

# Berechnung von Schalentragwerken

von

Acad. Prof. Ing. Aurel A. Beleş

und

Prof. Dr.-Ing. habil. Mircea V. Soare

Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin

**M**

Technische Hochschule Darmstadt

Fachbereich Mechanik

Bibliothek

Inv.-Nr.

BM 63/78

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Grundlegende Angaben und Beziehungen der Schalentheorie</b> .....	<b>13</b>
<b>2. Membranspannungszustand</b> .....	<b>34</b>
<b>2.1. Symmetrisch belastete Rotationsschalen</b> .....	<b>34</b>
2.1.1. Allgemeine Betrachtungen .....	34
2.1.2. Kugelkuppel .....	36
2.1.3. Kegelkuppel .....	50
2.1.4. Andere Rotationsschalen .....	50
2.1.5. Numerische und graphische Berechnung der Schnittkräfte .....	57
<b>2.2. Unsymmetrisch belastete Rotationsschalen</b> .....	<b>64</b>
2.2.1. Allgemeine Betrachtungen .....	64
2.2.2. Kugelkuppel und Parabelkuppel .....	67
2.2.3. Kegelkuppel .....	67
2.2.4. Kreiszyinderschalen .....	79
<b>2.3. Schalen über gleichschenkligen und gleichseitigem Dreiecksgrundriß</b> .....	<b>82</b>
<b>2.4. Schalen über rhombischem Grundriß</b> .....	<b>84</b>
<b>2.5. Schalen über elliptischem Grundriß</b> .....	<b>86</b>
<b>2.6. Zusammengesetzte Schalen</b> .....	<b>89</b>
2.6.1. Regelmäßiger Vielecksgrundriß mit geraden Rändern .....	90
2.6.2. Regelmäßiger Vielecksgrundriß mit krummlinigen Rändern .....	97
<b>2.7. Schalen über rechteckigem und quadratischem Grundriß</b> .....	<b>100</b>
2.7.1. Elliptisches und Rotationsparaboloid .....	101
2.7.2. Translationsfläche mit zwei Kreisbögen als Leitkurven .....	109
2.7.3. Kugelkuppel .....	110
2.7.4. Flächen mit einfachen Ausdrücken für die Membrankräfte .....	114
<b>2.8. Türme in Form von einschalig hyperbolischen Rotationsschalen</b> .....	<b>118</b>
<b>2.9. Flächen mit zwei Leitkurven und einer Leitebene</b> .....	<b>125</b>
2.9.1. Konoide .....	128
2.9.2. Von geradlinigen Erzeugenden begrenztes gleichseitiges hyperbolisches Paraboloid (Hypar) .....	133

<b>3. Membranformänderungszustand</b> .....	<b>138</b>
3.1. Symmetrisch belastete Rotationsschalen .....	138
3.1.1. Allgemeine Betrachtungen .....	138
3.1.2. Kugelkuppel .....	139
3.1.3. Kegelkuppel .....	140
3.1.4. Andere Rotationsflächenformen .....	141
3.2. Unsymmetrisch belastete Rotationsschalen .....	149
3.2.1. Allgemeine Betrachtungen .....	149
3.2.2. Kugelkuppel .....	152
3.2.3. Kegelkuppel .....	153
3.2.4. Kreiszyinderschalen .....	153
3.3. Das Rotationsparaboloid über verschiedenen Grundrißformen .....	160
3.3.1. Allgemeine Angaben .....	160
3.3.2. Gleichseitiger Dreiecksgrundriß .....	161
3.3.3. Rechteckiger und quadratischer Grundriß .....	163
<b>4. Biegetheorie</b> .....	<b>174</b>
4.1. Geschlossene Kreiszyinderschalen .....	174
4.1.1. Symmetrisch belasteter Kreiszyinder konstanter Dicke .....	174
4.1.2. Symmetrisch belastete Zylinderschalen veränderlicher Wanddicke .....	198
4.1.3. Unsymmetrisch belastete Zylinderschale konstanter Wanddicke .....	204
4.2. Symmetrisch belastete geschlossene Kegelschalen .....	233
4.3. Geschlossene Kugelschalen .....	239
4.3.1. Symmetrisch belastete Schale konstanter Dicke .....	239
4.3.2. Unsymmetrisch belastete Schale konstanter Dicke .....	251
4.4. Flache Rotationsparaboloide und Kugelkuppeln über quadratischem Grundriß .....	254
4.4.1. Allgemeine Betrachtungen .....	254
4.4.2. Näherungsformeln .....	255
4.4.3. Diagramme für das gleichmäßig belastete Rotationsparaboloid .....	257
4.4.4. Tabellen für das antimetrisch belastete Rotationsparaboloid .....	264
4.4.5. Belastungskombinationen .....	264
4.4.6. Erörterung des Spannungszustandes einer gleichmäßig belasteten Paraboloidschale über quadratischem Grundriß .....	269
4.5. Einfacher Randeffekt .....	275
4.5.1. Bedingungen für die Anwendbarkeit der Membrantheorie .....	276
4.5.2. Die Eigenschaften des einfachen Randeffektes .....	276
4.5.3. Allgemeine Rechenformeln .....	277
4.5.4. Tabellen für das elliptische Paraboloid über quadratischem Grundriß .....	280
4.6. Durch geradlinige Erzeugende begrenzte hyperbolische Paraboloide (Hyparschalen) .....	284
4.6.1. Auf zwei gegenüberliegende Ecken aufgelagertes hyperbolisches Paraboloid .....	284
4.6.2. Verhalten hyperbolischer Paraboloide des Schirmtyps .....	289

4.7. Hyperbolische Sattelparaboloide .....	298
4.7.1. Auf dem Rand gelenkiges hyperbolisches Sattelparaboloid .....	298
4.7.2. Hyperbolisches Sattelparaboloid, auf zwei Gegenseiten gelenkig aufgelagert .....	302
4.7.3. Das langgestreckte, an beiden Enden aufgelagerte hyperbolische Sattelparaboloid .....	302
4.8. Zylinderschalendächer .....	307
4.8.1. Exakte Methoden .....	307
4.8.2. Tabellen konkreter Zahlenwerte .....	309
4.8.3. Einflußkoeffizienten .....	347
4.8.4. Direkte Tabellen für Innenzylinderschalen .....	389
4.8.5. Längsverteilung von $N_x$ , $N_{x\varphi}$ , $N_\varphi$ und $M_\varphi$ .....	406
4.8.6. Näherungsverfahren auf Grund der exakten Theorie .....	410
4.8.7. Berechnung mit Polynomen .....	426
4.8.8. Balken- und Bogentheorie .....	432
4.8.9. Stellvertretende Fallwerke .....	433
4.8.10. Durchdrungene Zylinderschalen .....	437
4.8.11. Empirische Methoden .....	442
4.8.12. Bruchberechnung .....	445
4.9. Fallwerke .....	446
4.9.1. Einführung .....	446
4.9.2. Bahnsteigtragwerk .....	446
4.9.3. Berechnung eines windbelasteten achteckigen Turms .....	452
4.9.4. Tabellen für zickzackförmige Faltdächer .....	452
<b>5. Zusammenwirken der Schalen .....</b>	<b>465</b>
5.1. Symmetrisch belastete Rotationsschalen .....	466
5.1.1. Diagramme für die Berechnung von Flüssigkeitsbehältern mit in der Fundamentplatte elastisch eingespannten Wänden .....	466
5.1.2. Teilweise mit Flüssigkeit gefüllter zylindrischer Behälter .....	467
5.1.3. Kräftegrößenmethode. Praktische Steifigkeiten .....	487
5.1.4. Formänderungsmethode. Einflußkoeffizienten .....	489
5.1.5. Rohrleitungen mit Versteifungsringen .....	491
5.1.6. Berechnung von Zylinderboilern .....	493
5.1.7. Berechnung des Behälterbodens .....	497
5.1.8. Zusammenwirken zwischen Schalendach, Zugring und Wand .....	504
5.1.9. Kegelstumpfschalen für Hochbautenfundamente .....	510
5.2. Zylinder auf Einzelstützen mit Versteifungsring .....	515
5.3. Symmetrische horizontale Verschiebung der Stützen einer Kuppel über quadratischem Grundriß .....	517
5.4. Hyperbolische Kühltürme .....	523
<b>6. Sonderfragen .....</b>	<b>530</b>
6.1. Vorspannung von Stahlbetonschalen .....	530
6.1.1. Vorspannung des Fußringes bei Rotationsschalen .....	530
6.1.2. Vorspannung von zylindrischen Behältern .....	531
6.1.3. Vorspannung von Zylinderschalendächern .....	532
6.1.4. Vorspannung langgestreckter Hyparschalen .....	538
6.1.5. Vorspannung der Eckbereiche von Schalen mit positiver Gaußscher Krümmung .....	538

6.2. Einfluß von Temperaturschwankungen .....	543
6.2.1. Geschlossene Zylinderschalen .....	544
6.2.2. Sonnenwirkung auf kreiszylindrische Tonnenschalen .....	552
6.2.3. Rotationsschalen .....	553
6.2.4. Das hyperbolische Sattelparaboloid .....	555
6.3. Kriechen und Schwinden bei Stahlbetonschalen .....	557
6.3.1. Zeitlicher Verlauf der Formänderungen .....	557
6.3.2. Spannungs- und Formänderungszustände in Translationsschalen .....	560
6.3.3. Rechenbeispiel .....	563
6.3.4. Allgemeine Betrachtungen über den Einfluß des Kriechens und Schwindens .....	565
6.4. Große Formänderungen der Schalentragerwerke .....	567
6.5. Netzkuppeln .....	572
6.5.1. Anwendung baustatischer Methoden .....	574
6.5.2. Anwendung des Differenzenverfahrens .....	577
6.5.3. Angleichung an ein kontinuierliches Medium .....	580
6.6. Elastische Stabilität der Schalen .....	581
6.6.1. Einführung .....	581
6.6.2. Stabilität von Zylinderschalen .....	583
6.6.3. Stabilität von Kuppeln .....	603
6.6.4. Stabilität des Hypars mit geradlinigen Rändern .....	609