \qquad \text{(A 5-44)}$$

A 5.3.5.4.4 Zylinderschalen mit mehreren Ausschnitten und Abzweigen

Benachbarte Ausschnitte oder Abzweige werden wie Einzelausschnitte oder Einzelabzweige behandelt, wenn für den Mittenabstand t_φ gemäß **Bild A 5-15** und **Bild A 5-16** die Beziehung gilt

$$t_\varphi \geq \left(\frac{d_{Ai1}}{2} + s_{A1}\right) + \left(\frac{d_{Ai2}}{2} + s_{A2}\right) + 2 \cdot \sqrt{(d_{Hi} + s_H) \cdot s_H} \qquad \text{(A 5-45)}$$

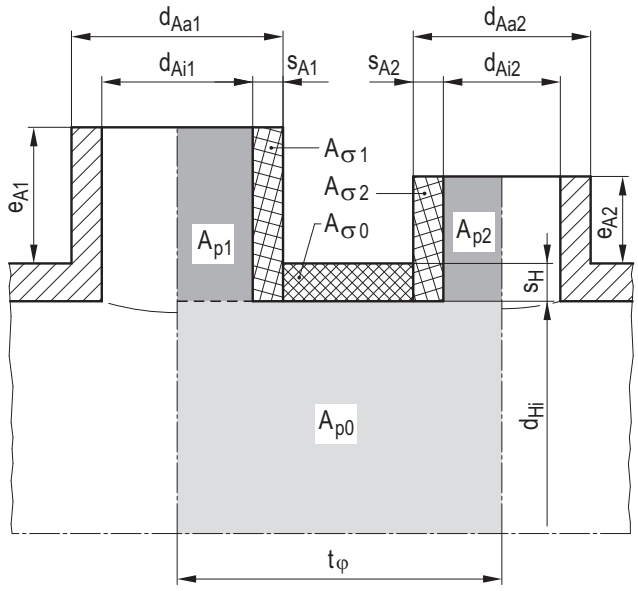


Bild A 5-15: Benachbarte Ausschnitte mit unterschiedlichen Abzweigdurchmessern (dargestellt für $\varphi_A = 0$)

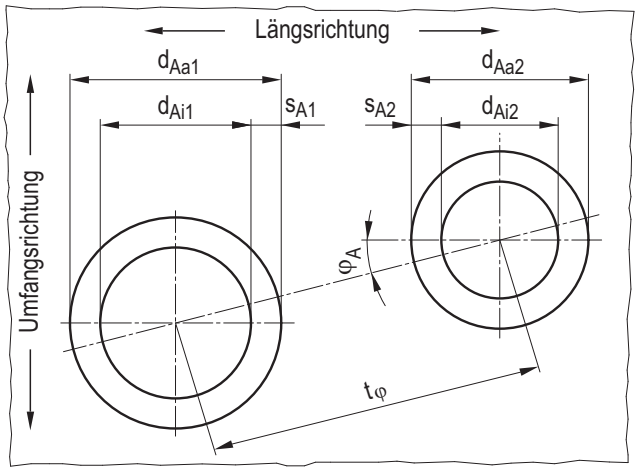


Bild A 5-16: Benachbarte Ausschnitte mit unterschiedlichen Abzweigdurchmessern (dargestellt als Abwicklung)

Im anderen Fall muss zusätzlich die Festigkeitsbetrachtung für den durch die benachbarten Ausschnitte oder Abzweige unter dem Winkel zur Mantellinie gelegten Schnitt gemäß **Bild A 5-15** und **A 5-16** durchgeführt werden, wobei die Festigkeitsbedingung gilt

$$\overline{\sigma}_\varphi = \frac{p}{2} \cdot \frac{A_{p0} \cdot \left(1 + \cos^2 \varphi_A\right) + 2 \cdot A_{p1} + 2 \cdot A_{p2}}{A_{\sigma 0} + A_{\sigma 1} + A_{\sigma 2}} + \frac{p}{2} \leq S \qquad \text{(A 5-46)}$$

Schräg- und/oder Umfangsteilungen werden rechnerisch auf eine Längsteilung zurückgeführt, wobei in der Festigkeitsbedingung nach Gleichung (A 5-46) die Druckfläche $2 \cdot A_{p0}$ durch den Faktor

$$\frac{1 + \cos^2 \varphi_A}{2}$$

korrigiert wurde.

Ist die zulässige Spannung der Abzweige geringer als die des Grundkörpers, so gilt

$$\left(S - \frac{p}{2}\right) \cdot A_{\sigma 0} + \left(S' - \frac{p}{2}\right) \cdot A_{\sigma 1} + \left(S'' - \frac{p}{2}\right) \cdot A_{\sigma 2} = \\ = \frac{p}{2} \cdot \left[A_{p0} \cdot \left(1 + \cos^2 \varphi_A\right) + 2 \cdot A_{p1} + 2 \cdot A_{p2}\right] \qquad \text{(A 5-47)}$$

Vergleiche hierzu **Bild A 5-15** und **A 5-16**.

Bei ungleichen Teilungsabständen $t_{\varphi 1}$ und $t_{\varphi 2}$ nach **Bild A 5-17** ist die größte Stegbeanspruchung für die Bemessung der Wanddicke des Grundkörpers maßgebend. Diese Wanddicke des Grundkörpers muss allseitig bis zu einer Länge e_H nach Gleichung (A 5-41), vom Rand der Ausschnitte gemessen, vorhanden sein.

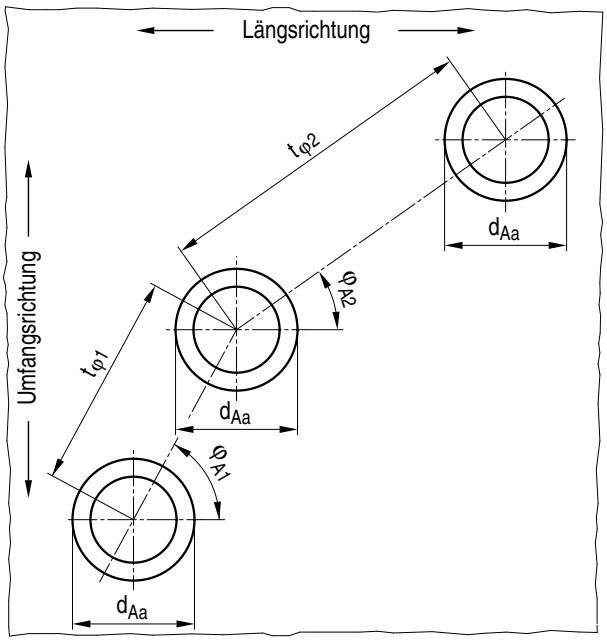


Bild A 5-17: Benachbarte Ausschnitte mit unterschiedlichen Mittenabständen (dargestellt als Abwicklung)

A 5.3.5.4.5 Zylinderschalen mit einem nicht radial angeordneten Abzweig

(1) Für Zylinderschalen, **Bild A 5-18** Teilbilder a und b, bei denen der Abzweig nicht radial, sondern unter dem Winkel Ψ_{A1} zur Tangente an den Grundkörper angeordnet ist, kann die größere Beanspruchung im Querschnitt, **Bild A 5-14** Teilbild a, oder im Längsschnitt, **Bild A 5-18** Teilbild b, auftreten. In beiden Fällen gilt die Festigkeitsbedingung gemäß den Gleichungen (A 5-39) und (A 5-40) wobei jeweils die in den Bildern gekennzeichneten Flächen A_p und A_σ einzusetzen sind.

(2) Die mittragenden Längen dürfen höchstens eingesetzt werden für den Grundkörper nach Gleichung (A 5-42) und für den Abzweig nach Gleichung (A 5-43), wobei $\Psi_A = \Psi_{A1}$ zu setzen ist.

(3) Die Abzweigwanddicke s_A soll nicht größer sein als die Wanddicke s_H des Grundkörpers. Die Schweißverbindung zwischen Grundkörper und Abzweig muss volltragend sein, wie in **Bild A 5-18** angedeutet.

A 5.3.6 Rohrleitungsflansche der Prüfgruppen A2/A3

Die Dimensionierung der Rohrleitungsflansche der Prüfgruppen A2/A3 ist gemäß Abschnitt A 2.10 durchzuführen.

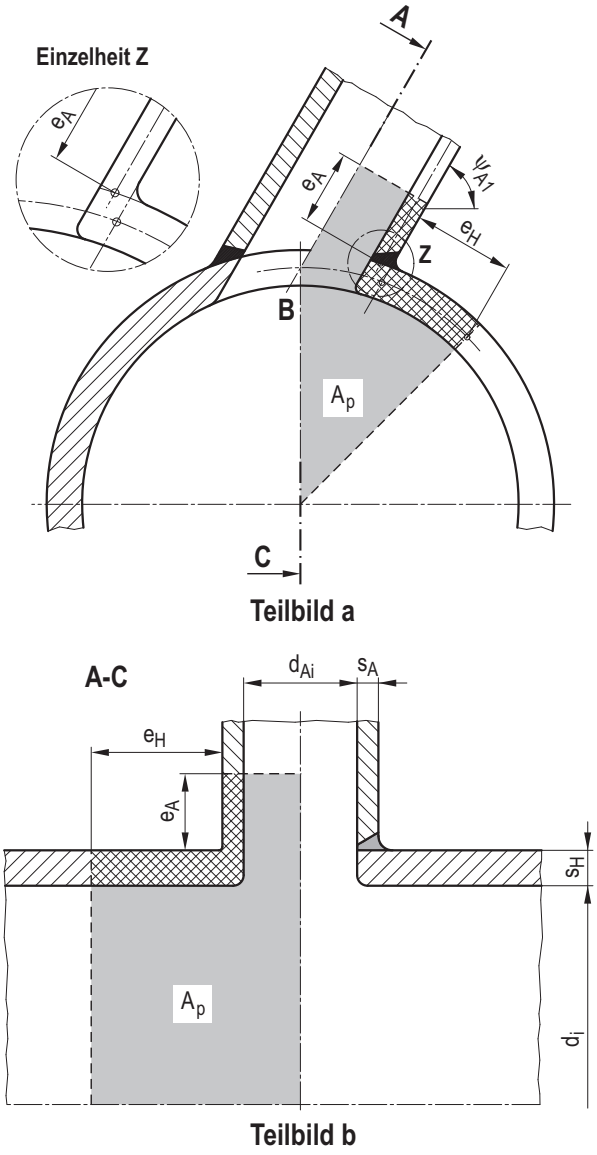


Bild A 5-18: Beanspruchungsschema für eine Zylinderschale mit einem nicht radial angeordneten Abzweig

Anhang B

Anforderungen an den Primärspannungsnachweis bei erneuten rechnerischen Nachweisen

B 1 Allgemeines

(1) Dieser Anhang beschreibt qualitativ und methodisch eine alternative Nachweismöglichkeit bei erneuten rechnerischen Primärspannungsnachweisen unter den in Abschnitt B 2 beschriebenen Voraussetzungen, falls die Anforderungen an die Dimensionierung unter Zugrundelegung der Auslegungsstufe (Stufe 0) nicht erfüllt sind. Er ist nicht auf Primärspannungsnachweise für neue Systeme und Komponenten anwendbar.

Hinweis:
Im Sinne einer transparenten Nachweisführung werden die technischen Gründe für die Notwendigkeit der Anwendung des Anhangs B (z. B. Regelwerksänderung, neue Kenntnisse über die Einwirkungen) in den Nachweisunterlagen benannt.

(2) Die Bestimmung der allgemeinen primären Membranspannungen hat bei erneuten rechnerischen Nachweisen grundsätzlich nach Abschnitt 6 zu erfolgen.

(3) Auf Basis des Kenntnisstands über die möglichen Lastfälle werden die zugrunde zu legenden Werte für Nachweisdruck, Nachweistemperatur und zusätzliche Nachweislasten genauer festgelegt. Die Anwendbarkeit der Werte ist zu begründen.

Hinweis:
Abhängig vom Kenntnisstand über die möglichen Lastfälle ist die Festlegung mehrerer Datensätze für Nachweisdruck, Nachweistemperatur und zusätzliche Nachweislasten möglich.

(4) Bei einem erneuten rechnerischen Primärspannungsnachweis darf die Nachweisführung gemäß Abschnitt B 3 angewendet werden.

(5) Wenn die Nachweisführung gemäß Abschnitt B 3 angewendet wird, sind der Nachweis und die hierbei verwendeten Nachweislasten in der Anlagendokumentation unter Einhaltung der Anforderungen gemäß KTA 1404 so zu dokumentieren, dass zu einem späterem Zeitpunkt keine Lasten oberhalb der nachgewiesenen Werte als zulässig erachtet werden.

B 2 Voraussetzungen

(1) Die erneut zu bewertende Komponente erfüllt ansonsten die Grundsätze der Basissicherheit.

(2) Die Sicherheitsventile und sonstige Sicherheitseinrichtungen sind so eingestellt, dass der Druck im bestimmungsgemäßen Betrieb den Nachweisdruck nur kurzfristig überschreitet und dabei die Beanspruchungsgrenzen von Stufe B eingehalten werden.

(3) Ein eventueller Entfall von Zuschlägen bei der Auslegung nach VPU 1 (z. B. Abdeckung des maximalen Druckes eines spezifizierten Lastfalls durch den Auslegungsdruck) ist sicherheitstechnisch begründet.

(4) Bei Verwendung von Ist-Abmessungen ist die Methodik der Messung und Auswertung im Rahmen der Nachweisführung anzugeben.

B 3 Nachweisführung

(1) Die Daten des Lastfalls bestehen aus den gemäß B 1 (3) festgelegten Werten für den Nachweisdruck, die Nachweistemperatur und die zu berücksichtigenden zusätzlichen Nachweislasten.

(2) Der Nachweisdruck für eine Komponente oder ein Bauteil ist mindestens die größte Druckdifferenz zwischen den druckbelasteten Oberflächen gemäß Stufe A.

(3) Die Nachweistemperatur dient der Festlegung der Festigkeitskennwerte. Sie soll mindestens gleich der nach Stufe A für den mechanisch führenden Lastfall gemäß (2) und (4) an der zu betrachtenden Stelle zu erwartenden Wandtemperatur sein.

(4) Die zusätzlichen Nachweislasten müssen bei Überlagerung mit dem Nachweisdruck mindestens so hoch angesetzt werden, dass sie die gleichzeitig wirkenden ungünstigsten primären Beanspruchungen der Stufe A abdecken.

(5) Der Primärspannungsnachweis ist

a) mit den Einwirkungen gemäß (2) bis (4) in Anlehnung an Abschnitt 6 unter Einhaltung der Beanspruchungsgrenzen der Stufe 0 und

b) für die Beanspruchungsstufen B, C, D und P unter Einhaltung der Beanspruchungsgrenzen der jeweiligen Stufe

gemäß **Tabelle 7.7-4** zu erbringen, wobei die geometrischen Ist-Werte des Bauteils (z. B. Wanddicke) verwendet werden dürfen.

(6) Die Analyse des mechanischen Verhaltens darf entweder durch eine allgemeine Analyse gemäß Abschnitt 7 oder durch eine komponentenspezifische Analyse gemäß Abschnitt 8 nachgewiesen werden.

Anhang C

Bestimmungen und Literatur, auf die in dieser Regel verwiesen wird

(Die Verweise beziehen sich nur auf die in diesem Anhang angegebene Fassung. Darin enthaltene Zitate von Bestimmungen beziehen sich jeweils auf die Fassung, die vorlag, als die verweisende Bestimmung aufgestellt oder ausgegeben wurde.)

AtG		Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz – AtG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 28. August 2013 (BGBl. I S. 3313) geändert worden ist
StrlSchV		Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I 2001, Nr. 38, S. 1714), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 7 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist
Sicherheitskriterien	(1977-10)	Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke vom 21. Oktober 1977 (BAnz. Nr. 206 vom 3. November 1977)
SiAnf		Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (SiAnf) vom 22. November 2012 (BAnz vom 24.01.2013)
Störfall-Leitlinien	(1983-10)	Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren gegen Störfälle im Sinne des § 28 Abs. 3 StrlSchV (Störfall-Leitlinien) vom 18. Oktober 1983 (Beilage zum BAnz. Nr. 245 vom 31. Dezember 1983)
RSK-LL	(1981-10)	RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren, 3. Ausgabe, 14.10.1981 (BAnz. Nr. 69a vom 14. April 1982)
KTA 1404	(2013-11)	Dokumentation beim Bau und Betrieb von Kernkraftwerken
KTA 2201.4	(2012-11)	Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen; Teil 4: Anlagenteile
KTA 3201.2	(2013-11)	Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren; Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung
KTA 3205.1	(2002-06)	Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen; Teil 1: Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen für Primärkreiskomponenten in Leichtwasserreaktoren
KTA 3211.1	(2000-06)	Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises; Teil 1: Werkstoffe
KTA 3211.3	(2012-11)	Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises; Teil 3: Herstellung
KTA 3211.4	(2012-11)	Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises; Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung
DIN 267-13	(2007-05)	Mechanische Verbindungselemente - Technische Lieferbedingungen - Teil 13: Teile für Schraubenverbindungen mit besonderen mechanischen Eigenschaften zum Einsatz bei Temperaturen von -200 °C bis +700 °C
DIN EN ISO 898-1	(2013-05)	Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl - Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen - Regelgewinde und Feingewinde (ISO 898-1:2013); Deutsche Fassung EN ISO 898-1:2013
DIN EN ISO 898-2	(2012-08)	Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl - Teil 2: Muttern mit festgelegten Festigkeitsklassen - Regelgewinde und Feingewinde (ISO 898-2:2012); Deutsche Fassung EN ISO 898-2:2012
DIN EN 1092-1	(2013-04)	Flansche und ihre Verbindungen - Runde Flansche für Rohre, Armaturen, Formstücke und Zubehörteile, nach PN bezeichnet - Teil 1: Stahlflansche; Deutsche Fassung EN 1092-1:2007+A1:2013
DIN EN ISO 2081	(2009-05)	Metallische und andere anorganische Überzüge - Galvanische Zinküberzüge auf Eisenwerkstoffen mit zusätzlicher Behandlung (ISO 2081:2008); Deutsche Fassung EN ISO 2081:2008
DIN 2510-1	(1974-09)	Schraubenverbindungen mit Dehnschaft; Übersicht, Anwendungsbereich und Einbaubeispiele
DIN 2510-2	(1971-08)	Schraubverbindungen mit Dehnschaft; Metrisches Gewinde mit großem Spiel, Nennmaße und Grenzmaße
DIN 2510-3	(1971-08)	Schraubenverbindungen mit Dehnschaft; Schraubenbolzen
DIN 2510-4	(1971-08)	Schraubenverbindungen mit Dehnschaft; Stiftschrauben
DIN 2510-7	(1971-08)	Schraubenverbindungen mit Dehnschaft; Dehnhülsen
DIN EN ISO 3506-1	(2010-04)	Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus nichtrostenden Stählen - Teil 1: Schrauben (ISO 3506-1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 3506-1:2009

DIN EN ISO 3506-2	(2010-04)	Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus nichtrostenden Stählen - Teil 2: Muttern (ISO 3506-2:2009); Deutsche Fassung EN ISO 3506-2:2009
DIN EN ISO 3506-3	(2010-04)	Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus nichtrostenden Stählen - Teil 3: Gewindestifte und ähnliche nicht auf Zug beanspruchte Verbindungselemente (ISO 3506-3:2009); Deutsche Fassung EN ISO 3506-3:2009
DIN EN 10253-2	(2008-09)	Formstücke zum Einschweißen - Teil 2: Unlegierte und legierte ferritische Stähle mit besonderen Prüfanforderungen; Deutsche Fassung EN 10253-2:2007
DIN EN 10253-4	(2008-06)	Formstücke zum Einschweißen - Teil 4: Austenitische und austenitisch-ferritische (Duplex-) Stähle mit besonderen Prüfanforderungen; Deutsche Fassung EN 10253-4:2008
DIN EN 12516-2	(2004-10)	Industriearmaturen - Gehäusefestigkeit - Teil 2: Berechnungsverfahren für drucktragende Gehäuse von Armaturen aus Stahl; Deutsche Fassung EN 12516-2:2004
DIN EN 13555	(2005-02)	Flansche und ihre Verbindungen - Dichtungskennwerte und Prüfverfahren für die Anwendung der Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen und Dichtungen; Deutsche Fassung EN 13555:2004
DIN 28011	(2012-06)	Gewölbte Böden, Klöpperform
DIN 28013	(2012-06)	Gewölbte Böden, Korbbogenform
VDI 2230 Blatt 1	(2003-02)	Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen - Zylindrische Einschraubenverbindungen
AD 2000-MB A 5	(2000-10)	Öffnungen, Verschlüsse und Verschlusselemente
AD 2000-MB B 13	(2012-07)	Einwandige Balgkompensatoren
AD 2000-MB S 3/2	(2004-02)	Allgemeiner Standsicherheitsnachweis für Druckbehälter - Nachweis für liegende Behälter auf Sätteln
AD 2000-MB S 3/4	(2001-09)	Allgemeiner Standsicherheitsnachweis für Druckbehälter - Behälter mit Tragpratzen
AD 2000-MB W 0	(2006-07)	Allgemeine Grundsätze für Werkstoffe

Literatur

[1] H. Hübel
Erhöhungsfaktor K_e zur Ermittlung plastischer Dehnungen aus elastischer Berechnung,
Technische Überwachung 35 (1994) Nr. 6, S. 268-278

[2] WRC Bulletin 297 (September 1987)
Local Stresses in Cylindrical Shells due to External Loadings on Nozzles-Supplement to WRC Bulletin No. 107 (Revision I)

[3] WRC Bulletin 107 (August 1965, Revision März 1979)
Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings

[4] British Standard PD 5500:2000, Annex G
Specification for unfired fusion welded pressure vessels

[5] TEMA
Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association Inc., Eighth Edition, New York 1999

[6] ASME Boiler and Pressure Vessel Code
Section VIII, Division 1, Appendix AA, 2001

[7] K. Bieniussa, H. Reck
Rohrleitungsspezifische Analyse der Beanspruchungen aus thermischer Schichtung,
22. MPA-Seminar, 10. und 11. Oktober 1996, Stuttgart

[8] Markus
Theorie und Berechnung rotationssymmetrischer Bauwerke, 2. berichtigte Auflage, Düsseldorf 1976

[9] Warren C. Young
Roark´s Formulas for Stress and Strain, 6. Ausgabe, Verlag McGraw-Hill, New York 1989

[10] Kantorowitsch
Die Festigkeit der Apparate und Maschinen für die chemische Industrie, Berlin 1955

[11] Kockelmann, J. Bartonicek, E. G. Meyer, M. Trobitz
Festigkeits- und Dichtheitsnachweis für Flanschverbindungen mit der Dichtung im Krafthaupt- und Kraftnebenschluss; Vortragsveranstaltung „Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit von Leichtwasserreaktoren; 13.-14. Juni 2002, MPA Stuttgart

[12] F. Schöckle, J. Bartonicek, R. Hahn, H. Kockelmann
Abdichteigenschaften von Dichtungen für Flanschverbindungen; 28. MPA-Seminar, 10. und 11. Oktober 2002

[13] R. Hahn, H. Kockelmann, J. Bartonicek, R. Jastrow, F. Schöckle
Ermittlung von Kennwerten für Flanschverbindungen mit der Dichtung im Krafthaupt- und Kraftnebenschluss,
27. MPA-Seminar, 4. und 5. Oktober 2001, Stuttgart

Anhang D (informativ)

Änderungen gegenüber der Fassung 1992-06 und Erläuterungen

Zu Abschnitt 1 „Anwendungsbereich“

Der Anwendungsbereich wurde hinsichtlich Rohrleitungen und Armaturen ≤ DN 50 präzisiert.

Zu Abschnitt 2 „Allgemeine Anforderungen und Begriffe“

(1) Der Abschnitt 2 „Allgemeine Anforderungen und Begriffe“ wurde an mehreren Stellen in Anlehnung an KTA 3201.2 (1996-06) aktualisiert.

(2) Die Begriffsdefinitionen wurden in einem separaten Abschnitt zusammengefasst. Die zugehörigen Anforderungen wurden präzisiert.

(3) Der in KTA 3211.2 (1992-06) enthaltene Absatz 12 wurde gestrichen, da in Abschnitt 7.1.1 Absatz 6 ausreichende Regelungen enthalten sind.

(4) Im Rahmen der Regeländerungsverfahren KTA 3211.2 und KTA 3211.3 wurde die Tabelle 2-1 hinsichtlich der Einstufungskriterien der Prüfgruppe A3 geändert, um die zuvor existierenden Unterschiede zwischen der Rahmenspezifikation Basissicherheit, den Konvoi-Spezifikationen und den Festlegungen in den Regeln der Reihe KTA 3211 zu beseitigen. Die bisher verwendete Formulierung „für überwachungspflichtige Anlagen zulässige Werkstoffe außerhalb KTA 3211.1“ wurde durch die klarere Eingrenzung „Werkstoffe im Geltungsbereich des AD 2000-Merkblatts W 0“ ersetzt. Die bisherigen Festlegungen zur Verwendung von austenitischen Werkstoffen mit s ≤ 16 mm und ≤ DN 150 wurden nicht mehr übernommen, da KTA 3211.1 (2000-06) die entsprechenden Anforderungen enthält.

Zu Abschnitt 3 „Lastfallklassen und Beanspruchungsstufen“

(1) Der Text in Abschnitt 3.2.4.1 wurde an die Formulierung in den „Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke“ und in KTA 3201.2 (1996-06) angepasst.

(2) In Abschnitt 3.3 wurden bei den Beanspruchungsstufen 0, A, B, C und D Hinweise ergänzt, in denen die Nachweisziele der jeweiligen Beanspruchungsstufen beschrieben sind.

(3) Der Abschnitt 3.3.3.2 wurde an die in Tabelle 7.7-4 vorgenommene Ergänzung von Primärspannungsbegrenzungen für die Stufe A angepasst.

(4) Die Festlegungen zur Berücksichtigung von Lastfällen der Stufe C in der Ermüdungsanalyse wurden in Abschnitt 3.3.3.4 und in Tabelle 7.7-4 präzisiert. Eine Berücksichtigung jedes aufgetretenen Lastspiels aus Ereignissen der Stufe C hinsichtlich seines Beitrags zur Bauteilermüdung erfolgt im Rahmen der Betriebsüberwachung (siehe KTA 3211.4 Abschnitt 8.1).

(5) Die Anforderung in Abschnitt 3.3.3.6 wurde derart geändert, dass alle Druckprüfungen in der Ermüdungsanalyse berücksichtigt werden müssen, sofern deren Anzahl die Zahl 10 überschreitet.

Zu Abschnitt 4 „Einwirkungen auf die Komponenten infolge von mechanischen und thermischen Belastungen sowie durch das Medium“

Es wurde neu aufgenommen, dass der Einfluss des Mediums auf die Bauteilermüdung entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik zu berücksichtigen ist. Hierfür wurden folgende Änderungen vorgenommen:

a) An allen betreffenden Stellen wurde „Korrosion und Erosion“ durch die allgemeinere Formulierung „Einwirkungen des Mediums“ ersetzt.
b) In Absatz 3 wurde ergänzt, dass Einwirkungen des Mediums die Ermüdungsfestigkeit reduzieren können.
c) In Abschnitt 4.5 wurde ein neuer Absatz ergänzt, der in Verbindung mit den in Abschnitt 7.8.3 vorgenommenen Änderungen Anforderungen für den Fall enthält, dass Unsicherheiten hinsichtlich der Wirkung des Mediums auf die Bauteilintegrität bestehen.

Zu Abschnitt 5 „Konstruktive Gestaltung“

(1) Der Abschnitt 5 „Konstruktive Gestaltung“ wurde an mehreren Stellen redaktionell überarbeitet, so dass die Vorgaben als Anforderungen an die konstruktive Gestaltung formuliert sind (z. B. Abschnitt 5.1.4.2, Abschnitt 5.3.2.3). Bei den Anforderungen an eine beanspruchungsgünstige Konstruktion wurden Temperaturschichtungen als Belastungsart aufgenommen.

(2) Im Abschnitt 5.2.4 wurde die Anforderung an die Schraubenanordnung in Flanschen im Einklang mit den Vorgaben des konventionellen Regelwerks präzisiert.

(3) Das Bild 5.2-2 wurde redaktionell überarbeitet. Die Bilder 5.2-5, 5.2-7, 5.3-1, 5.3-2, 5.3-3 und 5.3-4 wurden hinsichtlich der Prüflängenbezeichnungen an KTA 3211.3 angepasst.

(4) In Abschnitt 5.2.5 wurde der Verweis auf die Blätter 1 bis 4 der DIN 2510 erweitert, da in allen Blättern konstruktive Vorgaben für Dehnschrauben enthalten sind. Durch Aufnahme des Absatzes 5 wurde klargestellt, dass durch die konstruktive Gestaltung eine vorwiegende Zugbeanspruchung der Schrauben sicherzustellen ist.

(5) Das maximal zulässige Wanddickenverhältnis von Stutzen zur Grundschale (Abschnitt 5.2.6 Absatz 3, Tabelle 5.2-1) $s_A/s_H \leq 1{,}3$ stellt eine konservative Regelung dar und geht auf die Basissicherheit zurück. Sie soll sowohl einen günstigen Spannungsverlauf als auch Wanddickenreserven in der Schale zur Aufnahme von Stutzenkräften sicherstellen. Durchgeführte Detailanalysen zeigen, dass die Prinzipien der Basissicherheit auch bei einem Wanddickenverhältnis $s_A/s_H \leq 1{,}5$ eingehalten werden können. Es wurde deshalb eine entsprechende Einzelfallregelung in KTA 3211.2 aufgenommen. Hierbei ist in jedem Fall die Durchführung einer allgemeinen Analyse des mechanischen Verhaltens nach Abschnitt 7 erforderlich.

(6) Der Abschnitt 5.3.2.4 wurde gemeinsam mit Abschnitt 8.2.5 an die aktuelle Ausgabe des AD 2000-Merkblatts B 13 angepasst.

Zu Abschnitt 6 „Dimensionierung“

(1) Die Formulierungen in Abschnitt 6.1 wurden

a) aufgrund eines vom Bundesumweltministerium angemerkten formalen Widerspruchs zwischen den bisherigen Absätzen 2 und 5,
b) in Auswertung der RSK-Stellungnahme vom 24. Juli 2008 (410. Sitzung) „Festigkeitshypothesen im Anwendungsbereich des KTA-Regelwerks bei der Nachbewertung von Komponenten und Systemen; Bewertung sicherheitstechnischer Aspekte zur Frage der wahlweisen Verwendbarkeit der Festigkeitshypothesen nach von Mises und Tresca im KTA-Regelwerk“,
c) in Auswertung der Stellungnahme des Unterausschusses Programm und Grundsatzfragen (UA-PG) zum Verständnis von KTA-Regeln, 33. Sitzung des UA-PG vom 10. März 2010,

d) zur Aufnahme von Festlegungen zum Grenztragfähigkeitsnachweis

präzisiert und ergänzt. Hiermit soll erreicht werden, dass die Anforderungen an die Dimensionierung eindeutig vorgegeben werden und eine Fehlinterpretation der Anforderungen möglichst ausgeschlossen wird.

(2) Die Festlegungen zu Plattierungen im Abschnitt 6.3 wurden präzisiert.

(3) Der in Tabelle 6.6-1 mit aufgeführte Spannungsbegrenzungsterm $R_{p0,2T}/1,5$ (Dimensionierung nach Anhang A für austenitische Walz- und Schmiedestähle) war abweichend vom ASME Code (min $\{R_{p0,2RT}/1,5; R_{p0,2T}/1,1; R_{mRT}/3,0; R_{mT}/3,0\}$) mit aufgenommen worden, um den im Anhang A enthaltenen Dimensionierungsgleichungen, die nicht aus dem ASME Code sondern aus deutschen technischen Regelwerken entnommen wurden, hinsichtlich der dort geforderten Spannungsbegrenzung zu entsprechen. Dies ist vor allem bei den Werkstoffen von Bedeutung, bei denen aufgrund der Werkstoffkennwerte die Dehngrenze R_p für die Dimensionierung maßgebend wird und aufgrund des zugrunde liegenden Berechnungsverfahrens dann nicht mehr bei der Dimensionierung eine hinreichende Verformungsbegrenzung sichergestellt wäre. Ein Beispiel hierfür ist das Verformungsverhalten in gekrempten Böden.

Da das Spannungsabsicherungskonzept in der Analyse des mechanischen Verhaltens auf der Grundlage linear-elastischer Spannungsanalysen unter Verwendung der Traglastfaktoren bei ungleichmäßiger Spannungsverteilung sich im Grundsatz nicht von demjenigen im konventionellen Regelwerk unterscheidet, wird es als angemessen angesehen, bei einer Dimensionierung mit Hilfe von Primärspannungsnachweisen hier die gleichen Spannungsgrenzen der Bemessung zugrunde zu legen.

Unter Berücksichtigung des vorstehend erläuterten, zusätzlichen Spannungsbegrenzungsterms sinkt das zulässige Spannungsniveau bei Primärspannungsnachweisen unter die vom ASME Code geforderte Spannungsbegrenzung für austenitische Werkstoffe auch für alle anderen Bauformen, für die eine Anpassung nicht erforderlich ist (z. B. für Zylinderschalen unter innerem Überdruck). Die vorgeschlagene Regelung für die Bildung des Spannungsvergleichswertes zum Zwecke der Dimensionierung stellt somit eine Vereinfachung dar, die additive Konservativitäten beinhaltet.

(4) In Tabelle 6.7-1 wurde eine Fußnote 3 aufgenommen. Hierdurch wird sichergestellt, dass die zulässigen Spannungen bei Komponenten der Prüfgruppen A2 und A3 in keinem Fall diejenigen der Prüfgruppe A1 überschreitet.

(5) Die Tabelle 6.7-2 wurde an mehreren Stellen präzisiert und um die Zeile „Gesamtspannung“ sowie um eine Spannungsbegrenzung zur Berücksichtigung des Torsionsmoments infolge des Montagevorgangs bei Verwendung eines Drehmomentenschlüssels erweitert. Die Tabelle wurde dabei so geändert, dass der Einbauzustand als separate Spalte erscheint und eine Angabe von zulässigen Spannungen für die Beanspruchungsstufe P nur im Prüfzustand erfolgt.

Zu den Abschnitten 7.1 bis 7.7

(1) Im Abschnitt 7.1.2 wurde klargestellt, dass Schweißnähte bei Ermüdungsanalysen zu berücksichtigen sind.

(2) Da die Zugrundelegung des tatsächlichen Spannungs-Dehnungs-Zusammenhangs bei elastisch-plastischen Analysen nicht immer zutrifft und hierfür auch keine konkreten Anforderungen festgelegt waren, wurde der letzte Satz in Abschnitt 7.3 (1) geändert.

(3) Im Rahmen der Nachweisführung wird bewertet, inwieweit bei der Modellabbildung die unterschiedlichen Einflussgrößen das Ergebnis beeinflussen können und in welchem Umfang sie in die Modellabbildung mit einzubeziehen sind. Zeigt diese Bewertung, dass eine unmittelbare Einbeziehung in das Modell nicht erforderlich ist, ist dem Erfordernis einer Berücksichtigung ausreichend Rechnung getragen. In den Absätzen 3 und 5 des Abschnitts 7.6.2.3 wurde deshalb die Formulierung einheitlich in „ist zu berücksichtigen“ geändert.

(4) Abschnitt 7.6.2.6 wurde an KTA 3201.2 (1996-06) angepasst.

(5) Im Rahmen des Regeländerungsverfahrens wurde die Möglichkeit geprüft, Festlegungen zur Vorgehensweise bei der Analyse des Dämpfungsverhaltens für Betriebslastfälle in die Regel aufzunehmen. Es hat sich gezeigt, dass konkrete Festlegungen der Einzelfallbetrachtung vorbehalten bleiben müssen. Zur grundsätzlichen Vorgehensweise wird folgender Standpunkt vertreten:

Die wesentlichen Parameter einer dynamischen Rohrleitungsanalyse sind

- die Berechnungsverfahren nach der „Modal-Analyse“ bzw. der „direkten Integration“,
- die Wahl des Dämpfungsgrades für Betriebs- bzw. Störfälle,
- die Berücksichtigung des sogenannten „Frequenz-Shiftes“.

Bei dynamischen Rohrleitungsberechnungen wird zwischen der Modal-Analyse und der direkten Integration (Zeitverlaufsmethode) unterschieden. Beide Verfahren können gleichberechtigt verwendet werden. Als Dämpfungsparameter werden entweder eine konstante Dämpfung für alle Frequenzen oder eine frequenzabhängige Rayleigh-Dämpfung mit den zwei Parametern α und β zugrunde gelegt. Aus Anwendersicht ist die einfachere Verwendung einer konstanten Dämpfung für alle Frequenzbereiche der Rayleigh-Dämpfung vorzuziehen, da hier die Dämpfungshyperbel zwischen 2 signifikanten Frequenzen „eingehängt“ werden muss. Für die Festlegung dieser Einhängepunkte – z. B. erste Eigenfrequenz und eine ingenieurmäßig abgeschätzte höhere Eigenfrequenz in einer Größenordnung von ca. 60 Hz bis 80 Hz – sind ggf. aufwändige ingenieurmäßige Überlegungen bzw. Variationsrechnungen erforderlich.

Im amerikanischen ASME-Regelwerk wird für Rohrleitungen sowohl beim „Operational Basis Earthquake“ (OBE) als auch beim „Safe Shutdown Earthquake“(SSE) ein Dämpfungsgrad von 5 % empfohlen (Section III, Division 1, - Appendices, Table N-1230-1). Dieser Wert gilt unabhängig von der Frequenz. Um eine optimale betriebliche Auslegung der Rohrleitungen nicht durch zu strenge Forderungen an die Erdbebensicherheit zu behindern, ist der vorgeschlagene Dämpfungsgrad im Vergleich zu früheren Fassungen des ASME-Regelwerks erhöht worden. Berücksichtigt wurde dabei die Erfahrung, dass vergleichsweise flexibel trassierte Leitungen in fossil befeuerten Kraftwerken und in chemischen Anlagen beim Erdbeben nicht versagen.

Für die Wahl des Dämpfungswertes bei dynamischen Rohrleitungsanalysen wird im Wesentlichen auf KTA 2201.4 zurückgegriffen, aus der der üblicherweise angesetzte Dämpfungsgrad von 4 % für EVA-Lastfälle abgeleitet wird. Dieser Dämpfungsgrad von 4 % wird häufig auch für betriebliche Belastungen zugrunde gelegt.

Einen weiteren erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse von dynamischen Rohrleitungsanalysen hat die Wahl des sogenannten Frequenz-Shiftes. Hierdurch sollen Ungenauigkeiten beim Ansatz der Systemmassen und geometrischen Längen dahingehend berücksichtigt werden, dass eventuelle Resonanzeffekte zwischen Eigen- und Anregungsfrequenz der Rohrleitung erkannt werden. In der Praxis wird häufig ein Frequenz-Shift von $\pm$ 2 % (beidseitig) als Indikator für eventuell auftretende Resonanzeffekte verwendet.

Ausführungen zur Schwingungsberechnung sind auch in der Richtlinie VDI 3842 „Schwingungen in Rohrleitungssystemen“ (2004-06) enthalten.

(6) Zur Vermeidung von Fehlinterpretationen wurde die Definition der primären lokalen Membranspannung in Abschnitt 7.7.2.2 in Anlehnung an den ASME Code überarbeitet.

(7) Der Abschnitt 7.7.3 „Spannungsüberlagerung und Spannungsbeurteilung“ wurde an einigen Stellen zwecks Klarstellung der Anforderungen präzisiert.

(8) Der Abschnitt 7.7.4 „Grenztragfähigkeitsanalyse“ wurde für Prüfgruppe A1 aus KTA 3201.2 (1996-06) übernommen und in Anlehnung an das Verhältnis S_m/S-Werte und die erforderliche Traglastbegrenzung für die Prüfgruppen A2/A3 angepasst.

(9) In Tabelle 7.7-4 wurde für die Stufe 0 eine Fußnote in die Tabellen aufgenommen, die auf den neu geschaffenen normativen Anhang B verweist, der die Vorgehensweise bei einer erneuten Bewertung einer Komponente beschreibt.

Zu Abschnitt 7.8 „Ermüdungsanalyse“

(1) An mehreren Stellen erfolgte eine Präzisierung der Formulierungen.

(2) Im Rahmen des Regeländerungsverfahrens erfolgte eine ausführliche Diskussion und Auswertung des nationalen und internationalen Kenntnisstandes zu den bei Ermüdungsanalysen für ferritische und austenitische Werkstoffe anzuwendenden Ermüdungskurven. Hierbei wurde der Einfluss des Mediums ausführlich behandelt.

(3) KTA 3211.2 in der Fassung 1992-06 lag die aus den 1960-er Jahren stammende ASME Auslegungskurve („Langer-Curve“ [1]) unter Berücksichtigung unterschiedlicher Elastizitätsmoduln zu Grunde. Die Auswertung umfangreicher neuerer Versuchsergebnisse aus den USA und Japan für austenitische Werkstoffe zeigen, dass die der ursprünglichen (alten) ASME Auslegungskurve zu Grunde liegende Mittelwertkurve (an Luft) im Bereich ab 10^4 Lastwechsel nichtkonservative Ergebnisse liefern kann [2] (NUREG/CR-6909).

Aus diesem Grund wurde mit der Veröffentlichung der Ausgabe ASME 2009b, Section III, im Appendix I eine neue Auslegungskurve für austenitische Werkstoffe eingeführt. Die neue Auslegungskurve zeigt im Vergleich zur alten Auslegungskurve folgende Änderungen:

a) Im Kurzzeitfestigkeitsbereich 10^1 bis $5 \cdot 10^2$ Lastwechsel höhere zulässige Spannungsamplituden oder bei vorgegebener Spannungsamplitude eine höhere zulässige Lastwechselzahl.
b) Im Bereich von 10^3 bis 10^7 Lastwechsel geringere zulässige Spannunsamplituden oder bei vorgegebener Spannungsamplitude eine geringere zulässige Lastwechselzahl.
c) Aufnahme des hochzyklischen Bereiches bis 10^{11} Lastwechsel.
d) Entfall der Kurven A-C.

In wieweit die neue ASME Auslegungskurve in Luftumgebung auf die in den deutschen Kernkraftwerken eingesetzten stabilisierten austenitischen Werkstoffe 1.4550 und 1.4541 übertragbar und anwendbar ist, wurde im Rahmen von Forschungsvorhaben untersucht ([3] bis [7]). Anhand dieser Versuchsergebnisse wurden für Luftumgebung eigenständige Mittelwertskurven für Raumtemperatur und Temperaturen > 80 °C abgeleitet und darauf basierend neue Auslegungskurven [8] bis [10]. Im Gegensatz zu den Auswertungen in NUREG/CR-6909 [2], wo von keinem Einfluss der Temperatur auf die Mittelwertkurve an Luft ausgegangen wird, zeigten die Untersuchungen in [3], [5] und [7] einen nicht vernachlässigbaren Temperatureinfluss im Bereich ab 10^4 Lastwechsel. Aus diesem Grund erfolgt explizit für die stabilisierten austenitischen Stähle 1.4541 und 1.4550 die Herleitung von Mittelwert- und Auslegungskurven für Raumtemperatur und Temperaturen > 80 °C [8]. In den USA wird der Temperatureinfluss auf die Mittelwertkurve in Luftumgebung als nicht signifikant bewertet (NUREG/CR-6909 [2] Kap. 5.1.3). Deshalb wird im ASME Code keine Differenzierung der Auslegungskurve bezüglich der Temperatur vorgenommen. Bei der Bewertung des Mediumeinflusses mit F_{en}-Faktoren wird die Temperatur explizit berücksichtigt [2]. Für die übrigen austenitischen Stähle wurden die Auslegungskurven des ASME Code ab Ausgabe ASME 2009b übernommen. Für die ferritischen Werkstoffe bleiben die bisherigen Auslegungskurven bestehen.

(4) Hinsichtlich einer quantitativen Bewertung des Einflusses des Mediums auf die Ermüdungsfestigkeit wurden in den Forschungsvorhaben [11] bis [14] Versuche durchgeführt und vergleichend zu dem in NUREG/CR-6909 [2] gezeigten „Environmental Factor“ F_{en} bewertet. Damit liegen anhand der durchgeführten Laboruntersuchungen zwar Bewertungskriterien zur Erfassung des Mediumeinflusses auf das Ermüdungsverhalten vor, dieses wird allerdings als konservativ bewertet. International liegt derzeit noch keine einheitliche Vorgehensweise zur Erfassung eines möglichen Mediumeinflusses auf die Ermüdung in den Regelwerken vor. Dies wird insbesondere bei der Berechnung von F_{en} in den Berichten [15] und [16] deutlich.

International existieren in der Fachwelt verschiedene Berechnungsverfahren zur Berücksichtigung des Mediumeinflusses. Neben dem Verfahren nach NUREG/CR 6909 existieren weitere numerische Ansätze. Hierzu zählt der Approximationsansatz des Argonne National Laboratory (ANL), veröffentlicht im Bericht ANL-LWRS47 sowie ein auf dem ASME Code Meeting, „Section III Subgroup on Fatigue Strength“, Nashville TN, May 15, 2012, diskutiertes Verfahren. Ein Vorschlag für eine ausführliche Anleitung zur rechnerischen Vorgehensweise findet sich in [16]. Eine weitere Vereinheitlichung der US amerikanischen Vorgensweise kann erwartet werden [17], wenn Ende 2014 die Revisionen von NUREG/CR-6909 [2] und von Reg. Guide 1.207 [18] veröffentlicht werden.

Die bisherigen Laboruntersuchungen unter Mediumsbedingungen erfolgten fast ausschließlich mit konstanten einachsigen Beanspruchungsbedingungen. Neuere Erkenntnisse deuten auf einen lebensdauerbegünstigenden Einfluss betriebsnaher langer Haltezeiten hinsichtlich der Belastungen hin (Haltezeiteffekt). Dieses gilt hierbei sowohl für Luftumgebung, als auch für LWR-Mediumsbedingungen, z.B. [19] bis [22]. Eine Berücksichtigung dieses Effektes ist nach Vorliegen abgesicherter experimenteller Untersuchungen, falls erforderlich, vorgesehen.

Für eine statistisch abgesicherte Quantifizierung der Verteilung der anteiligen Beiträge von Temperatureinfluss und Mediumeinfluss liegen derzeit nicht genügend Untersuchungsergebnisse vor. Erste Untersuchungen zeigen jedoch den Einfluss der Temperatur unter verschiedenen Umgebungsbedingungen (Vakuum, Luft und Medium) [23]. Es zeigt sich, dass der aktuell in experimentellen Untersuchungen nachgewiesene lebensdauerbegrenzende Einfluss des Mediums bereits einen derzeit nicht quantifizierbaren Anteil des Temperatureinflusses enthält, der abhängig von der Dehnungsamplitude bzw. der zulässigen Zyklenzahl ist [24].

Vorliegende Untersuchungsergebnisse zum Mediumeinfluss mit realistischen transienten Dehnungsverläufen von AREVA-SAS zeigen, dass die ursprüngliche (alte) ASME Auslegungskurve für Austenit sowohl in Luft als auch unter moderaten Mediumsbedingungen (zugrunde gelegter F_{en}-Faktor: $F_{en} = 3$) weiterhin konservative Ergebnisse liefert ([25] – [27]).

Beruht die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit auf den tatsächlich aufgetretenen ermüdungsrelevanten Lastereignissen, kann im Sinne der Schadensvorsorge der aus Laborversuchen bestätigte reduzierende Einfluss des Mediums, insbesondere, wenn der Einfluss des Mediums nicht mehr als moderat angesehen werden kann, nicht grundsätzlich vernachlässigt werden.

In Abschnitt 7.8.3 (2) sind entsprechende Maßnahmen zur Berücksichtigung des Mediumeinflusses aufgeführt. Auswertungen unter Berücksichtigung der nach den existierenden Verfahren anzusetzenden Einflussfaktoren für die in deutschen Anlagen (DWR und SWR) vorhandenen Bedingungen (Werkstoff, Temperatur, Sauerstoffkonzentration, Dehnrate) ergaben, dass die Anwendung von Aufmerksamkeitsschwellen sachgerecht ist. Als Aufmerksamkeitsschwelle wurde sowohl für ferritische als auch für austenitische Werkstoffe der Wert D = 0,4 festgelegt. Erfolgt die Festlegung der nach Abschnitt 7.8.3 (2) erforderlichen Maßnahmen anhand von Ermüdungsbewertungen, die auf Basis der Ermüdungskurve 7.8-2 in KTA 3211.2 (1992-06) erstellt wurden, wird bei austenitischen Werkstoffen anstelle des Wertes D = 0,4 der Wert D = 0,2 als sachgerecht angesehen.

Die Berechnung zur Berücksichtigung des Mediumeinflusses wird auf Basis der Auslegungskurven an Luft durchgeführt (siehe z.B. [2], [16]).

Alternativ kann der Einfluss des Mediums auf die Ermüdung durch detaillierte Nachweise unter Berücksichtigung der Temperatur, des Sauerstoffgehalts und der Dehnungsänderungsgeschwindigkeit, z. B. unter Anwendung der oben genannten Verfahren oder durch experimentelle Nachweise erfasst werden.

Prinzipiell ist zur Berücksichtigung des Mediumeinflusses die oben genannte Vorgehensweise anwendbar. Untersuchungen deuten jedoch darauf hin, dass die hieraus abzuleitenden F_{en}-Faktoren in vielen Fällen konservativen Charakter tragen. Laboruntersuchungen zeigen, dass bei Berücksichtigung der Interaktion zwischen Oberflächen- und Mediumeffekt sowie bei Verwendung betriebsnaher Belastungssignale auf experimentellem Wege erhebliche Reserven nachgewiesen werden können, [24] bis [28]. Durch gezielte experimentelle Untersuchungen ist somit eine Quantifizierung von Konservativitäten möglich. Dies ermöglicht eine teilweise Abdeckung dieses Einflusses des Mediums durch die bestehenden Auslegungskurven und die Ableitung zulässiger F_{en}-Faktoren „$F_{en,allowable}$“ (siehe hierzu das in [28] beschriebene Verfahren, dessen Umsetzung im französischen RCC-M-Code diskutiert wird). Darauf deuten auch Untersuchungen der MPA-Stuttgart hin [9].

Aufgrund der konservativen Auslegung, der betrieblichen Maßnahmen und der vorbeugenden Instandhaltung zeigt die Betriebserfahrung der deutschen LWR-Anlagen, dass das vorhandene Medium keinen signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer der Komponenten hat.

Die Definition von Aufmerksamkeitsschwellen wird im Sinne eines konservativen Vorgehens im Rahmen der Regelwerkserstellung dem Umstand gerecht, dass sich auf Basis von Laborversuchen Hinweise bezüglich eines Einflusses des Mediums auf die Ermüdungsfestigkeit ergeben. Sollte sich der Kenntnisstand zu diesem Einfluss in Zukunft weiterentwickeln, so ist dann auf dieser neuen Basis über die Festlegung in KTA 3211.2 zur Höhe der Aufmerksamkeitsschwellen bzw. gegebenenfalls auch über deren Entfall zu entscheiden. Die Festlegung der Aufmerksamkeitsschwellen stellt ein den aktuellen Kenntnisstand zum Thema Mediumeinfluss widerspiegelndes pragmatisches und in der Betriebspraxis umsetzbares Verfahren dar, das in der internationalen Regelwerkslandschaft bisher Alleinstellungscharakter hat.

[1] Langer, B. F.: Design of Pressure Vessels for Low-Cycle Fatigue, Journal of Basic Engineering, 84(3), 1962, pp. 389-402.

[2] Chopra O. K. and Shack, W. J.: Effect of LWR Coolant Environments on the Fatigue Life of Reactor Materials, NUREG/CR-6909, ANL-06/08, 2007

[3] Herter, K.-H., Reicherter B., Schuler X.: Nachweis der Ermüdungsfestigkeit bei kerntechnischen Komponenten aus ferritischen und austenitischen Werkstoffen, BMWi Reaktorsicherheitsforschung - Kennzeichen 1501296, MPA Universität Stuttgart, Juni 2009

[4] Hoffmann, M., Herter K.-H., Schuler X.: Experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit der austenitischen Plattierung von kerntechnischen Komponenten, BMU Vorhaben 3611R01306, MPA Universität Stuttgart, Nr. 8428 000 000, Abschlussbericht, April 2012

[5] Herter, K.-H., Fesich T., Schuler X.: „Sicherheitsbewertung kerntechnischer Komponenten bei komplexer mehrachsiger Schwingbeanspruchung, BMWi-Vorhaben 1501392, MPA Universität Stuttgart, Abschlussbericht, Dezember 2012

[6] Herter, K.-H., Schuler X., Weissenberg T.: Fatigue behavior of nuclear material under air and environmental conditions, 2013 ASME Pressure Vessel and Piping Conference, PVP2013-97394, Paris

[7] Rudolph, J.; Willuweit, A.; Bauerbach, K.; Beier, H. Th.; Schlitzer, T.; Vormwald, M.; Fischaleck, M.; Scholz, A.: Numerische Simulation und experimentelle Charakterisierung des Ermüdungsrisswachstums unter thermozyklischer Beanspruchung. BMBF Verbundforschungsvorhaben „Grundlagen des System-, Ausström- und Werkstoffverhaltens von Rohrleitungen bei thermischer Wechselbeanspruchung“, Verbundvorhaben „Thermische Wechselbeanspruchung“, Verbundprojekt 02NUK009D

[8] Schuler, X.: MPA Aktennotiz Shr vom 02.10.2012: Ermüdungskurven für austenitische Werkstoffe in Luftumgebung im Anwendungsbereich der KTA 3201.2 und KTA 3211.2

[9] Herter K.-H., Schuler X., Weißenberg T.: Fatigue behaviour and crack growth of ferritic steel under environmental conditions. 38. MPA-Seminar, 1.-2. Oktober 2012, Stuttgart

[10] Schuler X., Herter K.-H., Rudolph J.: Derivation of design fatigue curves for austenitic stainless steel grades 1.4541 and 1.4550 within the German nuclear safety standard KTA 3201.2, 2013 ASME Pressure Vessel and Piping Conference, PVP2013-97138, Paris

[11] Waidele H., Weißenberg T. : Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken, Arbeitspaket 3, Einfluss des Reaktorkühlmediums auf das Ermüdungsverhalten austenitischer Rohrleitungen, BMU-Vorhaben SR 2501, MPA Universität Stuttgart, November 2007

[12] Weißenberg T.: Ermüdungsverhalten ferritischer Druckbehälter- und Rohrleitungsstähle in sauerstoffhaltigem Hochtemperaturwasser, Abschlussbericht, BMWi Reaktorsicherheitsforschung - Kennzeichen 1501309, MPA Universität Stuttgart, September 2009

[13] Weißenberg T.: Rissverhalten ferritischer Druckbehälterstähle in sauerstoffhaltigem Hochtemperaturwasser bei transienten Vorgängen, Risskorrosion Phase 1: Rissinitiierung und Risswachstum, Teilbericht A: Experimentelle Risskorrosionsuntersuchungen, Abschlussbericht, Forschungsvorhaben 1501319, MPA Universität Stuttgart, August 2010

[14] Weißenberg T.: Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken, Arbeitspaket 3.1, Untersuchung des Einflusses von Reaktorkühlmedium auf das Ermüdungsverhalten austenitischer CrNi-Stähle, BMU-Vorhaben SR0801312, MPA Universität Stuttgart, Juni 2011

[15] EPRI Technical Report No. 1023012, Environmentally Assisted Fatigue Gap Analysis and Roadmap for Future Research, Gap Analysis Report, Final Report, December 2011, EPRI, Palo Alto, CA: 2011.1023012

[16] EPRI Technical Report No. 1025823, Guidelines for Addressing Environmental Effects in Fatigue Usage Calculations, Final Report, December 2012, EPRI, Palo Alto, CA: 2012.1025823

[17] Stevens G.L.: Summary of NUREG/CR-6909, Rev. 1 and Suggestions for Future EAF Work, February 12, 2013, ASME Section III Subgroup on Fatigue Strength, Los Angeles, CA

[18] Regulatory Guide 1.207: Guidelines for evaluating fatigue analyses incorporating the life reduction of meatal components due to the effects of the light-water reactor environment for new reactors, U.S. NRC, March 2007

[19] Hälbig J., Ilg U., König G., Reese S.: Ermüdungskurven für austenitische Strukturwerkstoffe im Geltungsbereich des KTA-Regelwerkes unter Berücksichtigung des aktuellen Kenntnisstandes. Design Fatigue Curves for austenitic stainless steel structures in accordance with the German KTA Safety Standards considering the current knowledge. 37. MPA-Seminar, 6.-7. Oktober 2011, Stuttgart)

[20] Solin J., Reese S.H., Mayinger W.: Fatigue Performance of Stainless Steel in NPP Service Conditions. PVP2012-78721. Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Division Conference PVP2012, July 15-19, 2012, Toronto, Ontario, Canada

[21] Roth A., Devrient B.: Environmental Effects on Fatigue – Possible Reasons for the Apparent Mismatch Between Laboratory Test Results and Operational Experience. Fontevraud 7. 26.-30. September 2010, Paper Reference No A031-T05

[22] Roth A.: News From Hold-Time-Effects in Fatigue. Workshop, Ermüdungsverhalten von Bauteilen unter Berücksichtigung des Mediumeinflusses, 8. Juni 2011. MPA Stuttgart

[23] De Baglion L., Mendez J., Le Duff J.-A., Lefrançois A.: Influence of PWR Primary Water on LCF Behavior of Type 304L Austenitic Stainless Steel at 300 °C – Comparison with Results obtained in Vacuum or in Air. PVP2012-78767. Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Conference PVP2012, July 15-19, 2012, Toronto, Ontario, Canada

[24] Reese S.H., Solin J., Klucke D., Karabaki H. E.: Fatigue performance of stabilized austentic stainless steels in terms of environmental fatigue factors, temperature and hold time effects. Jahrestagung Kerntechnik 2013, 14.-16. Juni 2013, Berlin

[25] Le Duff J.-A., Lefrançois A., Vernot J.P.: Effects of Surface Finish and Loading Conditions on the Low Cycle Fatigue Behavior of Austenitic Stainless Steel in PWR Environment. Comparison of LCF Test Results with NUREG/CR-6909 Life Estimations. PVP2008-61894. Proceedings of PVP2008 2008 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 27-31, 2008, Chicago, Illinois, USA

[26] Le Duff J.-A., Lefrançois A., Vernot J.P.: Effects of Surface Finish and Loading Conditions on the Low Cycle Fatigue Fatigue Behavior of Austenitic Stainless Steel in PWR Environment for various Strain Amplitude Levels. PVP2009-78129. Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conference PVP2009, July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic

[27] Le Duff, J.-A.; Lefrançois, A.; Vernot, J.P.; Bossu, D.: Effect of loading signal shape and of surface finish on the low cycle fatigue behavior of 304L stainless steel in PWR environment. PVP2010-26027. Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels & Piping Division / K-PVP Conference PVP2010, July 18-22, 2010, Bellevue, Washington, USA

[28] Courtin, S.; Lefrançois, A.; Le Duff, J.-A.; Le Pécheur, A.: Environmentally Assisted Fatigue Assessment considering an alternative Method to the ASME Code Case N-792. PVP2012-78088. Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Conference PVP2012, July 15-19, 2012, Toronto, Ontario, Canada

Zu Abschnitt 7.11 „Spannungs-, Verformungs- und Ermüdungsanalysen für Flanschverbindungen“

Im Abschnitt 7.11, der bisher nur die Spannungs- und Ermüdungsanalyse für Schrauben behandelte, wurde die Durchführung von Spannungs-, Verformungs- und Ermüdungsanalysen für Flanschverbindungen in Anlehnung an KTA 3201.2 (1996-06) neu geregelt. Hierbei wurden die Anforderungen an die aktualisierten Abschnitte A2.9 bis A2.11 angepasst, die auch die Spannungsanalyse für Flansche und Schrauben abdecken und immer gesicherte Angaben des Dichtungsherstellers fordern.

Zu Abschnitt 7.12 „Vermeidung des Versagens infolge thermisch bedingter fortschreitender Deformation für Bauteile der Prüfgruppe A1“

(1) Der Abschnitt 7.12 wurde aus KTA 3201.2 (1996-06) übernommen, wobei die Anwendung auf Bauteile der Prüfgruppe A1 eingeschränkt wurde und die Gleichungen zur Ermittlung des plastischen Dehnungsinkrements $\Delta\varepsilon$ beim vereinfachten Nachweis durch Fallunterscheidungen so umgestellt wurden, dass keine negativen Einzelanteile mehr auftreten können. Sie sind somit für den Anwender eindeutig formuliert.

Damit werden für bestimmte Anwendungsfälle konservative Abschätzverfahren vorgegeben und die bisher nur allgemeine Forderung zum Nachweis der Vermeidung des Versagens infolge thermisch bedingter fortschreitender Deformation spezifiziert. Die Abschätzverfahren beruhen auf den im ASME-Code (NB 3228 und Code Case N 47) angegebenen Verfahren. Die Anwendung wird auf die Prüfgruppe A1 beschränkt, da hier die erforderlichen detaillierten Nachweise vorliegen.

(2) Als mögliche Alternative sowohl für die Ermüdungsanalyse als auch den Ratchetingnachweis kommt darüber hinaus die Anwendung der Vereinfachten Fließzonentheorie in Betracht (siehe hierzu z. B. H. HÜBEL: Vereinfachte Fließzonentheorie, Bauingenieur Bd. 73, 1998, Nr. 11, S. 492-502).

Zu Abschnitt 8.1 „Komponentenspezifische Analyse des mechanischen Verhaltens; Allgemeines“

(1) In Absatz 1 wurde klargestellt, dass alle in Abschnitt 8 angegebenen komponentenspezifischen Analysen und Festigkeitsnachweise anerkannte und gebräuchliche Berechnungsverfahren darstellen und, wenn mehrere Verfahren angegeben sind, alle angegebenen Verfahren innerhalb ihrer Anwendungsgrenzen gleichwertig zugelassen sind.

(2) Der Absatz 4 wurde um die Forderung ergänzt, dass die Einflüsse von nicht oder nur einseitig bearbeiteten Schweißnähten auf die Ermüdungsfestigkeit im Rahmen von Ermüdungsanalysen zu berücksichtigen sind.

Zu Abschnitt 8.2 „Behälter“

(1) Da eine Dimensionierung von Stutzen für Innendruck nicht zwingend nach den Gleichungen des Anhangs A 2.8 erfolgen muss, wurden die Formulierungen in den Abschnitten 8.2.1.2 und 8.2.1.3 entsprechend präzisiert.

(2) Der Abschnitt 8.2.5 wurde an das aktuelle AD-Regelwerk angepasst. Da die Dimensionierung von Balgkompensatoren nach dem AD-Regelwerk erfolgt und alle Dimensionierungsanforderungen von dort in KTA 3211.2 übernommen wurden, konnte der bisher in Abschnitt 8.2.5.3.1 enthaltene Verweis auf Abschnitt 6.1 ersatzlos gestrichen werden.

Die Änderungen in den Gleichungen 8.2-6, 8.2-7 und 8.2-12 wurden aufgrund unterschiedlicher Maßeinheiten in KTA 3211.2 und AD 2000-Merkblatt B 13 vorgenommen.

(3) In Abschnitt 8.2.6 „Wärmetauscherböden“ wurde als Absatz 8.2.6 (4) die Forderung neu aufgenommen, dass bei einem Druck in den Rohren größer als der doppelte Wert des Druckes um die Rohre ($p_2 > 2 \cdot p_1$) nachgewiesen werden muss, dass der Mantel die daraus resultierende Axialkraft zusätzlich aufnehmen kann (Anpassung an die aktuelle Ausgabe des AD 2000-Merkblatts B 5).

Zu Abschnitt 8.3 „Pumpen“

In Abschnitt 8.3.2.2.2 Absatz 3 wurde neu aufgenommen, dass die Ermittlung der Vergleichsspannungen sowohl nach

der Festigkeitshypothese nach Tresca als auch nach der von-Mises-Hypothese erfolgen kann.

Zu Abschnitt 8.4 „Armaturengehäuse“

(1) An mehreren Stellen wurden klarstellende Präzisierungen der Formulierungen und eine Anpassung der Gleichungen an die in den Bildern dargestellten Angaben vorgenommen.

(2) Der in Abschnitt 8.4.3 aufgenommene (aus dem ASME-Code übernommene) Primärspannungsnachweis für Armaturengehäuse wird für erforderlich gehalten, da das vereinfachte komponentenspezifische Verfahren zum Spannungs- und Ermüdungsnachweis als ein in sich geschlossenes Verfahren aus dem ASME-Code übernommen wurde. Die Dimensionierung von Armaturengehäusekörpern nach Anhang A 4 basiert hingegen auf der Norm DIN EN 12516-2. Die vereinfachte Spannungs- und Ermüdungsanalyse nach Abschnitt 8.4.7.2 kann auf einen nach Anhang A 4 dimensionierten Armaturengehäusekörper nicht ohne weiteres angewandt werden.

Die Festlegungen in Abschnitt 8.4.3 (4) und in Bild 8.4-1 (Teilbild b) stellen eine Verschärfung gegenüber dem ASME Code dar. Sie werden für erforderlich gehalten, da die tragende Fläche des Flanschblattes nicht sowohl bei der Dimensionierung des Gehäuses als auch bei der Dimensionierung des Flansches herangezogen werden kann.

(3) In die pauschale Spannungsanalyse (Abschnitt 8.4.4) wurde für die Beanspruchungsstufen 0, A und B entsprechend der Vorgehensweise im französischen RCC-M-Code außer dem Spannungsanteil aus Rohrleitungsbelastungen P_{eb} auch der primäre Innendruck-Anteil P_{Ip} aufgenommen - Gleichung (8.4-4). Die konstruktiven Anforderungen für die Durchführung der pauschalen Spannungsanalyse wurden durch Eintragung der entsprechenden Größen in Bild 8.4-5 präzisiert (Durchmesser und Wanddicke des Armaturengehäuses müssen größer sein als beim Rohrleitungsanschluss).

(4) Nach Auswertung der Erfahrungen bei der Anwendung der KTA 3201.2 (1996-06) wurde festgestellt, dass die Anwendung der pauschalen Spannungsanalyse auch für Eckventile zugelassen werden kann, sofern keine wesentliche gegenseitige Beeinflussung der Stutzen vorliegt. Nach vorliegenden Erfahrungen aus der Auswertung von Finite-Elemente-Berechnungen ist die gegenseitige Beeinflussung bei prismatischen Gehäusen gering. Die konstruktiven Voraussetzungen für die Anwendung der Tabelle 8.4-2 wurden deshalb entsprechend geändert.

(5) Da in der Stufe 0 nur eine Bewertung der primären Membranspannung erfolgt, wurde in Abschnitt 8.4.4 (2) und in Tabelle 8.4-2 die Anforderung für die Stufe 0 gestrichen.

Zu Abschnitt 8.5 „Rohrleitungen“

(1) In Abschnitt 8.5.1 wurden die Voraussetzungen zur Anwendung des Abschnitts 8.5 präzisiert. Ziel der Festlegungen in Abschnitt 8.5.1 ist sicherzustellen, dass in jedem Fall eine Bemessung der Rohrleitungsbauteile zur Aufnahme des Innendruckes erfolgt (Umfangsspannung). Die in Abschnitt 8.5 enthaltenen Nachweise behandeln in den Gleichungen (8.5-1) bis (8.5-6) im Wesentlichen die Spannungsanteile aus der Innendrucklängsspannung in Verbindung mit Zusatzspannungen aus thermischen und mechanischen Lasten. Die Anwendbarkeit dieser Gleichungen hängt von der Einhaltung der im Abschnitt 8.5 jeweils mit enthaltenen Geometriebedingungen ab. Eine Bindung an ein bestimmtes Bemessungsverfahren zur Festlegung der Wanddicke der Rohrleitungsbauteile über die allgemeinen Festlegungen im Abschnitt 6 hinaus ist nicht erforderlich, da das Verhältnis aus Spannungserhöhungsfaktor zur Grundspannung über die in Abschnitt 8.5 enthaltenen Festlegungen vollständig beschrieben ist und damit die Einhaltung der zulässigen Spannungen entsprechend den genannten Gleichungen sichergestellt wird.

(2) Mit den Anforderungen in Abschnitt 8.5.1 (6) und in Bild 8.5-1 wurden Regelungen für Induktivbiegungen neu aufgenommen, mit denen Wanddickenumlagerungen an Induktivbiegungen bei der komponentenspezifischen Analyse des mechanischen Verhaltens berücksichtigt werden. Die Vorgaben gelten unter der Voraussetzung, dass die Abmessungen nach KTA 3211.3 Abschnitt 9.3.3.4 (5) a) (Standardinduktivbiegungen) einhalten werden. Bei Induktivbiegungen, die diese Vorgaben nicht einhalten, erfolgt die Berücksichtigung der Aufstauchung über die in den Abschnitten 8.5.2.1 und 8.5.3.1 ergänzte Definition der Wanddicke s_c.

(3) Da der Abschnitt 8.5 für Rohrleitungssysteme konzipiert ist, wurde in den Abschnitten 8.5.2.3 und 8.5.3.3 klargestellt, dass der Spannungsbeiwert bei einer - eigentlich nicht vorgesehenen - Anwendung der Gleichung (8.5-1) auf ein einzelnes gerades Rohr zu modifizieren ist.

(4) Im Abschnitt 8.5.2.4.2 wurde die Forderung nach Berücksichtigung

a) von Momentenanteile aus Zwängungen infolge unterschiedlicher Gebäudebewegungen, die auf einen Rohrstrang wirken können,

b) der Belastungen infolge thermischer Schichtenströmung

neu aufgenommen. Die in der Literatur [9] enthaltene Vorgehensweise stellt ein vereinfachtes und unter Umständen sehr konservatives Verfahren dar. Sofern Kenntnisse über die vorliegenden Trennschichthöhen und -breiten vorhanden sind, ist anstelle der vereinfachten Vorgehensweise auch ein detaillierterer Nachweis möglich, bei dem sich entsprechend genauere Spannungswerte ergeben.

(5) Im Abschnitt 8.5.2.4.6 „Ermittlung der Temperaturschwingbreiten“ wurde klargestellt, dass eine zeit- und ortsabhängige Betrachtung zugelassen ist. Im Bild 8.5-2 wurden einige Präzisierungen vorgenommen.

(6) Im Abschnitt 8.5.2.9.1 wurde klargestellt, dass die Vergleichsspannungen gemäß Tabelle 7.7-4 zu begrenzen sind.

(7) Im Abschnitt 8.5.2.9.2 wurde ergänzt, dass die Anwendbarkeit der Spannungsbeiwerte auf Biegungen mit Wanddickenaufstauchungen größer als 15 %, bezogen auf die Nennwanddicke, (Induktivbiegungen) im Einzelfall nachzuweisen ist. Es ist vorgesehen, die Anwendbarkeit der Spannungsbeiwerte auf Induktivbiegungen durch Vergleichsrechnungen zu prüfen und auf dieser Basis eine Präzisierung der Anforderung vorzunehmen.

(8) Der Spannungsbeiwert C_3 in Zeile 1 der Tabelle 8.5-1 (gerades Rohr ohne Schweißnähte oder Störstellen) wurde an die Zeile 2 (stumpfgeschweißte Umfangsnähte) angeglichen und mit dem Wert 0,6 festgelegt. Diese Festlegung erfolgte abweichend vom ASME Code und nach Rückfrage beim zuständigen ASME-Committee, da sie physikalisch zutreffend ist.

Der Spannungsbeiwert B_1 für Bögen oder Biegungen wurde übereinstimmend mit dem aktuellen ASME Code festgelegt.

Die in Tabelle 8.5-1 angegebenen Korrekturfaktoren für die B_2-Beiwerte für Rohrleitungen mit $50 < d_a/s_c \leq 100$ wurden dem ASME Code, Fig. NC-3673.2(b)-1 (Note 3) entnommen und beheben den bisherigen Mangel, dass für dünnwandige Rohrleitungen mit $d_a/s_c > 50$ bisher keine B_2-Beiwerte verfügbar waren. Damit ist auch Frage nach der Verwendbarkeit der i-Faktoren für den Nachweis von primären Spannungen für Rohrleitungen mit $50 < d_a/s_c \leq 100$ weitgehend geklärt. Die angegebenen Korrekturen berücksichtigen das im Vergleich zu Rohrleitungen mit $d_a/s_c \leq 50$ andere Versagensverhalten dünnwandiger Rohrleitungen mit $d_a/s_c > 50$. Zahlreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen zeigen, dass Rohre mit $d_a/s_c < 30$ das plastische Moment erreichen, wobei ein großes plastisches Plateau in den Momenten-Verdrehungs-Verläufen und nur kleine Ovalisierungen auftreten. Die Rohre versagen letztlich mit einem glatten Knick. Bei

d_a/s_c-Verhältnissen zwischen 30 und 70 treten erhebliche Ovalisierungen und eine geringe Plastifizierung auf. Im Bereich $d_a/s_c > 70$ versagen die Rohre durch Beulen mit mehreren Falten vor Erreichen der Streckgrenze.

(9) Der Abschnitt 8.5.2.10 „Flexibilitätsfaktoren für die Systemanalyse“ wurde durch den Abschnitt 8.4.9 „Flexibilitäts- und Spannungserhöhungsfaktoren“ aus KTA 3201.2 (1996-06) ersetzt. Hierbei wurden folgende Aktualisierungen eingearbeitet:

a) Um die nach der bisherigen Regelung in einigen Fällen (in den Übergangsbereiche der Gleichungen zur Ermittlung der K-Faktoren) auftretenden großen Sprünge in den K-Faktoren zu vermeiden, wurde nach Auswertung umfangreicher Finite-Elemente-Analysen festgelegt, die K-Faktoren für die Übergangsbereiche durch lineare Interpolation zu ermitteln.
b) Die Primärspannungen dürfen nicht unter dem Wert des geraden ungestörten Rohres liegen. Bei kleinen Spannungsbeiwerten C_{2m} kann durch den Faktor 0,67 eine geringere Spannung als im geraden Rohr errechnet werden. Deshalb wurden die Gleichungen 8.5-83 und 8.5-84 so ergänzt, dass mindestens der Wert $1,0 \cdot M_{il}$ zu verwenden ist.

(10) Im Abschnitt 8.5.3 sind die auf i-Faktoren beruhenden Nachweise für die primären Spannungen in Rohrleitungen der Prüfgruppen A2 und A3 entfallen (Gleichungen 8.5-91 und 8.5-93 in der Regelfassung 1992-06). Die Primärspannungsnachweise können vollständig auf Grundlage der Spannungsbeiwerte geführt werden. Auf i-Faktoren beruhende Primärspannungsnachweise werden für dünnwandige Rohrleitungen als nicht sachgerecht angesehen.

Zu Abschnitt A 2.5 „Gewölbte Böden“

Der Abschnitt A 2.5.2.4 (3) wurde zusammen mit dem Bild A 2.5-6 gestrichen, da das aus dem früheren AD Merkblatt B3 entnommene Nachweisverfahren sich als nicht geeignet erwiesen hat und im Anwendungsbereich der KTA 3201.2 mit $s_{0n}/d_a \geq 0,001$ ein elastisches Einbeulen in der Krempe unter Innendruckbelastung nicht zu erwarten ist (vergleiche H. Hey: Stabilitätsfragen bei Krempen, TÜ 1988-12, S. 408-413). Dementsprechend ist diese Nachweisforderung inzwischen auch in AD B3 nicht mehr enthalten.

Zu den Abschnitten A 2.9 „Schraubenverbindungen“ und A 2.10 „Flansche“

(1) Die Abschnitte A 2.9 und A 2.10 wurden zur Anpassung an den aktuellen Kenntnisstand ergänzt um

a) Festlegungen zur Berechnung von Flanschverbindungen mit Dichtungen im Kraftnebenschluss,
b) Flussdiagramme, in denen die prinzipielle Vorgehensweise bei der Nachweisführung für Dichtungen im Krafthaupt- und im Kraftnebenschluss dargestellt ist.

Hierbei handelt es sich nicht um grundsätzlich neue Vorgehensweisen, sondern um die Einarbeitung der bisher üblichen Praxis unter Berücksichtigung der aktuellen DIN-EN-Normen.

(2) In den Abschnitten A 2.9.3 und A 2.10.2 „Allgemeines“ sind die erforderlichen Nachweisschritte entsprechend der Darstellung in den neu aufgenommenen Flussdiagrammen benannt.

Die Festlegung der für die verschiedenen Nachweisschritte zugrunde zu legenden Schraubenkräfte im Abschnitt A 2.9.3 (3) dient der erforderlichen Nachweissicherheit. Bei Kraftnebenschlussverbindungen berücksichtigen die Festlegungen, dass bei einer Schraubenzahl größer oder gleich 8 ein gleichmäßigeres Verformungsverhalten des Flanschblatts vorliegt.

(3) In Auswertung des VDI Berichtes 1903 „Schraubenverbindungen; Berechnung, Gestaltung, Anwendung“ (VDI-Verlag, Dresden 2005) wurde in Abschnitt A 2.9.3 alternativ die Nachweisführung nach VDI 2230 zugelassen und eine Anpassung der Gleichungen in Abschnitt A 2.9.4.5.2 vorgenommen, so dass zu den aktuellen Anforderungen nach VDI 2230 kein Widerspruch besteht. Als Folge der Anpassung an das Vorgehen nach VDI 2230 konnte die Berechnung der Gesamteinschraubtiefe unter Berücksichtigung der Gewindeaussenkung (Abschnitt A 2.9.4.3.5 in der Regelfassung 1992-06) entfallen.

(4) In den Gleichungen A 2.9-1, A 2.9-5, A 2.9-10, A 2.9-11 und A 2.9-16 sowie A 2.10-1 wurde der Sicherheitsbeiwert für die Dichtung S_D so entnommen bzw. zugefügt, dass dieser an der jeweils konkret zugehörigen Schraubenkraft berücksichtigt wird (Klarstellung, keine inhaltliche Änderung).

(5) In Gleichung A 2.9-9 ist die Abfrage nach der maximalen Kraft aus dem Rohrbiegemoment entfallen, da für die Abtragbarkeit von Reibkräften zur Aufnahme von Torsionsmomenten die Reibwirkung an der Dichtung maßgebend ist und somit der Dichtungsdurchmesser d_D wirksam wird.

(6) Der Abschnitt A 2.9.4.1 d) „Vorspannen von Schraubenverbindungen“ ist entfallen, da er inhaltlich im Abschnitt A 2.9.3.1 in den wesentlichen Punkten an übergeordneter Stelle aufgenommen ist.

(7) In den Gleichungen A 2.9-23, A 2.9-24 und A 2.9-25 zur Ermittlung der Schraubenkräfte bei Kraftnebenschlussverbindungen für das Einhalten der Blocklage im Betriebszustand wird zugrunde gelegt, dass die Reibkräfte über die metallische Auflage zwischen Dichtungs- und Flanschrand abgetragen werden, wobei konservativ eine linear angenommene Zunahme der Reibkraft von der Dichtung zum Flanschrand hin, die sich aus der Verdrehung der Flansche ergibt, berücksichtigt wird.

(8) Gleichung A 2.9-27 zur Ermittlung der Schraubenkraft bei Kraftnebenschlussverbindungen für das Erreichen der Blocklage im Einbauzustand wurde so ergänzt, dass auch Reibkräfte zur Abtragung von Torsionsmomenten und Querkräften berücksichtigt werden.

(9) Im Abschnitt A 2.9.4.5.1 (3) wurde neu aufgenommen, dass bei der Ermittlung der erforderlichen Einschraubtiefe die tatsächliche Schraubenkraft anstelle der auf die Zugfestigkeit bezogenen Schraubenkraft verwendet werden darf. Diese Regelung kann z. B. bei Sanierungsmaßnahmen zur Anwendung kommen, wenn Schrauben mit größerem Gewindedurchmesser eingesetzt werden.

(10) Für die Scherfestigkeit wird einheitlich der Wert „0,6“ verwendet. In den Gleichungen A 2.9-36, A 2.9-37 und A 2.9-39 wurde der bisher verwendete Wert „0,55“ in „0,6“ geändert und damit an die Gleichungen A 2.9-34 und A 2.9-35 angepasst.

(11) In den Bildern A 2.10-3, A 2.10-5 und A 2.10-6 wurde die Einleitung der Schraubenkraft in Übereinstimmung mit dem konventionellen Regelwerk dargestellt. Durch die geänderte Krafteinleitung wurde in Verbindung mit den konstruktiven Anforderungen in Abschnitt 5.2.4 eine konservative Festlegung getroffen.

(12) Zur Dimensionierung der Flanschverbindung mit Kraftnebenschluss wurde Gleichung A 2.10-46 neu aufgenommen. Sie dient zur Bestimmung der zulässigen Flanschdrehung, mit der eine ausreichende Dichtheit der Flanschverbindung erreicht wird. Maßgebend ist dabei der Rückfederungsspalt an der Dichtung $\Delta s_{1,2}$, der abhängig von der verwendeten Dichtung aus den Normen bzw. den Angaben des Dichtungsherstellers zu verwenden ist. Entsprechende Angaben sind zur Verfügung entsprechend Formblatt A 2.11-2.

Die Nachweise sind für den Einbauzustand, normalen und anormalen Betrieb sowie den Prüfzustand zu führen.

(13) Die Dichtheits- und Festigkeitsnachweise für Flanschverbindungen mit Kraftnebenschluss wurden auf der Grundlage der Nachweise für Krafthauptschlussverbindungen ergänzt. Der neu eingeführte Berechnungsalgorithmus basiert

im Wesentlichen auf dem Berechungsmodell, das auch der Nachweisführung für Krafthauptschlussverbindungen zugrunde liegt. Hierbei werden die Flansche als Stülpkörper bzw. lineare Drehfedern und die Schrauben als Längsfedern idealisiert. Der Drehpunkt der miteinander verschraubten Flansche verlagert sich bei Kraftnebenschlussverbindungen bei der Montage nach dem Erreichen der Blocklage in die Auflagefläche der beiden Flansche. Die sich belastungsabhängig einstellenden Flanschverdrehungen bewirken im Dichtungsbereich eine Spaltvergrößerung, die durch die Dichtungsrückfederung - bei einer linear-elastisch idealisierten Federkennlinie der Dichtung - ausgeglichen werden muss. Die neben der Dichtungskraft wirksame Kontaktkraft an der Auflagefläche stellt gegenüber dem mechanischen Verhalten der Gesamtverbindung bei Krafthauptschlussverbindungen eine Erweiterung dar, die in der Herleitung des neu eingeführten Algorithmus berücksichtigt wurde. Auf der Grundlage dieses Algorithmus kann analog zu den Nachweisführungen für Krafthauptschlussverbindungen für den Einbau- und Betriebszustand eine Nachprüfung der Kraft- und Verformungsverhältnisse erfolgen. Die Spaltöffnung infolge der sich gegenseitig verdrehenden Flanschblätter kann für den Einbau- und den Betriebszustand ermittelt und auf der Grundlage des Dichtungsdatenblattes bewertet werden.

(14) In den Abschnitt A 2.10.6.2.2.2 wurde die in DIN 2505 (Entwurf, Fassung April 1990) enthaltene Abgrenzung zwischen Flanschen mit kegeligem Ansatz und Flanschen ohne kegeligen Ansatz aufgenommen.

(15) Die Tabelle A 2.10-1 wurde so geändert, dass der Einbauzustand als separate Spalte erscheint und eine Angabe von zulässigen Spannungen für die Beanspruchungsstufe P nur im Prüfzustand erfolgt. Gleichzeitig wurde der Faktor Φ angepasst entsprechend der Formel in der DIN EN 1591, aus der der Faktor entnommen ist. Zusätzlich wurden die im Rahmen der verschiedenen Nachweisschritte zugrunde zu legenden Schraubenkräfte präzisiert.

(16) Weitere Ausführungen zu den Kraft- und Verformungsverhältnissen bei Flanschverbindungen mit Dichtungen im Kraftnebenschluss finden sich z. B. in den Arbeiten [1] bis [3].

[1] G. Müller: Überprüfung der Kraft- und Verformungsverhältnisse bei Flanschverbindungen mit Dichtungen im Kraftnebenschluss, Dichtungstechnik, Ausgabe 01/2011, Vulkan-Verlag Essen

[2] G. Müller: Vereinfachtes rechnerisches Verfahren zur Überprüfung der Kraft- und Verformungsverhältnisse bei Flanschverbindungen mit Dichtungen im Kraftnebenschluss, Sonderdruck, März 2011, TÜV NORD EnSys Hannover GmbH & Co. KG

[3] Forschungsbericht „Experimentelle Ermittlung der zulässigen Belastungen von Rohrleitungsflanschverbindungen DN100 mit der Dichtung im Kraftnebenschluss (KNS)“, SA-AT 19/08, Dezember 2010, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

Zu Abschnitt A 2.11 „Dichtungen“

(1) Der Abschnitt A 2.11 „Dichtungen“ wurde grundlegend überarbeitet und an den aktuellen Kenntnistand angepasst. Es wurde für sinnvoll erachtet, auf eine Verwendung der nach DIN 28090-1 (1995-09) „Statische Dichtungen für Flanschverbindungen - Teil 1: Dichtungskennwerte und Prüfverfahren“ ermittelten Dichtungskennwerte überzugehen. Es wird davon ausgegangen, dass künftig eine Kennwertzusammenstellung entsprechend den vorgegebenen Formblättern bereitgestellt wird.

(2) Die Kennwertdefinitionen für Dichtungen im Krafthauptschluss wurden aus DIN 28090-1 (1995-09) übernommen.

(3) Die bisherige Tabelle A 2.11-1 wurde gestrichen und durch ein Muster für eine Kennwertzusammenstellung ersetzt (Formblätter A 2.11-1 und A 2.11-2).

(4) Weitere Ausführungen zur Anwendung des Abschnitts A 2.11 finden sich z. B. in den Arbeiten:

a) H. Kockelmann, J. Bartonicek, E. Roos: Characteristics of gaskets for bolted flanged connections - present state of the art, The 1998 ASME/JSME Joint Pressure Vessel and Piping Conference, San Diego, California; July 26-30, 1998, PVP-Vol. 367, pp. 1/10

b) H. Kockelmann: Leckageraten von Dichtungen für Flanschverbindungen, Rohrleitungstechnik, 7. Ausgabe (1998), S. 194/216, Vulkan-Verlag Essen

c) H. Kockelmann, R. Hahn, J. Bartonicek, H. Golub, M. Trobitz, F. Schöckle: Kennwerte von Dichtungen für Flanschverbindungen, 25. MPA-Seminar, 7. und 8. Oktober 1999, Stuttgart

d) H. Kockelmann, J. Bartonicek, R. Hahn, M. Schaaf: Design of Bolted Flanged Connections of Metal-to-Metal Contact Type, ASME PVP Conference 2000, July 23-27, 2000, Seattle, USA

e) H. Kockelmann, Y. Birembaut: Asbestos Free Materials for Gaskets for Bolted Flanged Connections, Synthesis Report of the Brite Euram Project BE 5191 Focusing on Gasket Factors and Associated Gasket Testing Procedures, 4th International Symposium on Fluid Sealing, 17-19 Septembre 1996, Mandelieu/France

Zu Abschnitt A 4 „Armaturen“

Die Gleichung A 4.1-23 wurde an die entsprechende Gleichung in DIN EN 12516-2 angepasst.

Zu Anhang B „Anforderungen an den Primärspannungsnachweis bei erneuten rechnerischen Nachweisen“

(1) In der Praxis werden die für den Neubau von Komponenten geltenden KTA-Regeln 3201.2 und 3211.2 auch für bestehende, bereits rechnerisch nachgewiesene Komponenten angewandt, um die Einhaltung der gemäß dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderlichen Schadensvorsorge zeigen zu können. Die Notwendigkeit zur Durchführung von erneuten rechnerischen Nachweisen ergibt sich beispielsweise, wenn

a) sich die bestehende Komponente im Auswirkungsbereich von Austauschmaßnahmen befindet und die Zulässigkeit von geänderten Anschlusslasten, z. B. infolge des geänderten Eigengewichts der ausgetauschten Komponente, nachzuweisen ist,

b) an der bestehenden Komponente Beschleifungsmaßnahmen (z. B. zur Herstellung der Prüffähigkeit für wiederkehrende Prüfungen) durchgeführt worden sind, die eine Wanddickenunterschreitung zur Folge hatten,

c) sich neue Erkenntnisse zu den nachzuweisenden Lasten oder der gegebenen Beanspruchbarkeit der nachzuweisenden Komponente ergeben haben.

(2) Erforderliche Anpassungen gegenüber dem Stand der Genehmigung, die sich aufgrund von aktualisierten Anforderungen aus dem Stand von Wissenschaft und Technik bezüglich des Nachweises „Analyse des mechanischen Verhaltens“ ergeben, sind in der Praxis durch begrenzte Anlagen-Änderungen meist relativ einfach vorzunehmen (z. B. Optimierung des Halterungssystems oder Anpassungen der Fahrweise oder Wasserchemie). Dagegen sind Anpassungen aus aktualisierten Anforderungen an die Konstruktion und an die Dimensionierung von Komponenten meist nur durch einen Komplett-Austausch der betroffenen Komponenten möglich.

(3) Mit der Dimensionierung gemäß Abschnitt 6 (Anforderungen der Stufe 0) werden die Mindestanforderungen an die Abmessungen der Bauteile festgelegt, darüber hinausgehende Anforderungen an die Abmessungen können sich aus Einwirkungen der Beanspruchungsstufen A, B, C, D oder P ergeben. Mit der Stufe 0 ist es im Rahmen der Errichtung einer Anlage möglich, die insgesamt erforderlichen Festig-

keitsnachweise zeitlich zu staffeln. In einem ersten Schritt erfolgt mit den Daten der Stufe 0 und P die Komponentendimensionierung, die im Allgemeinen Voraussetzung für die Fertigungsfreigabe ist. In einem zweiten Schritt ist die Spannungsanalyse mit den Daten der Stufen A, B, C und D durchzuführen, die bis zur Druckprüfung vorliegen sollte. Zur Vereinfachung und Minimierung des rechnerischen Aufwandes werden in den Stufen A, B, C und D im Regelfall nur die Längsspannungen betrachtet. Die Umfangsspannungen werden bereits in der Stufe 0 begrenzt.

(4) Vor dem Hintergrund, dass in der Praxis der Dimensionierungs-Schritt im Rahmen der Errichtung mit Konservativitäten erfolgt, die u. a. auch Planungsunsicherheiten bei der Anlagenerrichtung abdecken sollen, müssen die Dimensionierungs-Anforderungen gemäß Abschnitt 6 bei erneuten Primärspannungsnachweisen nicht unbedingt erfüllt sein, um eine ausreichende Schadensvorsorge gemäß dem Stand von Wissenschaft und Technik zu gewährleisten. Deshalb sind bei erneuten rechnerischen Nachweisen, bei denen die Planungsunsicherheiten der Erstauslegung der Anlage nicht mehr gegeben sind, andere Wege zulässig, die ausreichende Dimensionierung nachzuweisen. D. h., der Primärspannungsnachweis kann unter Würdigung des Kenntnisstandes zum Nachweiszeitpunkt in der im Anhang B beschriebenen Weise erfolgen, um die geforderte ausreichende Schadensvorsorge gemäß dem Stand von Wissenschaft und Technik nachzuweisen. Hierbei wird berücksichtigt, dass Auslegungsdruck und -temperatur abdeckend für die Stufe A sein müssen, dass die Lasten der Stufe 0 und A im Grenzfall also identisch sein dürfen. Diese Bedingung stimmt inhaltlich mit den Festlegungen im aktuellen ASME BPVC 2010, Section III, Division 1, Subsection NC, Article NC-3112 und Subsection NCA, Article 2142.1 überein. Somit ist aus dem Regelwerk keine zusätzliche Sicherheit durch die Anwendung der Stufe 0 im Vergleich zur Anwendung der Stufe A quantifizierbar.

(5) Um entsprechende Bewertungsmaßstäbe zur Verfügung zu stellen, wurden qualitative und methodische Anforderungen an den Primärspannungsnachweis bei erneuten rechnerischen Nachweisen als Anhang B neu aufgenommen.