DIN EN 1993-1-6:2026-08 (D)

Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen; Deutsche Fassung EN 1993-1-6:2025

Inhalt

Seite

Europäisches Vorwort 7

0 Einleitung 9

1 Anwendungsbereich 13
1.1 Anwendungsbereich von EN 1993-1-6 13
1.2 Voraussetzungen 14

2 Normative Verweisungen 15

3 Begriffe und Symbole 15
3.1 Begriffe 15
3.1.1 Tragwerksformen und Geometrie 15
3.1.2 Grenzzustände 18
3.1.3 Einwirkungen 19
3.1.4 Schnittgrößen und Spannungen in Schalen 20
3.1.5 Berechnungskonzepte und deren Anwendung 21
3.1.6 Beim spannungsbasierten Tragsicherheitsnachweis verwendete Spannungskategorien 24
3.1.7 Spezielle Definitionen für Beulberechnungen 24
3.2 Symbole 26
3.2.1 Koordinatensystem 26
3.2.2 Schalenmaße 27
3.2.3 Verteilte Oberflächenlasten und -drücke 27
3.2.4 Linienlasten 27
3.2.5 Membranschnittgrößen 28
3.2.6 Biegeschnittgrößen 28
3.2.7 Spannungen 28
3.2.8 Verschiebungen bezogen auf die Schalenmittelfläche 28
3.2.9 Toleranzen 29
3.2.10 Werkstoffeigenschaften 30
3.2.11 Parameter für Widerstandsbeurteilung 30
3.2.12 Indizes 32
3.3 Vorzeichenvereinbarungen 33

4 Grundlagen der Bemessung 33
4.1 Allgemeine Regeln 33
4.1.1 Grundlegende Anforderungen 33
4.1.2 Besondere Anforderungen 34
4.2 Berechnungskonzepte 34
4.2.1 Allgemeines 34
4.2.2 Globale Tragwerksberechnung 35
4.2.3 Membrantheoretische Berechnung 35
4.2.4 Semi-membrantheoretische Berechnung 35
4.2.5 Lineare elastische Berechnung (LA) 35
4.2.6 Lineare elastische Verzweigungsberechnung (LBA) 36
4.2.7 Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung (GNA) 36
4.2.8 Materiell nichtlineare Berechnung (MNA) 37
4.2.9 Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA) 37
4.2.10 Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen (GNIA) 37
4.2.11 Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA) 38

4.3 Schalenrandbedingungen ... 38
4.4 Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten ... 39

5 Werkstoffe und Geometrie ... 39
5.1 Werkstoffeigenschaften ... 39
5.2 Bemessungswerte geometrischer Daten ... 41
5.3 Geometrische Toleranzen und geometrische Imperfektionen ... 41

6 Ermittlung der Schnittgrößen ... 42
6.1 Bemessungskonzepte ... 42
6.1.1 Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis ... 42
6.1.2 Bemessung anhand von Standardgleichungen ... 43
6.1.3 Bemessung mittels numerisch gestützter Berechnung ... 44
6.2 Schnittgrößen und Spannungen in Schalen ... 44
6.2.1 Schnittgrößen in der Schale ... 44
6.2.2 Modellierung der Schale für die Berechnung ... 45
6.2.3 Berechnungskonzepte ... 47
6.3 Zu beachtende Grenzzustände der Tragfähigkeit ... 48
6.3.1 LS1: Plastisches Versagen ... 48
6.3.2 LS2: Zyklisches Plastizieren ... 49
6.3.3 LS3: Beulen ... 50
6.3.4 LS4: Ermüdung ... 51
6.4 Konzepte für den Tragsicherheitsnachweis von Schalen ... 51
6.4.1 Allgemeines ... 51

7 Grenzzustand des plastischen Versagens (LS1) ... 52
7.1 Bemessungswerte der Einwirkungen ... 52
7.2 Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis ... 52
7.2.1 Bemessungswerte der Spannungen ... 52
7.2.2 Bemessungswerte des Widerstands ... 53
7.2.3 Begrenzung der Spannungen ... 55
7.3 Bemessung anhand numerisch gestützter MNA- oder GMNA-Berechnung ... 55
7.4 Bemessung anhand von Standardgleichungen ... 56

8 Grenzzustand des zyklischen Plastizierens (LS2) ... 56
8.1 Bemessungswerte von Einwirkungen ... 56
8.2 Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis ... 56
8.2.1 Bemessungswerte der Spannungsschwingbreite ... 56
8.2.2 Bemessungswerte des Widerstands ... 57
8.2.3 Begrenzung der Spannungsschwingbreite ... 57
8.3 Bemessung mittels numerisch gestützter GMNA-Berechnung ... 57
8.3.1 Bemessungswerte der gesamten akkumulierten plastischen Dehnung ... 57
8.3.2 Begrenzung der gesamten akkumulierten plastischen Dehnung ... 58
8.4 Bemessung mittels Standardgleichungen ... 58

9 Grenzzustand des Beulens (LS3) ... 58
9.1 Bemessungswerte von Einwirkungen ... 58
9.2 Spezielle Definitionen und Symbole ... 58
9.3 Beulrelevante Randbedingungen ... 59
9.4 Beulrelevante geometrische Toleranzen ... 62
9.4.1 Allgemeines ... 62
9.4.2 Beurteilung der beherrschenden Membranspannung an einer beliebigen Stelle ... 65
9.4.3 Toleranz für Unrundheit ... 66
9.4.4 Toleranz für unplanmäßige Exzentrizität ... 68
9.4.5 Toleranz für Vorbeulen ... 69
9.4.6 Toleranz für Ebenheit der Grenzfläche ... 73
9.5 Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis ... 73
9.5.1 Bemessungswerte von Spannungen ... 73
9.5.2 Bemessungswiderstand (Beanspruchbarkeit gegen Beulversagen) ... 74
9.5.3 Begrenzung der Spannungen (Beulsicherheitsnachweis) ... 76

9.6 Bemessung mittels Referenzwiderständen ... 77
9.6.1 Kurzbeschreibung ... 77
9.6.2 Bemessungswerte von Einwirkungen ... 77
9.6.3 Bemessungswert des Widerstands ... 78
9.6.4 Beulsicherheitsnachweis ... 80
9.7 Bemessung mittels numerisch gestützter Berechnung durch LBA und MNA ... 80
9.7.1 Bemessungswert von Einwirkungen ... 80
9.7.2 Bemessungswert des Widerstands ... 80
9.7.3 Beulsicherheitsnachweis ... 86
9.8 Bemessung mittels numerisch gestützter Berechnung durch GMNIA ... 86
9.8.1 Bemessungswerte von Einwirkungen ... 86
9.8.2 Bemessungswert des Widerstands ... 86
9.8.3 Beulsicherheitsnachweis ... 93

10 Grenzzustand der Ermüdung (LS4) ... 94
10.1 Bemessungswerte von Einwirkungen ... 94
10.2 Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis ... 94
10.2.1 Allgemeines ... 94
10.2.2 Verfahren zur Spannungsberechnung ... 95
10.2.3 Multiaxiale Spannungsfelder ... 96
10.2.4 Bemessungswerte des Widerstands (Beanspruchbarkeit gegen Ermüdung) ... 97
10.2.5 Ermüdungsnachweis ... 98

Anhang A (informativ) Membrantheoretische Spannungen in unversteiften Schalen ... 99
A.1 Anwendung dieses Anhangs ... 99
A.2 Umfang und Anwendungsbereich ... 99
A.3 Allgemeines ... 99
A.3.1 Auswirkungen von Einwirkungen und Widerstände ... 99
A.3.2 Formelzeichen ... 99
A.3.3 Randbedingungen ... 100
A.3.4 Vorzeichenvereinbarung ... 100
A.4 Zylinderschalen ... 100
A.5 Kegelschalen ... 102
A.6 Kugelschalen ... 104

Anhang B (informativ) Gleichungen für plastische Referenzwiderstände von unversteiften Schalen und Kreisplatten ... 105
B.1 Anwendung dieses Anhangs ... 105
B.2 Umfang und Anwendungsbereich ... 105
B.3 Allgemeines ... 105
B.3.1 Widerstände ... 105
B.3.2 Formelzeichen ... 105
B.3.3 Randbedingungen ... 106
B.4 Konstante unversteifte Zylinderschalen ... 106
B.4.1 Radiale Ringlinienlast ... 106
B.4.2 Nach außen gerichtete radiale Ringlinienlast und axiale Zugbeanspruchung ... 107
B.4.3 Radiale Ringlinienlast, Innendruck und Axiallast ... 108
B.5 Zylinderschalen mit lokalen Ringsteifen ... 109
B.5.1 Einzelne radiale Linienringlast ... 109
B.5.2 Radiale Linienringlast mit Axiallast ... 109
B.5.3 Radiale Linienringlast, konstanter Innendruck und Axiallast ... 110
B.6 Knotenlinien zwischen Kegel- und Zylinderschalen ... 111
B.6.1 Ausschließlich Meridiankräfte (vereinfacht) ... 111
B.6.2 Innendruck und Meridiankräfte ... 112
B.7 Kreisplatten mit axialsymmetrischen Randbedingungen ... 114
B.7.1 Gleichmäßig verteilte Beanspruchung bei gelenkig gelagertem Rand ... 114
B.7.2 Mittige kreisförmige Teilflächenbeanspruchung bei gelenkig gelagertem Rand ... 114
B.7.3 Gleichmäßig verteilte Beanspruchung bei eingespanntem Rand ... 114
B.7.4 Mittige kreisförmige Teilflächenbeanspruchung bei eingespanntem Rand ... 115

Anhang C (informativ) Gleichungen für lineare elastische Membran- und Biegespannungen in unversteiften Zylinderschalen und Kreisplatten ... 116
C.1 Anwendung dieses Anhangs ... 116
C.2 Umfang und Anwendungsbereich ... 116
C.3 Allgemeines ... 116
C.3.1 Auswirkungen von Einwirkungen ... 116
C.3.2 Formelzeichen ... 116
C.3.3 Randbedingungen ... 117
C.4 Am Fuß eingespannte Zylinderschalen ... 117
C.4.1 Konstanter Innendruck ... 117
C.4.2 Axiale Beanspruchung ... 118
C.4.3 Konstanter Innendruck mit axialer Beanspruchung ... 118
C.4.4 Hydrostatischer Innendruck ... 119
C.4.5 Radiale Verschiebung des Fußpunktes nach außen ... 120
C.4.6 Gleichmäßige Erwärmung ... 120
C.5 Am Fuß gelenkig gelagerte Zylinderschalen ... 121
C.5.1 Konstanter Innendruck ... 121
C.5.2 Axiale Beanspruchung ... 121
C.5.3 Konstanter Innendruck mit axialer Beanspruchung ... 122
C.5.4 Hydrostatischer Innendruck ... 122
C.5.5 Radiale Verschiebung des Fußpunktes nach außen ... 123
C.5.6 Gleichmäßige Erwärmung ... 124
C.5.7 Randverdrehung ... 124
C.6 Innendruck in Zylinderschalen ... 125
C.6.1 Endender konstanter Innendruck ... 125
C.6.2 Endender hydrostatischer Innendruck ... 125
C.6.3 Dickensprung ... 126
C.7 Lokale Ringsteife an einer Zylinderschale ... 127
C.7.1 Radialkraft nur am Ring ... 127
C.7.2 Axiale Beanspruchung ... 128
C.7.3 Konstanter Innendruck ... 129
C.8 Kreisplatten mit gelenkig gelagerten Randbedingungen ... 130
C.8.1 Gleichmäßige Flächenlast ... 130
C.8.2 Örtliche Teilflächenlast ... 130
C.9 Kreisplatten mit eingespannten Randbedingungen ... 131
C.9.1 Gleichmäßige Flächenlast ... 131
C.9.2 Eingespannte Platte: Örtliche Teilflächenlast ... 131

Anhang D (normativ) Gleichungen zur Bestimmung des Beulwiderstands unversteifter Schalen beim spannungsbasierten Tragsicherheitsnachweis ... 133
D.1 Anwendung dieses Anhangs ... 133
D.2 Umfang und Anwendungsbereich ... 133
D.3 Zylinderschalen mit konstanter Wanddicke: grundlegende Lastfälle ... 133
D.3.1 Formelzeichen und Randbedingungen ... 133
D.3.2 Dimensionslose Längen ... 134
D.3.3 Axiale Druckbeanspruchung (in Meridianrichtung) ... 134
D.3.4 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung ... 138
D.3.5 Schubbeanspruchung (Torsion) ... 141
D.4 Zylinderschalen mit konstanter Wanddicke: kombinierte Lastfälle ... 144
D.4.1 Axiale Druckbeanspruchung (in Meridianrichtung) mit gleichzeitig einwirkendem Innendruck ... 144
D.4.2 Außendruck unter Winddruckverteilung ... 145
D.4.3 Kombinationen von axialer Druckbeanspruchung (in Meridianrichtung), Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung und Schubbeanspruchung ... 147
D.5 Zylinderschalen mit abgestufter Wanddicke ... 149
D.5.1 Allgemeines ... 149
D.5.2 Axiale Druckbeanspruchung (in Meridianrichtung) ... 150
D.5.3 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung ... 150

D.5.4 Schubbeanspruchung ... 158
D.6 Zylinderschalen mit Überlappstößen ... 158
D.6.1 Allgemeines ... 158
D.6.2 Axiale Druckbeanspruchung (in Meridianrichtung) ... 159
D.6.3 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung ... 159
D.6.4 Schubbeanspruchung ... 160
D.7 Kegelschalen (vollständige Kegel und Kegelstümpfe) ... 160
D.7.1 Allgemeines ... 160
D.7.2 Bemessungsbeulspannungen ... 161
D.7.3 Beulsicherheitsnachweis ... 163

Anhang E (normativ) Gleichungen zur Bestimmung des Beulwiderstands unversteifter Schalen für die Bemessung des Referenzwiderstands ... 165
E.1 Anwendung dieses Anhangs ... 165
E.2 Umfang und Anwendungsbereich ... 165
E.3 Zylinderschalen unter globaler Biegebeanspruchung ... 165
E.3.1 Allgemeines ... 165
E.3.2 Beulwiderstand unter konstanter globaler Biegebeanspruchung ... 166
E.3.3 Beulwiderstand unter globaler Biege- und Axialdruckbeanspruchung ... 169
E.4 Schalen mit halbkugelförmigen Kuppeln ... 170
E.4.1 Allgemeines ... 170
E.4.2 Toleranzen für Kugelschalen ... 172
E.4.3 Beulsicherheitsnachweis für konstanten Außendruck ... 172
E.4.4 Beulsicherheitsnachweis für konstanten Außendruck ... 174

Literaturhinweise ... 175