

Sonderfälle	Bewertung von Spannungen bei rechnerischen und experimentellen Spannungsanalysen	AD 2000-Merkblatt S 4
--------------------	---	----------------------------------

Die AD 2000-Merkblätter werden von den in der „Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter“ (AD) zusammenarbeitenden, nachstehend genannten sieben Verbänden aufgestellt. Aufbau und Anwendung des AD 2000-Regelwerkes sowie die Verfahrensrichtlinien regelt das AD 2000-Merkblatt G1.

Die AD 2000-Merkblätter enthalten sicherheitstechnische Anforderungen, die für normale Betriebsverhältnisse zu stellen sind. Sind über das normale Maß hinausgehende Beanspruchungen beim Betrieb der Druckbehälter zu erwarten, so ist diesen durch Erfüllung besonderer Anforderungen Rechnung zu tragen.

Wird von den Forderungen dieses AD 2000-Merkblattes abgewichen, muss nachweisbar sein, dass der sicherheitstechnische Maßstab dieses Regelwerkes auf andere Weise eingehalten ist, z.B. durch Werkstoffprüfungen, Versuche, Spannungsanalyse, Betriebserfahrungen.

Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e.V. (FDBR), Düsseldorf

Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften e.V., Sankt Augustin

Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI), Frankfurt/Main

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA), Fachgemeinschaft Verfahrenstechnische Maschinen und Apparate, Frankfurt/Main

Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), Düsseldorf

VGB PowerTech e.V., Essen

Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e.V. (VdTÜV), Essen

Die AD 2000-Merkblätter werden durch die Verbände laufend dem Fortschritt der Technik angepasst. Anregungen hierzu sind zu richten an den Herausgeber:

Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e.V., Postfach 10 38 34, 45038 Essen.

Inhalt

- | | |
|--|---|
| 0 Präambel | 5 Spannungsüberlagerung und Spannungsbeurteilung |
| 1 Geltungsbereich | 6 Begrenzung der Vergleichsspannungen und der Vergleichsspannungsschwingbreiten |
| 2 Bezeichnungen und Begriffsbestimmungen | 7 Schrifttum |
| 3 Allgemeine Festlegungen | |
| 4 Spannungsanalyse, Spannungs-kategorien | |

0 Präambel

Zur Erfüllung der grundlegenden Sicherheitsanforderungen der Druckgeräte-Richtlinie kann das AD 2000-Regelwerk angewandt werden, vornehmlich für die Konformitätsbewertung nach den Modulen „G“ und „B + F“.

Das AD 2000-Regelwerk folgt einem in sich geschlossenen Auslegungskonzept. Die Anwendung anderer technischer Regeln nach dem Stand der Technik zur Lösung von Teilproblemen setzt die Beachtung des Gesamtkonzeptes voraus.

Bei anderen Modulen der Druckgeräte-Richtlinie oder für andere Rechtsgebiete kann das AD 2000-Regelwerk sinngemäß angewandt werden. Die Prüfständigkeit richtet sich nach den Vorgaben des jeweiligen Rechtsgebietes.

1 Geltungsbereich

1.1 Dieses AD 2000-Merkblatt enthält Kriterien zur Bewertung von Spannungen. Es kann in den Fällen angewendet werden, in denen der Beanspruchungszustand des Bauteils auf der Grundlage eines linear-elastischen Spannungs-Dehnungszusammenhangs berechnet worden ist. Es gilt auch

für die Bewertung gemessener Beanspruchungszustände, sofern dabei – abgesehen von örtlich beschränkten Teilplastifizierungen im Querschnitt – ein linear-elastisches Werkstoffgesetz insbesondere nach wiederholter Belastung erkennbar ist. Diese Kriterien sind anzuwenden, wenn das AD 2000-Regelwerk keine zutreffenden Regelungen enthält, siehe z. B. AD 2000-Merkblatt B 0 Abschnitt 2.2. Hiermit sind andere Nachweismöglichkeiten nicht ausgeschlossen. Bei auf der Grundlage von elastoplastischen Analysen ermittelten Spannungen können diese Kriterien nicht ohne weiteres zu deren Bewertung herangezogen werden.

1.2 Die in diesem AD 2000-Merkblatt angegebenen Kriterien der Spannungsbeurteilung gelten für Bauteile von Behälter-, Kessel-, Tank- und Rohrleitungsanlagen, soweit sich diese als ebene oder gekrümmte Flächentragwerke (bestehend aus isotropen Scheiben, Platten oder Schalen) oder als räumliche Stabwerke (bestehend aus Rohren oder aus Stäben mit rechteckigen oder runden Vollquerschnitten) darstellen lassen.

1.3 Die Spannungen können z. B. durch Über- bzw. Unterdrücke, äußere Kräfte und Momente, Massenkräfte sowie behinderte Wärmedehnung hervorgerufen werden.

Die AD 2000-Merkblätter sind urheberrechtlich geschützt. Die Nutzungsrechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, die Wiedergabe auf fotomechanischem Wege und die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei auszugsweiser Verwertung, dem Urheber vorbehalten.

1.4 Die hier getroffenen Festlegungen gelten für die im Druckbehälterbau zugelassenen Stähle. Bei der Übertragung auf andere metallische Werkstoffe, z. B. Nichtisenmetalle, sind die spezifischen Eigenschaften zu berücksichtigen.

1.5 Die auftretenden Bauteiltemperaturen (Wandungstemperaturen) liegen im Bereich zeitunabhängiger Festigkeitskennwerte.

1.6 Die Anforderungen des AD 2000-Regelwerkes hinsichtlich verwendeter Werkstoffe, Herstellung, Verarbeitung sowie erstmaliger und wiederkehrender Prüfungen müssen eingehalten werden.

1.7 Versagensarten

1.7.1 Bei Einhaltung der in diesem AD 2000-Merkblatt enthaltenen Kriterien zur Spannungsbegrenzung werden folgende Versagensarten vermieden:

- Zähes Bruchversagen und unzulässige Werkstoffverformung durch mechanische Überlastung,
- schrittweiser Dehnungszuwachs durch zyklische Belastung,
- Ermüdungsbruch durch Überschreiten der Zeit- oder Dauerfestigkeit (in Verbindung mit AD 2000-Merkblatt S 1 oder S 2).

1.7.2 Die Einhaltung der Spannungsbewertungskriterien nach Abschnitt 4 beinhaltet keine Absicherung gegen die nachfolgend genannten Versagensarten; diese müssen zusätzlich überprüft werden:

- Instabilität,
- Sprödbbruch,
- Zeitstandbruch,
- Hochtemperaturermüdung,
- Spannungsrisskorrosion,
- Schwingungsrisskorrosion.

2 Bezeichnungen und Begriffsbestimmungen

e	Berechnungswanddicke an der betrachteten Stelle (vgl. AD 2000-Merkblatt S 3/0)	in mm
f	zulässige Berechnungsspannung (vgl. AD 2000-Merkblatt S 3/0)	in N/mm ²
F	Spannungsspitze	in N/mm ²
P	primäre Spannung	in N/mm ²
P_e	Zwängungsspannungen, z. B. durch behinderte Wärmedehnung hervorgerufene Membran- und/oder Biegespannungen	in N/mm ²
P_b	primäre Biegespannung	in N/mm ²
P_l	primäre lokale Membranspannung	in N/mm ²
P_m	primäre globale Membranspannung	in N/mm ²
Q	sekundäre Spannung	in N/mm ²
R	kleinster Krümmungsradius der Schale an der betrachteten Stelle	in mm
$R_{p0,2} \text{ , } R_{p1,0}$	0,2 bzw. 1,0%-Dehngrenze (Mindestwerte)	in N/mm ²
$\sigma_{1,2,3}$	Hauptspannungen	in N/mm ²
$\sigma_{x,y,z}$	Normalspannungen	in N/mm ²
σ_{\max}	größte Hauptspannung	in N/mm ²
σ_{\min}	kleinste Hauptspannung	in N/mm ²

$\sigma_{v, Tresca}$	Vergleichsspannung nach <i>Tresca</i>	in N/mm ²
$\sigma_{v, v.Mises}$	Vergleichsspannung nach <i>v. Mises</i>	in N/mm ²
$\tau_{xy, yz, zx}$	Schubspannungskomponenten	in N/mm ²

3 Allgemeine Festlegungen

3.1 Zielsetzung

3.1.1 Mit der Analyse der Spannungen muss durch den Vergleich mit den zulässigen Spannungen nachgewiesen werden, dass die untersuchten Bauteile allen auftretenden Belastungen bei den verschiedenen Belastungsfällen (Betriebs-, Prüf-, Montage- und Sonderfälle gemäß AD 2000-Merkblatt S 3/0) standhalten.

3.1.2 Im Rahmen der durchzuführenden Analyse sind die Spannungen und erforderlichenfalls die Kraftgrößen und die Verformungen der zu untersuchenden Bauteile infolge von Belastungen unter Einhaltung der Randbedingungen und unter Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung ihrer Nachbarbauteile zu ermitteln. Diese Ermittlung darf rechnerisch oder experimentell oder in Kombination rechnerisch und experimentell erfolgen.

3.1.3 Die nach Abschnitt 3.1.2 ermittelten Spannungen sind hinsichtlich ihrer Zulässigkeit gemäß den Abschnitten 4, 5 und 6 zu überprüfen. Dabei ist zu beachten, dass die Genauigkeit der ermittelten Größen von der Güte der geometrischen Idealisierung 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.

3.2 Schweißnähte

Die zulässige Spannung in Schweißnähten ist entsprechend der Schweißnahtwertigkeit gemäß AD 2000-Merkblatt B 0 zu bestimmen.

3.3 Plattierungen

3.3.1 Bei der Bestimmung der erforderlichen Wanddicken und Querschnitte sind vorhandene Plattierungen in der Regel als nicht tragend anzusehen. Auftragsschweißungen auf das Grundmaterial mit gleichwertigen Werkstoffen gelten nicht als Plattierung.

3.3.2 Wenn die Plattierungsdicke mehr als 10 % der Wanddicke beträgt, ist die Plattierung bei einer Analyse der Kräfte und Spannungen zu berücksichtigen.

3.4 Belastungen

Als Belastungen sind alle Einwirkungen auf das Bauteil anzunehmen, die Beanspruchungen in diesem hervorrufen. Die Belastungen sind zu Lastfällen nach AD 2000-Merkblatt S 3/0 zusammenzufassen. Anzusetzende Belastungen sind anzugeben.

3.5 Spannungen

3.5.1 Die Spannungen bestehen aus Normal- und Schubspannungen oder aus einer Kombination von Normal- und Schubspannungen. Ihre Bewertung erfolgt als Vergleichsspannungen.

Im Falle einer linearelastischen Spannungsanalyse besteht ein linearer Zusammenhang zwischen den Spannungen und Verformungen. Dieser proportionale Zusammenhang ist auch oberhalb der Streckgrenze oder Dehngrenze des Werkstoffs zugrunde zu legen (fiktive Spannungen). Im Falle elastisch-plastischer Analysen ist vom tatsächlichen Spannungs-Dehnungs-Zusammenhang auszugehen.

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

3.5.3 Die Begrenzung der Spannungen bei ruhender Beanspruchung erfolgt nach Abschnitt 6 auf der Grundlage der Spannungsanalyse und -kategorisierung sowie der Vergleichsspannungsbildung nach den Abschnitten 4 und 5, die Begrenzung wechselnder Beanspruchungen nach dem AD 2000-Merkblatt S 2.

4 Spannungsanalyse, Spannungskategorien

Durch eine Spannungsanalyse mit Spannungskategorisierung und Spannungsbegrenzung ist nachzuweisen, dass keine unzulässigen (insbesondere nur begrenzte plastische) Verformungen auftreten.

4.1 Spannungskategorien

4.1.1 Die Spannungen sind abhängig von ihrer erzeugenden Ursache und ihrer Auswirkungen auf das Festigkeitsverhalten des Bauteils in primäre Spannungen, sekundäre Spannungen und Spannungsspitzen einzuteilen [4] und gemäß ihrer Zuordnung in unterschiedlicher Weise zu begrenzen.

4.1.2 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.

4.2 Primäre Spannungen P

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

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

4.2.3 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 im Sinne dieses Merkblattes 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.

4.2.4 Hinsichtlich der Verteilung der Membranspannung entlang der Wand sind primäre globale Membranspannungen P_m und primäre lokale Membranspannungen P_l zu unterscheiden. Rotationssymmetrische primäre Membranspannungen im Bereich von Störstellen, die von der globalen Membranspannung abweichen, werden als lokal eingestuft, wenn sie außerhalb eines die Störstelle enthaltenden Bereiches von der Länge $1,0 \cdot \sqrt{R \cdot e}$ in meri-

dionaler Richtung das $1,1$ -fache der zulässigen globalen Membranspannung nicht überschreiten. Zwei benachbarte Bereiche mit lokalen primären Membranspannungen müssen mindestens $2,5 \cdot \sqrt{R \cdot e}$ in meridionaler Richtung voneinander entfernt sein. Dabei ist R der kleinere Hauptkrümmungsradius und e die Wanddicke gemäß Abschnitt 2. Einzelne begrenzte Bereiche mit lokalen primären Membranspannungen, hervorgerufen durch konzentrierte Belastungen (z. B. Pratten, Stützen), sind so anzuordnen, dass es zu keinen Überlappungen von Bereichen kommt, in denen das $1,1$ -fache der zulässigen globalen Membranspannung überschritten wird.

4.2.5 Während primäre globale Membranspannungen so verteilt sind, dass als Folge einer Plastifizierung keine wesentliche Spannungsumlagerung zu benachbarten Bereichen hin stattfinden würde, führt im Falle der primären lokalen Membranspannungen eine Plastifizierung zur Spannungsumlagerung.

4.3 Sekundäre Spannungen Q

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

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

4.3.3 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 kann es für diese Stellen notwendig sein nachzuweisen, dass keine unzulässige Werkstoffverformung auftritt.

4.4 Spannungsspitzen F

4.4.1 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 nur für Ermüdung und Sprödbruchgefährdung von Bedeutung.

4.4.2 Zu den Spannungsspitzen zählen auch die Abweichungen von Nennspannungen an Lochrändern infolge Druck und Temperatur, wobei die Nennspannungen aus Gleichgewichtsbetrachtungen abzuleiten sind.

5 Spannungsüberlagerung und Spannungsbeurteilung

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.

Beispiele für die Zuordnung von Spannungskategorien geben die Tafeln 1 bis 3.

Aus diesen Spannungen ist für die primären Spannungen die Vergleichsspannung zu bilden. Für die Summe aus primären und sekundären Spannungen sowie für die Summe aus primären Spannungen, sekundären Spannungen und Spannungsspitzen ist jeweils die Vergleichsspannungsschwingbreite zu bilden (für weitergehende Angaben vergleiche [6]).

5.1 Vergleichsspannungen

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

- a) die primären globalen Membranspannungen oder
- b) die primären lokalen Membranspannungen und
- c) die Summe aus primären Biegespannungen und entweder den primären globalen oder den lokalen Membranspannungen

gesondert zu bilden.

Hieraus ist die Vergleichsspannung nach v. Mises unmittelbar zu berechnen

$$\sigma_{v, \text{v. Mises}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (1)$$

5.1.2 Zur Bildung der Vergleichsspannung nach Tresca sind für jeden der drei Fälle nach Abschnitt 5.1.1 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.

$$\sigma_{v, \text{Tresca}} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

Für die drei Fälle nach Abschnitt 5.1.1 a), b) und c) erhält man so die Vergleichsspannung aus P_m , P_l und $P_m + P_b$ oder $P_l + P_b$.

5.2 Vergleichsspannungsschwingbreiten

5.2.1 Zur Vermeidung des Versagens infolge

- a) eines unbegrenzt fortschreitenden Dehnungszuwachses infolge zyklischer Belastung,
- b) Ermüdung (vgl. AD 2000-Merkblatt S 2)

sind die zugehörigen Vergleichsspannungsschwingbreiten aus unterschiedlichen Spannungs-kategorien zu ermitteln und unterschiedlich zu begrenzen.

5.2.2 Im Falle nach Abschnitt 5.2.1 a) sind die benötigten Spannungstensenoren aus den gleichzeitig wirkenden Spannungen der primären und sekundären Spannungs-kategorien zu bilden, im Fall b) aus den gleichzeitig wirkenden Spannungen aller Spannungs-kategorien.

5.2.3 Aus der Menge der zu betrachtenden Beanspruchungszustände sind unter Verwendung eines festen Koordinatensystems zwei Beanspruchungszustände so auszuwählen, dass die aus der Differenz der zugehörigen Spannungstensenoren nach der verwendeten Festigkeits-hypothese gebildete Vergleichsspannung ein Maximum wird. Dieses Maximum stellt die Vergleichsspannungsschwingbreite dar.

5.2.4 Haben die zu betrachtenden Beanspruchungszustände gleichbleibende Hauptspannungsrichtungen, so

genügt es bei der Anwendung der Festigkeits-hypothese nach Tresca, das Maximum der Differenzen je zweier Hauptspannungsdifferenzen gleicher Paare von Hauptspannungsrichtungen zu bilden. Dieses Maximum stellt dann die Vergleichsspannungsschwingbreite (nach Tresca) dar.

6 Begrenzung der Vergleichsspannungen und der Vergleichsspannungsschwingbreiten

6.1 Allgemeines

6.1.1 Für jeden Lastfall (Betriebs-, Prüf-, Montage-, Sonderfälle) nach AD 2000-Merkblatt S 3/0 sind die Vergleichsspannungen und die Vergleichsspannungsschwingbreiten in Abhängigkeit von den mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes zu begrenzen. Die hier verwendeten Begrenzungen gelten für volle Rechteckquerschnitte, wie sie zum Beispiel der betrachteten Spannungsverteilung in Schalen zugrunde gelegt werden. Bei anderen Querschnitten sind die Stützziffern in Abhängigkeit von dem jeweiligen Tragverhalten festzulegen.

6.1.2 Im Falle der Vergleichsspannungen aus primären Spannungen und der Vergleichsspannungsschwingbreiten aus primären und sekundären Spannungen hat die Begrenzung unter Zugrundelegung des Spannungsvergleichswertes f (zulässige statische Berechnungsspannung) gemäß AD 2000-Merkblatt S 3/0 zu erfolgen.

6.1.3 Bei der Bildung der zulässigen statischen Berechnungsspannung f nach AD 2000-Merkblatt S 3/0 darf bei den verschiedenen Lastfällen (Betriebs-, Prüf-, Montage- und Sonderfälle) die örtlich und zeitlich jeweils vorhandene Temperatur verwendet werden.

6.1.4 Die Vergleichsspannungsschwingbreiten aus primären Spannungen, sekundären Spannungen und Spannungsspitzen sind im Rahmen einer Ermüdungsanalyse nach AD 2000-Merkblatt S 2 zu begrenzen.

6.2 Begrenzung der primären Vergleichsspannungen

Die primären Vergleichsspannungen sind für alle Lastfälle gemäß AD 2000-Merkblatt S 3/0 zu begrenzen mit

$$P_m \leq f$$

$$P_l \leq 1,5f$$

$$(P_m + P_b) \text{ oder } (P_l + P_b) \leq 1,5f$$

$$P_e \leq 1,5f$$

Die Einordnung für P_e ist abhängig von der Anordnung der betrachteten Stelle im Bauteil zu entscheiden, siehe hierzu Abschnitt 4.3.3.

6.3 Begrenzung der primären und sekundären Vergleichsspannungsschwingbreiten

Die primären und sekundären Vergleichsspannungsschwingbreiten sind für alle Betriebsfälle gemäß AD 2000-Merkblatt S 3/0 zu begrenzen mit

$$(P_m + P_b + Q) \text{ bzw. } (P_l + P_b + Q) \leq 3f$$

$$P_e \leq 3f$$

Bei Stahlguss darf die Vergleichsspannungsschwingbreite anstelle von $3f$ mit $4f$ begrenzt werden.

Die Zulässigkeit der Einordnung von P_e als Sekundärspannung ist abhängig von der Anordnung der betrachteten Stelle im Bauteil zu entscheiden, vgl. Abschnitt 4.3.3.

6.4 Abweichende Begrenzung der Vergleichsspannungen und der Vergleichsspannungsschwingbreiten

Mit Ausnahme der allgemeinen primären Membranspannungen sind Abweichungen bei der Begrenzung der Vergleichsspannungen und den Vergleichsspannungsschwingbreiten möglich, wenn durch andere Nachweise gezeigt wird, dass das Bauteil den gestellten Anforderungen genügt (z. B. durch Bauteilversuche, plastische Analyse u. a.).

6.5 Spannungsbegrenzung bei dreiaxsigem Zugspannungszustand

Ergibt die Spannungsanalyse einen dreiaxigen Zugspannungszustand, muss zur Vermeidung eines durch die dann eingeschränkte Duktilität hervorgerufenen spröden Versagens immer dann, wenn die kleinste Zugspannung den halben Betrag der größten Zugspannung übersteigt, zusätzlich die folgende Bedingung eingehalten werden:

$$\max(\sigma_1; \sigma_2; \sigma_3) \leq R_{p0,2 \text{ ‡}}$$

Anstelle von $R_{p0,2 \text{ ‡}}$ darf $R_{p1,0 \text{ ‡}}$ verwendet werden, sofern zur Bestimmung der zulässigen statischen Berechnungsspannung f nach AD 2000-Merkblatt S 3/0 dieser Wert zugrunde gelegt wurde.

7 Schrifttum

- [1] KTA 3201.2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung von Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren.
Beuth Vertrieb, Berlin (3/84).
- [2] KTA 3211.2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung von Komponenten der äußeren Systeme von Leichtwasserreaktoren.
Beuth Vertrieb, Berlin (6/92).
- [3] Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Design by Analysis.
The American Society of Mechanical Engineers, New York 1969.
- [4] *Kroenke, W. C.*: Classification of finite element stresses according to ASME Section III stress categories.
Technical paper presented to ASME 94th Winter Annual Meeting, Detroit, Michigan. November 11–15, 1973.
- [5] VdTÜV-Merkblatt 803: Richtlinien zur Durchführung und Auswertung von Dehnungsmessungen mit Dehnungsmessstreifen (DMS), Ausgabe März 1993.
Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln.
- [6] *Dietmann, H., u. H. Kockelmann*: Verwendung der Gestaltänderungsenergiehypothese im Anwendungsbe-
reich der KTA-Regeln.
VGB Kraftwerkstechnik **74** (1994), Heft 6.

Tafel 1. Spannungskategorisierung in Behältern für einige typische Fälle

Behälterteil	Ort	Spannungen hervorgerufen durch	Art der Spannung	Spannungskategorie
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 Stützen 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 kegelförmiger 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

(Fortsetzung auf Seite 6)

AD 2000-Merkblatt

Behälterteil	Ort	Spannungen hervorgerufen durch	Art der Spannung	Spannungskategorie
Gelochter Boden oder Mantel	Regulärer Steg in einem regelmäßigen Lochfeld	Druck	Membranspannung (Mittelwert über Stegquerschnitt) Biegespannung (Mittelwert über Stegbreite, aber veränderlich über Wanddicke) 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
Stützen	Querschnitt senkrecht zur Stützenachse	Innendruck oder äußere Kraft oder Moment ²⁾	Mittelwert der Membranspannung über den Stützenquerschnitt (Spannungskomponente senkrecht zur Schnittebene)	P_m
		Äußere Kraft oder Moment ²⁾	Biegung über den Stützenquerschnitt	P_m
	Stützenwand	Innendruck	Allgemeine Membranspannung Örtliche Membranspannung Biegung Spannungskonzentration	P_m P_l Q F
		Unterschiedliche Dehnung	Membranspannung Biegespannung Spannungskonzentration	Q Q F
Plattierung	Beliebig	Unterschiedliche Dehnung	Membranspannung Spannungskonzentration	F F
Beliebig	Beliebig	Radiale Temperaturverteilung ⁵⁾	Äquivalenter linearer Anteil ⁶⁾ 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 $1,0 \cdot \sqrt{R \cdot e}$.
- 4) In dünnwandigen Behältern muss die Möglichkeit des Einbeulens und unzulässiger Deformation untersucht werden.
- 5) Es ist zu untersuchen, ob die Gefahr des Versagens infolge unbegrenzt fortschreitender Deformation besteht.
- 6) Der äquivalente lineare Anteil ist definiert als die lineare Spannungsverteilung, die das gleiche Biegemoment erzeugt wie die tatsächliche Spannung.

Tafel 2. Spannungskategorisierung in Rohrleitungen für einige typische Fälle

Rohrleitungs-komponente	Ort	Spannungen hervorgerufen durch	Art der Spannung	Spannungs-kategorie
Gerade Rohre, Krümmer und Reduzierstücke, Abzweige und T-Stücke mit Ausnahme des Durchdringungsbereiches	Ungestörtes Rohr	Innendruck	Mittlere Membranspannung	P_m
		Mechanische Lasten einschließlich Eigengewichte und Trägheitskräfte	Biegespannung über Rohrquerschnitt (Spannungskomponente senkrecht zur Schnittebene)	P_b
	Im Bereich von Störstellen (Wanddickenänderungen, Verbindung verschiedener Rohrleitungssteile)	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
Flansche	Ungestörte Bereiche	Innendruck, Dichtkraft, Schraubenkräfte	Mittlere Membranspannung Biegespannung	P_m P_b
	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⁾	Äquivalenter Anteil ²⁾ der Biegespannung über der Wand Spannungskonzentration	F F

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

2) Der äquivalente Anteil ist definiert als die lineare Spannungsverteilung, die das gleiche Biegemoment erzeugt wie die tatsächliche Spannungsverteilung.

Tafel 3. Spannungskategorisierung integraler Bereiche von Komponentenstützkonstruktionen für einige typische Fälle

Typ der Komponentenstützkonstruktion	Ort	Spannungen hervorgerufen durch	Art der Spannung	Spannungskategorie
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“.

Herausgeber:



E-Mail: berlin@vdtuev.de
<http://www.vdtuev.de>

Bezugsquelle:

Beuth

Beuth Verlag GmbH
 10772 Berlin
 Tel. 030/26 01-22 60
 Fax 030/26 01-12 60
info@beuth.de
www.beuth.de