

# AD 2000-Merkblatt

ICS 23.020.30

Ausgabe September 2001

<b>Sonderfälle</b>	<b>Allgemeiner Standsicherheitsnachweis für Druckbehälter Behälter mit gewölbten Böden auf Füßen</b>	<b>AD 2000-Merkblatt S 3/3</b>
--------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------

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 Verbindung gewölbter Boden – Stützfüße    |
| 1 Geltungsbereich             | 6 Stützfußkonstruktion                      |
| 2 Allgemeines                 | 7 Schrifttum                                |
| 3 Formelzeichen und Einheiten | Anhang 1: Formeln für die Schnittkräfte und |
| 4 Belastungen                 | -momente in einer Kugelschale               |

## 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

Dieses AD 2000-Merkblatt dient der Berechnung von gewölbten Druckbehälterböden, die durch rohrförmige, gleichmäßig auf einem Teilkreis  $0,7 \leq d_F / D_a < 0,8$  an-

geordnete Behälterfüße (s. Bild 1a) örtlich beansprucht werden, sowie der Berechnung der Behälterfüße einschließlich der Fußplatten selbst.

Die Berechnung gilt bei vorstehenden Voraussetzungen innerhalb der Grenze  $e/R_m > 0,003$ , damit Stabilitätsversagen ausgeschlossen wird. Kräfte infolge Behälterneigung sind nicht berücksichtigt. Der Standsicherheitsnachweis für Boden und alle Bauteile der Fußkonstruktion muss für alle relevanten Lastfälle entsprechend AD 2000-Merkblatt S 3/0 Abschnitt 4.3 geführt werden. Als Bemessungskriterium für dünnwandige Kugelschalen mit lokalen Lasteinleitungen wird ein vereinfachtes Traglastverfahren herangezogen.

## 2 Allgemeines

Dieses AD 2000-Merkblatt ist nur in Zusammenhang mit AD 2000-Merkblatt S 3/0 anzuwenden.

Die Auswahl der Fußabmessungen und die Anordnung der Füße sollen vorzugsweise nach DIN 28 081 erfolgen. Bei geringer Beanspruchung (s. Abschnitt 5.1) können Verstärkungsbleche am Boden entfallen.

Ersatz für Ausgabe Oktober 2000; | = Änderungen gegenüber der vorangehenden Ausgabe

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.

Behälterfüße im äußeren Krempebereich von gewölbten Böden und am zylindrischen Mantel können nicht nach diesem AD 2000-Merkblatt berechnet werden. Sie sind nach anderen geeigneten Methoden (z. B. DIN 28 081 T. 4) zu bemessen.

Es ist sicherzustellen, dass eine gleichmäßige Auflagerung durch alle Füße gewährleistet ist (s. AD 2000-Merkblatt S 3/0 Abschnitt 4.4). Dies gilt insbesondere, wenn das Verhalten des Bodenwerkstoffes nicht zäh oder die Grenzdehnung z. B. wegen Beschichtung begrenzt ist.

Die schweißgerechte Gestaltung erfolgt in Anlehnung an DIN EN 1708.

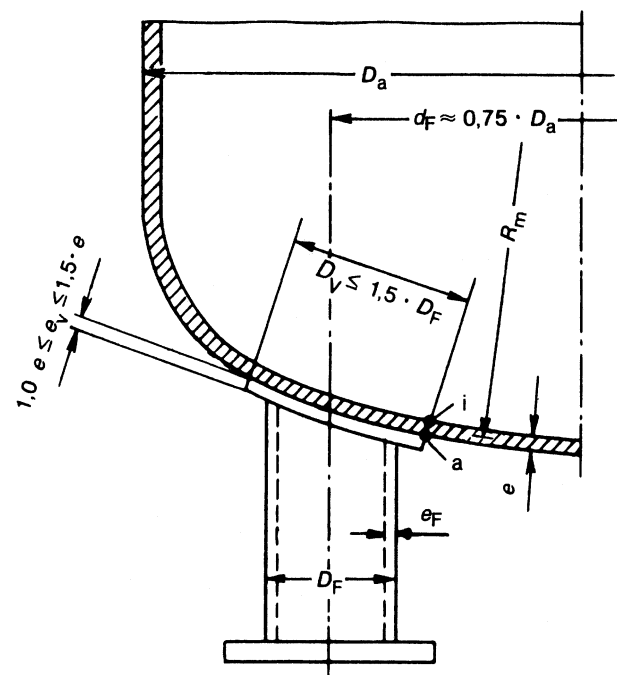


Bild 1a. Gewölbter Boden auf Füßen

## 3 Formelzeichen und Einheiten

Über die Festlegungen des AD 2000-Merkblattes B 0 hinaus gilt:

a	äußere, d. h. der Symmetrieachse abgewandte Schalenoberfläche (Bild 1a)	–
b	hier: Abstand der Ankerschrauben	in mm
e	Bodenwanddicke ohne Zuschläge	in mm
f	zulässige Beanspruchung (s. AD 2000-Merkblatt S 3/0)	in N/mm <sup>2</sup>
i	innere, d. h. der Symmetrieachse zugewandte Schalenoberfläche (Bild 1a)	–
l	Fußplattenlänge	in mm
m	hier: Exzentrizität	in mm
n <sub>S</sub>	Anzahl der Schrauben je Fuß	–
q	hier: Hilfswert	–
r <sub>0</sub>	Ersatzradius	in mm
ü	Überstand Fußplatte	in mm
z	hier: Traglastfaktor	–
A	Querschnittsfläche	in mm <sup>2</sup>
F <sub>V</sub>	auf Symmetrieachse bezogene Kraft	in N
M	Schnittmoment	in Nmm bzw. Nmm/mm

N	hier: Schnittkraft	in N/mm bzw. N
R <sub>m</sub>	hier: mittlerer Radius des Kalottenteils	in mm
U	Hilfswert	–
W	Biegegewiderstandsmoment	in mm <sup>3</sup>
α	hier: Hilfswert	–

## Indizes

b	– Biegeanteil
d	– Druckbelastung bezogen auf Stützfuß
h	– horizontal
m	– Membrananteil
x	– in x-Richtung
y	– in y-Richtung
z	– Zugbelastung bezogen auf Stützfuß
B	– Beton
F	– Fuß
K	– Ankerschraube
P	– Fußplatte
V	– Verstärkungsblech

## 4 Belastungen

Die vorhandene vertikale Gesamtkraft pro Fuß  $N_F$  errechnet sich in der Anschlussebene gewölbter Boden – Stützfuß aus allen Horizontal- und Vertikallasten entsprechend dem betrachteten Lastfall (s. Bild 1b) nach AD 2000-Merkblatt S3/0 Abschnitt 4.2.

Durch die horizontale Belastung  $F_F$  wird jeder Stützfuß zusätzlich auf Biegung beansprucht. Das daraus resultierende maximale Biegemoment in der Einspannstelle an der Fundamentoberkante errechnet sich aus

$$M_F = F_F \cdot h_F, \quad (1)$$

wobei die Gesamt-Horizontallast  $F_h$  gleichmäßig durch alle beteiligten Füße übertragen angenommen wird.

$$F_F = \frac{F_h}{n_F} \quad (2)$$

## 5 Verbindung gewölbter Boden – Stützfüße

### 5.1 Gewölbter Boden

Die maximalen Belastungen  $N_{Fd}$  gemäß AD 2000-Merkblatt S 3/0 Abschnitt 4.4 werden um 15 % erhöht, um damit Biegeanteilen infolge nichtradialer Lastenleitung Rechnung zu tragen. Damit ergibt sich eine resultierende Ersatz-Fußlast

$$F = 1,15 \cdot N_{Fd} \quad (3)$$

Diese ist in Bild 2 zur Ermittlung der dimensionslosen Schnittkräfte und -momente  $(N_x \cdot e / F)$ ,  $(N_y \cdot e / F)$ ,  $(M_x / F)$  und  $(M_y / F)$  in Abhängigkeit vom Berechnungsbeiwert

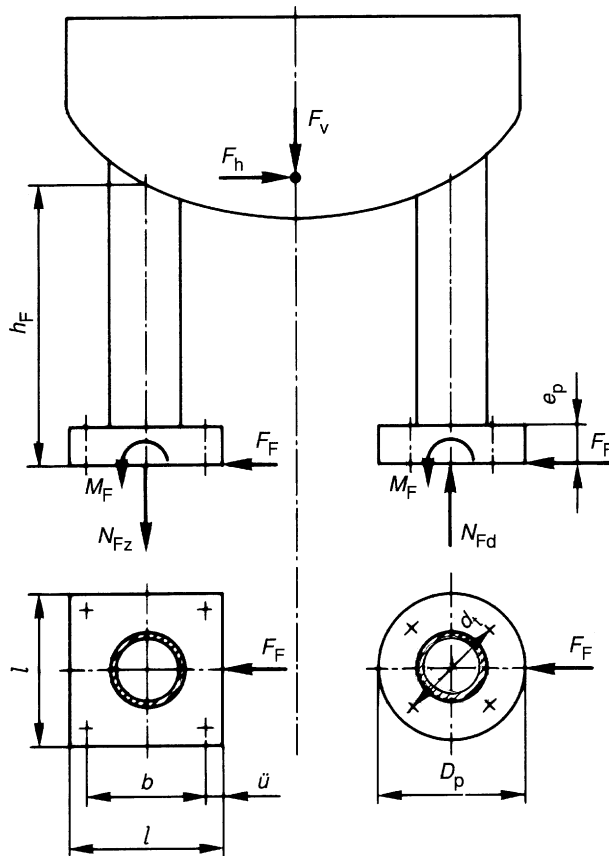
$$U = \frac{r_0}{\sqrt{R_m \cdot e}} \quad (4)$$

und in Tafel 1 einzusetzen.

Hierbei beträgt der Ersatzradius  $r_0 = \frac{D_V}{2}$ .

Für Behälterfüße ohne Verstärkungsplatte ist  $D_V = D_F$  einzusetzen.

Anstelle des Bildes 2 können auch die in Anhang 1 niedergelegten Formeln verwendet werden.



**Bild 1b.** Fußgeometrie und Belastungsgrößen

Die Beanspruchung durch den im betrachteten Lastfall am Anschluss Fuß - Boden lokal anstehenden Innendruck ist gemäß Tafel 1 zu überlagern.

## 5.2 Verstärkungsblech

Die erforderliche Blechdicke ergibt sich aus der Ungleichung

$$1,0 \cdot e \leq e_v = \alpha \cdot \sqrt{\frac{N_{Fd}}{1,3 \cdot f_v}} \leq 1,5 \cdot e \quad (5)$$

Dabei ist  $e$  gegebenenfalls so zu erhöhen, dass die Ungleichung erfüllt ist.

Der Faktor  $\alpha$  ist abhängig vom Verhältnis  $D_v/D_F$  und beträgt

$$\alpha = 2 \cdot \frac{D_v}{D_F} - 0,543 \cdot \left(\frac{D_v}{D_F}\right)^2 - 1,25 \quad (6)$$

Diese Formel gilt in den Grenzen  $1,25 \leq \frac{D_v}{D_F} \leq 1,5$ .

## 6 Stützfußkonstruktion

### 6.1 Spannungs- und Stabilitätsnachweis

Der allgemeine Spannungsnachweis erfolgt nach

$$\sigma_F = \frac{N_{Fd}}{A_F} + \frac{M_F}{W_F} \leq f_F \quad (7a)$$

$$\sigma_F = \frac{N_{Fd}}{\pi \cdot e_F \cdot (D_F - e_F)} + \frac{4 \cdot M_F}{\pi \cdot e_F \cdot (D_F - e_F)^2} \quad (7b)$$

Der Stabilitätsnachweis kann nach DIN 18 800 Teil 2 durchgeführt werden; er kann entfallen, wenn die folgende Bedingung erfüllt ist:

**Tafel 1.** Berechnungsgang

Nr.	Spannungen (N/mm <sup>2</sup> )	innen	außen
1	$\sigma_{mp} = R_m \cdot p / (20 \cdot e)$	+	
2	$\bar{\sigma}_{mx} = (N_x \cdot e/F) \cdot F/e^2$	-	
3	$\bar{\sigma}_{my} = (N_y \cdot e/F) \cdot F/e^2$	-	
4	$\sigma_{mx} = \sigma_{mp} + \bar{\sigma}_{mx}$		
5	$\sigma_{my} = \sigma_{mp} + \bar{\sigma}_{my}$		
6	$\sigma_{mV} = \sqrt{\sigma_{mx}^2 + \sigma_{my}^2} - \sigma_{mx} \cdot \sigma_{my} \leq 1,5 \cdot f$		
7	$\sigma_{bx} = (M_x/F) \cdot 6 \cdot F/e^2$	+	-
8	$\sigma_{by} = (M_y/F) \cdot 6 \cdot F/e^2$	+	-
9	$\sigma_x = \sigma_{mx} + \sigma_{bx}$		
10	$\sigma_y = \sigma_{my} + \sigma_{by}$		
11	$(\sigma_m + \sigma_b)_V = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} - \sigma_x \cdot \sigma_y$ $\leq (\sigma_m + \sigma_b)_{V \text{ zul}}$		
12	$q = \sigma_{mV} / K$		
13	$z = 1,5 - 0,5 \cdot q^2$		
14	$(\sigma_m + \sigma_b)_{V \text{ zul}} = 1,5 \cdot z \cdot f$		

Bei ausgekleideten Behältern ist die Dehnfähigkeit des Auskleidungswerkstoffes zu berücksichtigen.

$$N_{Fd} < 0,22 \cdot \frac{E_F \cdot I_F}{h_F^2} \quad (8)$$

### 6.2 Belastung der Ankerschrauben

Die Zugkraft für eine Schraube  $F_K$  errechnet sich für die Kreis- und Quadratfußplatte aus

$$F_K = \frac{N_{Fz}}{n_s} + \frac{4 \cdot M_F}{n_s \cdot d_t} \quad (9)$$

$$\text{mit } d_t = \sqrt{2} \cdot (l - 2\bar{u}) \quad (10)$$

für die Quadratfußplatte. Bei  $M_F > 0$  sind in der Regel mindestens 4 Schrauben je Fuß zu verwenden. Andere Verankerungen erfordern nach Maßgabe der Lastverteilung einen separaten Nachweis.

Die Bemessung der Ankerschrauben erfolgt nach AD 2000-Merkblatt S 3/0 Abschnitt 4.3.2.3 und 4.3.4.3.

### 6.3 Fußplattendicke

Die Abmessungen der Fußplatte werden durch die Belastungen und die vorhandene Betonpressung bestimmt.

#### 6.3.1 Vereinfachter Nachweis

Die Anwendung des Abschnittes 6.3.2 mit Ausnahme von Formel (24) kann entfallen, wenn innerhalb der „Abstrahlungsfläche“

$$A = \pi \cdot \frac{(D_F + 2 \cdot e_p)^2 - (D_F - 2 \cdot e_F - 2 \cdot e_p)^2}{4} \quad (11)$$

die von der Normalkraft und dem Moment verursachte Pressung

$$\sigma_B = \frac{F}{A} + \frac{4 \cdot M_F}{A \cdot (D_F - e_F)} \quad (12)$$

die zulässige Betonpressung nicht überschreitet.

Dabei müssen außerdem die Bedingungen

$$D_F + 2 \cdot e_P \leq D_P \text{ bzw. } \leq l \quad (13)$$

bei Kreisringplatten bzw. bei quadratischen Platten und

$$e_P \geq e_3 \text{ nach Formel (24)} \quad (14)$$

erfüllt sein.

## 6.3.2 Nachweis nach der Kreisplattentheorie

Die für die Dimensionierung maßgebenden maximalen Biegemomente werden nach der Kreisplattentheorie bestimmt, wobei der Bereich der Platten außerhalb des Stützfußes als kragender Plattenstreifen angenommen wird.

### Betonpressung:

Die vorhandene Betonpressung errechnet sich für die kreisförmige und quadratische Fußplatte aus

$$\text{Kreisplatte: } \sigma_B = \frac{4 \cdot N_{Fd}}{\pi \cdot D_P^2} \cdot \left( 1 + \frac{8 \cdot m}{D_P} \right) \quad (15)$$

$$\text{Quadratplatte: } \sigma_B = \frac{N_{Fd}}{l^2} \cdot \left( 1 + \frac{6 \cdot m \cdot \sqrt{2}}{l} \right) \quad (16)$$

$$\text{Exzentrizität: } m = \frac{M_F}{N_{Fd}} \quad (17)$$

### Quadratische Platte:

$$\text{Erforderliche Plattendicke } e_P = \max(e_1, e_2, e_3) \quad (18)$$

$$\text{außen: } e_1 = 0,5 \cdot (\sqrt{2} \cdot l - D_F) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_B}{f_P}} \quad (19)$$

$$\text{innen: } e_2 = 1,11 \cdot \left( \frac{D_F - e_F}{2} \right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_B}{f_P}} \quad (20)$$

### Kreisplatte:

$$\text{Erforderliche Plattendicke } e_P = \max(e_1, e_2, e_3) \quad (21)$$

$$\text{außen: } e_1 = \left( \frac{D_P - D_F}{4} \right) \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot \sigma_B}{f_P} \cdot \left( \frac{D_P}{D_F} + 1 \right)} \quad (22)$$

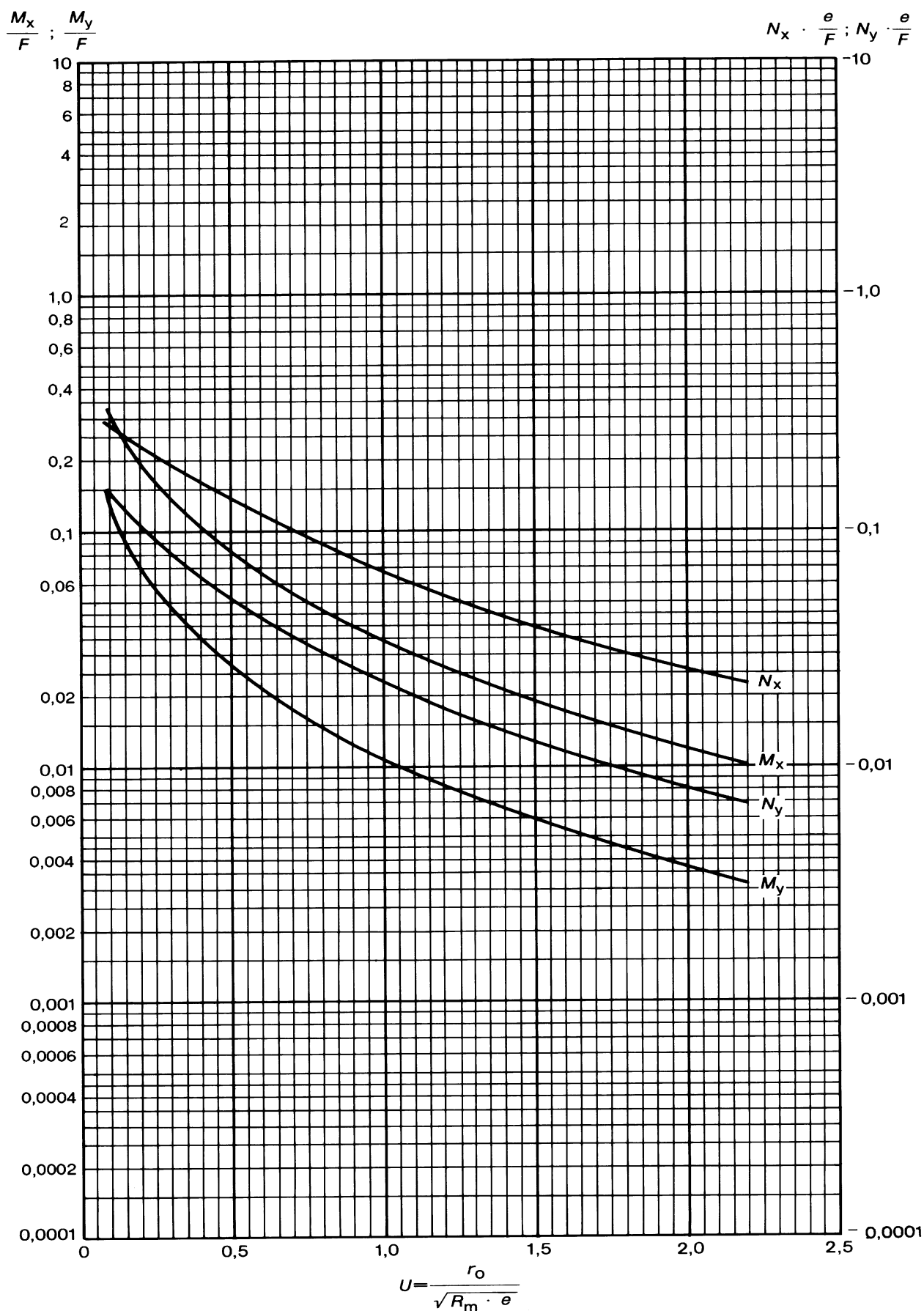
$$\text{innen: } e_2 = 1,11 \cdot \left( \frac{D_F - e_F}{2} \right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_B}{f_P}} \quad (23)$$

### Abhebefall:

$$e_3 = 1,71 \cdot \sqrt{\frac{F_K}{f_P}} \quad (24)$$

## 7 Schrifttum

- [1] Wichman, K. R., A. G. Hopper a. J. L. Mershon: Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings. WRC Bulletin 107 (Rev. March 1979). Editor C.F. Larson, New York.
- [2] Timoshenko, S., a. S. Woinowsky-Krieger: Theory of Plates and Shells. Mc Graw-Hill, 2. Edition, 1959.



**Bild 2.** Schnittkräfte  $N_x$ ,  $N_y$  und -momente  $M_x$ ,  $M_y$  in einer Kugelschale, hervorgerufen durch eine radiale Kraft  $F$  (entspr. Fig. SR-2 nach [1])

— Leerseite —

— Leerseite —

## Anhang 1 zu AD 2000-Merkblatt S 3/3

### Formeln für die Schnittkräfte und -momente in einer Kugelschale, hervorgerufen durch eine radiale Kraft $F$ gemäß Bild 2

Die Funktionswerte sind in Bild 2 des AD 2000-Merkblattes S 3/3 logarithmisch aufgetragen. Deshalb kommt für die mathematische Kurvendarstellung nur eine logarithmische Funktion in Betracht.

Für die Abszisse  $U$  ist eine lineare Transformation vorgenommen worden:  $T = -1,095238095 + 0,952380952 \cdot U$ . Die angegebenen Funktionen gelten für den Bereich  $0,100 \leq U \leq 2,20$ . Dieses entspricht in dem transformierten Bereich  $-1,00 \leq T \leq +1,00$ . Außerhalb dieses Bereiches sollen die Funktionen nicht mehr benutzt werden. Die benutzten Stützwerte liegen an den Bereichsenden dichter als in der Bereichsmittle. Deshalb ist über den ganzen Funktionsbereich eine gleichbleibende, ausreichende Genauigkeit mit dem Polynom 7. Grades in  $T$  gegeben.

Die Funktionswerte  $\phi$  ergeben sich zu

$$\phi = 10^{A_\phi}$$

$$\text{mit } A_\phi = \sum_{i=0}^{i=7} a_i \cdot T^i$$

Die Funktionswerte  $a_i$  sind in Tafel 1 dargestellt.

**Tafel 1.** Funktionswerte  $a_i$  zu AD 2000-Merkblatt S 3/3 Bild 2 bzw. WRCB, Fig. SR-2

$\frac{N_x \cdot e}{F}$	$\frac{M_x}{F}$	$\frac{N_y \cdot e}{F}$	$\frac{M_y}{F}$
$a_i \cdot T^i$	$a_i \cdot T^i$	$a_i \cdot T^i$	$a_i \cdot T^i$
$-1,253591954$	$-1,547988505$	$-1,733477011$	$-2,067959770$
$-0,500743292 \cdot T$	$-0,556978513 \cdot T$	$-0,565479303 \cdot T$	$-0,539315607 \cdot T$
$+0,202885672 \cdot T^2$	$+0,237166411 \cdot T^2$	$+0,227666485 \cdot T^2$	$+0,327914948 \cdot T^2$
$-0,244594962 \cdot T^3$	$-0,349080831 \cdot T^3$	$-0,062135964 \cdot T^3$	$-0,562600476 \cdot T^3$
$-0,154634027 \cdot T^4$	$-0,118395784 \cdot T^4$	$-0,049666123 \cdot T^4$	$-0,290641394 \cdot T^4$
$+0,401018423 \cdot T^5$	$+0,542020509 \cdot T^5$	$-0,106841035 \cdot T^5$	$+0,933201262 \cdot T^5$
$+0,104621919 \cdot T^6$	$+0,180079948 \cdot T^6$	$+0,062229523 \cdot T^6$	$+0,327094263 \cdot T^6$
$-0,213151433 \cdot T^7$	$-0,394581854 \cdot T^7$	$+0,057444808 \cdot T^7$	$-0,646227707 \cdot T^7$

$$\phi = \frac{N_x \cdot e}{F}; \quad \frac{M_x}{F}; \quad \frac{N_y \cdot e}{F}; \quad \frac{M_y}{F}$$

$$\phi = 10^{A_\phi}$$

$$A_\phi = \sum_{i=0}^{i=7} a_i \cdot T^i$$

$$T = -1,095238095 + 0,952380952 \cdot U$$

$$-1,00 \leq T \leq +1,00$$

$$U = \frac{r_0}{\sqrt{R_m \cdot e}}$$

$$0,100 \leq U \leq 2,20$$

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