

# AD 2000-Merkblatt

ICS 23.020.30

Ausgabe Juni 2014

<b>Druckbehälter aus nichtmetallischen Werkstoffen</b>	<b>Druckbehälter aus textilglasverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK)</b>	<b>AD 2000-Merkblatt N 1</b> korrigierte Fassung 05.2018
--	---	---

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 G 1.

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.

FDBR e. V. Fachverband Anlagenbau, Düsseldorf

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin

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

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

Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf

VGB PowerTech e. V., Essen

Verband der TÜV e. V. (VdTÜV), Berlin

Die AD 2000-Merkblätter werden durch die Verbände laufend dem Fortschritt der Technik angepasst.

## Inhalt

	Seite
0 Präambel .....	2
1 Geltungsbereich.....	2
2 Allgemeine Anforderungen .....	2
3 Werkstoffe.....	2
4 Berechnung .....	3
5 Prüfungen .....	14
6 Schrifttum.....	16

Ersatz für Ausgabe Mai 2006; | = Änderungen gegenüber der vorangehenden Ausgabe; ! = Korrektur a; :: = Korrektur b

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.

## 0 Präambel

Zur Erfüllung der wesentlichen Sicherheitsanforderungen der Druckgeräterichtlinie kann das AD 2000-Regelwerk angewandt werden, vornehmlich für die Konformitätsbewertung nach den Modulen „G“ und „B (Baumuster) + 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 Druckgeräterichtlinie oder für andere Rechtsgebiete kann das AD 2000-Regelwerk sinngemäß angewandt werden. Die Prüfständigkeit richtet sich nach den Vorgaben des jeweiligen Rechtsgebietes.

## 1 Geltungsbereich

Das AD 2000-Regelwerk folgt einem in sich geschlossenen Auslegungskonzept im Hinblick auf Druckbelastungen. Für das Gesamtkonzept eines Druckbehälters aus GFK, z. B. Lagerung, Flansche, Medien, Temperatur usw., kann die DIN EN 13121 herangezogen werden, da sie auch das Gesamtkonzept des AD 2000-Regelwerkes erfüllt (siehe Richtlinie über Druckgeräte 2014/68/EU, Erwägungsgrund 28).

Dieses AD 2000-Merkblatt gilt für die Anforderungen an Werkstoffe und Herstellung, für die Berechnung und für die Prüfung von Druckbehältern und Druckbehälterteilen aus textilglasverstärkten duroplastischen Kunststoffen. Textilglasverstärkte duroplastische Kunststoffe bestehen aus Reaktionsharz-Formstoffen, vorzugsweise auf Basis ungesättigter Polyester-(UP)-, Vinylester-(VE)- und Epoxid-(EP-)Harze, die durch Textilglas verstärkt sind.

Bei Verwendung von anderen Faserverstärkungen darf dieses AD 2000-Merkblatt sinngemäß angewendet werden.

## 2 Allgemeine Anforderungen

### 2.1 Grundlagen

Der Betreiber/Besteller muss dem Hersteller die für die Auslegung des Druckbehälters erforderlichen Angaben hinsichtlich des maximal zulässigen Druckes  $PS$ , des Beschickungsgutes und der zulässigen maximalen/minimalen Temperatur  $TS$  bekannt geben. Darüber hinaus müssen Angaben hinsichtlich wechselnder Beanspruchungen infolge Betriebsweise (Drücke, Temperaturen, Medien), hinsichtlich der Befüllung, der Entleerung, der Druckaufbringung und -entlastung sowie bei Vorgabe bestimmter Ausgangsstoffe, Herstellungsverfahren und Toleranzen gemacht werden.

### 2.2 Voraussetzungen

**2.2.1** Die Hersteller müssen über Einrichtungen verfügen, die eine sachgemäße Herstellung von Druckbehältern und Druckbehälterteilen ermöglichen.

**2.2.2** Die Hersteller müssen eigenes verantwortliches Aufsichtspersonal und fachkundiges Personal für die Fertigung haben.

**2.2.3** Die Hersteller müssen eigenes Prüfpersonal haben, das von der Fertigung unabhängig oder einer eigenen, von der Fertigung unabhängigen Prüfaufsicht unterstellt ist. Die Prüfaufsicht muss benannt werden. In Einzelfällen darf die Prüfaufsicht anderen Stellen übertragen werden.

**2.2.4** Die Hersteller müssen über Prüfeinrichtungen verfügen, die die Prüfung nach den entsprechenden DIN-Normen oder anderen für die Durchführung der Prüfungen in Frage kommenden Regeln erlauben. Prüfmaschinen müssen der DIN 51220 entsprechen.

## 3 Werkstoffe

### 3.1 Allgemeines

Durch die Vielzahl der auf dem Markt angebotenen Harze, Zusatzstoffe und Textilglasverstärkungen sowie durch die Kombinationsmöglichkeiten dieser Ausgangsstoffe und die verschiedenen Bedingungen bei der Herstellung lassen sich unterschiedliche Eigenschaften der Verbundwerkstoffe erzielen. Die Verbundwerkstoffe — nachfolgend „Werkstoffe“ genannt — sind durch das Harz/Härtersystem, die Art, Menge und Folge der Textilglasverstärkung und durch das Herstellungsverfahren gekennzeichnet.

### 3.2 Ausgangsstoffe

#### 3.2.1 Harzformstoffe

Für Druckbehälter aus textilglasverstärkten duroplastischen Kunststoffen sind vorzugsweise mittel- und hochreaktive UP-, VE- und EP-Harze zu verwenden.

#### 3.2.2 Zusatzstoffe

Für Druckbehälter aus textilglasverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK) dürfen Zusatzstoffe verwendet werden, um besondere Eigenschaften (z. B. hinsichtlich Thixotropie, Brandverhalten) zu erzielen, wenn ihre Eignung und ihre Verträglichkeit durch Prüfungen nach Abschnitt 5 nachgewiesen sind. Farbstoffe und Farbpigmente dürfen nur in den

äußeren Schutzschichten eingesetzt werden. Bei Verwendung thermoplastischer Schutzschichten ist Abschnitt 3.5 zu beachten.

### 3.2.3 Textilglasverstärkung

Die Verstärkung muss aus textilen Gläsern bestehen, die eine ausreichende Haftung zum Formstoff ergeben oder mit geeigneten Haftvermittlern ausgerüstet sind. Die Textilglasfaserverstärkung ist entsprechend dem planmäßigen Laminataufbau in das Harz einzubringen und möglichst gleichmäßig in den einzelnen tragenden Schichten zu verteilen.

### 3.2.4 Eigenschaften

Die kennzeichnenden Eigenschaften der Ausgangsstoffe müssen vom Lieferer gewährleistet und durch Bescheinigung nach DIN EN 10204 – 2.2 (Werkszeugnis) bestätigt sein.

## 3.3 Anforderungen an die Werkstoffe

### 3.3.1 Herstellung der Werkstoffe

Der Hersteller gewährleistet durch Güteüberwachung mit entsprechenden Aufzeichnungen die sachgemäße Herstellung und Verarbeitung der Werkstoffe sowie die Einhaltung der in einem Gutachten oder in Werkstoffblättern festgelegten Eigenschaften.

### 3.3.2 Verwendung der Werkstoffe

Die Ausgangsstoffe des Werkstoffes (z. B. Harzsystem, Textilglasverstärkung) und der Schutzschichten (siehe Abschnitt 3.6) müssen entsprechend dem Verwendungszweck gewählt werden, wobei die zu erwartenden mechanischen, chemischen und thermischen Beanspruchungen des Druckbehälters zu berücksichtigen sind. Bei der Werkstoffauswahl der Harzmatrix der Traglamine ist darauf zu achten, dass die Wärmeformbeständigkeit HDT (Heat Deflection Temperature, ermittelt nach ISO 75 Methode A) des gewählten Harzes 20 K höher als die Designtemperatur DT (= maximal zulässige Temperatur  $T_S$ ) des Druckbehälters ist. Dieser Wert wird in den Datenblättern des Harzherstellers ausgewiesen und wird an voll ausgehärteten Reinharzproben bestimmt, siehe EN 13121-3, Anhang D13 bzw. D18.

## 3.4 Verarbeitungszustand

An dem erstellten Druckgerät sind die Prüfungen nach Abschnitt 5.2 durchzuführen.

## 3.5 Schutzschichten

Die tragenden Schichten des Werkstoffes müssen beidseitig mit Schutzschichten versehen sein, die gegen Schädigung, z. B. durch Einwirken des Beschickungsguts bzw. durch Witterungseinflüsse, schützen.

Es sind Schutzschichten aus dem gleichen oder einem ähnlichen Harzformstoff erforderlich, die sich mit den tragenden Schichten einwandfrei verbinden und die Textilglasverstärkung vollständig abdecken. Eine Einfärbung ist nur in den äußeren Schichten nach der Druckprüfung zulässig. Dies kann z. B. durch eine eingefärbte Schutzschicht oder einen Farbanstrich erfolgen.

Die inneren Schutzschichten dürfen auch aus anderen Werkstoffen (z. B. Auskleidung, Beschichtung, Innenhülle) bestehen, wenn deren Eignung, z. B. chemische Widerstandsfähigkeit und ausreichende thermische Beständigkeit, nachgewiesen ist.

Bei Behältern mit thermoplastischen Linern ist die Haftfestigkeit und ggf. eine Dehnungsbegrenzung zu beachten.

## 3.6 Kennwerte für die Berechnung

Die mechanischen Eigenschaften Tragfähigkeit (Festigkeit) und Steifigkeiten (Elastizitätsmodule) des Werkstoffes sind im Wesentlichen von der Art, Menge und Orientierung der Textilglasverstärkung abhängig. Für den Festigkeitsnachweis bzw. den Stabilitätsnachweis sind die in den einzelnen Richtungen vorhandenen Kennwerte zu verwenden. Für die Kennwerte gelten die Festlegungen des Werkstoffgutachtens oder der Werkstoffblätter.

### 3.7 Prüfung und Nachweis der mechanischen Kennwerte der zum Einsatz kommenden GFK-Lamine

Die mechanischen Kennwerte der GFK-Lamine sind entsprechend den Angaben der Werkstoffblätter, des Werkstoffgutachtens bzw. durch Prüfungen nach den Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3 mit Bescheinigungen nach DIN EN 10204 – 3.1 nachzuweisen.

## 4 Berechnung

### 4.1 Allgemeines

4.1.1 Dieses AD 2000-Merkblatt enthält Berechnungsregeln für die Bemessung drucktragender Teile von Druckbehältern aus textilglasverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK). Soweit in Einzelfällen für die Bemessung andere allgemein anerkannte Regeln der Technik angewandt werden (z. B. Berücksichtigung der mehrachsigen Beanspruchung), ist der Beurteilung elastisches Verhalten des Werkstoffes zugrunde zu legen.

# AD 2000-Merkblatt

Seite 4 AD 2000-Merkblatt N 1, Ausg. 06.2014, korrigierte Fassung 05.2018

**4.1.2** Druckbehälter aus textilglasverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK) sind so zu bemessen, dass die auftretenden Verformungen und die Veränderungen der Werkstoffeigenschaften auch bei Langzeitbeanspruchung die Gebrauchstüchtigkeit der Bauteile nicht beeinträchtigen. Der Nachweis hierfür wird durch Prüfungen nach Abschnitt 5.1 erbracht.

**4.1.3** Schutzschichten bleiben bei der Ermittlung der tragenden Wanddicke unberücksichtigt.

**4.1.4** Bei Verbundbauweisen, GFK mit Schutzschichten oder thermoplastischen Auskleidungen, ist zu beachten, dass die Dehnung der tragenden Wand die zulässige Dehnung der Innenschicht nicht überschreiten darf.

**4.1.5** Bei Behältern in Verbundbauweise mit tragenden Innenschichten, z. B. GFK mit metallischen Linern, ist eine gesonderte Berechnung durchzuführen.

**4.1.6** Übergänge von Laminatdicken sind mit  $\leq 1:6$  auszuführen. Die Abklinglänge  $x$  kann um den Betrag (Gesamtdicke – Grundwanddicke)  $\times 4$  reduziert werden. Bei dem Nachweis der Schubübertragung darf dann die Abklinglänge  $x + (\text{Gesamtdicke} - \text{Grundwanddicke}) \times 4$  angesetzt werden.

## 4.2 Formelzeichen und Einheiten

$b$	Breite	mm
$d$	Durchmesser eines Ausschnittes, eines Flansches, einer Schraube usw.	mm
$d_L$	Schraubenlochdurchmesser	mm
$h$	Höhe	mm
$l$	Länge des Zylinders	mm
$l_R$	Abstand der Versteifungsringe/Beulringe	–
$p$	Berechnungsdruck / max. zulässiger Druck $PS$	bar
$p_{krit}$	kritischer äußerer Überdruck	bar
$r$	Radius einer Krempe	mm
$s$	erforderliche Wanddicke	mm
$s_A$	erforderliche Wanddicke am Ausschnitttrand	mm
$s_K$	Wanddicke der Krempe	mm
$s_V$	Dicke des Verbindungslaminates	mm
$s_S$	Stützenwanddicke	mm
$v$	Faktor zur Berücksichtigung von Verschwächungen	–
$x$	Abklinglänge	mm
$A$	Werkstoffabminderungsfaktor	–
$A_1 \dots A_4$	Teilfaktoren	–
$A_p/A_\sigma$	druckbelastete/tragende Querschnittsfläche (siehe AD 2000-Merkblatt B 9)	–
$C_1, C_2$	Formwerte	–
$\lambda$	Hilfswert	–
$D_a$	Außendurchmesser	mm
$D_K$	Innendurchmesser Kegelbodenkrempe	mm
$E_R$	Biege-E-Modul eines Versteifungsringes in Umfangsrichtung	N/mm <sup>2</sup>
$E_s$	Vergleichs-E-Modul der Wandung	N/mm <sup>2</sup>
$E_{UB}, E_{LB}$	Biege-E-Modul des Wandwerkstoffes in Umfangs- bzw. Längsrichtung	N/mm <sup>2</sup>
$E_{UZ}, E_{LZ}$	Zug-E-Modul des Wandwerkstoffes in Umfangs- bzw. Längsrichtung	N/mm <sup>2</sup>
$J$	Flächenträgheitsmoment	mm <sup>4</sup>
$K_Z$	Zugfestigkeit des Laminates in der jeweiligen Beanspruchungsrichtung	N/mm <sup>2</sup>
$K_B$	Biegefestigkeit des Laminates in der jeweiligen Beanspruchungsrichtung	N/mm <sup>2</sup>
$K_D$	Druckfestigkeit des Laminates in der jeweiligen Beanspruchungsrichtung	N/mm <sup>2</sup>
$K_{ZV}$	Zugfestigkeit des Überlaminates bzw. des Verbindungslaminates	N/mm <sup>2</sup>
$K_\perp$	Stirnabzugsfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>
$M$	Biegemoment für die Flanschberechnung	N mm
$m$	Umfangswellenzahl bei der radialen Beulung von Zylindern	–
HDT	Wärmeformbeständigkeit HDT (Heat Deflection Temperature) ermittelt nach ISO 75 Methode A	°C
DT	Designtemperatur DT (maximal zulässige Temperatur $TS$ )	°C
$R$	Radius einer Kalotte	mm
$S$	Sicherheitsbeiwert	–

$\varphi$	Winkel	°
$\psi$	Winkel	°
$\sigma$	Spannung	N/mm <sup>2</sup>
$\tau$	Scherfestigkeit des Laminates	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_{KI}$	Scherfestigkeit der Klebeverbindung	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon$	Dehnung	—
$\varepsilon_{\perp}$	Dehnung senkrecht zu den Verstärkungsfasern bei unidirektional verstärkten Laminaten	—
$\nu$	Querkontraktionszahl	—

### 4.3 Festigkeitskennwert

Als Festigkeit werden die Zugfestigkeit  $K_Z$ , die Biegefestigkeit  $K_B$ , bei Beanspruchung durch Außendruck die Druckfestigkeit  $K_D$  oder der zutreffende Elastizitätsmodul  $E$  in der jeweiligen Beanspruchungsrichtung eingesetzt.

### 4.4 Sicherheitsbeiwert und Werkstoffabminderungsfaktor

**4.4.1** Die zulässigen Spannungen des Werkstoffes ergeben sich aus den Kennwerten  $K$  für die Festigkeiten und  $E$  für die Elastizitätsmoduln. Für die Ermittlung der Bemessungswerte kann

- der globale Sicherheitsbeiwert  $S = 2$  (Bruchsicherheit, Beulsicherheit) in Verbindung mit dem Werkstoffabminderungsfaktor  $A$  als Produkt aus den Teilfaktoren  $A_1$  bis  $A_4$  oder
- das Teilsicherheitskonzept nach DIN EN 13121-3 in Verbindung mit den entsprechenden Werkstoffabminderungsfaktoren

herangezogen werden. Im Folgenden ist nur das globale Sicherheitskonzept beschrieben.

**4.4.2** Für den Nachweis nach dem globalen Sicherheitskonzept sind die Abminderungsfaktoren  $A_1$  bis  $A_4$  nach Tafel 1 bei nachweislicher Einhaltung der Anforderungen an die Werkstoffe nach Abschnitt 3.3 und den Bedingungen nach den Abschnitten 4.4.4 bis 4.4.8 zu berücksichtigen.

Die Abminderungsfaktoren  $A_1$  bis  $A_4$  können herabgesetzt werden, soweit dies durch Langzeituntersuchungen bei mechanischen, chemischen und thermischen Beanspruchungen an repräsentativen Werkstoffproben oder durch Dehnungsmessungen oder Zeitstanddruckversuche an repräsentativen Behältermustern nachgewiesen und durch Werkstoffgutachten bestätigt wird.

**Tafel 1 — Werkstoffspezifische Abminderungsfaktoren**

Einfluss langzeitiger Lasteinwirkungen bis $2 \times 10^5$ Stunden	$A_1 = 2,0$ oder nach Werkstoffgutachten
Einfluss des Lagermediums und der Bewitterung	$A_2$ siehe 4.4.4
Einfluss der Betriebstemperatur	$A_3$ siehe 4.4.5
Einfluss von Inhomogenitäten bzw. der Streuung	$A_4 = 1,2$

Das Produkt aus  $A \cdot S$  darf jedoch den Wert 4,0 nicht unterschreiten, und die zulässigen Spannungen müssen unterhalb der Rissbildungsgrenze (siehe Abschnitt 4.4.7) bei der jeweils maßgebenden Beanspruchungsart liegen.

**4.4.3** Der Teilfaktor  $A_1 = 2,0$  für das Zeitstandverhalten gilt ohne weiteren Nachweis für Werkstoffe mit Textilglasanteilen von mindestens 40 Massen-% und Füllstoffanteilen von höchstens 10 Massen-% im Traglaminat. Bei anderer Zusammensetzung des Werkstoffes oder zur Herabsetzung ist der Teilfaktor  $A_1$  durch Zeitstandbruchversuche oder durch Zeitstandkriechversuche gemäß Abschnitt 5.2.2 (7) nachzuweisen. Als Mindestwert ist  $A_1 = 1,25$  einzusetzen.

**4.4.4** Bei Medien nach Medienlisten 40 des Deutschen Instituts für Bautechnik, DIBt Berlin, bzw. DIN EN 13121-2 ist der Teilfaktor  $A_2$  den Werten entsprechend den Medienlisten einzusetzen. Bei nicht gelisteten Medien und/oder abweichenden ist entsprechend der DIN EN 13121-2 zu verfahren.

**4.4.5** Der Teilfaktor  $A_3$  für den Temperatureinfluss kann durch folgende Gleichungen berechnet werden:

$$A_3 = 1,00 + 0,4 \cdot \left( \frac{DT - 20}{HDT - 30} \right) \quad \text{für den nicht wärmeisolierten Behälter}$$

$$A_3 = 1,00 + 0,4 \cdot \left( \frac{DT}{HDT - 30} \right) \quad \text{für den wärmeisolierten Behälter}$$

Bei nicht getemperten Laminaten ist der oben ermittelte Wert  $A_3$  um 0,05 Punkte zu erhöhen.

DT = Auslegungstemperatur in °C

HDT = Wärmeformbeständigkeit (Heat Deflection Temperature) des im Traglaminat eingesetzten Harzes in °C, ermittelt nach ISO 75 Methode A

# AD 2000-Merkblatt

Seite 6 AD 2000-Merkblatt N 1, Ausg. 06.2014, korrigierte Fassung 05.2018

Die Gleichung zur Ermittlung des  $A_3$ -Faktors ist nur anwendbar in den Grenzen  $1,0 \leq A_3 \leq 1,4$ .

Für nicht wärmeisolierte Standzargen gilt  $A_3^* = (1 + A_3)/2$ . Für wärmeisolierte Standzargen wird  $A_3^* = A_3$  gesetzt.

**4.4.6** Bei Verwendung statistisch gesicherter Kennwerte für die Berechnung darf der Teilfaktor  $A_4 = 1,0$  gesetzt werden. Als statistisch gesichert können unter Zugrundelegung einer logarithmischen Normalverteilung die 5 %-Fraktile (siehe DIN 53598-1) für eine Aussagewahrscheinlichkeit von  $P = 75$  % bei Auswertung von mindestens zehn Einzelwerten gelten.

**4.4.7** Ein experimenteller Nachweis der Rissbildung (z. B. durch Belastungsversuche mit Farbeindringverfahren oder Schallemissionsmessungen) darf entfallen, wenn die medienbelastete Seite aus einer Wirrfaserschicht von ca. 450 g/m<sup>2</sup> besteht oder zusätzlich einen Liner besitzt und wenn die Grenzdehnungen die in der folgenden Tabelle angegebenen Werte nicht überschreiten.

**Tafel 2 — Grenzdehnungen  $\varepsilon_{\text{grenz,d}}$**

Matrix	Laminat	Wirrfaserlaminat CSM	Mischlaminat WR/CSM	Wickellaminat	
				0°(axial)/90°(Umfang)	$\leq \pm 65^\circ$
UP		0,30 %	0,25 %	0,20 %/0,27 %	0,27 %
VE-Bisphenol		0,35 %	0,30 %	0,23 %/0,30 %	0,30 %
VE-Novolak		0,30 %	0,25 %	0,20 %/0,27 %	0,27 %
Furan		0,20 %	0,15 %	0,15 %/0,20 %	0,15 %
Epoxid		0,35 %	0,30 %	0,25 %/0,30 %	0,30 %

Der Nachweis der Grenzdehnungen ist unter Lasten ohne Zeit-, Medien- und Temperatureinfluss zu führen.

Auf einen Grenzdehnungsnachweis für die nicht mit dem Medium beaufschlagte Seite kann verzichtet werden, wenn dort das Traglaminat mit einer Wirrfaserschicht von ca. 450 g/m<sup>2</sup> endet.

Wird die Chemieschutzschicht oder die Schutzschicht mit einer anderen Matrix als in dem Traglaminat hergestellt, so muss als Grenzwert der Dehnung der kleinere der beiden möglichen Grenzwerte angesetzt werden.

Die Grenzdehnungen der Tabelle 2 gelten nur, wenn  $0,1 \cdot \varepsilon_R$  des Reinharzes größer ist als die angegebenen Grenzdehnungen, ansonsten ist  $0,1 \cdot \varepsilon_R$  zu verwenden.

Bei Behältern mit thermoplastischen Linern aus PP, PE, PVDF sind die Grenzdehnungen der zur Anwendung kommenden Matrixwerkstoffe maßgebend. Bei Linern aus PVC-C und PVC-U beträgt die Grenzdehnung 0,20 %.

Bei Prüfdruck darf die Grenzdehnung den Wert von  $1,3 \times$  den oben angegebenen Grenzdehnungen nicht überschreiten.

**4.4.8** Bei Beanspruchung durch äußeren Überdruck ist das Zeitstandverhalten ebenfalls zu berücksichtigen. Das Produkt aus dem Sicherheitsbeiwert und dem Werkstoffabminderungsfaktor ist entsprechend den zu erwartenden Belastungsbedingungen so festzulegen, dass  $A \cdot S = 2,7$  gegen Instabilität während der der Berechnung zugrunde gelegten Lebensdauer nicht unterschritten wird. In die Berechnung darf anstelle von  $A_1$  der Wert  $\sqrt{A_1}$  eingesetzt werden.

## 4.5 Berechnung gegen inneren Überdruck

Die nachstehenden Berechnungsregeln gelten für zylindrische Mäntel und für Kugeln unter innerem Überdruck mit  $D_a/D_i \leq 1,2$ .

### 4.5.1 Fügeverbindungen

Der rechnerische Nachweis der Belastbarkeit der Fügeverbindungen (Laminatverbindungen, Klebeverbindungen) ist mit folgenden Bruchwerten durchzuführen:

$\tau_{KI} = 7,0$  N/mm<sup>2</sup>, für den Schubnachweis darf max.  $16 \times s_v$  eingesetzt werden, und

$\sigma_L = 4,0$  N/mm<sup>2</sup> gilt für Stirnabzug ohne schälenden Anteil. Die Dicke des Verbindungslaminates ist im Verhältnis der Festigkeiten des geprüften zu dem zu beurteilenden Wandwerkstoff festzulegen. Das Verbindungslaminat muss die zu verbindenden Bauteile zu beiden Seiten mindestens in einer Breite von  $x = \sqrt{D_a \cdot s_v}$  überdecken und dann allmählich auslaufen (Verhältnis  $\leq 1 : 6$ ). Die Breite der Klebeverbindung muss mindestens dem 10-Fachen der kleineren Wanddicke der zu verbindenden Teile entsprechen.

### 4.5.2 Zylindrische Mäntel

**4.5.2.1** Die erforderliche Wanddicke  $s$  ergibt sich aus der Beanspruchung in Umfangsrichtung bzw. Längsrichtung. Da die Festigkeiten bei textilglasverstärkten Kunststoffen in beiden Richtungen unterschiedlich sein können, ist die größere der nach den Abschnitten 4.5.2.2 und 4.5.2.3 ermittelten Wanddicken für die Bemessung maßgebend.

**4.5.2.2** Die erforderliche Wanddicke  $s$  für die Beanspruchung in Umfangsrichtung beträgt:

$$s = \frac{D_a \cdot p}{20 \cdot \frac{K_Z}{A \cdot S}} \quad (1)$$

**4.5.2.3** Die erforderliche Wanddicke  $s$  für die Beanspruchung in Längsrichtung beträgt:

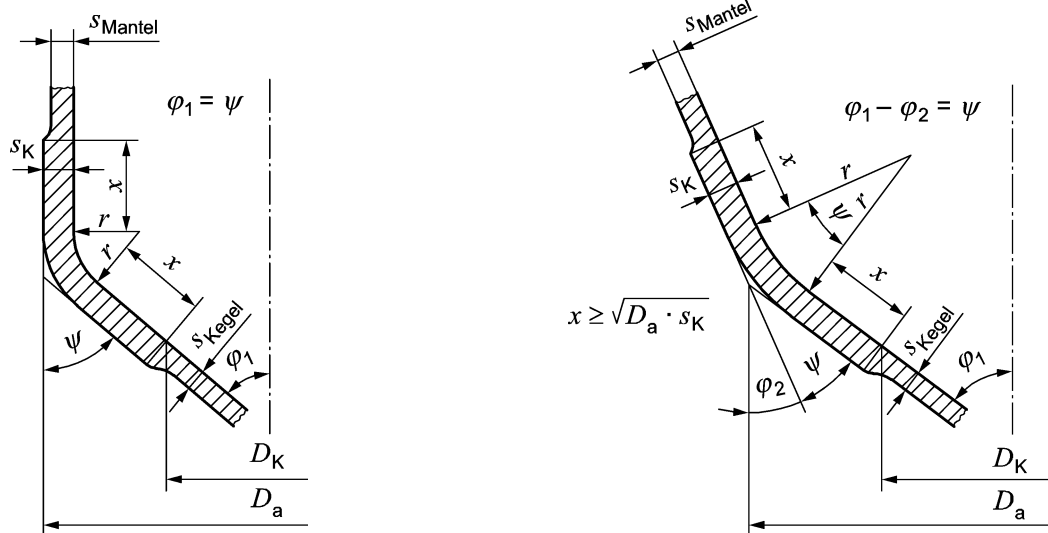
$$s = \frac{D_a \cdot p}{40 \cdot \frac{K_Z}{A \cdot S}} \quad (2)$$

## 4.5.3 Kegelförmige Mäntel

Die nachstehenden Berechnungsregeln gelten für kegelförmige Mäntel, bei denen am weiten Ende das Verhältnis  $s \geq 3,0 \text{ mm}$  bzw.  $s \geq D_a/500$  beträgt.

**4.5.3.1** Für die Bemessung der Wanddicke sind die in der Krempe am weiten Ende in beiden Richtungen auftretenden Beanspruchungen und die am weiten Ende auftretende Beanspruchung in Richtung der Mantellinie (Biegebeanspruchung) und in Umfangsrichtung (Zugbeanspruchung) maßgebend. Die Berechnung erfolgt für den kegelförmigen Mantel nach den Abschnitten 4.5.3.2 und 4.5.3.3 und für die Krempe nach dem Abschnitt 4.5.3.5, wobei jeweils die größere Wanddicke für die Bemessung maßgebend ist.

In der Krempe muss die erforderliche Biegefestigkeit in Umfangs- und Meridianrichtung vorhanden sein.



**Bild 1 und Bild 2 — Ausführungsarten kegelförmiger Mäntel**

**4.5.3.2** Die erforderliche Wanddicke  $s$  des Mantels für die Beanspruchung in Umfangsrichtung des Kegels beträgt:

$$s = \frac{D_K \cdot p}{20 \cdot \frac{K_Z}{A \cdot S}} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_1} \quad (3)$$

**4.5.3.3** Die erforderliche Wanddicke  $s$  des Mantels für die Beanspruchung in Längsrichtung des Kegels beträgt:

$$s = \frac{D_a \cdot p}{40 \cdot \frac{K_Z}{A \cdot S}} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_1} \quad (4)$$

**4.5.3.4** Die erforderliche Wanddicke  $s$  der Krempe am weiten Ende des kegelförmigen Mantels für die Beanspruchung beträgt:

$$s_K = \frac{D_a \cdot p \cdot C_1}{20 \cdot \frac{K_B}{A \cdot S}} \quad (5)$$

**4.5.3.5** Der Formwert  $C_1$  ist unter Zugrundelegung des Winkels  $\psi$ , der von den durch die Krempe verbundenen Mänteln gebildet wird, abhängig vom Verhältnis des Krempenradius zum Berechnungsdurchmesser  $r/D_a$  und dem Winkel  $\varphi$  bzw.  $\psi$  der Tafel 3 zu entnehmen.

**4.5.3.6** Kegelförmige Mäntel sind mit einer Krempe im Verhältnis  $r/D_a \geq 0,1$  zu versehen.

**4.5.3.7** Werden die Krempen kegelförmiger Mäntel verstärkt, so muss das Verstärkungslaminat an beiden Seiten der Krempe eine Breite von  $x \geq \sqrt{D_a \cdot s_K}$  in gleicher Dicke überdecken und dann allmählich auslaufen  $\leq 1 : 6$ .

**Tafel 3 — Formwert  $C_1$  für die Krempenberechnung von Kegeln**

$r/D_a$	$C_1$ für $\varphi$ bzw. $\psi$					
	10°	20°	30°	45°	60°	75°
0,06	1,57	2,18	2,55	3,22	4,10	6,28
0,08	1,52	2,02	2,34	2,74	3,51	5,53
0,1	1,46	1,86	2,13	2,26	2,93	4,79
0,15	1,33	1,46	1,46	1,53	1,93	3,59
0,2	1,06	1,20	1,20	1,26	1,53	2,79
0,3	1,00	1,06	1,13	1,20	1,33	1,86
$1/\cos \varphi$	1,015	1,064	1,155	1,414	2,000	3,86

## 4.5.4 Kugeln

Die erforderliche Wanddicke  $s$  beträgt:

$$s = \frac{D_a \cdot p}{40 \cdot \frac{K_Z}{A \cdot S}} \quad (6)$$

## 4.5.5 Gewölbte Böden

**4.5.5.1** Bei Verwendung gewölbter Böden ist die Korbbogen- oder die Halbkugelform der Klöpperform vorzuziehen. Flachgewölbte und ebene gekrempte Böden dürfen nicht verwendet werden.

**4.5.5.2** Die erforderliche Wanddicke  $s_{Kr}$  für die Krempe beträgt:

$$s_{Kr} = \frac{D_a \cdot p \cdot C_2}{40 \cdot \frac{K_B}{A \cdot S}} \quad (7)$$

wobei die Formwerte  $C_2$  der Tafel 4 zu entnehmen sind.

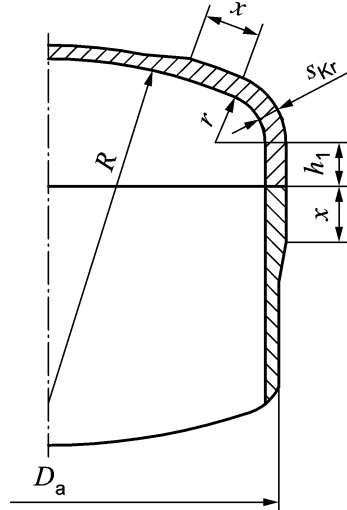
Die erforderliche Biegefestigkeit  $K_B$  muss in Umfangs- und in Längsrichtung vorhanden sein.

**4.5.5.3** Die erforderliche Wanddicke  $s$  für die Kalotte und bei Halbkugelböden beträgt:

$$s = \frac{D_a \cdot p \cdot C_2}{40 \cdot \frac{K_Z}{A \cdot S}} \quad (8)$$

wobei die Formwerte  $C_2$  der Tafel 4 zu entnehmen sind und  $D_a$  der Außendurchmesser des Zylinders ist.





**Bild 3 — Verstärkung von Krepfen und Verbindungen**

**4.5.5.4** Bei Klöpperböden und bei Korbbogenböden darf die Wanddicke der Kreppe den Wert  $s_K \geq 3,0$  mm und  $s_K \geq D_a/500$  nicht unterschreiten.

**4.5.5.5** Werden die Krepfen gewölbter Böden verstärkt (siehe Bild 3), so muss das Verstärkungslaminat den kalottenförmigen Teil des Bodens und den Zylinder in einer Breite von  $x \geq \sqrt{D_a \cdot s_K}$  überdecken und dann allmählich auslaufen  $\leq 1 : 6$ .

**Tafel 4 — Formwert  $C_2$  für die Berechnung gewölbter Böden**

Bodenform	Formwert $C_2$	
Halbkugelböden		1,2
Korbbogenböden $R = 0,8 \cdot D_a$ $h_1 \geq 3,0 \cdot s_K$ $r = 0,154 \cdot D_a$	für Kalottenwanddicke	1,8
	für Krepfenwanddicke	3,5
Klöpperböden $R = D_a$ $r = 0,1 \cdot D_a$ $h_1 \geq 3,5 \cdot s_K$	für Kalottenwanddicke	2,4
	für Krepfenwanddicke bei $s_K/D_a$	
	= 0,005	5,8
	= 0,01	5,4
	= 0,02	5,1
	= 0,03	4,75
	= 0,04	4,45
	= 0,05	4,2
	$\geq 0,06$	4,0

## 4.5.6 Ausschnitte

**4.5.6.1** Da über die Wirkung von Ausschnittverstärkungen bei Druckbehältern aus textilglasverstärkten duroplastischen Kunststoffen zu wenig Ergebnisse vorliegen, ist der Berechnung die elastische Beanspruchung des scheibenförmigen oder ähnlich verstärkten Ausschnittes zugrunde zu legen. Es sind nur angeformte oder anlamierte Stutzen zulässig.

Die Laminierung für die scheibenförmige Verstärkung von Ausschnittsrändern soll am Außenrand der Verstärkungsscheiben allmählich auf die Behälterwanddicke auslaufen ( $\leq 1 : 6$ ).

**4.5.6.2** Die erforderliche Wanddicke  $s_A$  am Ausschnitttrand von Zylindern und Kegeln beträgt

$$s_A = \frac{D_a \cdot p}{20 \cdot v_A \cdot \frac{K_Z}{A \cdot S}} \quad (9)$$

Die Zugfestigkeit  $K_Z$  dieser Fügeverbindung muss in der verstärkten Wand in Umfangsrichtung vorhanden sein. In Längsrichtung muss sie mindestens die Hälfte des eingesetzten Wertes betragen. Dies gilt für Durchmesserhältnisse  $d_A/D_a \leq 0,4$ . Bei Kegeln ist für  $D_a$  der Außendurchmesser am Ausschnittmittelpunkt einzusetzen.

**4.5.6.3** Die erforderliche Wanddicke  $s_A$  am Ausschnitttrand in Kugeln und Kugelkalotten beträgt:

$$s_A = \frac{D_a \cdot p}{40 \cdot v_A \cdot \frac{K_Z}{A \cdot S}} \quad (10)$$

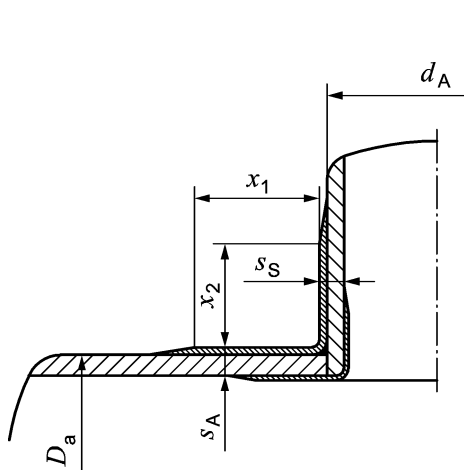
wobei  $D_a$  = Außendurchmesser der Kugel ist.

Die Zugfestigkeit  $K_Z$  dieser Fügeverbindung muss in der ausgeschnittenen und verstärkten Wand in beiden Richtungen des Ausschnittes vorhanden sein.

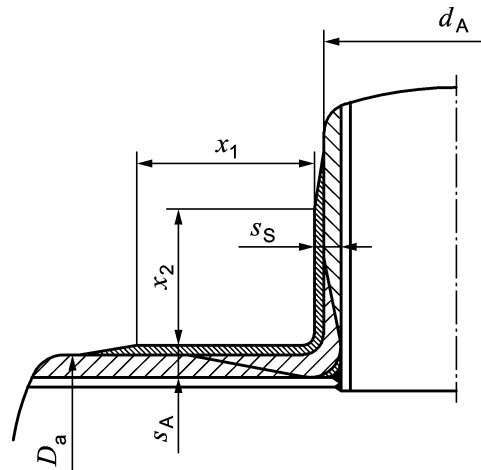
**4.5.6.4** Die Verschwächungsbeiwerte  $v_A$  unverstärkter, scheibenförmig oder rohrförmig verstärkter Ausschnitte können der Tafel 5 entnommen werden. Aufgesetzte und bündig eingesetzte Stutzen gelten nicht als rohrförmige Verstärkung und bedürfen einer besonderen Beurteilung.

**Tafel 5 — Verschwächungsbeiwert  $v_A$  für die Berechnung von Ausschnitten**

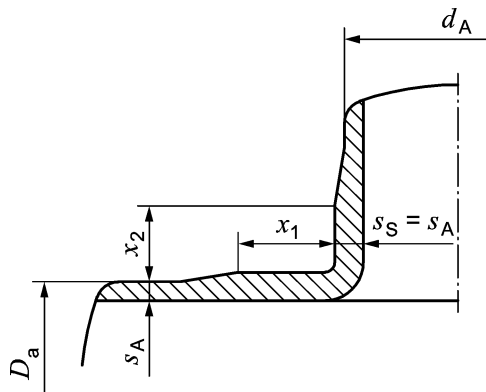
$\frac{d_A}{\sqrt{D_a \cdot s_A}}$	1	2	3	4	5
Ausführung					
unverstärkt oder scheibenförmig verstärkt nach den Bildern 4a bzw. 4b	0,44	0,33	0,27	0,22	0,19
scheiben- und rohrförmig verstärkt nach Bild 5 ( $s_S/s_A = 1$ ) bzw. nach Bild 6 ( $s_S/s_A \geq 0,8$ )	0,60	0,47	0,38	0,32	0,28



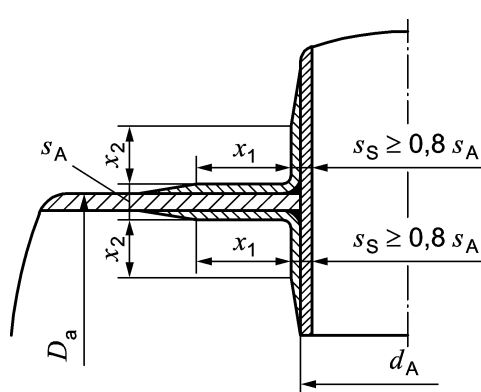
**Bild 4a — Scheibenförmige Verstärkung (duroplastische Schutzschicht)**



**Bild 4b — Scheibenförmige Verstärkung (thermoplastischer Liner)**



**Bild 5 — Scheibenförmige Ausschnittverstärkung (angeformter Stutzen)**



**Bild 6 — Scheiben- und rohrförmige Ausschnittverstärkung (durchgesteckter Stutzen)**

**4.5.6.5** Die Breite der scheibenförmigen Verstärkung muss  $x_1 \geq \sqrt{D_a \cdot s_A}$ , mindestens jedoch  $10 \times$  Mantelwanddicke, die Höhe der rohrförmigen Verstärkung  $x_2 \geq \sqrt{d_A \cdot s_A}$  betragen, wobei die Ausführungen gemäß den Bildern 5 und 6 zu beachten sind. Für Ausschnitte mit  $d_A \leq 150$  ist  $x_1 = 100$  mm, mindestens jedoch  $10 \times$  Mantelwanddicke.

**4.5.6.6** Die Nachprüfung der gegenseitigen Beeinflussung von benachbarten Ausschnitten ist dann zu führen, wenn der Mittenabstand  $\leq 1,5 \times d_{\max}$  bzw.  $\leq \sqrt{D_a \cdot s_A}$  beträgt. Vereinfachend kann  $v_A$  mit  $d_A$  des umschließenden Kreises der beiden Ausschnitte ermittelt werden.

Der Nachweis darf auch durch weitere Berechnungsmethoden (z. B. FEM) oder Dehnungsmessungen geführt werden.

**4.5.6.7** In der Krempe von Böden sollen keine Ausschnitte angeordnet werden. Soweit Stutzen erforderlich sind, soll ihr innerer Durchmesser den Wert  $\sqrt{2r \cdot s}$  nicht überschreiten. Die Stutzenwanddicke soll gleich der Krempe wanddicke sein. Außerdem ist bei der Prüfung nachzuweisen, dass die zulässigen Spannungen und Dehnungen nicht überschritten werden.

## 4.5.7 Flansche

Flansche mit konischem oder zylindrischem Ansatz, die aus einem durchgehenden Laminat hergestellt sind und deren Verbindung mit dem Stutzenrohr mindestens in einem Abstand von  $x = \sqrt{D_a \cdot s}$  vom Flanschblatt oder mit dem Überlaminat der Stutzenverstärkung erfolgt, können nach der Vornorm DIN 2505 (Oktober 1964) bzw. nach der DIN EN 13121-3 berechnet werden. Die Anzahl der Schrauben soll möglichst groß gewählt werden, und die Schraubenteilung soll nicht größer als  $5 d_L$  sein. Es sind mindestens vier Schrauben vorzusehen.

Als Anhaltswert für die Berechnung nach der Vornorm DIN 2505 (Oktober 1964) gilt:

$$\frac{M}{W} \leq \frac{K_B}{1,5 \cdot A \cdot S} \quad (11)$$

Als Biegefestigkeit  $K_B$  ist die für die betrachtete Richtung, hier ist die Umfangsrichtung maßgebend, vorhandene Biegefestigkeit einzusetzen.

Blindflansche und ebene Platten dürfen in Anlehnung an das AD 2000-Merkblatt B 5 bzw. DIN EN 13121-3 bemessen werden, wobei anstelle von  $\frac{K}{S}$  der Term  $\frac{K_B}{1,5 \cdot A \cdot S}$  eingesetzt werden muss.

## 4.6 Verformungsnachweis

Mit den unter Abschnitt 4.5.1 angegebenen Gleichungen lassen sich für die vorgesehenen Wanddicken die vorliegenden mittleren Spannungen im Betriebs- und Prüfzustand für die einzelnen Bauteilgruppen ermitteln.

Im Einzelnen gilt:

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{E_L} - \frac{\nu_L}{E_U} \cdot \sigma_U \quad (12)$$

$$\varepsilon_U = \frac{\sigma_U}{E_U} - \frac{\nu_U}{E_L} \cdot \sigma_L \quad (13)$$

Hierin sind  $E_L$ ,  $E_U$  die im Werkstoffgutachten festgelegten E-Moduln. Die Werteermittlung nach der Kontinuums- (schichtweise Bruchanalyse [1]) oder der Netztheorie [3] ist unter Berücksichtigung von Abschnitt 4.4.8 zulässig.

Die ermittelten Dehnungen  $\varepsilon_L$  und  $\varepsilon_U$  müssen kleiner als die für den entsprechenden Lastfall zulässigen Werte sein (siehe Abschnitt 4.4.8).

## 4.7 Nachweise gegenüber äußerem Überdruck

### 4.7.1 Berechnung der zulässigen Druckspannung

**4.7.1.1** Der zulässige äußere Betriebsüberdruck beträgt bei zylindrischen Mänteln für die Beanspruchung in Umfangsrichtung

$$p = \frac{20 \cdot s \cdot K_D}{D_a \cdot A \cdot S} \quad (14)$$

**4.7.1.2** Der zulässige äußere Betriebsüberdruck beträgt für die Beanspruchung in Längsrichtung

$$p = \frac{40 \cdot s \cdot K_D}{D_a \cdot A \cdot S} \quad \text{im ungestörten Bereich} \quad (15)$$

$$p = \frac{20 \cdot s \cdot K_D}{D_a \cdot A \cdot S} \quad \text{im Bereich der Einflussbreite } b \text{ für starre Ringe bzw. Böden } b = 0,3 \cdot \sqrt{D_a \cdot s} \quad (16)$$

## 4.7.2 Berechnung gegen Instabilität

Der kritische Beuldruck ist von den elastischen Eigenschaften und von der Geometrie des Zylinders abhängig.

Der zulässige Betriebsüberdruck ergibt sich zu

$$p_{\text{zul}} = \frac{p_{\text{krit}}}{A \cdot S} \quad (17)$$

### 4.7.2.1 Unversteifte Zylinder

Für unversteifte Zylinder kann ohne besonderen Nachweis bei Zylinderlängen  $\leq 6 \cdot D_a$  der kritische Beuldruck nach Formel (18) berechnet werden.

$$p_{\text{krit}} = 23,5 \cdot E_s \cdot \frac{D_a}{l} \cdot \left( \frac{s}{D_a} \right)^{5/2} \quad (18)$$

$$E_s = \sqrt[4]{E_{\text{UB}}^3 \cdot E_{\text{LB}}} \quad (18a)$$

Für unversteifte Zylinder, deren zylindrische Länge  $l$  größer als  $6 \cdot D_a$  ist, ist der kritische Beuldruck nach Formel (19) zu berechnen.

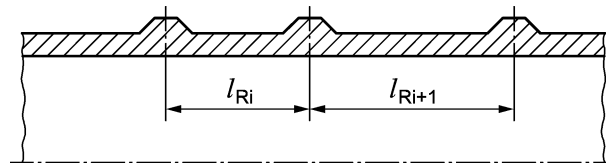
$$p_{\text{krit}} = \frac{20 \cdot E_{\text{UB}}}{1 - \nu_L \cdot \nu_U} \cdot \left( \frac{s}{D_a} \right)^3 \quad (19)$$

Für übliche Lamine darf  $\nu_L \cdot \nu_U = 0,1$  gesetzt werden.

$$\text{Damit ergibt sich } p_{\text{krit}} \approx 22 \cdot E_{\text{UB}} \cdot \left( \frac{s}{D_a} \right)^3 \quad (19a)$$

### 4.7.2.2 Ringversteifte Zylinder

Die Zylinderschale zwischen Versteifungen ist entsprechend Abschnitt 4.7.2.1 zu beurteilen.



**Bild 7 — Abstände von Ringversteifungen**

Hierbei ist  $l = l_R$  der Abstand zweier benachbarter Versteifungsringe. Liegen unterschiedliche Ringabstände vor, ist für  $l_R$  der Mittelwert aus den beiden maximalen benachbarten Ringabständen in die Berechnung von  $p_{\text{krit}}$  einzusetzen:

$$l_R = \frac{(l_{Ri} + l_{Ri+1})_{\text{max}}}{2}$$

Gesamtinstabilität:

Für die Berechnung des zulässigen Druckes bezüglich der Gesamtinstabilität gilt bei versteiften Zylinderschalen:

$$p_{\text{krit}} = \frac{20 \cdot E_s \cdot s}{D_a} \cdot \frac{\lambda^4}{\left( m^2 - 1 + \frac{\lambda^2}{2} \right) \cdot (m^2 + \lambda^2)^2} + \frac{(m^2 - 1) \cdot 80 \cdot E_R \cdot J_e}{D_a^3 \cdot l_R} \quad (20)$$

$m \geq 2$  ist die ganzzahlige Anzahl der möglichen Beulwellen in Umfangsrichtung;  $m$  ist so zu wählen, dass  $p$  zum kleinsten Wert bei gegebenem  $E_R \cdot J_e$  wird.

$E_s$  ist der Vergleichsmodul nach Formel (18a) der Wandung zur Ermittlung der Steifigkeit für die mittragende Breite  $l_m$  (Formel (22)).

$\lambda$  ist wie folgt zu ermitteln:

$$\lambda = \frac{\pi \cdot D_a}{2 \cdot l} \quad (21)$$

wobei  $l$  der Abstand zwischen zwei Endscheiben bzw. zwei wirksamen Versteifungen ist.

Vereinfachend kann für die Ermittlung der Ringsteifigkeit, unter Vernachlässigung der Schalentragswirkung und der Endscheiben, Folgendes angesetzt werden:

$$\text{erforderliches } J \geq \frac{p \cdot D^3 \cdot l_R}{240 \cdot E_R} \cdot A \cdot S$$

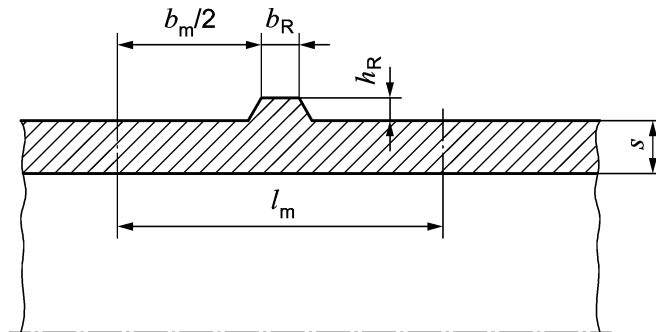
Das Flächenträgheitsmoment  $J_e$  der elastischen Versteifung (Bild 8) setzt sich zusammen aus dem Trägheitsmoment des Ringes mit der Höhe  $h_R$  und dem Trägheitsmoment der mittragenden Breite  $l_m$ . Bei einwandfreier schubfester Verbindung des Verstärkungsringes mit dem Mantel wird das Gesamtträgheitsmoment auf den gemeinsamen Schwerpunkt bezogen. Ist eine einwandfreie Verbindung Ring/Mantel nicht gewährleistet, so ist das Gesamtträgheitsmoment  $J_e$  nur die Summe der Einzelträgheitsmomente. Hierbei sind eventuell vorhandene Unterschiede im E-Modul zu berücksichtigen.

$l_R$  ist der Abstand der Ringe (siehe Bild 7).

Die mittragende Schalenlänge  $l_m$  ergibt sich zu

$$l_m = b_m + b_R \quad (22)$$

$$b_m \leq 1,1 \cdot \sqrt{D_a \cdot s} \leq 20 \cdot s \quad (22a)$$



**Bild 8 — Abmessungen von Ringversteifungen**

$$2h_R \leq b_R \leq 20 h_R$$

$$s \leq h_R \leq 4s$$

### 4.7.3 Gewölbte Böden unter äußerem Überdruck

Bei Verwendung gewölbter Böden ist die Korbbogen- oder Halbkugelform der Klöpperform vorzuziehen. Flachgewölbte und ebene Böden mit Krempe dürfen nicht verwendet werden.

#### 4.7.3.1 Festigkeitsberechnung

Der zulässige äußere Überdruck von Böden ergibt sich für die Krempe:

$$p = \frac{40 \cdot s \cdot \frac{K_B}{A \cdot S}}{D_a \cdot C_2} \quad (23)$$

Für die Kalotte:

$$p = \frac{40 \cdot s \cdot \frac{K_D}{A \cdot S}}{D_a \cdot C_2} \quad (24)$$

Der Formbeiwert  $C_2$  ist der Tafel 4 zu entnehmen.

#### 4.7.3.2 Stabilitätsberechnung

Der zulässige Beuldruck der Kugelschale mit dem Radius  $R$  ergibt sich zu

$$p = 3,66 \cdot \frac{E_B}{A \cdot S} \cdot \left(\frac{s}{R}\right)^2 \quad (25)$$

Als Biege-E-Modul ist der kleinste der richtungsabhängigen Werte aus dem Werkstoffgutachten einzusetzen.

## 5 Prüfungen

### 5.1 Verfahrensprüfung

Die Verfahrensprüfung erfolgt im Herstellerwerk anhand von Herstellerunterlagen über seine Fertigungseinrichtungen, sein Fachpersonal und seine Gütesicherung sowie über seine Werkstoffe. Die Herstellung und die Entnahme der für die Bauart repräsentativen Proben für die Werkstoffprüfung müssen bei der Verfahrensprüfung erfolgen.

Über die Durchführung und die Ergebnisse der Verfahrensprüfung wird ein Bericht erstellt, in dem die Druckbehälterbauart, die Baugrößen, die Werkstoffe und die Herstellungsverfahren zu beschreiben sind.

Bei Änderungen, z. B. bei Durchmesserabweichungen von mehr als 50 %, Änderung der Unterstützungen oder der Verbindungen sowie der Ausschnitt- oder Stützenabmessungen, ist eine Ergänzungsprüfung erforderlich.

### 5.2 Werkstoffprüfung

#### 5.2.1 Allgemeines

**5.2.1.1** Die für die Bemessung und Ausführung der Bauteile maßgebenden Werkstoffkennwerte und Teilfaktoren sind vor oder bei Aufnahme der Fertigung zu ermitteln und in einem Werkstoffgutachten festzulegen. Änderungen des Werkstoffs oder der Herstellung sowie Erweiterungen der Betriebsbedingungen (z. B. Betriebstemperaturen, Beschickungsgut) erfordern eine ergänzende Werkstoffbegutachtung.

**5.2.1.2** Die Werkstoffprüfung dient der Bestimmung der Kennwerte, die der Berechnung nach Abschnitt 4 zugrunde gelegt werden. Der Werkstoffnachweis erfolgt aufgrund eines erstmaligen Werkstoffgutachtens anhand einer Identitätsprüfung des Werkstoffs oder anhand eines Werkstoffgutachtens im Einzelfall.

**5.2.1.3** Die typgemäßen Eigenschaften der Ausgangsstoffe nach Abschnitt 3.2 müssen durch Bescheinigungen DIN EN 10204 – 2.2 (Werkszeugnisse) bestätigt werden.

**5.2.1.4** Die zur Werkstoffprüfung erforderlichen Proben sind dem Bauteil oder den Werkstoffmustern zu entnehmen, die dem Werkstoff des Bauteils hinsichtlich der Ausgangsstoffe, des Schichtaufbaus und der Herstellung entsprechen müssen. Die Probennahme erfolgt in den Hauptspannungsrichtungen der Textilglasverstärkung.

#### 5.2.2 Kennwertbestimmung

Bei der Werkstoffprüfung sind folgende Kennwerte zu bestimmen:

- (1) Textilglasanteil in Anlehnung an DIN EN ISO 1172, ggf. für das Laminat der Tragschichten und der Schutzschicht getrennt, sowie Schichtenaufbau mit den anteiligen Flächengewichten.
- (2) Kriechneigung in 24 h-Zeitstand-Biegeversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 14125.
- (3) Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Elastizitätsmodul nach DIN EN ISO 527 (vorzugsweise Probekörper II mit 50 mm Breite).
- (4) Biegefestigkeit, Durchbiegung beim Bruch und Elastizitätsmodul nach DIN EN ISO 14125 (vorzugsweise mit Probekörpern mit 30 mm Breite und einer Länge entsprechend dem 24-Fachen der Dicke bei einem Auflagerabstand entsprechend dem 20-Fachen der Dicke), bei 23 °C.
- (5) Bruchlast von Laminatverbindungen im Zugversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 527 oder im Biegeversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 14125 mit Proben entsprechend der Bauteilgeometrie bei 23 °C.
- (6) Kriechdehnung im Zeitstand-Zugversuch oder im Zeitstand-Biegeversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 14125 bei zulässiger Betriebsspannung oder mindestens 20 % der Laminatbruchspannung, bei 23 °C über mindestens 1000 Std.
- (7) Die Barcol-Härte ist nach DIN EN 59 zu bestimmen. Es ist ein Wert von mindesten 80 % des im Datenblatt des Harzherstellers angegebenen Barcol-Wertes zu erreichen.

Die Prüfbedingungen sind im Ergebnisbericht anzugeben.

Die Erreichung der Anforderungswerte nach (2) und (7) gewährleistet eine ordnungsgemäße Aushärtung und damit auch die aus den Datenblättern des Harzherstellers angesetzte HDT des Matrixwerkstoffes.

#### 5.2.3 Werkstoffgutachten

**5.2.3.1** Das Werkstoffgutachten dient dem Nachweis, dass die Anforderungen nach Abschnitt 3.3 und die Bedingungen nach den Abschnitten 4.4.4 bis 4.4.8 erfüllt sind.

Die Festlegungen von Werkstoffgutachten können in Werkstoffblättern zusammengefasst werden.

**5.2.3.2** Das Werkstoffgutachten wird erstmalig vor Aufnahme der Fertigung oder im Einzelfall bei Aufnahme der Fertigung anhand der Ergebnisse aus der Werkstoffprüfung nach Abschnitt 5.2 erstellt. Dem Werkstoffgutachten sind die Mittelwerte der Ergebnisse nach (1) und (2) des Abschnitts 5.2.2 aus mindestens je fünf Proben, die Mittelwerte und Standardabweichungen der Ergebnisse nach (3), (4), (5) und (7) aus mindestens je zehn Proben sowie die Mittelwerte und Standardabweichungen der Ergebnisse nach (6) aus jeweils mindestens zehn Proben zugrunde zu legen.

**5.2.3.3** Bei Vorlage eines Werkstoffgutachtens ist die Durchführung einer Identitätsprüfung als Werkstoffnachweis erforderlich und ausreichend. Bei der Identitätsprüfung sind die Prüfungen (1), (2), (4) und (7) des Abschnitts 5.2.2 mit mindestens je drei Proben bei 23 °C durchzuführen.

Bei Änderungen gegenüber dem vorgelegten Werkstoffgutachten ist die Durchführung aller Prüfungen nach Abschnitt 5.2.2 und eine Begutachtung im Einzelfall erforderlich.

## 5.3 Behälterprüfung

### 5.3.1 Entwurfsprüfung und Abnahme

**5.3.1.1** Für die Entwurfsprüfung gilt AD 2000-Merkblatt HP 511. Zusätzlich sind folgende Angaben erforderlich:

- Laminataufbau der Bauteile und Bauteilverbindungen,
- verwendete Harzsysteme und Verstärkungsstoffe einschließlich eventueller thermischer Nachbehandlungen,
- Zusammensetzung und Aufbau der Schutzschichten,
- HDT und ggf. Schubmodulkurven der Harzformstoffe,
- Beschickungsmittel, seine chemische Zusammensetzung, sein Aggregatzustand und das Gewicht der Füllung,
- Bemessungsgrundlage mit Quellenangabe, wenn die Bemessung nicht nach Abschnitt 4 erfolgt,
- die vorgesehene Verwendungsdauer des Druckbehälters,
- schwellende und andere dynamische Beanspruchungen, die bei der Auslegung des Druckbehälters berücksichtigt werden müssen,
- Anweisungen für den Transport und die Montage.

**5.3.1.2** Für die Schlussprüfung gilt in Anlehnung AD 2000-Merkblatt HP 512.

#### 5.3.1.3 Druckprüfung Einzelfertigung

Die Druckprüfung ist bei einer Einzelfertigung in Anlehnung an AD 2000-Merkblatt HP 512 durchzuführen.

Der Prüfdruck beträgt abweichend HP 512 mindestens das 1,3-Fache des maximal zulässigen Druckes. Die Druckprüfung wird bei Umgebungstemperatur durchgeführt.

Sämtliche thermoplastischen Auskleidungen sind vor der Durchführung der Dichtheitsprüfung oder der Druckprüfung einer Hochspannungsprüfung auf Fehler zu unterziehen. Sollten Fehler festgestellt werden, dürfen sie durch Ausarbeiten der fehlerhaften Stelle und erneutes Verschweißen behoben werden. Die Mindestlänge von Ausbesserungsnähten beträgt 50 mm.

Sämtliche in Einzelfertigung hergestellten Bauteile sind einer Druckprüfung entsprechend den Anforderungen der Auslegungsspezifikation zu unterziehen.

Die Beanspruchung darf während der Prüfung an keinem Bauteil die nach Abschnitt 4 ermittelten Grenzwerte überschreiten. Hierzu können gegebenenfalls Dehnungsmessungen erforderlich sein, wenn das statische System keine eindeutigen Ergebnisse liefert.

Die Bauteile sind während der Prüfung in geeigneter Weise abzustützen. Bei Bedarf sind die Bauteile während der Prüfung durch geeignete Halterungen zu verankern.

Alle Manometer müssen eine Messgenauigkeit von  $\leq 2\%$  aufweisen.

Sämtliche Bauteile sind vor Beginn der Druckprüfung auf Dichtheit zu prüfen.

Sämtliche Druckprüfungen sind mit kontrolliertem, allmählich steigendem Prüfdruck durchzuführen.

Die Prüfdauer beträgt in allen Fällen mindestens eine Stunde.

Während der Prüfungen ist auf Anzeichen von Undichtigkeit oder ungewöhnliche Verformung an der Außenseite der Bauteile zu achten. Fehler sind mit ihrer genauen Lage aufzuzeichnen.

Nach Abschluss der Druckprüfung ist die Innenfläche auf Risse und Haarrisse im Harz zu untersuchen. Thermoplastische Auskleidungen sind nach der Druckprüfung auf Schäden zu untersuchen und einer Hochspannungsprüfung zu unterziehen.

Mit Zustimmung der benannten Stelle dürfen während der Prüfung festgestellte Fehler repariert werden. Werden Reparaturen an tragenden Bauteilen durchgeführt, ist das Bauteil einer erneuten Prüfung zu unterziehen.

Stehende Behälter müssen ggf. liegend der Druckprüfung unterzogen werden. Dabei sind die Auflagerungen des Behälters während der Prüfung und die resultierenden statischen und Druckbelastungen der verschiedenen Behälterbauteile zu beachten.

### 5.3.2 EG-Baumusterprüfung

Bei einer Serienfertigung ist in Anlehnung an AD 2000-Merkblatt HP 512 an einem Baumuster eine Druckprüfung durchzuführen. Hierfür ist ein Prüfplan, der auch fertigungsüberwachende Prüfungen enthalten muss, zu erstellen.

## 6 Schrifttum

- [1] Puck, A.: „Konstruieren und Berechnen von GfK-Teilen“, Beiheft zur Fachschrift „Kunststoffberater“, Umschau-Verlag, Frankfurt/Main 1969
- [2] NN *Berechnungsempfehlungen des DIBt, 40-B1, 40-B2, 40-B3, 40-B5*
- [3] NN *Medienlisten des DIBt 40*
- [4] NN *DIN EN 13121 Teile 1–4*

---

Herausgeber:



Verband der TÜV e.V.

E-Mail: [berlin@vdtuev.de](mailto: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  
[kundenservice@beuth.de](mailto:kundenservice@beuth.de)  
[www.beuth.de](http://www.beuth.de)