

Niedersächsisches Ministerialblatt

62. (67.) Jahrgang

Hannover, den 30. 10. 2012

Nummer 37 i

9. ANLAGENBAND

zur

**Liste der Technischen Baubestimmungen
— Fassung September 2012 —**

DIN EN 1993-1-5

DIN EN 1993-1-5/NA

DIN EN 1993-1-6

DIN EN 1993-1-6/NA

DIN EN 1993-1-7

DIN EN 1993-1-7/NA

DIN EN 1993-1-9

DIN EN 1993-1-9/NA

DIN EN 1993-1-10

DIN EN 1993-1-10/NA

DIN EN 1993-1-11

DIN EN 1993-1-11/NA

DIN EN 1993-1-12

DIN EN 1993-1-12/NA

Die hier abgedruckten Technischen Baubestimmungen sind nur in Verbindung mit dem RdErl. des MS vom 28. 9. 2012 (Nds. MBl. Nr. 37) zu verwenden.

Inhalt:

– DIN EN1993-1-5: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile.	1
– DIN EN 1993-1-5/NA: Nationaler Anhang — National festgelegte Parameter — Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile	71
– DIN EN 1993-1-6: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen	79
– DIN EN 1993-1-6/NA: Nationaler Anhang — National festgelegte Parameter — Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen	187
– DIN EN 1993-1-7: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-7: Plattenförmige Bauteile mit Querbelastung.	199
– DIN EN 1993-1-7/NA: Nationaler Anhang — National festgelegte Parameter — Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-7: Plattenförmige Bauteile mit Querbelastung	245
– DIN EN 1993-1-9: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-9: Ermüdung.	247
– DIN EN 1993-1-9/NA: Nationaler Anhang — National festgelegte Parameter — Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-9: Ermüdung	291
– DIN EN 1993-1-10: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung	297
– DIN EN 1993-1-10/NA: Nationaler Anhang — National festgelegte Parameter — Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung	319
– DIN EN 1993-1-11: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-11: Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern aus Stahl	325
– DIN EN 1993-1-11/NA: Nationaler Anhang — National festgelegte Parameter — Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-11: Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern aus Stahl	371
– DIN EN 1993-1-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlgüten bis S700	379
– DIN EN 1993-1-12/NA: Nationaler Anhang — National festgelegte Parameter — Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlgüten bis S700	391

DIN EN 1993-1-5

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatzvermerk
siehe unten

**Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile;
Deutsche Fassung EN 1993-1-5:2006 + AC:2009**

Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-5: Plated structural elements;
German version EN 1993-1-5:2006 + AC:2009

Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 1-5: Plaques planes;
Version allemande EN 1993-1-5:2006 + AC:2009

Ersatzvermerk

Ersatz für DIN EN 1993-1-5:2007-02;
mit DIN EN 1993-1-1:2010-12, DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-3:2010-12,
DIN EN 1993-1-3/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-8:2010-12,
DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-9:2010-12, DIN EN 1993-1-9/NA:2010-12,
DIN EN 1993-1-10:2010-12, DIN EN 1993-1-10/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-11:2010-12 und
DIN EN 1993-1-11/NA:2010-12 Ersatz für DIN 18800-1:2008-11;
mit DIN EN 1993-1-1:2010-12, DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-3:2010-12,
DIN EN 1993-1-3/NA:2010-12 und DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12 Ersatz für DIN 18800-2:2008-11;
mit DIN EN 1993-1-3:2010-12, DIN EN 1993-1-3/NA:2010-12 und DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12 Ersatz für
DIN 18800-3:2008-11;
Ersatz für DIN EN 1993-1-5 Berichtigung 1:2010-05

Gesamtumfang 70 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

DIN EN 1993-1-5:2010-12

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 1993-1-5:2006 + AC:2009) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Die Arbeiten auf nationaler Ebene wurden durch die Experten des NABau-Spiegelausschusses NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung“ begleitet.

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 13. Januar 2006 angenommen.

Die Norm ist Bestandteil einer Reihe von Einwirkungs- und Bemessungsnormen, deren Anwendung nur im Paket sinnvoll ist. Dieser Tatsache wird durch das Leitpapier L der Kommission der Europäischen Gemeinschaft für die Anwendung der Eurocodes Rechnung getragen, indem Übergangsfristen für die verbindliche Umsetzung der Eurocodes in den Mitgliedsstaaten vorgesehen sind. Die Übergangsfristen sind im Vorwort dieser Norm angegeben.

Die Anwendung dieser Norm gilt in Deutschland in Verbindung mit dem Nationalen Anhang.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN [und/oder die DKE] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Der Beginn und das Ende des hinzugefügten oder geänderten Textes wird im Text durch die Textmarkierungen **AC** **AC** angezeigt.

Änderungen

Gegenüber DIN V ENV 1993-1-5:2001-02 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) die Stellungnahmen der nationalen Normungsinstitute wurden eingearbeitet;
- b) der Vornormcharakter wurde aufgehoben;
- c) der Text wurde vollständig überarbeitet.

Gegenüber DIN EN 1993-1-5:2007-02, DIN EN 1993-1-5 Berichtigung 1:2010-05, DIN 18800-1:2008-11, DIN 18800-2:2008-11 und DIN 18800-3:2008-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) auf europäisches Bemessungskonzept umgestellt;
- b) Ersatzvermerke korrigiert;
- c) Vorgänger-Norm mit der Berichtigung 1 konsolidiert;
- d) redaktionelle Änderungen durchgeführt.

Frühere Ausgaben

DIN 1050: 1934-08, 1937xxxx-07, 1946-10, 1957x-12, 1968-06
DIN 1073: 1928-04, 1931-09, 1941-01, 1974-07
DIN 1073 Beiblatt: 1974-07
DIN 1079: 1938-01, 1938-11, 1970-09
DIN 4100: 1931-05, 1933-07, 1934xxxx-08, 1956-12, 1968-12
DIN 4101: 1937xxx-07, 1974-07
DIN 4114-1: 1952xx-07
DIN 4114-2: 1952-07, 1953x-02
DIN 18800-1: 1981-03, 1990-11, 2008-11
DIN 18800-1/A1: 1996-02
DIN 18800-2: 1990-11, 2008-11
DIN 18800-2/A1: 1996-02
DIN 18800-3: 1990-11, 2008-11
DIN 18800-3/A1: 1996-02
DIN V ENV 1993-1-5: 2001-02
DIN EN 1993-1-5: 2007-02
DIN EN 1993-1-5 Berichtigung 1: 2010-05

DIN EN 1993-1-5:2010-12

— Leerseite —

EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE

EN 1993-1-5

Oktober 2006

+AC

April 2009

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatz für ENV 1993-1-5:1997

Deutsche Fassung

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile

Eurocode 3: Design of steel structures —
Part 1-5: Plated structural elements

Eurocode 3: Calcul des structures en acier —
Partie 1-5: Plaques planes

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 13. Januar 2006 angenommen.

Die Berichtigung tritt am 1. April 2009 in Kraft und wurde in EN 1993-1-5:2006 eingearbeitet.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

Inhalt

	Seite
Vorwort	4
Nationaler Anhang zu EN 1993-1-5	4
1 Allgemeines	5
1.1 Anwendungsbereich	5
1.2 Normative Verweisungen	5
1.3 Begriffe	5
1.4 Formelzeichen	6
2 Grundlagen für die Tragwerksplanung und Verfahren	7
2.1 Allgemeines	7
2.2 Effektive Breiten bei der Tragwerksberechnung	8
2.3 Einfluss des Plattenbeulens auf die Tragfähigkeit gleichförmiger Bauteile	8
2.4 Methode der reduzierten Spannungen	9
2.5 Bauteile mit veränderlichem Querschnitt	9
2.6 Bauteile mit profilierten Stegblechen	9
3 Berücksichtigung der Schubverzerrungen bei der Bemessung von Bauteilen	9
3.1 Allgemeines	9
3.2 Mittragende Breiten zur Berücksichtigung der Schubverzerrungen bei elastischem Werkstoffverhalten	10
3.2.1 Mittragende Breiten	10
3.2.2 Spannungsverteilung unter Berücksichtigung der Schubverzerrung	11
3.2.3 Lasteinleitung in Blechebene	12
3.3 Berücksichtigung der Schubverzerrungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit	13
4 Plattenbeulen bei Längsspannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit	14
4.1 Allgemeines	14
4.2 Beanspruchbarkeit bei Längsspannungen	15
4.3 Effektive Querschnittsgrößen	15
4.4 Einzelblechfelder ohne Längssteifen	16
4.5 Längs ausgesteifte Blechfelder	20
4.5.1 Allgemeines	20
4.5.2 Plattenartiges Verhalten	22
4.5.3 Knickstabähnliches Verhalten	22
4.5.4 Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten	24
4.6 Nachweis	25
5 Schubbeulen	25
5.1 Grundlagen	25
5.2 Bemessungswert der Beanspruchbarkeit	26
5.3 Beitrag des Steges	27
5.4 Beitrag der Flansche	29
5.5 Nachweis	30
6 Beanspruchbarkeit bei Querbelastrung	30
6.1 Grundlagen	30
6.2 Bemessungswert der Beanspruchbarkeit	31
6.3 Länge der starren Lasteinleitung	31
6.4 Abminderungsfaktor χ_F für die wirksame Lastausbreitungslänge	32
6.5 Wirksame Lastausbreitungslänge	33
6.6 Nachweis	33
7 Interaktion	34
7.1 Interaktion zwischen Schub, Biegemoment und Normalkraft	34
7.2 Interaktion zwischen Querbelastrung an den Längsrändern, Biegemoment und Normalkraft	35

8	Flanschinduziertes Stegblechbeulen	35
9	Steifen und Detailausbildung	36
9.1	Allgemeines	36
9.2	Wirkung von Längsspannungen	36
9.2.1	Minimale Anforderungen an Quersteifen	36
9.2.2	Minimale Anforderungen an Längssteifen	38
9.2.3	Geschweißte Blechstöße	39
9.2.4	Steifenausschnitte	39
9.3	Wirkung von Schubspannungen	40
9.3.1	Starre Auflagersteifen	40
9.3.2	Verformbare Auflagersteifen	41
9.3.3	Zwischenliegende Quersteifen	41
9.3.4	Längssteifen	42
9.3.5	Schweißnähte	42
9.4	Wirkung von Querlasten	42
10	Methode der reduzierten Spannungen	42
Anhang A (informativ) Berechnung kritischer Spannungen für ausgesteifte Blechfelder		45
A.1	Äquivalente orthotrope Platten	45
A.2	Kritische Beulspannung bei Blechfeldern mit einer oder zwei Steifen in der Druckzone	48
A.2.1	Allgemeine Vorgehensweise	48
A.2.2	Vereinfachtes Modell für einen Ersatzstab mit elastischer Bettung durch ein Blech	49
A.3	Schubbeulwerte für ausgesteifte Blechfelder	50
Anhang B (informativ) Bauteile mit veränderlichem Querschnitt		52
B.1	Allgemeines	52
B.2	Interaktion von Plattenbeulen und Biegedrillknicken von Bauteilen	53
Anhang C (informativ) Berechnungen mit der Finite-Element-Methode (FEM)		54
C.1	Allgemeines	54
C.2	Anwendung	54
C.3	Modellierung	55
C.4	Wahl des Programms und Dokumentation	55
C.5	Ansatz von Imperfektionen	55
C.6	Werkstoffeigenschaften	58
C.7	Belastungen	59
C.8	Kriterien für den Grenzzustand	59
C.9	Teilsicherheitsbeiwerte	60
Anhang D (informativ) Bauteile mit profilierten Stegblechen		61
D.1	Allgemeines	61
D.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit	61
D.2.1	Momententragfähigkeit	61
D.2.2	Schubtragfähigkeit	63
D.2.3	Anforderungen an Endsteifen	64
Anhang E (normativ) Alternative Methoden zur Bestimmung wirksamer Querschnitte		65
E.1	Wirksame Querschnittsflächen für Spannungen unterhalb der Streckgrenze	65
E.2	Wirksame Querschnittsflächen für die Steifigkeit	65

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

Vorwort

Dieses Dokument (EN 1993-1-5:2006) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Structural Eurocodes“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis April 2007, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis März 2010 zurückgezogen werden.

Dieses Dokument ersetzt ENV 1993-1-5:1997.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Nationaler Anhang zu EN 1993-1-5

Diese Norm enthält alternative Vorgehensweisen, Zahlenwerte sowie Empfehlungen. Durch besonderen Hinweis (Anmerkungen) sind die Stellen gekennzeichnet, bei denen eine nationale Auswahl getroffen werden darf. EN 1993-1-5 enthält bei der nationalen Einführung einen nationalen Anhang. Dieser Anhang legt die nationalen Parameter fest, die für die Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten verwendet werden müssen.

Eine nationale Wahl darf für folgende Abschnitte erfolgen:

- | | |
|------------|------------|
| — 2.2(5) | — 10(1) |
| — 3.3(1) | — 10(5) |
| — 4.3(6) | — C.2(1) |
| — 5.1(2) | — C.5(2) |
| — 6.4(2) | — C.8(1) |
| — 8(2) | — C.9(3) |
| — 9.1(1) | — D.2.2(2) |
| — 9.2.1(9) | |

1 Allgemeines

1.1 Anwendungsbereich

(1) EN 1993-1-5 enthält Regelungen für den Entwurf und die Berechnung von aus ebenen Blechen zusammengesetzten und in ihrer Ebene belasteten Bauteilen mit oder ohne Steifen.

(2) Diese Regelungen gelten für Blechträger mit I-Querschnitt und Kastenträger, bei denen ungleichmäßige Spannungsverteilungen infolge Schubverzerrungen sowie Beulen unter Längsspannungen, Schubspannungen und Querlasten auftreten. Sie gelten auch für ebene Bleche aller anderen Bauteile, z. B. von Tankbauwerken und Silos, soweit Lasten und Beanspruchungen in der Ebene der Bauteile wirken. Die Wirkungen von Lasten quer zur Bauteilebene werden in EN 1993-1-5 nicht behandelt.

ANMERKUNG 1 Die Regelungen in EN 1993-1-5 ergänzen die Regelungen für Querschnitte der Querschnittsklassen 1, 2, 3 und 4, siehe EN 1993-1-1.

ANMERKUNG 2 Regelungen zu schlanken Platten mit wechselnden Längsspannungen und/oder Schubspannungen, die zu Ermüdung durch wechselnde Biegung aus der Plattenebene (Blechatmen) führen können, sind in EN 1993-2 und EN 1993-6 angegeben.

ANMERKUNG 3 Regelungen zur Wirkung von Lasten quer zur Plattenebene und zur Kombination von Lastwirkungen in der Ebene und aus der Ebene sind EN 1993-2 und EN 1993-1-7 zu entnehmen.

ANMERKUNG 4 Einzelne Blechfelder dürfen als eben angesehen werden, wenn für den Krümmungsradius r gilt:

$$r \geq \frac{a^2}{t} \quad (1.1)$$

Dabei ist

a die Blechfeldbreite;

t die Blechdicke.

1.2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 1993-1-1, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*

1.3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

1.3.1

kritische elastische Spannung

Spannung in einem Bauteil oder Beulfeld, bei dem das Gleichgewicht im Bauteil oder im Beulfeld nach den Ergebnissen der elastischen Theorie für perfekte Strukturen und kleine Verformungen instabil wird

1.3.2

Membranspannungen

Spannungen in der Mittelebene der Platte oder des Blechs

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

1.3.3

Bruttoquerschnitt

die gesamte Querschnittsfläche eines Bauteils ohne Berücksichtigung nicht durchlaufender Längssteifen, Bindebleche oder Bleche für die Stoßdeckung

1.3.4

effektiver Querschnitt und effektive Breite

Bruttoquerschnitt oder Bruttoquerschnittsbreite, reduziert infolge gemeinsamer Wirkung von Plattenbeulen und Schubverzerrung; der Begriff „effektiv“ wird wie folgt unterschieden:

„wirksam (effektiv^P)“ bezeichnet die Wirkung von Plattenbeulen;

„mittragend (effektiv^S)“ bezeichnet die Wirkung der ungleichförmigen Spannungsverteilung aus Schubverzerrung;

„effektiv“ bezeichnet die Verbindung von wirksamem Querschnitt und mittragendem Querschnitt

1.3.5

Blechträger

Bauteil, das aus ebenen Blechen (ebenen Flachstäben oder Blechen) zusammengesetzt ist; die ebenen Bleche können ausgesteift oder nicht ausgesteift sein

1.3.6

Steifen

Flachstäbe oder Profilstäbe, die an ein Blech angeschlossen werden, um Beulen zu verhindern oder um Lasteinleitungen auszusteiern; Steifen werden bezeichnet als:

— Längssteifen, wenn sie parallel zur Bauteilachse laufen;

— Quersteifen, wenn sie quer zur Bauteilachse laufen.

1.3.7

ausgesteiftes Beulfeld (Gesamtfeld, Blech)

Beulfeld (Gesamtfeld, Blech) mit Quer- und/oder Längssteifen

1.3.8

Einzelfeld

von Quer- und /oder Längssteifen oder Flansche umrandetes, nicht weiter ausgesteiftes Blech

1.3.9

Hybridträger

Blechträger mit unterschiedlichen Stahlsorten für Gurte und Stege; für die hier angegebenen Regelungen wird eine höhere Stahlsorte der Gurte im Vergleich zu den Stegen angenommen

1.3.10

Vorzeichenregelung

solange nicht anders angegeben, sind Druckkräfte bzw. Druckspannungen positiv definiert

1.4 Formelzeichen

(1) In Ergänzung zu den Formelzeichen in EN 1990 und EN 1993-1-1 werden folgende Formelzeichen benutzt:

$A_{s\ell}$ die gesamte Fläche aller Längssteifen in einer ausgesteiften Platte;

A_{st} die Bruttoquerschnittsfläche einer Quersteife;

A_{eff}	effektive Querschnittsfläche;
$A_{\text{c,eff}}$	wirksame Querschnittsfläche;
$A_{\text{c,eff,loc}}$	wirksame Querschnittsfläche infolge lokalen Plattenbeulens;
a	Länge des ausgesteiften oder nicht ausgesteiften Beulfeldes;
b	Breite des ausgesteiften oder nicht ausgesteiften Beulfeldes;
b_{w}	lichter Abstand zwischen Schweißnähten  bei geschweißten Abschnitten oder zwischen den Enden der Radien gewalzter Abschnitte  .
b_{eff}	mittragende Breite zur Berücksichtigung der elastischen Schubverzerrung;
F_{Ed}	Bemessungswert der einwirkenden Querlast;
h_{w}	lichte Steghöhe zwischen den Flanschen;
L_{eff}	wirksame Lastausbreitungslänge von Querlasten unter Berücksichtigung des Beulens, siehe Abschnitt 6;
$M_{\text{f,Rd}}$	Bemessungswert der plastischen Momententragfähigkeit, wenn nur die Flanschen rechnerisch angesetzt werden;
$M_{\text{pl,Rd}}$	Bemessungswert der plastischen Momententragfähigkeit (unabhängig von der Querschnittsklassifizierung);
M_{Ed}	Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes;
N_{Ed}	Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft;
t	Blechdicke;
V_{Ed}	Bemessungswert der einwirkenden Schubkraft aus Querkraft und Torsion;
W_{eff}	effektives elastisches Widerstandsmoment;
β	Abminderungsfaktor für die mittragende Breite zur Berücksichtigung der elastischen Schubverzerrung.

(2) Weitere Formelzeichen sind im Text definiert.

2 Grundlagen für die Tragwerksplanung und Verfahren

2.1 Allgemeines

(1)P Mittragenden Breiten und die Auswirkungen von Plattenbeulen müssen berücksichtigt werden, wenn dadurch der Grenzzustand der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit oder Ermüdung wesentlich beeinflusst wird.

ANMERKUNG Die in dieser Norm zu verwendenden Teilsicherheitsbeiwerte γ_{M0} und γ_{M1} sind für die verschiedenen Anwendungsbereiche in den nationalen Anhängen von EN 1993-1 bis EN 1993-6 angegeben.

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

2.2 Effektive Breiten bei der Tragwerksberechnung

(1)P Die Auswirkung der ungleichförmigen Spannungsverteilung aus Schubverzerrung und des Plattenbeulens auf die Steifigkeit der Bauteile und Verbindungen muss berücksichtigt werden, wenn sie die Tragwerksberechnung wesentlich beeinflusst.

(2) Die Auswirkung der ungleichförmigen Spannungsverteilung aus Schubverzerrung darf bei elastischer Tragwerksberechnung durch eine mittragende Breite berücksichtigt werden, die als über die gesamte Spannweite konstant angenommen werden darf.

(3) Bei Durchlaufträgern ist in der Regel in jedem Feld als mittragende Breite auf jeder Stegseite das Minimum aus der vollen geometrischen mittragenden Breite und $L/8$ anzusetzen, wobei L die Spannweite oder bei Kragarmen die doppelte Kragarmlänge ist.

(4) Die Auswirkung des Plattenbeulens darf bei der elastischen Tragwerksberechnung durch die wirksame Fläche der unter Druckbeanspruchung stehenden Querschnittsteile berücksichtigt werden, siehe 4.3.

(5) Die Auswirkung des Plattenbeulens darf bei der statischen Tragwerksberechnung vernachlässigt werden, wenn die wirksame Fläche eines unter Druckbeanspruchung stehenden Querschnittsteiles größer als die zugehörige ρ_{lim} -fache Bruttoquerschnittsfläche ist.

ANMERKUNG 1 Der Grenzwert ρ_{lim} kann im nationalen Anhang angegeben sein. Der Wert $\rho_{lim} = 0,5$ wird empfohlen.

ANMERKUNG 2 Hinweise zur Bestimmung der Steifigkeit für den Fall, dass (5) nicht eingehalten ist, sind in Anhang E angegeben.

2.3 Einfluss des Plattenbeulens auf die Tragfähigkeit gleichförmiger Bauteile

(1) Die Verfahren mit wirksamen Breiten bei Längsspannungen, die Verfahren zur Ermittlung der Tragfähigkeit bei Schubbeulen und bei Beulen infolge Querlasten auf den Längsrändern sowie die Interaktionsformeln zur Bestimmung der Beanspruchbarkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit beim Zusammenwirken dieser Effekte gelten für die folgenden Bedingungen:

- die Plattenfelder sind rechteckig und die Flansche verlaufen parallel;
- der Durchmesser nicht ausgesteifter Löcher oder Ausschnitte ist kleiner als $0,05 b$, wobei b die Beulfeldbreite ist.

ANMERKUNG Die Regeln dürfen auch für nicht rechteckige Beulfelder angewendet werden, wenn für den Winkel α_{limit} (siehe Bild 2.1) gilt: $\alpha_{limit} \leq 10^\circ$. Ist $\alpha_{limit} > 10^\circ$, so darf das Beulfeld unter Ansatz eines rechteckigen Ersatzbeulfeldes mit der größeren der beiden Abmessungen b_1 und b_2 des vorhandenen Beulfeldes nachgewiesen werden.

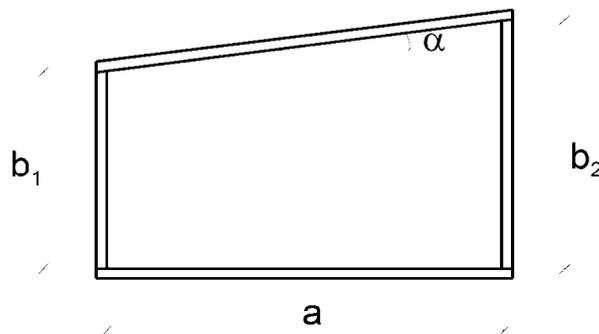


Bild 2.1 — Definition des Winkels α

(2) Für die Berechnung von Spannungen für Gebrauchstauglichkeitsnachweise oder von Spannungsschwingbreiten für Ermüdungsnachweise darf die mittragende Querschnittsfläche verwendet werden, wenn die Bedingungen in **AC** 2.2(5) **AC** erfüllt sind. Für die Berechnung von Spannungen für Tragfähigkeitsnachweise ist in der Regel die effektive Querschnittsfläche nach 3.3 zu verwenden, wobei β durch β_{ult} ersetzt wird.

2.4 Methode der reduzierten Spannungen

(1) Als Alternative zu dem Verfahren mit wirksamen Breiten nach den Abschnitten 4 bis 7 dürfen die Querschnitte auch der Querschnittsklasse 3 zugeordnet werden, wenn die Längsspannungen für jedes Blechfeld bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten. Diese Grenzwerte sind in Abschnitt 10 angegeben.

ANMERKUNG Für Einzelbleche entspricht die Methode der reduzierten Spannungen der Methode mit wirksamen Breiten (siehe 2.3). Es ist zu beachten, dass bei der Methode der reduzierten Spannungen Lastumlagerungen zwischen den Einzelblechen eines Bauteils nicht berücksichtigt werden.

2.5 Bauteile mit veränderlichem Querschnitt

(1) Bei Bauteilen mit veränderlichen Querschnitten (z. B. Bauteile mit nicht parallelen Gurten oder Blechfelder ohne Rechteckberandung) oder Bauteilen mit regelmäßigen oder unregelmäßigen großen Ausschnitten dürfen Verfahren auf der Grundlage von Finite-Elemente-Berechnungen angewendet werden.

ANMERKUNG 1 Hinweise zu nicht gleichförmigen Bauteilen können Anhang B entnommen werden.

ANMERKUNG 2 Anhang C gibt Hinweise zu FE-Berechnungen.

2.6 Bauteile mit profilierten Stegblechen

(1) Bei der Berechnung von Bauteilen mit profilierten Stegblechen ist in der Regel anzunehmen, dass die Biegesteifigkeit allein aus den Flanschen herrührt und die profilierten Stege nur Schubkräfte und Querlasten aus den Längsrändern übernehmen.

ANMERKUNG Anhang D gibt Hinweise zum Beulen der Druckflansche und zur Schubtragfähigkeit der Stegbleche.

3 Berücksichtigung der Schubverzerrungen bei der Bemessung von Bauteilen

3.1 Allgemeines

(1) In Gurten darf der Einfluss der Schubverzerrungen vernachlässigt werden, wenn die Bedingung $b_0 < L_e/50$ erfüllt ist. Für einseitig gestützte Flanschteile entspricht die Flanscbreite b_0 der vorhandenen Flanscbreite, bei zweiseitig gestützten Flanschteilen ist b_0 gleich der Hälfte der vorhandene Flanscbreite. Die Länge L_e ergibt sich aus dem Abstand der Momentennullpunkte, siehe 3.2.1(2).

(2) Wird die in (1) angegebene Bedingung nicht erfüllt, sind in der Regel bei den Nachweisen sowohl im Gebrauchstauglichkeitszustand als auch bei den Nachweisen für die Werkstoffermüdung die Einflüsse der Schubverzerrungen auf das Tragverhalten der Gurte zu berücksichtigen. Hierzu wird die mittragende Breite nach 3.2.1 bestimmt und die Spannungsverteilung nach 3.2.2 angenommen. Für Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit dürfen effektive Breiten nach 3.3 eingesetzt werden.

(3) Elastische Spannungen sind in der Regel nach 3.2.3 zu ermitteln, wenn diese aus einer in Blechebene wirkenden lokalen Lasteinleitung resultieren, wobei die Lasteinleitung über den Gurt in den Steg erfolgt.

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

3.2 Mittragende Breiten zur Berücksichtigung der Schubverzerrungen bei elastischem Werkstoffverhalten

3.2.1 Mittragende Breiten

(1) Zur Berücksichtigung elastischer Schubverzerrungen ist die mittragende Breite b_{eff} in der Regel wie folgt zu ermitteln:

$$b_{\text{eff}} = \beta b_0 \quad (3.1)$$

Der Faktor β ist Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Diese mittragende Breite darf bei den Nachweisen sowohl im Gebrauchstauglichkeitszustand als auch bei den Nachweisen für die Werkstoffermüdung verwendet werden.

(2) Unterscheiden sich angrenzende Feldweiten um nicht mehr als 50 % bzw. sind die Kragarme nicht länger als 50 % der angrenzenden Feldweite, so darf die mittragende Länge L_e nach Bild 3.1 bestimmt werden. In anderen Fällen ist in der Regel L_e als der Abstand zwischen zwei Momentennullpunkten abzuschätzen.

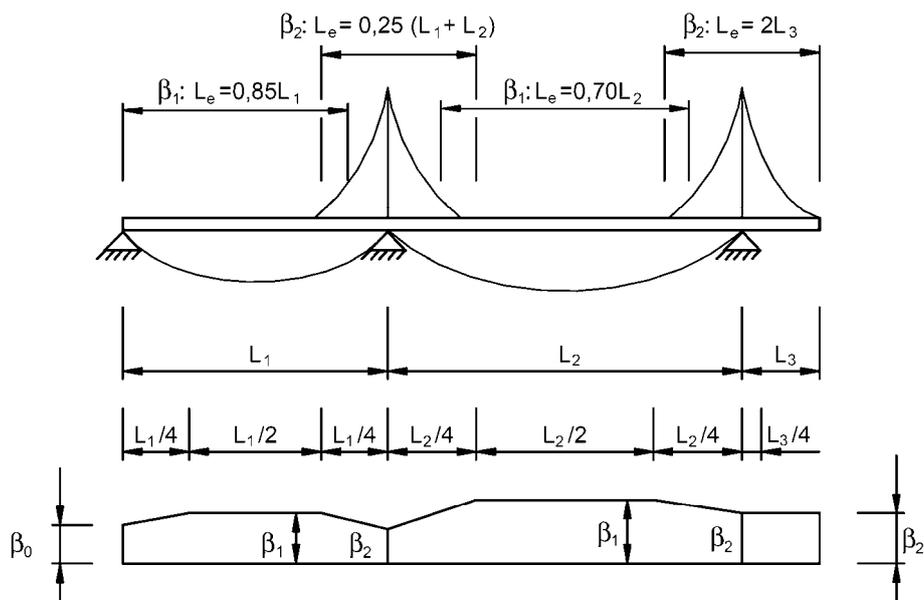
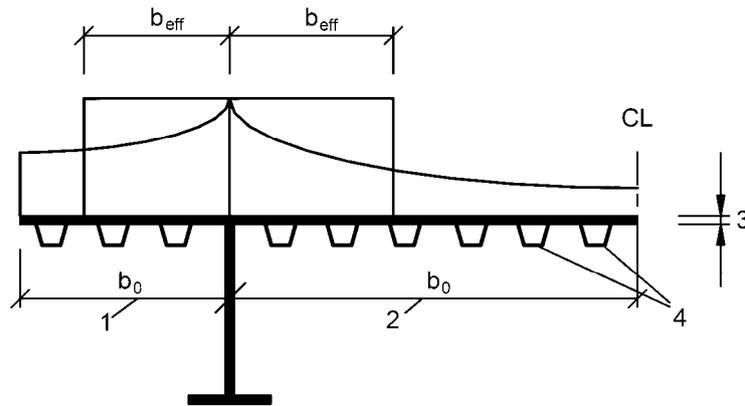


Bild 3.1 — Effektive Länge L_e für Durchlaufträger und Verteilung der mittragenden Breite

**Legende**

- 1 einseitig gestütztes Flanschteil
 2 zweiseitig gestütztes Flanschteil
 3 Blechdicke t
 4 Längssteifen mit $A_{s\ell} = \sum A_{s\ell i}$

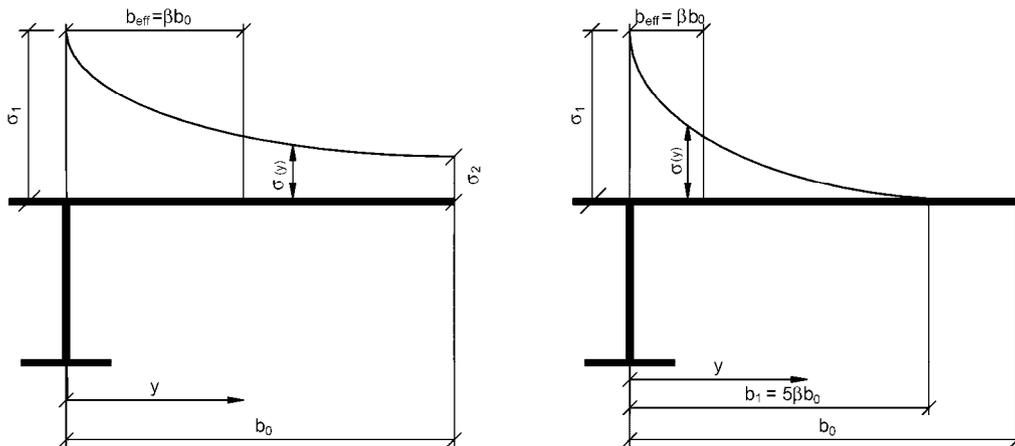
Bild 3.2 — Bezeichnungen für die mittragende Breite**Tabelle 3.1 — Abminderungsfaktor β für die mittragende Breite**

κ	Nachweisort	β -Wert
$\kappa \leq 0,02$		$\beta = 1,0$
$0,02 < \kappa \leq 0,70$	Feldmoment	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4 \kappa^2}$
	Stützmoment	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 \left(\kappa - \frac{1}{2 \cdot 500 \kappa} \right) + 1,6 \kappa^2}$
$> 0,70$	Feldmoment	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5,9 \kappa}$
	Stützmoment	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{8,6 \kappa}$
alle κ	Endauflager	$\beta_0 = (0,55 + 0,025/\kappa) \beta_1$, jedoch $\beta_0 < \beta_1$
alle κ	Kragarm	$\beta = \beta_2$ am Auflager und am Kragarmende
$\kappa = \alpha_0 b_0 / L_e$ mit $\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{s\ell}}{b_0 t}}$ Dabei ist $A_{s\ell}$ die Querschnittsfläche aller Längssteifen innerhalb der Breite b_0 . Weitere Formelzeichen sind in Bild 3.1 und Bild 3.2 angegeben.		

3.2.2 Spannungsverteilung unter Berücksichtigung der Schubverzerrung

(1) Zur Berücksichtigung der Schubverzerrungen sind in der Regel die in Bild 3.3 dargestellten Verteilungen der Längsspannungen über die Platte anzusetzen.

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)



$$\beta > 0,20 :$$

$$\sigma_2 = 1,25 (\beta - 0,20) \sigma_1$$

$$\sigma(y) = \sigma_2 + (\sigma_1 - \sigma_2) \left(1 - y/b_0\right)^4$$

$$\beta \leq 0,20 :$$

$$\sigma_2 = 0$$

$$\sigma(y) = \sigma_1 \left(1 - y/b_1\right)^4$$

σ_1 wird mit der mittragenden Breite b_{eff} des Obergurtes ermittelt.

Bild 3.3 — Verteilung der Längsspannungen über das Obergurtblech unter Berücksichtigung der Schubverzerrungen

3.2.3 Lasteinleitung in Blechebene

(1) Die elastische Spannungsverteilung in einer nicht ausgereiften oder ausgereiften Platte infolge einer lokalen Lasteinleitung in der Blechebene ist in der Regel wie folgt zu ermitteln, siehe Bild 3.4:

AC

$$\sigma_{z,\text{Ed}} = \frac{F_{\text{Ed}}}{b_{\text{eff}} (t_w + a_{\text{st},1})} \quad \text{AC (3.2)}$$

mit

$$b_{\text{eff}} = s_e \sqrt{1 + \left(\frac{z}{s_e n}\right)^2}$$

$$n = 0,636 \sqrt{1 + \frac{0,878 a_{\text{st},1}}{t_w}}$$

$$s_e = s_s + 2 t_f$$

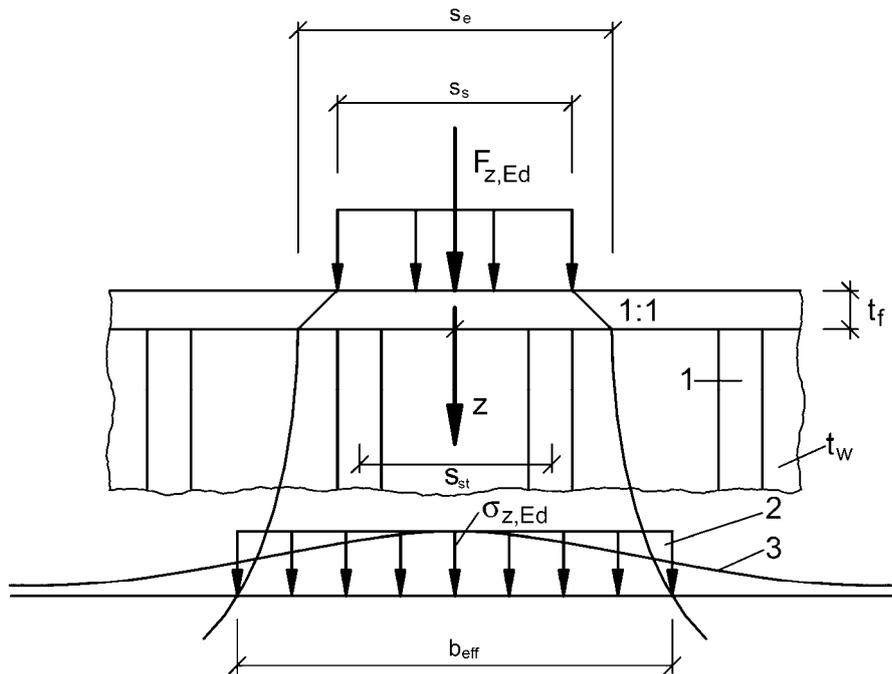
Dabei ist

$a_{\text{st},1}$ die Bruttoquerschnittsfläche AC der direkt belasteten Steifen dividiert durch AC die Längeneinheit der Breite s_e , AC d. h., auf der sicheren Seite, die gesamte Fläche der Steifen je Schwerpunktabstand s_{st} AC;

AC

 s_e ist die Länge der starren Lasteinleitung; s_{st} ist der Abstand der Steifen AC; t_w die Stegblechdicke; z der Abstand zum Flansch.

ANMERKUNG Gleichung (3.2) gilt für $s_{st}/s_e \leq 0,5$; anderenfalls ist in der Regel die Wirkung der Steifen zu vernachlässigen.



Legende

- 1 Steife
- 2 vereinfachte Spannungsverteilung
- 3 tatsächliche Spannungsverteilung

Bild 3.4 — Lasteinleitung in Blechebene

ANMERKUNG Die oben gezeigte Spannungsverteilung darf auch bei Nachweisen für die Werkstoffermüdung verwendet werden.

3.3 Berücksichtigung der Schubverzerrungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit

- (1) Im Grenzzustand der Tragfähigkeit dürfen die Schubverzerrungen wie folgt berücksichtigt werden:
 - a) wie elastische Schubverzerrungen entsprechend den Nachweisen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und den Nachweisen für die Werkstoffermüdung;
 - b) für die gleichzeitige Wirkung von Schubverzerrungen und Plattenbeulen;
 - c) für die elastisch-plastische Wirkung von Schubverzerrungen unter Berücksichtigung der Begrenzung plastischer Dehnungen.

DIN EN 1993-1-5:2010-12 EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

ANMERKUNG 1 Die zu verwendende Vorgehensweise darf im nationalen Anhang festgelegt werden. Solange nicht in EN 1993-2 bis EN 1993-6 anders festgelegt, wird die Anwendung der in ANMERKUNG 3 angegebenen Vorgehensweise empfohlen.

ANMERKUNG 2 Die gleichzeitige Wirkung von Plattenbeulen und Schubverzerrungen darf mittels der effektiven Querschnittsfläche A_{eff} wie folgt berücksichtigt werden:

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{c,eff}} \beta_{\text{ult}} \quad (3.3)$$

Dabei ist

$A_{\text{c,eff}}$ die wirksame Querschnittsfläche eines Druckgurtes unter Berücksichtigung von Plattenbeulen nach 4.4 und 4.5;

β_{ult} der Abminderungsfaktor für die mittragende Breite zur Berücksichtigung der Schubverzerrungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit. β_{ult} darf mit β nach Tabelle 3.1 angesetzt werden, jedoch unter Verwendung von

$$\alpha_0^* = \sqrt{\frac{A_{\text{c,eff}}}{b_0 t_f}} \quad (3.4)$$

t_f die Gurtblechdicke.

ANMERKUNG 3 Die elastisch-plastische Wirkung von Schubverzerrungen unter Berücksichtigung der Begrenzung plastischer Dehnungen darf mittels der effektiven Querschnittsfläche A_{eff} wie folgt berücksichtigt werden:

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{c,eff}} \beta^{\kappa} \geq A_{\text{c,eff}} \beta \quad (3.5)$$

mit β und κ nach Tabelle 3.1.

Die Gleichungen in ANMERKUNG 2 und ANMERKUNG 3 dürfen auch für Gurte unter Zugbeanspruchung angesetzt werden; hierbei ist $A_{\text{c,eff}}$ in der Regel durch die Bruttoquerschnittsfläche des Zuggurtes zu ersetzen.

4 Plattenbeulen bei Längsspannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit

4.1 Allgemeines

(1) Dieser Abschnitt gilt für Beulnachweise von Beulfeldern mit Längsdruckspannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit, wenn die folgenden Bedingungen zutreffen:

- die Beulfelder sind rechteckig und die Flansche näherungsweise parallel (siehe 2.3);
- soweit Steifen vorhanden sind, verlaufen diese in Längs- und/oder Querrichtung;
- Löcher oder Ausschnitte sind klein (siehe 2.3);
- die Bauteile sind gleichförmig;
- flanschinduziertes Stegblechbeulen ist ausgeschlossen.

ANMERKUNG 1 Anforderungen zur Vermeidung des Einbeulens von Druckflanschen in den Steg sind in Abschnitt 8 angegeben.

ANMERKUNG 2 Anforderungen an Steifen sowie Hinweise zur Detailausbildung sind in Abschnitt 9 angegeben.

4.2 Beanspruchbarkeit bei Längsspannungen

(1) Die Beanspruchbarkeit von Blechträgern mit Längsspannungen darf nach dem Verfahren der wirksamen Fläche für druckbeanspruchte Blechelemente mit den Querschnittswerten für Querschnittsklasse 4 (A_{eff} , I_{eff} , W_{eff}) ermittelt werden. Damit können die Querschnittsnachweise oder die Bauteilnachweise für Knicken oder Biegedrillknicken nach EN 1993-1-1 geführt werden.

(2) Die wirksamen Flächen dürfen auf der Grundlage der linearen Spannungsverteilung infolge der Anwendung der elementaren Biegetheorie ermittelt werden. Soweit nicht iterativ vorgegangen wird, sind die Spannungen in der Regel auf die Streckgrenze in der Mittelebene des Druckflansches zu begrenzen.

4.3 Effektive Querschnittsgrößen

(1) Bei der Berechnung der Längsspannungen sind in der Regel die Einflüsse der Schubverzerrung und des Plattenbeulens durch effektive Breiten zu berücksichtigen, siehe 3.3.

(2) Die effektiven Querschnittswerte von Bauteilen sind in der Regel aus den effektiven Flächen der druckbeanspruchten Blechelemente und den mittragenden Flächen der zugbeanspruchten Blechelemente unter Berücksichtigung ihrer Lage im Querschnitt zu ermitteln.

(3) Die wirksame Querschnittsfläche A_{eff} wird in der Regel unter der Annahme reiner Druckspannungen infolge der Druckkraft N_{Ed} berechnet. Bei unsymmetrischen Querschnitten erzeugt die Verschiebung der Schwerelinie e_{N} der wirksamen Querschnittsfläche A_{eff} gegenüber der Schwerelinie des Bruttoquerschnitts ein zusätzliches Moment, siehe Bild 4.1, das in der Regel beim Querschnittsnachweis nach 4.6 zu berücksichtigen ist.

(4) Das wirksame Widerstandsmoment W_{eff} ist in der Regel unter der Annahme reiner Biegelängsspannungen infolge M_{Ed} zu bestimmen, siehe Bild 4.2. Bei zweiachialer Biegung sind in der Regel die wirksamen Widerstandsmomente für beide Hauptachsen zu bestimmen.

ANMERKUNG Alternativ zu 4.3(3) und (4) dürfen die wirksamen Querschnittswerte mit der resultierenden Verteilung der Längsspannungen aus gleichzeitiger Wirkung von N_{Ed} und M_{Ed} bestimmt werden. Die Auswirkungen einer Verschiebung der Schwerelinie e_{N} ist in der Regel entsprechend 4.3(3) zu berücksichtigen, wobei ein iteratives Vorgehen erforderlich ist.

(5) Die Spannungen in den Flanschen sind in der Regel mit dem elastischen Widerstandsmoment, bezogen auf die Mittelebene des Gurtbleches, zu berechnen.

(6) Hybridträger dürfen mit Werkstoffen im Gurt mit einer Streckgrenze f_{yf} bis zu $\varphi_{\text{h}} \times f_{\text{yw}}$ des Stegwerkstoffs berechnet werden, wenn gilt:

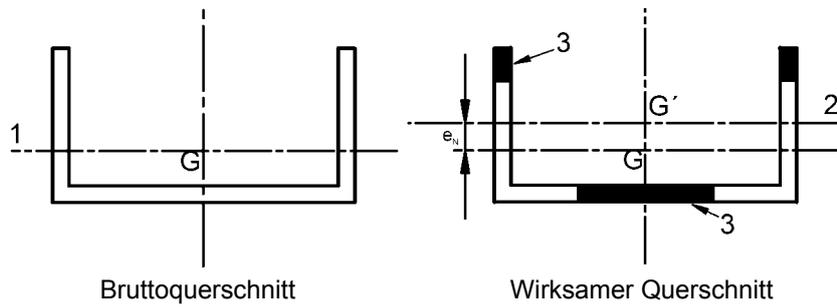
- a) die Erhöhung der Spannungen im Gurt infolge Fließens im Steg wird durch eine Begrenzung der Stegspannungen auf f_{yw} berücksichtigt;
- b) die wirksame Fläche des Steges wird mit f_{yf} AC gestrichener Text AC ermittelt.

ANMERKUNG Der Wert φ_{h} darf im nationalen Anhang festgelegt werden. Der Wert $\varphi_{\text{h}} = 2,0$ wird empfohlen.

(7) Die Vergrößerung der Verformungen und Spannungen infolge Hybridwirkung nach 4.3(6) unter Berücksichtigung der ANMERKUNG darf bei Gebrauchstauglichkeitsnachweisen und Ermüdungsnachweisen vernachlässigt werden.

(8) Bei Hybridträgern, die die Bedingungen in 4.3(6) erfüllen, darf für die Begrenzung des Spannungsschwingspiels in EN 1993-1-9 der Wert $1,5 f_{\text{yf}}$ zugrunde gelegt werden.

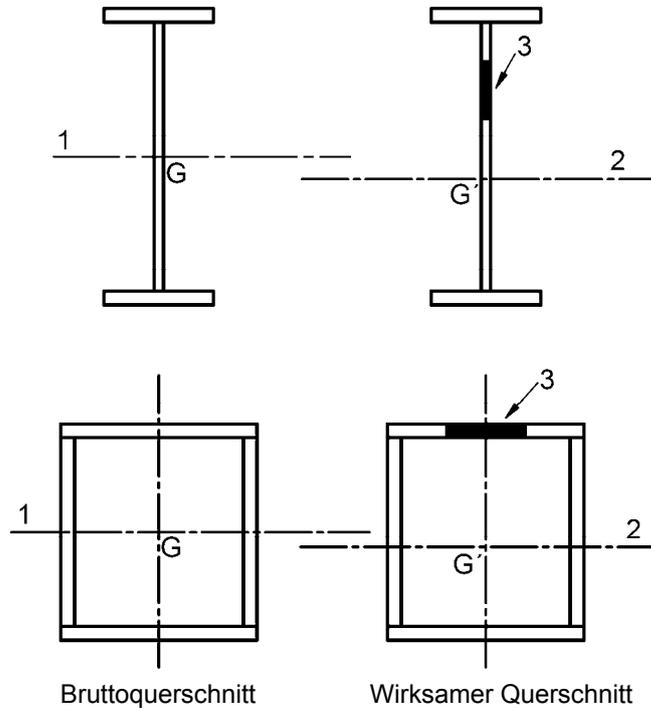
DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)



Legende

- G Schwerpunkt des Bruttoquerschnitts
- G' Schwerpunkt des wirksamen Querschnitts
- 1 Schwerlinie des Bruttoquerschnitts
- 2 Schwerlinie des wirksamen Querschnitts
- 3 nicht wirksame Querschnittsflächen

Bild 4.1 — Wirkung von Normalkräften bei Querschnitten der Klasse 4



Legende

- G Schwerpunkt des Bruttoquerschnitts
- G' Schwerpunkt des wirksamen Querschnitts
- 1 Schwerlinie des Bruttoquerschnitts
- 2 Schwerlinie des wirksamen Querschnitts
- 3 nicht wirksame Querschnittsflächen

Bild 4.2 — Wirkung von Biegemomenten bei Querschnitten der Klasse 4

4.4 Einzelblechfelder ohne Längssteifen

(1) Die wirksamen Flächen ebener druckbeanspruchter Blechfelder sind in der Regel für beidseitig gestützte Querschnittsteile der Tabelle 4.1 und für einseitig gestützte Querschnittsteile der Tabelle 4.2 zu entnehmen. Die wirksame Fläche eines druckbeanspruchten Teils eines Blechfeldes mit der wirklichen Fläche A_c wird in der Regel wie folgt ermittelt.

$$A_{c,eff} = \rho A_c \quad (4.1)$$

Dabei ist ρ der Abminderungsfaktor für Beulen.

(2) Der Abminderungsfaktor ρ darf wie folgt ermittelt werden:

— beidseitig gestützte Querschnittsteile:

$$\rho = 1,0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \quad (4.2)$$

— einseitig gestützte Querschnittsteile:

$$\rho = 1,0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad (4.3)$$

mit

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}}$$

ψ Spannungsverhältnis nach 4.4(3) und 4.4(4);

\bar{b} maßgebende Breite nach folgender Festlegung (Bezeichnungen siehe EN 1993-1-1, Tabelle 5.2);

b_w für Stege;

b für beidseitig gestützte Gurtelemente (außer bei rechteckigen Hohlprofilen);

$b - 3t$ für Gurte von rechteckigen Hohlprofilen;

c für einseitig gestützte Gurtelemente;

h für gleichschenklige Winkel;

h für ungleichschenklige Winkel;

k_σ Beulwert in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis ψ und den Lagerungsbedingungen; Beulwerte langer Platten sind in Tabelle 4.1 oder Tabelle 4.2 angegeben;

t Blechdicke;

σ_{cr} kritische elastische Beulspannung (siehe Gleichung (A.1) in A.1(2) und Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2);

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y \text{ [N/mm}^2\text{]}}}$$

(3) Für Gurte von I-Querschnitten und Kastenträgern sind in der Regel die Spannungsverteilungen für die Anwendung der Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 mit Bruttoquerschnittswerten zu bestimmen, wobei auf eine mögliche Reduzierung der Bruttoquerschnittswerte durch mittragende Breiten zu achten ist. Für Stegelemente

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

ist in der Regel das Spannungsverhältnis ψ für die Tabelle 4.1 mit der Spannungsverteilung zu ermitteln, die sich aus der wirksamen Breite der Druckflansche und dem Bruttoquerschnitt des Steges ergibt.

ANMERKUNG Sind Spannungsverteilungen für verschiedene Montagezustände (z. B. bei Verbundbrücken) zu berücksichtigen, so dürfen im ersten Schritt die Spannungsverteilungen für einen Querschnitt berechnet werden, der sich aus den effektiven Gurtflächen und den Bruttoquerschnitten der Stege zusammensetzt. Mit der hieraus resultierenden Spannungsverteilung darf die wirksame Querschnittsfläche der Stege bestimmt werden; diese wirksame Querschnittsfläche der Stege darf für alle Montagezustände zur Bestimmung der endgültigen Spannungsverteilung verwendet werden.

(4) Mit der Einschränkung in 4.4(5) darf der Beulschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ eines Blechfeldes ersetzt werden durch:

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}} \quad (4.4)$$

Dabei ist

$\sigma_{com,Ed}$ der größte Bemessungswert der einwirkenden Druckbeanspruchung in dem Blechfeld unter Berücksichtigung aller einwirkenden Lasten.

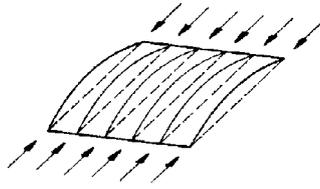
ANMERKUNG 1 Dieses Vorgehen erfordert im Allgemeinen eine iterative Berechnung, in der das Spannungsverhältnis ψ (siehe Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2) in jedem Schritt neu aus der Spannungsverteilung mit dem wirksamen Querschnitt des vorherigen Iterationsschritts ermittelt wird.

ANMERKUNG 2 Eine alternative Vorgehensweise ist in Anhang E angegeben.

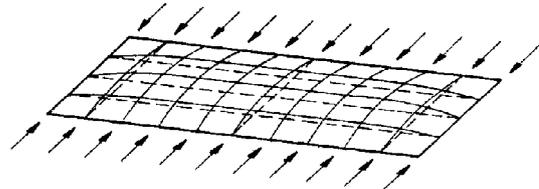
(5) Beim Knicknachweis von Bauteilen der Querschnittsklasse 4 nach EN 1993-1-1, 6.3.1, 6.3.2 oder 6.3.4 ist in der Regel entweder der Beulschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ oder $\bar{\lambda}_{p,red}$ mit $\sigma_{com,Ed}$ anzuwenden, wobei $\sigma_{com,Ed}$ nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung globaler Imperfektionen ermittelt wird.

(6) Bei Beulfeldabmessungen, bei denen knickstabähnliches Verhalten auftreten kann (z. B. für $a/b < 1$), ist der Nachweis in der Regel nach 4.5.4 unter Verwendung der Abminderungsfaktoren ρ_c zu führen.

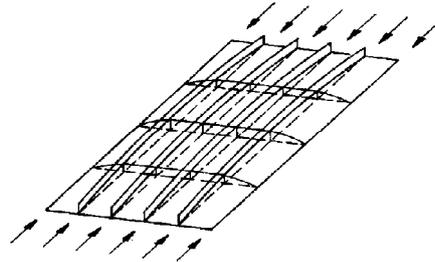
ANMERKUNG Dies betrifft z. B. schmale Einzelfelder zwischen Quersteifen, bei denen das Plattenbeulen knickstabähnlich ist und einen Abminderungsfaktor ρ_c in der Größenordnung des Abminderungsfaktors χ_c für Stabknicken erfordert, siehe Bild 4.3 a) und b). Bei längs ausgesteiften Blechfeldern mit $a/b \geq 1$ kann ebenfalls knickstabähnliches Verhalten auftreten, siehe Bild 4.3 c).



a) knickstabähnliches Verhalten eines Beulfeldes ohne Lagerung in Längsrichtung



b) knickstabähnliches Verhalten eines nicht ausgesteiften Beulfeldes mit kleinem Seitenverhältnis α



c) knickstabähnliches Verhalten eines längs ausgesteiften Blechfeldes mit großem Seitenverhältnis α

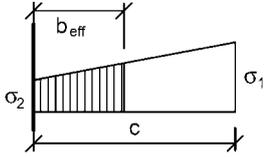
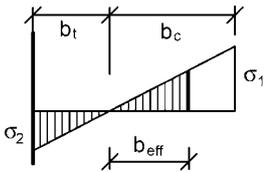
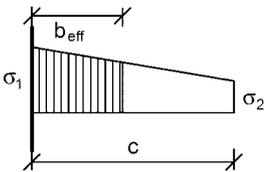
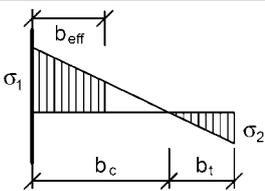
Bild 4.3 — Knickstabähnliches Verhalten

Tabelle 4.1 — Zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

Spannungsverteilung (Druck positiv)				Wirksame Breite b_{eff}		
				$\psi = 1:$	$b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$	$b_{e2} = 0,5 b_{eff}$
				$1 > \psi \geq 0:$	$b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$	$b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$
				$\psi < 0:$	$b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$	$b_{e2} = 0,6 b_{eff}$
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$\boxed{AC} -1 > \psi \geq -3 \boxed{AC}$
Beulwert k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29 \psi + 9,78 \psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

Tabelle 4.2 — Einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

Spannungsverteilung (Druck positiv)		Wirksame Breite b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Beulwert k_{σ}	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21 \psi + 0,07 \psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Beulwert k_{σ}	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5 \psi + 17,1 \psi^2$	23,8

4.5 Längs ausgesteifte Blechfelder

4.5.1 Allgemeines

(1) Bei längs ausgesteiften Blechfeldern sind in der Regel sowohl die wirksamen Flächen infolge lokalen Beulens der Einzelfelder im Blech und in den Steifen als auch die wirksamen Flächen aus den Gesamtfeldbeulen des ausgesteiften Gesamtfeldes zu berücksichtigen.

(2) In einer zweischrittigen Vorgehensweise sind in der Regel zunächst die wirksamen Flächen der Einzelfelder mit Hilfe des Abminderungsfaktors nach 4.4 zur Berücksichtigung des Einzelfeldbeulens zu bestimmen. Im zweiten Schritt ist in der Regel die wirksame Fläche des ausgesteiften Gesamtfeldes aus den wirksamen Flächen der Steifen mit Hilfe des Abminderungsfaktors ρ_c zur Berücksichtigung des Gesamtfeldbeulens (z. B. über das Modell der äquivalenten orthotropen Platte) zu ermitteln.

(3) Die wirksame Fläche der Druckzone eines ausgesteiften Blechfeldes ist in der Regel mit:

$$A_{c,eff} = \rho_c A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} t \quad (4.5)$$

anzusetzen, wobei $A_{c,eff,loc}$ aus den wirksamen Flächen aller Steifen und Einzelfelder besteht, die sich ganz oder teilweise im Druckbereich befinden, mit Ausnahme derjenigen wirksamen Querschnittsteile der Breite $b_{edge,eff}$, die durch ein angrenzendes Plattenbauteil gestützt werden (siehe Beispiel in Bild 4.4).

(4) Die Fläche $A_{c,eff,loc}$ ist in der Regel mit:

$$A_{c,eff,loc} = A_{sl,eff} + \sum_c \rho_{loc} b_{c,loc} t \quad (4.6)$$

zu ermitteln.

Dabei ist

\sum_c bezieht sich auf den im Druckbereich liegenden Teil des längs ausgesteiften Blechfeldes mit Ausnahme der Querschnittsteile $b_{edge,eff}$, siehe Bild 4.4;

$A_{sl,eff}$ die Summe der wirksamen Fläche aller Längssteifen mit der Bruttoquerschnittsfläche A_{sl} in der Druckzone nach 4.4;

$b_{c,loc}$ die Breite der Druckzone in einem Einzelfeld;

ρ_{loc} der Abminderungsfaktor nach 4.4(2) für das Einzelfeld.

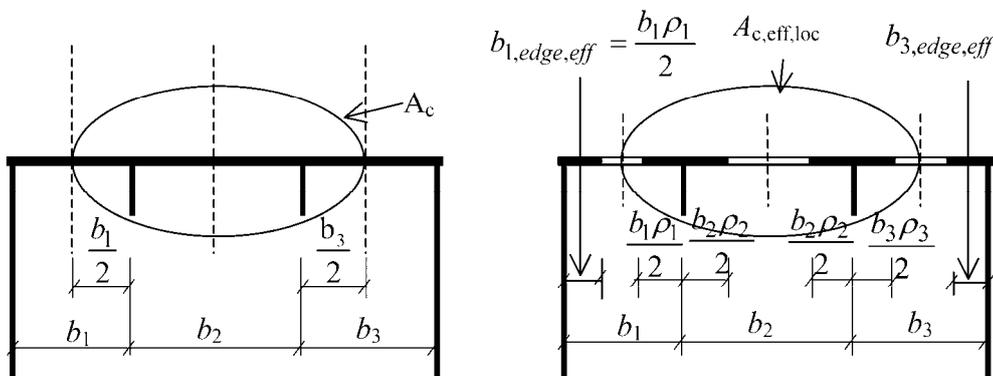


Bild 4.4 — Längsausgesteiftes Blechfeld unter konstanter Druckbeanspruchung

ANMERKUNG Bei nicht konstanter Verteilung der Druckspannungen siehe Bild A.1.

(5) Bei der Ermittlung des Abminderungsfaktors ρ_c für das Gesamtfeldbeulen ist in der Regel auf die Möglichkeit knickstabähnlichen Verhaltens mit größerer Abminderung als beim Plattenbeulen zu achten.

(6) Der Abminderungsfaktor ρ_c ist in der Regel durch Interpolation zwischen dem Abminderungsfaktor ρ für plattenartiges Verhalten und dem Abminderungsfaktor χ_c für knickstabähnliches Verhalten nach 4.5.4 zu ermitteln.

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

(7) Die Abminderung der unter Druckbeanspruchung stehenden Fläche $A_{c,eff,loc}$ durch ρ_c darf als über diesen Gesamtquerschnitt gleichmäßig verteilt angenommen werden.

(8) Sind mittragende Breiten zu berücksichtigen (siehe 3.3), ist in der Regel für die unter Druckbeanspruchung stehenden Querschnittsteile eines längs ausgesteiften Blechfeldes anstelle der wirksamen Querschnittsfläche $A_{c,eff}$ die effektive Querschnittsfläche $A_{c,eff}^*$ zur Berücksichtigung sowohl der Plattenbeuleffekte als auch der Effekte aus Schubverzerrungen zu verwenden.

(9) Als wirksame Querschnittsfläche der unter Zug stehenden Flächen des ausgesteiften Beulfeldes ist in der Regel die Bruttofläche der Zugzone anzunehmen, wobei gegebenenfalls mittragende Breiten zu berücksichtigen sind, siehe 3.3.

(10) Das wirksame Widerstandsmoment W_{eff} ist in der Regel als Flächenträgheitsmoment des wirksamen Gesamtquerschnitts geteilt durch den Randabstand zur Mittelebene des Gurtbleches anzusetzen.

4.5.2 Plattenartiges Verhalten

(1) Der Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ einer äquivalenten orthotropen Platte ist wie folgt definiert:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,p}}} \quad (4.7)$$

mit

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c}$$

Dabei ist

A_c die Bruttoquerschnittsfläche des längs ausgesteiften Blechfeldes ohne Berücksichtigung der durch ein angrenzendes Plattenbauteil gestützten Randbleche, siehe Bild 4.4 (A_c ist gegebenenfalls mit einem Faktor zur Berücksichtigung der Effekte aus Schubverzerrungen zu multiplizieren, siehe 3.3);

$A_{c,eff,loc}$ die effektive Querschnittsfläche (ggf. unter Berücksichtigung von Schubverzerrungen) des oben beschriebenen Bereiches des längsausgesteiften Blechfeldes unter Berücksichtigung des Einzelfeldbeulens und/oder des Gesamtfeldbeulens.

(2) Der Abminderungsfaktor ρ für die äquivalente orthotrope Platte wird nach 4.4(2) bestimmt; Voraussetzung hierfür ist die Ermittlung von $\bar{\lambda}_p$ nach Gleichung (4.7).

ANMERKUNG Anhang A gibt Hinweise zur Berechnung von $\sigma_{cr,p}$.

4.5.3 Knickstabähnliches Verhalten

(1) Als elastische kritische Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ eines unausgesteiften Blechfeldes (siehe 4.4) oder eines ausgesteiften Blechfeldes (siehe 4.5) ist in der Regel die Knickspannung anzusetzen, die sich bei Freisetzen der Längsränder ergibt.

(2) Die elastische kritische Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ eines unausgesteiften Blechfeldes darf mit:

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 E t^2}{12 (1 - \nu^2) a^2} \quad (4.8)$$

bestimmt werden.

(3) Bei einem ausgesteiften Blechfeld darf $\sigma_{cr,c}$ mit Hilfe der Knickspannung $\sigma_{cr,st}$ der am höchstbelasteten Druckrand liegenden Steife ermittelt werden:

$$\sigma_{cr,s\ell} = \frac{\pi^2 E I_{s\ell,1}}{A_{s\ell,1} a^2} \quad (4.9)$$

Dabei ist

$I_{s\ell,1}$ das Flächenträgheitsmoment unter Ansatz der Bruttoquerschnittsfläche der als Ersatzdruckstab betrachteten Steife und der angrenzenden mittragenden Blechstreifen bezogen auf Knicken senkrecht zur Blechebene;

$A_{s\ell,1}$ die Bruttoquerschnittsfläche des Ersatzdruckstabes, die sich aus der Steife und den angrenzenden mittragenden Blechstreifen entsprechend Bild A.1 zusammensetzt.

ANMERKUNG Der Wert $\sigma_{cr,c}$ darf aus $\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,s\ell} \frac{b_c}{b_{s\ell,1}}$ ermittelt werden, wobei $\sigma_{cr,c}$ für den Druckrand gilt. $b_{s\ell,1}$ und b_c bezeichnen die Abstände aus der Spannungsverteilung, die für die Extrapolation benötigt werden, siehe Bild A.1.

(4) Der Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_c$ des Ersatzdruckstabes ist wie folgt definiert:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad \text{bei nicht ausgesteiften Blechfeldern} \quad (4.10)$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad \text{bei ausgesteiften Blechfeldern} \quad (4.11)$$

Dabei ist

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{s\ell,1,eff}}{A_{s\ell,1}};$$

$A_{s\ell,1}$ nach 4.5.3(3) und

$A_{s\ell,1,eff}$ die wirksame Querschnittsfläche der Steife und der angrenzenden mittragenden Blechstreifen unter Berücksichtigung des Beulens, siehe Bild A.1.

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

(5) Der Abminderungsfaktor χ_c ist in der Regel nach EN 1993-1-1, 6.3.1.2 zu bestimmen. Der Imperfektionsbeiwert α hat bei nicht ausgesteiften Blechfeldern in der Regel der Knickkurve a mit $\alpha = 0,21$ zu entsprechen. Bei ausgesteiften Blechfeldern ist α in der Regel zur Berücksichtigung größerer Imperfektionen geschweißter Platten durch den vergrößerten Wert α_e :

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} \quad (4.12)$$

zu ersetzen.

Dabei ist

$$i = \sqrt{\frac{I_{s\ell,1}}{A_{s\ell,1}}}$$

e = max (e_1, e_2) der größere der beiden Abstände nach Bild A.1, d. h. entweder der Abstand zwischen dem Schwerpunkt der vom Blech isoliert betrachteten, einseitig angebrachten Einzelsteifen ohne mitwirkende Breite (bei zweiseitig angebrachten Steifen wird hierbei nur eine Seite betrachtet) zur Schwereachse des ausgesteiften Blechfeldes oder der Abstand der Schwereachse des ausgesteiften Blechfeldes zur Mittelebene des Bleches;

α = 0,34 (Kurve b) für Hohlsteifenquerschnitte;
 = 0,49 (Kurve c) für offene Steifenquerschnitte.

4.5.4 Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

(1) Der endgültige Abminderungsfaktor ρ_c wird in der Regel mit Hilfe der Interaktionsgleichung:

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \xi (2 - \xi) + \chi_c \quad (4.13)$$

ermittelt.

Dabei ist

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 \text{ jedoch } 0 \leq \xi \leq 1;$$

$\sigma_{cr,p}$ die elastische Plattenbeulspannung, siehe A.1(2);

$\sigma_{cr,c}$ die elastische Knickspannung, siehe 4.5.3(2) und (3);

χ_c der Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung knickstabähnlichen Verhaltens;

ρ der Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung des Plattenbeulens, siehe 4.4(1).

4.6 Nachweis

(1) Der Bauteilnachweis \overline{AC} mit Hilfe von Normalkraft und wirksamer Querschnittsgrößen für Längsspannungen \overline{AC} lautet in der Regel wie folgt:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff}} + \frac{M_{Ed} + N_{Ed} e_N}{f_y W_{eff}} \leq 1,0 \quad (4.14)$$

Dabei ist

- A_{eff} die wirksame Querschnittsfläche nach 4.3(3);
- e_N die Verschiebung der neutralen Achse nach 4.3(3);
- M_{Ed} der Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes;
- N_{Ed} der Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft;
- W_{eff} das wirksame Widerstandsmoment, siehe 4.3(4);
- γ_{M0} der Teilsicherheitsbeiwert, siehe EN 1993-2 bis -6.

ANMERKUNG Gleichung (4.14) darf für Bauteile unter Normalkraft und zweiachsigler Biegung wie folgt erweitert werden:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{y,N}}{f_y W_{y,eff}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{z,N}}{f_y W_{z,eff}} \leq 1,0 \quad (4.15)$$

Dabei ist

- $M_{y,Ed}, M_{z,Ed}$ die Bemessungswerte der einwirkenden Biegemomente um die y-y- bzw. die z-z-Achse;
- $e_{y,N}, e_{z,N}$ die Verschiebungen der jeweiligen neutralen Achse.

(2) Die Schnittgrößen M_{Ed} und N_{Ed} sind gegebenenfalls nach Theorie II. Ordnung zu berechnen.

(3) Für eine längs des Beulfeldes veränderliche Spannung ist in der Regel der Beulnachweis für die Schnittgrößen an der Querschnittsstelle zu führen, die sich im Abstand $0,4 a$ oder $0,5 b$ (kleinster Wert) von dem Beulfeldrand befindet, an dem die größten Spannungen auftreten. In diesem Fall muss am Beulfeldrand zusätzlich ein Querschnittsnachweis geführt werden.

5 Schubbeulen

5.1 Grundlagen

(1) Die Regeln dieses Abschnittes zur Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit von Plattenelementen unter Berücksichtigung von Schubbeulen gelten unter folgenden Voraussetzungen:

- a) die Beulfelder sind rechteckig und die Flansche näherungsweise parallel (siehe 2.3);
- b) soweit Steifen vorhanden sind, laufen diese in Längs- und/oder Querrichtung;

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

- c) Löcher oder Ausschnitte sind klein (siehe 2.3);
 d) die Bauteile sind gleichförmig.

(2) Für nicht ausgesteifte Blechfelder mit einem Verhältnis $h_w/t > \frac{72}{\eta} \varepsilon$ und für ausgesteifte Blechfelder mit einem Verhältnis $h_w/t > \frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau}$ ist in der Regel ein Schubbeulnachweis zu führen und es sind Quersteifen an den Lagern vorzusehen; es gilt:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y \text{ (N/mm}^2\text{)}}}$$

ANMERKUNG 1 h_w ist in Bild 5.1 und k_τ in 5.3(3) angegeben.

ANMERKUNG 2 Der nationale Anhang darf η festlegen. Der Wert $\eta = 1,20$ wird empfohlen für Stahlsorten bis S460, für Stahlsorten höher als S460 wird $\eta = 1,0$ empfohlen.

5.2 Bemessungswert der Beanspruchbarkeit

(1) Bei nicht ausgesteiften und ausgesteiften Stegen ist in der Regel der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit $V_{b,Rd}$ unter Berücksichtigung des Schubbeulens wie folgt zu ermitteln:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (5.1)$$

Der Beitrag des Steges ergibt sich zu:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (5.2)$$

Der Beitrag der Flansche $V_{bf,Rd}$ wird nach 5.4 bestimmt.

(2) Steifen haben in der Regel den Anforderungen nach 9.3 zu genügen; die Schweißnähte sind in der Regel nach 9.3.5 auszubilden.

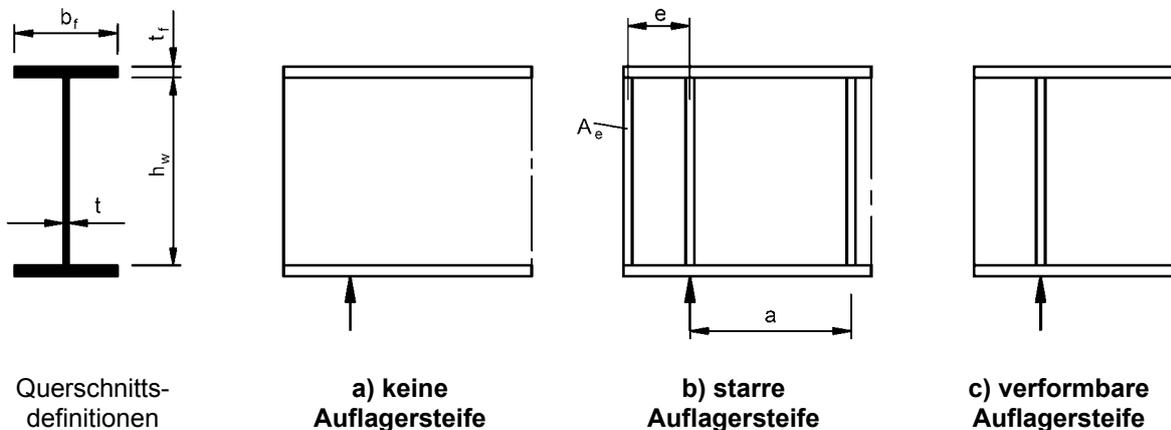


Bild 5.1 — Kriterien für Auflagersteifen

5.3 Beitrag des Steges

(1) Bei Stegen mit Quersteifen nur an den Auflagern (Auflagersteifen) und bei Stegen, die quer und/oder längs ausgesteift sind, ist in der Regel der Faktor χ_w für den Stegbeitrag zur Beanspruchbarkeit nach Tabelle 5.1 oder Bild 5.2 zu bestimmen.

Tabelle 5.1 — Beitrag des Steges χ_w zur Schubbeanspruchbarkeit

	Starre Auflagersteife	Verformbare Auflagersteife
$\bar{\lambda}_w < 0,83 / \eta$	η	η
$0,83 / \eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37 / (0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$

ANMERKUNG Siehe auch 6.2.6 in EN 1993-1-1.

(2) Es werden nach Bild 5.1 folgende Fälle unterschieden:

- keine Auflagersteifen; siehe 6.1(2), Typ (c);
- starre Auflagersteifen; dieser Fall gilt auch für Innenfelder außer dem Feld am Endauflager und für Felder an Zwischenlagern von durchlaufenden Trägern, siehe 9.3.1;
- verformbare Auflagersteifen, siehe 9.3.2.

(3) Die [AC] modifizierte Schlankheit [AC] $\bar{\lambda}_w$ in Tabelle 5.1 und Bild 5.2 ist in der Regel mit:

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr}}} \quad (5.3)$$

zu bestimmen. Für die kritische Beulspannung τ_{cr} gilt:

$$\tau_{cr} = k_\tau \sigma_E \quad (5.4)$$

ANMERKUNG 1 Werte für σ_E und k_τ dürfen Anhang A entnommen werden.

ANMERKUNG 2 Die [AC] modifizierte Schlankheit [AC] $\bar{\lambda}_w$ darf wie folgt ermittelt werden:

a) nur Auflagersteifen:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 t \varepsilon} \quad (5.5)$$

b) Auflagersteifen und zusätzlich in Querrichtung und/oder in Längsrichtung laufenden Steifen:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 t \varepsilon \sqrt{k_\tau}} \quad (5.6)$$

wobei k_τ der kleinste Schubbeulwert des Stegfeldes ist.

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

ANMERKUNG 3 Werden zusätzlich zu starren Quersteifen auch verformbare Quersteifen verwendet, sollten sowohl die Stegfelder zwischen allen Quersteifen (z. B. $a_2 \times h_w$ und $a_3 \times h_w$) als auch das Stegfeld zwischen nur starren Quersteifen, zwischen denen sich verformbare Quersteifen befinden (z. B. $a_4 \times h_w$), im Hinblick auf das kleinste k_τ geprüft werden.

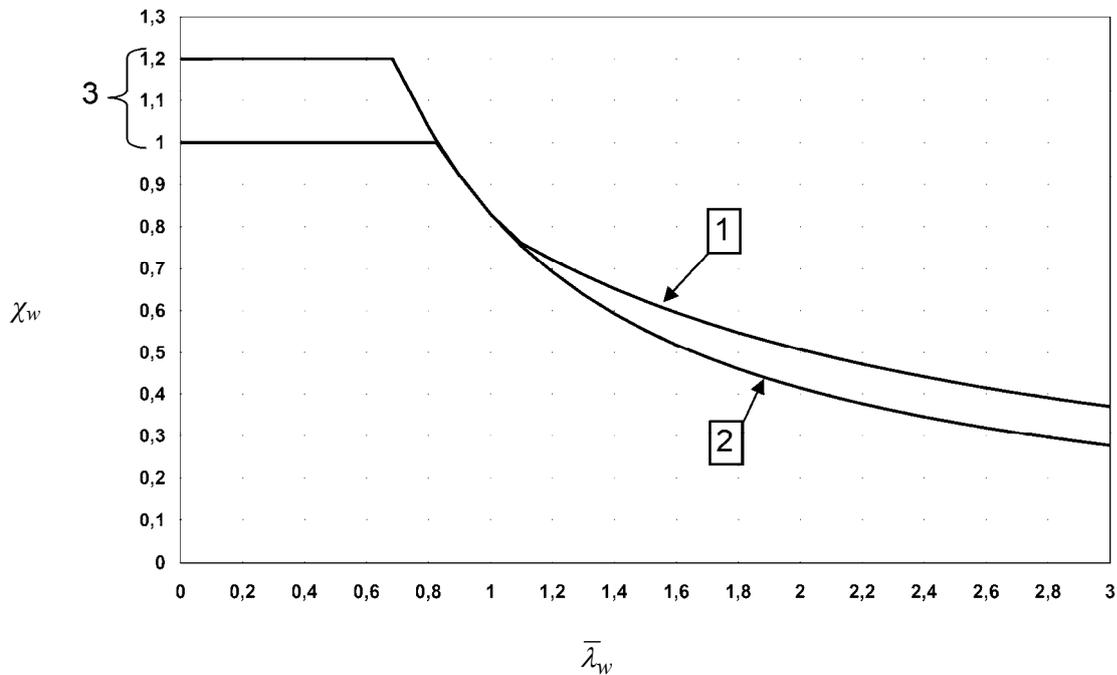
ANMERKUNG 4 Sind Flansche und starre Quersteifen vorhanden, darf eine starre Randlagerung angenommen werden. In diesem Fall kann die Schubbeuluntersuchung für Beulfelder zwischen zwei Quersteifen (z. B. $a_1 \times h_w$ in Bild 5.3) erfolgen.

ANMERKUNG 5 Bei verformbaren Quersteifen darf der kleinste Wert k_τ durch eine Eigenwertbestimmung für folgende Subsysteme ermittelt werden:

1. zwei benachbarte Stegblechfelder mit einer verformbaren Quersteife;
2. drei benachbarte Stegblechfelder mit zwei verformbaren Quersteifen.

Hinweise zur Bestimmung von k_τ gibt A.3.

(4) Das Flächenträgheitsmoment der Steifen ist in der Regel bei der Ermittlung von k_τ auf 1/3 seines wirklichen Wertes zu reduzieren. Diese Reduktion ist bereits in den Gleichungen in A.3 enthalten.



Legende

- 1 starre Auflagersteife
- 2 verformbare Auflagersteife
- 3 Bereich der empfohlenen Werte für η

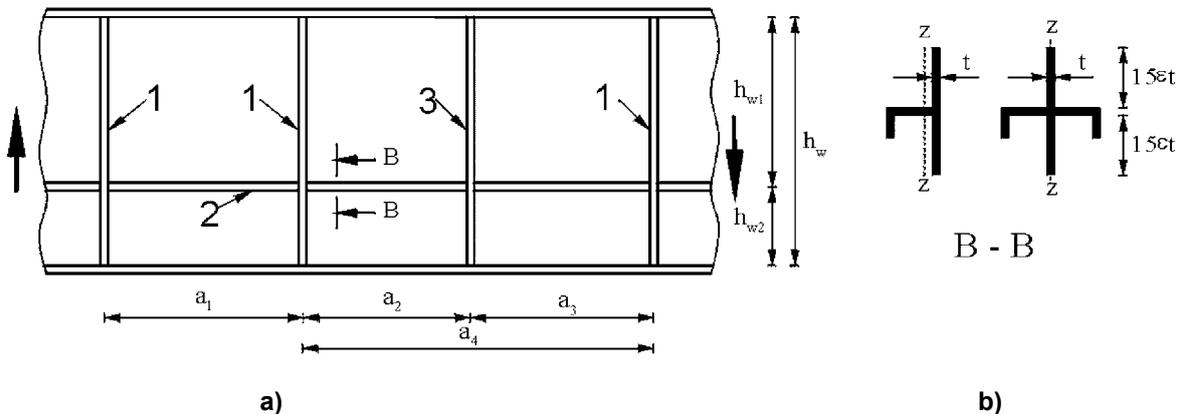
Bild 5.2 — Beitrag des Stages χ_w zur Schubbeanspruchbarkeit

(5) Bei Stegen mit Längssteifen ist in der Regel die $\overline{\lambda}_{AC}$ modifizierte Schlankheit $\overline{\lambda}_{w,AC}$ in (3) mit mindestens dem Wert von

$$\overline{\lambda}_{w,AC} = \frac{h_{wi}}{37,4 t \varepsilon \sqrt{k_{ti}}} \quad (5.7)$$

anzusetzen, wobei sich h_{wi} und k_{ti} auf das Einzelfeld mit $\overline{\lambda}_{AC}$ der modifizierten Schlankheit $\overline{\lambda}_{w,AC}$ dem größten Einzelfeldschlankheitsgrad $\overline{\lambda}_{w,AC}$ beziehen.

ANMERKUNG Zur Berechnung von k_{ti} darf der Ausdruck in A.3 mit $k_{tst} = 0$ verwendet werden.



Legende

- 1 starre Quersteife
- 2 Längssteife
- 3 verformbare Quersteife

Bild 5.3 — Stegblech mit Quer- und Längssteifen

5.4 Beitrag der Flansche

(1) Werden die Flansche bei Annahme eines Zweipunktquerschnittes nicht vollständig für die Querschnittsbeanspruchung ausgenutzt ($M_{Ed} < M_{f,Rd}$), darf der Flanschbeitrag zur Schubbeanspruchbarkeit berücksichtigt werden. Dieser wird in der Regel wie folgt ermittelt:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right) \quad (5.8)$$

Dabei ist

b_f und t_f gelten für den Flansch, der die kleinere Beanspruchbarkeit für Normalkräfte liefert;

b_f sollte an jeder Stegseite nicht größer als $15 \varepsilon t_f$ angenommen werden;

$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,k}}{\gamma_{M0}}$ der Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit bei Berücksichtigung alleine der effektiven Flächen der Flansche;

$$c = a \left(0,25 + \frac{1,6 b_f t_f^2 f_{yf}}{t h_w^2 f_{yw}} \right).$$

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

(2) Wirkt auch eine Normalkraft N_{Ed} , so ist der Wert von $M_{f,Rd}$ in der Regel mit dem Faktor:

$$\left(1 - \frac{N_{Ed}}{(A_{f1} + A_{f2}) \cdot f_{yf}} \cdot \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M0}} \right) \quad (5.9)$$

zu reduzieren. A_{f1} und A_{f2} sind die Flächen der Flansche.

5.5 Nachweis

(1) Der Nachweis ist in der Regel wie folgt zu führen:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (5.10)$$

Dabei ist

V_{Ed} der Bemessungswert der einwirkenden Schubkraft aus Querkraft und Torsion.

6 Beanspruchbarkeit bei Querbelastrung

6.1 Grundlagen

(1) Die Beanspruchbarkeit eines Trägersteges für Querlasten, die über die Flansche an den Längsrändern einwirken, ist für gewalzte und geschweißte Träger in der Regel nach 6.2 zu bestimmen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Flansche infolge ihrer eigenen Querbiegesteifigkeit oder durch Verbände in ihrer Lage quer gehalten werden.

(2) Es werden 3 Arten der Lasteinleitung unterschieden:

- a) Lasten, die einseitig über einen Flansch eingeleitet werden und im Gleichgewicht mit Querkraften im Steg stehen, siehe Bild 6.1 a);
- b) Lasten, die beidseitig über beide Flansche eingeleitet werden und mit sich selbst im Gleichgewicht stehen, siehe Bild 6.1 b);
- c) Lasten, die in der Nähe des Trägerendes ohne Querstreifen eingeleitet werden und mit der Querkraft im Steg im Gleichgewicht stehen, siehe Bild 6.1 c).

(3) Bei Hohlkastenträgern mit geneigten Stegen ist in der Regel die Beanspruchbarkeit sowohl der Stege als auch der Gurte nachzuweisen. Die zu berücksichtigenden inneren Kräfte sind die Komponenten der äußeren Lasten in der Stegebene und der Gurtebene.

(4) Zusätzlich ist in der Regel die Auswirkung der Querbelastrung auf die Momententragfähigkeit des Bauteils zu berücksichtigen, siehe 7.2.

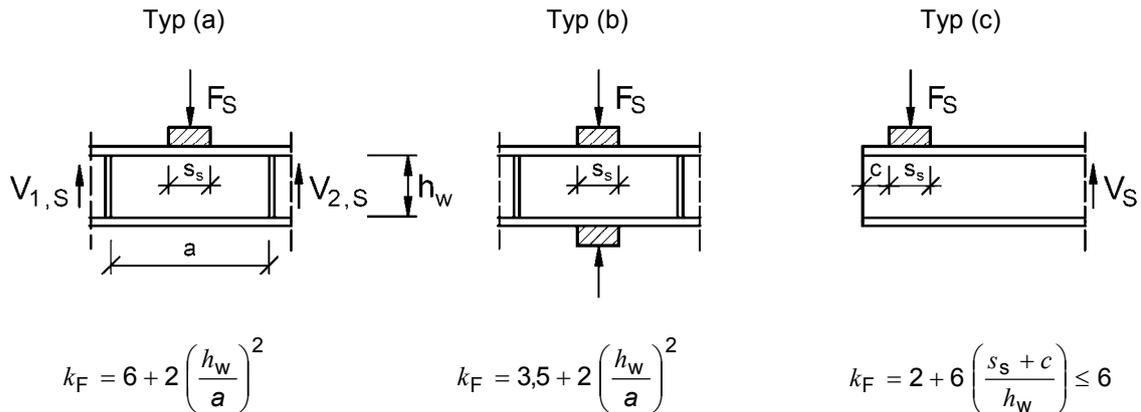


Bild 6.1 — Beulwerte für verschieden Arten der Lasteinleitung

6.2 Bemessungswert der Beanspruchbarkeit

(1) Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit eines nicht ausgesteiften oder ausgesteiften Stegbleches bei Plattenbeulen unter Querbelastung ist in der Regel aus

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} L_{eff} t_w}{\gamma_{M1}} \quad (6.1)$$

zu bestimmen. Dabei ist

t_w die Stegblechdicke;

f_{yw} die Streckgrenze des Stegblechs;

L_{eff} die wirksame Lastausbreitungslänge unter Berücksichtigung des Stegbeulens bei Querlasten:

$$L_{eff} = \chi_F \ell_y \quad (6.2)$$

ℓ_y die wirksame Lastausbreitungslänge ohne Stegbeulen (siehe 6.5), abhängig von der Länge s_s der starren Lasteinleitung, siehe 6.3;

χ_F der Abminderungsfaktor infolge Stegbeulen bei Querlasten, siehe 6.4(1).

6.3 Länge der starren Lasteinleitung

(1) Die Länge der starren Lasteinleitung s_s ist in der Regel die Länge, über die die Querlast auf den Flansch eingeleitet wird, siehe Bild 6.2. Diese Länge kann bei Lasteinleitung über Futter oder Bleche über einen Lastausbreitungswinkel 1:1 berechnet werden. Der Wert s_s ist in der Regel kleiner als h_w .

(2) Liegen mehrere Einzellasten dicht beieinander, so ist in der Regel die Beanspruchbarkeit sowohl für jede Einzellast als auch für die gesamte Querbelastung und diese mit einer Länge der starren Lasteinleitung entsprechend dem Abstand der äußeren Einzellasten zu ermitteln.

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

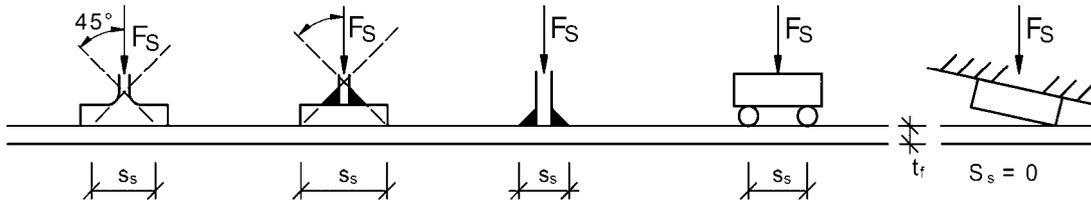


Bild 6.2 — Länge der starren Lasteinleitung

(3) Folgen die Futter oder Bleche an der Stelle der Lasteinleitung bei Verformung des Trägers nicht der Neigung des Trägers (siehe rechtes Teilbild 6.2), so ist in der Regel $s_s = 0$ anzusetzen.

6.4 Abminderungsfaktor χ_F für die wirksame Lastausbreitungslänge

(1) Der Abminderungsfaktor χ_F für die wirksame Lastausbreitungslänge ist in der Regel aus

$$\chi_F = \frac{0,5}{\lambda_F} \leq 1,0 \quad (6.3)$$

zu ermitteln, wobei gilt:

$$\lambda_F = \sqrt{\frac{\ell_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}} \quad (6.4)$$

$$F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} \quad (6.5)$$

(2) Der Faktor k_F für Stege ohne Längssteifen ist in der Regel nach Bild 6.1 zu ermitteln.

ANMERKUNG Der nationale Anhang darf Hinweise zur Bestimmung von k_F für Stege mit Längssteifen geben. Folgende Regelungen werden empfohlen:

Für Stege mit Längssteifen darf k_F wie folgt bestimmt werden:

$$k_F = 6 + 2 \left[\frac{h_w}{a} \right]^2 + \left[5,44 \frac{b_1}{a} - 0,21 \right] \sqrt{\gamma_s} \quad (6.6)$$

Dabei ist

b_1 die Höhe des belasteten Einzelfeldes als lichter Abstand zwischen dem belasteten Flansch und der ersten Steife

$$\gamma_s = 10,9 \frac{I_{s\ell,1}}{h_w t_w^3} \leq 13 \left[\frac{a}{h_w} \right]^3 + 210 \left[0,3 - \frac{b_1}{a} \right] \quad (6.7)$$

$I_{s\ell,1}$ das Flächenträgheitsmoment der zu dem belasteten Flansch am nächsten gelegenen Steife einschließlich der wirksamen Stegteile nach Bild 9.1.

Gleichung (6.6) gilt für $0,05 \leq \frac{b_1}{a} \leq 0,3$ und $\frac{b_1}{h_w} \leq 0,3$ für den Typ (a) nach Bild 6.1.

(3) ℓ_y ist in der Regel nach 6.5 zu bestimmen.

6.5 Wirksame Lastausbreitungslänge

(1) Die wirksame Lastausbreitungslänge ohne Stegbeulen ℓ_y ist in der Regel mit Hilfe der dimensionslosen Parameter m_1 und m_2 mit

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} \quad (6.8)$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 \quad \text{für } \bar{\lambda}_F > 0,5$$

$$m_2 = 0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \quad (6.9)$$

zu berechnen.

Bei Kastenträgern ist b_f in Gleichung (6.8) in der Regel an jeder Stegseite auf $15 \varepsilon t_f$ zu begrenzen.

(2) Für die Fälle (a) und (b) in Bild 6.1 ist ℓ_y in der Regel aus:

$$\ell_y = s_s + 2 t_f \left(1 + \sqrt{m_1 + m_2} \right) \quad \text{mit } \ell_y \leq a \quad (\text{Quersteifenabstand}) \quad (6.10)$$

zu bestimmen.

(3) Für den Fall (c) ist ℓ_y in der Regel als kleinster Wert der Gleichungen (6.11) und (6.12) AC gestrichener Text AC zu ermitteln:

$$\ell_y = \ell_e + t_f \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{\ell_e}{t_f} \right)^2 + m_2} \quad (6.11)$$

$$\ell_y = \ell_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2} \quad (6.12)$$

AC Dabei ist AC

$$\ell_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{yw} h_w} \leq s_s + c \quad (6.13)$$

6.6 Nachweis

(1) Der Nachweis ist in der Regel wie folgt zu führen:

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{f_{yw} L_{eff} t_w} \leq 1,0 \quad (6.14)$$

$$\gamma_{M1}$$

Dabei ist

F_{Ed} der Bemessungswert der einwirkenden Querlast;

L_{eff} die wirksame Lastausbreitungslänge unter Berücksichtigung des Stegbeulens bei Querbelastung, siehe AC 6.2(1) AC;

t_w die Blechdicke.

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

7 Interaktion

7.1 Interaktion zwischen Schub, Biegemoment und Normalkraft

(1) Für $\bar{\eta}_3 \leq 0,5$ (siehe unten) darf der Einfluss der Schubkräfte auf die Beanspruchbarkeit für Biegemoment und Normalkraft vernachlässigt werden. Bei $\bar{\eta}_3 > 0,5$ ist in der Regel für die gemeinsame Wirkung von Biegung, Normalkraft und Schub im Steg von I-Trägern oder von Kastenträgern die Bedingung

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \left(2\bar{\eta}_3 - 1\right)^2 \leq 1,0 \quad \text{mit} \quad \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \quad (7.1)$$

zu erfüllen.

Dabei ist

$M_{f,Rd}$ der Bemessungswert der plastischen Momentenbeanspruchbarkeit des Querschnitts, der nur mit der effektiven Querschnittsfläche der Flansche berechnet wird;

$M_{pl,Rd}$ der Bemessungswert der plastischen Momentenbeanspruchbarkeit des Querschnitts, der mit der effektiven Querschnittsfläche der Flansche und der vollen Querschnittsfläche des Steges berechnet wird (unabhängig von der Querschnittsklasse).

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}}$$

AC $V_{bw,Rd}$ siehe (5.2). **AC**

Zusätzlich sind in der Regel die Anforderungen nach 4.6 und 5.5 zu erfüllen.

Die Schnittgrößen sind gegebenenfalls nach Theorie II. Ordnung zu ermitteln.

(2) Das Interaktionskriterium in (1) gilt in der Regel an jeder Querschnittsstelle, braucht jedoch an Innenstützen von Drucklaufträgern bei Vorhandensein einer Quersteife nur im Bereich außerhalb des Abstandes $h_w/2$ von der Stütze erfüllt zu werden.

(3) Der Bemessungswert $M_{f,Rd}$ der plastischen Momentenbeanspruchbarkeit des Querschnitts, der nur mit Flanschen berechnet wird, darf als das Produkt der effektiven Fläche des kleineren Flansches und der Streckgrenze ($= A_{ef} f_y / \gamma_{M0}$) multipliziert mit dem Abstand zwischen den Mittelebenen der Flanschbleche bestimmt werden.

(4) Wirkt zusätzlich eine Normalkraft N_{Ed} ein, ist in der Regel der Wert $M_{pl,Rd}$ nach EN 1993-1-1, 6.2.9 und $M_{f,Rd}$ nach 5.4(2) zu reduzieren. Ist die Normalkraft so groß, dass sich der gesamte Steg unter Druckbeanspruchung befindet, ist in der Regel 7.1(5) anzuwenden.

(5) Der Flansch eines Kastenträgers ist in der Regel nach 7.1(1) nachzuweisen, wobei $M_{f,Rd} = 0$ und τ_{Ed} als Mittelwert der Schubspannung im Flansch mit mindestens der Hälfte der maximalen Schubspannungen im Flansch anzusetzen ist; für $\bar{\eta}_1$ ist hierbei η_1 nach 4.6(1) anzusetzen. Zusätzlich sind in der Regel die Einzelfelder mit dem Mittelwert der Schubspannung in den Einzelfeldern und dem für Einzelfeldbeulen nach 5.3 ermittelten Abminderungsfaktor χ_w nachzuweisen, wobei von starrer Randlagerung an den Längssteifen ausgegangen werden darf.

7.2 Interaktion zwischen Querbelastung an den Längsrändern, Biegemoment und Normalkraft

(1) Bei gemeinsamer Wirkung von Querlasten an den Längsrändern, Biegemoment und Normalkraft ist in der Regel die Beanspruchbarkeit zusätzlich zu den Nachweisen in 4.6 und 6.6 mit der folgenden Interaktionsbeziehung zu prüfen:

$$\eta_2 + 0,8 \eta_1 \leq 1,4 \quad (7.2)$$

(2) Wirkt eine Querlast auf den Zugflansch, so ist in der Regel die Beanspruchbarkeit nach Abschnitt 6 nachzuweisen; zusätzlich sind die Regelungen in EN 1993-1-1, 6.2.1(5) einzuhalten.

8 Flanschinduziertes Stegblechbeulen

(1) Um das Einknicken des Druckflansches in den Steg zu vermeiden, hat in der Regel das Verhältnis h_w/t_w für den Steg das folgende Kriterium zu erfüllen:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \quad (8.1)$$

Dabei ist

- A_w die Stegfläche;
- A_{fc} die effektive Querschnittsfläche des Druckflansches;
- h_w die lichte Steghöhe;
- t_w die Stegdicke.

Der Wert k ist in der Regel wie folgt anzusetzen:

- bei Ausnutzung plastischer Rotationen $k = 0,3$;
- bei Ausnutzung der plastischen Momentenbeanspruchbarkeit $k = 0,4$;
- bei Ausnutzung der elastischen Momentenbeanspruchbarkeit $k = 0,55$.

(2) Bei Trägern, die in ihrer Stegebene gekrümmt sind, und bei denen der Druckflansch auf der konkaven Seite liegt, ist in der Regel das folgende Kriterium zu prüfen:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq \frac{k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}}{\sqrt{1 + \frac{h_w E}{3 r f_{yf}}}} \quad (8.2)$$

Dabei ist r der Krümmungsradius des Druckflansches.

ANMERKUNG Der nationale Anhang gibt weitere Informationen zu flanschinduziertem Stegblechbeulen.

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

9 Steifen und Detailausbildung

9.1 Allgemeines

(1) Die in diesem Abschnitt enthaltenen Regelungen zu Steifen in Plattenbauteilen ergänzen die Plattenbeulregeln in den Abschnitten 4 bis 7.

ANMERKUNG Im nationalen Anhang können weitere Anforderungen an Steifen und deren Detailausbildung für spezifische Anwendungsbereiche festgelegt werden.

(2) Beim Nachweis der Knicksicherheit von Steifen darf der wirksame Querschnitt mit einer mitwirkenden Blechbreite von $15\epsilon t$ auf jeder Seite, jedoch maximal dem Steifenabstand angenommen werden, siehe Bild 9.1.

(3) Die Normalkraft in Quersteifen ist in der Regel als Summe der Kräfte aus der Schubübertragung (siehe 9.3.3(3)) und den äußeren Lasten anzusetzen.

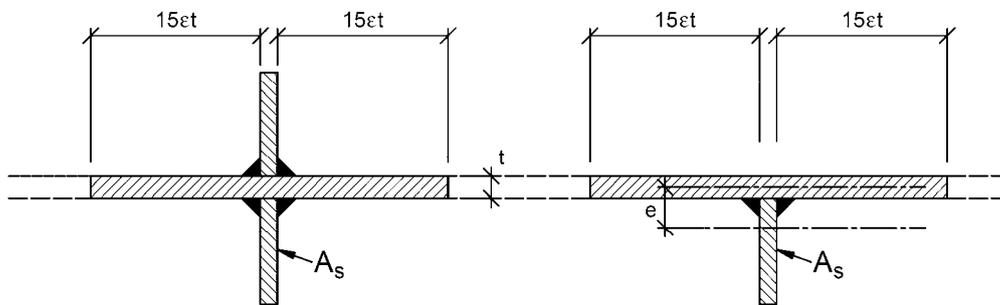


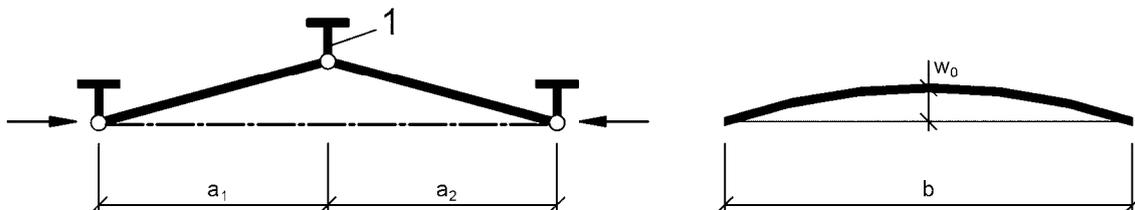
Bild 9.1 — Wirksamer Querschnitt von Steifen

9.2 Wirkung von Längsspannungen

9.2.1 Minimale Anforderungen an Quersteifen

(1) Um die Bedingung für starre Lagerung eines Blechfeldes mit oder ohne Längssteifen zu erfüllen, haben Quersteifen in der Regel den nachfolgenden Steifigkeits- und Festigkeitsanforderungen zu genügen.

(2) Die Quersteife wird in der Regel als gelenkig gelagerter Einfeldträger unter Querbelastung mit einer sinusförmigen geometrischen Imperfektion $w_0 = s/300$ behandelt, wobei s der kleinste Wert von a_1 , a_2 oder b ist, siehe Bild 9.2. Dabei sind a_1 und a_2 die Breiten der Beulfelder rechts und links der Quersteife und b ist die Spannweite der Quersteife bzw. der Abstand zwischen den Schwerpunkten der das Beulfeld begrenzenden Flansche. Exzentrizitäten sind in der Regel zu berücksichtigen.



Legende

1 Quersteife

Bild 9.2 — Quersteife

(3) Die Quersteife ist in der Regel für die Abtriebskräfte aus den Druckkräften in den Nachbarfeldern zu bemessen, wobei anzunehmen ist, dass die übrigen Quersteifen starr und ohne Imperfektionen sind; hierbei sind angreifende äußere Lasten sowie die Normalkraft entsprechend der ANMERKUNG zu 9.3.3(3) zu berücksichtigen. Die Bleche und die Längssteifen der Nachbarfelder werden als gelenkig an die Quersteifen angeschlossen betrachtet.

(4) Es ist in der Regel mit einer elastischen Berechnung nach Theorie II. Ordnung nachzuweisen, dass im Grenzzustand der Tragfähigkeit

— die maximale Spannung in den Steifen unter der Bemessungslast die Streckgrenze f_y/γ_{M1} nicht überschreitet;

— die zusätzliche Auslenkung zu der Imperfektion den Wert $b/300$ nicht überschreitet.

(5) Sind keine Normalkräfte in der Quersteife vorhanden, so dürfen beide Kriterien in (4) als erfüllt angesehen werden, wenn das Flächenträgheitsmoment I_{st} der Quersteife mindestens folgende Bedingungen erfüllt:

$$I_{st} = \frac{\sigma_m}{E} \left(\frac{b}{\pi} \right)^4 \left(1 + w_0 \frac{300}{b} u \right) \quad (9.1)$$

mit

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} \frac{N_{Ed}}{b} \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right)$$

$$u = \frac{\pi^2 E e_{max}}{f_y 300 b} \geq 1,0$$

γ_{M1}

Dabei ist

e_{max} der Abstand der Randfaser der Steife zum Schwerpunkt der Steife;

N_{Ed} der größte Bemessungswert der einwirkenden Druckkraft in den Nachbarfeldern, jedoch mindestens die größte Druckspannung multipliziert mit der halben wirksamen Druckfläche eines Feldes einschließlich der Steifen;

$\sigma_{cr,c}$, $\sigma_{cr,p}$ sind in 4.5.3 und Anhang A definiert.

ANMERKUNG EN 1993-2 und EN 1993-1-7 geben Hinweise zur Behandlung senkrecht zur Blechebene belasteter Quersteifen.

(6) Bei Quersteifen unter Druckbeanspruchung ist in der Regel die einwirkende Normalkraft um den Wert $\Delta N_{st} = \sigma_m b^2 / \pi^2$ zur Berücksichtigung von Abtriebskräften zu erhöhen. Die Kriterien in (4) behalten ihre Gültigkeit, jedoch braucht ΔN_{st} bei der Berechnung der konstanten Druckspannung infolge der einwirkenden Druckbeanspruchung in der Quersteife nicht berücksichtigt zu werden.

(7) Sind keine Normalkräfte in der Quersteife vorhanden, so dürfen vereinfachend die Anforderungen in (4) nach Theorie I. Ordnung mit der folgenden gleichmäßig über die Länge b verteilten zusätzlichen Querlast q nachgewiesen werden:

$$q = \frac{\pi}{4} \sigma_m (w_0 + w_{el}) \quad (9.2)$$

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

Dabei ist

σ_m in (5) definiert;

w_0 in Bild 9.2 angegeben;

w_{el} die unter Annahme elastischen Werkstoffverhaltens ermittelte Verformung; diese darf entweder iterativ ermittelt oder mit dem maximalen Wert $b/300$ angenommen werden.

(8) Um Drillknicken von Steifen mit offenen Querschnitten zu vermeiden, ist in der Regel das folgende Kriterium zu erfüllen (solange kein Nachweis mit genaueren Methoden erfolgt):

$$\frac{I_T}{I_p} \geq 5,3 \frac{f_y}{E} \quad (9.3)$$

Dabei ist

I_p das polare Trägheitsmoment des Steifenquerschnitts alleine, gerechnet um den Anschlusspunkt an das Blech;

I_T das St. Venant'sche Torsionsträgheitsmoment für den Steifenquerschnitt alleine (ohne Blech).

(9) Wird die Wölbsteifigkeit berücksichtigt, ist in der Regel entweder das Kriterium in (8) oder das folgende Kriterium zu erfüllen:

$$\sigma_{cr} \geq \theta f_y \quad (9.4)$$

Dabei ist

σ_{cr} die kritische Drillknickspannung ohne Berücksichtigung von Einspanneffekten durch das Blech;

θ ein Beiwert zur Sicherstellung elastischen Verhaltens entsprechend der Querschnittsklasse 3.

ANMERKUNG Der Beiwert θ ist im nationalen Anhang festgelegt. Es wird ein Wert von $\theta = 6$ empfohlen.

9.2.2 Minimale Anforderungen an Längssteifen

(1) Die Anforderungen zur Vermeidung von Drillknicken in 9.2.1(8) and (9) gelten ebenfalls für Längssteifen.

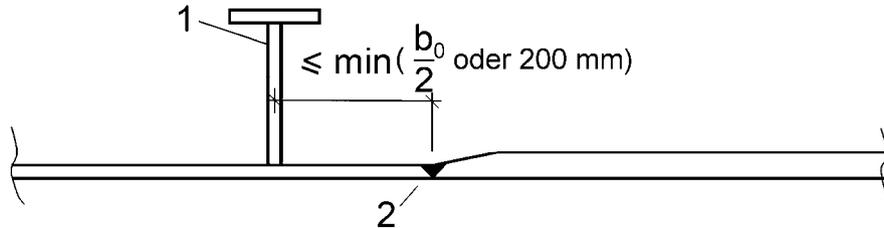
(2) Bei diskontinuierlich angeordnete Längssteifen, die nicht kraftschlüssig an den Quersteifen angeschlossen sind oder durch diese durchlaufen, sind in der Regel folgende Punkte zu beachten:

- Einsatz nur für Stege (d. h. nicht zulässig in Flanschen);
- bei Steifigkeitsannahmen für die statische Berechnung nicht zu berücksichtigen;
- bei Spannungsberechnungen zu vernachlässigen;
- zu berücksichtigen bei der Ermittlung der wirksamen Breiten von Einzelstegfeldern;
- zu berücksichtigen bei der Berechnung von Beul- bzw. Knickspannungen.

(3) Tragfähigkeitsnachweise für Steifen sind in der Regel nach 4.5.3 und 4.6 zu führen.

9.2.3 Geschweißte Blechstöße

(1) Schweißstöße von Blechen unterschiedlicher Blechdicken sind in der Regel in der Nähe von Quersteifen anzuordnen, siehe Bild 9.3. Exzentrizitäten brauchen nicht berücksichtigt zu werden, wenn der Abstand des Schweißstoßes zur Quersteife kleiner als der kleinere Wert von $b_0/2$ und 200 mm ist; b_0 ist der Abstand zwischen Längssteifen, die die dünnere Platte versteifen.



Legende

- 1 Quersteife
2 Schweißnaht

Bild 9.3 — Geschweißte Blechstöße

9.2.4 Steifenausschnitte

(1) Ausschnitte in Längssteifen sind in der Regel entsprechend Bild 9.4 auszubilden.

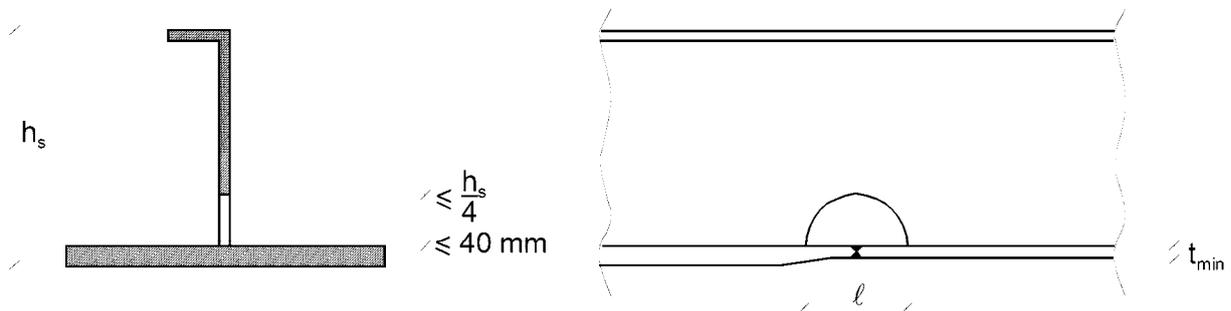


Bild 9.4 — Ausschnitte in Längssteifen

(2) Für die Ausschnittbreite ℓ sind in der Regel folgende Grenzwerte einzuhalten:

- $\ell \leq 6 t_{\min}$ bei druckbelasteten Flachsteifen;
- $\ell \leq 8 t_{\min}$ bei druckbelasteten Steifen mit anderen Querschnittsformen;
- $\ell \leq 15 t_{\min}$ bei Steifen mit anderen Querschnittsformen ohne Druckbelastung.

t_{\min} bezeichnet die kleinere Blechdicke.

(3) Die Grenzwerte für die Ausschnittbreite ℓ in (2) für druckbelastete Steifen darf um den Faktor $\sqrt{\frac{\sigma_{x,Rd}}{\sigma_{x,Ed}}}$ erhöht werden, wenn gilt: $\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd}$ und $\ell \leq 15 t_{\min}$.

Dabei ist $\sigma_{x,Ed}$ die Druckspannung am Ausschnitt.

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

(4) Ausschnitte in Quersteifen sind in der Regel nach Bild 9.5 auszubilden.

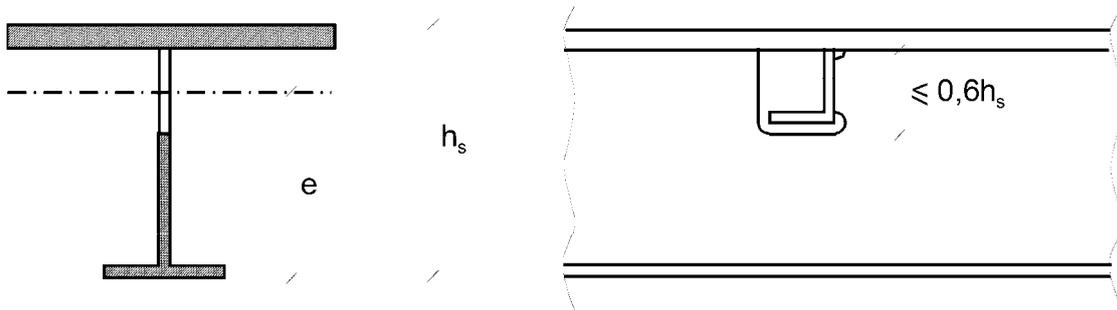


Bild 9.5 — Ausschnitte in Quersteifen

(5) Der Bruttoquerschnitt des Steges im Bereich des Ausschnittes ist in der Regel für folgende Querkraft V_{Ed} nachzuweisen:

$$V_{Ed} = \frac{I_{net}}{e} \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \frac{\pi}{b_G} \quad (9.5)$$

Dabei ist

- I_{net} das Flächenträgheitsmoment des Nettoquerschnitts des Quersteife;
- e der maximale Abstand der Flanschunterseite zur Schwerlinie des Nettoquerschnitts, siehe Bild 9.5;
- b_G die Länge der Quersteife zwischen den Flanschen.

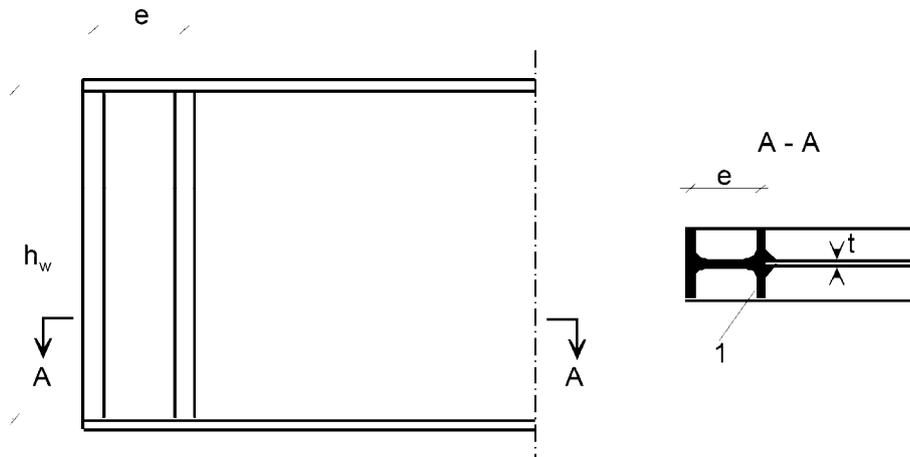
9.3 Wirkung von Schubspannungen

9.3.1 Starre Auflagersteifen

(1) Starre Auflagersteifen (siehe Bild 5.1) dienen in der Regel als Steifen für die Einleitung der Auflagerkräfte aus Lagern (siehe 9.4) und als kurze Biegeträger für die Verankerung der längsgerichteten Membranspannungen in der Stegebene.

ANMERKUNG EN 1993-2 gibt Hinweise zu Lagerbewegungen infolge von Exzentrizitäten.

(2) Eine starre Auflagersteife besteht in der Regel aus zwei doppelseitig angeordneten Quersteifen, die die Gurte eines kurzen Biegeträgers der Länge h_w bilden, siehe Bild 5.1 b). Der Stegstreifen zwischen den Quersteifen bildet den Steg des kurzen Biegeträgers. Alternativ darf die starre Auflagersteife auch aus einem eingesetzten Profilträger bestehen, der nach Bild 9.6 mit dem Stegblech verbunden wird.

**Legende**

1 eingesetzter Profilträger

Bild 9.6 — Eingesetzter Profilträger als Auflagersteife

(3) Die Mindestquerschnittsfläche jeder der beiden Quersteifen beträgt in der Regel $4 h_w t^2 / e$, wobei e der Abstand zwischen den Mittelebenen der Flachbleche ist und die Bedingung $e > 0,1 h_w$ erfüllen sollte, siehe Bild 5.1 b). Wird die Auflagersteife nicht aus zwei Quersteifen zusammengesetzt, sollte das elastische Widerstandsmoment für Biegung senkrecht zum Steg mindestens $4 h_w t^2$ betragen.

(4) Als Alternative darf das Trägerende auch mit einer einzigen doppelseitigen Quersteife ausgebildet sein, wenn sich eine weitere Quersteife so dicht am Lager befindet, dass das Einzelfeld den maximalen Schub aufnehmen kann, der bei der Bemessung von verformbaren Auflagersteifen entsteht.

9.3.2 Verformbare Auflagersteifen

(1) Eine verformbare Auflagersteife liegt bei einer einzelnen doppelseitigen Auflagersteife nach Bild 5.1 c) vor. Sie kann gegebenenfalls die Auflagerkräfte aus dem Lager aufnehmen (siehe 9.4).

9.3.3 Zwischenliegende Quersteifen

(1) Zwischenliegende Quersteifen, die als starre Randlagerung für die Stegbeulfelder dienen, sind in der Regel hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Steifigkeit nachzuweisen.

(2) Zwischenliegende Quersteifen, die als nicht starr zu betrachten sind, dürfen mit ihrer Steifigkeit bei der Berechnung von k_τ nach 5.3(5) berücksichtigt werden.

(3) Zwischenliegende starre Quersteifen haben in der Regel zusammen mit dem mittragenden Teil des Steges folgenden Mindestbedingungen für das Flächenträgheitsmoment I_{st} zu genügen:

$$\begin{aligned} \text{für } a / h_w < \sqrt{2} : I_{st} &\geq 1,5 h_w^3 t^3 / a^2 \\ \text{für } a / h_w \geq \sqrt{2} : I_{st} &\geq 0,75 h_w t^3 \end{aligned} \quad (9.6)$$

ANMERKUNG Die Tragfähigkeit starrer Quersteifen darf für eine Normalkraft $\left(V_{Ed} - \frac{1}{\lambda_w} f_{yw} h_w t / (\sqrt{3} \gamma_{M1}) \right)$ nach

9.2.1(3) geprüft werden. Im Falle veränderlicher Schubkraft wird der Nachweis für eine Schubkraft im Abstand von $0,5 h_w$ von dem Beulfeldrand mit der größten Schubkraft durchgeführt.

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

9.3.4 Längssteifen

(1) Die Querschnittstragfähigkeit von Längssteifen unter Längsspannungen ist in der Regel nachzuweisen, wenn diese als zur Querschnittstragfähigkeit beitragend angenommen werden.

9.3.5 Schweißnähte

(1) Die Schweißnähte dürfen für den Nennwert des Schubflusses V_{Ed} / h_w bemessen werden, solange V_{Ed} den Wert $\chi_w f_{yw} h_w t / (\sqrt{3} \gamma_{M1})$ nicht überschreitet. Bei größeren Werten sind in der Regel die Halsnähte zwischen den Gurten und dem Steg für den Schubfluss $\eta f_{yw} t / (\sqrt{3} \gamma_{M1})$ zu bemessen.

(2) Anderenfalls sind in der Regel genauere Berechnungen zur Bemessung der Schweißnähte unter Berücksichtigung der Berechnungsmethode (elastisch/plastisch) und Einflüssen aus Theorie II. Ordnung durchzuführen.

9.4 Wirkung von Querlasten

(1) Reicht die Beanspruchbarkeit des nicht ausgesteiften Stegbleches nicht aus, sind in der Regel Quersteifen vorzusehen.

(2) Knicken von Quersteifen aus der Stegebene unter Querbelastung und Querkräften (siehe 9.3.3(3)) ist in der Regel nach EN 1993-1-1, 6.3.3 oder 6.3.4 unter Verwendung von Knicklinie c und einer Knicklänge von $l \geq 0,75 h_w$ nachzuweisen, wenn beide Steifenenden seitlich gehalten sind. Größere Knicklängen l sind bei Endlagerungen mit Verformungsmöglichkeit notwendig. Zusätzlich ist auch die Beanspruchbarkeit des Querschnitts der Quersteifen nachzuweisen, wenn Ausschnitte in den Quersteifen vorhanden sind.

(3) Bei Anwendung einseitiger oder anderer unsymmetrisch angeordneter Steifen ist die Exzentrizität bei Nachweisen nach EN 1993-1-1, 6.3.3 oder 6.3.4 in der Regel zu berücksichtigen. Werden die Steifen zur seitlichen Stützung des Obergurtes eingesetzt, so sollten sie eine Steifigkeit und Tragfähigkeit haben, die mit den Annahmen für die Bemessung gegen Biegedrillknicken übereinstimmen.

10 Methode der reduzierten Spannungen

(1) Die Methode der reduzierten Spannungen darf zur Bestimmung der Grenzspannungen ausgesteifter und nicht ausgesteifter Blechfelder eines Querschnitts benutzt werden.

ANMERKUNG 1 Dieses Verfahren ist eine Alternative zum Verfahren mit wirksamen Breiten nach Abschnitten 4 bis 7 unter Berücksichtigung folgender Punkte:

- die Spannungskomponenten des gesamten Spannungsfeldes, das sich aus $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ und τ_{Ed} zusammensetzt, wirken gemeinsam;
- die Grenzspannungen des schwächsten Querschnittsteils können die Tragfähigkeit des gesamten Querschnitts bestimmen.

ANMERKUNG 2 Die Grenzspannungen dürfen ebenfalls zur Bestimmung äquivalenter wirksamer Flächen herangezogen werden. Anwendungsgrenzen der jeweiligen Methoden können im nationalen Anhang festgelegt werden.

(2) Bei ausgesteiften und nicht ausgesteiften Blechfeldern, die mit den gemeinsam wirkenden Spannungen $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ und τ_{Ed} beansprucht werden, darf Querschnittsklasse 3 angenommen werden, wenn gilt:

$$\frac{\rho \alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}} \geq 1 \quad (10.1)$$

Dabei ist

- $\alpha_{ult,k}$ der kleinste Faktor für die Vergrößerung der Bemessungslasten, um den charakteristischen Wert der Beanspruchbarkeit am kritischen Punkt des Blechfeldes zu erreichen, siehe (4);
- ρ der Reduktionsbeiwert in Abhängigkeit des Schlankheitsgrades des Blechfeldes $\bar{\lambda}_p$, siehe (5);
- γ_{M1} der Teilsicherheitsbeiwert.

(3) Der $\boxed{\text{AC}}$ modifizierte Schlankheitsgrad des Blechfeldes $\boxed{\text{AC}} \bar{\lambda}_p$ des Blechfeldes ist in der Regel wie folgt zu bestimmen:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} \quad (10.2)$$

Dabei ist

- α_{cr} der kleinste Faktor für die Vergrößerung der Bemessungslasten, um die elastische Verzweigungsbelastung für das gesamte einwirkende Spannungsfeld zu erreichen, siehe (6).

ANMERKUNG 1 Zur Bestimmung von α_{cr} für das gesamte einwirkende Spannungsfeld darf das ausgesteifte Blechfeld entsprechend den Regeln in Abschnitten 4 und 5 abgebildet werden, jedoch ohne die in 5.3(4) angegebene Abminderung des Flächenträgheitsmomentes der Längssteifen.

ANMERKUNG 2 Kann α_{cr} nicht für das gesamte Blechfeld einschließlich der Einzelfelder als Ganzes bestimmt werden, so dürfen getrennte Nachweise für die Einzelfelder und das gesamte Blechfeld geführt werden.

(4) Für die Bestimmung von $\alpha_{ult,k}$ darf das Fließkriterium benutzt werden:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 \quad (10.3)$$

$\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ und τ_{Ed} sind die Komponenten des Spannungsfeldes im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

ANMERKUNG Bei Verwendung der Fließbeziehung in Gleichung (10.3) wird angenommen, dass sich der Grenzzustand des Fließens ohne vorhergehendes Beulen einstellt.

(5) Der Abminderungsbeiwert ρ darf nach einer der beiden folgenden Methoden ermittelt werden:

a) der kleinste Werte der folgenden Abminderungsbeiwerte:

- ρ_x der Reduktionsbeiwert nach 4.5.4(1) für die Längsrichtung, falls erforderlich unter Berücksichtigung knickstabähnlichen Verhaltens;
- ρ_z der Reduktionsbeiwert nach 4.5.4(1), hier jedoch für die Querrichtung, falls erforderlich unter Berücksichtigung knickstabähnlichen Verhaltens;
- χ_w der Reduktionsbeiwert für Schubbeulen nach $\boxed{\text{AC}}$ 5.3(1) $\boxed{\text{AC}}$.

Alle Reduktionsbeiwerte werden mit dem $\boxed{\text{AC}}$ modifizierten Schlankheitsgrad des Blechfeldes $\boxed{\text{AC}} \bar{\lambda}_p$ des Blechfeldes nach Gleichung (10.2) ermittelt.

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

ANMERKUNG Dieses Vorgehen führt zu dem Nachweisformat:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M1}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M1}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M1}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y / \gamma_{M1}}\right)^2 \leq \rho^2 \quad (10.4)$$

ANMERKUNG Zur Bestimmung von ρ_z für Spannungen in Querrichtung ist in der Regel das Vorgehen nach Abschnitt 4 für Längsspannungen σ_x auf die Spannungen in Querrichtung σ_z anzuwenden. Aus Kompatibilitätsgründen ist Abschnitt 6 in der Regel nicht anzuwenden.

- b) ein aus den Abminderungsbeiwerten ρ_x , ρ_z und χ_w entsprechend a) interpolierter Abminderungsbeiwert, wobei die Gleichung für $\alpha_{ult,k}$ als Interpolationsfunktion herangezogen wird.

ANMERKUNG Diese Vorgehen führt zu dem Nachweisformat:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x f_y / \gamma_{M1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z f_y / \gamma_{M1}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x f_y / \gamma_{M1}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z f_y / \gamma_{M1}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w f_y / \gamma_{M1}}\right)^2 \leq 1 \quad (10.5)$$

ANMERKUNG 1 Da die Nachweise nach den Gleichungen (10.3), (10.4) und (10.5) bereits eine Interaktion zwischen Querkraft, Biegemoment, Normalkraft und Querbelastrung beinhalten, braucht Abschnitt 7 in der Regel nicht angewendet zu werden.

ANMERKUNG 2 Der nationale Anhang darf weitere Informationen zur Verwendung der Gleichungen (10.4) und (10.5) geben. Treten Zug- und Druckspannungen in einem Blechfeld auf, so wird empfohlen, die Gleichungen (10.4) und (10.5) lediglich auf die unter Druckbeanspruchung stehenden Querschnittsteile anzuwenden.

- (6) Liegen nicht die Werte α_{cr} für das gesamte Spannungsfeld, sondern nur die Werte $\alpha_{cr,i}$ jeweils für die Komponenten $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ und τ_{Ed} des Spannungsfeldes vor, so darf der Wert α_{cr} für die gemeinsame Wirkung von $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$, τ_{Ed} wie folgt bestimmt werden:

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1+\psi_x}{4 \alpha_{cr,x}} + \frac{1+\psi_z}{4 \alpha_{cr,z}} + \left[\left(\frac{1+\psi_x}{4 \alpha_{cr,x}} + \frac{1+\psi_z}{4 \alpha_{cr,z}} \right)^2 + \frac{1-\psi_x}{2 \alpha_{cr,x}^2} + \frac{1-\psi_z}{2 \alpha_{cr,z}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{1/2} \quad (10.6)$$

Dabei ist

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}}$$

$$\alpha_{cr,z} = \frac{\sigma_{cr,z}}{\sigma_{z,Ed}}$$

AC

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr}}{\tau_{Ed}} \quad \text{AC}$$

$\sigma_{cr,x}$, $\sigma_{cr,z}$, τ_{cr} , ψ_x und ψ_z werden nach Abschnitten 4 bis 6 bestimmt.

- (7) Die Bemessung von Steifen sowie die Detailausbildung haben in der Regel nach Abschnitt 9 zu erfolgen.

Anhang A (informativ)

Berechnung kritischer Spannungen für ausgesteifte Blechfelder

A.1 Äquivalente orthotrope Platten

- (1) Blechfelder mit mindestens drei Längssteifen, deren Steifigkeit verschmiert werden darf, dürfen als äquivalente orthotrope Platten nachgewiesen werden.
- (2) Die elastische kritische Beulspannung der äquivalenten orthotropen Platte ist:

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \sigma_E \quad (\text{A.1})$$

Dabei ist

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E t^2}{12(1-\nu^2)b^2} = 190\,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad \text{in MPa;}$$

- $k_{\sigma,p}$ der Beulwert für die orthotrope Platte mit verschmierten Steifen (ohne Betrachtung des Einzelfeldbeulens);
- b wie in Bild A.1 definiert;
- t die Blechdicke.

ANMERKUNG 1 Der Beulwert $k_{\sigma,p}$ darf entweder entsprechenden Beulwerttafeln für verschmierte Längssteifen entnommen oder mittels Computerberechnungen ermittelt werden. Alternativ dürfen auch Beulwerttafeln für diskrete Längssteifen verwendet werden, falls Einzelfeldbeulen ausgeschlossen werden kann bzw. in einer separaten Berechnung berücksichtigt wird.

ANMERKUNG 2 $\sigma_{cr,p}$ ist die kritische Beulspannung an dem Blechfeldrand mit der größten Druckspannung, siehe Bild A.1.

ANMERKUNG 3 Bei der Untersuchung von Stegen sollte die Breite b in den Gleichungen (A.1) und (A.2) durch h_w ersetzt werden.

ANMERKUNG 4 Für längs ausgesteifte Blechfelder mit mindestens drei äquidistant verteilten Längssteifen darf der Beulwert $k_{\sigma,p}$ zur Berücksichtigung des Gesamtfeldbeulens des ausgesteiften Blechfeldes näherungsweise wie folgt bestimmt werden:

$$k_{\sigma,p} = \frac{2\left((1+\alpha^2)^2 + \gamma - 1\right)}{\alpha^2(\psi+1)(1+\delta)} \quad \text{für } \alpha \leq \sqrt[4]{\gamma}$$

$$k_{\sigma,p} = \frac{4(1+\sqrt{\gamma})}{(\psi+1)(1+\delta)} \quad \text{für } \alpha > \sqrt[4]{\gamma} \quad (\text{A.2})$$

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

mit:

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \geq 0,5$$

$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_p}$$

$$\langle \text{AC} \rangle \delta = \frac{A_{sl}}{A_p} \langle \text{AC} \rangle$$

$$\alpha = \frac{a}{b} \geq 0,5$$

Dabei ist

I_{sl} das Flächenträgheitsmoment des gesamten längsversteiften Blechfeldes;

I_p das Flächenträgheitsmoment für Plattenbiegung $= \frac{bt^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{bt^3}{10,92}$;

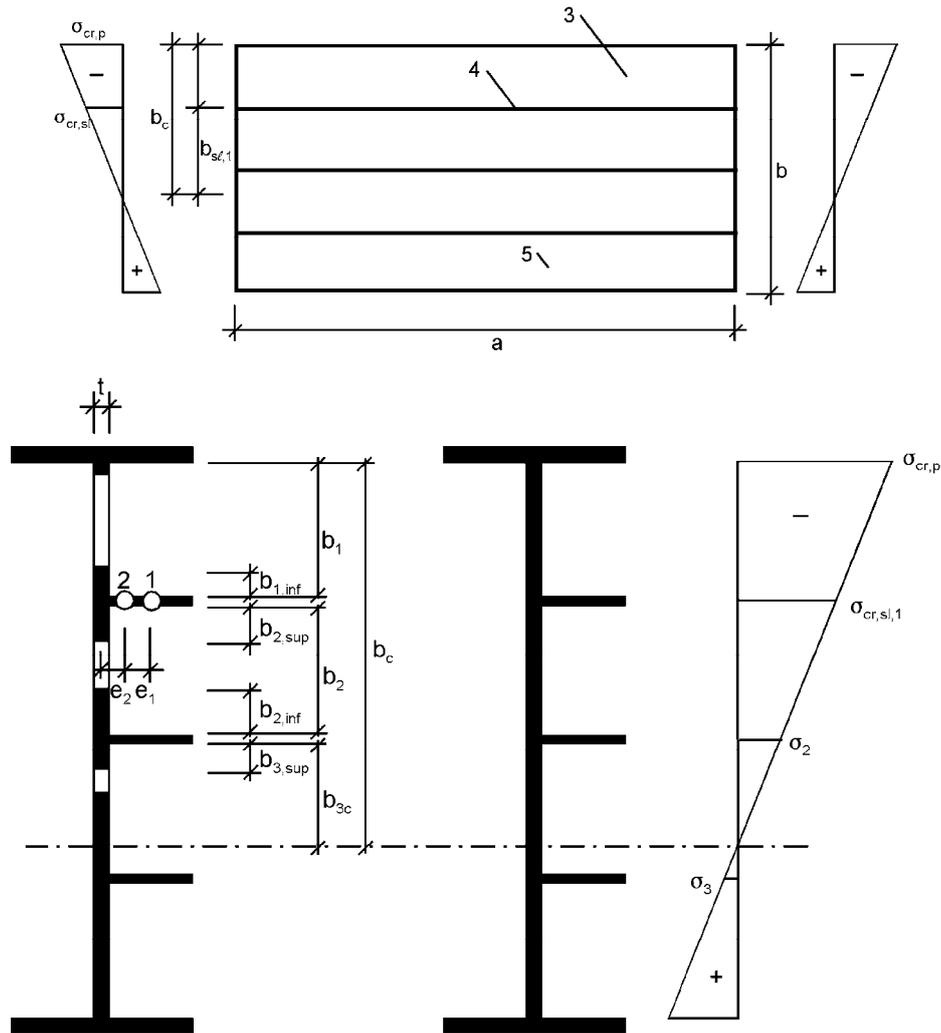
$\langle \text{AC} \rangle A_{sl} \langle \text{AC} \rangle$ die Summe der Bruttoquerschnittsflächen aller Längssteifen ohne Anteile des Blechfeldes;

A_p die Bruttoquerschnittsfläche des Bleches $= b t$;

σ_1 die größere Randspannung;

σ_2 die kleinere Randspannung.

a , b und t sind in Bild A.1 definiert.



$e = \max (e_1, e_2)$

Legende

- 1 Schwerelinie der $\boxed{\text{AC}}$ Längssteife $\boxed{\text{AC}}$
- 2 Schwerelinie des $\boxed{\text{AC}}$ Ersatzdruckstabes $\boxed{\text{AC}}$ = Längssteife + mitwirkende Blechteile
- 3 Einzelfeld
- 4 Längssteife
- 5 Blechdicke t

	Breite bei Bruttoquerschnittsfläche	Breite bei wirksamen Flächen nach Tabelle 4.1	Bedingung für ψ_i
$b_{1,\text{inf}}$	$\frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} b_1$	$\frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} b_{1,\text{eff}}$	$\psi_1 = \frac{\sigma_{\text{cr,sl},1}}{\sigma_{\text{cr,p}}} > 0$
$b_{2,\text{sup}}$	$\frac{2}{5 - \psi_2} b_2$	$\frac{2}{5 - \psi_2} b_{2,\text{eff}}$	$\psi_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{\text{cr,sl},1}} > 0$
$b_{2,\text{inf}}$	$\frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} b_2$	$\frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} b_{2,\text{eff}}$	$\psi_2 > 0$
$b_{3,\text{sup}}$	$0,4 b_{3c}$	$0,4 b_{3c,\text{eff}}$	$\psi_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_2} < 0$

Bild A.1 — Bezeichnungen für längsausgesteifte Beulfelder

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

A.2 Kritische Beulspannung bei Blechfeldern mit einer oder zwei Steifen in der Druckzone

A.2.1 Allgemeine Vorgehensweise

(1) Bei Blechfeldern mit nur einer Längssteife in der Druckzone darf die Vorgehensweise in A.1 dadurch vereinfacht werden, dass die elastische kritische Beulspannung mit Hilfe der elastischen kritischen Knickspannung der Längssteife als Ersatzdruckstab auf elastischer Bettung ermittelt wird. Die elastische Bettung steht dabei für die Plattenwirkung quer zur Längssteife. Die kritische Knickspannung darf nach A.2.2 ermittelt werden.

(2) Der Bruttoquerschnitt des Ersatzdruckstabes (zur Berechnung von $A_{s\ell,1}$ und $I_{s\ell,1}$) setzt sich in der Regel aus dem Bruttoquerschnitt der Steife und der anschließenden mitwirkenden Blechteile zusammen. Liegt das anschließende Einzelfeld voll im Druckbereich, ist ein Anteil $(3-\psi)/(5-\psi)$ der wirksamen Breite b_1 an der Kante des Feldes und ein Anteil $2/(5-\psi)$ an der Kante mit den höchsten Spannungen als mitwirkend anzusehen. Wechseln im anschließenden Einzelfeld die Spannungen von Druck auf Zug, sollte das 0,4fache der wirksamen Breite b_c der Druckzone verwendet werden, siehe Bild A.2 und Tabelle 4.1. ψ ist dabei das Spannungsverhältnis des betrachteten Einzelfeldes.

(3) Die wirksame Querschnittsfläche $A_{s\ell,eff}$ des Ersatzdruckstabes sollte in der Regel aus den wirksamen Querschnittsteilen der Steife und den anschließenden wirksamen Blechteilen zusammengesetzt werden, siehe Bild A.1. Der Schlankheitsgrad der Blechfelder in dem Ersatzdruckstab darf nach 4.4(4) ermittelt werden, wobei $\sigma_{com,Ed}$ für die Bruttofläche des Blechfeldes berechnet wird.

(4) Falls der Wert $\rho_c f_y / \gamma_{M1}$ (mit ρ_c nach 4.5.4(1)) größer als die mittlere Spannung $\sigma_{com,Ed}$ in dem Ersatzdruckstab ist, braucht keine weitere Abminderung der wirksamen Fläche des Ersatzdruckstabes vorgenommen zu werden; andernfalls ist die Abminderung nach (4.6) durch

$$A_{c,eff,loc} = \frac{\rho_c f_y A_{sl,1}}{\sigma_{com,Ed} \gamma_{M1}} \quad (A.3)$$

zu ersetzen.

(5) Die Abminderung in A.2.1(4) gilt in der Regel nur für die Fläche des Ersatzknickstabes. Außer für das Einzelfeldbeulen brauchen andere unter Druckbeanspruchung stehende Teile des Blechfeldes nicht abgemindert zu werden.

(6) Alternativ zur Verwendung der wirksamen Fläche nach A.2.1(4) darf die Beanspruchbarkeit des Ersatzdruckstabes auch nach A.2.1(5) bis (7) ermittelt und mit der mittleren Spannung $\sigma_{com,Ed}$ verglichen werden.

ANMERKUNG Diese Näherung in (6) darf auch im Falle mehrfacher Steifen verwendet werden, wobei als weitere Vereinfachung die Federung durch das Blech vernachlässigt werden darf. Dadurch wird der Ersatzdruckstab als freier Knickstab für Knicken quer zur Blechebene nachgewiesen.

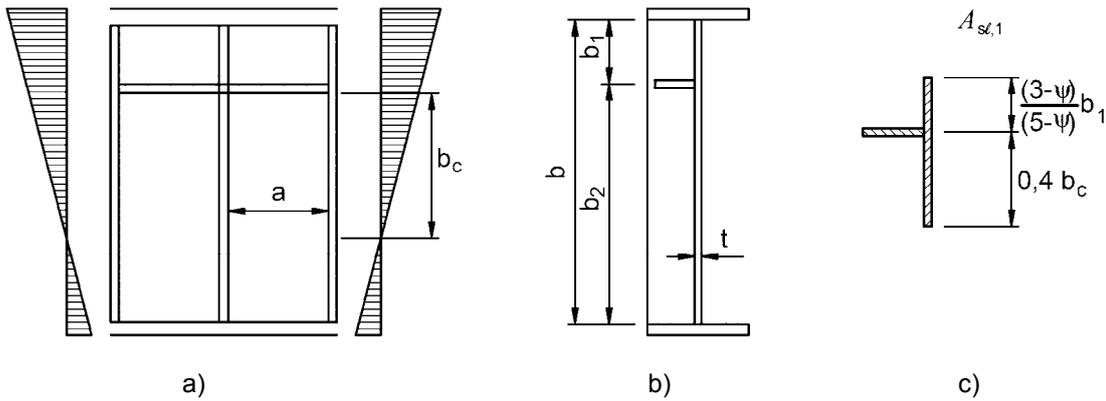


Bild A.2 — Bezeichnungen für ein Blechfeld mit nur einer Steife in der Druckzone

(7) Befinden sich zwei Steifen in der Druckzone eines ausgesteiften Beulfeldes, darf das Verfahren für eine Einzelsteife nach A.2.1(1) ebenso angewendet werden, siehe Bild A.3. Zunächst wird angenommen, dass jede der beiden Steifen für sich ausknicken kann, wobei die andere als starr gilt. Dann wird das gemeinsame Ausknicken beider Steifen durch Betrachtung einer einzigen Ersatzsteife berücksichtigt, in der beide Steifen zusammengeführt sind. Für diese Ersatzsteife gilt:

- a) ihre Querschnittsfläche und ihr Flächenträgheitsmoment $I_{s\ell}$ sind die Summe der entsprechenden Größen für die Einzelsteifen, die in den vorhergehenden Schritten betrachtet wurden;
- b) ihre Lage entspricht der Lage der Resultierenden der Druckkräfte in den Einzelsteifen, die in den vorhergehenden Schritten berechnet wurden.

Für die drei in Bild A.3 dargestellten Fälle wird jeweils ein kritischer Wert $\sigma_{cr,p}$ berechnet, siehe A.2.2(1), wobei jeweils gilt: $b_1 = b_1^*$ und $b_2 = b_2^*$ sowie $B^* = b_1^* + b_2^*$, siehe Bild A.3.

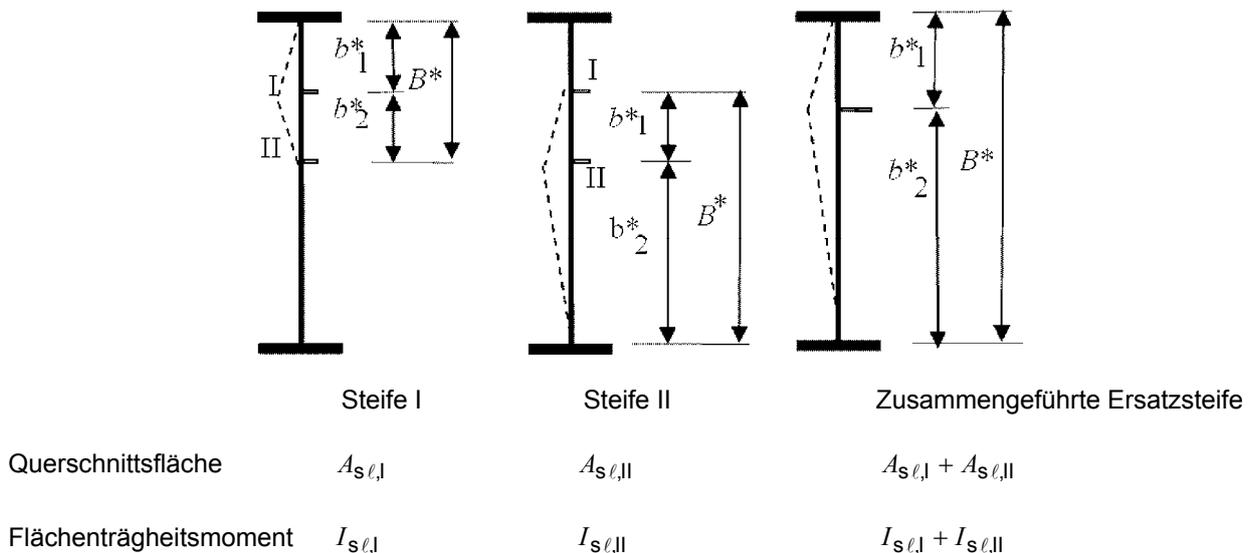


Bild A.3 — Bezeichnungen für ein Blechfeld mit zwei Steifen in der Druckzone

A.2.2 Vereinfachtes Modell für einen Ersatzstab mit elastischer Bettung durch ein Blech

(1) Bei nur einer Längssteife in der Druckzone und Vernachlässigung eventuell vorhandener weiterer Längssteifen in der Zugzone lautet die elastische kritische Knickspannung der Steifen:

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

AC

$$\sigma_{cr,s\ell} = \frac{1,05 E}{A_{s\ell,1}} \frac{\sqrt{I_{s\ell,1} t^3 b}}{b_1 b_2} \quad \text{für } a \geq a_c$$

$$\sigma_{cr,s\ell} = \frac{\pi^2 E I_{s\ell,1}}{A_{s\ell,1} a^2} + \frac{E t^3 b a^2}{4 \pi^2 (1-\nu^2) A_{s\ell,1} b_1^2 b_2^2} \quad \text{für } a < a_c$$

AC (A.4)

mit

$$a_c = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{s\ell,1} b_1^2 b_2^2}{t^3 b}}$$

Dabei ist

$A_{s\ell,1}$ die Bruttoquerschnittsfläche des Ersatzdruckstabes nach A.2.1(2);

$I_{s\ell,1}$ das Flächenträgheitsmoment des Bruttoquerschnitts des Ersatzdruckstabes nach A.2.1(2) für Knicken quer zur Blechebene;

b_1, b_2 die Abstände der Steifen zu den Längsrändern ($b_1 + b_2 = b$).

AC gestrichener Text **AC**

(2) Bei zwei Längssteifen in der Druckzone und Vernachlässigung eventuell vorhandener weiterer Längssteifen in der Zugzone ist in der Regel die maßgebende elastisch kritische Beulspannung der niedrigste Wert, der für die drei Fälle nach Gleichung (A.4) mit $b_1 = b_1^*$, $b_2 = b_2^*$ und $b = B^*$ berechnet wurde.

A.3 Schubbeulwerte für ausgesteifte Blechfelder

(1) Bei Blechfeldern mit mehr als zwei oder ohne Längssteifen, die durch starre Quersteifen begrenzt sind, darf der Schubbeulwert k_τ wie folgt bestimmt werden:

$$k_\tau = 5,34 + 4,00 (h_w / a)^2 + k_{\tau s\ell} \quad \text{für } a / h_w \geq 1$$

$$k_\tau = 4,00 + 5,34 (h_w / a)^2 + k_{\tau s\ell} \quad \text{für } a / h_w < 1$$

(A.5)

Dabei ist

$$k_{\tau s\ell} = 9 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_{s\ell}}{t^3 h_w} \right)^3} \geq \frac{2,1}{t} \sqrt[3]{\frac{I_{s\ell}}{h_w}}$$

a der Abstand starrer Quersteifen, siehe Bild 5.3;

$I_{s\ell}$ das Flächenträgheitsmoment einer Längssteife um die z-z-Achse, siehe Bild 5.3 b). Bei Stegblechen mit **AC** gestrichener Text **AC** Steifen ist $I_{s\ell}$ die Summe der Steifigkeiten aller Einzelsteifen, wobei diese nicht gleichmäßig angeordnet sein müssen.

ANMERKUNG Gleichung (A.5) gilt nicht für Blechfelder mit verformbaren Zwischenquersteifen.

(2) Gleichung (A.5) darf auch für Blechfelder mit einer oder zwei Längssteifen angewendet werden, wenn für $\alpha = \frac{a}{h_w}$ gilt: $\alpha \geq 3$. Für Blechfelder mit einer oder zwei Längssteifen und $\alpha < 3$ darf der Schubbeulwert wie folgt bestimmt werden:

$$k_{\tau} = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \frac{I_{s\ell}}{t^3 h_w}}{\alpha^2} + 2,2 \sqrt[3]{\frac{I_{s\ell}}{t^3 h_w}} \quad (\text{A.6})$$

Anhang B (informativ)

Bauteile mit veränderlichem Querschnitt

B.1 Allgemeines

- (1) Der Beulnachweis von aus Blechfeldern zusammengesetzten Bauteilen, bei denen die Regelmäßigkeitsbedingungen nach 4.1(1) nicht zutreffen, kann nach dem Verfahren in Abschnitt 10 durchgeführt werden.
- (2) Zur Bestimmung von $\alpha_{ult,N}$ und α_{cr} dürfen FE-Verfahren verwendet werden, siehe Anhang C.
- (3) Die Abminderungsfaktoren ρ_x , ρ_z und χ_w können für den Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ den entsprechenden Plattenbeulkurven entnommen werden, siehe Abschnitte 4 und 5.

ANMERKUNG Die Abminderungsfaktoren ρ dürfen auch wie folgt ermittelt werden:

$$\rho = \frac{1}{\varphi_p + \sqrt{\varphi_p^2 - \bar{\lambda}_p}} \quad (\text{B.1})$$

mit

$$\varphi_p = \frac{1}{2} \left(1 + \alpha_p \left(\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p0} \right) + \bar{\lambda}_p \right)$$

und

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}}$$

Dieses Vorgehen gilt für ρ_x , ρ_z und χ_w . Werte für $\bar{\lambda}_{p0}$ und α_p sind in Tabelle B.1 angegeben. Die Werte in Tabelle B.1 sind an den Beulkurven in Abschnitten 4 und 5 kalibriert und liefern eine direkte Verbindung zu der geometrischen Ersatzimperfektion durch:

$$e_0 = \alpha_p \left(\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p0} \right) \frac{t}{6} \frac{1 - \frac{\rho \bar{\lambda}_p}{\gamma_{M1}}}{1 - \rho \bar{\lambda}_p} \quad (\text{B.2})$$

Tabelle B.1 — Zahlenwerte für $\bar{\lambda}_{p0}$ und α_p

Produkt	Vorherrschende Beulform	α_p	$\bar{\lambda}_{p0}$
warmgewalzt	Längsspannungen mit $\psi \geq 0$	0,13	0,70
	Längsspannungen mit $\psi < 0$		0,80
	Schubspannungen Querlasten		
geschweißt oder kaltgeformt	Längsspannungen mit $\psi \geq 0$	0,34	0,70
	Längsspannungen mit $\psi < 0$		0,80
	Schubspannungen Querlasten		

B.2 Interaktion von Plattenbeulen und Biegedrillknicken von Bauteilen

(1) Das in B.1 angegebene Verfahren darf auf den Nachweis von gemeinsam auftretendem Plattenbeulen und Biegedrillknicken von Bauteilen angewendet werden, wenn die Werte α_{ult} und α_{cr} wie folgt ermittelt werden:

α_{ult} ist der kleinste Faktor für die Vergrößerung der Bemessungswerte der Lasten, um die charakteristische Beanspruchbarkeit des kritischen Bauteilquerschnitts zu erreichen, wobei Plattenbeulen und Biegedrillknicken vernachlässigt und bei der Berechnung nicht betrachtet werden;

α_{cr} ist der kleinste Faktor für die Vergrößerung der Bemessungswerte der Lasten, um die elastische Verzweigungsbelastung für das Bauteil unter Einschluss von Plattenbeulen und Biegedrillknicken zu erreichen.

(2) Wenn α_{cr} Biegedrillknickverformungen enthält, ist in der Regel der Abminderungsfaktor ρ der kleinste Wert von ρ nach B.1(3) und χ_{LT} nach EN 1993-1-1, 6.3.3 anzusetzen.

Anhang C (informativ)

Berechnungen mit der Finite-Element-Methode (FEM)

C.1 Allgemeines

(1) Anhang C enthält Hinweise zur Anwendung von FE-Methoden bei Nachweisen im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit sowie bei Ermüdungsnachweisen von plattenartigen Bauteilen.

ANMERKUNG 1 EN 1993-1-6 gibt Hinweise zur Anwendung von FE-Methoden bei Schalentragwerken.

ANMERKUNG 2 Diese Anhang darf nur von Ingenieuren mit entsprechender Erfahrung bei der Anwendung von FE-Methoden angewendet werden.

(2) Die Wahl der jeweiligen FE-Methode hängt von der zu untersuchenden Fragestellung ab. Folgende Annahmen sind zu treffen:

Tabelle C.1 — Annahmen für Berechnungen mit FEM

Nr	Werkstoffverhalten	Strukturverhalten	Imperfektionen, siehe C.5	Anwendungsbeispiel
1	linear	linear	Nein	elastische mittragende Breite, elastische Tragfähigkeit
2	nichtlinear	linear	Nein	plastische Tragfähigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit
3	linear	nichtlinear	Nein	kritische Plattenbeullast
4	linear	nichtlinear	Ja	elastische Tragfähigkeit unter Berücksichtigung von Plattenbeulen
5	nichtlinear	nichtlinear	Ja	elastisch-plastische Tragfähigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit

C.2 Anwendung

(1) Bei Anwendung von FE-Berechnungen ist in der Regel besonders auf folgende Punkte zu achten:

- geeignete Modellierung des Bauteils und seiner Randbedingungen;
- geeignetes Programm und ausreichende Programmdokumentation;
- Ansatz von Imperfektionen;
- Ansatz der Werkstoffeigenschaften;
- Modellierung der Lasten;
- Modellierung der Kriterien für den Grenzzustand;
- anzuwendende Teilsicherheitsbeiwerte.

ANMERKUNG Der nationale Anhang darf Bedingungen für die Anwendung von FE-Berechnungen für Entwurf und Bemessung festlegen.

C.3 Modellierung

(1) Die Wahl der Finiten Elemente (z. B. Schalenelemente oder Volumenelemente) und die Netzgestaltung bestimmt die Genauigkeit der Ergebnisse durchzuführen. Im Zweifelsfall sind die Brauchbarkeit des Netzes und die Größe der Finiten Elemente durch Empfindlichkeitsprüfungen (gegebenenfalls mit anschließender Verfeinerung) nachzuweisen.

(2) Die FE-Modellierung darf durchgeführt werden für

- ein Bauteil als Ganzes;
- eine Substruktur als Teil des Bauteils.

ANMERKUNG Ein Beispiel für ein Bauteil könnte der Steg oder das druckbeanspruchte Bodenblech eines Kastenträgers im Stützenbereich eines Durchlaufträgers sein. Ein Beispiel für eine Substruktur könnte ein Einzelfeld des Bodenblechs sein, das unter zweiachialer Belastung steht.

(3) Die geometrischen und mechanischen Bedingungen für Lagerung, Koppelbedingungen und Einzelheiten der Lasteinleitung sind in der Regel so zu wählen, dass realistische oder auf der sicheren Seite liegende Resultate erzielt werden.

(4) Die Abmessungen sind in der Regel mit den Nennwerten zu modellieren.

(5) Sind Imperfektionen vorzusehen, so gelten für diese in der Regel die Form und die Amplituden gemäß C.5.

(6) Die Werkstoffeigenschaften sind in der Regel unter Beachtung von C.6(2) zu wählen.

C.4 Wahl des Programms und Dokumentation

(1) Das Programm muss für die Aufgabe geeignet und erwiesenermaßen zuverlässig sein.

ANMERKUNG Die Zuverlässigkeit kann durch geeignete Prüfberechnungen (benchmark tests) nachgewiesen werden.

(2) Netzgestaltung, Belastung, Randbedingungen und andere Eingaben sind in der Regel ebenso wie die Resultate nachprüfbar zu dokumentieren, so dass sie von unabhängigen Drittstellen reproduziert werden können.

C.5 Ansatz von Imperfektionen

(1) Bei FE-Berechnungen verwendete Imperfektionen sollten in der Regel sowohl geometrische als auch strukturelle Imperfektionen (Eigenspannungen) enthalten.

(2) Sind keine genaueren getrennten Ansätze von geometrischen und strukturellen Imperfektionen möglich, dürfen geometrische Ersatzimperfektionen verwendet werden.

ANMERKUNG 1 Geometrische Imperfektionen dürfen mit der Form der modalen Beulfigur angesetzt werden. Der nationale Anhang darf die zugehörigen Amplituden festlegen. Ein Wert entsprechend 80 % der geometrischen Fertigungstoleranzen wird empfohlen.

ANMERKUNG 2 Strukturelle Imperfektionen in Form von Eigenspannungen dürfen mit einer Eigenspannungsverteilung angesetzt werden, deren Verlauf und Amplitude im Mittel aus dem Fertigungsablauf erwartet werden können.

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

(3) Die Richtung der Imperfektionen ist in der Regel so anzusetzen, dass die niedrigste Beanspruchbarkeit erzielt wird.

(4) Für geometrische Ersatzimperfektionen dürfen die Ansätze in Tabelle C.2 und Bild C.1 angewendet werden.

Tabelle C.2 — Geometrische Ersatzimperfektionen

Imperfektionsansatz	Bauteil	Form	Amplitude
global	Bauteil der Länge ℓ	Bogen	siehe EN 1993-1-1, Tabelle 5.1
global	Längssteife der Länge a	Bogen	min ($a/400$, $b/400$)
lokal	Teilfeld oder Einzelfeld mit kurzer Länge a oder b	Beulform	min ($a/200$, $b/200$)
lokal	Verdrehung von Steifen und Flanschen	Bogen	1/50

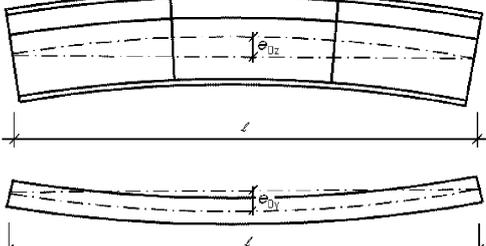
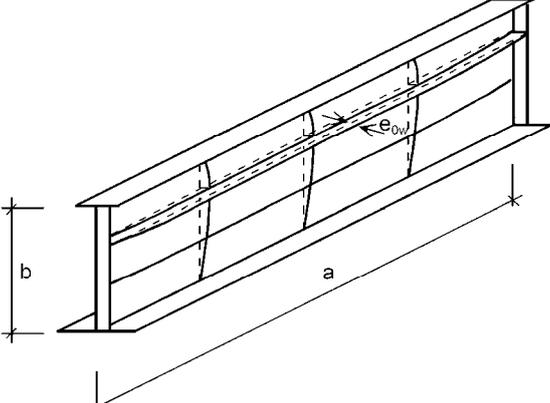
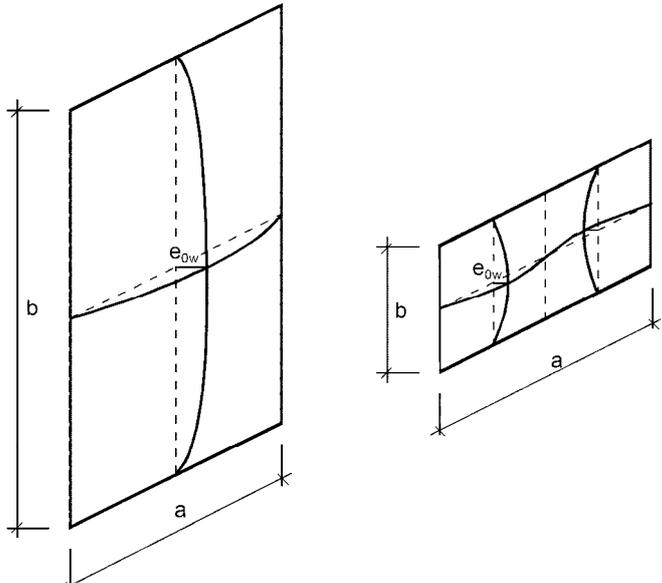
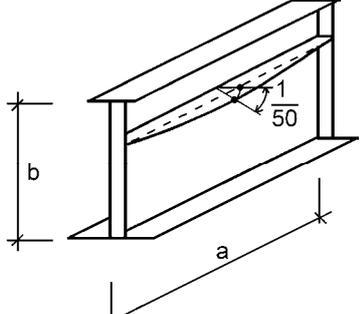
Imperfektionsansatz	Bauteil
global, Bauteil der Länge ℓ	
global, Längssteife der Länge a	
lokal, Teilfeld oder Einzelfeld	
lokal, Verdrehung von Steifen oder Flanschen	

Bild C.1 — Modellierung geometrischer Ersatzimperfectionen

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

(5) Bei Betrachtung des Zusammenwirkens verschiedener Imperfektionen ist in der Regel eine Leitimperfektion zu wählen; die Begleitimperfektionen dürfen auf 70 % abgemindert werden.

ANMERKUNG 1 Jede der Imperfektionen in Tabelle C.2 ist in der Regel als Leitimperfektion und die verbleibenden sind als Begleitimperfektionen anzusetzen.

ANMERKUNG 2 Geometrische Ersatzimperfektionen dürfen auch durch entsprechende Störlasten abgebildet werden.

C.6 Werkstoffeigenschaften

(1) Werkstoffeigenschaften sind in der Regel mit charakteristischen Werten anzusetzen.

(2) Abhängig von der gewünschten Genauigkeit und der Größe der erwarteten Dehnungen dürfen folgende Näherungen für das Werkstoffverhalten verwendet werden, siehe Bild C.2:

- a) elastisch-plastisch ohne Wiederverfestigung;
- b) elastisch-plastisch mit Pseudowiederverfestigung;
- c) elastisch-plastisch mit linearer Wiederverfestigung;
- d) wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve, die aus der technischen Spannungs-Dehnungs-Kurve wie folgt ermittelt wird:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{true}} &= \sigma (1 + \varepsilon) \\ \varepsilon_{\text{true}} &= \ln (1 + \varepsilon)\end{aligned}\tag{C.1}$$

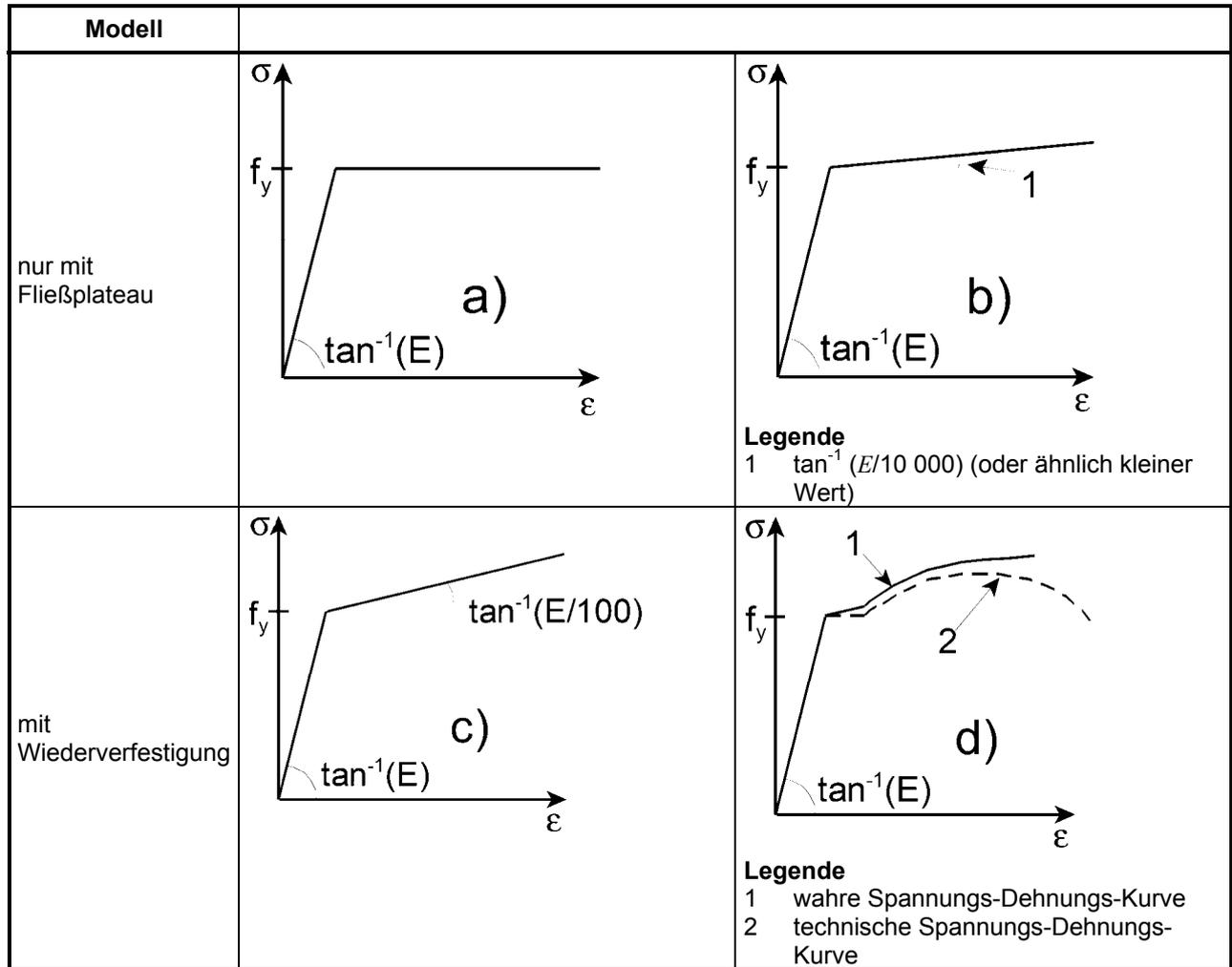


Bild C.2 — Modellierung des Werkstoffverhaltens

ANMERKUNG Für den Elastizitätsmodul im elastischen Bereich ist der Nennwert maßgebend.

C.7 Belastungen

(1) Die anzusetzenden Lasten sollten in der Regel die maßgebenden Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsfaktoren enthalten. Für schrittweise Berechnungen darf ein einziger Lasterhöhungsfaktor α verwendet werden.

C.8 Kriterien für den Grenzzustand

(1) Folgende Kriterien für Grenzzustände sind in der Regel zu verwenden:

1. Für Bauteile mit Plattenbeulen:

Erreichen des Maximums der Last-Verformungskurve.

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

2. Für Bereiche unter Zugbeanspruchungen:

Erreichen eines Maximalwertes der Hauptmembrandehnung.

ANMERKUNG 1 Der Maximalwert der Hauptmembrandehnung darf im nationalen Anhang festgelegt werden; es wird ein Wert von 5 % empfohlen.

ANMERKUNG 2 Andere Kriterien dürfen verwendet werden (z. B. Erreichen eines Fließkriteriums oder Begrenzung der Fließzone).

C.9 Teilsicherheitsbeiwerte

(1) Der ermittelte Lasterhöhungsfaktor α_u , mit dem der Grenzzustand erreicht wird, soll ausreichend zuverlässig sein.

(2) Der erforderliche Lasterhöhungsfaktor α_u besteht in der Regel aus zwei Anteilen:

1. α_1 zur Abdeckung der Modellunsicherheit bei der Modellierung mit Finiten Elementen; α_1 ist in der Regel aus der Auswertung geeigneter Versuche zu ermitteln, siehe EN 1990, Anhang D;
2. α_2 zur Abdeckung von Ungenauigkeiten des Belastungs- und des Widerstandsmodells. α_2 darf mit γ_{M1} angesetzt werden, wenn der Verlust der Stabilität maßgebend ist, und mit γ_{M2} , wenn Werkstoffversagen zu erwarten ist.

(3) Der Nachweis ist in der Regel mit

$$\alpha_u > \alpha_1 \alpha_2 \quad (\text{C.2})$$

zu führen.

ANMERKUNG Der nationale Anhang darf Hinweise zur Festlegung von γ_{M1} und γ_{M2} geben. Es wird empfohlen, die Zahlenwerte für γ_{M1} und γ_{M2} in den entsprechenden Teilen der EN 1993 anzuwenden.

Anhang D (informativ)

Bauteile mit profilierten Stegblechen

D.1 Allgemeines

(1) Die Bemessungsregeln in Anhang D gelten für Bauteile mit trapezförmig oder sinusförmig profilierten Stegblechen und Blechgurten nach Bild D.1.

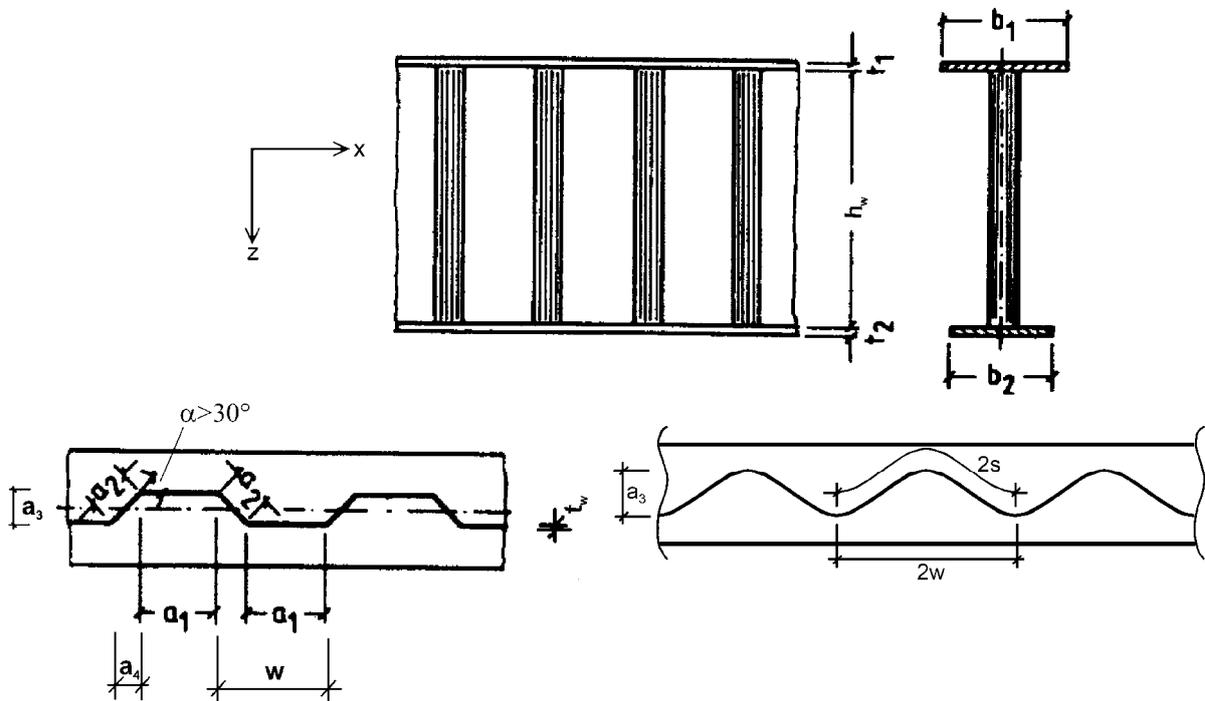


Bild D.1 — Bezeichnungen

D.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit

D.2.1 Momententragfähigkeit

(1) Die Beanspruchbarkeit für Biegemomente $\overline{AC} M_{y,Rd} \overline{AC}$ ist in der Regel wie folgt zu ermitteln:

\overline{AC}

$$M_{y,Rd} = \min \left\{ \underbrace{\frac{b_2 t_2 f_{yf,r}}{\gamma_{M0}} \left(h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right)}_{\text{Zuggurt}}; \underbrace{\frac{b_1 t_1 f_{yf,r}}{\gamma_{M0}} \left(h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right)}_{\text{Druckgurt}}; \underbrace{\frac{b_1 t_1 \chi f_{yf}}{\gamma_{M1}} \left(h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right)}_{\text{Druckgurt}} \right\} \quad \overline{AC} (D.1)$$

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

Dabei ist

$f_{yf,r}$ die aufgrund der Querbiegemomente in den Gurten wie folgt abgeminderte Fließgrenze:

$$f_{yf,r} = f_{yf} f_T$$

$$f_T = 1 - 0,4 \sqrt{\frac{\sigma_x(M_z)}{f_{yf}}} \frac{1}{\gamma_{M0}}$$

$\sigma_x(M_z)$ die durch Querbiegemomente hervorgerufene Spannung im Gurt;

χ der Abminderungsbeiwert für Biegeknicken senkrecht zur Systemebene nach EN 1993-1-1, 6.3.

ANMERKUNG 1 Das Querbiegemoment M_z kann aus der Einleitung des Schubflusses vom Steg in die Gurte nach Bild D.2 herrühren.

ANMERKUNG 2 Bei sinusförmig profilierte Stegblechen ist $f_T = 1,0$.

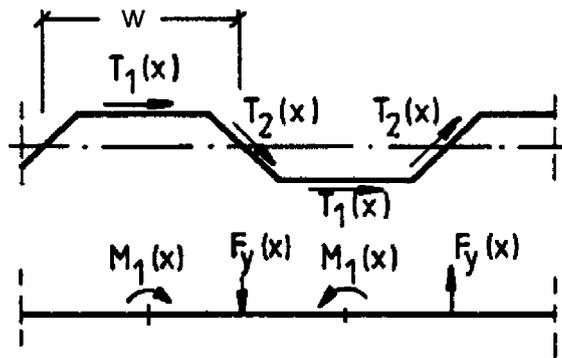


Bild D.2 — Querlasten infolge Einleitung des Schubflusses in die Gurte

(2) Die wirksame Fläche des Druckflansches ist in der Regel nach 4.4(1) zu bestimmen; hierzu ist der größere Wert des Schlankheitsgrades $\bar{\lambda}_p$, siehe 4.4(2), zu verwenden. Der Beulwert k_σ ergibt sich wie folgt, wobei der größere Wert **AC** aus a) und b) **AC** zu verwenden ist:

a)

$$k_\sigma = 0,43 + \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (\text{D.2})$$

Dabei ist

b die Breite des einseitig gestützten Gurtblechs von der Schweißnahtwurzel bis zum freien Ende;

$$a = a_1 + 2 a_4$$

b)

$$k_\sigma = 0,60 \quad (\text{D.3})$$

AC gestrichener Text **AC**

D.2.2 Schubtragfähigkeit

(1) Die Schubtragfähigkeit $V_{bw,Rd}$ ist in der Regel wie folgt zu bestimmen:

AC

$$V_{bw,Rd} = \chi_c \frac{f_{yw}}{\gamma_{M1} \sqrt{3}} h_w t_w \quad \text{AC (D.4)}$$

Dabei ist

χ_c der kleinere Wert der Abminderungsbeiwerte aus lokalem Plattenbeulen $\chi_{c,\ell}$ (siehe (2)) und Knicken $\chi_{c,g}$ (siehe (3)) ist.

(2) Der Abminderungsbeiwert $\chi_{c,\ell}$ für lokales Plattenbeulen ist in der Regel wie folgt zu ermitteln:

$$\chi_{c,\ell} = \frac{1,15}{0,9 + \bar{\lambda}_{c,\ell}} \leq 1,0 \quad \text{(D.5)}$$

mit

AC

$$\bar{\lambda}_{c,\ell} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,\ell} \sqrt{3}}} \quad \text{AC (D.6)}$$

$$\tau_{cr,\ell} = 4,83 E \left[\frac{t_w}{a_{\max}} \right]^2 \quad \text{(D.7)}$$

a_{\max} ist der größere Wert von a_1 und a_2 .

ANMERKUNG Der nationale Anhang darf Hinweise zur Bestimmung von $\tau_{cr,\ell}$ und $\chi_{c,\ell}$ für sinusförmig profilierte Stegbleche geben. Die Verwendung der folgenden Gleichung wird empfohlen:

$$\tau_{cr,\ell} = \left(5,34 + \frac{a_3 s}{h_w t_w} \right) \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{s} \right)^2$$

Dabei ist

w die Länge der Projektion einer halben Welle, siehe Bild D.1;

s die abgewinkelte Länge einer halben Welle, siehe Bild D.1.

(3) Der Abminderungsbeiwert $\chi_{c,g}$ für Knicken ist in der Regel wie folgt zu berechnen:

$$\chi_{c,g} = \frac{1,5}{0,5 + \bar{\lambda}_{c,g}} \leq 1,0 \quad \text{(D.8)}$$

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

Dabei ist

AC

$$\bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,g} \sqrt{3}}} \quad \text{AC (D.9)}$$

$$\tau_{cr,g} = \frac{32,4}{t_w h_w^2} \sqrt[4]{D_x D_z^3} \quad \text{(D.10)}$$

$$D_x = \frac{E t^3}{12(1-\nu^2)} \frac{w}{s}$$

$$D_z = \frac{E I_z}{w}$$

I_z das Flächenträgheitsmoment eines Profilierungsabschnittes der Länge w , siehe Bild D.1.

ANMERKUNG 1 Die Werte s und I_z werden für die wirkliche Form der Profilierung ermittelt.

ANMERKUNG 2 Gleichung (D.10) gilt für Bleche unter der Annahme gelenkiger Randlagerung.

D.2.3 Anforderungen an Endsteifen

(1) Endsteifen sind in der Regel nach Abschnitt 9 zu bemessen.

Anhang E (normativ)

Alternative Methoden zur Bestimmung wirksamer Querschnitte

E.1 Wirksame Querschnittsflächen für Spannungen unterhalb der Streckgrenze

(1) Als Alternative zum Vorgehen nach 4.4(2) dürfen folgende Gleichungen zur Ermittlung wirksamer Flächen für Spannungen unterhalb der Streckgrenze angewendet werden:

a) für zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile:

$$\rho = \frac{1 - 0,055(3 + \psi) / \bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_{p,red}} + 0,18 \frac{(\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red})}{(\bar{\lambda}_p - 0,6)} \leq 1,0 \quad (E.1)$$

b) für einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile:

$$\rho = \frac{1 - 0,188 / \bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_{p,red}} + 0,18 \frac{(\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red})}{(\bar{\lambda}_p - 0,6)} \leq 1,0 \quad (E.2)$$

Die Bezeichnungen sind in 4.4(2) und 4.4(4) angegeben. Der Einfluss knickstabähnlichen Verhaltens ist bei der Berechnung der Tragfähigkeit nach 4.4(5) zu berücksichtigen.

E.2 Wirksame Querschnittsflächen für die Steifigkeit

(1) Zur Bestimmung wirksamer Querschnittsflächen für die Steifigkeit darf der Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{p,ser}$ für die Gebrauchstauglichkeit wie folgt ermittelt werden:

$$\bar{\lambda}_{p,ser} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed,ser}}{f_y}} \quad (E.3)$$

Dabei ist

$\sigma_{com,Ed,ser}$ die größte Druckspannung (berechnet für den wirksamen Querschnitt) im betrachteten Querschnittsteil unter Lasten im Gebrauchtauglichkeitszustand.

(2) Das Flächenträgheitsmoment darf durch eine Interpolation der Bruttoquerschnittsfläche und der wirksamen Querschnittsfläche unter der entsprechenden Lastkombination wie folgt angenommen werden:

$$I_{eff} = I_{gr} - \frac{\sigma_{gr}}{\sigma_{com,Ed,ser}} (I_{gr} - I_{eff}(\sigma_{com,Ed,ser})) \quad (E.4)$$

Dabei ist

I_{gr} das Flächenträgheitsmoment des Bruttoquerschnitts;

σ_{gr} die größte am Bruttoquerschnitt ermittelte Biegespannung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit;

$I_{eff}(\sigma_{com,Ed,ser})$ das für den wirksamen Querschnitt ermittelte Flächenträgheitsmoment; der wirksame Querschnitt wird nach (E.1) für die größte Spannung innerhalb der betrachteten Bauteillänge $\sigma_{com,Ed,ser} \geq \sigma_{gr}$ ermittelt.

DIN EN 1993-1-5:2010-12
EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 (D)

(3) Das wirksame Flächenträgheitsmoment I_{eff} darf veränderlich entsprechend dem Spannungszustand entlang des Bauteils angenommen werden. Alternativ darf I_{eff} als konstant entlang des Bauteils, berechnet für das größte einwirkende positive Biegemoment unter Gebrauchtauglichkeitslasten, angesetzt werden.

(4) Die Berechnung erfordert ein iteratives Vorgehen. Auf der sicheren Seite darf die Berechnung jedoch in einem Schritt für eine Spannung größer oder gleich $\sigma_{\text{com,Ed,ser}}$ durchgeführt werden.

DIN EN 1993-1-5/NA

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatzvermerk
siehe unten

**Nationaler Anhang –
National festgelegte Parameter –
Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile**

National Annex –
Nationally determined parameters –
Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-5: Plated structural elements

Annexe Nationale –
Paramètres déterminés au plan national –
Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 1-5: Plaques planes

Ersatzvermerk

Mit DIN EN 1993-1-1:2010-12, DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-3:2010-12, DIN EN 1993-1-3/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-5:2010-12, DIN EN 1993-1-8:2010-12, DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-9:2010-12, DIN EN 1993-1-9/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-10:2010-12, DIN EN 1993-1-10/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-11:2010-12 und DIN EN 1993-1-11/NA:2010-12 Ersatz für DIN 18800-1:2008-11;
mit DIN EN 1993-1-1:2010-12, DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-3:2010-12, DIN EN 1993-1-3/NA:2010-12 und DIN EN 1993-1-5:2010-12 Ersatz für DIN 18800-2:2008-11;
mit DIN EN 1993-1-3:2010-12, DIN EN 1993-1-3/NA:2010-12 und DIN EN 1993-1-5:2010-12 Ersatz für DIN 18800-3:2008-11

Gesamtumfang 8 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung“ erstellt.

Dieses Dokument bildet den Nationalen Anhang zu DIN EN 1993-1-5:2010-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile*.

Die Europäische Norm EN 1993-1-5 räumt die Möglichkeit ein, eine Reihe von sicherheitsrelevanten Parametern national festzulegen. Diese national festzulegenden Parameter (en: *Nationally determined parameters*, NDP) umfassen alternative Nachweisverfahren und Angaben einzelner Werte, sowie die Wahl von Klassen aus gegebenen Klassifizierungssystemen. Die entsprechenden Textstellen sind in der Europäischen Norm durch Hinweise auf die Möglichkeit nationaler Festlegungen gekennzeichnet. Eine Liste dieser Textstellen befindet sich im Unterabschnitt NA 2.1. Darüber hinaus enthält dieser nationale Anhang ergänzende nicht widersprechende Angaben zur Anwendung von DIN EN 1993-1-5:2010-12 (en: *non-contradictory complementary information*, NCI).

Dieser Nationale Anhang ist Bestandteil von DIN EN 1993-1-5:2010-12.

DIN EN 1993-1-5:2010-12 und dieser Nationale Anhang DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12 ersetzen:

- zusammen mit DIN EN 1993-1-1, DIN EN 1993-1-1/NA, DIN EN 1993-1-3, DIN EN 1993-1-3/NA, DIN EN 1993-1-8, DIN EN 1993-1-8/NA, DIN EN 1993-1-9, DIN EN 1993-1-9/NA, DIN EN 1993-1-10, DIN EN 1993-1-10/NA, DIN EN 1993-1-11 und DIN EN 1993-1-11/NA die nationale Norm DIN 18800-1:2008-11;
- zusammen mit DIN EN 1993-1-1, DIN EN 1993-1-1/NA, DIN EN 1993-1-3 und DIN EN 1993-1-3/NA die nationale Norm DIN 18800-2:2008-11;
- zusammen mit DIN EN 1993-1-3 und DIN EN 1993-1-3/NA die nationale Norm DIN 18800-3:2008-11.

Änderungen

Gegenüber DIN 18800-1:2008-11, DIN 18800-2:2008-11 und DIN 18800-3:2008-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) nationale Festlegungen zu DIN EN 1993-1-5:2010-12 aufgenommen.

Frühere Ausgaben

DIN 1050: 1934-08, 1937xxxx-07, 1946-10, 1957x-12, 1968-06
DIN 1073: 1928-04, 1931-09, 1941-01, 1974-07
DIN 1073 Beiblatt: 1974-07
DIN 1079: 1938-01, 1938-11, 1970-09
DIN 4100: 1931-05, 1933-07, 1934xxxx-08, 1956-12, 1968-12
DIN 4101: 1937xxx-07, 1974-07
DIN 4114-1: 1952xx-07
DIN 4114-2: 1952-07, 1953x-02
DIN 18800-1: 1981-03, 1990-11, 2008-11
DIN 18800-1/A1: 1996-02
DIN 18800-2: 1990-11, 2008-11
DIN 18800-2/A1: 1996-02
DIN 18800-3: 1990-11, 2008-11
DIN 18800-3/A1: 1996-02

NA 1 Anwendungsbereich

Dieser Nationale Anhang enthält nationale Festlegungen für den Entwurf und die Berechnung von aus ebenen Blechen zusammengesetzten und in ihrer Ebene belasteten Bauteilen mit oder ohne Steifen, die bei der Anwendung von DIN EN 1993-1-5:2010-12 in Deutschland zu berücksichtigen sind.

Dieser Nationale Anhang gilt nur in Verbindung mit DIN EN 1993-1-5:2010-12.

NA 2 Nationale Festlegungen zur Anwendung von DIN EN 1993-1-5:2010-12

NA 2.1 Allgemeines

DIN EN 1993-1-5:2010-12 weist an den folgenden Textstellen die Möglichkeit nationaler Festlegungen aus (NDP, en: *Nationally determined parameters*):

- | | |
|----------------------|----------------------|
| — 2.2(5) Anmerkung 1 | — 10(1) Anmerkung 2 |
| — 3.3(1) Anmerkung 1 | — 10(5) Anmerkung 5 |
| — 4.3(6) Anmerkung | — C.2(1) Anmerkung |
| — 5.1(2) Anmerkung 2 | — C.5(2) |
| — 6.4(2) Anmerkung | — C.8(1) Anmerkung 1 |
| — 8(2) Anmerkung | — C.9(3) Anmerkung |
| — 9.1(1) Anmerkung | — D.2.2(2) Anmerkung |
| — 9.2.1(9) Anmerkung | |

Darüber hinaus enthält NA 2.2 ergänzende nicht widersprechende Angaben zur Anwendung von DIN EN 1993-5-1:2010-12. Diese sind durch ein vorangestelltes „NCI“ (en: *non-contradictory complementary information*) gekennzeichnet.

- | | |
|------------|---------------------|
| — 4.4(6) | — 5.3(4) |
| — 4.5.1(3) | — 7 |
| — 5.3(2) | — C.9(2) |
| — 5.3(3) | — Literaturhinweise |

DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12

NA 2.2 Nationale Festlegungen

Die nachfolgende Nummerierung entspricht der Nummerierung von DIN EN 1993-1-5:2010-12. bzw. ergänzt diese.

ANMERKUNG Bemessungshilfen für die Anwendung von DIN EN 1993-1-5 sind [1] bis [4] zu entnehmen.

NDP zu 2.2(5) Anmerkung 1

Es gilt die Empfehlung.

NDP zu 3.3(1) Anmerkung 1

Es gilt die Empfehlung.

NDP zu 4.3(6) Anmerkung

Es gilt die Empfehlung.

NCI zu 4.4(6)

Die Randbedingungen zur Bestimmung der elastischen kritischen Beul- und Knickspannung bei plattenartigem bzw. knickstabähnlichem Verhalten müssen identisch sein.

NCI zu 4.5.1(3)

Längssteifen mit Steifenquerschnitten, deren Steifigkeit $\gamma < 25$ ist (γ nach DIN EN 1993-1-5:2010-12, Anhang A), sind zu vernachlässigen.

NDP zu 5.1(2) Anmerkung 2

Für den Hochbau gilt die Empfehlung.

Für den Brückenbau und ähnliche Anwendungsbereiche ist $\eta = 1,0$ anzusetzen.

NCI zu 5.3(2)

Für schubbeanspruchte Beulfelder mit geschlossenen Längssteifen, die an die Auflager- bzw. Vertikalsteife angeschlossen sind, darf stets eine starre Auflagersteife angenommen werden.

NCI zu 5.3(3)

Bei der Ermittlung der kritischen Beulspannung τ_{cr} von Beulfeldern ohne Längssteifen muss als Randbedingung „gelenkige Lagerung“ angenommen werden.

NCI zu 5.3(4)

Durch die hohe Torsionssteifigkeit geschlossener Längssteifen ist eine Abminderung des Flächenträgheitsmoments der Steifen auf 1/3 seines wirklichen Wertes nicht erforderlich.

NDP zu 6.4(2) Anmerkung

Für Stege mit Längssteifen darf folgendes Vorgehen angewendet werden:

(1) Die Ersatzverzweigungslast F_{cr} ermittelt sich wie folgt:

$$F_{cr} = \frac{F_{cr,1} \cdot F_{cr,2}}{F_{cr,1} + F_{cr,2}} \quad (\text{NA.1})$$

mit

$$F_{cr,1} = k_{F,1} \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{t_w^3}{h_w} \quad (\text{NA.2})$$

$$F_{cr,2} = k_{F,2} \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{t_w^3}{b_1} \quad (\text{NA.3})$$

und

$$k_{F,1} = k_F \text{ nach DIN EN 1993-1-5:2010-12, Gleichung (6.6)} \quad (\text{NA.4})$$

$$k_{F,2} = \left[0,8 \cdot \left(\frac{s_s + 2 \cdot t_f}{a} \right) + 0,6 \right] \cdot \left(\frac{a}{b_1} \right)^{0,6 \cdot \left(\frac{s_s + 2 \cdot t_f}{a} \right) + 0,5} \quad (\text{NA.5})$$

(2) Der Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_F$ bestimmt sich mit $m_2 = 0$ nach DIN EN 1993-1-5:2010-12, Gleichung (6.4).

(3) Der Abminderungsfaktors χ_F für Stege mit Längssteifen und Lasteinleitungstyp (a) ermittelt sich zu:

$$\chi_F = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}_F}} \leq 1,0 \quad \text{mit} \quad \varphi = 0,5 \left(1 + 0,21(\bar{\lambda}_F - 0,80) + \bar{\lambda}_F \right) \quad (\text{NA.6})$$

NCI zu 7

Bei gemeinsamer Wirkung von Querbelastung an den Längsrändern und Querkraft ist die Beanspruchbarkeit mit der folgenden Interaktionsbeziehung zu prüfen:

$$\left[\eta_3 \cdot \left(1 - \frac{F_{Ed}}{2 \cdot V_{Ed}} \right) \right]^{1,6} + \eta_2 \leq 1,0 \quad (\text{NA.7})$$

NDP zu 8(2) Anmerkung

Keine weiteren Informationen.

NDP zu 9.1(1) Anmerkung

Keine weiteren Anforderungen.

NDP zu 9.2.1(9) Anmerkung

Es gilt die Empfehlung.

DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12**NDP zu 10(1) Anmerkung 2**

Die Methode der reduzierten Spannungen muss für Gebrauchstauglichkeitsnachweise verwendet werden, wenn diese gefordert sind. Sie darf auch für Tragfähigkeitsnachweise angewendet werden.

Es gilt die Annahme gelenkig gelagerter Ränder.

NDP zu 10(5) Anmerkung 5

Weitere Informationen zur Anwendung von DIN EN 1993-1-5:2010-12, Abschnitt 10 sind in Abschnitt 4 aus [2] enthalten.

Es gilt die Empfehlung, dass beim Auftreten von Zug- und Druckspannungen in einem Blechfeld, Gleichungen (10.4) und (10.5) lediglich auf die unter Druckbeanspruchung stehenden Querschnittsteile anzuwenden sind.

Für die Querbelaugung ist folgende Beulkurve mit $\alpha_p = 0,34$ und $\bar{\lambda}_0 = 0,80$ anzuwenden:

$$\rho_z = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}_p}} \leq 1,0 \quad \text{mit} \quad \varphi = 0,5 \left(1 + \alpha_p (\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_p \right) \quad (\text{NA.8})$$

NDP zu C.2(1) Anmerkung

Es ist durch Vergleichsrechnungen nachzuweisen, dass das gewählte Finite-Element-Modell geeignet ist und mit den gewählten Ansätzen, z. B. für Randbedingungen, Imperfektionen und Beanspruchungen, eine ausreichende Genauigkeit erreicht wird.

NDP zu C.5(2)

Es gilt der umformulierte Text zu C.5(2):

(2) Anstelle der genaueren getrennten Ansätze von geometrischen und strukturellen Imperfektionen dürfen geometrische Ersatzimperfektionen verwendet werden.

Sind zur Festlegung von geometrischen oder strukturellen Imperfektionen Versuche oder gutachterliche Stellungnahmen erforderlich, sind die Festlegungen über einen bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweis zu treffen.

Zu Anmerkung 1:

Es gilt die Empfehlung, falls kein anderer Wert begründet wird.

NDP zu C.8(1) Anmerkung 1

Es gilt die Empfehlung, falls kein anderer Wert begründet wird.

NCI zu C.9(2)

Zum Text C.9(2):

α_1 ist mit 1,05 anzusetzen bei gleichzeitiger Verwendung von α_2 mit $\gamma_{M1} = 1,1$ oder $\gamma_{M2} = 1,25$, sofern keine genaueren Untersuchungen im Rahmen eines bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweises erfolgen.

NDP zu C.9(3) Anmerkung

Es gilt die Festlegung zu C.9(2).

NDP zu D.2.2(2) Anmerkung

Für trapezförmig profilierte Stegbleche sind D_x und D_z wie folgt zu berechnen:

$$D_x = \frac{a_1 + a_3}{a_1 + a_2} \cdot \frac{E \cdot t_w^3}{12} \quad (\text{NA.9})$$

$$D_z = \frac{3 \cdot a_1 \cdot a_3^2 + \sqrt{2} \cdot a_3^3}{a_1 + a_3} \cdot \frac{E \cdot t_w}{12} \quad (\text{NA.10})$$

Für sinusförmig profilierte Stegbleche sind D_x und D_z wie folgt zu berechnen:

$$D_x = \frac{E \cdot t_w^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{w}{s} \quad (\text{NA.11})$$

$$D_z = \frac{E \cdot I_z}{w} \quad (\text{NA.12})$$

Der Nachweis des lokalen Beulens für Träger mit sinusförmig profilierten Stegblechen darf vernachlässigt werden, wenn folgende Bedingungen eingehalten sind:

$$\frac{w}{a_3} \leq 2; \quad \frac{w}{t_w} \leq 52; \quad \frac{a_3}{t_w} \leq 27 \quad (\text{NA.13})$$

Für sinusförmig profilierte Stegbleche mit abweichenden Abmessungen ist Gl. (D.7) als äquivalentes Trapezblechprofil anzuwenden.

DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12

NCI **Literaturhinweise**

- [1] Johansson, B.; Maquoi, R.; Sedlacek, G.; Müller, C.; Beg, D.: Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 „Plated Structural Elements“, 1st Edition, ECCS-JRC Report No. EUR 22898 EN, October 2007
- [2] Sedlacek, G.; Feldmann, M.; Kuhlmann, U.; Mensinger, M.; Naumes, J.; Müller, Ch.; Braun, B.; Ndogmo, J.: Entwicklung und Aufbereitung wirtschaftlicher Bemessungsregeln für Stahl- und Verbundträger mit schlanken Stegblechen im Hoch- und Brückenbau. DAST-Forschungsbericht, AiF-Projekt-Nr. 14771, 2008
- [3] Braun, B.; Kuhlmann, U.: Bemessung und Konstruktion von aus Blechen zusammengesetzten Bauteilen nach DIN EN 1993-1-5. In: Stahlbau-Kalender 2009 (Hrsg. Ulrike Kuhlmann), Ernst & Sohn Verlag, 2009
- [4] Sedlacek, G.; Eisel, H.; Hensen, W.; Kühn, B.; Paschen, M.: Leitfaden zum DIN-Fachbericht 103 – Stahlbrücken. Ausgabe März 2003, Ernst & Sohn Verlag, 2004

DIN EN 1993-1-6

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatzvermerk
siehe unten**Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen;
Deutsche Fassung EN 1993-1-6:2007 + AC:2009**

Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-6: Strength and stability of shell structures;
German version EN 1993-1-6:2007 + AC:2009

Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 1-6: Résistance et stabilité des structures en coque;
Version allemande EN 1993-1-6:2007 + AC:2009

Ersatzvermerk

Ersatz für DIN EN 1993-1-6:2007-07;
mit DIN EN 1993-1-6/NA:2010-12 Ersatz für DIN 18800-4:2008-11;
Ersatz für DIN EN 1993-1-6 Berichtigung 1:2009-11

Gesamtumfang 107 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

DIN EN 1993-1-6:2010-12

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 1993-1-6:2007 + AC:2009) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Die Arbeiten auf nationaler Ebene wurden durch die Experten des NABau-Spiegelausschusses NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung“ begleitet.

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 12. Juni 2006 angenommen.

Die Norm ist Bestandteil einer Reihe von Einwirkungs- und Bemessungsnormen, deren Anwendung nur im Paket sinnvoll ist. Dieser Tatsache wird durch das Leitpapier L der Kommission der Europäischen Gemeinschaft für die Anwendung der Eurocodes Rechnung getragen, indem Übergangsfristen für die verbindliche Umsetzung der Eurocodes in den Mitgliedsstaaten vorgesehen sind. Die Übergangsfristen sind im Vorwort dieser Norm angegeben.

Die Anwendung dieser Norm gilt in Deutschland in Verbindung mit dem Nationalen Anhang.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN [und/oder die DKE] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Der Beginn und das Ende des hinzugefügten oder geänderten Textes wird im Text durch die Textmarkierungen AC AC angezeigt.

Änderungen

Gegenüber DIN V ENV 1993-1-6:2002-05 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) die Stellungnahmen der nationalen Normungsinstitute wurden eingearbeitet;
- b) der Vornormcharakter wurde aufgehoben;
- c) der Text wurde vollständig überarbeitet.

Gegenüber DIN EN 1993-1-6:2007-07, DIN EN 1993-1-6 Berichtigung 1:2009-11 und DIN 18800-4:2008-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) auf europäisches Bemessungskonzept umgestellt;
- b) Ersatzvermerke korrigiert;
- c) Vorgänger-Norm mit der Berichtigung 1 konsolidiert;
- d) redaktionelle Änderungen durchgeführt.

Frühere Ausgaben

DIN 18800-4: 1990-11, 2008-11

DIN V ENV 1993-1-6: 2002-05

DIN EN 1993-1-6: 2007-07

DIN EN 1993-1-6 Berichtigung 1: 2009-11

EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE

EN 1993-1-6

Februar 2007

+AC

April 2009

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatz für ENV 1993-1-6:1999

Deutsche Fassung

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen

Eurocode 3: Design of steel structures —
Part 1-6: Strength and stability of shell structures

Eurocode 3: Calcul des structures en acier —
Partie 1-6: Résistance et stabilité des structures en coque

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 12. Juni 2006 angenommen.

Die Berichtigung tritt am 29. April 2009 in Kraft und wurde in EN 1993-1-6:2007 eingearbeitet.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

Inhalt

	Seite
Vorwort	6
1 Allgemeines	7
1.1 Anwendungsbereich	7
1.2 Normative Verweisungen	8
1.3 Begriffe	9
1.3.1 Tragwerksformen, Geometrie	9
1.3.2 Grenzzustände	10
1.3.3 Einwirkungen	11
1.3.4 Schnittgrößen und Spannungen in Schalen	12
1.3.5 Berechnungskonzepte	12
1.3.6 Bei der spannungsbasierten Bemessung verwendete Spannungskategorien	14
1.3.7 Spezielle Definitionen für Beulberechnungen	14
1.4 Formelzeichen	15
1.5 Vorzeichenvereinbarungen	19
2 Grundlagen der Bemessung und Modellierung	19
2.1 Allgemeines	19
2.2 Berechnungskonzepte	20
2.2.1 Allgemeines	20
2.2.2 Globale Berechnung	20
2.2.3 Membrantheoretische Berechnung	20
2.2.4 Lineare elastische Berechnung (LA)	20
2.2.5 Lineare elastische Verzweigungsberechnung (LBA)	21
2.2.6 Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung (GNA)	21
2.2.7 Materiell nichtlineare Berechnung (MNA)	21
2.2.8 Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA)	21
2.2.9 Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen (GNIA)	21
2.2.10 Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA)	22
2.3 Schalenrandbedingungen	22
3 Werkstoffe und Geometrie	22
3.1 Werkstoffeigenschaften	22
3.2 Bemessungswerte der Abmessungen	23
3.3 Geometrische Toleranzen und geometrische Imperfektionen	23
4 Grenzzustände der Tragfähigkeit in stählernen Schalen	24
4.1 Zu beachtende Grenzzustände	24
4.1.1 LS1: Plastische Grenze oder Zugbruch	24
4.1.2 LS2: Zyklisches Plastizieren	24
4.1.3 LS3: Beulen	25
4.1.4 LS4: Ermüdung	26
4.2 Konzepte für den Tragsicherheitsnachweis von Schalen	26
4.2.1 Allgemeines	26
4.2.2 Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis	27
4.2.3 Direkter Tragsicherheitsnachweis	28
4.2.4 Numerisch gestützter Tragsicherheitsnachweis	28
5 Schnittgrößen und Spannungen in Schalen	29
5.1 Schnittgrößen in Schalen	29
5.2 Modellierung der Schale für die Berechnung	29
5.2.1 Geometrie	29
5.2.2 Randbedingungen	30
5.2.3 Einwirkungen und Umwelteinflüsse	31
5.2.4 Schnittgrößen und Spannungen	32
5.3 Berechnungskonzepte	32

6	Grenzzustand Plastische Grenze oder Zugbruch (LS1)	32
6.1	Bemessungswerte der Einwirkungen	32
6.2	Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis	32
6.2.1	Bemessungswerte der Spannungen	32
6.2.2	Bemessungswerte des Widerstandes	33
6.2.3	Begrenzung der Spannungen	34
6.3	Numerisch gestützter Tragsicherheitsnachweis mittels globaler MNA- oder GMNA- Berechnung	34
6.4	Direkter Tragsicherheitsnachweis	35
7	Grenzzustand Zyklisches Plastizieren (LS2)	35
7.1	Bemessungswerte der Einwirkungen	35
7.2	Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis	35
7.2.1	Bemessungswerte der Spannungsschwingbreite	35
7.2.2	Bemessungswerte des Widerstandes	36
7.2.3	Begrenzung der Spannungsschwingbreite	36
7.3	Numerisch gestützter Tragsicherheitsnachweis mittels globaler MNA- oder GMNA- Berechnung	36
7.3.1	Bemessungswerte der gesamten akkumulierten plastischen Dehnung	36
7.3.2	Begrenzung der gesamten akkumulierten plastischen Dehnung	37
7.4	Direkter Tragsicherheitsnachweis	37
8	Grenzzustand Beulen (LS3)	37
8.1	Bemessungswerte der Einwirkungen	37
8.2	Spezielle Definitionen und Formelzeichen	37
8.3	Beulrelevante Randbedingungen	38
8.4	Beulrelevante geometrische Toleranzen	38
8.4.1	Allgemeines	38
8.4.2	Toleranz für Unrundheit	40
8.4.3	Toleranz für unplanmäßige Exzentrizität	41
8.4.4	Toleranz für Vorbeulen	42
8.4.5	Toleranz für Auflager-Unebenheit	45
8.5	Spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis	45
8.5.1	Bemessungswerte der Spannungen	45
8.5.2	Bemessungswert des Widerstandes (Beultragfähigkeit)	45
8.5.3	Begrenzung der Spannungen (Beulsicherheitsnachweis)	46
8.6	Numerisch gestützter Beulsicherheitsnachweis mittels globaler MNA- und LBA- Berechnung	47
8.6.1	Bemessungswerte der Einwirkungen	47
8.6.2	Bemessungswert des Widerstandes	47
8.6.3	Beulsicherheitsnachweis	50
8.7	Numerisch gestützter Beulsicherheitsnachweis mittels globaler GMNIA-Berechnung	50
8.7.1	Bemessungswerte der Einwirkungen	50
8.7.2	Bemessungswert des Widerstandes	50
8.7.3	Beulsicherheitsnachweis	55
9	Grenzzustand Ermüdung (LS4)	55
9.1	Bemessungswerte der Einwirkungen	55
9.2	Spannungsbasierter Ermüdungssicherheitsnachweis	55
9.2.1	Allgemeines	55
9.2.2	Bemessungswerte der Spannungsschwingbreite	55
9.2.3	Bemessungswerte des Widerstandes (Ermüdungsfestigkeit)	56
9.2.4	Begrenzung der Spannungsschwingbreite (Ermüdungssicherheitsnachweis)	56
9.3	Numerisch gestützter Ermüdungssicherheitsnachweis mittels globaler LA- oder GNA- Berechnung	57
Anhang A (normativ)	Membrantheorietische Spannungen in Schalen	58
A.1	Allgemeines	58

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

Seite

A.1.1	Beanspruchungen und Widerstände	58
A.1.2	Formelzeichen	58
A.1.3	Randbedingungen	59
A.1.4	Vorzeichenvereinbarung	59
A.2	Unversteifte Kreiszylinderschalen	59
A.2.1	Konstante Axiallast	59
A.2.2	Axiallast aus globaler Biegung	59
A.2.3	Reibungslast	59
A.2.4	Konstanter Innendruck	59
A.2.5	Veränderlicher Innendruck	59
A.2.6	Konstanter Schub aus Torsion	60
A.2.7	Sinusförmig veränderlicher Schub aus Querkraft	60
A.3	Unversteifte Kegelschalen	60
A.3.1	Konstante Axiallast	60
A.3.2	Axiallast aus globaler Biegung	60
A.3.3	Reibungslast	60
A.3.4	Konstanter Innendruck	61
A.3.5	Linear veränderlicher Innendruck	61
A.3.6	Konstanter Schub aus Torsion	61
A.3.7	Sinusförmig veränderlicher Schub aus Querkraft	61
A.4	Unversteifte Kugelschalen	62
A.4.1	Konstanter Innendruck	62
A.4.2	Konstante Eigengewichtslast	62
Anhang B (normativ) Zusätzliche Gleichungen für plastische Kollaps-Widerstände		63
B.1	Allgemeines	63
B.1.1	Widerstände	63
B.1.2	Formelzeichen	63
B.1.3	Randbedingungen	63
B.2	Unversteifte Kreiszylinderschalen	64
B.2.1	Zylinder: Radiale Linienlast	64
B.2.2	Zylinder: Radiale Linienlast und Axiallast	64
B.2.3	Zylinder: Radiale Linienlast, konstanter Innendruck und Axiallast	65
B.3	Ringversteifte Kreiszylinderschalen	66
B.3.1	Ringverstifter Zylinder: Radiale Linienlast	66
B.3.2	Ringverstifter Zylinder: Radiale Linienlast und Axiallast	67
B.3.3	Ringverstifter Zylinder: Radiale Linienlast, konstanter Innendruck und Axiallast	68
B.4	Knotenlinien zwischen Schalen	69
B.4.1	Knotenlinie unter ausschließlich meridionaler Belastung (vereinfacht)	69
B.4.2	Knotenlinie unter Innendruck und Axiallast	70
B.5	Kreisplatten mit axialsymmetrischen Randbedingungen	71
B.5.1	Gleichmäßig verteilte Last, gelenkig gelagerter Rand	71
B.5.2	Örtliche Teilflächenlast, gelenkig gelagerter Rand	71
B.5.3	Gleichmäßig verteilte Last, eingespannter Rand	72
B.5.4	Örtliche Teilflächenlast, eingespannter Rand	72
Anhang C (normativ) Formeln für lineare elastische Membran- und Biegespannungen		73
C.1	Allgemeines	73
C.1.1	Beanspruchungen	73
C.1.2	Formelzeichen	73
C.1.3	Randbedingungen	74
C.2	Am Fuß eingespannte unversteifte Kreiszylinderschalen	74
C.2.1	Zylinder, eingespannt: Konstanter Innendruck	74
C.2.2	Zylinder, eingespannt: Axiallast	74
C.2.3	Zylinder, eingespannt: Konstanter Innendruck und Axiallast	75
C.2.4	Zylinder, eingespannt: Hydrostatischer Innendruck	75
C.2.5	Zylinder, eingespannt: Radiale Verschiebung nach außen	76
C.2.6	Zylinder, eingespannt: Gleichmäßige Erwärmung	76

C.3	Am Fuß gelenkig gelagerte unversteifte Kreiszyinderschalen.....	76
C.3.1	Zylinder, gelenkig gelagert: Konstanter Innendruck.....	76
C.3.2	Zylinder, gelenkig gelagert: Axiallast.....	77
C.3.3	Zylinder, gelenkig gelagert: Konstanter Innendruck und Axiallast	77
C.3.4	Zylinder, gelenkig gelagert: Hydrostatischer Innendruck.....	78
C.3.5	Zylinder, gelenkig gelagert: Radiale Verschiebung nach außen.....	78
C.3.6	Zylinder, gelenkig gelagert: Gleichmäßige Erwärmung.....	79
C.3.7	Zylinder, gelenkig gelagert: Randverdrehung.....	79
C.4	Innendruck in unversteiften Kreiszyinderschalen	80
C.4.1	Zylinder: Endender konstanter Innendruck.....	80
C.4.2	Zylinder: Endender hydrostatischer Innendruck	80
C.4.3	Zylinder: Dickensprung	81
C.5	Ringsteife an einer Kreiszyinderschale	81
C.5.1	Ringverteifter Zylinder: Radialkraft am Ring.....	81
C.5.2	Ringverteifter Zylinder: Axiallast	82
C.5.3	Ringverteifter Zylinder: Konstanter Innendruck	82
C.6	Kreisplatten mit axialsymmetrischen Randbedingungen	83
C.6.1	Gelenkig gelagerte Platte: Gleichmäßige Flächenlast.....	83
C.6.2	Gelenkig gelagerte Platte: Örtliche Teilflächenlast	83
C.6.3	Eingespannte Platte: Gleichmäßige Flächenlast	83
C.6.4	Eingespannte Platte: Örtliche Teilflächenlast	84
Anhang D (normativ) Formeln für den Beulsicherheitsnachweis.....		85
D.1	Unversteifte Kreiszyinderschalen mit konstanter Wanddicke	85
D.1.1	Formelzeichen und Randbedingungen	85
D.1.2	Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialrichtung).....	85
D.1.3	Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung	88
D.1.4	Schubbeanspruchung.....	91
D.1.5	Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialrichtung) mit gleichzeitig wirkendem Innendruck	92
D.1.6	Kombinationen der Beanspruchung durch Druck in Meridianrichtung (Axialrichtung), Druck in Umfangsrichtung und Schub.....	94
D.2	Unversteifte Kreiszyinderschalen mit abgestufter Wanddicke	95
D.2.1	Allgemeines	95
D.2.2	Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialrichtung).....	96
D.2.3	Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung	96
D.2.4	Schubbeanspruchung.....	100
D.3	Unversteifte Kreiszyinderschalen mit Überlappstößen.....	100
D.3.1	Allgemeines	100
D.3.2	Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialrichtung).....	101
D.3.3	Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung	101
D.3.4	Schubbeanspruchung.....	101
D.4	Unversteifte Kegelschalen (vollständige Kegel und Kegelstümpfe)	102
D.4.1	Allgemeines	102
D.4.2	Bemessungsbeulspannungen	103
D.4.3	Beulsicherheitsnachweis	105

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

Vorwort

Dieses Dokument EN 1993-1-6:2007, „Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen“ wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird. CEN/TC 250 ist verantwortlich für alle Eurocodes.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis August 2007 und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis März 2010 zurückgezogen werden.

Dieser Eurocode ersetzt ENV 1993-1-6:1999.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Nationaler Anhang für EN 1993-1-6

Diese Norm enthält alternative Verfahren, Werte und Empfehlungen zusammen mit Hinweisen, an welchen Stellen möglicherweise nationale Festlegungen getroffen werden müssen. Deshalb sollte die jeweilige nationale Ausgabe von EN 1993-1-6 einen Nationalen Anhang mit allen national festzulegenden Parametern enthalten, die für die Bemessung und Konstruktion von Stahltragwerken, die in dem Ausgabeland gebaut werden sollen, erforderlich sind.

Nationale Festlegungen sind in den folgenden Abschnitten von EN 1993-1-6 vorgesehen:

- | | |
|-------------|------------------------|
| — 3.1 (4) | — 8.4.4 (4) |
| — 4.1.4 (3) | — 8.4.5 (1) |
| — 5.2.4 (1) | — 8.5.2 (2) |
| — 6.3 (5) | — 8.5.2 (4) |
| — 7.3.1 (1) | — 8.7.2 (7) |
| — 7.3.2 (1) | — 8.7.2 (16) |
| — 8.4.2 (3) | — 8.7.2 (18) (zweimal) |
| — 8.4.3 (2) | — 9.2.1 (2)P |
| — 8.4.3 (4) | |

1 Allgemeines

1.1 Anwendungsbereich

(1) EN1993-1-6 enthält Grundregeln für die Bemessung von Stahlkonstruktionen, die die Form von Rotationsschalen haben.

(2) Diese Norm ist zusammen mit EN1993-1-1, EN1993-1-3, EN1993-1-4, EN1993-1-9 sowie den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 anzuwenden. Dies sind:

- Teil 3-1 für Türme und Maste;
- Teil 3-2 für Schornsteine;
- Teil 4-1 für Silos;
- Teil 4-2 für Tankbauwerke;
- Teil 4-3 für Rohrleitungen.

(3) Diese Norm definiert die charakteristischen Werte und die Bemessungswerte des Tragwerkswiderstandes.

(4) Diese Norm regelt die Anforderungen an die Bemessung gegen folgende Grenzzustände der Tragfähigkeit:

- plastische Grenze oder Zugbruch;
- zyklisches Plastizieren;
- Beulen;
- Ermüdung.

(5) Das Gesamtgleichgewicht des Tragwerkes (Gleiten, Abheben, Umkippen) ist durch diese Norm nicht abgedeckt, wird aber in EN1993-1-1 behandelt. Besondere Überlegungen für spezielle Anwendungsgebiete werden in den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 behandelt.

(6) Die in dieser Norm angegebenen Regeln gelten für Rotationsschalen und damit verbundene Kreis- und Kreisringplatten sowie stabförmige Ring- und Längssteifen, soweit sie Teile des vollständigen Tragwerkes sind. Es werden allgemeine Verfahren für computergestützte Berechnungen aller Schalenformen behandelt. In den Anhängen sind detaillierte FormelAusdrücke für die Handberechnung von unversteiften Zylindern und Kegeln angegeben.

(7) Zylindrische und kegelförmige Schalenteile, -felder und -abschnitte werden in dieser Norm nicht explizit behandelt. Die angegebenen Regeln können jedoch anwendbar sein, wenn die zutreffenden Randbedingungen ausreichend berücksichtigt werden.

(8) Diese Norm gilt für stählerne Schalenkonstruktionen des konstruktiven Ingenieurbaus. Wenn keine Normen zu Schalenkonstruktionen aus anderen Metallen existieren, gelten die Festlegungen dieser Norm, vorausgesetzt, die jeweiligen Materialeigenschaften werden berücksichtigt.

(9) Die in dieser Norm angegebenen Regeln gelten für die in den einschlägigen Anwendungsteilen von EN1993 definierten Temperaturbereiche. Der Temperaturhöchstwert ist so festgelegt, dass Kriecheflüsse vernachlässigt werden können, sofern sie nicht im einschlägigen Anwendungsteil abgedeckt sind.

DIN EN 1993-1-6:2010-12

EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

(10) Die in dieser Norm angegebenen Regeln gelten für Konstruktionen, die die in EN1993-1-10 angegebenen Sprödbruchanforderungen erfüllen.

(11) Die in dieser Norm angegebenen Regeln gelten für die Bemessung unter Einwirkungen, die ihrer Natur nach als quasi-statisch behandelt werden dürfen.

(12) Im Rahmen dieser Norm wird vorausgesetzt, dass Windlast und Schüttgutfluss in der Regel als quasi-statisch behandelt werden dürfen.

(13) Dynamische Effekte, einschließlich ihrer Folgen für die Ermüdung, sollten nach den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 berücksichtigt werden. In diesem Teil 1-6 werden die Schnittgrößen aus dynamischem Verhalten jedoch als quasi-statisch behandelt.

(14) Die in dieser Norm angegebenen Regeln gelten für Tragwerke, die in Übereinstimmung mit EN 1090-2 gefertigt und errichtet werden.

(15) Diese Norm behandelt keine Dichtigkeitsaspekte.

(16) Diese Norm gilt für Konstruktionen innerhalb der folgenden Grenzen:

— Bemessungs-Metalltemperaturen innerhalb des Bereiches -50 °C bis $+300\text{ °C}$,

— Radius/Dicken-Verhältnisse innerhalb des Bereiches 20 bis 5 000.

ANMERKUNG Es ist zu beachten, dass die Regeln zum spannungsbasierten Tragsicherheitsnachweis in dieser Norm bei einigen Geometrien eher dickwandiger Schalen und einigen für diese geltenden Belastungsbedingungen recht konservativ sein können.

1.2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN1090-2, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 2: Technische Anforderungen an die Ausführung von Tragwerken aus Stahl*

EN 1990, *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*

EN1991, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke*

EN 1993-1-1, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*

EN 1993-1-3, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-3: Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für dünnwandige Bauteile und Bleche*

EN 1993-1-4, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln - Ergänzende Regeln zur Anwendung nichtrostender Stähle*

EN 1993-1-5, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-5: Plattenbeulen*

EN 1993-1-9, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-9: Ermüdung*

EN 1993-1-10, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung*

EN 1993-1-12, *T Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlgüten bis S 700*

EN 1993-2, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 2: Stahlbrücken*

EN 1993-3-1, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 3-1: Türme und Maste*

EN 1993-3-2, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 3-2: Schornsteine*

EN 1993-4-1, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4-1: Silos*

EN 1993-4-2, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4-2: Tankbauwerke*

EN 1993-4-3, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4-3: Rohrleitungen*

EN 1993-5, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 5: Pfähle und Spundwände*

1.3 Begriffe

Die in EN 1990 für den allgemeinen Gebrauch in den Eurocodes für den konstruktive Ingenieurbau definierten Begriffe gelten auch für die vorliegende Norm. Falls nicht anders festgelegt, gelten für die vorliegende Norm auch die Begriffe von ISO 8930. Ergänzend zu EN 1993-1-1 gelten für die Anwendung der vorliegenden Norm folgende Begriffe.

1.3.1 Tragwerksformen, Geometrie

1.3.1.1

Schale

Tragwerk oder Tragwerkselement, das aus einer gekrümmten dünnen Wandung besteht

1.3.1.2

Rotationsschale

Schale, deren geometrische Form durch eine Mittelfläche definiert ist, welche durch Rotation einer meridionalen Linie (Erzeugenden) um eine einzige Achse über ein Bogenmaß von 2π erzeugt wird. Die Schale kann beliebig lang sein.

1.3.1.3

vollständige Rotationsschale

Schale, die aus mehreren Teilen zusammengesetzt ist, von denen jeder eine Rotationsschale darstellt

1.3.1.4

Schalensegment

Rotationsschale mit definierter Geometrie und konstanter Wanddicke: Kreiszylinder, Kegelstumpf, Kugelstumpf, Kreisringplatte, Toroidkrempe oder andere Formen

1.3.1.5

Schalenfeld

unvollständige Rotationsschale: Die Schale wird durch eine Erzeugende definiert, die mit einem Bogenmaß von weniger als 2π um die Achse rotiert wird

1.3.1.6

Schalenmittelfläche

Gekrümmte Fläche, die an jedem Punkt der Schale mittig zwischen ihrer inneren und äußeren Oberfläche liegt. Falls die Schale an entweder einer oder beiden Oberflächen versteift ist, wird trotzdem die Mittelfläche der gekrümmten Wandung als Referenz-Schalenmittelfläche verwendet. Die Schalenmittelfläche dient als Referenzfläche für die Berechnung und kann an Wanddickensprüngen oder an Knotenlinien diskontinuierlich sein, was zu Exzentrizitäten führt, die für das Tragwerksverhalten der Schale wichtig sein können.

1.3.1.7

Knotenlinie

Linie, an der zwei oder mehr Schalensegmente zusammentreffen: Sie kann auch eine Steife einschließen. Die Anschlusslinie einer Ringsteife an eine Schale kann als Knotenlinie behandelt werden.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

1.3.1.8

Längssteife

Örtliches Versteifungsbauteil, das einem Schalenmeridian folgt, welcher eine Erzeugende der Rotationsschale darstellt. Eine Längssteife soll entweder die Stabilität verbessern oder bei der Einleitung örtlicher Lasten mitwirken. Sie dient nicht primär dazu, den Widerstand gegen Biegeeffekte zu erhöhen, die durch Querlasten verursacht werden.

1.3.1.9

Rippe

Örtliches Bauteil, das eine primäre Biegelastabtragung längs eines Schalenmeridians ermöglicht, welcher eine Erzeugende der Rotationsschale darstellt. Eine Rippe wird vorgesehen, um Querlasten mittels Biegung zu übertragen oder zu verteilen.

1.3.1.10

Ringsteife

Örtliches Versteifungsbauteil, das der Umfangslinie der Rotationsschale an einem bestimmten Punkt des Schalenmeridians folgt. Es wird in der Regel angenommen, dass die Steifigkeit der Ringsteife in Bezug auf Verformungen aus der eigenen Ebene (meridionale Verschiebungen der Schale) vernachlässigbar ist, sie jedoch in Bezug auf Verformungen in der Ringebene steif ist. Sie wird entweder vorgesehen, um die Stabilität zu verbessern oder in Ringebene angreifende örtliche Lasten einzuleiten.

1.3.1.11

Basisring

Tragwerkselement, das der Umfangslinie der Rotationsschale an deren Basis folgt und die Möglichkeit bietet, die Schale an ein Fundament oder ein anderes Tragwerkselement anzuschließen. Der Basisring wird auch benötigt, um die angenommenen Randbedingungen praktisch sicherzustellen.

1.3.1.12

Ringträger oder Ringbalken

Versteifungsbauteil in Umfangsrichtung, das sowohl in Ringebene als auch rechtwinklig dazu eine Biegesteifigkeit- und Festigkeit aufweist. Ein Ringträger oder -balken ist ein lasttragendes Tragwerksbauteil zur Weiterleitung örtlicher Lasten in die Schale.

1.3.2 Grenzzustände

1.3.2.1

plastische Grenze

LS1

Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dem das Tragwerk Fließzonen in einer solchen Anordnung entwickelt, dass seine Fähigkeit, weiter steigenden Lasten zu widerstehen, als erschöpft betrachtet werden muss. Die plastische Grenze ist nahe verwandt mit einer plastischen Grenzlasterlast nach der Theorie kleiner Verschiebungen oder einem plastischen Kollapsmechanismus.

1.3.2.2

Zugbruch

LS1

Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dem die Schalenwandung infolge Zugbeanspruchung reißt

1.3.2.3

zyklisches Plastizieren

LS2

Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dem durch Be- und Entlastungszyklen wiederholtes Fließen verursacht wird, was zum Versagen infolge Kurzzeitermüdung führt, wenn die Kapazität des Werkstoffes zur Energieabsorption erschöpft ist

1.3.2.4**Beulen****LS3**

Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dem das Tragwerk unter Membrandruck- und/oder Membranschubbeanspruchung plötzlich seine Stabilität verliert. Beulen führt entweder zu großen Verformungen oder dazu, dass das Tragwerk nicht mehr in der Lage ist, die einwirkenden Lasten zu tragen.

1.3.2.5**Ermüdung****LS4**

Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dem wiederholte Belastungen Risse in der Schalenwandung verursachen, welche nach weiteren Lastzyklen zum Bruch führen können.

1.3.3 Einwirkungen**1.3.3.1****Axiallast**

extern aufgebrachte Belastung in axialer Richtung

1.3.3.2**Radiallast**

extern aufgebrachte Belastung normal zur Oberfläche einer Kreiszylinderschale

1.3.3.3**Innendruck**

Anteil der Flächenbelastung, der normal zur Schalenoberfläche, nach außen gerichtet, wirkt. Seine Größe kann sowohl in Umfangs- als auch in Meridianrichtung veränderlich sein (z. B. bei Belastung durch Schüttgut in einem Silo).

1.3.3.4**Außendruck**

Anteil der Flächenbelastung, der normal zur Schalenoberfläche, nach innen gerichtet, wirkt. Seine Größe kann sowohl in Meridian- als auch in Umfangsrichtung veränderlich sein (z. B. bei Windlast)

1.3.3.5**hydrostatischer Druck**

linear mit der Axialkoordinate der Rotationsschale veränderlicher Druck

1.3.3.6**Wandreibungslast**

meridionaler Anteil der Flächenbelastung entlang der Schalenwandung infolge Reibung, verbunden mit Innendruck (z. B. wenn die Schale Schüttgut enthält)

1.3.3.7**örtliche Last**

Punktlast oder über einen begrenzten Bereich des Schalenumfangs und der Höhe verteilte Last

1.3.3.8**Teilflächenlast**

örtlich Flächenlast normal zur Schalenoberfläche

1.3.3.9**Soglast**

gleichförmiger Außendruck (Unterdruck) infolge des niedrigeren Innendrucks in einer mit betrieblichen oder Belüftungsöffnungen versehenen Schale unter Windeinwirkung

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

1.3.3.10

Teilvakuum

gleichförmiger Außendruck (Unterdruck) infolge Entnahme gespeicherter Flüssigkeiten oder Schüttgüter aus einem unzureichend belüfteten Behälter

1.3.3.11

thermische Einwirkung

veränderliche Temperaturen entweder in Längs- oder in Umfangs- oder in Dickenrichtung der Schale

1.3.4 Schnittgrößen und Spannungen in Schalen

1.3.4.1

Membranschnittgrößen

Membranschnittgrößen sind die Kräfte je Längeneinheit der Schale, welche sich aus dem Integral des Verlaufs der Normalspannungen und der Schubspannungen parallel zur Schalenmittelfläche über die Schalendicke ergeben. Unter elastischen Bedingungen erzeugt jede dieser Schnittgrößen einen Spannungszustand, der gleichförmig über die Schalendicke verläuft. Es gibt drei Membranschnittgrößen an jedem Punkt (siehe Bild 1.1e)).

1.3.4.2

Biegeschnittgrößen

Biegeschnittgrößen sind die Biege- und Drehmomente je Längeneinheit der Schale, welche sich aus dem Integral des Flächenmomentes ersten Grades des Verlaufs der Normalspannungen und der Schubspannungen parallel zur Schalenmittelfläche über die Schalendicke ergeben. Unter elastischen Bedingungen erzeugt jede dieser Schnittgrößen einen Spannungszustand, der über die Schalendicke linear verläuft mit dem Wert Null an der Schalenmittelfläche. Es gibt zwei Biegemomente und ein Drehmoment an jedem Punkt.

1.3.4.3

Querschubschnittgrößen

Querschubschnittgrößen sind die Kräfte je Längeneinheit der Schale, welche sich aus dem Integral des Verlaufes des Querschubes senkrecht zur Schalenmittelfläche über die Schalendicke ergeben. Unter elastischen Bedingungen erzeugt jede dieser Schnittgrößen einen Spannungszustand, der parabelförmig über die Schalendicke verläuft. Es gibt zwei Querschubschnittgrößen an jedem Punkt (siehe Bild 1.1f)).

1.3.4.4

Membranspannungen

Membranspannungen sind wie folgt definiert: Membranschnittgrößen geteilt durch die Schalendicke (siehe Bild 1.1e))

1.3.4.5

Biegespannungen

Biegespannungen im elastischen Bereich sind wie folgt definiert: Biegeschnittgrößen multipliziert mit 6 und dividiert durch das Quadrat der Schalendicke.

1.3.5 Berechnungskonzepte

1.3.5.1

globale Berechnung

Berechnung, die das gesamte Tragwerk umfasst, anstatt einzelne Tragwerksteile separat zu behandeln

1.3.5.2**membrantheoretische Berechnung**

Berechnung, die das Tragverhalten einer dünnwandigen Schalenstruktur unter verteilten Lasten unter der Annahme beschreibt, dass das Gleichgewicht mit den äußeren Lasten ausschließlich durch Membrankräfte erreicht wird

1.3.5.3**lineare elastische Schalenberechnung****LA**

Berechnung, die das Tragverhalten einer dünnwandigen Schalenstruktur auf der Grundlage der linear-elastischen Schalenbiegetheorie kleiner Verformungen beschreibt, angewendet auf die perfekte Geometrie der Schalenmittelfläche

1.3.5.4**lineare elastische Verzweigungs(eigenwert)-Berechnung****LBA**

Berechnung, die den linearen Verzweigungseigenwert für eine dünnwandige Schalenstruktur auf der Grundlage der linear-elastischen Schalenbiegetheorie kleiner Verformungen beschreibt, angewendet auf die perfekte Geometrie der Schalenmittelfläche. Es ist zu beachten, dass sich die Bezeichnung Eigenwert hier nicht auf Schwingungszustände bezieht.

1.3.5.5**geometrisch nichtlineare elastische Berechnung****GNA**

Berechnung auf der Grundlage der auf die perfekte Struktur angewendeten Schalenbiegetheorie und eines linear-elastischen Werkstoffgesetzes, jedoch unter Zuhilfenahme einer nichtlinearen Theorie großer Verformungen für die Verschiebungen, die allen Änderungen der Geometrie, die durch die Einwirkungen auf die Schale hervorgerufen werden, in vollem Umfang Rechnung trägt. Diese Berechnung schließt eine Verzweigungseigenwert-Überprüfung auf jedem Belastungsniveau ein.

1.3.5.6**materiell nichtlineare Berechnung****MNA**

Berechnung auf der Grundlage der Schalenbiegetheorie kleiner Verformungen, angewendet auf die perfekte Struktur (wie in [AC](#) 1.3.5.3 [AC](#)), aber unter Zuhilfenahme eines nichtlinearen elasto-plastischen Werkstoffgesetzes

1.3.5.7**geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung****GMNA**

Berechnung auf der Grundlage der auf die perfekte Struktur angewendeten Schalenbiegetheorie und unter Zuhilfenahme einer nichtlinearen Theorie großer Verformungen für die Verschiebungen und eines nichtlinearen elasto-plastischen Werkstoffgesetzes. Diese Berechnung schließt eine Verzweigungseigenwert-Überprüfung auf jedem Belastungsniveau ein.

1.3.5.8**geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen****GNIA**

Berechnung ähnlich der in [AC](#) 1.3.5.5 [AC](#) definierten GNA-Berechnung, aber mit ausdrücklich eingeschlossenen Imperfektionen, d.h. angewendet auf ein Modell für die Strukturgeometrie, das die imperfekte Form einschließt (z. B. unvermeidbare Abweichungen der Schalenmittelfläche von der idealen Form). Mit den Imperfektionen wird der Einfluss der Abweichungen von den angesetzten Randbedingungen und/oder der Einfluss von Eigenspannungen berücksichtigt. Diese Berechnung schließt eine Überprüfung der Verzweigungslast auf jedem Belastungsniveau ein.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

1.3.5.9

geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen

GMNIA

Berechnung, bei der Imperfektionen ausdrücklich eingeschlossen sind und die auf der Grundlage der auf die imperfekte Struktur (z. B. unvermeidbare Abweichungen der Schalenmittelfläche von der idealen Form) angewendeten Schalenbiegetheorie erfolgt unter Zuhilfenahme eines nichtlinearen elasto-plastischen Werkstoffgesetzes sowie einer nichtlinearen Theorie großer Verformungen für Verschiebungen, die allen Änderungen der Geometrie, die durch die Einwirkungen auf die Schale hervorgerufen werden, in vollem Umfang Rechnung trägt. Zu den Imperfektionen können auch Imperfektionen in den Randbedingungen und Eigenspannungen gehören. Diese Berechnung schließt eine Verzweigungseigenwert-Überprüfung auf jedem Belastungsniveau ein.

1.3.6 Bei der spannungsbasierten Bemessung verwendete Spannungskategorien

1.3.6.1

Primärspannungen

System von Spannungen, das zur Herstellung des Gleichgewichts mit der wirkenden Lasten erforderlich ist. Es umfasst in erster Linie Membranspannungen, unter bestimmten Bedingungen können jedoch auch Biegespannungen erforderlich sein, um Gleichgewicht herzustellen.

1.3.6.2

Sekundärspannungen

Spannungen, die entweder durch die interne Kompatibilität entstehen oder durch die Kompatibilität mit den Randbedingungen, verbunden mit einwirkenden Lasten oder Verschiebungen (Temperatur, Vorspannung, Setzung, Schrumpfen). Diese Spannungen sind nicht erforderlich, um Gleichgewicht zwischen einem internen Spannungszustand und den externen Lasten herzustellen.

1.3.7 Spezielle Definitionen für Beulberechnungen

1.3.7.1

idealer Beulwiderstand

kleinste Verzweigungs- oder Durchschlagslast, berechnet unter den idealisierenden Annahmen elastischen Werkstoffverhaltens, perfekter Geometrie, perfekter Lasteinleitung, perfekter Auflagerung, isotropen Werkstoffes und Abwesenheit von Eigenspannungen (LBA-Berechnung)

1.3.7.2

ideale Beulspannung

zum idealen Beulwiderstand gehörende Membranspannung

1.3.7.3

plastischer Referenzwiderstand

plastische Grenzlast, berechnet unter den idealisierenden Annahmen starr-plastischen Werkstoffverhaltens, perfekter Geometrie, perfekter Lasteinleitung, perfekter Auflagerung und isotropen Werkstoffes (durch MNA-Berechnung modelliert)

1.3.7.4

charakteristischer Beulwiderstand

Beullast unter Berücksichtigung des inelastischen Werkstoffverhaltens, der in praktischen Stahlbauten unvermeidbaren geometrischen und strukturellen Imperfektionen und gegebenenfalls vorhandener Folgelasteffekte

1.3.7.5

charakteristische Beulspannung

zum charakteristischen Beulwiderstand gehörende Membranspannung

1.3.7.6**Bemessungsbeulwiderstand**

Bemessungswert der Beullast, ermittelt aus dem charakteristischen Beulwiderstand durch Division durch den Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand

1.3.7.7**Bemessungsbeulspannung**

zum Bemessungsbeulwiderstand gehörende Membranspannung

1.3.7.8**maßgebende Spannung**

festgelegter Wert in einem veränderlichen Spannungsfeld, der zur Charakterisierung der Beanspruchung beim Beulsicherheitsnachweis verwendet wird

1.3.7.9**Herstelltoleranz-Qualitätsklasse**

für die Bemessung angenommene Kategorie der Anforderungen an die Herstellgenauigkeit, siehe 8.4

1.4 Formelzeichen

(1) In dieser Norm werden über die in EN 1990 und EN 1993-1-1 angegebenen Formelzeichen hinaus die Folgenden verwendet.

(2) Koordinatensystem, siehe Bild 1.1:

r Radialkoordinate, normal zur Rotationsachse;

x Meridiankoordinate;

z Axialkoordinate;

θ Umfangskoordinate;

ϕ Meridianeigung: Winkel zwischen der Rotationsachse und der Normalen auf dem Schalenmeridian;

(3) Drücke:

p_n normal zur Schalenmittelfläche;

p_x in Schalenmittelfläche tangential in Meridianrichtung;

p_θ in Schalenmittelfläche tangential in Umfangsrichtung;

(4) Linienlasten:

P_n je Umfangslängeneinheit, normal zur Schalenmittelfläche;

P_x je Umfangslängeneinheit, in Meridianrichtung;

P_θ je Umfangslängeneinheit, in Umfangsrichtung;

(5) Membranschnittgrößen:

n_x Membrannormalkraft in Meridianrichtung;

n_θ Membrannormalkraft in Umfangsrichtung;

$n_{x\theta}$ Membranschubkraft;

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

(6) Biegeschnittgrößen (je Längeneinheit):

- m_x Biegemoment, das Spannungen in Meridianrichtung erzeugt;
 m_θ Biegemoment, das Spannungen in Umfangsrichtung erzeugt;
 $m_{x\theta}$ Drillmoment;
 q_{xn} zur Meridianbiegung gehörende Querkraft;
 $q_{\theta n}$ zur Umfangsbiegung gehörende Querkraft;

(7) Spannungen:

- σ_x Meridianspannung;
 σ_θ Umfangsspannung;
 σ_{eq} von Mises-Vergleichsspannung (kann bei zyklischer Belastung auch negative Werte annehmen);
 $\tau, \tau_{x\theta}$ Membranschubspannung;
 $\tau_{xn}, \tau_{\theta n}$ Querkraftschubspannung – zur Meridianbiegung gehörend, zur Umfangsbiegung gehörend;

(8) Verschiebungen:

- u Verschiebung in Meridianrichtung;
 v Verschiebung in Umfangsrichtung;
 w Verschiebung normal zur Schalenmittelfläche;
 β_ϕ Verdrehung in Meridianrichtung, siehe 5.2.2;

(9) Schalenabmessungen:

- d Innendurchmesser der Schale;
 L Gesamtlänge der Schale;
 ℓ Länge eines Schalensegmentes;
 ℓ_g Messlänge für die Messung von Imperfektionen;
 $\ell_{g\theta}$ Messlänge für die Messung von Imperfektionen in Umfangsrichtung;
 ℓ_{gw} Messlänge für die Messung von Imperfektionen über Schweißnähte hinweg;
 ℓ_{gx} Messlänge für die Messung von Imperfektionen in Meridianrichtung;
 ℓ_R Grenzlänge einer Schale für den Beulsicherheitsnachweis;
 r Radius der Schalenmittelfläche, rechtwinklig zur Rotationsachse;
 t Dicke der Schalenwandung;
 t_{max} maximale Dicke der Schalenwandung an einem Stoß;
 t_{min} Mindestdicke der Schalenwandung an einem Stoß;
 t_{ave} mittlere Dicke der Schalenwandung an einem Stoß;
 β halber Öffnungswinkel eines Kegels;

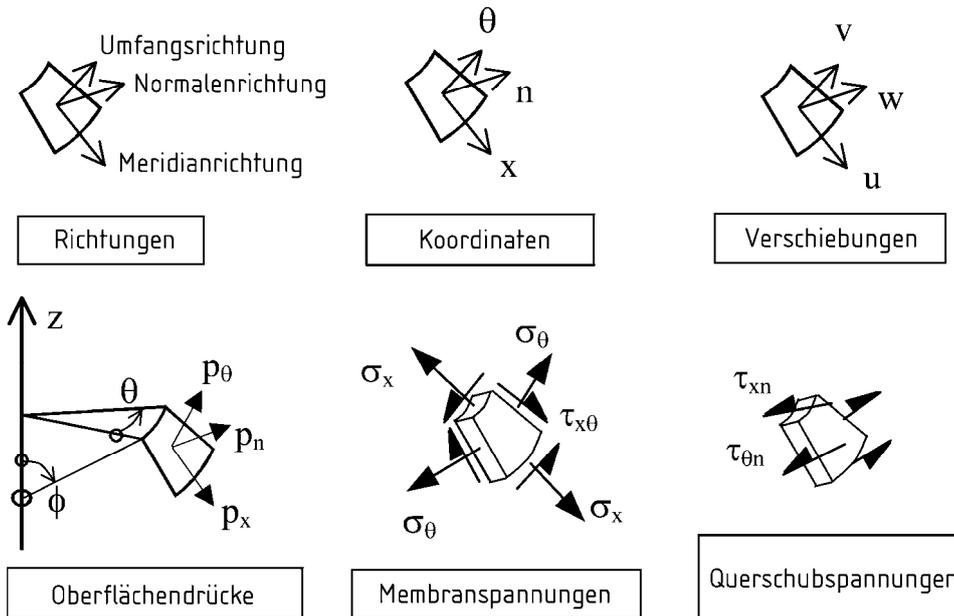


Bild 1.1 — Bezeichnungen in Rotationsschalen

(10) Herstelltoleranzen, siehe 8.4:

- e unplanmäßige Exzentrizität zwischen den Schalenmittelflächen miteinander verbundener Bleche;
- U_e Toleranzparameter für unplanmäßige Exzentrizität;
- U_r Toleranzparameter für Unrundheit;
- U_n Parameter für Imperfektionsamplitude bei numerischen Berechnungen;
- U_0 Toleranzparameter für Vorbeule;
- Δw_0 Amplitude einer Vorbeule rechtwinklig zur Schalenmittelfläche;

(11) Werkstoffeigenschaften:

- E Elastizitätsmodul;
- f_{eq} von Mises-Vergleichsfließspannung;
- f_y Streckgrenze;
- f_u Zugfestigkeit;
- ν Querkontraktionszahl (Poissonzahl);

(12) Parameter bei Tragsicherheitsnachweisen:

- C Koeffizient beim Beulsicherheitsnachweis;
- D Schädigungssumme beim Ermüdungssicherheitsnachweis;
- F allgemeine Einwirkung;
- F_{Ed} einer Bemessungssituation entsprechende Einwirkung auf ein komplettes Tragwerk (Bemessungswerte);
- F_{Rd} Rechenwerte der Einwirkung im Zustand des höchsten Tragwerkswiderstandes (Bemessungswerte);

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

- r_{Rk} bezogener charakteristischer Beulwiderstand (mit Indizes zur Identifizierung der Grundlage):
definiert als Verhältnis (F_{Rk}/F_{Ed});
- r_{Rpl} bezogener plastischer Referenzwiderstand (definiert als Lastfaktor auf die Bemessungslasten,
ermittelt mit einer MNA-Berechnung);
- r_{Rcr} bezogener idealer Beulwiderstand (definiert als Lastfaktor auf die Bemessungslasten, ermittelt mit
einer LBA-Berechnung);

ANMERKUNG Um die Konsistenz der Formelzeichen in der gesamten Normenreihe EN 1993 sicherzustellen, wird hier anstelle von R_{Ri} das Formelzeichen für den bezogenen Referenzwiderstand r_{Ri} verwendet. Zur Vermeidung von Missverständnissen ist zu beachten, dass in Fachkreisen der Schalentragswerksbemessung weithin das Formelzeichen R_{Ri} verwendet wird.

- k Kalibrierungsfaktor für nichtlineare Berechnungen;
- k Parameter in den Gleichungen zur Beulinteraktion;
- n Anzahl von Lastspielen;
- α Faktor für elastische Imperfektionsabminderung beim Beulsicherheitsnachweis;
- β Faktor für plastischen Bereich beim Beulsicherheitsnachweis;
- γ Teilsicherheitsbeiwert;
- Δ Schwingbreite bei alternierenden oder zyklischen Lasten;
- ε_p plastische Dehnung;
- η Exponent in der Gleichung für die Beulkurvenform;
- $\bar{\lambda}$ bezogener Schalenschlankheitsgrad;
- $\bar{\lambda}_{ov}$ bezogener Schlankheitsgrad der gesamten Schale (mehrere Segmente);
- $\bar{\lambda}_o$ vollplastischer Grenzschlankheitsgrad (Wert von $\bar{\lambda}$, oberhalb dessen der Widerstand aufgrund von Instabilität oder Änderung der Geometrie gemindert wird);
- $\bar{\lambda}_p$ teilplastischer Grenzschlankheitsgrad (Wert von $\bar{\lambda}$, unterhalb dessen die Plastizität die Stabilität beeinflusst);
- ω bezogener Längenparameter einer Kreiszylinderschale;
- χ Beulabminderungsfaktor für elastisch-plastische Effekte beim Beulsicherheitsnachweis;
- χ_{ov} Beulabminderungsfaktor für die gesamte Schale;

(13) Indizes:

- E Spannungs- oder Verschiebungswert (als Folge von Bemessungseinwirkungen);
- F Einwirkungen;
- M Werkstoff/Material;
- R Widerstand;
- cr idealer Beulwert;
- d Bemessungswert;
- int innen;
- k charakteristischer Wert;

max	Maximalwert;
min	Mindestwert;
nom	Nennwert;
pl	plastischer Wert;
u	Traglastwert;
y	Fließwert.

(14) Weitere Formelzeichen werden bei erstmaligem Auftreten definiert.

1.5 Vorzeichenvereinbarungen

- (1) Nach außen gerichtet positiv: Innendruck positiv, Verschiebung nach außen positiv, Ausnahme: siehe (4).
- (2) Zugspannungen positiv, Ausnahme: siehe (4).

ANMERKUNG Druck wird in EN 1993-1-1 als positiv betrachtet.

- (3) Schubspannungen positiv wie in Bildern 1.1 und D.1 dargestellt.
- (4) Zur Vereinfachung werden in Abschnitt 8 und in Anhang D Druckspannungen als positiv betrachtet. Dort werden außerdem sowohl Außendrucke als auch Innendrucke als positiv behandelt.

2 Grundlagen der Bemessung und Modellierung

2.1 Allgemeines

- (1) Für die Grundlagen der Bemessung gilt EN 1990, ergänzt durch die folgenden Regeln.
- (2) Die Schale sollte vor allem so bemessen werden, dass sie alle Einwirkungen trägt und die folgenden Anforderungen erfüllt:
 - Gesamtgleichgewicht;
 - Gleichgewicht zwischen Einwirkungen und inneren Schnittgrößen, siehe Abschnitte 6 und 8;
 - Vermeidung von Rissen infolge zyklischen Plastizierens, siehe Abschnitt 7;
 - Begrenzung von Rissen infolge Ermüdung, siehe Abschnitt 9.
- (3) Die Bemessung der Schale sollte die Gebrauchstauglichkeitsanforderungen erfüllen, die in der jeweils maßgebenden Anwendungsnorm (EN 1993 Teil 3-1, Teil 3-2, Teil 4-1, Teil 4-2, Teil 4-3) festgelegt sind.
- (4) Die Schale darf auch aufgrund einer versuchsgestützten Bemessung dimensioniert werden. Wo angebracht, sind die entsprechenden Anforderungen in der maßgebenden Anwendungsnorm (EN 1993 Teil 3-1, Teil 3-2, Teil 4-1, Teil 4-2, Teil 4-3) festgelegt.
- (5) Alle Einwirkungen sollten mit ihren Bemessungswerten nach EN 1991 bzw. EN 1993 Teil 3-1, Teil 3-2, Teil 4-1, Teil 4-2 oder Teil 4-3 eingeführt werden.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

2.2 Berechnungskonzepte

2.2.1 Allgemeines

(1) In Abhängigkeit vom Grenzzustand und von anderen Überlegungen sollte(n) eines oder mehrere der nachfolgend genannten Berechnungskonzepte, wie in Abschnitt 4 näher ausgeführt, angewendet werden:

- globale Berechnung, siehe 2.2.2;
- membrantheoretische Berechnung, siehe 2.2.3;
- lineare elastische Berechnung, siehe 2.2.4;
- lineare elastische Verzweigungsberechnung, siehe 2.2.5;
- geometrisch nichtlineare elastische Berechnung, siehe 2.2.6;
- materiell nichtlineare Berechnung, siehe 2.2.7;
- geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung, siehe 2.2.8;
- geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen, siehe 2.2.9;
- geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen, siehe 2.2.10.

2.2.2 Globale Berechnung

(1) Für eine globale Berechnung dürfen vereinfachte Ansätze zur Erfassung einzelner Tragwerksteile angewendet werden.

2.2.3 Membrantheoretische Berechnung

(1) Eine membrantheoretische Berechnung sollte nur angewendet werden, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- die Randbedingungen sind geeignet, um die Beanspruchungen der Schale ohne wesentliche Biegeeffekte in Auflagerreaktionen zu überführen;
- die Schalengeometrie ist stetig veränderlich (ohne Diskontinuitäten);
- die Lasten sind stetig verteilt (ohne örtliche Konzentrationen oder Punktlasten).

(2) Eine membrantheoretische Berechnung muss nicht notwendigerweise Verformungskompatibilität an Rändern oder zwischen Schalensegmenten unterschiedlicher Form oder zwischen unterschiedlich belasteten Schalensegmenten liefern. Die ermittelten Membranschnittkräfte erfüllen jedoch die Anforderungen in Bezug auf die Primärspannungen (LS1).

2.2.4 Lineare elastische Berechnung (LA)

(1) Die Linearität der Theorie folgt aus den Annahmen linear-elastischen Werkstoffverhaltens und linearer kleiner Verformungen. Die Theorie kleiner Verformungen impliziert, dass die Geometrie identisch mit derjenigen der unverformten Struktur bleibt.

(2) Eine LA-Berechnung erfüllt sowohl die Bedingungen der Verformungskompatibilität als auch des Gleichgewichtes. Die ermittelten Membran- und Biegeschnittkräfte erfüllen die Bedingungen für Primär- und Sekundärspannungen (**AC** LS1 bis LS4 **AC**).

2.2.5 Lineare elastische Verzweigungsberechnung (LBA)

(1) Die Bedingungen von 2.2.4 in Bezug auf die Annahmen zum Werkstoffverhalten und zur Geometrie werden erfüllt. Diese lineare Verzweigungsberechnung liefert jedoch unter der Annahme, dass sich weder die Geometrie noch die Belastungsrichtung oder das Werkstoffverhalten ändert, den kleinsten Eigenwert, bei dem die Schale in einen anderen Verformungszustand beulen kann. Imperfektionen aller Art werden außer Acht gelassen. Dieses Berechnungskonzept liefert den bezogenen idealen elastischen Beulwiderstand r_{RCr} , siehe 8.6 und 8.7 (LS3).

2.2.6 Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung (GNA)

(1) Eine GNA-Berechnung erfüllt sowohl die Bedingungen des Gleichgewichtes als auch der Verformungskompatibilität, und zwar unter Einschluss der Geometrieveränderung, die von der Belastung verursacht wird. Das ermittelte Spannungsfeld erfüllt die Bedingungen für Primär- und Sekundärspannungen (AC) LS2 und LS4 (AC).

(2) Wenn Druck- oder Schubspannungen in gewissen Teilen der Schale dominieren, liefert eine GNA-Berechnung die elastische Beullast der perfekten Struktur – einschließlich Änderungen der Geometrie –, die beim Beulsicherheitsnachweis (LS3) hilfreich sein kann.

(3) Falls dieses Berechnungskonzept für eine Beullastberechnung verwendet wird, müssen die Eigenwerte des Systems überprüft werden, um sicherzustellen, dass der numerische Prozess tatsächlich eine Verzweigung im Lastpfad erkennt.

2.2.7 Materiell nichtlineare Berechnung (MNA)

(1) Das Ergebnis einer MNA-Berechnung ist die plastische Grenzlast, die als Lasterhöhungsfaktor r_{Rpl} bezüglich des Bemessungswertes der Einwirkungen F_{Ed} formuliert werden kann. Dieses Berechnungskonzept liefert den in 8.6 und 8.7 zu verwendenden bezogenen plastischen Referenzwiderstand r_{Rpl} .

(2) Eine MNA-Berechnung kann für den Tragsicherheitsnachweis gegen (AC) die Grenzzustände LS1 und LS3 (AC) verwendet werden.

(3) Eine MNA-Berechnung kann auch durchgeführt werden, um das plastische Dehnungsinkrement $\Delta\varepsilon$ während eines Lastspiels zyklischer Belastung zu ermitteln, das für den Nachweis gegen zyklisches Plastizieren (LS2) verwendet werden kann.

2.2.8 Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA)

(1) Die Ergebnisse einer GMNA-Berechnung sind, analog zu 2.2.7, die geometrisch nichtlineare plastische Grenzlast der perfekten Struktur und das plastische Dehnungsinkrement, die für die Nachweise gegen die Grenzzustände LS1 und LS2 verwendet werden können.

(2) Wenn Druck- oder Schubspannungen in gewissen Teilen der Schale dominieren, liefert eine GMNA-Berechnung die elasto-plastische Beullast der perfekten Struktur, die beim Beulsicherheitsnachweis (LS3) hilfreich sein kann, siehe 8.7.

(3) Falls dieses Berechnungskonzept für eine Beullastberechnung verwendet wird, sollten die Eigenwerte des Systems überprüft werden, um sicherzustellen, dass der numerische Prozess tatsächlich eine Verzweigung im Lastpfad erkennt.

2.2.9 Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen (GNIA)

(1) Eine GNIA-Berechnung wird in Fällen verwendet, in denen Druck- oder Schubspannungen in der Schale dominieren. Sie liefert elastische Beullasten der imperfekten Struktur, die beim Beulsicherheitsnachweis (LS3) hilfreich sein können.

DIN EN 1993-1-6:2010-12

EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

(2) Falls dieses Berechnungskonzept für eine Beullastberechnung (LS3) verwendet wird, sollten die Eigenwerte des Systems überprüft werden, um sicherzustellen, dass der numerische Prozess tatsächlich eine Verzweigung im Lastpfad erkennt. Es muss sorgfältig darauf geachtet werden, sicherzustellen, dass die örtlichen Spannungen nicht Werte überschreiten, bei denen die Werkstoffnichtlinearität das Tragverhalten beeinflussen kann.

2.2.10 Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA)

(1) Eine GMNIA-Berechnung wird in Fällen verwendet, in denen Druck- oder Schubspannungen in der Schale dominieren. Sie liefert elasto-plastische Beullasten der „realen“ imperfekten Struktur, die für den Beulsicherheitsnachweis (LS3) verwendet werden können, siehe 8.7.

(2) Falls dieses Berechnungskonzept für eine Beullastberechnung verwendet wird, sollten die Eigenwerte des Systems überprüft werden, um sicherzustellen, dass der numerische Prozess tatsächlich eine Verzweigung im Lastpfad erkennt.

(3) Falls dieses Berechnungskonzept für eine Beullastberechnung verwendet wird, sollte zusätzlich immer auch eine GMNA-Berechnung der perfekten Schale durchgeführt werden, um die Imperfektionsempfindlichkeit des Tragwerks erkennen zu können.

2.3 Schalenrandbedingungen

(1) Die für die Bemessungsberechnung angenommenen Randbedingungen sollten so gewählt werden, dass sie zuverlässig ein realistisches oder konservatives Modell der realen Konstruktion darstellen. Besondere Beachtung sollte nicht nur der Behinderung von Verschiebungen rechtwinklig zur Schalenwandung (Durchbiegungen) gewidmet werden, sondern auch der Behinderung von Verschiebungen in der Ebene der Schalenwandung (in Meridian- und in Umfangsrichtung), weil sie signifikante Auswirkungen auf die Festigkeit und den Beulwiderstand der Schale haben.

(2) In Schalenbeulberechnungen (Eigenwertanalysen) für den Grenzzustand LS3 sollte sich die Definition der Randbedingungen auf die inkrementellen Verschiebungen während des Beulprozesses beziehen und nicht auf die Gesamtverschiebungen, die vor dem Beulen von den einwirkenden Lasten erzeugt wurden.

(3) Die Randbedingungen am kontinuierlich unterstützten unteren Rand einer Schale sollten berücksichtigen, ob örtliches Anheben der Schale verhindert wird oder nicht.

(4) Die Verdrehung des Schalenrandes β_ϕ sollte besonders in kurzen Schalen und bei der Berechnung von Sekundärspannungen in längeren Schalen (nach den Grenzzuständen LS2 und LS4) beachtet werden.

(5) Die in 5.2.2 beschriebenen Randbedingungen sollten für Computerberechnungen und zur Auswahl der zutreffenden Formel ausdrücke in den Anhängen A bis D verwendet werden.

(6) Die konstruktiven Verbindungen zwischen Schalensegmenten an einer Knotenlinie sollten so beschaffen sein, dass die für die Berechnung der einzelnen Schalensegmente angenommenen Randbedingungen praktisch sichergestellt sind.

3 Werkstoffe und Geometrie

3.1 Werkstoffeigenschaften

(1) Die Werkstoffeigenschaften der Stähle sind der einschlägigen Anwendungsnorm zu entnehmen.

(2) Wenn Werkstoffe mit nichtlinearer Spannungsdehnungslinie eingesetzt werden und ein spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis (siehe 8.5) geführt wird, sollte anstelle des Anfangstangentenmoduls E ein reduzierter Wert für den E -Modul eingesetzt werden. Falls kein besseres Verfahren zur Verfügung steht, sollte bei der Berechnung des idealen Beulwiderstandes oder der idealen Beulspannung der zur 0,2 %-Dehngrenze gehörende Sekantenmodul verwendet werden.

(3) Für eine globale numerische Berechnung unter Einschluss der Werkstoffnichtlinearität sollte in allen relevanten Gleichungen als Fließspannung f_y die 0,2 %-Dehngrenze verwendet werden. Die Spannungsdehnungslinie sollte für unlegierte Stähle aus EN 1993-1-5, Anhang C, und für nichtrostende Stähle aus EN 1993-1-4, Anhang C entnommen werden.

(4) Die Werkstoffeigenschaften gelten für Temperaturen bis 150 °C.

ANMERKUNG Im Nationalen Anhang dürfen Informationen zu den Werkstoffeigenschaften bei Temperaturen über 150 °C angegeben werden.

3.2 Bemessungswerte der Abmessungen

(1) Die Wanddicke t der Schale sollte wie in der einschlägigen Anwendungsnorm festgelegt angesetzt werden. Falls keine der vorhandenen Anwendungsnormen auf den gegebenen Fall zutrifft, ist die Nennwandungsdicke, reduziert um den vorgeschriebenen Korrosionsabschlag, zu verwenden.

(2) Die Dickenbereiche, innerhalb derer die Regeln der vorliegenden Norm angewendet werden dürfen, sind in den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 festgelegt.

(3) Als Referenzfläche für die Lasten sollte die Schalenmittelfläche verwendet werden.

(4) Als rechnerischer Schalenradius r sollte der rechtwinklig zur Rotationsachse gemessene Nennradius der Schalenmittelfläche verwendet werden.

(5) Die Regeln der vorliegenden Norm für den Beulsicherheitsnachweis sollten nicht außerhalb der Gültigkeitsbereiche für das Verhältnis r/t angewendet werden, die in Abschnitt 8 oder Anhang D oder in den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 angegeben sind.

3.3 Geometrische Toleranzen und geometrische Imperfektionen

(1) Toleranzwerte für die Abweichungen der Schalengeometrie von den Nennwerten sind, soweit sie Gebrauchstauglichkeitsanforderungen betreffen, in den Ausführungsnormen angegeben. Zu beachtende Abweichungen sind:

- Unrundheit (Abweichung von der Kreisform);
- Exzentrizitäten (Abweichungen von der Stetigkeit der Schalenmittelfläche an Blechstößen, rechtwinklig zur Schale betrachtet);
- örtliche Vorbeulen (örtliche Abweichungen von der Schalenmittelfläche rechtwinklig zu ihr).

ANMERKUNG Die Ausführungsanforderungen sind in EN 1090 festgelegt, an dieser Stelle wird jedoch wegen der kritischen Beziehung zwischen der Form der Toleranzen, der Größe des Toleranzmaßes und dem zu bestimmenden Widerstand der Schalenstruktur eine genauere Beschreibung dieser Toleranzen gegeben.

(2) Wenn der Grenzzustand Beulen (LS3, siehe 4.1.3) einer der zu beachtenden Grenzzustände der Tragfähigkeit ist, sind zusätzliche beulrelevante geometrische Toleranzwerte einzuhalten, um die geometrischen Imperfektionen innerhalb festgelegter Grenzen zu halten. Diese beulrelevanten geometrischen Toleranzwerte sind in Abschnitt 8 oder in den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 quantifiziert.

(3) Rechenwerte für die Abweichungen der Schalenmittelfläche von der Nenngeometrie, wie sie als Annahmen für geometrische Ersatzimperfektionen (Gesamtimperfektionen oder örtliche Imperfektionen) für den numerisch gestützten Beulsicherheitsnachweis mittels globaler GMNIA-Berechnung (siehe 8.7) benötigt werden, sollten aus den festgelegten geometrischen Toleranzen abgeleitet werden. Entsprechende Regeln sind in 8.7 oder in den einschlägigen Anwendungsteilen von EN 1993 angegeben.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

4 Grenzzustände der Tragfähigkeit in stählernen Schalen

4.1 Zu beachtende Grenzzustände

4.1.1 LS1: Plastische Grenze oder Zugbruch

(1) Als Grenzzustand „Plastische Grenze“ sollte derjenige Zustand betrachtet werden, in dem die Fähigkeit der Struktur, ihren Einwirkungen zu widerstehen, infolge Werkstofffließens erschöpft ist. Der in diesem Grenzzustand von der Struktur geleistete Widerstand darf aus einem plastischen Kollapsmechanismus hergeleitet werden, der auf einer Theorie kleiner Verformungen beruht.

(2) Im Rahmen von LS1 sollte auch derjenige Zustand betrachtet werden, in dem die Schalenwandung durch ihre gesamte Dicke hindurch infolge von Zugbeanspruchung reißt, so dass die beiden Teile der Schale getrennt werden. Er wird „Zugbruch“ genannt.

(3) Bei Abwesenheit von Löchern für Verbindungsmittel darf der Grenzzustand Zugbruch als durch den Grenzzustand Plastische Grenze abgedeckt betrachtet werden. Sind jedoch Löcher für Verbindungsmittel vorhanden, so sollte ein zusätzlicher Tragsicherheitsnachweis nach EN 1993-1-1, 6.2, geführt werden.

(4) Beim Tragsicherheitsnachweis gegen den Grenzzustand LS1 darf plastisches oder teilplastisches Verhalten der Struktur angenommen werden (d. h. elastische Kompatibilität darf vernachlässigt werden).

ANMERKUNG Der grundlegende Charakter dieses Grenzzustandes ist, dass die getragenen Lasten oder Einwirkungen (der Widerstand) nicht erhöht werden können, ohne eine erhebliche Veränderung der Strukturgeometrie in Kauf zu nehmen oder die Verfestigungsreserven des Werkstoffes auszunutzen.

(5) Beim Nachweis von Grenzzustand LS1 sollten alle relevanten Lastkombinationen beachtet werden.

(6) Bei der Berechnung der Bemessungsspannungen und -schnittgrößen für den Nachweis von Grenzzustand LS1 sollte(n) eines oder mehrere der folgenden Berechnungskonzepte (siehe 2.2) angewendet werden:

- Membrantheorie;
- Gleichungen in den Anhängen A und B;
- lineare elastische Berechnung (LA);
- materiell nichtlineare Berechnung (MNA);
- geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA).

4.1.2 LS2: Zyklisches Plastizieren

(1) Als Grenzzustand „Zyklisches Plastizieren“ sollte derjenige Zustand betrachtet werden, in dem wiederholte Belastungs- und Entlastungszyklen Zug- und Druckfließen an derselben Stelle erzeugen, so dass im Tragwerk wiederholt plastische Arbeit geleistet wird, was schließlich zu örtlichen Rissen infolge Erschöpfung der Kapazität des Werkstoffes zur Energieabsorption führt.

ANMERKUNG Zu den Spannungen, die diesen Grenzzustand beschreiben, tragen alle Einwirkungen und Kompatibilitätsbedingungen des Tragwerks bei.

(2) Alle veränderlichen Einwirkungen (z. B. Nutzlasten und Temperaturgradienten), die zum Fließen führen und mit mehr als drei Lastspielen während der Lebensdauer der Struktur auftreten können, sollten beim Nachweis des Grenzzustandes LS2 berücksichtigt werden.

(3) Bei der Verifizierung dieses Grenzzustandes sollte die Verträglichkeit der Verformungen unter elastischen oder elastisch-plastischen Bedingungen berücksichtigt werden.

(4) Bei der Berechnung der Bemessungsspannungen und -schnittgrößen für den Nachweis von Grenzzustand LS2 sollte(n) eines oder mehrere der folgenden Berechnungskonzepte (siehe 2.2) angewendet werden:

- Formeln in Anhang C;
- elastische Berechnung (LA oder GNA);
- MNA- oder GMNA-Berechnung zur Bestimmung der plastischen Dehnungsscheingbreite.

(5) Versagen durch Kurzzeitermüdung (en: Low cycle fatigue) darf als ausgeschlossen gelten, wenn die in dieser Norm spezifizierten Nachweise geführt wurden.

4.1.3 LS3: Beulen

(1) Als Grenzzustand „Beulen“ sollte derjenige Zustand betrachtet werden, in dem das gesamte Tragwerk oder Teile davon plötzlich große Verformungen rechtwinklig zur Schalenmittelfläche entwickeln, verursacht durch Stabilitätsverlust unter Druck- oder Schub-Membranspannungen in der Schalenwandung, was zur Unfähigkeit, jegliche Erhöhung der Schnittgrößen zu ertragen, und daher möglicherweise zum Versagen des gesamten Tragwerks führt.

(2) Bei der Berechnung der Bemessungsspannungen und -schnittgrößen für den Nachweis von Grenzzustand LS3 sollte(n) eines oder mehrere der folgenden Berechnungskonzepte (siehe 2.2) angewendet werden:

- Membrantheorie, nur für axialsymmetrische Bedingungen (zu Ausnahmen siehe einschlägige Anwendungsteile von EN 1993);
- Formeln in Anhang A;
- lineare elastische Berechnung (LA), die für Spannungsberechnungen unter allgemeinen Belastungsbedingungen als Mindestforderung anzusehen ist (es sei denn, der betreffende Lastfall ist in Anhang A angegeben);
- lineare elastische Verzweigungsberechnung (LBA), die für Schalen unter allgemeinen Belastungsbedingungen gefordert ist, falls der ideale Beulwiderstand verwendet werden soll;
- materiell nichtlineare Berechnung (MNA), die für Schalen unter allgemeinen Belastungsbedingungen gefordert ist, falls der plastische Referenzwiderstand verwendet werden soll;
- GMNIA-Berechnung in Kombination mit MNA-, LBA- und GMNA-Berechnung und unter Anwendung geeigneter Ersatzimperfektionen und zu ermittelnder Kalibrierungsfaktoren.

(3) Beim Nachweis des Grenzzustandes LS3 sollten alle relevanten Lastkombinationen, die Druck- oder Schub-Membranspannungen in der Schale erzeugen, berücksichtigt werden.

(4) Da die Tragfähigkeit im Grenzzustand LS3 stark von der Qualität der Herstellung abhängt, sollten beim Nachweis die entsprechenden Anforderungen an die Ausführungstoleranzen beachtet werden.

ANMERKUNG Zu diesem Zweck werden drei Klassen für die geometrischen Toleranzen festgelegt, so genannte Herstelltoleranz-Qualitätsklassen sind in Abschnitt 8 angegeben.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

4.1.4 LS4: Ermüdung

(1) Als Grenzzustand „Ermüdung“ sollte derjenige Zustand betrachtet werden, in dem wiederholte Zyklen von zu- und abnehmenden Spannungen zur Entstehung von Ermüdungsrissen führen.

(2) Bei der Berechnung der Bemessungsspannungen und -schnittgrößen für den Nachweis von Grenzzustand LS4 sollten folgende Berechnungskonzepte (siehe 2.2) angewendet werden:

- Formeln in Anhang C, zusammen mit Spannungskonzentrationsfaktoren;
- elastische Berechnung (LA oder GNA), zusammen mit Spannungskonzentrationsfaktoren.

(3) Alle veränderlichen Einwirkungen, die nach dem relevanten Einwirkungsspektrum in EN 1991 in Übereinstimmung mit dem entsprechenden Anwendungsteil von EN 1993-3 oder EN 1993-4 mit mehr als N_f -Zyklen während der Bemessungslbensdauer des Tragwerks auftreten, sollten beim Nachweis des Grenzzustandes LS4 berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Der Wert von N_f darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $N_f = 10\,000$ empfohlen.

4.2 Konzepte für den Tragsicherheitsnachweis von Schalen

4.2.1 Allgemeines

(1) Der Tragsicherheitsnachweis gegen die Grenzzustände der Tragfähigkeit sollte nach einem der folgenden Konzepte geführt werden:

- spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis;
- direkter Tragsicherheitsnachweis mit Hilfe von Bemessungsformeln;
- numerisch gestützter Tragsicherheitsnachweis durch globale Berechnung (z. B. mit Hilfe von Computerprogrammen auf der Grundlage der Finite-Elemente-Methode).

(2) Es sollte beachtet werden, dass die von verschiedenen Spannungskomponenten in der Schale verursachten elasto-plastischen Werkstoffbeanspruchungen unterschiedliche Auswirkungen auf die Versagensarten und die Grenzzustände der Tragfähigkeit haben. Die Spannungskomponenten sollten daher Spannungskategorien mit unterschiedlichen Grenzen zugeordnet werden. Spannungen, die von der Schale aufgebaut werden, um Gleichgewichtsbedingungen einzuhalten, sind als signifikanter anzusehen als Spannungen, die aus Verformungszwängen rechtwinklig zur Schale entstehen. Örtliche Spannungsspitzen aus Kerbwirkungen an konstruktiven Details dürfen als vernachlässigbar in ihrem Einfluss auf den Widerstand gegen statische Belastung angesehen werden.

(3) Als Spannungskategorien für den spannungsbasierten Tragsicherheitsnachweis werden Primärspannungen, Sekundärspannungen und Lokalspannungen eingeführt. Primär- und Sekundärspannungen dürfen, falls sinnvoll, durch Schnittgrößen ersetzt werden.

(4) In einer globalen Berechnung tritt an die Stelle der Primär- und Sekundärspannungen die rechnerische Grenzlast und bei zyklischer Belastung die Dehnungsschwingbreite.

(5) Im Allgemeinen darf angenommen werden, dass Primärspannungen den Grenzzustand LS1 kontrollieren, dass LS3 in hohem Maße von den Primärspannungen abhängig ist, von den Sekundärspannungen jedoch beeinflusst werden kann, dass LS2 von der Kombination der Primär- und Sekundärspannungen abhängt und dass Lokalspannungen den Grenzzustand LS4 dominieren.

4.2.2 Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis

4.2.2.1 Allgemeines

(1) Wenn das Konzept des spannungsbasierten Tragsicherheitsnachweises angewendet wird, sollten die Grenzzustände mit Hilfe der drei Spannungskategorien Primär-, Sekundär- und Lokalspannungen formuliert werden. Die Kategorisierung erfolgt in der Regel auf der Basis der von Mises-Vergleichsspannung in einem Punkt, allerdings nicht bei den Beulspannungen.

4.2.2.2 Primärspannungen

(1) Als Primärspannungen gelten die Spannungen, die für das Gleichgewicht mit den aufgetragenen Belastungen erforderlich sind. Sie dürfen an jedem realistischen, statisch zulässigen System berechnet werden. Der Grenzzustand Plastische Grenze (LS1) sollte als erreicht betrachtet werden, wenn die Primärspannungen an einer ausreichenden Anzahl von Punkten durch die Wanddicke hindurch die Streckgrenze erreicht haben, so dass nur die Verfestigungsreserve des Werkstoffes oder eine Veränderung der Schalengeometrie eine weitere Vergrößerung des Schalenwiderstandes liefern würde.

(2) Der Ermittlung der Primärspannungen darf ein beliebiges System von Schnittgrößen zu Grunde gelegt werden, sofern es nur konsistent mit den Gleichgewichtsbedingungen des Tragwerks ist. Dabei dürfen auch die Vorteile der Plastizitätstheorie genutzt werden. Die Primärspannungen dürfen auch einer linearen elastischen Berechnung (LA) entnommen werden, da diese die Gleichgewichtsbedingungen a priori erfüllt. Im Übrigen darf auch jedes der in 5.3 genannten Berechnungskonzepte zu Grunde gelegt werden.

(3) Da eine Grenzlastermittlung für LS1 volles Durchplastizieren des Querschnitts erlaubt, dürfen die Primärspannungen aus Biegemomenten näherungsweise mit Hilfe des plastischen Widerstandsmomentes berechnet werden, siehe 6.2.1. Falls Interaktionen zwischen Schnittgrößen in einem Querschnitt auftreten, dürfen entsprechende Regeln, die auf der von Mises-Fließhypothese basieren, angewendet werden.

(4) Die Primärspannungen sollten auf den Bemessungswert der Streckgrenze begrenzt werden, siehe Abschnitt 6 (LS1).

4.2.2.3 Sekundärspannungen

(1) In statisch unbestimmten Tragwerken sollten die durch innere Kompatibilität und Kompatibilität mit den Randbedingungen verursachten Sekundärspannungen beachtet werden, die infolge aufgetragener Lasten oder aufgetragener Verschiebungen (Temperatur, Vorspannung, Setzung, Schrumpfen) entstehen.

ANMERKUNG Bei Annäherung an den von Mises-Fließzustand wachsen die Strukturverformungen ohne weitere Vergrößerung der Spannungen.

(2) Wenn eine zyklische Belastung Plastizieren verursacht und mehrere Lastzyklen auftreten, sollte eine mögliche Widerstandsabminderung durch die Sekundärspannungen in Betracht gezogen werden. Wenn die zyklische Belastung groß genug ist, um sowohl unter Maximallast als auch nach Entlastung Fließen zu verursachen, sollte ein mögliches Versagen durch zyklisches Plastizieren infolge der Sekundärspannungen in Betracht gezogen werden.

(3) Wenn zur Spannungsermittlung eine lineare elastische Berechnung durchgeführt wird, die alle Kompatibilitätsbedingungen beachtet (Randeffekte, Knotenlinien, veränderliche Wanddicken usw.), dürfen die linear durch die Dicke veränderlichen Spannungen als Summe der Primär- und Sekundärspannungen in einen Nachweis eingeführt werden, dem die von Mises-Fließhypothese zu Grunde liegt, siehe 6.2.

ANMERKUNG Die Sekundärspannungen werden niemals getrennt von den Primärspannungen benötigt.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

(4) Die Sekundärspannungen sollten wie folgt begrenzt werden:

- Die Summe der Primär- und Sekundärspannungen (einschließlich Biegespannungen) sollte für den Grenzzustand des zyklischen Plastizierens (LS2, siehe Abschnitt 7) auf $2f_{yd}$ begrenzt werden.
- Die Membrankomponente der Summe der Primär- und Sekundärspannungen sollte durch den Bemessungsbeulwiderstand (LS3, siehe Abschnitt 8) begrenzt werden.
- Die Summe der Primär- und Sekundärspannungen (einschließlich Biegespannungen) sollte für den Grenzzustand der Ermüdung (LS4, siehe Abschnitt 9) auf die Ermüdungsfestigkeit begrenzt werden.

4.2.2.4 Lokalspannungen

(1) Örtliche Spannungsspitzen in der Schalenwandung infolge von Kerbwirkungen (Löcher, Schweißnähte, Dickensprünge, Befestigungen, Anschlüsse) sollten beim Nachweis des Grenzzustandes Ermüdung (LS4) berücksichtigt werden.

(2) Für die in EN 1993-1-9 aufgelisteten konstruktiven Details dürfen dem Ermüdungssicherheitsnachweis die linearen elastischen Nennspannungen (Summe der Primär- und Sekundärspannungen) an der entsprechenden Stelle zu Grunde gelegt werden. Für alle anderen konstruktiven Details dürfen die Lokalspannungen auch mit Hilfe von Spannungskonzentrationsfaktoren (Kerbfaktoren) aus den Spannungen einer LA-Berechnung ermittelt werden.

(3) Die Lokalspannungen sollten entsprechend den in Abschnitt 9 angegebenen Anforderungen des Ermüdungssicherheitsnachweises (LS4) begrenzt werden.

4.2.3 Direkter Tragsicherheitsnachweis

(1) Wenn das Konzept des direkten Tragsicherheitsnachweises angewendet wird, dürfen die Grenzzustände mit Hilfe von Bemessungsformeln formuliert werden, die entweder aus der Membrantheorie oder aus der Theorie plastischer Mechanismen oder aus der linearen elastischen Schalentheorie hergeleitet wurden.

(2) Die membrantheoretischen Formeln in Anhang A dürfen zur Ermittlung der Primärspannungen für die Grenzzustände LS1 und LS3 verwendet werden.

(3) Die plastizitätstheoretischen Formeln in Anhang B dürfen zur Ermittlung der plastischen Grenzlast für den Grenzzustand LS1 verwendet werden.

(4) Die schalentheoretischen Formeln (LA) in Anhang C dürfen zur Ermittlung der Summen aus Primär- und Sekundärspannungen für die Grenzzustände LS2 und LS4 verwendet werden. Ein Beulsicherheitsnachweis (Grenzzustand LS3) darf auf den Membrananteilen dieser Formeln beruhen.

4.2.4 Numerisch gestützter Tragsicherheitsnachweis

(1) Wenn das Konzept des numerisch gestützten Tragsicherheitsnachweises mittels globaler Berechnung angewendet werden soll, sollten die Grenzzustände mit Hilfe eines der in 2.2 festgelegten alternativen Berechnungskonzepte, angesetzt auf die vollständige Struktur, formuliert werden (Ausnahme: Membrantheorie).

(2) Eine lineare elastische Berechnung (LA) darf zur Ermittlung von Spannungen oder Schnittgrößen für die Grenzzustände LS2 und LS4 verwendet werden. Der Membrananteil der LA-Spannungen darf für den Grenzzustand LS3 verwendet werden. Eine LA-Berechnung darf auch für den Grenzzustand LS1 verwendet werden, sie liefert jedoch nur einen angenäherten Schätzwert, und ihre Ergebnisse sollten nach den in Abschnitt 6 angegebenen Regeln interpretiert werden.

(3) Eine lineare elastische Verzweigungsberechnung (LBA) darf zur Ermittlung des idealen Beulwiderstandes des Tragwerks für den Grenzzustand LS3 verwendet werden.

(4) Eine materiell nichtlineare Berechnung (MNA) darf zur Ermittlung des plastischen Referenzwiderstandes für den Grenzzustand LS1 verwendet werden. Unter zyklischen Belastungsbedingungen darf eine MNA-Berechnung zur Ermittlung des plastischen Dehnungsinkrements für den Grenzzustand LS2 verwendet werden. Der plastische Referenzwiderstand wird außerdem im Rahmen des Beulsicherheitsnachweises Grenzzustand LS3 benötigt und darf mit Hilfe einer MNA-Berechnung ermittelt werden.

(5) Geometrisch nichtlineare elastische Berechnungen (GNA und GNIA) umfassen zwar die Berücksichtigung der Schalenverformungen, jedoch lässt keine der in Abschnitt 8 festgelegten Nachweismethoden zu, diese ohne eine GMNIA-Berechnung anzuwenden. Zur Ermittlung der elastischen Beullast der perfekten Schale darf eine GNA-Berechnung verwendet werden. Zur Ermittlung der elastischen Beullast der imperfekten Schale darf eine GNIA-Berechnung verwendet werden.

(6) Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnungen (GMNA, GMNIA) dürfen zur Ermittlung von Kollapslasten der perfekten Schale (GMNA) bzw. der imperfekten Schale (GMNIA) verwendet werden. Die GMNA-Berechnung darf, wie in 6.3 näher beschrieben, für den Nachweis des Grenzzustandes LS1 verwendet werden. Die GMNIA-Kollapslast darf unter zusätzlicher Berücksichtigung der GMNA-Kollapslast, wie in 8.7 näher beschrieben, für den Nachweis des Grenzzustandes LS3 verwendet werden. Unter zyklischen Belastungsbedingungen darf das plastische Dehnungsinkrement aus einer GMNA-Berechnung für den Grenzzustand LS2 verwendet werden.

5 Schnittgrößen und Spannungen in Schalen

5.1 Schnittgrößen in Schalen

(1) Grundsätzlich sollten alle acht Schnittgrößen an jedem Punkt der Schalenwandung berechnet werden, und die Formulierung jedes Grenzzustandes sollte sie alle berücksichtigen. Jedoch sind die Schubspannungen τ_{xn} , $\tau_{\theta n}$ infolge der Querkräfte q_{xn} , $q_{\theta n}$ in fast allen praktischen Fällen so klein im Vergleich zu den anderen Spannungskomponenten, dass sie in der Regel bei der Bemessung vernachlässigt werden können.

(2) Demzufolge darf für Bemessungszwecke die Formulierung der Grenzzustände nur auf den sechs Schalenschnittgrößen n_x , n_θ , $n_{x\theta}$, m_x , m_θ , $m_{x\theta}$ basiert werden. Für Rotationsschalen mit ausschließlich axialsymmetrischer Belastung und Auflagerung werden nur n_x , n_θ , m_x und m_θ benötigt.

(3) Bei Zweifeln hinsichtlich des Spannungswertes, der in einen der Tragsicherheitsnachweise einzuführen ist, sollte die von Mises-Vergleichsspannung an der Schalenoberfläche verwendet werden.

5.2 Modellierung der Schale für die Berechnung

5.2.1 Geometrie

(1) Die Schale sollte durch ihre Mittelfläche beschrieben werden.

(2) Als Krümmungsradius sollte dessen Nennwert verwendet werden. Imperfektionen dürfen vernachlässigt werden, mit Ausnahme der in Abschnitt 8 angegebenen Regeln für den Grenzzustand Beulen (LS3).

(3) Eine aus Schalensegmenten zusammengesetzte Schale sollte nicht für die Berechnung in die einzelnen Segmente zerlegt werden, es sei denn, die Randbedingungen jedes Segmentes werden so gewählt, dass ihre gegenseitige Beeinflussung auf der sicheren Seite wiedergegeben wird.

(4) Ein Basisring, der dafür gedacht ist, örtliche Auflagerkräfte in die Schale einzuleiten, sollte beim Beulsicherheitsnachweis (LS3) nicht von ihr getrennt werden.

(5) Exzentrizitäten und Sprünge in der Schalenmittelfläche sollten im Berechnungsmodell berücksichtigt werden, wenn sie als Folge der exzentrisch weitergeleiteten Membrankräfte signifikante Biegeeffekte erzeugen.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

- (6) An Knotenlinien zwischen Schalensegmenten sollten eventuelle Exzentrizitäten zwischen den Mittelflächen der Schalensegmente bei der Modellierung erfasst werden.
- (7) Ringsteifen sollten als diskrete Tragelemente der Schale behandelt werden, es sei denn, ihr Abstand ist kleiner als $1,5\sqrt{rt}$.
- (8) Eine mit diskreten Längssteifen versteifte Schale darf als orthotrope Schale behandelt werden, wenn der Abstand der Steifen nicht größer als $5\sqrt{rt}$ ist.
- (9) Eine Schale mit profilierter Wandung (Wellen vertikal oder horizontal) darf als orthotrope Schale behandelt werden, wenn die Wellenlänge kleiner als $0,5\sqrt{rt}$ ist.
- (10) Eine Öffnung in der Schalenwandung darf bei der Modellierung vernachlässigt werden, wenn ihre größte Abmessung kleiner als $0,5\sqrt{rt}$ ist.
- (11) Die Gesamtstabilität des vollständigen Tragwerks sollte nach den im zutreffenden Teil 3-1, Teil 3-2, Teil 4-1, Teil 4-2 oder Teil 4-3 von EN 1993 angegebenen Regeln nachgewiesen werden.

5.2.2 Randbedingungen

- (1) Bei den Berechnungen für die Formulierung von Grenzzuständen sollten die zutreffenden Randbedingungen aus Tabelle 5.1 verwendet werden. Hinsichtlich spezieller Bedingungen für Beulberechnungen wird auf 8.3 verwiesen.
- (2) Biegeeingspannungen an Schalenrändern dürfen bei einer Modellierung für den Grenzzustand LS1 vernachlässigt, sollten dagegen bei der Modellierung für die Grenzzustände LS2 und LS4 berücksichtigt werden. Für den Grenzzustand LS3 brauchen sie nur bei kurzen Schalen (siehe Anhang D) berücksichtigt zu werden.
- (3) Auflager-Randbedingungen sollten darauf überprüft werden, ob sichergestellt ist, dass sie nicht größere Ungleichmäßigkeiten der übertragenen oder eingeleiteten Kräfte verursachen, insbesondere wenn diese exzentrisch zur Schalenmittelfläche angreifen. In Bezug auf genaue Angaben zur Anwendung dieser Regel auf Silos und Tankbauwerke wird auf die einschlägigen Anwendungsteile von EN 1993 verwiesen.
- (4) Wenn eine globale numerische Berechnung durchgeführt wird, sollte für die Verschiebung v in Umfangsrichtung dieselbe Randbedingung angesetzt werden wie für die Verschiebung w in Normalenrichtung, es sei denn, es liegen besondere Umstände vor, aufgrund derer dies nicht angemessen ist.

Tabelle 5.1 — Randbedingungen für Schalen

Randbedingung Typ	Einfache Bezeichnung	Beschreibung	Verschiebung in Normalenrichtung	Verschiebung in Meridianrichtung	Verdrehung in Meridianrichtung
BC1r	eingespannter Rand	radial unverschieblich meridional unverschieblich biegeeingespannt	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_{\phi} = 0$
BC1f		radial unverschieblich meridional unverschieblich biege gelenkig	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_{\phi} \neq 0$
BC2r		radial unverschieblich meridional verschieblich biegeeingespannt	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_{\phi} = 0$
BC2f	gelenkiger Rand	radial unverschieblich meridional verschieblich biege gelenkig	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_{\phi} \neq 0$
BC3	freier Rand	radial frei meridional frei biege gelenkig	$w \neq 0$	$u \neq 0$	$\beta_{\phi} \neq 0$

ANMERKUNG Die Verschiebung v in Umfangsrichtung ist mit der Verschiebung w in Normalenrichtung eng verbunden, daher werden keine separaten Bedingungen für diese beiden Parameter unterschieden (siehe (4)), allerdings sollten die Werte in Spalte (4) für die Verschiebung v angenommen werden.

5.2.3 Einwirkungen und Umwelteinflüsse

(1) Einwirkungen sollten als in der Schalenmittelfläche wirkend angenommen werden. Lastexzentrizitäten sollten in Form statisch äquivalenter Kräfte und Momente in der Schalenmittelfläche erfasst werden.

(2) Örtliche und kleinflächige Einwirkungen sollten nicht durch äquivalente gleichförmige Lasten ersetzt werden, ausgenommen beim Beulsicherheitsnachweis (LS3) nach Abschnitt 8.

(3) Die Modellierung sollte, sofern relevant, folgende Effekte erfassen:

- örtliche Setzungen unter Schalenwandungen;
- örtliche Setzungen unter Einzelstützen;
- Gleichmäßigkeit/Ungleichmäßigkeit der Auflagerung;
- thermische Differenzen zwischen zwei Seiten einer Schale;
- thermische Differenzen zwischen Innen- und Außenoberfläche einer Schale;
- Windeffekte an Öffnungen und Durchdringungen;
- Windinteraktionseffekte bei Gruppen von Schalentragerwerken;
- Verbindungen mit anderen Tragwerken;
- Bedingungen während der Montage.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

5.2.4 Schnittgrößen und Spannungen

(1) Unter der Voraussetzung, dass das Radius/Dicken-Verhältnis größer als $(r/t)_{\min}$ ist, darf die Schalenkrümmung bei der Berechnung der Schnittgrößen aus den Spannungen in der Schalenwandung vernachlässigt werden.

ANMERKUNG Der Wert von $(r/t)_{\min}$ darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $(r/t)_{\min} = 25$ empfohlen.

5.3 Berechnungskonzepte

(1) Die Berechnung sollte sich auf eines oder mehrere der in Tabelle 5.2 aufgelisteten Berechnungskonzepte stützen. Hinsichtlich der Bedingungen für die Anwendung der einzelnen Berechnungskonzepte wird auf 2.2 verwiesen.

Tabelle 5.2 — Berechnungskonzepte

Berechnungskonzept	Schalentheorie	Werkstoffgesetz	Schalengeometrie
Membrantheorietische Berechnung	Membrangleichgewicht	entfällt	perfekt
Lineare elastische Berechnung (LA)	lineare Biegung und Verzerrung	linear	perfekt
Lineare elastische Verzweigungsberechnung (LBA)	lineare Biegung und Verzerrung	linear	perfekt
Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung (GNA)	nichtlinear	linear	perfekt
Materiell nichtlineare Berechnung (MNA)	linear	nichtlinear	perfekt
Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA)	nichtlinear	nichtlinear	perfekt
Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen (GNIA)	nichtlinear	linear	imperfekt
Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA)	nichtlinear	nichtlinear	imperfekt

6 Grenzzustand Plastische Grenze oder Zugbruch (LS1)

6.1 Bemessungswerte der Einwirkungen

(1) PEs sind die zur ungünstigsten relevanten Lastkombination (einschließlich γ_F - und ψ -Faktoren) gehörenden Bemessungswerte der Einwirkungen zu Grunde zu legen.

(2) Es brauchen nur Einwirkungen, die das Tragwerksgleichgewicht beeinflussen, berücksichtigt zu werden.

6.2 Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis

6.2.1 Bemessungswerte der Spannungen

(1) Obwohl die zu Grunde liegende elastische Berechnung nicht präzise den plastischen Grenzzustand vorhersagen kann, darf sie im Sinne des ersten Plastizitätstheoretischen Traglasttheorems (Statischer Satz –

untere Schranke) verwendet werden, um eine konservative Näherung des plastischen Kollapswiderstandes zu erhalten, der den Grenzzustand LS1 beschreibt, siehe 4.1.1.

(2) Die Fließbedingung nach Ilyushin darf, wie in (6) näher ausgeführt, angewendet werden, da sie dem wirklichen plastischen Kollaps näher kommt als eine simple Ermittlung der elastischen Oberflächenspannung.

(3) Als Bemessungswert $\sigma_{\text{eq,Ed}}$ der Spannung sollte an jedem Punkt des Tragwerks die größte Primärspannung aus einer statischen Berechnung, welche die Gleichgewichtsbedingungen zwischen aufgebrachten Bemessungslasten und inneren Kräften und Momenten einhält, verwendet werden.

(4) Als Primärspannung darf der Maximalwert der für das Gleichgewicht mit den aufgebrachten Lasten erforderlichen Spannungen an einem bestimmten Punkt oder entlang einer Linie in der Schalenstruktur genommen werden.

(5) Bei membrantheoretischer Berechnung darf das resultierende zweidimensionale Feld der Schnittgrößen $n_{x,\text{Ed}}$, $n_{\theta,\text{Ed}}$ und $n_{x\theta,\text{Ed}}$ wie folgt in eine Bemessungs-Vergleichsspannung $\sigma_{\text{eq,Ed}}$ umgerechnet werden:

$$\sigma_{\text{eq,Ed}} = \frac{1}{t} \sqrt{n_{x,\text{Ed}}^2 + n_{\theta,\text{Ed}}^2 - n_{x,\text{Ed}} \cdot n_{\theta,\text{Ed}} + 3 n_{x\theta,\text{Ed}}^2} \quad (6.1)$$

(6) Bei LA- oder GNA-Berechnung darf das resultierende zweidimensionale Feld der Primärspannungen wie folgt in eine von Mises-Bemessungs-Vergleichsspannung umgerechnet werden:

$$\sigma_{\text{eq,Ed}} = \sqrt{\sigma_{x,\text{Ed}}^2 + \sigma_{\theta,\text{Ed}}^2 - \sigma_{x,\text{Ed}} \cdot \sigma_{\theta,\text{Ed}} + 3 (\tau_{x\theta,\text{Ed}}^2 + \tau_{xn,\text{Ed}}^2 + \tau_{\theta n,\text{Ed}}^2)} \quad (6.2)$$

mit

$$\sigma_{x,\text{Ed}} = \frac{n_{x,\text{Ed}}}{t} \pm \frac{m_{x,\text{Ed}}}{(t^2/4)}, \quad \sigma_{\theta,\text{Ed}} = \frac{n_{\theta,\text{Ed}}}{t} \pm \frac{m_{\theta,\text{Ed}}}{(t^2/4)} \quad (6.3)$$

$$\tau_{x\theta,\text{Ed}} = \frac{n_{x\theta,\text{Ed}}}{t} \pm \frac{m_{x\theta,\text{Ed}}}{(t^2/4)}, \quad \tau_{xn,\text{Ed}} = \frac{q_{xn,\text{Ed}}}{t}, \quad \tau_{\theta n,\text{Ed}} = \frac{q_{\theta n,\text{Ed}}}{t} \quad (6.4)$$

ANMERKUNG 1 Die vorstehenden Ausdrücke liefern eine vereinfachte konservative Vergleichsspannung für Bemessungszwecke.

ANMERKUNG 2 Die Werte von $\tau_{xn,\text{Ed}}$ und $\tau_{\theta n,\text{Ed}}$ sind üblicherweise sehr klein und haben keinen Einfluss auf den plastischen Widerstand, so dass sie in der Regel außer Acht gelassen werden können.

6.2.2 Bemessungswerte des Widerstandes

(1) Die von Mises-Grenz-Vergleichsspannung sollte wie folgt ermittelt werden:

$$f_{\text{eq,Rd}} = f_{\text{yd}} = f_{\text{yk}} / \gamma_{\text{M0}} \quad (6.5)$$

(2) Der Teilsicherheitsbeiwert γ_{M0} für den Widerstand sollte der einschlägigen Anwendungsnorm entnommen werden.

(3) Falls für die vorliegende Konstruktion keine Anwendungsnorm existiert oder die einschlägige Anwendungsnorm die relevanten Werte von γ_{M0} nicht festlegt, sollte der Wert von γ_{M0} EN 1993-1-1 entnommen werden.

(4) Falls der Werkstoff eine nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Kurve zeigt, sollte als charakteristischer Wert der Streckgrenze f_{yk} die 0,2 %-Dehngrenze angesetzt werden.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

(5) Der Einfluss von Löchern für Verbindungsmittel sollte für Zugbeanspruchung nach EN 1993-1-1, 6.2.3 und für Druckbeanspruchung nach EN 1993-1-1, 6.2.4 erfasst werden. Beim Zugspannungsnachweis sollte der Widerstand auf dem Bemessungswert der Zugfestigkeit f_{ud} beruhen.

6.2.3 Begrenzung der Spannungen

(1)P Die Bemessungsspannungen müssen die folgende Bedingung erfüllen:

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd} \quad (6.6)$$

6.3 Numerisch gestützter Tragsicherheitsnachweis mittels globaler MNA- oder GMNA-Berechnung

(1)P Der Bemessungswert des plastischen Grenzwiderstandes ist als Lastfaktor r_R , bezogen auf die Bemessungswerte F_{Ed} der für den betrachteten Lastfall maßgebenden Einwirkungskombination, zu ermitteln.

(2) Die Bemessungswerte F_{Ed} der Einwirkungen sollten nach 6.1 bestimmt werden. Die relevanten Lastfälle sollten den maßgebenden Einwirkungskombinationen entsprechend formuliert werden.

(3) In einer MNA- oder GMNA-Berechnung, basierend auf dem Bemessungswert der Streckgrenze f_{yd} , sollten die Bemessungswerte der Einwirkungen nach (2) auf die Schale aufgebracht und dann sukzessive so lange um den Lastfaktor r_R erhöht werden, bis der plastische Grenzzustand erreicht ist.

(4) Wenn eine MNA-Berechnung durchgeführt wird, darf der größte unter Vernachlässigung der Werkstoffverfestigung in der Berechnung erreichte Wert als Lastverhältnis $r_{R,MNA}$ verwendet werden. Dieses Lastverhältnis wird in 8.7 als bezogener plastischer Referenzwiderstand r_{Rpl} bezeichnet.

(5) Wenn eine GMNA-Berechnung durchgeführt wird und diese eine Höchstlast mit anschließend abfallendem Lastverformungspfad liefert, sollte der Maximalwert zur Bestimmung des Lastverhältnisses $r_{R,GMNA}$ verwendet werden. Liefert die GMNA-Berechnung keine Höchstlast, sondern stattdessen, obwohl ohne Werkstoffverfestigung berechnet, eine stetig steigende Einwirkung-Verschiebung-Beziehung, so sollte das Lastverhältnis $r_{R,GMNA}$ nur so groß angesetzt werden, dass der Maximalwert der in der Schale vorhandenen plastischen von Mises-Vergleichsdehnung nicht größer als $\varepsilon_{mps} = n_{mps} (f_{yd}/E)$ ist.

ANMERKUNG Der Wert von n_{mps} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $n_{mps} = 50$ empfohlen.

(6) Der charakteristische plastische Grenzwiderstand r_{Rk} sollte je nach angewandeter Berechnung entweder als $r_{R,MNA}$ oder als $r_{R,GMNA}$ angesetzt werden.

(7)P Der Bemessungswert des plastischen Grenzwiderstandes F_{Rd} ist wie folgt zu ermitteln:

$$F_{Rd} = F_{Rk} / \gamma_{M0} = \frac{r_{Rk} \cdot F_{Ed}}{\gamma_{M0}} = r_{Rd} \cdot F_{Ed} \quad (6.7)$$

Dabei ist

γ_{M0} der Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand gegen Plastizieren nach 6.2.2.

(8)P Es ist nachzuweisen, dass

$$F_{Ed} \leq F_{Rd} = r_{Rd} \cdot F_{Ed} \text{ oder } r_{Rd} \geq 1 \quad (6.8)$$

6.4 Direkter Tragsicherheitsnachweis

- (1) Für jedes Schalensegment des Tragwerks, das einen Basis-Lastfall aufweist, wie in Anhang A angeführt, sollte die größte unter den Bemessungswerten F_{Ed} der Einwirkungen ermittelte von Mises-Membranspannung $\sigma_{eq,Ed}$ nicht größer als die Grenz-Vergleichsspannung nach 6.2.2 sein.
- (2) Für jedes Schalen- oder Plattensegment des Tragwerks, das einen Basis-Lastfall aufweist, wie in Anhang B aufgeführt, sollten die Bemessungswerte F_{Ed} der Einwirkungen nicht größer sein als der mit dem Bemessungswert der Streckgrenze f_{yd} berechnete Widerstand F_{Rd} .
- (3) Wenn Versagen im Nettoquerschnitt an einer geschraubten Verbindung eines der Bemessungskriterien ist, sollte für jede Verbindung der Bemessungswert F_{Ed} der Einwirkungen berechnet werden. Können die Spannungen durch einen Basis-Lastfall nach Anhang A dargestellt werden und umfasst der resultierende Spannungszustand ausschließlich Membranspannungen, so sollte F_{Ed} nicht größer sein als der mit dem Bemessungswert der Zugfestigkeit f_{ud} berechnete Widerstand F_{Rd} , siehe 6.2.2 (5).

7 Grenzzustand Zyklisches Plastizieren (LS2)

7.1 Bemessungswerte der Einwirkungen

- (1) Falls keine bessere Definition zur Verfügung steht, sollten für jeden Lastfall die charakteristischen Werte derjenigen Einwirkungsanteile, die erwartungsgemäß während der Lebensdauer des Tragwerks mehr als dreimal wiederholt aufgebracht und wieder weggenommen werden, als Bemessungswerte der Einwirkungen gewählt werden.
- (2) Wenn eine elastische Berechnung oder die Formeln aus Anhang C verwendet werden, sollte nur der veränderliche Anteil der Einwirkungen zwischen ihren oberen und unteren Extremwerten berücksichtigt werden.
- (3) Wenn eine materiell nichtlineare computergestützte Berechnung verwendet wird, sollte zusätzlich zum veränderlichen Anteil der Einwirkungen zwischen ihren oberen und unteren Extremwerten auch der gleichzeitig wirkende ständige Anteil der Einwirkungen angesetzt werden.

7.2 Spannungsbasierter Tragsicherheitsnachweis

7.2.1 Bemessungswerte der Spannungsschwingbreite

- (1) Die Schale sollte in einer LA- oder GNA-Berechnung unter den Bemessungswerten F_{Ed} der beiden extremen Einwirkungskombinationen, zwischen denen sich der zyklische Prozess abspielt, durchgerechnet werden. Für jede der beiden extremen Einwirkungskombinationen sind die Spannungskomponenten zu ermitteln. Aus den jeweils zusammengehörigen extremen Spannungswerten sollten die Bemessungswerte der Schwingbreite jeder Spannungskomponente $\Delta\sigma_{x,Ed,i}$, $\Delta\sigma_{\theta,Ed,i}$, $\Delta\tau_{x\theta,Ed,i}$ an jeder Oberfläche (dargestellt als $i = 1, 2$ für die Innen- und die Außenseite der Schale) und an jedem Punkt der Schale ermittelt werden. Aus diesen Spannungsschwingbreiten lassen sich wie folgt die Bemessungswerte der von Mises-Vergleichsspannungsschwingbreiten an der Innen- und der Außenseite der Schale berechnen:

$$\Delta\sigma_{eq,Ed,i} = \sqrt{\Delta\sigma_{x,Ed,i}^2 - \Delta\sigma_{x,Ed,i} \cdot \Delta\sigma_{\theta,Ed,i} + \Delta\sigma_{\theta,Ed,i}^2 + 3 \Delta\tau_{x\theta,Ed,i}^2} \quad (7.1)$$

- (2) Als Bemessungswert $\Delta\sigma_{eq,Ed}$ der Spannungsschwingbreite sollte der größte Wert der von Mises-Vergleichsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{eq,Ed,i}$ bei getrennter Berechnung beider Schalenoberflächen angesetzt werden ($i = 1$ und $i = 2$ werden getrennt betrachtet).

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

(3) An Knotenlinien zwischen Schalensegmenten, wo die Berechnung die theoretische Verbindungslinie der Schalenmittelflächen modelliert und die endliche Größe der Verbindung außer Acht lässt, darf die Spannungsschwingbreite im ersten physikalischen Punkt des Schalensegmentes genommen werden (im Gegensatz zu dem Wert, der an der theoretischen Verbindungslinie der beiden Schalenmittelflächen berechnet wird).

ANMERKUNG Diese Erlaubnis ist von Bedeutung, wenn die Spannung in unmittelbarer Nähe zur Knotenlinie stark veränderlich ist.

7.2.2 Bemessungswerte des Widerstandes

(1) Die von Mises-Grenz-Vergleichsspannungsschwingbreite $\Delta f_{eq,Rd}$ sollte wie folgt bestimmt werden:

$$\Delta f_{eq,Rd} = 2f_{yd} \quad (7.2)$$

7.2.3 Begrenzung der Spannungsschwingbreite

(1)P Die Bemessungs-Spannungsschwingbreite muss die folgende Bedingung erfüllen:

$$\Delta \sigma_{eq,Ed} \leq \Delta f_{eq,Rd} \quad (7.3)$$

7.3 Numerisch gestützter Tragsicherheitsnachweis mittels globaler MNA- oder GMNA-Berechnung

7.3.1 Bemessungswerte der gesamten akkumulierten plastischen Dehnung

(1) In einer MNA- oder GMNA-Berechnung sollten die Bemessungswerte der veränderlichen und ständigen Einwirkungen, wie in 7.1 beschrieben, aufgebracht werden.

ANMERKUNG 1 Zu diesem Zweck wird üblicherweise eine MNA-Berechnung durchgeführt.

ANMERKUNG 2 Im Nationalen Anhang dürfen Empfehlungen für eine verfeinerte Berechnung gegeben werden.

(2) Es sollte die gesamte akkumulierte plastische von Mises-Vergleichsdehnung $\varepsilon_{p,eq,Ed}$ am Ende der Entwurfslebensdauer des Tragwerks ermittelt werden.

(3) Die gesamte akkumulierte plastische von Mises-Vergleichsdehnung darf mit Hilfe einer Berechnung bestimmt werden, in der alle Lastzyklen während der Entwurfslebensdauer modelliert werden.

(4) Falls keine auf diese Weise verfeinerte Berechnung durchgeführt wird, darf die gesamte akkumulierte plastische von Mises-Vergleichsdehnung wie folgt bestimmt werden:

$$\varepsilon_{p,eq,Ed} = n \Delta \varepsilon_{p,eq,Ed} \quad (7.4)$$

Dabei ist

n die Anzahl der Lastspiele während der Entwurfslebensdauer des Tragwerks;

$\Delta \varepsilon_{p,eq,Ed}$ das größte, in der gesamten Schale vorkommende Inkrement der plastischen von Mises-Vergleichsdehnung während eines kompletten Lastspiels nach dem dritten Zyklus.

(5) Es darf angenommen werden, dass mit „an jedem Punkt der Schale“ alle Punkte gemeint sind, die von Kerben oder örtlichen Diskontinuitäten nicht weniger als die größte Blechdicke in der unmittelbaren Umgebung entfernt sind.

7.3.2 Begrenzung der gesamten akkumulierten plastischen Dehnung

(1) Falls kein genauere Tragsicherheitsnachweis gegen Kurzzeitermüdung (Low cycle fatigue) geführt wird, sollte der Bemessungswert der gesamten akkumulierten plastischen von Mises-Vergleichsdehnung $\varepsilon_{p,eq,Ed}$ die folgende Bedingung erfüllen:

$$\varepsilon_{p,eq,Ed} \leq n_{p,eq} (f_{yd}/E) \quad (7.5)$$

ANMERKUNG Der Wert von $n_{p,eq}$ darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $n_{p,eq} = 25$ empfohlen.

7.4 Direkter Tragsicherheitsnachweis

(1) Für jedes Schalensegment des Tragwerks, das einen Basis-Lastfall aufweist, wie in Anhang C aufgeführt, sollte die größte von Mises-Vergleichsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{eq,Ed}$ an einer der beiden Oberflächen unter den Bemessungswerten F_{Ed} der Einwirkungen mit Hilfe der entsprechenden in Anhang C angegebenen Formeln berechnet werden. Das weitere Nachweisverfahren entspricht 7.2.

8 Grenzzustand Beulen (LS3)

8.1 Bemessungswerte der Einwirkungen

(1) PE sind alle relevanten Einwirkungskombinationen, die Druck- oder Schub-Membranspannungen in der Schalenwandung erzeugen, zu untersuchen.

8.2 Spezielle Definitionen und Formelzeichen

(1) Es wird auf die speziellen Beul-Definitionen in 1.3.6 verwiesen.

(2) Zusätzlich zu den in 1.4 definierten Formelzeichen werden in diesem Abschnitt 8 die in den nächstehenden Absätzen (3) und (4) aufgelisteten Formelzeichen verwendet.

(3) Schnittgrößen und Spannungen:

$n_{x,Ed}, \sigma_{x,Ed}$ Bemessungswerte der vorhandenen beulrelevanten Membrannormalkräfte und -spannungen in Meridianrichtung (als Druck positiv);

$n_{\theta,Ed}, \sigma_{\theta,Ed}$ Bemessungswerte der vorhandenen beulrelevanten Membrannormalkräfte und -spannungen in Umfangsrichtung (als Druck positiv);

$n_{x\theta,Ed}, \tau_{x\theta,Ed}$ Bemessungswerte der vorhandenen beulrelevanten Membranschubkräfte und -spannungen.

(4) Widerstandsgrößen für den spannungsbasierten Beulsicherheitsnachweis:

$\sigma_{x,Rcr}$ ideale elastische Meridianbeulspannung;

$\sigma_{\theta,Rcr}$ ideale elastische Umfangsbeulspannung;

$\tau_{x\theta,Rcr}$ ideale elastische Schubbeulspannung;

$\sigma_{x,Rk}$ charakteristische Meridianbeulspannung;

$\sigma_{\theta,Rk}$ charakteristische Umfangsbeulspannung;

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

$\tau_{x\theta,Rk}$	charakteristische Schubbeulspannung;
$\sigma_{x,Rd}$	Bemessungs-Meridianbeulspannung;
$\sigma_{\theta,Rd}$	Bemessungs-Umfangsbeulspannung;
$\tau_{x\theta,Rd}$	Bemessungs-Schubbeulspannung.

ANMERKUNG Dies ist eine spezielle Vereinbarung für die Schalenbemessung, abweichend von derjenigen in EN 1993-1-1.

(5) Vorzeichenvereinbarung für LS3 Druckspannungen und -kräfte in Meridian- und Umfangsrichtung sollten als positiv genommen werden.

8.3 Beulrelevante Randbedingungen

(1) Beim Grenzzustand Beulen sollte den Randbedingungen, die für die inkrementellen Verschiebungen beim Beulvorgang wirksam sind (im Unterschied zu den Vorbeulverschiebungen), besondere Beachtung gewidmet werden. Beispiele baupraktischer Randbedingungen sind in Bild 8.1 zu sehen, in dem die Bezeichnungen nach Tabelle 5.1 verwendet werden.

8.4 Beulrelevante geometrische Toleranzen

8.4.1 Allgemeines

(1) Sofern im einschlägigen Anwendungsteil von EN 1993 keine spezifischen beulrelevanten geometrischen Toleranzen angegeben sind, sollten folgende Toleranz-Grenzwerte eingehalten werden, wenn der Grenzzustand LS3 einer der zu beachtenden Grenzzustände ist.

ANMERKUNG 1 Die hier ermittelten charakteristischen Beulspannungen schließen alle Imperfektionen ein, die auf den Amplituden und Formen der geometrischen Toleranzen beruhen, deren Einhaltung bei der Herstellung vorausgesetzt wird.

ANMERKUNG 2 Die hier vorgeschriebenen geometrischen Toleranzen sind jene, welche bekanntermaßen einen großen Einfluss auf die Tragsicherheit einer Schale haben.

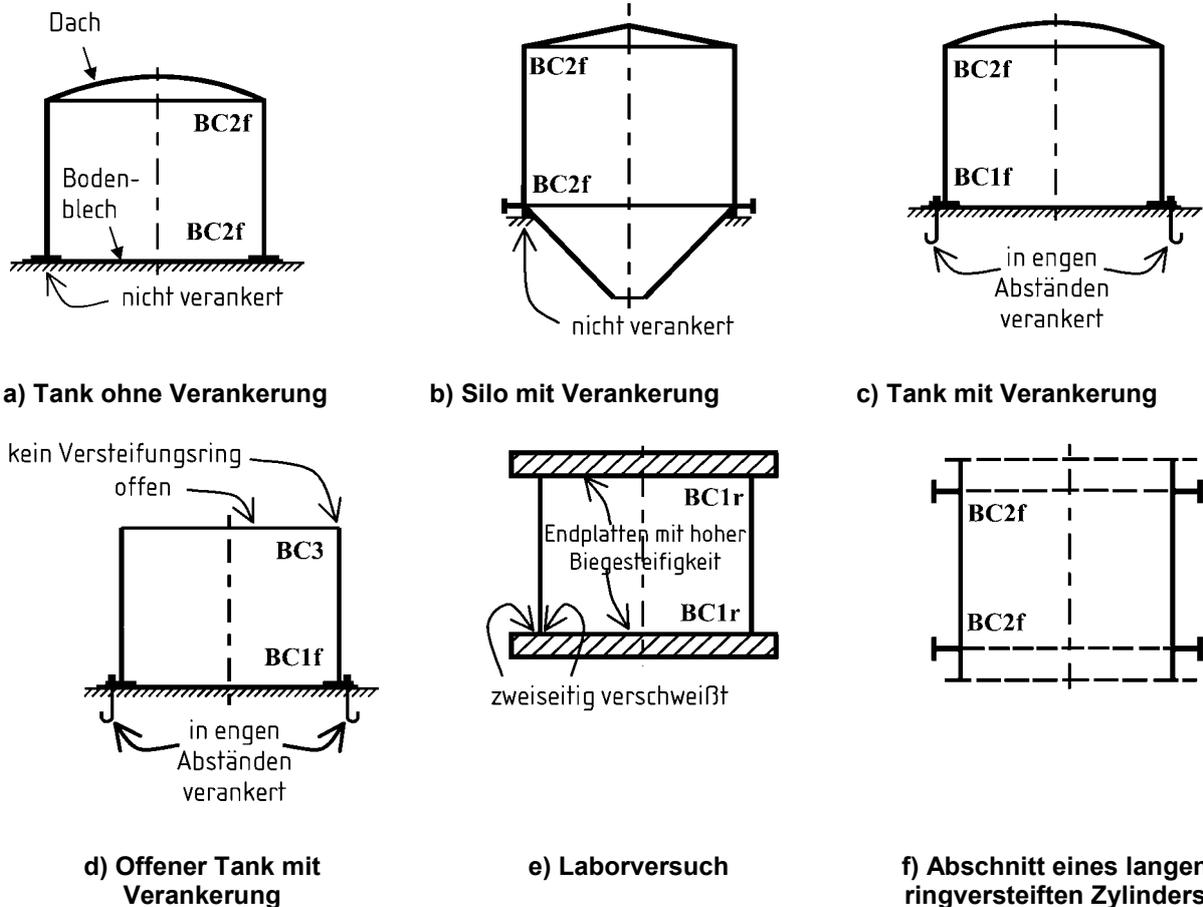


Bild 8.1 — Schematische Beispiele von Randbedingungen für den Grenzzustand LS3

(2) Für die Herstelltoleranz-Qualitätsklasse sollte eine der drei Klassen A, B oder C nach den Toleranzdefinitionen in 8.4.2, 8.4.3, 8.4.4 und 8.4.5 gewählt werden. Diese Klassierung bezieht sich nur auf die Tragsicherheit.

ANMERKUNG Die hier spezifizierten Toleranzen entsprechen denen der Ausführungsnorm EN 1090; sie sind hier jedoch ausführlicher dargestellt, um die Beziehung zwischen den Imperfektionsamplituden und dem ermitteltem Beulwiderstand näher zu erläutern.

(3) Jeder der Toleranztypen sollte separat klassifiziert werden: Die niedrigste Herstelltoleranz-Qualitätsklasse, die eine entsprechend große Toleranz ergibt, gilt dann für die gesamte Bemessung.

(4) Die verschiedenen Toleranztypen dürfen unabhängig voneinander behandelt werden; Interaktionen zwischen ihnen brauchen in der Regel nicht beachtet zu werden.

(5) Es sollte durch repräsentative Stichprobenprüfungen am fertiggestellten Tragwerk nachgewiesen werden, dass die gemessenen Imperfektionen innerhalb der in 8.4.2 bis 8.4.5 festgelegten geometrischen Toleranzen bleiben.

(6) Die stichprobenartigen Imperfektionsmessungen sollten am (mit Ausnahme des Eigengewichts) unbelasteten Tragwerk und, wenn möglich, mit den endgültigen Randbedingungen vorgenommen werden.

(7) Wenn die gemessenen Imperfektionen die in 8.4.2 bis 8.4.4 festgelegten geometrischen Toleranzen nicht einhalten, sollten die eventuell infrage kommenden Korrekturmaßnahmen, wie z. B. Richten, im Einzelfall erwogen und entschieden werden.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

ANMERKUNG Vor einer Entscheidung für Richtmaßnahmen zwecks Reduzierung geometrischer Imperfektionen sollte bedacht werden, dass dies zusätzliche Eigenspannungen zur Folge haben kann. Auch der Ausnutzungsgrad der Grenzbeulspannungen bei der Bemessung sollte berücksichtigt werden.

8.4.2 Toleranz für Unrundheit

(1) Die Unrundheit sollte in Form des Parameters U_r (siehe Bild 8.2) ermittelt werden:

$$U_r = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{nom}}} \quad (8.1)$$

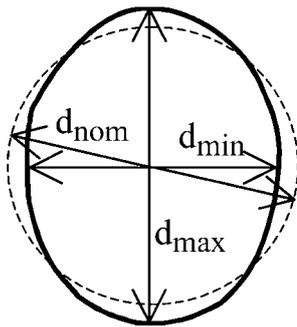
Dabei ist

d_{\max} der größte gemessene Innendurchmesser;

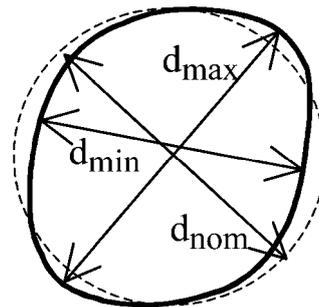
d_{\min} der kleinste gemessene Innendurchmesser;

d_{nom} der Nenn-Innendurchmesser.

(2) Als gemessener Innendurchmesser von einem gegebenen Punkt aus gilt die Entfernung quer durch die Schale hindurch zum weitest entfernten Punkt auf demselben Breitenkreis. Um den Höchst- und Mindestwert eines Breitenkreises zu ermitteln, sollte eine angemessene Anzahl von Durchmessern gemessen werden.



a) Abgeflachte Querschnittsform



b) Unsymmetrische Querschnittsform

Bild 8.2 — Messung der Durchmesser zur Ermittlung der Unrundheit

(3) Der Unrundheitsparameter U_r sollte die folgende Bedingung erfüllen:

$$U_r \leq U_{r,\max} \quad (8.2)$$

Dabei ist

$U_{r,\max}$ der Toleranzgrenzwert des Unrundheitsparameters für die gewählte Herstelltoleranz-Qualitätsklasse.

ANMERKUNG Die Toleranzgrenzwerte des Unrundheitsparameters $U_{r,\max}$ dürfen dem Nationalen Anhang entnommen werden. Die Empfehlungswerte sind in Tabelle 8.1 angegeben.

Tabelle 8.1 — Empfohlene Toleranzgrenzwerte des Unrundheitsparameters $U_{r,max}$

Herstelltoleranz- Qualitätsklasse	Durchmesserbereich	$d \text{ (m)} \leq 0,50 \text{ m}$	$0,50 \text{ m} < d \text{ (m)} < 1,25 \text{ m}$	$1,25 \text{ m} \leq d \text{ (m)}$
	Beschreibung der Qualität	Wert für $U_{r,max}$		
Klasse A	exzellent	0,014	$0,007 + 0,009 \cdot 3 \cdot (1,25 - d)$	0,007
Klasse B	hoch	0,020	$0,010 + 0,013 \cdot 3 \cdot (1,25 - d)$	0,010
Klasse C	normal	0,030	$0,015 + 0,020 \cdot 0 \cdot (1,25 - d)$	0,015

8.4.3 Toleranz für unplanmäßige Exzentrizität

(1) An Stößen in der Schalenwand, die rechtwinklig zu Druckmembrankräften verlaufen, sollte die unplanmäßige Exzentrizität e_a wie folgt aus der messbaren Gesamtexzentrizität e_{tot} und dem planmäßigen Versatz e_{int} ermittelt werden:

$$e_a = e_{tot} - e_{int} \quad (8.3)$$

Dabei ist

e_{tot} die Exzentrizität zwischen den Schalenmittelflächen der beiden verbundenen Bleche, siehe Bild 8.3 c);

e_{int} der planmäßige Versatz zwischen den Schalenmittelflächen der beiden verbundenen Bleche, siehe Bild 8.3 b);

e_a die unplanmäßige Exzentrizität zwischen den Schalenmittelflächen der beiden verbundenen Bleche.

(2) Die unplanmäßige Exzentrizität e_a sollte die für die gewählte Herstelltoleranz-Qualitätsklasse geltende maximal zulässige unplanmäßige Exzentrizität $e_{a,max}$ nicht überschreiten.

ANMERKUNG Werte der maximal zulässigen unplanmäßigen Exzentrizität $e_{a,max}$ dürfen dem Nationalen Anhang entnommen werden. Die Empfehlungswerte sind in Tabelle 8.2 angegeben.

Tabelle 8.2 — Empfehlungswerte für die maximal zulässige unplanmäßige Exzentrizität

Herstelltoleranz- Qualitätsklasse	Beschreibung der Qualität	Empfehlungswerte für die maximal zulässige unplanmäßige Exzentrizität $e_{a,max}$
Klasse A	exzellent	2 mm
Klasse B	hoch	3 mm
Klasse C	normal	4 mm

(3) Die unplanmäßige Exzentrizität e_a sollte außerdem in Form des Parameters U_e beschrieben werden:

$$U_e = \frac{e_a}{t_{av}} \quad \text{oder} \quad U_e = \frac{e_a}{t} \quad (8.4)$$

Dabei ist

t_{av} die mittlere Dicke des dünneren und des dickeren der beiden Bleche an der Verbindung.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

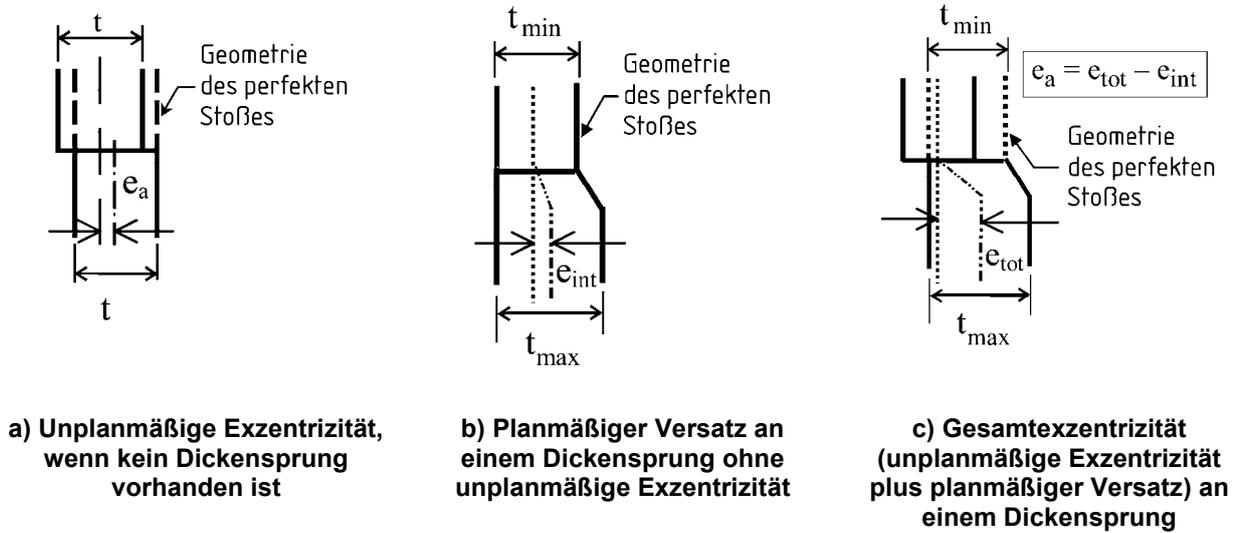


Bild 8.3 — Unplanmäßige Exzentrizität und planmäßiger Versatz an einem Stoß

(4) Der Exzentrizitätsparameter U_e sollte die folgende Bedingung erfüllen:

$$U_e \leq U_{e,max} \tag{8.5}$$

Dabei ist

$U_{e,max}$ der Toleranzgrenzwert des Exzentrizitätsparameters für die gewählte Herstelltoleranz-Qualitätsklasse.

ANMERKUNG 1 Die Toleranzgrenzwerte des Exzentrizitätsparameters $U_{e,max}$ dürfen dem Nationalen Anhang entnommen werden. Die Empfehlungswerte sind in Tabelle 8.3 angegeben.

Tabelle 8.3 — Empfohlene Toleranzgrenzwerte des Exzentrizitätsparameters $U_{e,max}$

Herstelltoleranz-Qualitätsklasse	Beschreibung der Qualität	Empfehlungswert für $U_{e,max}$
Klasse A	exzellent	0,14
Klasse B	hoch	0,20
Klasse C	normal	0,30

ANMERKUNG 2 Der planmäßige Versatz wird in D.2.1.2 behandelt, und Überlappstöße werden in D.3 behandelt. Diese beiden Fälle werden im Rahmen dieser Norm nicht als Imperfektionen angesehen.

8.4.4 Toleranz für Vorbeulen

(1) Zur Messung von Vorbeulen an jedem beliebigen Punkt der Schalenwandung in Meridian- und in Umfangsrichtung sollten Messlehren verwendet werden (siehe Bild 8.4). Die Meridian-Messlehre sollte gerade sein, während die Umfangsmesslehre entsprechend dem Nennkrümmungsradius r der Schalenmittelfläche gekrümmt sein sollte.

(2) Die Tiefe Δw_0 von Vorbeulen in der Schalenwandung sollte mit Hilfe von Messlehren gemessen werden, deren Länge ℓ_g wie folgt zu wählen ist:

- a) Bei Anwesenheit von Meridiandruckspannungen: Messung in Meridian- und Umfangsrichtung, einschließlich über Schweißnähte hinweg, mit

$$\ell_{gx} = 4 \sqrt{r t} \quad (8.6)$$

- b) Bei Anwesenheit von Umfangsdruckspannungen oder Schubspannungen: Messung in Umfangsrichtung mit

$$\ell_{g\theta} = 2,3 (\ell^2 r t)^{0,25}, \text{ aber } \ell_{g\theta} \leq r, \quad (8.7)$$

Dabei ist

ℓ die Meridianlänge des Schalensegmentes.

- c) Zusätzlich über Schweißnähte hinweg: Messung in Meridian- und Umfangsrichtung mit

$$\ell_{gw} = 25 t \text{ oder } \ell_{gw} = 25 t_{\min}, \text{ aber mit } \ell_{gw} \leq 500 \text{ mm} \quad (8.8)$$

Dabei ist

t_{\min} die Dicke des dünneren Bleches an der Naht.

- (3) Die Vorbeultiefe sollte in Form der Parameter U_{0x} , $U_{0\theta}$, U_{0w} beschrieben werden:

$$U_{0x} = \Delta w_{0x} / \ell_{gx} \quad U_{0\theta} = \Delta w_{0\theta} / \ell_{g\theta} \quad U_{0w} = \Delta w_{0w} / \ell_{gw} \quad (8.9)$$

- (4) Die Vorbeulparameter U_{0x} , $U_{0\theta}$, U_{0w} sollten die folgenden Bedingungen erfüllen:

$$U_{0x} \leq U_{0,\max} \quad U_{0\theta} \leq U_{0,\max} \quad U_{0w} \leq U_{0,\max} \quad (8.10)$$

Dabei ist

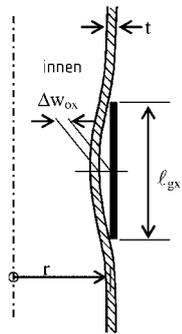
$U_{0,\max}$ der Toleranzgrenzwert des Vorbeulparameters für die gewählte Herstelltoleranz-Qualitätsklasse.

ANMERKUNG Die Toleranzgrenzwerte des Vorbeulparameters $U_{0,\max}$ dürfen dem Nationalen Anhang entnommen werden. Die Empfehlungswerte sind in Tabelle 8.4 angegeben.

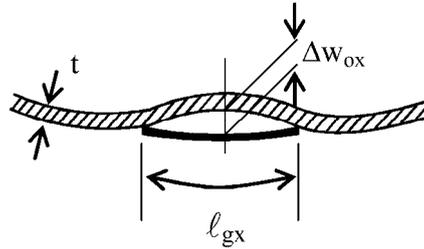
Tabelle 8.4 — Empfohlene Toleranzgrenzwerte des Vorbeulparameters $U_{0,\max}$

Herstelltoleranz-Qualitätsklasse	Beschreibung der Qualität	Empfehlungswert für $U_{0,\max}$
Klasse A	exzellent	0,006
Klasse B	hoch	0,010
Klasse C	normal	0,016

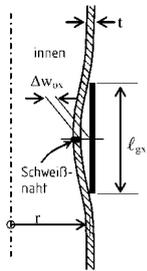
DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)



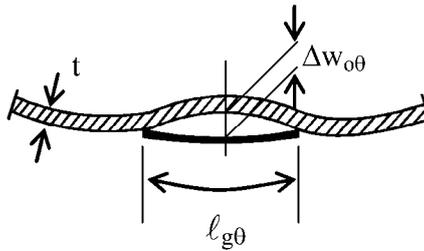
a) Messung entlang eines Meridians (siehe 8.4.4 (2)a)



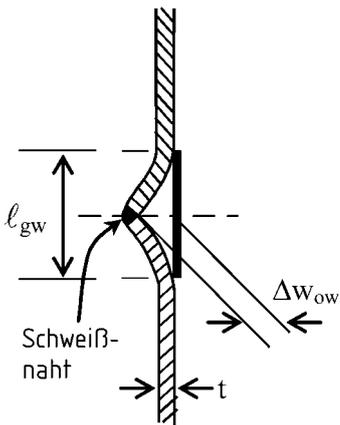
b) Erste Messung entlang einer Umfangslinie (siehe 8.4.4 (2)a)



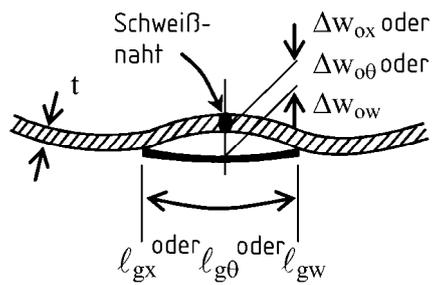
c) Erste Messung entlang eines Meridians über eine Schweißnaht hinweg (siehe 8.4.4 (2)a)



d) Zweite Messung entlang einer Umfangslinie (siehe 8.4.4 (2)b)



e) Zweite Messung über eine Schweißnaht hinweg mit Spezialmesslehre (siehe 8.4.4 (2)c)



f) Messungen entlang einer Umfangslinie über eine Schweißnaht hinweg (siehe 8.4.4 (2)c)

Bild 8.4 — Messung der Vorbeultiefen Δw_0

8.4.5 Toleranz für Auflager-Unebenheit

(1) Wenn ein anderes Tragelement kontinuierlich eine Schale unterstützt (wie z. B. ein Fundament), sollte seine Ebenheitsabweichung örtlich keinen größeren Neigungswinkel in Umfangsrichtung als β_0 aufweisen.

ANMERKUNG Der Wert von β_0 darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\beta_0 = 0,1 \text{ ‰} = 0,001 \text{ rad}$ empfohlen.

8.5 Spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis

8.5.1 Bemessungswerte der Spannungen

(1) Als Bemessungswerte der Spannungen $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$ und $\tau_{x\theta,Ed}$ sollten die maßgebenden Werte der Druck- und Schub-Membranspannungen aus einer linearen elastischen Berechnung (LA) verwendet werden. Bei rein axialsymmetrischen Belastungs- und Auflagerungsbedingungen und in anderen einfachen Lastfällen darf in der Regel auch eine membrantheoretische Berechnung zu Grunde gelegt werden.

(2) Als maßgebende Membranspannungen auf einem Breitenkreis gelten die Maximalwerte jeder Membranspannung auf diesem Breitenkreis, sofern nicht in Anhang D der vorliegenden Norm oder im einschlägigen Anwendungsteil von EN 1993 spezielle Bestimmungen angegeben sind.

ANMERKUNG In einigen Fällen (z. B. Schalenwandung mit abgestufter Dicke unter Umfangsdruckbeanspruchung, siehe D.2.3) sind die maßgebenden Membranspannungswerte fiktiv und können größer sein als die tatsächlichen Maximalwerte.

(3) Für Basis-Lastfälle dürfen die Membranspannungen auch aus Anhang A oder Anhang C entnommen werden.

8.5.2 Bemessungswert des Widerstandes (Beultragfähigkeit)

(1) Der Beulwiderstand sollte in Form von Beulspannungen, wie in 1.3.6 definiert, dargestellt werden. Die Bemessungsbeulspannungen sollten dann wie folgt ermittelt werden:

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1}, \quad \sigma_{\theta,Rd} = \sigma_{\theta,Rk} / \gamma_{M1}, \quad \tau_{x\theta,Rd} = \tau_{x\theta,Rk} / \gamma_{M1} \quad (8.11)$$

(2) Der Teilsicherheitsbeiwert γ_{M1} für den Widerstand sollte der entsprechenden Anwendungsnorm entnommen werden.

ANMERKUNG Der Wert des Teilsicherheitsbeiwerts γ_{M1} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Für den Fall, dass für die vorliegende Konstruktion keine Anwendungsnorm existiert oder die Anwendungsnorm die relevanten Werte von γ_{M1} nicht festlegt, wird empfohlen, den Wert von γ_{M1} nicht kleiner als $\gamma_{M1} = 1,1$ anzusetzen.

(3) Die charakteristischen Beulspannungen sollten durch Multiplikation der charakteristischen Streckgrenze mit den Beul-Abminderungsfaktoren χ wie folgt ermittelt werden:

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x f_{yk}, \quad \sigma_{\theta,Rk} = \chi_\theta f_{yk}, \quad \tau_{x\theta,Rk} = \chi_\tau f_{yk} / \sqrt{3} \quad (8.12)$$

(4) Die Beul-Abminderungsfaktoren χ_x , χ_θ und χ_τ sollten als Funktion der bezogenen Schalenschlankheitsgrade $\bar{\lambda}$ aus folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$\chi = 1 \quad \text{wenn} \quad \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \quad (8.13)$$

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

$$\chi = 1 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta \quad \text{wenn} \quad \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda} < \bar{\lambda}_p \quad (8.14)$$

$$\chi = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}^2} \quad \text{wenn} \quad \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda} \quad (8.15)$$

Dabei ist

- α der elastische Imperfektions-Abminderungsfaktor;
- β der den plastischen Bereich definierende Faktor;
- η der die Beulkurvenform beschreibende Exponent;
- $\bar{\lambda}_0$ der vollplastische Grenzschlankheitsgrad.

ANMERKUNG 1 Die Werte aller dieser Parameter sollten Anhang D entnommen werden. Falls diese Werte nicht in Anhang D festgelegt sind, können sie im Nationalen Anhang angegeben werden.

ANMERKUNG 2 Der Formelausdruck (8.15) beschreibt die elastische Beulspannung unter Berücksichtigung geometrischer Imperfektionen. In diesem Falle können, da sich die Schale vollständig elastisch verhält, die charakteristischen Beulspannungen alternativ wie folgt direkt bestimmt werden: $\sigma_{x,Rk} = \alpha_x \sigma_{x,Rcr}$, $\sigma_{\theta,Rk} = \alpha_\theta \sigma_{\theta,Rcr}$ und $\tau_{x\theta,Rk} = \alpha_\tau \tau_{x\theta,Rcr}$.

(5) Der teilplastische Grenzschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ sollte wie folgt ermittelt werden:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} \quad (8.16)$$

(6) Die bezogenen Schalenschlankheitsgrade für die verschiedenen Spannungskomponenten sollten wie folgt ermittelt werden:

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{x,Rcr}}, \quad \bar{\lambda}_\theta = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{\theta,Rcr}}, \quad \bar{\lambda}_\tau = \sqrt{(f_{yk} / \sqrt{3}) / \tau_{x\theta,Rcr}} \quad (8.17)$$

(7) Die idealen elastischen Beulspannungen $\sigma_{x,Rcr}$, $\sigma_{\theta,Rcr}$ und $\tau_{x\theta,Rcr}$ sollten mit Hilfe der entsprechenden Formeln in Anhang D ermittelt werden.

(8) Falls Anhang D keine geeigneten Formelausdrücke enthält, dürfen die idealen elastischen Beulspannungen aus einer numerischen LBA-Berechnung der Schale unter den in 8.1 festgelegten beulrelevanten Einwirkungskombinationen abgeleitet werden. Zu den Bedingungen, die diese Berechnung erfüllen muss, siehe 8.6.2 (5) und (6).

8.5.3 Begrenzung der Spannungen (Beulsicherheitsnachweis)

(1) Obwohl Beulen kein ausschließlich spannungsinitiiertes Versagensphänomen ist, wird der Grenzzustand Beulen im Rahmen dieses Konzeptes dadurch dargestellt, dass die Bemessungswerte der Membranspannungen begrenzt werden. Der Einfluss der Biegespannungen auf die Beultragfähigkeit darf vernachlässigt werden, vorausgesetzt, sie resultieren aus Randstörungseffekten. Im Falle von Biegespannungen aus örtlichen Belastungen oder aus thermischen Gradienten sind besondere Überlegungen erforderlich.

(2) Je nach Last- und Spannungssituation sollten ein oder mehrere der folgenden Einzelnachweise für die maßgebenden Membranspannungen geführt werden:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd}, \quad \sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd}, \quad \tau_{x\theta,Ed} \leq \tau_{x\theta,Rd} \quad (8.18)$$

(3) Bei Anwesenheit von mehr als einer der drei beulrelevanten Membranspannungskomponenten unter der betrachteten Einwirkungskombination sollte folgender Interaktionsnachweis für den kombinierten Membranspannungszustand geführt werden:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right)^{k_\theta} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}} \right)^{k_\tau} \leq 1 \quad (8.19)$$

Dabei sind $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$ und $\tau_{x\theta,Ed}$ die interaktionsrelevanten Gruppen zusammengehöriger maßgebender Druck- und Schubmembranspannungen in der Schale, und die Werte der Beulinteraktionsparameter k_x , k_θ , k_τ und k_i sind in Anhang D angegeben.

(4) Ist $\sigma_{x,Ed}$ oder $\sigma_{\theta,Ed}$ eine Zugspannung, so sollte der entsprechende Wert in Formel­ausdruck (8.19) mit null angesetzt werden.

ANMERKUNG Für axialdruckbeanspruchte Zylinder unter Innendruck (der zu Zugbeanspruchung in Umfangsrichtung führt) sind in Anhang D besondere Regeln angegeben. Der dort resultierende Wert von $\sigma_{x,Rd}$ trägt sowohl der Tatsache Rechnung, dass der Innendruck den elastischen Beulwiderstand erhöht, als auch dem destabilisierenden Effekt des elastisch-plastischen Ringbeulens (en: elephant's foot phenomenon; Gleichung (D.43)). Wird die Zugspannung $\sigma_{\theta,Ed}$ dann in Formel­ausdruck (8.19) mit null angesetzt, so wird die Beultragfähigkeit korrekt wiedergegeben.

(5) Die Stellen und Werte aller in Gleichung (8.19) gemeinsam zu verwendenden beulrelevanten Membranspannungen sind in Anhang D festgelegt.

(6) Falls der Schalenbeulfall nicht in Anhang D enthalten ist, dürfen die Beulinteraktionsparameter konservativ wie folgt geschätzt werden:

$$k_x = 1,0 + \chi_x^2 \quad (8.20)$$

$$k_\theta = 1,0 + \chi_\theta^2 \quad (8.21)$$

$$k_\tau = 1,5 + 0,5 \chi_\tau^2 \quad (8.22)$$

$$k_i = (\chi_x \chi_\theta)^2 \quad (8.23)$$

ANMERKUNG Diese Regeln können sich in manchen Fällen als sehr konservativ darstellen, sie enthalten jedoch die beiden Grenzfälle, die für ein großes Fallspektrum als auf der sicheren Seite liegend bekannt sind:

- in sehr dünnwandigen Schalen ist die Interaktion zwischen σ_x und σ_θ annähernd linear, und
- in sehr dickwandigen Schalen entspricht die Interaktion den von Mises-Regeln.

8.6 Numerisch gestützter Beulsicherheitsnachweis mittels globaler MNA- und LBA-Berechnung

8.6.1 Bemessungswerte der Einwirkungen

(1) Hierfür gilt 8.1 (1).

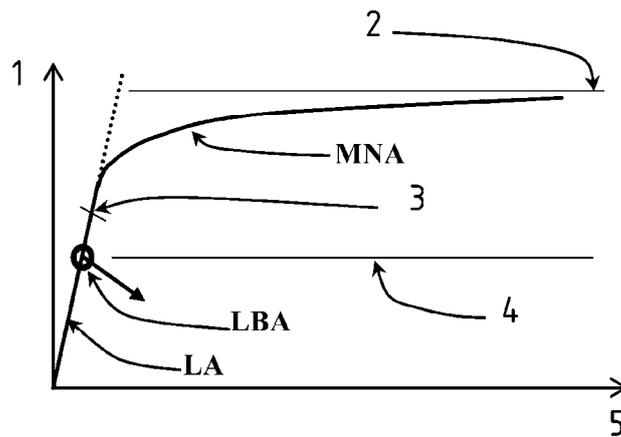
8.6.2 Bemessungswert des Widerstandes

(1) Der Bemessungsbeulwiderstand sollte bei diesem Konzept mit Hilfe des Lasterhöhungsfaktors r_{Rd} , bezogen auf die Bemessungswerte F_{Ed} der Einwirkungskombination für den betreffenden Lastfall, bestimmt werden.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

(2) Der Bemessungsbeulwiderstand $F_{Rd} = r_{Rd} \cdot F_{Ed}$ sollte mit Hilfe des plastischen Referenzwiderstandes $F_{Rpl} = r_{Rpl} \cdot F_{Ed}$ und des idealen elastischen Beulwiderstandes $F_{cr} = r_{Rcr} \cdot F_{Ed}$ und durch Kombination dieser beiden zur Bestimmung des charakteristischen Beulwiderstandes $F_{Rk} = r_{Rk} \cdot F_{Ed}$ ermittelt werden. Mit Hilfe des Teilsicherheitsbeiwertes γ_{M1} erhält man daraus dann den Bemessungsbeulwiderstand.

(3) Der bezogene plastische Referenzwiderstand r_{Rpl} (siehe Bild 8.5) sollte aus einer materiell nichtlinearen Berechnung (MNA) unter der betreffenden Einwirkungskombination als Lasterhöhungsfaktor bei Erreichen der plastischen Grenzlast ermittelt werden. Als r_{Rpl} darf der größte unter Vernachlässigung der Werkstoffverfestigung in der Berechnung erreichte Wert verwendet werden.



Legende

- 1 r Lasterhöhungsfaktor auf Bemessungswerte der Einwirkungen
- 2 r_{Rpl} plastische Grenzlast nach Theorie kleiner Verformungen
- 3 r_{Rpl} Schätzung aus LA-Berechnung
- 4 r_{Rcr} aus linearer elastischer Verzweigung
- 5 Verformung

Bild 8.5 — Zur Definition des bezogenen plastischen Referenzwiderstands r_{Rpl} und des bezogenen idealen Beulwiderstands r_{Rcr} auf der Basis globaler MNA- und LBA-Berechnungen

(4) Falls keine materiell nichtlineare Berechnung (MNA) durchgeführt werden kann, darf der bezogene plastische Referenzwiderstand r_{Rpl} konservativ aus einer unter Verwendung der Bemessungswerte der betreffenden Einwirkungskombination durchgeführten linearen Schalenberechnung (LA) wie folgt geschätzt werden. Aus den an einem beliebigen Punkt der Schale zusammen auftretenden Membranschnittgrößen $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$ und $n_{x\theta,Ed}$ erhält man einen Wert für r_{Rpl} nach folgender Gleichung:

$$r_{Rpl} = \frac{t \cdot f_{yk}}{\sqrt{n_{x,Ed}^2 - n_{x,Ed} \cdot n_{\theta,Ed} + n_{\theta,Ed}^2 + n_{x\theta,Ed}^2}} \quad (8.24)$$

Der niedrigste auf diese Weise berechnete Wert sollte als Schätzwert für den plastischen Referenzwiderstand r_{Rpl} verwendet werden.

ANMERKUNG Ein sicherer Schätzwert für r_{Rpl} lässt sich üblicherweise ermitteln, indem man die Gleichung (8.24) sukzessive auf die drei Punkte der Schale anwendet, an denen jede der drei beulrelevanten Membranschnittgrößen ihren Höchstwert erreicht, und den niedrigsten dieser drei Schätzwerte als maßgebenden Wert für r_{Rpl} verwendet.

(5) Der ideale bezogene elastische Beulwiderstand r_{Rcr} sollte aus einer Eigenwertanalyse (LBA) ermittelt werden, angesetzt auf den linear berechneten elastischen Spannungszustand in der geometrisch perfekten

Schale (LA) unter den Bemessungswerten der betreffenden Einwirkungskombination. Der niedrigste erhaltene Eigenwert (Verzweigungslastfaktor) sollte als der ideale bezogene elastische Beulwiderstand r_{Rcr} angesetzt werden, siehe Bild 8.5.

(6) Es sollte nachgewiesen werden, dass der angewendete Eigenwert-Algorithmus zuverlässig die Eigenform findet, die zum niedrigsten Eigenwert führt. In Zweifelsfällen sollten auch benachbarte Eigenwerte und ihre zugehörigen Eigenformen berechnet werden, um einen besseren Einblick in das Verzweigungsverhalten der Schale zu erhalten. Die für die Berechnung verwendete Software sollte anhand von „Benchmark-Fällen“ mit physikalisch ähnlichen Beulcharakteristika überprüft werden.

(7) Der bezogene Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{ov}$ der Gesamtschale sollte wie folgt bestimmt werden:

$$\bar{\lambda}_{ov} = \sqrt{F_{Rpl} / F_{Rcr}} = \sqrt{r_{Rpl} / r_{Rcr}} \quad (8.25)$$

(8) Der Beulabminderungsfaktor χ_{ov} der Gesamtschale sollte nach 8.5.2 (4) als $\chi_{ov} = f(\bar{\lambda}_{ov}, \bar{\lambda}_{ov,0}, \alpha_{ov}, \beta_{ov}, \eta_{ov})$ bestimmt werden, wobei α_{ov} der elastische Imperfektionsabminderungsfaktor der Gesamtschale, β_{ov} der plastische Bereichsfaktor, η_{ov} der Interaktionsexponent und $\bar{\lambda}_{ov,0}$ der vollplastische Grenzschlankheitsgrad, alle bezogen auf die Grenzschale, ist.

(9) Bei der Festlegung der Faktoren $\bar{\lambda}_{ov,0}$, r_{Rov} , β_{ov} , η_{ov} sollten die Imperfektionsempfindlichkeit, die geometrische Nichtlinearität und andere Aspekte des betreffenden Schalenbeulfalles berücksichtigt werden. Es sollten konservative Werte für diese Parameter durch Vergleich mit bekannten Schalenbeulfällen (siehe Anhang D) gewählt werden, die in ihrer Beulform, ihrer Imperfektions- und Fließempfindlichkeit sowie in ihrer geometrischen Nichtlinearität und ihrem Nachbeulverhalten ähnlich sind. Bei der Wahl des Wertes für r_{Rov} sollte außerdem die betreffende Herstelltoleranz-Qualitätsklasse berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Wenn dieses Konzept auf Schalengeometrien und Lastfälle angewendet wird, bei denen Durchschlagbeulen auftreten kann, sollte bei der Wahl eines geeigneten Wertes für r_{Rov} mit besonderer Sorgfalt vorgegangen werden. Zu diesen Fällen gehören konische und sphärische Kappen und Kuppeln, die durch Außendruck belastet werden oder auf radial verschieblichen Auflagern stehen. Der Wert für r_{Rov} sollte auch dann mit Sorgfalt gewählt werden, wenn die Schalengeometrie und der betreffende Lastfall zu Zuständen führen, die in hohem Maße empfindlich gegenüber Änderungen der Geometrie sind, wie z. B. an unversteiften Knotenlinien zwischen zylindrischen und konischen Schalensegmenten unter Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (z. B. in Schornsteinen).

Die häufig in der Literatur mitgeteilten elastischen Schalenbeullasten für diese Sonderfälle beruhen in der Regel auf geometrisch nichtlinearer Berechnung von perfekten oder imperfekten Geometrien, aus der Vorhersagen zur Durchschlagbeullast abgeleitet werden. Im Gegensatz dazu verwendet die hier beschriebene Methode die lineare Verzweigungslast als den idealen elastischen Referenz-Beulwiderstand, der häufig wesentlich höher als die Durchschlaglast ist. In der Bemessungsberechnung müssen diese beiden Quellen abgeminderten Widerstandes durch Wahl eines angemessenen elastischen Imperfektionsabminderungsfaktors r_{Rov} für die Gesamtschale berücksichtigt werden. Er muss sowohl den Effekt der geometrischen Nichtlinearität (die zum Durchschlagen führen kann) als auch den Effekt der zusätzlichen Tragfähigkeitsabminderung durch geometrische Imperfektionen abdecken.

(10) Wenn die Forderungen von (9) nicht zweifelsfrei erfüllt werden können, sollten geeignete Versuche durchgeführt werden, siehe EN1990, Anhang D.

(11) Wenn keine speziellen Werte von r_{Rov} , β_{ov} , η_{ov} und $\bar{\lambda}_{ov,0}$ im Sinne von (9) oder (10) zur Verfügung stehen, dürfen die Werte für axialdruckbeanspruchte unversteifte Zylinder verwendet werden, siehe D.1.2.2. Falls bekannt ist, dass es bei der betrachteten Konstruktion zu Durchschlagen kommen kann, sollte erwogen werden, r_{Rov} noch weiter abzumindern.

(12) Der bezogene charakteristische Beulwiderstand r_{Rk} sollte wie folgt ermittelt werden:

$$r_{Rk} = \chi_{ov} r_{Rpl} \quad (8.26)$$

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

Dabei ist

r_{Rpl} der bezogene plastische Referenzwiderstand.

(13) Der bezogene Bemessungsbeulwiderstand r_{Rd} sollte wie folgt ermittelt werden:

$$r_{Rd} = r_{Rk} / \gamma_{M1} \quad (8.27)$$

Dabei ist

γ_{M1} der Teilsicherheitsbeiwert für den Beulwiderstand nach 8.5.2 (2).

8.6.3 Beulsicherheitsnachweis

(1) Der Nachweis lautet:

$$F_{Ed} \leq F_{Rd} = r_{Rd} \cdot F_{Ed} \text{ oder } r_{Rd} \geq 1 \quad (8.28)$$

8.7 Numerisch gestützter Beulsicherheitsnachweis mittels globaler GMNIA-Berechnung

8.7.1 Bemessungswerte der Einwirkungen

(1) Hierfür sollte der aus 8.1 (1) verwendet werden.

8.7.2 Bemessungswert des Widerstandes

(1) Der Bemessungsbeulwiderstand sollte bei diesem Konzept als Lasterhöhungsfaktor r_R , bezogen auf die Bemessungswerte F_{Ed} der Einwirkungskombination für den betreffenden Lastfall, bestimmt werden.

(2) Der bezogene charakteristische Beulwiderstand r_{Rk} sollte aus dem mit Hilfe des Kalibrierungsfaktors k_{GMNIA} angepassten bezogenen elastisch-plastischen Beulwiderstands $r_{R,GMNIA}$ der imperfekten Schale ermittelt werden. Mit Hilfe des Teilsicherheitsbeiwertes γ_{M1} erhält man daraus den bezogenen Bemessungsbeulwiderstand r_{Rd} .

(3) Zur Ermittlung des bezogenen elastisch-plastischen Beulwiderstands $r_{R,GMNIA}$ sollte eine GMNIA-Berechnung der geometrisch imperfekten Schale unter der betreffenden Einwirkungskombination durchgeführt werden, begleitet von einer Eigenwertanalyse zum Aufspüren möglicher Verzweigungen im Lastpfad.

ANMERKUNG Falls Plastizieren wesentlichen Einfluss auf den Beulwiderstand hat, sollte sichergestellt werden, dass die angesetzte Imperfektionsform gewisse Vorbeul-Schubdehnungen erzeugt, weil der Schubmodul bereits auf kleine plastische Schubdehnungen sehr empfindlich reagiert. Bei bestimmten Schalenbeulproblemen (z. B. beim Schubbeulen von Kreisringplatten) kann die Eigenwertanalyse, falls dieser Effekt außer Acht gelassen wird, zu einer erheblichen Überschätzung des elastisch-plastischen Beulwiderstandes führen.

(4) Es sollte zunächst eine LBA-Berechnung der perfekten Struktur durchgeführt werden, um den idealen bezogenen elastischen Beulwiderstand r_{Rcr} der perfekten Schale zu bestimmen. Anschließend sollte eine MNA-Berechnung der perfekten Struktur durchgeführt werden, um den bezogenen plastischen Referenzwiderstand r_{Rpl} der perfekten Schale zu bestimmen. Diese beiden Widerstandsverhältnisse sollten dann zur Ermittlung des bezogenen Schlankheitsgrades λ_{ov} der Gesamtschale nach Formel Ausdruck (8.25) verwendet werden.

(5) Daraufhin sollte eine GMNA-Berechnung der perfekten Struktur durchgeführt werden, um den bezogenen elastisch-plastischen Beulwiderstand $r_{R,GMNA}$ der perfekten Schale zu bestimmen. Dieses Widerstandsverhältnis wird später für den Nachweis verwendet, dass die gewählten geometrischen Imperfektionen ausreichend schädliche Wirkung haben, um sich sicher sein zu können, dass der geringste Widerstand

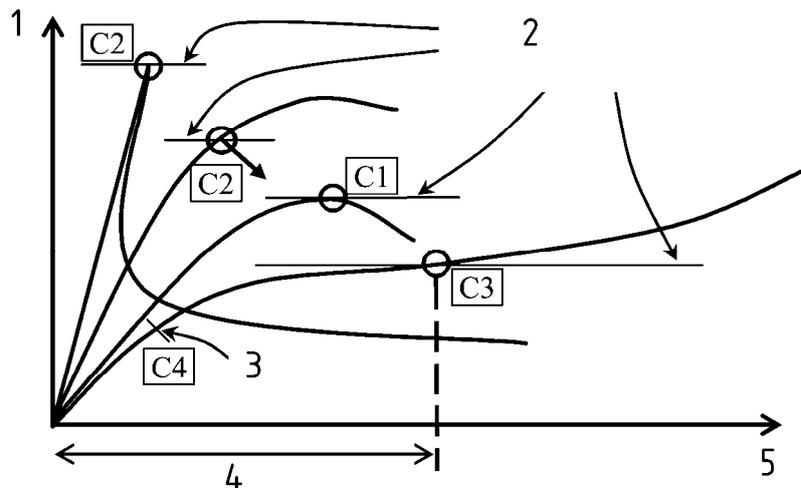
ermittelt wurde. Die GMNA-Berechnung sollte unter der betreffenden Einwirkungskombination durchgeführt werden, begleitet von einer Eigenwertanalyse zum Aufspüren möglicher Verzweigungen im Lastpfad.

(6) Der bezogene elastisch-plastische Beulwiderstand $r_{R,GMNIA}$ der imperfekten Schale sollte als der kleinste Lasterhöhungsfaktor r_R ermittelt werden, der aus den im Folgenden angegebenen Kriterien C1, C2 und C3 erhalten wird, siehe Bild 8.6:

- Kriterium C1: Maximallast der Lastverformungskurve (Grenzlast);
- Kriterium C2: Verzweigungslast, falls die Gleichgewichtsverzweigung auf dem Belastungspfad vor Erreichen des Maximums der Lastverformungskurve erfolgt;
- Kriterium C3: zur größten tolerierbaren Verformung gehörende Last, falls diese Verformung vor Erreichen einer Verzweigungslast oder einer Grenzlast erreicht wird.

7) Die zur größten tolerierbaren Verformung gehörende Last sollte mit Blick auf die Eigenheiten des betreffenden Tragwerks festgelegt werden. Falls kein anderer Wert zur Verfügung steht, darf die größte tolerierbare Verformung als erreicht angesehen werden, wenn die größte örtliche Verdrehung der Schalenoberfläche (Neigung der Oberfläche in Bezug auf ihre ursprüngliche Geometrie) den Wert β erreicht.

ANMERKUNG Der Wert von β darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\beta = 0,1$ Bogenmaß empfohlen.



Legende

- 1 r Lasterhöhungsfaktor auf Bemessungswerte der Einwirkungen
- 2 $r_{R,GMNIA}$ ist der kleinste dieser alternativen Werte
- 3 Fließbeginn als sichere Schätzung
- 4 größte tolerierbare Verformung
- 5 Verformung

Bild 8.6 — Definition des Beulwiderstandes auf der Grundlage einer globalen GMNIA-Berechnung

(8) Eine konservative Festlegung des bezogenen elastisch-plastischen Beulwiderstands $r_{R,GMNIA}$ der imperfekten Schale lässt sich mit Hilfe einer GNIA-Berechnung der geometrisch imperfekten Schale unter der betreffenden Einwirkungskombination erhalten. In diesem Falle sollte zur Bestimmung des kleinsten Lasterhöhungsfaktors r_R das folgende Kriterium herangezogen werden:

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

— Kriterium C4: Last, bei der die Vergleichsspannung am höchstbeanspruchten Punkt der Schalenoberfläche den Bemessungswert der Streckgrenze $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_{M0}$ erreicht, siehe Bild 8.6.

ANMERKUNG Es ist zu beachten, dass bei GMNA-, GMNIA- und GNIA-Berechnungen immer auch regelmäßige Eigenwertüberprüfungen durchgeführt werden müssen, um sicherzustellen, dass jede denkbare Verzweigung im Lastpfad gefunden wird.

(9) Bei einer GMNIA-(oder GNIA-)Berechnung sollten geeignete Maßnahmen ergriffen werden, um die Einflüsse von praktisch unvermeidbaren Imperfektionen abzudecken. Diese umfassen:

a) Geometrische Imperfektionen, wie z. B.:

- Abweichungen von der Nenngeometrie der Schalensmittelfläche (Vorverformungen/Vorbeulen, Unrundheit);
- Unregelmäßigkeiten an und nahe Schweißnähten (kleine Exzentrizitäten, Schrumpfeinziehungen, Krümmungsfehler vom Walzen);
- Abweichungen von der Nenndicke;
- mangelhafte Ebenheit der Auflagerung.

b) Materielle Imperfektionen, z. B.:

- durch Walzen, Pressen, Schweißen, Richten usw. verursachte Eigenspannungen;
- Inhomogenitäten und Anisotropien.

ANMERKUNG Weitere möglicherweise negative Einflüsse auf den bezogenen elastisch-plastischen Beulwiderstand $r_{R,GMNIA}$ der imperfekten Schale, wie z. B. Bodensetzungen oder Nachgiebigkeit von Verbindungen oder Auflagerungen, werden nicht als Imperfektionen im Sinne dieser Regeln klassifiziert.

(10) Die Imperfektionen sollten dadurch abgedeckt werden, dass in das Berechnungsmodell für die numerische GMNIA-Berechnung geeignete zusätzliche Größen aufgenommen werden.

(11) Falls kein besseres Verfahren angewendet wird, sollten die Imperfektionen in der Regel mit Hilfe geometrischer Ersatzimperfektionen eingeführt werden, die die Form von Abweichungen der Schalengeometrie rechtwinklig zur perfekten Soll-Schalensmittelfläche haben. Das heißt, die Mittelfläche der geometrisch imperfekten Schale sollte durch Superposition der geometrischen Ersatzimperfektionen zur Sollgeometrie der perfekten Schale modelliert werden.

(12) Die Form der geometrischen Ersatzimperfektionen ist so zu wählen, dass sie den bezogenen elastisch-plastischen Beulwiderstand $r_{R,GMNIA}$ der imperfekten Schale so ungünstig wie möglich beeinflussen. Falls die ungünstigste Imperfektionsform nicht ohne weiteres zweifelsfrei erkennbar ist, sollte die Berechnung für eine ausreichende Anzahl verschiedener Imperfektionsformen wiederholt werden, um den ungünstigsten Fall (niedrigster Wert von $r_{R,GMNIA}$) zu identifizieren.

(13) Wenn keine andere ungünstigere Imperfektionsform begründet werden kann, darf eine eigenformaffine Imperfektionsform angesetzt werden.

ANMERKUNG Die eigenformaffine Form ist die kritische Beulform, die zu dem basierend auf einer LBA-Berechnung der perfekten Schale ermittelten idealen bezogenen elastischen Beulwiderstand r_{Rcr} gehört.

(14) Die Form der geometrischen Ersatzimperfektionen sollte, wenn möglich, die konstruktive Ausbildung und die Randbedingungen in ungünstiger Weise reflektieren.

(15) Ungeachtet der Absätze (13) und (14) dürfen Imperfektionsformen von der Berechnung ausgenommen werden, wenn sie aufgrund des Fertigungs- oder Montageverfahrens als unrealistisch ausgeschlossen werden können.

(16) Modifikationen der gewählten Imperfektionsform zwecks Einschusses realistischer konstruktiver Details (wie z. B. eines axialsymmetrischen Schweißnahteinzuges) sollten untersucht werden.

ANMERKUNG Im Nationalen Anhang dürfen zusätzliche Anforderungen für die Festlegung geeigneter Imperfektionsformen formuliert werden.

(17) Das Vorzeichen der geometrischen Ersatzimperfektionen sollte so gewählt werden, dass die größten Formabweichungen ungünstig zum Krümmungsmittelpunkt der Schale gerichtet sind.

(18) Die Amplitude der gewählten geometrischen Ersatzimperfektionsform sollte in Abhängigkeit von der Herstelltoleranz-Qualitätsklasse angesetzt werden. Als größte Abweichung $\Delta w_{0,eq}$ der ersatzimperfekten Schale von der perfekten Geometrie sollte der größere der beiden Werte $\Delta w_{0,eq,1}$ und $\Delta w_{0,eq,2}$ angesetzt werden. Die beiden Werte sind:

$$\Delta w_{0,eq,1} = \ell_g U_{n1} \quad (8.29)$$

$$\Delta w_{0,eq,2} = n_i t U_{n2} \quad (8.30)$$

Dabei ist

- ℓ_g alle relevanten Messlängen nach 8.4.4 (2);
- t die örtliche Wanddicke;
- n_i ein Multiplikator, mit dessen Hilfe ein angemessenes Toleranzniveau erreicht werden soll;
- U_{n1} und U_{n2} Imperfektionsamplitudenparameter für die zutreffende Herstelltoleranz-Qualitätsklasse.

ANMERKUNG 1 Der Wert von n_i darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $n_i = 25$ empfohlen.

ANMERKUNG 2 Die Werte für die Imperfektionstoleranzparameter U_{n1} und U_{n2} dürfen dem Nationalen Anhang entnommen werden. Die Empfehlungswerte sind in Tabelle 8.5 angegeben.

Tabelle 8.5 — Empfohlene Werte der Imperfektionsamplitudenparameter U_{n1} und U_{n2}

Herstelltoleranz-Qualitätsklasse	Beschreibung der Qualität	Empfehlungswert für U_{n1}	Empfehlungswert für U_{n2}
Klasse A	exzellent	0,010	0,010
Klasse B	hoch	0,016	0,016
Klasse C	normal	0,025	0,025

(19) Die Amplitude der geometrischen Imperfektion in der gewählten Form der geometrischen Ersatzimperfektion sollte entsprechend der in 8.4.4 (2) beschriebenen Messlängenmethode interpretiert werden, durch die sie definiert wird.

(20) Zusätzlich sollte sichergestellt werden, dass eine Berechnung mit einer um 10 % kleineren Imperfektionsamplitude gegenüber dem nach (18) ermittelten Wert $\Delta w_{0,eq}$ nicht einen kleineren Wert für $r_{R,GMNIA}$ liefert. Sollte dies der Fall sein, so sollte das Verfahren mit veränderlicher Amplitude iterativ wiederholt werden, bis der kleinste Wert für $r_{R,GMNIA}$ gefunden wurde.

(21) Falls Lastfolge-Effekte möglich sind, sollten sie entweder in die Berechnung eingeschlossen oder als vernachlässigbar klein nachgewiesen werden.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

(22) Für jeden berechneten Wert des bezogenen elastisch-plastischen Beulwiderstands $r_{R,GMNIA}$ der imperfekten Schale sollte das Verhältnis der Widerstände von imperfekter und perfekter Schale ($r_{R,GMNIA}/r_{R,GMNA}$) bestimmt und mit nach 8.5 und Anhang D ermittelten Werten von r_R verglichen werden, um nachzuweisen, dass die schädliche Wirkung der gewählten geometrischen Imperfektion mit der vergleichbar ist, wie sie sich aus einer unteren Hüllkurve von Versuchsergebnissen ergibt.

ANMERKUNG Wird der Widerstand durch plastische Effekte dominiert, so ist das Verhältnis ($r_{R,GMNIA}/r_{R,GMNA}$) wesentlich größer als der elastische Imperfektionsabminderungsfaktor α , so dass von einer stark eingeschränkten Vergleichbarkeit auszugehen ist. Wird der Widerstand jedoch durch im Wesentlichen elastische Beulphänomene bestimmt, so sollte das Verhältnis ($r_{R,GMNIA}/r_{R,GMNA}$) nur geringfügig größer als der durch „Handberechnung“ bestimmte Wert sein, und im Falle eines deutlich größeren Wertes sollten die dazu führenden Faktoren untersucht werden.

(23) Die Zuverlässigkeit des numerisch ermittelten bezogenen elastisch-plastischen Beulwiderstands $r_{R,GMNIA}$ der imperfekten Schale sollte nach einem der folgenden alternativen Verfahren überprüft werden:

- a) Anwendung des gleichen Programms zur Berechnung von Vergleichswerten $r_{R,GMNIA,check}$ für andere Schalenbeulfälle, für die Werte des bezogenen charakteristischen Beulwiderstands $r_{Rk,known,check}$ bekannt sind. Die Vergleichsfälle sollten in ihren beulbeherrschenden Parametern (z. B. bezogener Schalen-schlankheitsgrad, Nachbeulverhalten, Imperfektionsempfindlichkeit, geometrische Nichtlinearität und Werkstoffverhalten) ähnlich sein und mit ähnlichen Imperfektionsannahmen modelliert werden.
- b) Vergleich von berechneten Werten ($r_{R,GMNIA,check}$) mit Versuchsergebnissen ($r_{R,test,known,check}$). Für die herangezogenen Versuchsfälle gelten dieselben Bedingungen wie in a).

ANMERKUNG 1 Andere Schalenbeulfälle, für die Werte des bezogenen charakteristischen Beulwiderstands $r_{Rk,known,check}$ bekannt sind, können der wissenschaftlichen Literatur zum Schalenbeulen entnommen werden. Es sollte beachtet werden, dass die „Handberechnungen“ nach 8.5 und Anhang D aus unteren Hüllkurven von Versuchsergebnissen abgeleitet wurden und dass diese in einigen Fällen zu so niedrig angesetzten Werten für den charakteristischen Beulwiderstand führen, dass sie sich nicht mehr auf einfache Weise numerisch nachvollziehen lassen.

ANMERKUNG 2 Werden Versuchsergebnisse verwendet, so sollte festgestellt werden, ob die im Versuch gegebenen geometrischen Imperfektionen als repräsentativ für die in der Praxis auftretenden gelten können.

(24) Je nach Ergebnis der Zuverlässigkeitsüberprüfungen sollte wie folgt ein Kalibrierungsfaktor k_{GMNIA} ermittelt werden:

$$k_{GMNIA} = \frac{r_{Rk,known,check}}{r_{R,GMNIA,check}} \quad \text{oder} \quad k_{GMNIA} = \frac{r_{R,test,known,check}}{r_{R,GMNIA,check}} \quad (8.31)$$

Dabei ist

- | | |
|--------------------------|---|
| $r_{Rk,known,check}$ | der bekannte charakteristische Wert des Vergleichsbeulfalles; |
| $r_{R,test,known,check}$ | das bekannte Versuchsergebnis; |
| $r_{R,GMNIA,check}$ | das Ergebnis der numerischen Berechnung für den Vergleichsbeulfall bzw. den Versuchsbeulfall. |

(25) Werden Versuchsergebnisse zur Bestimmung von k_{GMNIA} verwendet und ist der Rechenwert von k_{GMNIA} größer als 1,0, so sollte $k_{GMNIA} = 1,0$ angesetzt werden.

(26) Wird zur Bestimmung von k_{GMNIA} ein bekannter charakteristischer Wert verwendet, der auf einer allgemein anerkannten Theorie beruht, und liegt der Rechenwert von k_{GMNIA} außerhalb des Bereiches $0,8 < k_{GMNIA} < 1,2$, so sollte dieses Verfahren nicht angewendet werden. Das Ergebnis der GMNIA-Berechnung sollte als ungültig betrachtet werden, und es sollten weitere Berechnungen durchgeführt werden, um die Gründe für die Diskrepanz zu ermitteln.

(27) Der bezogene charakteristische Beulwiderstand sollte wie folgt ermittelt werden:

$$r_{Rk} = k_{GMNIA} \cdot r_{R,GMNIA} \quad (8.32)$$

Dabei ist

$r_{R,GMNIA}$ der berechnete bezogene elastisch-plastische Beulwiderstand der imperfekten Schale;
 k_{GMNIA} der Kalibrierungsfaktor.

8.7.3 Beulsicherheitsnachweis

(1) Der bezogene Bemessungsbeulwiderstand r_{Rd} sollte wie folgt ermittelt werden:

$$r_{Rd} = r_{Rk} / \gamma_{M1} \quad (8.33)$$

Dabei ist

γ_{M1} der Teilsicherheitsbeiwert für den Beulwiderstand nach 8.5.2 (2).

(2) Der Nachweis lautet:

$$F_{Ed} \leq F_{Rd} = r_{Rd} \cdot F_{Ed} \text{ oder } r_{Rd} \geq 1 \quad (8.34)$$

9 Grenzzustand Ermüdung (LS4)

9.1 Bemessungswerte der Einwirkungen

(1) Für jeden Lastfall sollten von der Gesamteinwirkung diejenigen veränderlichen Anteile, die das erwartete Einwirkungsspektrum während der Entwurfslebensdauer des Tragwerks repräsentieren, als Bemessungswerte der Ermüdungseinwirkungen angenommen werden.

(2) Die relevanten Einwirkungsspektren sollten in Abstimmung mit den Definitionen der entsprechenden Anwendungsteile von EN 1993 aus EN 1991 entnommen werden.

9.2 Spannungsbasierter Ermüdungssicherheitsnachweis

9.2.1 Allgemeines

(1) So weit hier nicht anders angegeben, sollte der Ermüdungssicherheitsnachweis nach EN 1993-1-9 geführt werden.

(2)P Der Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mf} für den Ermüdungswiderstand ist aus der einschlägigen Anwendungsnorm zu entnehmen.

ANMERKUNG Der Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mf} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Falls für die vorliegende Konstruktion keine Anwendungsnorm existiert oder die Anwendungsnorm die relevanten Werte von γ_{Mf} nicht festlegt, sollte der Wert von γ_{Mf} EN 1993-1-9 entnommen werden. Es wird empfohlen, den Wert von γ_{Mf} nicht kleiner als $\gamma_{Mf} = 1,1$ anzusetzen.

9.2.2 Bemessungswerte der Spannungsschwingbreite

(1) Die Spannungen infolge der Bemessungswerte der Ermüdungseinwirkungen sollten mit Hilfe einer LA-Berechnung ermittelt werden.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

- (2) Als Bemessungswert der Ermüdungsspannung gilt die größere der beiden Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma$ auf den beiden Schalenoberflächen, jeweils als Summe aus Primär- und Sekundärspannungen genommen.
- (3) In Abhängigkeit vom gewählten Nachweiskonzept nach EN 1993-1-9 sollten die Schwingbreiten $\Delta\sigma$ entweder für die Nennspannungen oder für die geometrischen Spannungen ermittelt werden.
- (4) Nennspannungsschwingbreiten werden benötigt, wenn nach 9.2.3 (2) vorgegangen werden soll.
- (5) Geometrische Spannungsschwingbreiten werden benötigt, wenn das entsprechende konstruktive Detail von den in 9.2.3 (2) genannten abweicht.
- (6) Die geometrische Spannungsschwingbreite braucht nur die Nenngeometrie der betreffenden Verbindung zu erfassen, aber beispielsweise nicht örtliche Spannungsspitzen infolge Schweißnahtgeometrie und innerer Nahtfehler. Sie darf mit Hilfe von geometrischen Spannungskonzentrationsfaktoren (Kerbfaktoren), z. B. aus Formeln, ermittelt werden.
- (7) Spannungen, die für den Ermüdungssicherheitsnachweis von konstruktiven Details mit eindimensionaler geometrischer Ausrichtung benötigt werden, sollten in Komponenten quer und längs zur Detailachse zerlegt werden.

9.2.3 Bemessungswerte des Widerstandes (Ermüdungsfestigkeit)

- (1) Die wie nachfolgend festgelegt erhaltenen Bemessungswerte des Ermüdungswiderstandes dürfen auf Baustähle mit Temperaturen bis zu 150 °C angewendet werden.
- (2) Der Ermüdungswiderstand von konstruktiven Details, wie sie typisch für Schalenstrukturen sind, sollte den Detailkategorien (Kerbfällen) aus EN 1993-3-2 entnommen und entsprechend der Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_E$ mit einer angemessenen Anzahl von Spannungsschwingspielen, in denen die Werte entsprechend der Schweißnahtgüte zusätzlich klassifiziert sind, bewertet werden.
- (3) Die Ermüdungsschwingbreiten (Ermüdungsfestigkeiten) für die einzelnen Detailkategorien sollten aus EN 1993-1-9 entnommen werden.

9.2.4 Begrenzung der Spannungsschwingbreite (Ermüdungssicherheitsnachweis)

- (1) Bei jedem Nachweis für diesen Grenzzustand sollte die Bemessungs-Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_E$ die folgende Bedingung erfüllen:

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_E \leq \Delta\sigma_R / \gamma_{Mf} \quad (9.1)$$

Dabei ist

- γ_{Ff} der Teilsicherheitsbeiwert für die Ermüdungseinwirkungen;
- γ_{Mf} der Teilsicherheitsbeiwert für den Ermüdungswiderstand;
- $\Delta\sigma_E$ die konstante Spannungsschwingbreite des schadensäquivalenten Einstufenkollektivs;
- $\Delta\sigma_R$ die Ermüdungsschwingbreite für die relevante Detailkategorie (Kerbfall) und die Anzahl der Lastspiele des Spannungsspektrums.

- (2) Alternativ zu (1) darf der Nachweis auch mit Hilfe der Schädigungssumme nach Palmgren-Miner für eine Reihe von m verschiedenen Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_i$ (mit $i = 1, m$) geführt werden:

$$D_d \leq 1 \quad (9.2)$$

mit:

$$D_d = \sum_{i=1}^m n_i / N_i \quad (9.3)$$

Dabei ist

n_i die Anzahl der Lastspiele, die mit der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_i$ auftreten;

N_i die Anzahl der Lastspiele, die bei einer Spannungsschwingbreite $\gamma_{Ff} \gamma_{Mf} \Delta\sigma_i$ in der relevanten Detailkategorie zum Ermüdungsbruch führen würde.

(3) Bei kombinierten Normal- und Schubspannungsschwingbreiten sollte die Interaktion nach EN 1993-1-9 nachgewiesen werden.

9.3 Numerisch gestützter Ermüdungssicherheitsnachweis mittels globaler LA- oder GNA-Berechnung

(1) Die Ermüdungsbemessung auf der Grundlage einer elastischen Berechnung (LA- oder GNA-Berechnung) sollte nach den in 9.2 für den spannungsbasierten Ermüdungssicherheitsnachweis angegebenen Regeln durchgeführt werden. Die Spannungsschwingbreiten infolge der Ermüdungsbelastung sollten hier jedoch nach der Schalentheorie unter Einschluss der geometrischen Diskontinuitäten der Verbindungen in den konstruktiven Details ermittelt werden.

(2) Bei Anwendung eines dreidimensionalen Finite-Elemente-Modells sollten die Kerbeffekte aus der örtlichen Schweißnahtgeometrie eliminiert werden.

Anhang A (normativ)

Membrantheoretische Spannungen in Schalen

A.1 Allgemeines

A.1.1 Beanspruchungen und Widerstände

Es darf angenommen werden, dass die nach den Gleichungen dieses Anhangs berechneten Beanspruchungen oder Widerstände charakteristische Werte für die betreffende Beanspruchung oder den betreffenden Widerstand sind, sofern für die Einwirkungen, die geometrischen Größen und die Werkstoffeigenschaften charakteristische Werte verwendet werden.

A.1.2 Formelzeichen

Die in diesem Anhang verwendeten Bezeichnungen für geometrische Größen, Spannungen und Lasten folgen 1.4. Darüber hinaus werden folgende Formelzeichen verwendet.

Große lateinische Buchstaben

F_x auf einen Zylinder einwirkende Axiallast

F_y auf einen Kegel einwirkende Axiallast

M auf den ganzen Zylinder einwirkendes globales Biegemoment (nicht zu verwechseln mit dem Biegemoment je Längeneinheit in der Schalenwandung m)

M_t auf den ganzen Zylinder einwirkendes globales Torsionsmoment

V auf den ganzen Zylinder einwirkende globale Querkraft

Kleine lateinische Buchstaben

g Flächengewicht der Schalenwandung

p_n Flächendruck normal zur Schalenmittelfläche

p_x flächenhaft verteilte Meridianbelastung an der Schalenwandung

Kleine griechische Buchstaben

ϕ Winkel der Meridianneigung

σ_x axiale oder meridionale Membranspannung ($= n_x/t$)

σ_θ Umfangsmembranspannung ($= n_\theta/t$)

τ Membranschubspannung ($= n_{x\theta}/t$)

A.1.3 Randbedingungen

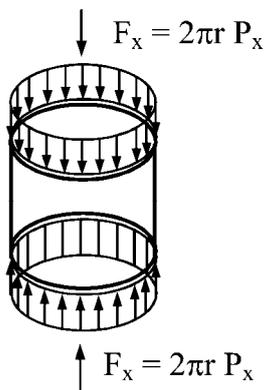
- (1) Für die Randbedingungen gelten die Bezeichnungen nach 2.3 und 5.2.2.
- (2) Die Formeln dieses Anhangs gelten theoretisch exakt für Zylinder, die an beiden Enden radial frei und frei verdrehbar sowie an einem Ende axial gelagert sind (Membranlagerung).
- (3) Die Formeln dieses Anhangs gelten theoretisch exakt für Kegelstümpfe, bei denen die aufgetragenen Lasten zu einem Membran-Spannungszustand führen und folgende Randbedingungen gelten: an beiden Enden senkrecht zur Schale frei verschieblich und an einem Ende in Meridianrichtung gelagert.
- (4) Für Kegelstümpfe sind die Randbedingungen so zu verstehen, dass sie Last- bzw. Auflagerkraftkomponenten quer zur Schalenwand einschließen, so dass die in die Schale eingeleiteten Spannungsergebnisse ausschließlich in Richtung des Schalenmeridians wirken (Membrankräfte).

A.1.4 Vorzeichenvereinbarung

- (1) Das Vorzeichen von Spannungen σ ist stets positiv für Zug, obwohl einige Bilder Fälle zeigen, in denen zur Illustration äußere Lasten im entgegengesetzten Sinne aufgebracht werden.

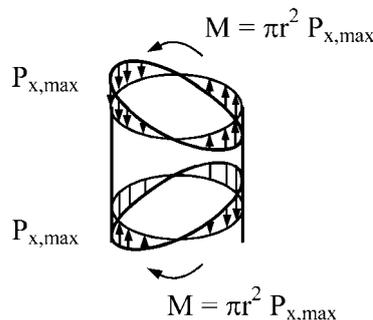
A.2 Unversteifte Kreiszylinderschalen

A.2.1 Konstante Axiallast



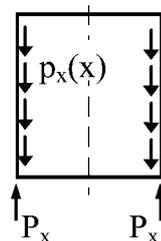
$$\sigma_x = -\frac{F_x}{2\pi r t}$$

A.2.2 Axiallast aus globaler Biegung



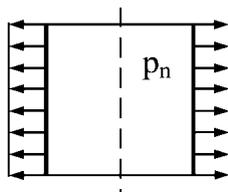
$$\sigma_x = \pm \frac{M}{\pi r^2 t}$$

A.2.3 Reibungslast



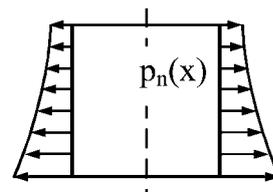
$$\sigma_x = \frac{1}{t} \int_0^l p_x \cdot dx$$

A.2.4 Konstanter Innendruck



$$\sigma_\theta = p_n \cdot \frac{r}{t}$$

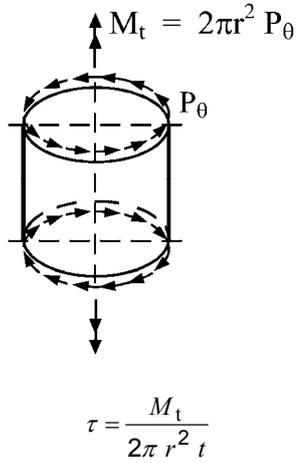
A.2.5 Veränderlicher Innendruck



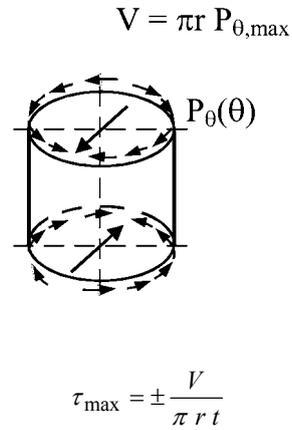
$$\sigma_\theta(x) = p_n(x) \cdot \frac{r}{t}$$

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

A.2.6 Konstanter Schub aus Torsion

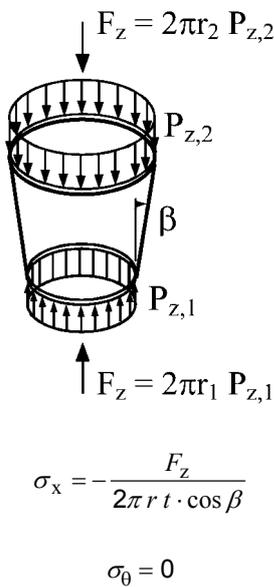


A.2.7 Sinusförmig veränderlicher Schub aus Querkraft

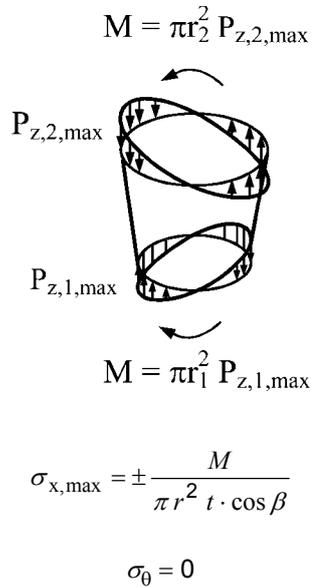


A.3 Unversteifte Kegelschalen

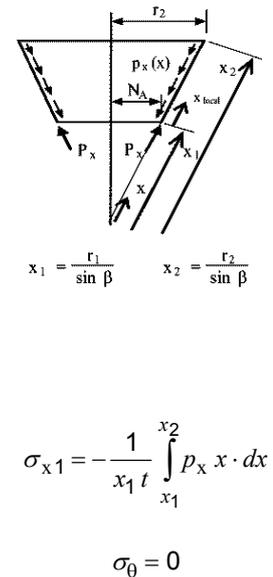
A.3.1 Konstante Axiallast



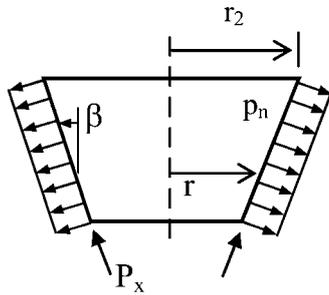
A.3.2 Axiallast aus globaler Biegung



A.3.3 Reibungslast



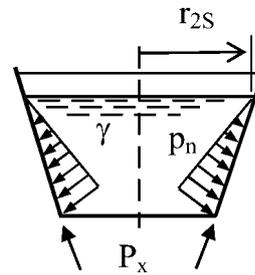
A.3.4 Konstanter Innendruck



$$\sigma_x = -p_n \frac{r}{2t \cdot \cos \beta} \left[\left(\frac{r_2}{r} \right)^2 \right]$$

$$\sigma_\theta = p_n \frac{r}{t \cdot \cos \beta}$$

A.3.5 Linear veränderlicher Innendruck

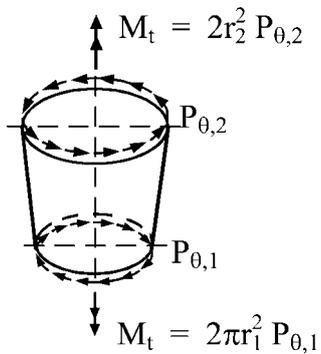


r_{2s} ist der Radius an der Flüssigkeitsoberfläche

$$\sigma_x = -\frac{\gamma r}{t \cdot \sin \beta} \left\{ \frac{r_{2s}}{6} \left[\left(\frac{r_{2s}}{r} \right)^2 - 3 \right] + \frac{r}{3} \right\}$$

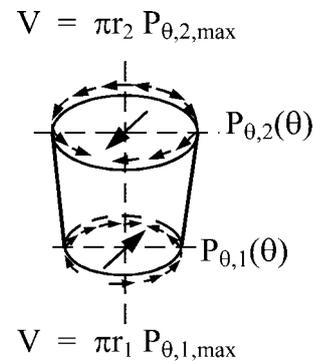
$$\sigma_\theta = +\frac{\gamma r}{t \cdot \sin \beta} (r_{2s} - r)$$

A.3.6 Konstanter Schub aus Torsion



$$\tau = \frac{M_t}{2\pi r^2 t}$$

A.3.7 Sinusförmig veränderlicher Schub aus Querkraft

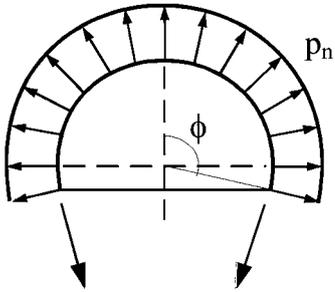


$$\tau_{\max} = \pm \frac{V}{\pi r t}$$

DIN EN 1993-1-6:2010-12
 EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

A.4 Unversteifte Kugelschalen

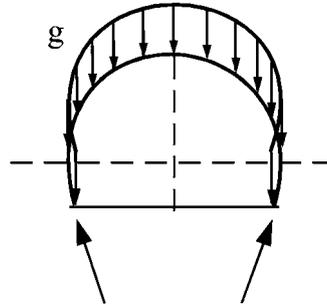
A.4.1 Konstanter Innendruck



$$\sigma_x = \frac{p_n r}{2t}$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_n r}{2t}$$

A.4.2 Konstante Eigengewichtslast



$$\sigma_x = -\frac{gr}{t} \left(\frac{1}{1 + \cos \phi} \right)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{gr}{t} \left(\cos \phi - \frac{1}{1 + \cos \phi} \right)$$

Anhang B (normativ)

Zusätzliche Gleichungen für plastische Kollaps-Widerstände

B.1 Allgemeines

B.1.1 Widerstände

Es darf angenommen werden, dass die nach den Formelausdrücken dieses Anhangs berechneten Widerstände charakteristische Werte für den betreffenden Widerstand sind, sofern für die geometrischen Größen und die Werkstoffeigenschaften charakteristische Werte verwendet werden.

B.1.2 Formelzeichen

Die in diesem Anhang verwendeten Bezeichnungen für geometrische Größen, Spannungen und Lasten folgen 1.4. Darüber hinaus werden folgende Formelzeichen verwendet.

Große lateinische Buchstaben

A_r Querschnittsfläche einer Ringsteife

P_R charakteristischer Wert des plastischen Widerstandes eines Mechanismus nach der Theorie kleiner Verformungen

Kleine lateinische Buchstaben

b Dicke einer Ringsteife

ℓ mitwirkende Breite der Schale, die mit einer Ringsteife zusammenwirkt

r Radius des Zylinders

s_e dimensionsloser von Mises-Vergleichsspannungsparameter

s_m dimensionsloser Spannungskombinationsparameter

s_x dimensionsloser Axialspannungsparameter

s_θ dimensionsloser Umfangsspannungsparameter

Indizes

r zu einer Ringsteife gehörend

R Widerstand

B.1.3 Randbedingungen

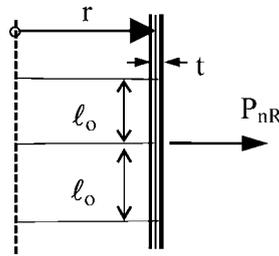
(1) Für die Randbedingungen gelten die Bezeichnungen nach 5.2.2.

(2) Der Ausdruck „eingespannt“ steht für Randbedingung BC2r und der Ausdruck „gelenkig“ für Randbedingung BC1f.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

B.2 Unversteifte Kreiszylinderschalen

B.2.1 Zylinder: Radiale Linienlast



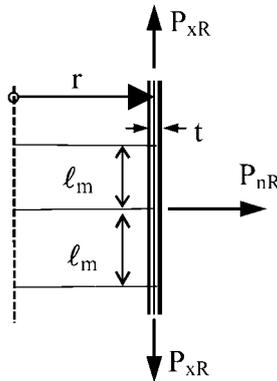
Bezugsgröße:

$$\ell_0 = 0,975 \sqrt{rt}$$

Der plastische Widerstand P_{nR} (Kraft je Umfangslängeneinheit) ist:

$$\frac{P_{nR}}{2\ell_0} = f_y \frac{t}{r}$$

B.2.2 Zylinder: Radiale Linienlast und Axiallast



Bezugsgrößen:

$$s_x = \frac{P_x}{f_y t}$$

$$\ell_0 = 0,975 \sqrt{rt}$$

Anwendbarkeitsbereich:

$$-1 \leq s_x \leq +1$$

Abhängige Parameter:

Wenn $P_n > 0$ (nach außen), dann: $A = +s_x - 1,50$

Wenn $P_n < 0$ (nach innen), dann: $A = -s_x - 1,50$

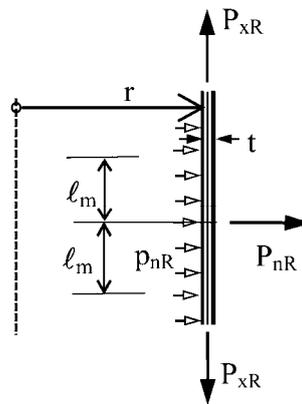
$$s_m = A + \sqrt{A^2 + 4(1 - s_x^2)}$$

Wenn $s_x \neq 0$, dann: $\ell_m = s_m \ell_o$

Der plastische Widerstand P_{nR} (Kraft je Umfangslängeneinheit) ist:

$$\frac{P_{nR}}{2\ell_m} = f_y \frac{t}{r}$$

B.2.3 Zylinder: Radiale Linienlast, konstanter Innendruck und Axiallast



Bezugsgrößen:

$$s_x = \frac{P_x}{f_y t}$$

$$s_\theta = \frac{p_n}{f_y} \cdot \frac{r}{t}$$

$$\ell_o = 0,975 \sqrt{r t}$$

$$s_e = \sqrt{s_\theta^2 + s_x^2} - s_x s_\theta$$

Anwendbarkeitsbereich:

$$-1 \leq s_x \leq +1$$

$$-1 \leq s_\theta \leq +1$$

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

Abhängige Parameter:

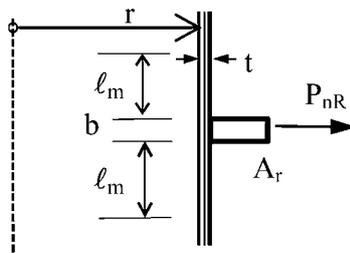
Nach außen gerichtete Ringlast $P_n > 0$		Nach innen gerichtete Ringlast $P_n < 0$	
Bedingung	Gleichungen	Bedingung	Gleichungen
$s_e < 1,00$ und $s_\theta \leq 0,975$	$A = +s_x - 2 s_\theta - 1,50$ $s_m = A + \sqrt{A^2 + 4 (1 - s_e^2)}$ $\ell_m = \ell_0 \left(\frac{s_m}{1 - s_\theta} \right)$	$s_e < 1,00$ und $s_\theta \geq -0,975$	$A = -s_x + 2 s_\theta - 1,50$ $s_m = A + \sqrt{A^2 + 4 (1 - s_e^2)}$ $\ell_m = \ell_0 \left(\frac{s_m}{1 + s_\theta} \right)$
$s_e = 1,00$ oder $s_\theta > 0,975$	$\ell_m = 0,0$	$s_e = 1,00$ oder $s_\theta < -0,975$	$\ell_m = 0,0$

Der plastische Widerstand (P_n und p_n stets nach außen positiv) ist:

$$\frac{P_{nR}}{2\ell_m} + p_n = f_y \frac{t}{r}$$

B.3 Ringversteifte Kreiszylinderschalen

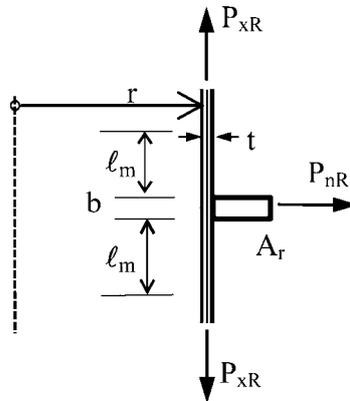
B.3.1 Ringversteifter Zylinder: Radiale Linienlast



Der plastische Widerstand P_{nR} (Kraft je Umfangslängeneinheit) ist:

$$P_{nR} = f_y \left(\frac{A_r + (b + 2\ell_m)t}{r} \right)$$

$$\ell_m = \ell_0 = 0,975 \sqrt{rt}$$

B.3.2 Ringverstärkter Zylinder: Radiale Linienlast und Axiallast

Bezugsgrößen:

$$s_x = \frac{P_x}{f_y t}$$

$$\ell_o = 0,975 \sqrt{r t}$$

Anwendbarkeitsbereich:

$$-1 \leq s_x \leq +1$$

Abhängige Parameter:

Wenn $P_n > 0$,dann: $A = +s_x - 1,50$ Wenn $P_n < 0$,dann: $A = -s_x - 1,50$

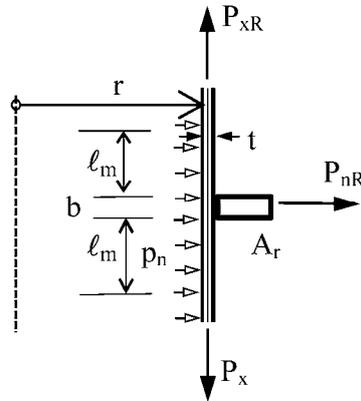
$$s_m = A + \sqrt{A^2 + 4(1 - s_x^2)}$$

Wenn $s_x \neq 0$,dann: $\ell_m = s_m \ell_o$ Der plastische Widerstand P_{nR} (Kraft je Umfangslängeneinheit) ist:

$$P_{nR} = f_y \left(\frac{A_r + (b + 2\ell_m)t}{r} \right)$$

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

B.3.3 Ringverstärkter Zylinder: Radiale Linienlast, konstanter Innendruck und Axiallast



Bezugsgrößen:

$$s_x = \frac{P_x}{f_y t}$$

$$s_\theta = \frac{p_n}{f_y} \cdot \frac{r}{t}$$

$$\ell_0 = 0,975 \sqrt{r t}$$

$$s_e = \sqrt{s_\theta^2 + s_x^2 - s_x s_\theta}$$

Anwendbarkeitsbereich:

$$-1 \leq s_x \leq +1$$

$$-1 \leq s_\theta \leq +1$$

Abhängige Parameter:

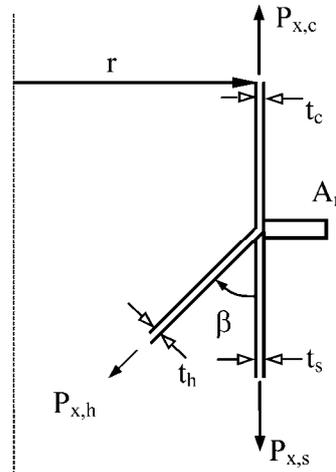
Nach außen gerichtete Ringlast $P_n > 0$		Nach innen gerichtete Ringlast $P_n < 0$	
Bedingung	Formeln	Bedingung	Formeln
$s_e < 1,00$ und $s_\theta \leq 0,975$	$A = +s_x - 2 s_\theta - 1,50$ $s_m = A + \sqrt{A^2 + 4 (1 - s_e^2)}$ $\ell_m = \ell_0 \left(\frac{s_m}{1 - s_\theta} \right)$	$s_e < 1,00$ und $s_\theta \geq -0,975$	$A = -s_x + 2 s_\theta - 1,50$ $s_m = A + \sqrt{A^2 + 4 (1 - s_e^2)}$ $\ell_m = \ell_0 \left(\frac{s_m}{1 + s_\theta} \right)$
$s_e = 1,00$ oder $s_\theta > 0,975$	$\ell_m = 0,0$	$s_e = 1,00$ oder $s_\theta < -0,975$	$\ell_m = 0,0$

Der plastische Widerstand (P_n und p_n stets nach außen positiv) ist:

$$P_{nR} + p_n (b + 2 \ell_m) = f_y \left(\frac{A_r + (b + 2 \ell_m) t}{r} \right)$$

B.4 Knotenlinien zwischen Schalen

B.4.1 Knotenlinie unter ausschließlich meridionaler Belastung (vereinfacht)



Anwendbarkeitsbereich:

$$t_h^2 \leq t_s^2 \leq t_h^2$$

$$|P_{xs}| \ll t_s f_y, \quad |P_{xh}| \ll t_h f_y \text{ und } |P_{xc}| \ll t_c f_y$$

Abhängige Parameter:

$$\eta = \sqrt{\frac{t_c^2}{t_s^2 + t_h^2}}$$

$$\psi_s = \psi_h = 0,7 + 0,6 \eta^2 - 0,3 \eta^3$$

Für den Zylinder

$$\ell_{oc} = 0,975 \sqrt{r t_c}$$

Für die Zarge

$$\ell_{os} = 0,975 \psi_s \sqrt{r t_s}$$

Für das Kegelsegment

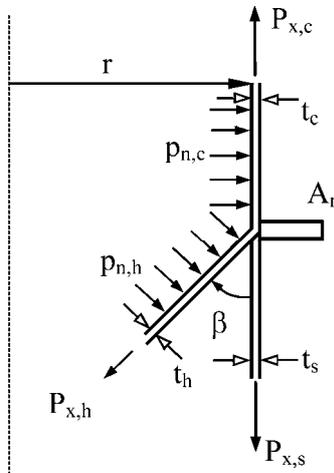
$$\ell_{oh} = 0,975 \psi_h \sqrt{\frac{r t_h}{\cos \beta}}$$

Der plastische Widerstand ist:

$$P_{xhR} r \sin \beta = f_y (A_r + \ell_{oc} t_c + \ell_{os} t_s + \ell_{oh} t_h)$$

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

B.4.2 Knotenlinie unter Innendruck und Axiallast



Bezugsgrößen:

$$s_{xc} = \frac{P_{xc}}{f_y t_c}$$

$$s_{xs} = \frac{P_{xs}}{f_y t_s}$$

$$s_{xh} = \frac{P_{xh}}{f_y t_h}$$

$$s_{\theta c} = \frac{p_{nc}}{f_y} \cdot \frac{r}{t_c}$$

$$s_{\theta s} = 0$$

$$s_{\theta h} = \frac{p_{nh}}{f_y} \cdot \frac{r}{t_h \cdot \cos \beta}$$

für $i = c, s, h$ gilt jeweils $s_{ei} = \sqrt{s_{\theta i}^2 + s_{xi}^2} - s_{xi} s_{\theta i}$

Anwendbarkeitsbereich:

$$-1 \leq s_{xi} \leq +1$$

$$-1 \leq s_{\theta i} \leq +1$$

Berechnung der wirksamen Dicke:

Untere Blechgruppe dicker $t_c^2 \leq t_s^2 + t_h^2$	Obere Blechgruppe dicker $t_c^2 > t_s^2 + t_h^2$
$\eta = \sqrt{\frac{t_c^2}{t_s^2 + t_h^2}}$	$\eta = \sqrt{\frac{t_s^2 + t_h^2}{t_c^2}}$
$\psi_c = 1,0$	$\psi_c = 0,7 + 0,6 \eta^2 - 0,3 \eta^3$
$\psi_s = \psi_h = 0,7 + 0,6 \eta^2 - 0,3 \eta^3$	$\psi_s = \psi_h = 1,0$

Abhängige Parameter:

Für die Zylindersegmente

$$\ell_{oi} = 0,975 \psi_i \sqrt{r t_i}$$

Für das Kegelsegment

$$\ell_{oh} = 0,975 \psi_h \sqrt{\frac{r t_i}{\cos \beta}}$$

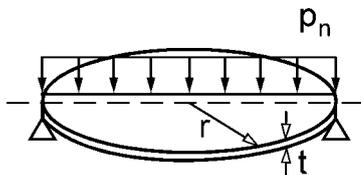
Für jedes Schalensegment i getrennt	
Bedingung	Formeln
$s_{ei} < 1,00$ und $s_{\theta i} \geq -0,975$	$A = -s_{xi} + 2 s_{\theta i} - 1,50$ $s_{mi} = A_i + \sqrt{A_i^2 + 4 (1 - s_{ei}^2)}$ $\ell_{mi} = \ell_{oi} \left(\frac{s_{mi}}{1 + s_{\theta i}} \right)$
$s_e = 1,00$	$\ell_{mi} = 0,0$
$s_{\theta i} < -0,975$	$\ell_{mi} = 0,0$

Der plastische Widerstand ist:

$$P_{xhR} r \sin \beta = f_y (A_r + \ell_{mc} t_c + \ell_{ms} t_s + \ell_{mh} t_h) + r (p_{nc} \ell_{mc} + p_{nh} \ell_{mh} \cos \beta)$$

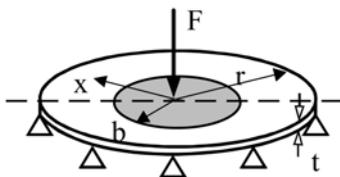
B.5 Kreisplatten mit axialsymmetrischen Randbedingungen

B.5.1 Gleichmäßig verteilte Last, gelenkig gelagerter Rand



$$p_{n,R} = 1,625 \left(\frac{t}{r} \right)^2 f_y$$

B.5.2 Örtliche Teilflächenlast, gelenkig gelagerter Rand



Konstanter Druck p_n auf kreisförmiger Teilfläche mit dem Radius b

$$F = p_n \pi b^2$$

Mit:

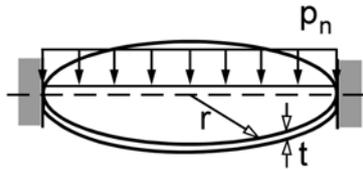
$$F_R = K \frac{\pi}{2} t^2 f_y$$

$$K = 1,0 + 1,10 \frac{b}{r} + 1,15 \left(\frac{b}{r} \right)^4 \quad \text{oder} \quad K = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{b}{t},$$

je nachdem, welcher der kleinere Wert ist

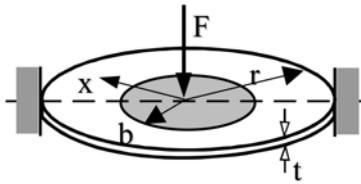
DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

B.5.3 Gleichmäßig verteilte Last, eingespannter Rand



$$p_{n,R} = 3,125 \left(\frac{t}{r} \right)^2 f_y$$

B.5.4 Örtliche Teilflächenlast, eingespannter Rand



Konstanter Druck p_n auf kreisförmiger Teilfläche mit dem Radius b

$$F = p_n \pi b^2$$

Mit:

$$F_R = K \frac{\pi}{2} t^2 f_y$$

$$K = 1,40 + 2,85 \frac{b}{r} + 2,0 \left(\frac{b}{r} \right)^4 \quad \text{oder} \quad K = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{b}{t},$$

je nachdem, welcher der kleinere Wert ist

Anhang C (normativ)

Formeln für lineare elastische Membran- und Biegespannungen

C.1 Allgemeines

C.1.1 Beanspruchungen

Es darf angenommen werden, dass die nach den Formelaustrücken dieses Anhangs berechneten Beanspruchungen charakteristische Werte für die betreffende Beanspruchung sind, sofern für die Einwirkungen, die geometrischen Größen und die Werkstoffeigenschaften charakteristische Werte verwendet werden.

C.1.2 Formelzeichen

Die in diesem Anhang verwendeten Bezeichnungen für geometrische Größen, Spannungen und Lasten folgen 1.4. Darüber hinaus werden folgende Formelzeichen verwendet.

Lateinische Buchstaben

- b Radius, bis zu dem eine örtliche Teilflächenlast auf einer Kreisplatte reicht
- r äußerer Radius einer Kreisplatte
- x axiale Koordinate auf einem Zylinder oder radiale Koordinate auf einer Kreisplatte

Griechische Buchstaben

- $\sigma_{eq,m}$ Vergleichsspannung aus Membranspannungen
- $\sigma_{eq,s}$ Vergleichsspannung aus Oberflächenspannungen
- σ_{MT} Referenzspannung nach Membrantheorie
- σ_{bx} meridionale Biegespannung
- $\sigma_{b\theta}$ Umfangs-Biegespannung
- σ_{sx} meridionale Oberflächenspannung
- $\sigma_{s\theta}$ Umfangs-Oberflächenspannung
- τ_{xn} Querschubspannung aus Meridianbiegung

Indizes

- n in Normalenrichtung
- r zu einer Ringsteife gehörend
- y Wert bei Fließbeginn

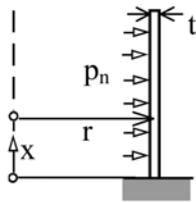
DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

C.1.3 Randbedingungen

- (1) Für die Randbedingungen gelten die Bezeichnungen nach 5.2.2.
- (2) Der Ausdruck „eingespannt“ steht für Randbedingung BC1r und der Ausdruck „gelenkig“ für Randbedingung BC2f.

C.2 Am Fuß eingespannte unversteifte Kreiszyklinderschalen

C.2.1 Zylinder, eingespannt: Konstanter Innendruck

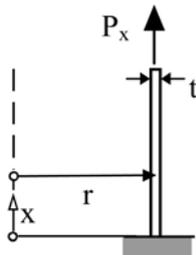


$$\sigma_{MT\theta} = p_n \frac{r}{t}$$

BC1r

Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
$\pm 1,816 \sigma_{MT\theta}$	$+1,080 \sigma_{MT\theta}$	$1,169 \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$1,614 \sigma_{MT\theta}$	$1,043 \sigma_{MT\theta}$

C.2.2 Zylinder, eingespannt: Axiallast

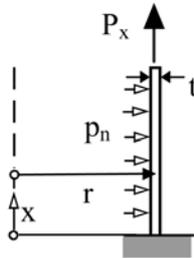


$$\sigma_{MTx} = \frac{P_x}{t}$$

BC1r

Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
$1,545 \sigma_{MTx}$	$+ 0,455 \sigma_{MTx}$	$0,351 \sqrt{t/r} \sigma_{MTx}$	$1,373 \sigma_{MTx}$	$1,000 \sigma_{MTx}$

C.2.3 Zylinder, eingespannt: Konstanter Innendruck und Axiallast



$$\sigma_{MT\theta} = p_n \frac{r}{t}$$

$$\sigma_{MTx} = \frac{P_x}{t}$$

BC1r

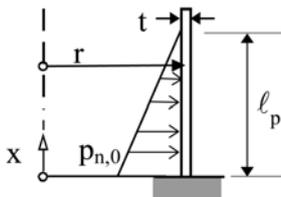
$$\text{Maximum } \sigma_{eq,m} = \sigma_{MT\theta} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{MTx}}{\sigma_{MT\theta}}\right) + \left(\frac{\sigma_{MTx}}{\sigma_{MT\theta}}\right)^2}$$

$$\text{Maximum } \sigma_{eq,m} = k \sigma_{MT\theta}$$

$\left(\frac{\sigma_{MTx}}{\sigma_{MT\theta}}\right)$	-2,0	0	0	2,0
	Äußere Oberfläche maßgebend		Innere Oberfläche maßgebend	
<i>k</i>	4,360	1,614	1,614	2,423

Zwischen Werten derselben Oberfläche darf linear interpoliert werden.

C.2.4 Zylinder, eingespannt: Hydrostatischer Innendruck



$$\sigma_{MT\theta} = p_{n,0} \frac{r}{t}$$

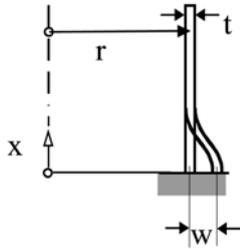
BC1r

Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
$k_x \sigma_{MT\theta}$	$k_\theta \sigma_{MT\theta}$	$k_\tau \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,s} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,m} \sigma_{MT\theta}$

$\left(\frac{\sqrt{rt}}{l_p}\right)$	k_x	k_θ	k_τ	$k_{eq,s}$	$k_{eq,m}$
0	1,816	1,080	1,169	1,614	1,043
0,2	1,533	0,733	1,076	1,363	0,647

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

C.2.5 Zylinder, eingespannt: Radiale Verschiebung nach außen

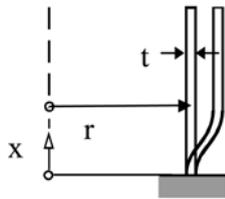


$$\sigma_{MT\theta} = \frac{wE}{r}$$

BC1r

Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
1,816 $\sigma_{MT\theta}$	1,545 $\sigma_{MT\theta}$	1,169 $\sqrt{t/r}$ $\sigma_{MT\theta}$	2,081 $\sigma_{MT\theta}$	1,000 $\sigma_{MT\theta}$

C.2.6 Zylinder, eingespannt: Gleichmäßige Erwärmung



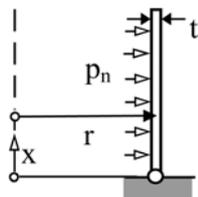
$$\sigma_{MT\theta} = \alpha E T$$

BC1r

Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
1,816 $\sigma_{MT\theta}$	1,545 $\sigma_{MT\theta}$	1,169 $\sqrt{t/r}$ $\sigma_{MT\theta}$	2,081 $\sigma_{MT\theta}$	1,000 $\sigma_{MT\theta}$

C.3 Am Fuß gelenkig gelagerte unversteifte Kreiszylinderschalen

C.3.1 Zylinder, gelenkig gelagert: Konstanter Innendruck

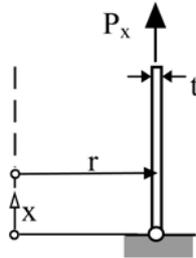


$$\sigma_{MT\theta} = p_n \frac{r}{t}$$

BC1f

Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
$\pm 0,585$ $\sigma_{MT\theta}$	+1,125 $\sigma_{MT\theta}$	0,583 $\sqrt{t/r}$ $\sigma_{MT\theta}$	1,126 $\sigma_{MT\theta}$	1,067 $\sigma_{MT\theta}$

C.3.2 Zylinder, gelenkig gelagert: Axiallast

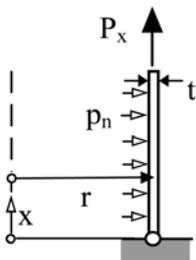


$$\sigma_{MTx} = \frac{P_x}{t}$$

BC1f

Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
+1,176 σ_{MTx}	+0,300 σ_{MTx}	0,175 $\sqrt{t/r}$ σ_{MTx}	1,118 σ_{MTx}	1,010 σ_{MTx}

C.3.3 Zylinder, gelenkig gelagert: Konstanter Innendruck und Axiallast



$$\sigma_{MT\theta} = p_n \frac{r}{t}$$

$$\sigma_{MTx} = \frac{P_x}{t}$$

BC1f

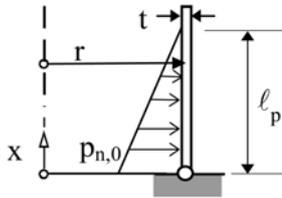
$$\text{Maximum } \sigma_{eq,m} = \sigma_{MTx} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{MTx}}{\sigma_{MT\theta}}\right) + \left(\frac{\sigma_{MTx}}{\sigma_{MT\theta}}\right)^2}$$

$$\text{Maximum } \sigma_{eq,s} = k \sigma_{MT\theta}$$

$\left(\frac{\sigma_{MTx}}{\sigma_{MT\theta}}\right)$	-2,0	-1,0	-0,5	0,0	0,25	0,50	1,00	2,0
k	3,146	3,075	1,568	1,126	0,971	0,991	1,240	1,943

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

C.3.4 Zylinder, gelenkig gelagert: Hydrostatischer Innendruck



$$\sigma_{MT\theta} = p_{n0} \frac{r}{t}$$

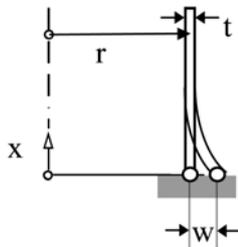
BC1f

Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
$k_x \sigma_{MT\theta}$	$k_\theta \sigma_{MT\theta}$	$k_\tau \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,s} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,m} \sigma_{MT\theta}$

$\left(\frac{\sqrt{rt}}{l_p}\right)$	k_x	k_θ	k_τ	$k_{eq,s}$	$k_{eq,m}$
0	0,585	1,125	0,583	1,126	1,067
0,2	0,585	0,873	0,583	0,919	0,759

Für verschiedene Werte von l_p darf in $\left(\frac{\sqrt{rt}}{l_p}\right)$ linear interpoliert werden.

C.3.5 Zylinder, gelenkig gelagert: Radiale Verschiebung nach außen

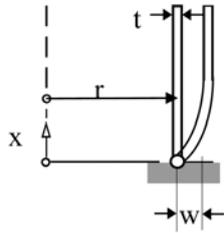


$$\sigma_{MT\theta} = \frac{wE}{r}$$

BC1f

Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
$\pm 0,585 \sigma_{MT\theta}$	$1,000 \sigma_{MT\theta}$	$0,583 \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$1,000 \sigma_{MT\theta}$	$1,000 \sigma_{MT\theta}$

C.3.6 Zylinder, gelenkig gelagert: Gleichmäßige Erwärmung



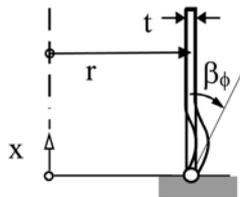
$$\sigma_{MT\theta} = \alpha E T$$

$$w = \alpha r T$$

BC1f

Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
$\pm 0,585 \sigma_{MT\theta}$	$1,000 \sigma_{MT\theta}$	$0,583 \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$1,000 \sigma_{MT\theta}$	$1,000 \sigma_{MT\theta}$

C.3.7 Zylinder, gelenkig gelagert: Randverdrehung



$$\sigma_{MT\theta} = E \sqrt{\frac{t}{r}} \cdot \beta_{\theta}$$

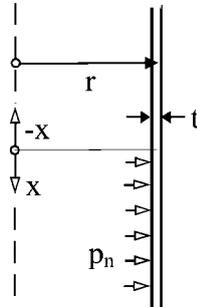
BC1f

Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
$\pm 1,413 \sigma_{MT\theta}$	$0,470 \sigma_{MT\theta}$	$0,454 \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$1,255 \sigma_{MT\theta}$	$0,251 \sigma_{MT\theta}$

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

C.4 Innendruck in unverstärkten Kreiszyklinderschalen

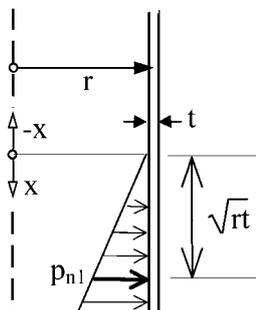
C.4.1 Zylinder: Endender konstanter Innendruck



$$\sigma_{MT\theta} = p_n \frac{r}{t}$$

Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
$\pm 0,293 \sigma_{MT\theta}$	$1,062 \sigma_{MT\theta}$	$0,467 \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$1,056 \sigma_{MT\theta}$	$1,033 \sigma_{MT\theta}$

C.4.2 Zylinder: Endender hydrostatischer Innendruck



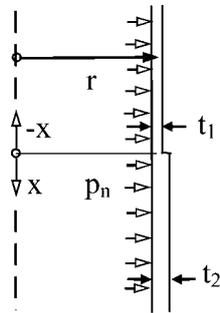
$$\sigma_{MT\theta} = p_{n1} \frac{r}{t}$$

p_{n1} ist der Druck in einer Tiefe von \sqrt{rt} unter der Oberfläche

Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
$k_x \sigma_{MT\theta}$	$k_\theta \sigma_{MT\theta}$	$k_\tau \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,s} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,m} \sigma_{MT\theta}$

k_x	k_θ	k_τ	$k_{eq,s}$	$k_{eq,m}$
-1,060	0,510	0,160	1,005	0,275

C.4.3 Zylinder: Dickensprung



$$\sigma_{MT\theta} = p_n \frac{r}{t_1}$$

Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
$k_x \sigma_{MT\theta}$	$k_\theta \sigma_{MT\theta}$	$k_\tau \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,s} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,m} \sigma_{MT\theta}$

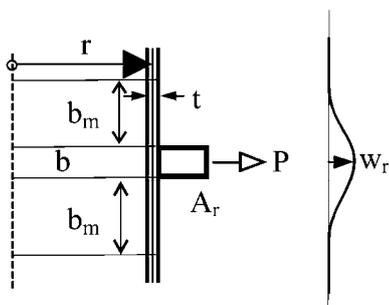
$\left(\frac{t_1}{t_2}\right)$	k_x	k_θ	k_τ	$k_{eq,s}$	$k_{eq,m}$
1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0
0,8	0,025 6	1,010	0,179	1,009	0,895
0,667	0,086 2	1,019	0,349	1,015	0,815
0,571	0,168	1,023	0,514	1,019	0,750
0,5	0,260	1,027	0,673	1,023	0,694

C.5 Ringsteife an einer Kreiszylinderschale

C.5.1 Ringversteifter Zylinder: Radialkraft am Ring

Die Spannungen in der Schale werden ermittelt, indem die hier berechneten Werte von w in die in C.2.5 angegebenen Formeln eingesetzt werden.

Falls am Ring ein Sprung in der Schalendicke vorliegt, sollte das in EN 1993-4-1, 8.2.2 beschriebene Verfahren angewendet werden.



$$w = w_r$$

$$b_m = 0,778 \sqrt{r t}$$

$$\left(\frac{wE}{r}\right) = \frac{P \cdot r}{A_r + (b + 2b_m)t}$$

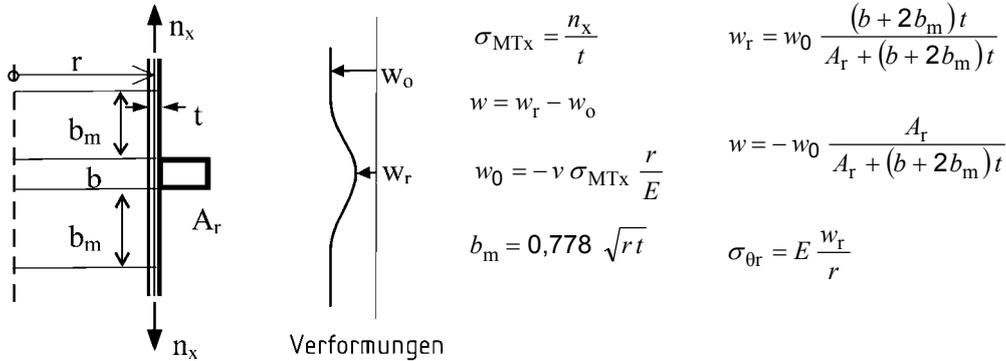
$$\sigma_{\theta r} = \frac{P \cdot r}{A_r + (b + 2b_m)t}$$

Verformungen

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

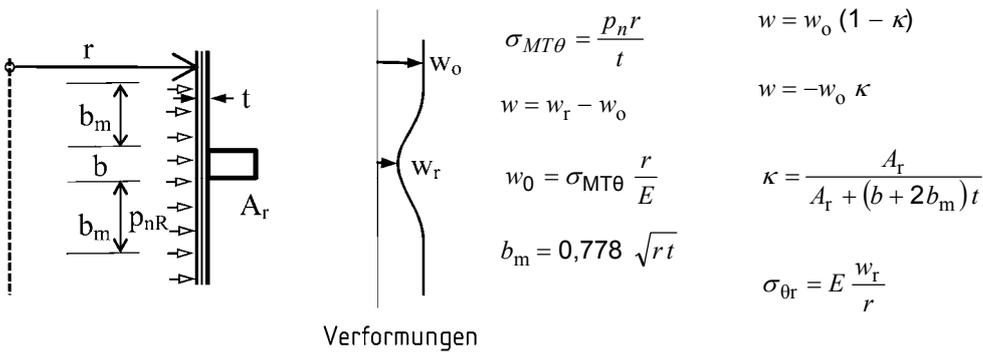
C.5.2 Ringverstärkter Zylinder: Axiallast

Die Spannungen in der Schale werden ermittelt, indem die hier berechneten Werte von w in die in C.2.5 und C.2.2 angegebenen Formeln eingesetzt werden.



C.5.3 Ringverstärkter Zylinder: Konstanter Innendruck

Die Spannungen in der Schale werden ermittelt, indem die hier berechneten Werte von w in die in C.2.5 und C.2.1 angegebenen Formeln eingesetzt werden.

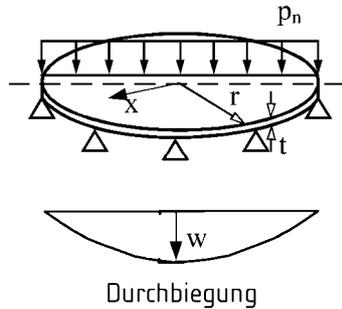


Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
$k_x \sigma_{MT\theta}$	$k_\theta \sigma_{MT\theta}$	$k_\tau \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,s} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,m} \sigma_{MT\theta}$

κ	k_x	k_θ	k_τ	$k_{eq,s}$	$k_{eq,m}$
1,0	1,816	1,080	1,169	1,614	1,043
0,75	1,312	1,060	0,877	1,290	1,032
0,50	0,908	1,040	0,585	1,014	1,021
0,0	0,0	1,000	0,0	1,000	1,000

C.6 Kreisplatten mit axialsymmetrischen Randbedingungen

C.6.1 Gelenkig gelagerte Platte: Gleichmäßige Flächenlast



$$w = 0,696 \frac{p_n r^4}{E t^3}$$

$$\max \sigma_{xb} = 1,238 p_n \left(\frac{r}{t}\right)^2$$

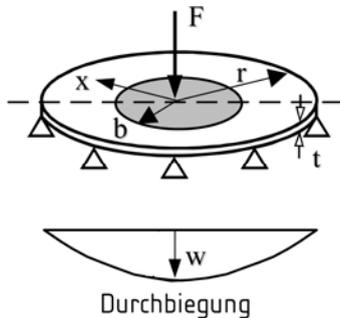
$$\max \sigma_{\theta b} = 1,238 p_n \left(\frac{r}{t}\right)^2$$

$$p_{n,y} = 0,808 \left(\frac{t}{r}\right)^2 f_y$$

C.6.2 Gelenkig gelagerte Platte: Örtliche Teilflächenlast

Gleichmäßiger Druck p_n auf einer kreisförmigen Teilfläche mit dem Radius b

$$F = p_n \pi b^2 \quad b < 0,2 r$$

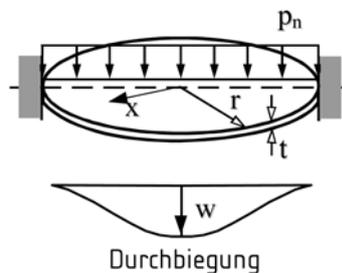


$$w = 0,606 \frac{F r^2}{E t^3}$$

$$\max \sigma_{xb} = \max \sigma_{\theta b} = 0,621 \frac{F}{t^2} \left(\ln \frac{b}{r} + 0,769 \right)$$

$$F_y = 1,611 \frac{t^2}{\left(\ln \frac{b}{r} + 0,769 \right)} f_y$$

C.6.3 Eingespannte Platte: Gleichmäßige Flächenlast



$$w = 0,171 \frac{p_n r^4}{E t^3}$$

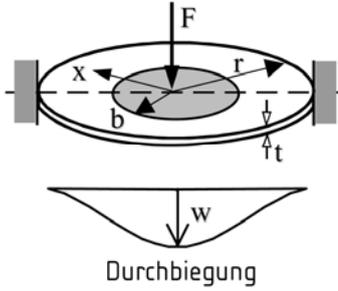
$$\sigma_0 = p_n \left(\frac{r}{t}\right)^2$$

$$p_{n,y} = 1,50 \left(\frac{t}{r}\right)^2 f_y \text{ (am Rand)}$$

Maximum σ_{bx} in der Mitte	Maximum $\sigma_{b\theta}$ in der Mitte	Maximum σ_{eq} in der Mitte	Maximum σ_{bx} am Rand	Maximum $\sigma_{b\theta}$ am Rand	Maximum σ_{eq} am Rand
$0,488 \sigma_0$	$0,488 \sigma_0$	$0,488 \sigma_0$	$0,75 \sigma_0$	$0,225 \sigma_0$	$0,667 \sigma_0$

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

C.6.4 Eingespannte Platte: Örtliche Teilflächenlast



Gleichmäßiger Druck p_n auf einer kreisförmigen Teilfläche mit dem Radius b

$$F = p_n \pi b^2 \quad b < 0,2 r$$

$$w = 0,217 \frac{F r^2}{E t^3}$$

$$\sigma_0 = \frac{F}{t^2} \quad F_y = 1,611 \frac{t^2}{\left(\ln \frac{b}{r}\right)} f_y \text{ in der Mitte}$$

Maximum σ_{bx} in der Mitte	Maximum $\sigma_{b\theta}$ in der Mitte	Maximum σ_{cq} in der Mitte	Maximum σ_{bx} am Rand	Maximum $\sigma_{b\theta}$ am Rand	Maximum σ_{cq} am Rand
$0,621 \left(\ln \frac{b}{r}\right) \sigma_0$	$0,621 \left(\ln \frac{b}{r}\right) \sigma_0$	$0,621 \left(\ln \frac{b}{r}\right) \sigma_0$	$0,477 \sigma_0$	$0,143 \sigma_0$	$0,424 \sigma_0$

Anhang D (normativ)

Formeln für den Beulsicherheitsnachweis

D.1 Unversteifte Kreiszylinderschalen mit konstanter Wanddicke

D.1.1 Formelzeichen und Randbedingungen

(1) Geometrische Größen

- ℓ Zylinderlänge zwischen definierten Rändern
- r Radius der Zylindermittelfläche
- t Dicke der Schalenwand
- Δw_k charakteristische Imperfektionsamplitude

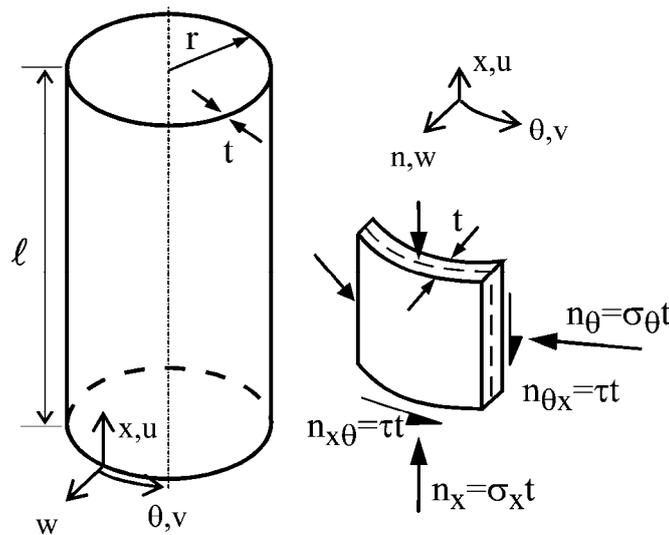


Bild D.1 — Zylindergeometrie, Membranspannungen und Membrankräfte

(2) Die Randbedingungen sind in 2.3, 5.2.2 und 8.3 festgelegt.

D.1.2 Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialrichtung)

D.1.2.1 Ideale Meridianbeulspannungen

- (1) Die folgenden Formeln gelten nur für Schalen mit den Randbedingungen BC1 oder BC2 an beiden Enden.
- (2) Die Länge des Schalensegments wird mit Hilfe des dimensionslosen Längenparameters ω beschrieben:

$$\omega = \frac{\ell}{r} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{\ell}{\sqrt{rt}} \quad (\text{D.1})$$

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

(3) Die ideale Meridianbeulspannung sollte wie folgt ermittelt werden, wobei C_x nach Absatz (4), (5) oder (6) einzusetzen ist:

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 E C_x \frac{t}{r} \quad (D.2)$$

(4) Für mittellange Zylinder mit

$$1,7 \leq \omega \leq 0,5 \frac{r}{t} \quad (D.3)$$

sollte der Faktor C_x wie folgt angesetzt werden:

$$C_x = 1,0 \quad (D.4)$$

(5) Für kurze Zylinder mit

$$\omega \leq 1,7 \quad (D.5)$$

darf der Faktor C_x wie folgt angesetzt werden:

$$C_x = 1,36 - \frac{1,83}{\omega} + \frac{2,07}{\omega^2} \quad (D.6)$$

(6) Für lange Zylinder mit

$$\omega > 0,5 \frac{r}{t} \quad (D.7)$$

sollte der Faktor C_x wie folgt ermittelt werden:

$$C_x = C_{x,N} \quad (D.8)$$

wobei $C_{x,N}$ der größere der folgenden beiden Werte ist:

$$C_{x,N} = 1 + \frac{0,2}{C_{xb}} \left[1 - 2\omega \frac{t}{r} \right] \quad (D.9)$$

und

$$C_{x,N} = 0,60 \quad (D.10)$$

Dabei ist C_{xb} ein Parameter, der von den Randbedingungen abhängt und Tabelle D.1 zu entnehmen ist.

Tabelle D.1 — Parameter C_{xb} für den Einfluss der Randbedingungen auf die ideale elastische Meridianbeulspannung in langen Zylindern

Fall	Zylinderende	Randbedingung	C_{xb}
1	Ende 1 Ende 2	BC1 BC1	6
2	Ende 1 Ende 2	BC1 BC2	3
3	Ende 1 Ende 2	BC2 BC2	1

(7) Für lange Zylinder, die Absatz (6) entsprechen und außerdem die folgenden Bedingungen erfüllen:

$$\frac{r}{t} \leq 150 \text{ und } \omega \leq 6 \left(\frac{r}{t} \right) \text{ und } 500 \leq \frac{E}{f_{y,k}} \leq 1\,000 \quad (\text{D.11})$$

darf der Faktor C_x alternativ wie folgt ermittelt werden:

$$C_x = C_{x,N} \left(\frac{\sigma_{xE,N}}{\sigma_{xE}} \right) + \left(\frac{\sigma_{xE,M}}{\sigma_{xE}} \right) \quad (\text{D.12})$$

Dabei ist

σ_{xE} der Bemessungswert der Meridianspannung $\sigma_{x,Ed}$;

$\sigma_{xE,N}$ der Anteil von $\sigma_{x,Ed}$, der sich aus globaler Normalkraft ergibt (in Umfangsrichtung konstanter Anteil);

$\sigma_{xE,M}$ der Anteil von $\sigma_{x,Ed}$, der sich aus der globalen Rohrbiegung ergibt (Spitzenwert des in Umfangsrichtung veränderlichen Anteils).

Anstelle der Gleichung (D.12) darf auch der folgende einfachere Ausdruck verwendet werden:

$$C_x = 0,60 + 0,40 \left(\frac{\sigma_{xE,M}}{\sigma_{xE}} \right) \quad (\text{D.13})$$

D.1.2.2 Parameter für Meridianbeulen

(1) Der elastische Imperfektions-Abminderungsfaktor für Meridianbeulen α_x sollte wie folgt ermittelt werden:

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91 (\Delta w_k / t)^{1,44}} \quad (\text{D.14})$$

Dabei ist Δw_k die charakteristische Imperfektionsamplitude:

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} \cdot t \quad (\text{D.15})$$

Dabei ist Q ein Parameter, der die Herstellqualität für Meridianbeulen erfasst.

(2) Der Herstellqualitätsparameter Q ist für die jeweils spezifizierte Herstelltoleranz-Qualitätsklasse der Tabelle D.2 zu entnehmen.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

Tabelle D.2 — Parameter Q in Abhängigkeit von der Herstellqualität

Herstelltoleranz- Qualitätsklasse	Beschreibung	Q
Klasse A	exzellent	40
Klasse B	hoch	25
Klasse C	normal	16

(3) Der vollplastische Grenzschlankheitsgrad λ_{x0} , der plastische Bereichsfaktor β und der Beulkurvenexponent η sollten wie folgt angesetzt werden:

$$\bar{\lambda}_{x0} = 0,20 \quad \beta = 0,60 \quad \eta = 1,0 \quad (\text{D.16})$$

(4) Bei langen Zylindern, die die besonderen Bedingungen von D.1.2.1 (7) erfüllen, darf der vollplastische Grenzschlankheitsgrad λ_{x0} auch wie folgt ermittelt werden:

$$\bar{\lambda}_{x0} = 0,20 + 0,10 \left(\frac{\sigma_{xE,M}}{\sigma_{xE}} \right) \quad (\text{D.17})$$

Dabei ist

σ_{xE} der Bemessungswert der Meridianspannung $\sigma_{x,Ed}$;

$\sigma_{xE,M}$ der Anteil von $\sigma_{x,Ed}$, der sich aus der globalen Rohrbiegung ergibt (Spitzenwert des in Umfangsrichtung veränderlichen Anteils).

(5) Es braucht kein Beulsicherheitsnachweis gegen Meridianbeulen geführt zu werden, wenn der Zylinder die folgende Bedingung erfüllt:

$$\frac{r}{t} \leq 0,03 \frac{E}{f_{yk}} \quad (\text{D.18})$$

D.1.3 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung

D.1.3.1 Ideale Umfangsbeulspannungen

(1) Die folgenden Formeln gelten für Schalen mit allen Randbedingungen.

(2) Die Länge des Schalensegments wird mit Hilfe des dimensionslosen Längenparameters ω beschrieben:

$$\omega = \frac{l}{r} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{l}{\sqrt{r t}} \quad (\text{D.19})$$

(3) Für mittellange Zylinder mit

$$20 \leq \frac{\omega}{C_{\theta}} \leq 1,63 \frac{r}{t} \quad (\text{D.20})$$

sollte die ideale Umfangsbeulspannung wie folgt ermittelt werden:

$$\sigma_{\theta,Rcr} = 0,92 E \left(\frac{C_{\theta}}{\omega} \right) \left(\frac{t}{r} \right) \quad (\text{D.21})$$

(4) Der Faktor C_θ ist in Abhängigkeit von den Randbedingungen der Tabelle D.3 zu entnehmen, siehe 5.2.2 und 8.3.

(5) Für kurze Zylinder mit

$$\frac{\varpi}{C_\theta} < 20 \quad (\text{D.22})$$

sollte die ideale Umfangsbeulspannung wie folgt ermittelt werden:

$$\sigma_{\theta, \text{Rcr}} = 0,92 E \left(\frac{C_{\theta s}}{\omega} \right) \left(\frac{t}{r} \right) \quad (\text{D.23})$$

(6) Der Faktor $C_{\theta s}$ ist in Abhängigkeit von den Randbedingungen der Tabelle D.4 zu entnehmen, siehe 5.2.2 und 8.3.

Tabelle D.3 — Umfangsbeulfaktoren C_θ für mittellange Zylinder

Fall	Zylinderende	Randbedingung	Wert von C_θ
1	Ende 1 Ende 2	BC1 BC1	1,5
2	Ende 1 Ende 2	BC1 BC2	1,25
3	Ende 1 Ende 2	BC2 BC2	1,0
4	Ende 1 Ende 2	BC1 BC3	0,6
5	Ende 1 Ende 2	BC2 BC3	0
6	Ende 1 Ende 2	BC3 BC3	0

Tabelle D.4 — Umfangsbeulfaktoren $C_{\theta s}$ für kurze Zylinder

Fall	Zylinderende	Randbedingung	$C_{\theta s}$
1	Ende 1 Ende 2	BC1 BC1	$1,5 + \frac{10}{\omega^2} - \frac{5}{\omega^3}$
2	Ende 1 Ende 2	BC1 BC2	$1,25 + \frac{8}{\omega^2} - \frac{4}{\omega^3}$
3	Ende 1 Ende 2	BC2 BC2	$1,0 + \frac{3}{\omega^{1,35}}$
4	Ende 1 Ende 2	BC1 BC3	$0,6 + \frac{1}{\omega^2} - \frac{0,3}{\omega^3}$
Mit $\omega = \frac{e}{\sqrt{rt}}$			

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

(7) Für lange Zylinder mit

$$\frac{\omega}{C_{\theta}} > 1,63 \frac{r}{t} \quad (\text{D.24})$$

sollte die ideale Umfangsbeulspannung wie folgt ermittelt werden:

$$\sigma_{\theta, \text{Rcr}} = E \left(\frac{t}{r} \right)^2 \left[0,275 + 2,03 \left(\frac{C_{\theta}}{\omega} \cdot \frac{r}{t} \right)^4 \right] \quad (\text{D.25})$$

D.1.3.2 Parameter für Umfangsbeulen

(1) Der elastische Imperfektions-Abminderungsfaktor für Umfangsbeulen ist für die jeweils spezifizierte Herstelltoleranz-Qualitätsklasse der Tabelle D.5 zu entnehmen.

Tabelle D.5 — Elastischer Imperfektions-Abminderungsfaktor α_{θ} in Abhängigkeit von der Herstellqualität

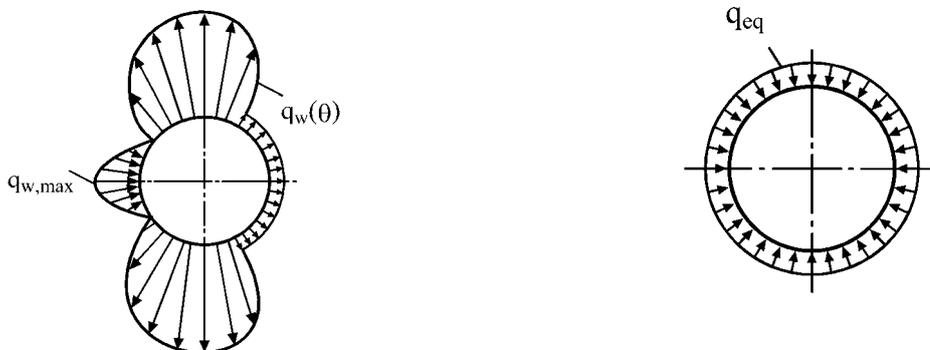
Herstelltoleranz-Qualitätsklasse	Beschreibung	α_{θ}
Klasse A	exzellent	0,75
Klasse B	hoch	0,65
Klasse C	normal	0,50

(2) Der vollplastische Grenzschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{\theta 0}$, der plastische Bereichsfaktor β und der Beulkurvenexponent η sollten wie folgt angesetzt werden:

$$\bar{\lambda}_{\theta 0} = 0,40 \quad \beta = 0,60 \quad \eta = 1,0 \quad (\text{D.26})$$

(3) Es braucht kein Beulsicherheitsnachweis gegen Umfangsbeulen geführt zu werden, wenn der Zylinder die folgende Bedingung erfüllt:

$$\frac{r}{t} \leq 0,21 \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}} \quad (\text{D.27})$$



a) Winddruckverteilung längs des Zylinderumfanges

b) Äquivalente axialsymmetrische Druckverteilung

Bild D.2 — Ersatz der typischen Winddruckverteilung

(4) Die bei der Windbelastung von Zylindern auftretende ungleichmäßige Verteilung des Druckes q_w (siehe Bild D.2) darf für den Beulsicherheitsnachweis durch einen äquivalenten konstanten Außendruck ersetzt werden:

$$q_{eq} = k_w q_{w,max} \quad (D.28)$$

Dabei ist $q_{w,max}$ der größte Winddruckwert, und k_w sollte wie folgt ermittelt werden:

$$k_w = 0,46 \left(1 + 0,1 \sqrt{\frac{C_{\theta}}{\omega} \cdot \frac{r}{t}} \right) \quad (D.29)$$

mit $0,65 \leq k_w \leq 1$ und mit C_{θ} aus Tabelle D.3 in Abhängigkeit von den Randbedingungen.

(5) Der Bemessungswert der Umfangsdruckspannung für den spannungsbasierten Beulsicherheitsnachweis nach 8.5 beträgt:

$$\sigma_{\theta,Ed} = (q_{eq} + q_s) \left(\frac{r}{t} \right) \quad (D.30)$$

Dabei ist q_s der durch Belüftung, Teilvakuum oder sonstige Phänomene verursachte Sog im Inneren.

D.1.4 Schubbeanspruchung

D.1.4.1 Ideale Schubbeulspannungen

(1) Die folgenden Formeln gelten nur für Schalen mit den Randbedingungen BC1 oder BC2 an beiden Enden.

(2) Die Länge des Schalensegments wird mit Hilfe des dimensionslosen Längenparameters ω beschrieben:

$$\omega = \frac{\ell}{r} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{\ell}{\sqrt{rt}} \quad (D.31)$$

(3) Die ideale elastische Schubbeulspannung ist wie folgt zu ermitteln:

$$\tau_{x\theta,Rcr} = 0,75 E C_{\tau} \sqrt{\frac{1}{\omega} \left(\frac{t}{r} \right)} \quad (D.32)$$

(4) Für mittellange Zylinder mit

$$10 \leq \omega \leq 8,7 \frac{r}{t} \quad (D.33)$$

beträgt der Faktor C_{τ} :

$$C_{\tau} = 1,0 \quad (D.34)$$

(5) Für kurze Zylinder mit

$$\omega < 10 \quad (D.35)$$

beträgt der Faktor C_{τ} :

$$C_{\tau} = \sqrt{1 + \frac{42}{\omega^3}} \quad (D.36)$$

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

(6) Für lange Zylinder mit

$$\omega > 8,7 \frac{r}{t} \quad (\text{D.37})$$

beträgt der Faktor C_τ :

$$C_\tau = \frac{1}{3} \sqrt{\omega \frac{t}{r}} \quad (\text{D.38})$$

D.1.4.2 Parameter für Schubbeulen

(1) Der elastische Imperfektions-Abminderungsfaktor für Schubbeulen ist für die jeweils spezifizierte Herstelltoleranz-Qualitätsklasse der Tabelle D.6 zu entnehmen.

Tabelle D.6 — Elastischer Imperfektions-Abminderungsfaktor α_τ in Abhängigkeit von der Herstellqualität

Herstelltoleranz-Qualitätsklasse	Beschreibung	α_τ
Klasse A	exzellent	0,75
Klasse B	hoch	0,65
Klasse C	normal	0,50

(2) Der vollplastische Grenzschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{\tau 0}$, der plastische Bereichsfaktor β und der Beulkurvenexponent η sollten wie folgt angesetzt werden:

$$\bar{\lambda}_{\tau 0} = 0,40 \quad \beta = 0,60 \quad \eta = 1,0 \quad (\text{D.39})$$

(3) Es braucht kein Beulsicherheitsnachweis gegen Schubbeulen geführt zu werden, wenn der Zylinder die folgende Bedingung erfüllt:

$$\frac{r}{t} \leq 0,16 \left(\frac{E}{f_{yk}} \right)^{0,67} \quad (\text{D.40})$$

D.1.5 Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialrichtung) mit gleichzeitig wirkendem Innendruck

D.1.5.1 Ideale Meridianbeulspannung bei gleichzeitig wirkendem Innendruck

(1) Es darf angenommen werden, dass sich die Anwesenheit des Innendruckes nicht auf die ideale Meridianbeulspannung $\sigma_{x, Rcr}$ auswirkt, so dass diese ermittelt werden kann, wie in D.1.2.1 beschrieben.

D.1.5.2 Parameter für Meridianbeulen bei gleichzeitig wirkendem Innendruck

(1) Der Beulsicherheitsnachweis gegen Meridianbeulen bei gleichzeitig wirkendem Innendruck ist analog zum Meridianbeulen ohne Innendruck zu führen, wie in 8.5 und D.1.2.2 beschrieben. Jedoch ist der elastische Imperfektions-Abminderungsfaktor α_x durch den innendruckbeeinflussten elastischen Imperfektions-Abminderungsfaktor α_{xp} zu ersetzen.

(2) Als innendruckbeeinflusster elastischer Imperfektions-Abminderungsfaktor α_{xp} ist der kleinere der beiden folgenden Werte zu verwenden:

α_{xpe} ist ein Faktor, der die innendruckinduzierte elastische Stabilisierung erfasst;

α_{xpp} ist ein Faktor, der die innendruckinduzierte plastische Destabilisierung erfasst.

(3) Der Faktor α_{xpe} sollte wie folgt ermittelt werden:

$$\alpha_{xpe} = \alpha_x + (1 - \alpha_x) \left[\frac{\overline{p_s}}{p_s + 0,3 / \alpha_x^{0,5}} \right] \quad (D.41)$$

$$\overline{p_s} = \left(\frac{p_s}{\sigma_{x,Rcr}} \right) \left(\frac{r}{t} \right) \quad (D.42)$$

Dabei ist

p_s der kleinste Bemessungswert des örtlichen Innendruckes an der Nachweisstelle, der garantiert gleichzeitig mit dem Meridiandruck vorhanden ist;

α_x der elastische Imperfektions-Abminderungsfaktor für Meridianbeulen ohne Innendruck nach D.1.2.2;

$\sigma_{x,Rcr}$ die ideale Meridianbeulspannung nach D.1.2.1 (3).

(4) Der Faktor α_{xpe} darf in der Regel nicht auf mittellange Zylinder nach D.1.2.1 (6) angewendet werden; darüber hinaus darf er in der Regel nicht angewendet werden, außer die zwei folgenden Bedingungen sind eingehalten:

— der Zylinder ist mittellang nach D.1.2.1 (4);

— der Zylinder ist kurz nach D.1.2.1 (5), sofern in D.1.2.1. (3) $C_x = 1$ eingeführt ist.

(5) Der Faktor α_{xpp} sollte wie folgt ermittelt werden:

$$\alpha_{xpp} = \left\{ 1 - \left(\frac{\overline{p_g}}{\overline{\lambda_x}^2} \right)^2 \right\} \left[1 - \frac{1}{1,12 + s^{3/2}} \right] \left[\frac{s^2 + 1,21 \overline{\lambda_x}^2}{s(s+1)} \right] \quad (D.43)$$

$$\overline{p_g} = \left(\frac{p_g}{\sigma_{x,Rcr}} \right) \left(\frac{r}{t} \right) \quad (D.44)$$

$$s = \frac{1}{400} \cdot \frac{r}{t} \quad (D.45)$$

Dabei ist

p_g der größte Bemessungswert des örtlichen Innendruckes an der Nachweisstelle, der im ungünstigsten Falle gleichzeitig mit dem Meridiandruck vorhanden ist;

$\overline{\lambda_x}$ der bezogene Schalenschlankheitsgrad nach 8.5.2 (6);

$\sigma_{x,Rcr}$ die ideale Meridianbeulspannung nach D.1.2.1 (3).

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

**D.1.6 Kombinationen der Beanspruchung durch Druck in Meridianrichtung (Axialrichtung),
 Druck in Umfangsrichtung und Schub**

(1) Die in 8.5.3 (3) zu verwendenden Beulinteraktionsparameter dürfen wie folgt ermittelt werden:

$$k_x = 1,25 + 0,75 \chi_x \quad (\text{D.46})$$

$$k_\theta = 1,25 + 0,75 \chi_\theta \quad (\text{D.47})$$

$$k_\tau = 1,75 + 0,25 \chi_\tau \quad (\text{D.48})$$

$$k_i = (\chi_x \chi_\theta)^2 \quad (\text{D.49})$$

Dabei ist

$\chi_x, \chi_\theta, \chi_\tau$ die in 8.5.2 definierten und unter Verwendung der in D.1.2 bis D.1.4 angegebenen Beulparameter ermittelten Beulabminderungsfaktoren.

(2) Es sollte davon ausgegangen werden, dass die drei Membranspannungskomponenten an jedem Punkt der Schale, mit Ausnahme der an die Ränder angrenzenden, miteinander interagieren. Für alle Punkte innerhalb einer Randzone der Länge ℓ_R an beiden Enden des Zylindersegments darf der Beulinteraktionsnachweis entfallen. Der Wert von ℓ_R ist der kleinere der beiden folgenden:

$$\ell_R = 0,1 L \quad (\text{D.50})$$

und

$$\ell_R \leq 0,16 r \sqrt{r/t} \quad (\text{D.51})$$

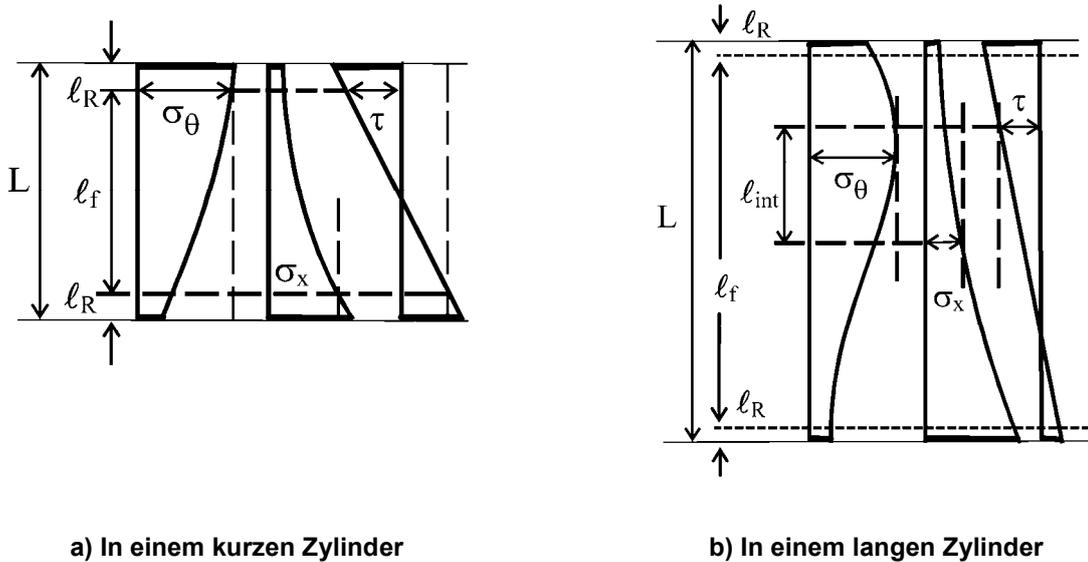
(3) Für den Fall, dass die Durchführung von Beulinteraktionsnachweisen an allen Punkten als zu aufwändig empfunden wird, gestatten die Regeln der folgenden Absätze (4) und (5) eine einfachere konservative Nachweisführung. Falls der Maximalwert einer der beulrelevanten Membranspannungen in einer Randzone der Länge ℓ_R an einem der beiden Enden des Zylinders auftritt, darf der in 8.5.3 (3) geforderte Beulinteraktionsnachweis mit den in Absatz (4) festgelegten Werten durchgeführt werden.

(4) Falls die in Absatz (3) angegebenen Bedingungen erfüllt sind, dürfen in den Beulinteraktionsnachweis nach 8.5.3 (3) die innerhalb der freien Länge ℓ_f (d. h. außerhalb der Randzonen, siehe Bild D.3 a)) auftretenden Maximalwerte jeder der beulrelevanten Membranspannungen eingeführt werden, wobei:

$$\ell_f = L - 2 \ell_R \quad (\text{D.52})$$

(5) Bei Zylindern, die nach D.1.2.1 (6) als lang gelten, dürfen die in den Beulinteraktionsnachweis eingeführten interaktionsrelevanten Membranspannungsgruppen noch weiter eingeschränkt werden als nach den Absätzen (3) und (4). Die Spannungen, die als Membranspannung einer interaktionsrelevanten Gruppe zugehörig betrachtet werden, dürfen dann auf jeden Längenabschnitt ℓ_{int} begrenzt werden, der in die für den Interaktionsnachweis verbleibende freie Länge ℓ_f fällt (siehe Bild D.3 b)), wobei:

$$\ell_{\text{int}} = 1,3 r \sqrt{r/t} \quad (\text{D.53})$$



a) In einem kurzen Zylinder

b) In einem langen Zylinder

Bild D.3 — Beispiele für interaktionsrelevante Gruppen von Membranspannungskomponenten

(6) Falls die Absätze (3) bis (5) keine speziellen Angaben zur Festlegung der interaktionsrelevanten Gruppen zusammengehöriger Membranspannungskomponenten enthalten und dennoch eine einfache konservative Behandlung erwünscht ist, dürfen die Höchstwerte der einzelnen Membranspannungen, unabhängig von der Stelle ihres Auftretens in der Schale, in die Gleichung (8.19) eingeführt werden.

D.2 Unversteifte Kreiszylinderschalen mit abgestufter Wanddicke

D.2.1 Allgemeines

D.2.1.1 Formelzeichen und Randbedingungen

(1) In diesem Abschnitt werden folgende Formelzeichen verwendet:

- L Gesamtlänge des Zylinders
- r Radius der Zylindermittelfläche
- j ganzzahliger Index zur Bezeichnung der einzelnen Zylinderschüsse mit konstanter Wanddicke (von $j = 1$ bis $j = n$)
- t_j konstante Wanddicke des Zylinderschusses j
- l_j Länge des Zylinderschusses j

(2) Die folgenden Formeln gelten nur für Schalen mit den Randbedingungen BC1 oder BC2 (siehe 5.2.2 und 8.3), wobei zwischen den beiden Randbedingungen nicht unterschieden wird.

D.2.1.2 Geometrie und planmäßiger Versatz

(1) Die Regeln in D.2 gelten für den Fall, dass die Wanddicke des Zylinders schussweise einsinnig von oben nach unten zunimmt (siehe Bild D.5 a)).

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

(2) Die folgenden Regeln gelten nur, wenn der planmäßig vorgesehene Versatz e_0 zwischen Blechen benachbarter Zylinderschüsse (siehe Bild D.4) den zulässigen Wert $e_{0,p}$, der als der kleinere der beiden folgenden anzusetzen ist, nicht überschreitet.

$$e_{0,p} = 0,5 (t_{\max} - t_{\min}) \quad (\text{D.54})$$

und

$$e_{0,p} = 0,5 t_{\min} \quad (\text{D.55})$$

Dabei ist

t_{\max} die Dicke des dickeren Bleches am Stoß;

t_{\min} die Dicke des dünneren Bleches am Stoß.

(3) Für Zylinder mit zulässigem planmäßigem Versatz zwischen Blechen benachbarter Schüsse nach Absatz (2) darf als Radius r einheitlich der Mittelwert aller Schüsse verwendet werden.

(4) Bei Zylindern mit Überlappstößen sollten die in D.3 angegebenen Regeln angewendet werden.

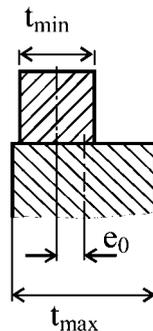


Bild D.4 — Planmäßiger Versatz e_0 in einer stumpf gestoßenen Schale

D.2.2 Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialrichtung)

(1) Jeder Zylinderschuss j der Länge ℓ_j ist als gedachter Ersatz-Zylinder mit der Gesamtlänge $\ell = L$ und der konstanten Wanddicke $t = t_j$ nach D.1.2 zu behandeln.

(2) Für lange Ersatz-Zylinder nach D.1.2.1 (6) sollte der Parameter C_{xb} konservativ mit $C_{xb} = 1$ angesetzt werden, sofern nicht eine genauere Berechnung einen günstigeren Wert rechtfertigt.

D.2.3 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung

D.2.3.1 Ideale Umfangsbeulspannungen

(1) Falls der Zylinder aus drei Schüssen mit unterschiedlicher Wanddicke besteht, sollten die Regeln der Absätze (4) bis (7) auf die drei realen Schüsse a, b und c angewendet werden, siehe Bild D.5 b).

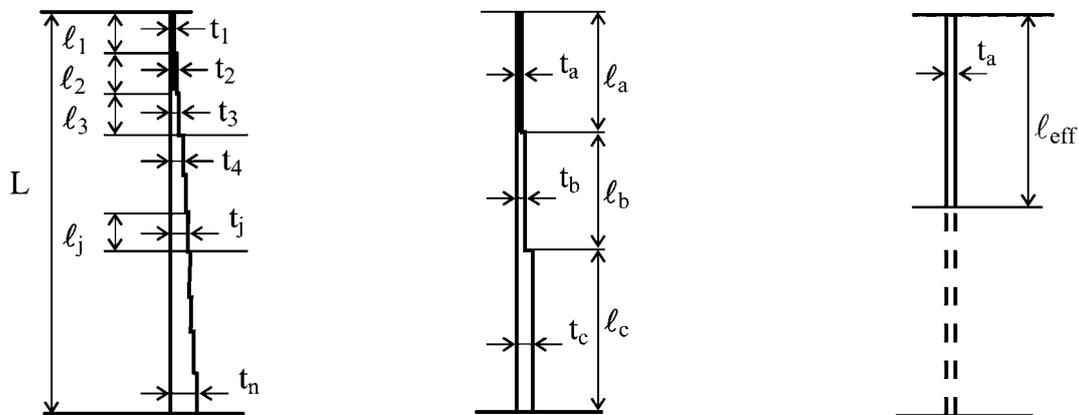
(2) Falls der Zylinder nur aus einem Schuss besteht (d. h. falls er konstante Wanddicke hat), sollte nach D.1 vorgegangen werden.

(3) Falls der Zylinder aus zwei Schüssen unterschiedlicher Wanddicke besteht, sollten die Regeln der Absätze (4) bis (7) angewendet werden, wobei zwei der drei fiktiven Schüsse, nämlich a und b, als gleich dick zu behandeln sind.

(4) Falls der Zylinder aus mehr als drei Schüssen mit unterschiedlicher Wanddicke besteht (siehe Bild D.5 a)), sollte er zunächst durch einen Ersatz-Zylinder mit drei Schüssen a, b und c (siehe Bild D.5 b)) ersetzt werden. Die Länge seines oberen Schusses, ℓ_a , sollte bis zum oberen Rand desjenigen Schusses reichen, dessen Wanddicke erstmals größer als das 1,5fache der kleinsten Wanddicke t_1 ist, allerdings nicht mehr als die Hälfte der Gesamtlänge L des Zylinders. Die Längen der beiden anderen Schüsse des Ersatzzylinders, ℓ_b und ℓ_c , sollten wie folgt ermittelt werden:

$$\ell_b = \ell_a \text{ und } \ell_c = L - 2\ell_a, \quad \text{falls } \ell_a \leq L/3 \quad (\text{D.56})$$

$$\ell_b = \ell_c = 0,5 (L - \ell_a), \quad \text{falls } L/3 < \ell_a \leq L/2 \quad (\text{D.57})$$



a) Zylinder mit abgestufter
Wanddicke

b) Dreischüssiger Ersatz-
Zylinder

c) Einschüssiger Ersatz-Zylinder
mit konstanter Wanddicke

Bild D.5 — Überführung eines abgestuften Zylinders in Ersatz-Zylinder

(5) Die fiktiven Wanddicken t_a , t_b und t_c der drei Schüsse sollten als gewichtete Mittelwerte der tatsächlichen Wanddicken über jeden der drei fiktiven Schüsse ermittelt werden:

$$t_a = \frac{1}{\ell_a} \sum_a \ell_j t_j \quad (\text{D.58})$$

$$t_b = \frac{1}{\ell_b} \sum_b \ell_j t_j \quad (\text{D.59})$$

$$t_c = \frac{1}{\ell_c} \sum_c \ell_j t_j \quad (\text{D.60})$$

(6) Der dreischüssige Zylinder (d. h. der reale oder der Ersatz-Zylinder) ist durch einen einschüssigen Ersatzzylinder der Ersatzlänge ℓ_{eff} mit konstanter Wanddicke $t = t_a$ zu ersetzen, siehe Bild D.5 c). Die Ersatzlänge beträgt:

$$\ell_{\text{eff}} = \ell_a / \kappa, \quad (\text{D.61})$$

wobei κ ein dimensionsloser Faktor ist, der aus Bild D.6 zu entnehmen ist.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

(7) Für mittellange oder kurze Zylinderschüsse ist die ideale Umfangsbeulspannung jedes Zylinderschusses j des ursprünglichen Zylinders mit abgestufter Wanddicke wie folgt zu ermitteln:

$$\sigma_{\theta, Rcr, j} = \left(\frac{t_a}{t_j} \right) \sigma_{\theta, Rcr, eff} \quad (D.62)$$

Dabei ist $\sigma_{\theta, Rcr, eff}$ die ideale Umfangsbeulspannung des einschüssigen Ersatzzylinders mit der Ersatzlänge ℓ_{eff} nach Absatz (6), ermittelt nach D.1.3.1 (3) bzw. D.1.3.1 (5) oder D.1.3.1 (7). Der Faktor C_θ in den entsprechenden Formeln ist dabei zu $C_\theta = 1,0$ zu setzen.

ANMERKUNG Die Gleichung (D.62) mag befremdlich wirken, da der Widerstand bei dünner werdenden Blechen anwächst. Der Grund hierfür ist, dass der gesamte Zylinder bei einem einzigen kritischen Außendruck verzweigt und die Gleichung (D.62) die Membranspannung in jedem Schuss für diesen Zustand angibt. Da der Außendruck in Axialrichtung konstant ist, sind diese Spannungswerte in den dickeren Schüssen kleiner. Es ist zu beachten, dass die Umfangsmembranspannungen, die mit den entsprechenden Grenzspannungen im Nachweis verglichen werden, in den dickeren Schüssen ebenfalls kleiner sind (siehe Bild D.7). Wird ein Zylinder mit abgestufter Wanddicke durch konstanten Außendruck elastisch beansprucht, so ist das Verhältnis der Umfangsmembranspannung zur entsprechenden Grenzspannung über alle Schüsse konstant.

(8) Die Länge eines Zylinderschusses lässt sich mit Hilfe des dimensionslosen Längenparameters ω_j beschreiben:

$$\omega_j = \frac{\ell_j}{r} \sqrt{\frac{r}{t_j}} = \frac{\ell_j}{\sqrt{r t_j}} \quad (D.63)$$

(9) Für lange Zylinderschüsse j sollte eine alternative zweite Berechnung der idealen Umfangsbeulspannung durchgeführt werden. Der kleinere der beiden nach den Absätzen (7) und (10) ermittelten Werte ist für den Beulsicherheitsnachweis des Zylinderschusses j zu verwenden.

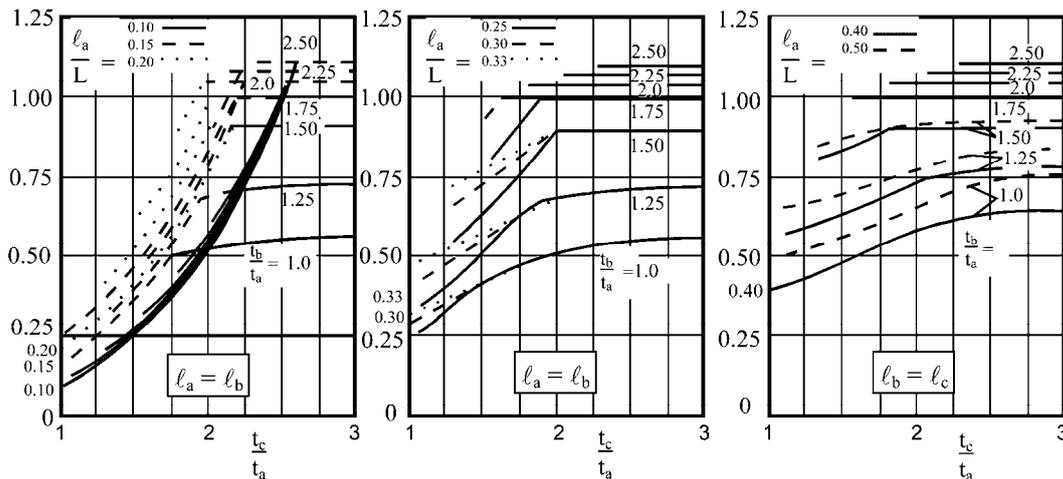


Bild D.6 — Faktor κ zur Ermittlung der Ersatzlänge ℓ_{eff}

(10) Ein Zylinderschuss j gilt als lang, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\omega_j > 1,63 \frac{r}{t_j} \quad (D.64)$$

In diesem Falle sollte die ideale elastische Umfangsbeulspannung wie folgt ermittelt werden:

$$\sigma_{\theta, Rcr, j} = E \left(\frac{t_j}{r} \right)^2 \left[0,275 + 2,03 \left(\frac{1}{\omega_j} \cdot \frac{r}{t_j} \right)^4 \right] \quad (D.65)$$

D.2.3.2 Beulsicherheitsnachweis für Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung

(1) Für jeden Zylinderschuss j gelten die in 8.5 angegebenen Regeln, und es sollte folgender Nachweis geführt werden:

$$\sigma_{\theta, Ed, j} \leq \sigma_{\theta, Rcr, j} \quad (D.66)$$

Dabei ist

$\sigma_{\theta, Ed, j}$ der maßgebende Wert der Druckmembranspannung in Umfangsrichtung, wie in den nachstehenden Absätzen genauer beschrieben;

$\sigma_{\theta, Rcr, j}$ die aus der idealen elastischen Umfangsbeulspannung nach D.1.3.2 ermittelte Bemessungs-Umfangsbeulspannung.

(2) Falls der Bemessungswert der Umfangsmembrankraft $n_{\theta, Ed}$ über die Länge L konstant ist, sollte der maßgebende Wert der Umfangsdruckmembranspannung in Zylinderschuss j einfach wie folgt angesetzt werden:

$$\sigma_{\theta, Ed, j} = n_{\theta, Ed} / t_j \quad (D.67)$$

(3) Falls der Bemessungswert der Umfangsmembrankraft $n_{\theta, Ed}$ über die Länge L veränderlich ist, sollte als maßgebender Wert der Druckmembranspannung in Umfangsrichtung ein fiktiver Wert $\sigma_{\theta, Ed, j, mod}$ angesetzt werden, der aus dem Maximalwert der in der gesamten Zylinderlänge L vorhandenen Umfangsmembrankraft $n_{\theta, Ed}$, dividiert durch die jeweilige örtliche Dicke t_j , ermittelt wird (siehe Bild D.7):

$$\sigma_{\theta, Ed, j, mod} = \max (n_{\theta, Ed}) / t_j \quad (D.68)$$

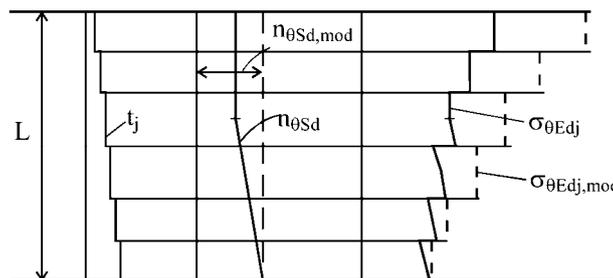


Bild D.7 — Maßgebende Druckmembranspannungen in Umfangsrichtung, wenn die Umfangsmembrankraft $n_{\theta, Ed}$ über die Länge L veränderlich ist

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

D.2.4 Schubbeanspruchung

D.2.4.1 Ideale Schubbeulspannungen

(1) Falls keine speziellen Regeln zur Herleitung eines einschüssigen Ersatz-Zylinders mit konstanter Wanddicke zur Verfügung stehen, dürfen die in D.2.3.1 (1) bis (6) angegebenen Formelausdrücke angewendet werden.

(2) Die weitere Bestimmung der idealen elastischen Schubbeulspannungen darf grundsätzlich so durchgeführt werden, wie in D.2.3.1 (7) bis (10) angegeben, wobei jedoch die Formelausdrücke von D.1.3.1 für Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung durch die relevanten Formelausdrücke für Schubbeanspruchung nach D.1.4.1 zu ersetzen sind.

D.2.4.2 Beulsicherheitsnachweis für Schubbeanspruchung

(1) Es dürfen die Regeln nach D.2.3.2 angewendet werden, wobei jedoch die Gleichungen für Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung durch die relevanten Formelausdrücke für Schubbeanspruchung zu ersetzen sind.

D.3 Unversteifte Kreiszylinderschalen mit Überlappstößen

D.3.1 Allgemeines

D.3.1.1 Begriffe

D.3.1.1.1

Umfangsüberlappstoß

Überlappstoß, der in Umfangsrichtung um die Schalenachse verläuft

D.3.1.1.2

Meridianüberlappstoß

Überlappstoß, der parallel zur Schalenachse (in Meridianrichtung) verläuft

D.3.1.2 Geometrie und Schnittgrößen

(1) Im Falle von Zylinderschalen mit Überlappstößen (siehe Bild D.8) dürfen anstelle der in D.2 angegebenen die folgenden Regeln angewendet werden.

(2) Die folgenden Regeln gelten für Überlappstöße, die den Radius der Schalenmittelfläche entweder vergrößern oder verringern.

(3) Falls der Überlappstoß in Umfangsrichtung um die Schalenachse verläuft (Umfangsüberlappstoß), sollten für Druckbeanspruchung in Meridianrichtung die Regeln nach D.3.2 angewendet werden.

(4) Falls mehrere Überlappstöße in Umfangsrichtung um die Schalenachse verlaufen (Umfangsüberlappstöße) und die Blechdicke über die Schalenhöhe veränderlich ist, sollten für Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung die Regeln nach D.3.3 angewendet werden.

(5) Falls ein kontinuierlicher Überlappstoß parallel zur Schalenachse verläuft (Meridianüberlappstoß ohne Versatz), sollten für Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung die Bestimmungen nach D.3.3 angewendet werden.

(6) In den sonstigen Fällen braucht der Einfluss von Überlappstößen auf den Beulwiderstand nicht gesondert berücksichtigt zu werden.

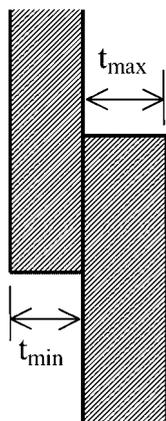


Bild D.8 — Schale mit Überlappstoß

D.3.2 Druckbeanspruchung in Meridianrichtung (Axialrichtung)

- (1) Wird ein Zylinder mit Umfangsüberlappstößen durch Druck in Meridianrichtung beansprucht, so darf der Beulwiderstand wie für einen Zylinder mit konstanter bzw. abgestufter Wanddicke ermittelt werden, wobei der Bemessungsbeulwiderstand jedoch durch Multiplikation mit dem Faktor 0,70 abzumindern ist.
- (2) Falls der Überlappstoß einen Dickensprung einschließt, darf der Bemessungsbeulwiderstand als gleich dem für das dünnere Blech nach Absatz (1) ermittelten Wert angesetzt werden.

D.3.3 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung

- (1) Wird ein Zylinder mit kontinuierlichen Meridianüberlappungsstößen durch Druck in Umfangsrichtung beansprucht, so darf der Bemessungsbeulwiderstand wie für einen Zylinder mit konstanter bzw. abgestufter Wanddicke ermittelt werden, wobei er jedoch durch Multiplikation mit dem Faktor 0,90 abzumindern ist.
- (2) Wird ein Zylinder mit mehreren Umfangsüberlappstößen und mit über die Schalenhöhe veränderlicher Blechdicke durch Druck in Umfangsrichtung beansprucht, so sollte das in D.2 angegebene Verfahren angewendet werden, wobei jedoch die geometrischen Einschränkungen des planmäßigen Versatzes außer Acht zu lassen sind und der Bemessungsbeulwiderstand durch Multiplikation mit dem Faktor 0,90 abzumindern ist.
- (3) Werden in beiden Richtungen Überlappstöße mit versetzter Anordnung der Meridianüberlappstöße in verschiedenen Schüssen oder Elementen angeordnet, so sollte der Bemessungsbeulwiderstand nach Absatz (2) ermittelt werden, wobei jedoch keine Abminderung des Beulwiderstandes erforderlich ist.

D.3.4 Schubbeanspruchung

- (1) Bei Membranschubbeanspruchung eines Zylinders mit Überlappstößen darf der Beulwiderstand ohne Reduktion wie für einen Zylinder mit konstanter bzw. abgestufter Wanddicke ohne besondere Berücksichtigung der Überlappstöße ermittelt werden.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

D.4 Unversteifte Kegelschalen (vollständige Kegel und Kegelstümpfe)

D.4.1 Allgemeines

D.4.1.1 Formelzeichen

In diesem Abschnitt werden folgende Formelzeichen verwendet:

- h axiale Länge (Höhe) des Kegelstumpfes
- L meridionale Länge (Mantellänge) des Kegelstumpfes ($= h/\cos \beta$)
- r Radius der Kegelmittelfläche, rechtwinklig zur Rotationsachse, linear veränderlich entlang der Länge
- r_1 Radius am kleinen Ende des Kegelstumpfes
- r_2 Radius am großen Ende des Kegelstumpfes
- β halber Öffnungswinkel des Kegels

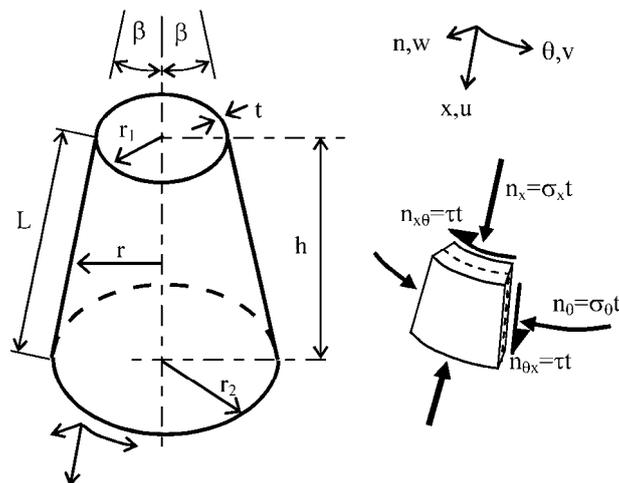


Bild D.9 — Kegelgeometrie, Membranspannungen und Membrankräfte

D.4.1.2 Randbedingungen

(1) Die folgenden Formeln gelten nur für Kegelschalen mit den Randbedingungen BC1 oder BC2 (siehe 5.2.2 und 8.3), wobei zwischen den beiden Randbedingungen nicht unterschieden wird. Sie dürfen nicht auf Kegelschalen angewendet werden, deren Ende die Randbedingung BC3 aufweist.

(2) Die Regeln in D.4 gelten nur für die folgenden beiden Varianten der radialen Unverschieblichkeitsrandbedingung am jeweiligen Kegelende:

„Zylinder-Randbedingung“ $w = 0$;

„Ring-Randbedingung“ $u \sin \beta + w \cos \beta = 0$.

D.4.1.3 Geometrie

(1) Die folgenden Regeln gelten nur für Kegelstümpfe mit konstanter Wanddicke und mit halbem Öffnungswinkel $\beta \leq 65^\circ$ (siehe Bild D.9).

D.4.2 Bemessungsbeulspannungen**D.4.2.1 Ersatz-Zylinder**

(1) Alle für den Beulsicherheitsnachweis nach 8.5 benötigten Bemessungsbeulspannungen lassen sich durch Behandlung der Kegelschale als Ersatz-Zylinder mit der Länge ℓ_e und dem Radius r_e ermitteln, wobei ℓ_e und r_e vom Typ der Membranspannungsverteilung in der Kegelschale abhängen.

D.4.2.2 Druckbeanspruchung in Meridianrichtung

(1) Bei Kegeln unter Meridiandruckbeanspruchung sollte die Ersatz-Zylinderlänge ℓ_e wie folgt angesetzt werden:

$$\ell_e = L \quad (\text{D.69})$$

(2) Der Ersatz-Zylinderradius r_e an der betreffenden beulrelevanten Stelle sollte wie folgt angesetzt werden:

$$r_e = \frac{r}{\cos \beta} \quad (\text{D.70})$$

D.4.2.3 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung

(1) Bei Kegeln unter Umfangsdruckbeanspruchung sollte die Ersatz-Zylinderlänge ℓ_e wie folgt angesetzt werden:

$$\ell_e = L \quad (\text{D.71})$$

(2) Der Ersatz-Zylinderradius r_e sollte wie folgt angesetzt werden:

$$r_e = \frac{(r_1 + r_2)}{2 \cos \beta} \quad (\text{D.72})$$

D.4.2.4 Belastung durch konstanten Außendruck

(1) Auf Kegel, bei denen an beiden Enden entweder die Randbedingung BC1 oder die Randbedingung BC2 vorliegt und die durch konstanten Außendruck q belastet werden, darf das folgende Verfahren angewendet werden, um zu einer wirtschaftlicheren Bemessung zu gelangen.

(2) Die Ersatz-Zylinderlänge ℓ_e sollte als der kleinere der beiden folgenden Werte angesetzt werden:

$$\ell_e = L \quad (\text{D.73})$$

und

$$\ell_e = \left(\frac{r_2}{\sin \beta} \right) (0,53 + 0,125 \beta) \quad (\text{D.74})$$

wobei der halbe Öffnungswinkel des Kegels β im Bogenmaß gemessen wird.

DIN EN 1993-1-6:2010-12
EN 1993-1-6:2007 + AC:2009 (D)

(3) Bei kürzeren Kegelschalen, deren Ersatz-Zylinderlänge ℓ_e durch die Gleichung (D.73) wiedergegeben wird, sollte der Ersatz-Zylinderradius r_e wie folgt angesetzt werden:

$$r_e = \left(\frac{0,55 r_1 + 0,45 r_2}{\cos \beta} \right) \quad (\text{D.75})$$

(4) Bei längeren Kegelschalen, deren Ersatz-Zylinderlänge ℓ_e durch die Gleichung (D.74) wiedergegeben wird, sollte der Ersatz-Zylinderradius r_e wie folgt angesetzt werden:

$$r_e = 0,71 r_2 \left[\frac{1 - 0,1 \beta}{\cos \beta} \right] \quad (\text{D.76})$$

(5) Der Beulsicherheitsnachweis sollte auf der nominellen Umfangsmembranspannung beruhen:

$$\sigma_{\theta, \text{Ed}} = q \left(\frac{r_e}{t} \right) \quad (\text{D.77})$$

Dabei ist q der Außendruck, und die durch diesen erzeugte Meridianmembranspannung wird außer Acht gelassen.

D.4.2.5 Schubbeanspruchung

(1) Bei Kegeln unter Membranschubbeanspruchung sollte die Ersatz-Zylinderlänge ℓ_e wie folgt angesetzt werden:

$$\ell_e = h \quad (\text{D.78})$$

(2) Der Ersatz-Zylinderradius r_e sollte wie folgt angesetzt werden:

$$r_e = \left[1 + \rho_g - \frac{1}{\rho_g} \right] r_1 \cdot \cos \beta \quad (\text{D.79})$$

Mit:

$$\rho_g = \sqrt{\frac{r_1 + r_2}{2 r_1}} \quad (\text{D.80})$$

D.4.2.6 Belastung durch konstante Torsion

(1) Auf Kegel, bei denen an beiden Enden die Randbedingung BC2 vorliegt und die durch ein konstantes globales Torsionsmoment belastet werden, das linear über die Meridianlänge veränderliche Membranschubspannungen erzeugt, darf unter der Voraussetzung, dass $\rho_u \leq 0,8$ ist, das folgende Verfahren angewendet werden, um zu einer wirtschaftlicheren Bemessung zu gelangen.

(2) Die Ersatz-Zylinderlänge ℓ_e sollte wie folgt angesetzt werden:

$$\ell_e = L \quad (\text{D.81})$$

- (3) Der Ersatz-Zylinderradius r_e sollte wie folgt angesetzt werden:

$$r_e = \left(\frac{r_1 + r_2}{2 \cos \beta} \right) \left(1 - \rho_u^{0,25} \right)^{0,4} \quad (\text{D.82})$$

Mit:

$$\rho_u = \frac{L \sin \beta}{r_2} \quad (\text{D.83})$$

D.4.3 Beulsicherheitsnachweis

D.4.3.1 Druckbeanspruchung in Meridianrichtung

- (1) Der Nachweis sollte an der Stelle des Kegels geführt werden, an der die Kombination aus Bemessungs-Meridianmembranspannung $\sigma_{x,Ed}$ und Bemessungs-Meridianbeulspannung $\sigma_{x,Rd}$ nach D.4.2.2 am ungünstigsten ist.
- (2) Falls die Meridiandruckbeanspruchung durch eine konstante Axiallast auf einem Kegelstumpf verursacht wird, kann sowohl der kleinste Radius r_1 als auch der größte Radius r_2 die ungünstigste Stelle sein.
- (3) Falls die Meridiandruckbeanspruchung durch ein konstantes globales Biegemoment auf einem Kegelstumpf verursacht wird, sollte der kleinste Radius r_1 als die ungünstigste Stelle betrachtet werden.
- (4) Die Bemessungs-Meridianbeulspannung $\sigma_{x,Rd}$ des Ersatz-Zylinders ist nach D.1.2 zu ermitteln.

D.4.3.2 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung, konstanter Außendruck

- (1) Falls die Umfangsdruckbeanspruchung durch konstanten Außendruck verursacht wird, sollte der Beulsicherheitsnachweis mit der nach Gleichung (D.77) ermittelten Bemessungs-Umfangsmembranspannung $\sigma_{\theta,Ed}$ und der Umfangsbeulspannung $\sigma_{\theta,Rd}$ nach D.4.2.1 und D.4.2.3 oder D.4.2.4 geführt werden.
- (2) Falls die Umfangsdruckbeanspruchung durch andere Einwirkungen als konstanten Außendruck verursacht wird, sollte die berechnete Spannungsverteilung $\sigma_{\theta,Ed}(x)$ durch eine fiktive einhüllende Spannungsverteilung $\sigma_{\theta,Ed,env}(x)$ ersetzt werden, die nirgends innerhalb der berechneten Spannungsverteilung liegt und aus einem fiktiven konstanten Manteldruck entstanden sein könnte. Der Beulsicherheitsnachweis sollte dann durchgeführt werden, wie in Absatz (1) beschrieben, aber mit $\sigma_{\theta,Ed,env}$ anstelle von $\sigma_{\theta,Ed}$.
- (3) Die Bemessungs-Umfangsbeulspannung $\sigma_{\theta,Rd}$ des Ersatz-Zylinders sollte nach D.1.3 ermittelt werden.

D.4.3.3 Schubbeanspruchung, konstante Torsion

- (1) Falls die Schubbeanspruchung durch ein konstantes globales Torsionsmoment verursacht wird, sollte der Beulsicherheitsnachweis mit dem Bemessungswert der an der Stelle $r = r_e \cos \beta$ wirkenden Membranschubspannung $\tau_{x\theta,Ed}$ und mit der Schubbeulspannung $\tau_{x\theta,Rd}$ nach D.4.2.1 und D.4.2.5 oder D.4.2.6 geführt werden.
- (2) Falls die Schubbeanspruchung durch andere Einwirkungen als ein konstantes globales Torsionsmoment verursacht wird (z. B. eine globale Querkraft auf dem Kegel), sollte die berechnete Spannungsverteilung $\tau_{x\theta,Ed}(x)$ durch eine fiktive einhüllende Spannungsverteilung $\tau_{x\theta,Ed,env}(x)$ ersetzt werden, die nirgends innerhalb der berechneten Spannungsverteilung liegt und aus einem fiktiven globalen Torsionsmoment entstanden sein könnte. Der Beulsicherheitsnachweis sollte dann durchgeführt werden, wie in Absatz (1) beschrieben, aber mit $\tau_{x\theta,Ed,env}$ anstelle von $\tau_{x\theta,Ed}$.
- (3) Die Bemessungs-Schubbeulspannung $\tau_{x\theta,Rd}$ des Ersatz-Zylinders sollte nach D.1.4 ermittelt werden.

DIN EN 1993-1-6/NA

ICS 91.010.30; 91.080.10

Mit DIN EN 1993-1-6:2010-12
Ersatz für
DIN 18800-4:2008-11**Nationaler Anhang –
National festgelegte Parameter –
Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen**National Annex –
Nationally determined parameters –
Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-6: Strength and stability of shell structuresAnnexe Nationale –
Paramètres déterminés au plan national –
Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 1-6: Résistance et stabilité des structures en coque

Gesamtumfang 11 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

DIN EN 1993-1-6/NA:2010-12

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung“ erstellt.

Dieses Dokument bildet den Nationalen Anhang zu DIN EN 1993-1-6:2010-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-6 NA: Festigkeit und Stabilität von Schalen*.

Die Europäische Norm EN 1992-1-6 räumt die Möglichkeit ein, eine Reihe von sicherheitsrelevanten Parametern national festzulegen. Diese national festzulegenden Parameter (en: Nationally determined parameters, NDP) umfassen alternative Nachweisverfahren und Angaben einzelner Werte, sowie die Wahl von Klassen aus gegebenen Klassifizierungssystemen. Die entsprechenden Textstellen sind in der Europäischen Norm durch Hinweise auf die Möglichkeit nationaler Festlegungen gekennzeichnet. Eine Liste dieser Textstellen befindet sich im Unterabschnitt NA 2.1. Darüber hinaus enthält dieser Nationale Anhang ergänzende nicht widersprechende Angaben zur Anwendung von DIN EN 1993-1-6:2010-12 (en: non-contradictory complementary information, NCI).

Dieser Nationale Anhang ist Bestandteil von DIN EN 1993-1-6:2010-12.

DIN EN 1993-1-6:2010-12 und dieser Nationale Anhang DIN EN 1993-1-6/NA:2010-12 ersetzen DIN 18800-4:2008-11.

Änderungen

Gegenüber DIN 18800-4:2008-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) nationale Festlegungen zu DIN EN 1993-1-6:2010-12 aufgenommen.

Frühere Ausgaben

DIN 18800-4: 1990-11, 2008-11

NA 1 Anwendungsbereich

Dieser Nationale Anhang enthält nationale Festlegungen zu den Grundregeln für die Bemessung von Stahlkonstruktionen, die die Form von Rotationsschalen haben, die bei der Anwendung von DIN EN 1993-1-6:2010-12 in Deutschland zu berücksichtigen sind.

Dieser Nationale Anhang gilt nur in Verbindung mit DIN EN 1993-1-6:2010-12.

NA 2 Nationale Festlegungen zur Anwendung von DIN EN 1993-1-6:2010-12**NA 2.1 Allgemeines**

DIN EN 1993-1-6:2010-12 weist an den folgenden Textstellen die Möglichkeit nationaler Festlegungen aus (NDP, en: Nationally determined parameters).

— 3.1(4)	— 8.4.3(4)
— 4.1.4(3)	— 8.4.4(4)
— 5.2.4(1)	— 8.4.5(1)
— 6.3(5)	— 8.5.2(2)
— 7.3.1(1)	— 8.5.2(4)
— 7.3.2(1)	— 8.7.2(7)
— 8.4.2(3)	— 8.7.2(16)
— 8.4.3(2)	— 8.7.2(18)
	— 9.2.1(2)P

Darüber hinaus enthält NA 2.2 ergänzende nicht widersprechende Angaben zur Anwendung von DIN EN 1993-1-6:2010-12. Diese sind durch ein vorangestelltes "NCI" (en: non-contradictory complementary information) gekennzeichnet.

- Lange Zylinder unter globaler Rohrbiegung oder globaler Rohrbiegung mit Normalkraft
- Lange Zylinder unter Außendruck
- Anhang NA.A (normativ) Kugelschalen unter konstantem Außendruck
- Literaturhinweise

DIN EN 1993-1-6/NA:2010-12

NA 2.2 Nationale Festlegungen

Die nachfolgende Nummerierung entspricht der Nummerierung von DIN EN 1993-1-6:2010-12.

NDP zu 3.1(4) Anmerkung

Die Werkstoffeigenschaften bei Temperaturen über 150 °C sind über einen bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweis zu belegen.

NDP zu 4.1.4(3) Anmerkung

Es gelten die Empfehlungen.

NDP zu 5.2.4(1) Anmerkung

Es gelten die Empfehlungen.

NDP zu 6.3(5) Anmerkung

Es gelten die Empfehlungen.

NDP zu 7.3.1(1) Anmerkung 2

Verfeinerte Berechnungen sind hier nicht vorgesehen.

NDP zu 7.3.2(1) Anmerkung

Es gelten die Empfehlungen.

NDP zu 8.4.2(3) Anmerkung

Es gelten die Empfehlungen.

NDP zu 8.4.3(2) Anmerkung

Es gelten die Empfehlungen.

NDP zu 8.4.3(4) Anmerkung

Es gelten die Empfehlungen.

NDP zu 8.4.4(4) Anmerkung

Es gelten die Empfehlungen.

NDP zu 8.4.5(1) Anmerkung

Es gelten die Empfehlungen.

NDP zu 8.5.2(2) Anmerkung

Es gelten die Empfehlungen.

NDP zu 8.5.2(4) Anmerkung 1

Es gibt hier keine zusätzlichen Festlegungen zu den Parametern.

NDP zu 8.7.2(7) Anmerkung

Alleine die Anforderungen an Funktion und Aussehen der Schale bestimmen die größte tolerierbare Verformung.

NDP zu 8.7.2(16) Anmerkung

Bei der Festlegung geeigneter Imperpektionsformen rechtwinklig zur Schalenmittelfläche im Sinne von (11) sind gegebenenfalls neben ‚eigenformaffinen‘ Formen nach (13) auch ‚kollapsaffine‘ oder ‚nachbeulaffine‘ Formen in Erwägung zu ziehen. Darüber hinaus sind auch solche geometrischen Ersatzimperpektionen zu bedenken, die nicht Abweichungen rechtwinklig zur Schalenmittelfläche, sondern parallel zur Schalenmittelfläche beschreiben (z. B. Aufstandsimperpektionen bei stehenden Schalenbauten).

NDP zu 8.7.2(18) Anmerkung1 und Anmerkung 2

Es gelten die Empfehlungen. Darüber hinaus wird besonders auf (20) hingewiesen, womit solche Schalenbeulfälle abgedeckt werden sollen, bei denen zu groß angenommene Imperpektionen ein günstigeres Ergebnis liefern als kleinere Imperpektionen.

NDP zu 9.2.1(2)P Anmerkung

Anstelle der Empfehlung gilt DIN EN 1993-1-9/NA.

NCI Lange Zylinder unter globaler Rohrbiegung oder globaler Rohrbiegung mit Normalkraft

Für lange Kreiszyylinder mit

$$\omega \geq 0,5 \frac{r}{t} \quad (\text{NA.1})$$

darf der günstigere Faktor C_x nach D.1.2.1 (7) auch für Schalen mit $E/f_{y,k} < 500$ verwendet werden. Die beiden anderen Anwendungsbedingungen in Gleichung (D.11) brauchen nicht beachtet zu werden.

ANMERKUNG In der nächsten Ausgabe von DIN EN 1993-1-6 wird dies aufgrund neuerer Erkenntnisse erfasst sein.

NCI Lange Zylinder unter Außendruck

Für lange Kreiszyylinder mit

$$\omega \geq 24,5; \quad r/t \leq 100; \quad \frac{r}{t} \sqrt{\frac{f_{y,k}}{E}} \geq 1,57 \quad (\text{NA.2})$$

darf der elastische Imperpektions-Abminderungsfaktor für Umfangsbeulen α_0 nach D.1.3.2(1), Tabelle D.5, um

$$\Delta\alpha = \left(\alpha_{\text{Ring}} - \alpha_0 \right) \left(1 - \frac{600}{\omega^2} \right), \quad (\text{NA.3})$$

erhöht werden. In Gleichung (NA.3) bedeuten:

α_0 = Grundwert nach D.1.3.2(1), Tabelle D.5,

$$\alpha_{\text{Ring}} = \frac{1}{1 + 0,257 \frac{t}{r} \sqrt{\frac{E}{f_{y,k}}}} \quad (\text{NA.4})$$

DIN EN 1993-1-6/NA:2010-12

NCI

Anhang NA.A

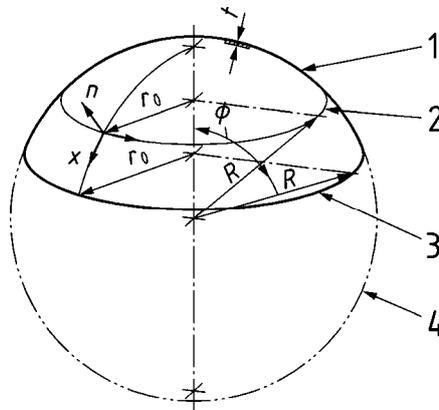
(normativ)

Kugelschalen unter konstantem Außendruck

NCI NA.A.1 Allgemeines

Die angegebenen Regeln basieren sowohl auf umfangreichen numerischen Parameterstudien als auch auf allen verfügbaren experimentellen Ergebnissen für Kugelschalen und Kugelkalotten unter konstantem Außendruck (innerem Unterdruck) [1], [2]. Dabei sind sowohl die Beullasten als auch die axisymmetrischen elasto-plastischen Traglasten berücksichtigt. In den in DIN EN 1993-1-6:2010-12, 5.3, Tabelle 5.2, angegebenen Berechnungskonzepten sind die geometrisch und physikalisch nichtlinearen Berechnungen unter Einschluss der Imperfektionen als GMNIA-Berechnung klassifiziert. Weitere Erläuterungen sind in Abschnitt 15 der European Design Recommendations, 5th edition [3] zu finden.

NCI NA.A.2 Geometrie und beulrelevante geometrische Toleranzen



Legende

R	Radius der Kugelmittelfläche	1	Breitenkreis
t	Schalendicke,	2	Kugelkalotte
r_0	Grundkreisradius der Kugelkalotte,	3	Grundkreis
ϕ	Winkelcoordinate in der Meridianebene	4	Vollkugel

Bild NA.A.1 — Geometrie, Bezeichnungen

Für die beulrelevanten geometrischen Toleranzen gilt DIN EN 1993-1-6:2010-12, 8.4 sinngemäß, wobei jeweils der Kugelradius R an die Stelle des Zylinderradius r und der Kugeldurchmesser $2R$ an die Stelle des Zylinderdurchmessers d tritt. Die Messung von Vorbeulen (siehe DIN EN 1993-1-6:2010-12, 8.4.4) sollte sowohl in Meridianrichtung als auch in Umfangsrichtung jeweils mit l_{gx} nach Gl. (8.6) und l_{gw} nach Gl. (8.8) aus DIN EN 1993-1-6:2010-12 durchgeführt werden. Eine Messung in Umfangsrichtung mit $l_{g\theta}$ nach Gl. (8.7) ist nicht erforderlich. Die gemessenen Formabweichungen müssen die Toleranzgrenzwerte der bei der Bemessung gewählten Herstelltoleranz-Qualitätsklasse (siehe DIN EN 1993-1-6:2010-12, 4.3.5) einhalten.

NCI NA.A.3 Anwendungsbereich

Die folgenden Regeln gelten für Kugelschalen und Kugelkalotten

- mit konstanter oder schwach veränderlicher Wanddicke,
 - unter konstantem Außendruck oder konstantem innerem Unterdruck p
- oder
- unter Eigengewicht oder Schneebelastung (als konservative Näherung)
- und
- unterschiedlicher Lagerung gemäß folgender Beschreibung:
 - RBK 1: Vollkugel, nicht oder ringförmig tangential gelagert;
 - RBK 2: Kugelkalotte mit eingespannt unverschieblichem Rand (BC1r in DIN EN 1993-1-6:2010-12, Tabelle 5.1);
 - RBK 3: Kugelkalotte mit gelenkig unverschieblichem Rand (BC1f in DIN EN 1993-1-6:2010-12, Tabelle 5.1);
 - RBK 4: Kugelkalotte mit normal zur Kugelmittelfläche radial verschieblichem Rand (Membranlagerung) ($w \neq 0 / u = 0 / \beta_\theta \neq 0$ in Anlehnung an DIN EN 1993-1-6:2010-12, Tabelle 5.1);
 - RBK 5: Kugelkalotte mit in Grundkreisebene radial verschieblichem Rand ($u \cdot \sin \phi - w \cdot \cos \phi = 0 / u \cdot \cos \phi + w \cdot \sin \phi \neq 0 / \beta_\theta \neq 0$ in Anlehnung an DIN EN 1993-1-6:2010-12, Tabelle 5.1);

Bei einer Halbkugel ($\phi = 90^\circ$) stimmen die Randbedingungen RBK 4 und RBK 5 überein. In diesem Fall kann RBK4 verwendet werden.

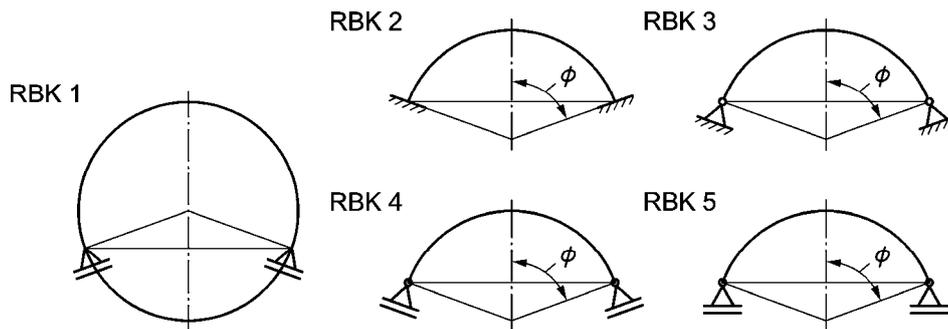
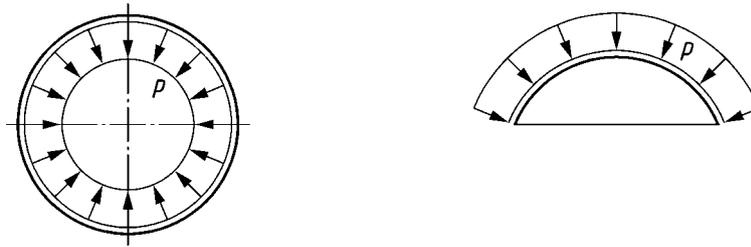


Bild NA.A.2 — Darstellung der Randbedingungen

DIN EN 1993-1-6/NA:2010-12**Bild NA.A.3 — Lasten auf Kugelschalen und Kugelkalotten**

ANMERKUNG Die Bemessungsregeln liegen für die Lastfälle Eigengewicht und Schneebelastung bezüglich Stabilitätsversagen auf der sicheren Seite, wenn für den Druck p der Wert der größten Flächenlast rechtwinklig zur Schalenmittelfläche eingesetzt wird.

Die folgenden Regeln sind nur anwendbar bei Kugelschalen, die die Bedingungen

$$\frac{R}{t} \leq 3000 \quad (\text{NA.A.1})$$

$$\phi \leq 135^\circ \text{ (Kugelkalotte), jedoch auch } \phi = 180^\circ \text{ (Vollkugel)} \quad (\text{NA.A.2})$$

erfüllen.

NCI NA.A.4 Abgrenzungskriterium

Für Kugelschalen, die die Bedingung

$$\frac{R}{t} \leq \frac{E}{20 f_{y,k}} \cdot C_c \quad (\text{NA.A.3})$$

und Kugelkalotten, die die Bedingung

$$\frac{r_0}{R} \leq \frac{1,1}{\sqrt{\frac{R}{t}}} \quad (\text{NA.A.4})$$

erfüllen, braucht kein Beulsicherheitsnachweis geführt zu werden.

NCI NA.A.5 Idealer elastischer Beulwiderstand

Der ideale elastische Beulwiderstand p_{Rcr} wird bestimmt durch

$$p_{Rcr} = \frac{2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot C_c E \left(\frac{t}{R} \right)^2 \quad (\text{NA.A.5})$$

wobei der Beiwert C_c von den Randbedingungen abhängt und aus Tabelle NA.A.1 zu entnehmen ist.

Tabelle NA.A.1 — Beiwerte C_c

RBK	1	2	3	4	5
C_c	1,0	0,8	0,7	0,4	0,1
Anwendbar für	—	$\phi \leq 135^\circ$			

NCI NA.A.6 Imperfektions-Abminderungsfaktor (elastischer Bereich)

Für die Herstelltoleranz-Qualitätsklassen sollte eine der drei Klassen A, B oder C nach DIN EN 1993-1-6:2010-12, Abschnitt 8 gewählt werden.

Der Imperfektions-Abminderungsfaktor für Kugelschalen im elastischen Bereich wird bestimmt durch

$$\alpha = \frac{0,70}{1 + 1,90 \left(\frac{\Delta w_k}{t} \right)^{0,75}} \quad (\text{NA.A.6})$$

mit Δw_k als charakterischer Imperfektionsamplitude

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{Rt} \quad (\text{NA.A.7})$$

und dem Qualitätsparameter Q

Qualitätsklasse	Beschreibung	Q
Klasse A	exzellent	40
Klasse B	hoch	25
Klasse C	normal	16

NCI NA.A.7 Charakteristischer Beulwiderstand

Der charakteristische Beulwiderstand p_{Rk} wird bestimmt zu

$$p_{Rk} = \chi \cdot p_{Rpl} \quad (\text{NA.A.8})$$

mit dem plastischen Bezugswiderstand

$$p_{Rpl} = f_{y,k} \cdot C_{pl} \cdot \frac{2t}{R} \quad (\text{NA.A.9})$$

und C_{pl} nach Tabelle NA.A.2 in Abhängigkeit von den Randbedingungen sowie dem Beul-Abminderungsfaktor

$$\chi = 1,0 \text{ für } \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \quad (\text{NA.A.10})$$

DIN EN 1993-1-6/NA:2010-12

$$\chi = 1,0 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta \quad \text{für } \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_p \quad (\text{NA.A.11})$$

$$\chi = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}^2} \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda} \quad (\text{NA.A.12})$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{P_{Rpl}}{P_{Rcr}}} \quad (\text{NA.A.13})$$

$$\bar{\lambda}_0 = 0,20, \quad \beta = 0,70, \quad \eta = 1,0 \quad (\text{NA.A.14})$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} \quad (\text{NA.A.15})$$

Tabelle NA.A.2 — Beiwerte C_{pl}

RBK	1	2	3	4	5
C_{pl}	1,0	0,9	0,9	0,8	0,2
Anwendbar für	—	$\phi \leq 135^\circ$			

NCI NA.A.8 Beulsicherheitsnachweis

Für den Bemessungswert des vorhandenen Druckes p_{Ed} muss gelten:

$$p_{Ed} \leq p_{Rd} \quad (\text{NA.A.16})$$

wobei sich der Bemessungswert p_{Rd} des Beulwiderstandes aus

$$p_{Rd} = \frac{P_{Rk}}{\gamma_M} \quad (\text{NA.A.17})$$

ergibt.

Für den Teilsicherheitsbeiwert γ_M gilt DIN EN 1993-1-6/NA:2010-12, zu 8.5.2(2).

NCI

Literaturhinweise

- [1] Albertin, U.: Bemessungskonzepte für Stabilitätsfälle imperfektionssensitiver Schalenstrukturen. Berichte aus dem Konstr. Ingenieurbau 7/2000, TU München 2000.
- [2] Wunderlich, W., Albertin, U.: Buckling behaviour of imperfect spherical shells. International Journal of Nonlinear Mechanics 37 (2002), 589-604.
- [3] ECCS: Buckling of Steel Shells – European Design Recommendations, 5th Edition (Eds: J.M. Rotter / H. Schmidt). ECCS-Publication No. 125, Brussels 2008.
- [4] DASt-Richtlinie 020, Bemessung schlanker stählerner windbelasteter Kreiszyinderschalen. Stahlbau Verlags- und Service GmbH, Düsseldorf.

DIN EN 1993-1-7**DIN**

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatz für
DIN EN 1993-1-7:2007-07 und
DIN EN 1993-1-7
Berichtigung 1:2009-12**Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-7: Plattenförmige Bauteile mit Querbelastung;
Deutsche Fassung EN 1993-1-7:2007 + AC:2009**Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-7: Plated structures subject to out of plane loading;
German version EN 1993-1-7:2007 + AC:2009Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 1-7: Résistance et stabilité des structures en plaques planes chargées hors de leur
plan;
Version allemande EN 1993-1-7:2007 + AC:2009

Gesamtumfang 45 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

DIN EN 1993-1-7:2010-12

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 1993-1-7:2007 + AC:2009) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Die Arbeiten auf nationaler Ebene wurden durch die Experten des NABau-Spiegelausschusses NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung“ begleitet.

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 12. Juni 2006 angenommen.

Die Norm ist Bestandteil einer Reihe von Einwirkungs- und Bemessungsnormen, deren Anwendung nur im Paket sinnvoll ist. Dieser Tatsache wird durch das Leitpapier L der Kommission der Europäischen Gemeinschaft für die Anwendung der Eurocodes Rechnung getragen, indem Übergangsfristen für die verbindliche Umsetzung der Eurocodes in den Mitgliedsstaaten vorgesehen sind. Die Übergangsfristen sind im Vorwort dieser Norm angegeben.

Die Anwendung dieser Norm gilt in Deutschland in Verbindung mit dem Nationalen Anhang.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN [und/oder die DKE] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Der Beginn und das Ende des hinzugefügten oder geänderten Textes wird im Text durch die Textmarkierungen AC AC angezeigt.

Änderungen

Gegenüber DIN V ENV 1993-1-7:2002-05 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) die Stellungnahmen der nationalen Normungsinstitute wurden eingearbeitet;
- b) der Vornormcharakter wurde aufgehoben;
- c) der Text wurde vollständig überarbeitet.

Gegenüber DIN EN 1993-1-7:2007-07 und DIN EN 1993-1-7 Berichtigung 1:2009-12 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Vorgänger-Norm mit der Berichtigung 1 konsolidiert;
- b) redaktionelle Änderungen durchgeführt.

Frühere Ausgaben

DIN V ENV 1993-1-7: 2002-05

DIN EN 1993-1-7: 2007-07

DIN EN 1993-1-5 Berichtigung 1: 2009-12

EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE

EN 1993-1-7

April 2007

+AC

April 2009

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatz für ENV 1993-1-7:1999

Deutsche Fassung

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-7: Plattenförmige Bauteile mit Querbelastrung

Eurocode 3: Design of steel structures —
Part 1-7: Plated structures subject to out of plane loading

Eurocode 3: Calcul des structures en acier —
Partie 1-7: Résistance et stabilité des structures en plaques
planes chargées hors de leur plan

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 12. Juni 2006 angenommen.

Die Berichtigung tritt am 15. April 2009 in Kraft und wurde in EN 1993-1-7:2007 eingearbeitet.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

Inhalt

	Seite
Vorwort	4
Nationaler Anhang zu EN 1993-1-7	4
1 Allgemeines	5
1.1 Anwendungsbereich	5
1.2 Normative Verweisungen	5
1.3 Begriffe	6
1.3.1 Konstruktive Ausbildung und Abmessungen	6
1.4 Symbole	8
2 Grundlagen der Bemessung.....	10
2.1 Anforderungen	10
2.2 Grundsätze der Grenzzustandsnachweise	10
2.2.1 Allgemeines	10
2.2.2 Plastisches Versagen	10
2.2.3 Zyklische Plastizierung	11
2.2.4 Beulen	11
2.2.5 Ermüdung	11
2.3 Einwirkungen	11
2.4 Bemessung mit Versuchsunterstützung.....	11
3 Werkstoffeigenschaften	11
4 Dauerhaftigkeit.....	11
5 Statische Berechnung	12
5.1 Allgemeines	12
5.2 Schnittgrößen in der Platte	12
5.2.1 Allgemeines	12
5.2.2 Randbedingungen für die Platte	12
5.2.3 Berechnungsmodelle für plattenartige Tragwerke.....	12
6 Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	18
6.1 Allgemeines	18
6.2 Plastische Grenzbeanspruchbarkeit.....	18
6.2.1 Allgemeines	18
6.2.2 Ergänzende Regelungen für die Gesamtberechnung.....	18
6.2.3 Ergänzende Regelungen für die Anwendung vereinfachter Modelle.....	19
6.3 Zyklisches Plastizieren	19
6.3.1 Allgemeines	19
6.3.2 Ergänzende Regelungen für die Gesamtberechnung.....	19
6.4 Beulnachweise	20
6.4.1 Allgemeines	20
6.4.2 Ergänzende Regeln für die Gesamtberechnung	20
6.4.3 Ergänzende Regelungen für die Anwendung vereinfachter Modelle.....	21
7 Ermüdung	21
8 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	22
8.1 Allgemeines	22
8.2 Plattendurchbiegungen.....	22
8.3 Exzessive Schwingungen	22
Anhang A (informativ) Berechnungsverfahren für den Entwurf von plattenartigen Tragwerken.....	23
A.1 Allgemeines	23
A.2 Linear-elastische Plattenberechnung (LA)	23
A.3 Geometrisch nicht-lineare Berechnung (GNA).....	23
A.4 Werkstofflich nicht-lineare Berechnung (MNA).....	24

	Seite
A.5	Geometrisch und werkstofflich nicht-lineare Berechnung (GMNA).....24
A.6	Geometrisch nicht-lineare Berechnung mit Imperfektionen (GNIA)24
A.7	Geometrisch und werkstofflich nicht-lineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA)25
Anhang B (informativ) Spannungen in unausgesteiften Rechteckplatten aus der Theorie kleiner	
	Verformungen26
B.1	Allgemeines26
B.2	Symbole.....26
B.3	Gleichmäßig verteilte Flächenlast27
B.3.1	Plattendurchbiegungen27
B.3.2	Plattenspannungen27
B.3.3	Koeffizienten k für gleichmäßig verteilte Flächenlasten28
B.4	Auf eine Teilfläche der Platte gleichmäßig verteilte Flächenlast31
B.4.1	Plattendurchbiegungen31
B.4.2	Plattenspannungen31
B.4.3	Koeffizienten k für eine auf eine Teilfläche konzentrierte Last32
Anhang C (informativ) Spannungen in unausgesteiften Rechteckplatten aus der Theorie großer	
	Verformungen33
C.1	Allgemeines33
C.2	Symbole.....33
C.3	Auf die Gesamtfläche der Platte gleichmäßig verteilte Flächenlast34
C.3.1	Plattendurchbiegungen34
C.3.2	Plattenspannungen34
C.3.3	Koeffizienten k für gleichmäßig verteilte Flächenlasten35
C.4	Auf eine Teilfläche der Platte gleichmäßig verteilte Flächenlast39
C.4.1	Allgemeines39
C.4.2	Plattenspannungen39
C.4.3	Koeffizienten k für auf Teilflächen konzentrierte Last.....40

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

Vorwort

Dieses Dokument EN 1993-1-7:2007, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-7: Plattenförmige Bauteile mit Querbelastrung wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Structural Eurocodes“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Oktober 2007, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis März 2010 zurückgezogen werden.

EN 1993-1-7 ersetzt ENV 1993-1-7:1999.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Nationaler Anhang zu EN 1993-1-7

Diese Norm enthält alternative Vorgehensweisen, Zahlenwerte sowie Empfehlungen. Durch besonderen Hinweis (Anmerkungen) sind die Stellen gekennzeichnet, bei denen eine nationale Auswahl getroffen werden darf. EN 1993-1-7 enthält bei der nationalen Einführung einen Nationalen Anhang. Dieser Anhang legt die nationalen Parameter fest, die für die Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten verwendet werden müssen.

Eine nationale Wahl darf für folgenden Abschnitt erfolgen:

— 6.3.2(4)

1 Allgemeines

1.1 Anwendungsbereich

(1)P EN 1993-1-7 liefert Bemessungsregeln für den Entwurf nicht ausgesteifter und ausgesteifter Platten, die Teil von plattenartigen Tragwerken wie z.B. Silos und Behälter sind, welche einer Querbelastung ausgesetzt sind. Sie gilt in Verbindung mit EN 1993-1-1 und den entsprechenden Anwendungsnormen.

(2) Diese Europäische Norm legt die Bemessungswerte für die Beanspruchbarkeiten fest; der Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit kann dem Nationalen Anhang der maßgebenden Anwendungsnormen entnommen werden; Empfehlungen sind in der entsprechenden Anwendungsnorm enthalten.

(3) Diese Norm enthält Anforderungen für Tragfähigkeitsnachweise für die Grenzzustände:

- plastisches Versagen;
- zyklische Plastizierung;
- Beulen;
- Ermüdung.

(4) Die Grenzzustände des statischen Gleichgewichts (Rutschen, Abheben und Kippen) werden in dieser Norm nicht behandelt; sie sind in EN 1993-1-1 geregelt. Besonderheiten, die für bestimmte Anwendungen gelten, können in den Anwendungsnormen von EN 1993 gefunden werden.

(5) Die Regeln dieser Norm beziehen sich auf dünne Plattenelemente von Bauteilen, die ausgesteift oder nicht ausgesteift sein können und quer zur Plattenebene belastet werden.

(6) Für den Nachweis ausgesteifter und nicht ausgesteifter plattenartiger Tragwerke mit Belastungen nur in der Plattenebene gilt EN 1993-1-5. In EN 1993-1-7 werden Interaktionsregeln für die Auswirkungen von Belastungen in der Ebene und aus der Ebene angegeben.

(7) Bemessungsregeln für dünnwandige kaltgeformte Bauteile und Blechtafeln sind in EN 1993-1-3 zu finden.

(8) Der Temperaturbereich, für den die Regelungen in dieser Norm gelten, wird in den Anwendungsnormen von EN 1993 geregelt.

(9) Die Bemessungsregeln in dieser Norm beziehen sich auf Tragwerke, die nach EN 1090-2 ausgeführt sind.

(10) Windlasten und Lasten aus Schüttgütern können im Allgemeinen als vorwiegend ruhende Lasten angesehen werden. Dynamische Wirkungen sind in der Regel entsprechend dem Ermüdungsnachweis nach EN 1993-1-9 zu berücksichtigen. In diesem Teil werden die Schnittgrößen aus dynamischem Verhalten als vorwiegend ruhend behandelt.

1.2 Normative Verweisungen

(1) Diese Europäische Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Europäischen Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation.

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

EN 1993-1-1, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*

EN 1993-1-3, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-3: Kaltgeformte dünnwandige Profile und Bleche*

EN 1993-1-4, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-4: Nichtrostender Stahl*

EN 1993-1-5, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-5: Plattenbeulen*

EN 1993-1-6, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalentragerwerken*

EN 1993-1-8, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-8: Berechnung und Bemessung von Anschlüssen*

EN 1993-1-9, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-9: Ermüdung*

EN 1993-1-10, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-10: Auswahl der Stahlsorten im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung*

EN 1993-1-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlgüten bis S700*

EN 1993-4-1, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4-1: Silos*

EN 1993-4-2, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4-2: Tanks*

1.3 Begriffe

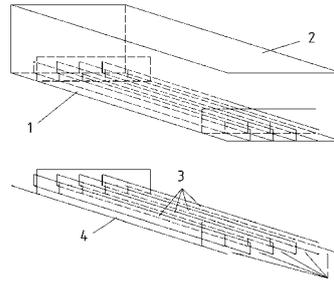
- (1) Es gelten die Regelungen in EN 1990, 1.5.
- (2) Die nachfolgenden Begriffe werden in Ergänzung zu EN 1993-1-1 verwendet:

1.3.1 Konstruktive Ausbildung und Abmessungen

1.3.1.1

plattenartiges Tragwerk

Tragwerk, das aus Flachblechen zusammengesetzt und verschweißt ist. Die Flachbleche können ausgesteift und nicht ausgesteift sein, siehe Bild 1.1



Legende

- 1 Querstreifen (offene oder geschlossene Form)
- 2 Flächentragwerk
- 3 Längssteifen (offene oder geschlossene Form)
- 4 Blechfeld
- 5 Einzelbleche

Bild 1.1 — Komponenten eines plattenartigen Tragwerks

1.3.1.2

Plattenfeld

Plattenfeld ist ein nicht ausgesteiftes oder ausgesteiftes Flachblech. Ein Plattenfeld darf als eine Komponente eines plattenartigen Tragwerks angesehen werden

1.3.1.3

Steife

Blech oder Profil, das das Flachblech zur Vermeidung von Beulen oder zur Verstärkung für lokale Lasten aussteift. Eine Steife wird bezeichnet als:

- Längssteife, wenn die Steifenachse in Hauptrichtung der Lastübertragung verläuft;
- Quersteife, wenn die Steifenachse senkrecht zur Hauptrichtung der Lastübertragung verläuft

1.3.1.4

ausgesteiftes Flachblech

Blech mit Längs- und/oder Quersteifen

1.3.1.5

Einzelfeld

nicht ausgesteiftes Blechfeld umrandet von

- Steifen;
- Gurten und/oder Steifen (bei einem Steg);
- Stegen und/oder Steifen (bei einem Gurt)

1.3.2 Bezeichnungen

1.3.2.1

plastisches Versagen

Versagensart im Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei der das Tragwerk die Fähigkeit zur weiteren Lastaufnahme durch Ausbildung von Fließmechanismen verliert

1.3.2.2

Bruch unter Zugbelastung

Versagen im Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dem das Blech infolge Zugbeanspruchung reißt

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

1.3.2.3

zyklische Plastizierung

wiederholtes Fließen infolge von Belastungs- und Entlastungszyklen

1.3.2.4

Beulen

Stabilitätsversagen des plattenartigen Tragwerks infolge Druck und/oder Schubbelastung

1.3.2.5

Ermüdung

Rissbildung oder Versagen infolge zyklischer Belastung

1.3.3 Einwirkungen

1.3.3.1

Querbelastung

Belastung senkrecht zur Mittelfläche eines Plattenfeldes

1.3.3.2

Kräfte in Plattenebene

Kräfte, die parallel zur Oberfläche des Plattenfeldes einwirken. Sie werden durch Wirkungen in der Ebene (z. B. Temperaturwirkungen oder Reibung) ausgelöst oder entstehen durch äußere Lasten, die auf das plattenartige Tragwerk einwirken

1.4 Symbole

(1) Zusätzlich zu den Bezeichnungen in EN 1990 und EN 1993-1-1 gelten die folgenden Bezeichnungen:

(2) Membranspannungen in Rechteckplatte, siehe Bild 1.2:

σ_{mx} Membrannormalspannung in x -Richtung infolge der breitenbezogenen Membrannormalkräfte n_x ;

σ_{my} Membrannormalspannung in y -Richtung infolge der breitenbezogenen Membrannormalkräfte n_y ;

τ_{mxy} Membranschubspannung infolge der breitenbezogenen Membranschubkräfte n_{xy} .

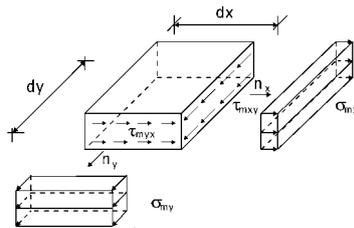


Bild 1.2 — Membranspannungen

(3) Biege- und Schubspannungen in Rechteckplatten infolge Biegung, siehe Bild 1.3:

σ_{bx} Spannung in x -Richtung infolge des breitenbezogenen Biegemomentes m_x ;

σ_{by} Spannung in y -Richtung infolge des breitenbezogenen Biegemomentes m_y ;

τ_{bxy} Schubspannung infolge des breitenbezogenen Torsionsmomentes m_{xy} ;

τ_{bxz} Schubspannungen infolge der breitenbezogenen Querkräfte infolge Biegung q_x ;

τ_{byz} Schubspannungen infolge der breitenbezogenen Querkräfte infolge Biegung q_y .

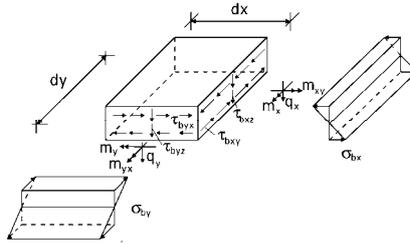


Bild 1.3 — Längs- und Schubspannungen infolge Biegung

ANMERKUNG Im Allgemeinen gibt es acht Schnittgrößen an jedem Punkt der Platte. Die Schubspannungen τ_{bxz} und τ_{byz} infolge q_x und q_y sind meistens verglichen mit den anderen Spannungskomponenten ohne Bedeutung und werden deshalb in der Regel bei der Bemessung vernachlässigt.

(4) Griechische Kleinbuchstaben:

α Seitenverhältnis des Plattenfeldes (a/b);

ε Dehnung;

α_R Lastvergrößerungsfaktor;

ρ Abminderungsbeiwert für Plattenbeulen;

σ_i Längsspannungen in der Richtung i , siehe Bild 1.2 und Bild 1.3;

τ Schubspannungen, siehe Bild 1.2 und Bild 1.3;

ν Querkontraktionszahl;

γ_M Teilsicherheitsbeiwert.

(5) Lateinische Großbuchstaben:

E Elastizitätsmodul

(6) Lateinische Kleinbuchstaben:

a Länge des Plattenfeldes, siehe Bild 1.4 und Bild 1.5;

b Breite des Plattenfeldes, siehe Bild 1.4 und Bild 1.5;

f_{yk} Fließspannung/Streckgrenze oder 0,2%-Dehngrenze bei einem Werkstoff mit einer nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Kurve;

n_i Membrannormalkraft in der Richtung i [kN/m];

m_{xy} Membranquerkraft [kN/m];

m Biegemoment/Torsionsmoment [kNm/m];

q_z Querkraft in der Richtung z [kN/m];

t Dicke des Blechfeldes, siehe 1.4 und 1.5.

ANMERKUNG Kurzzeichen und Bezeichnungen, die vorstehend nicht aufgeführt sind, werden im Text erklärt, wenn sie zuerst auftauchen.

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

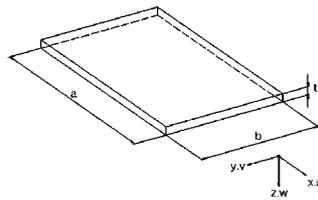


Bild 1.4 — Abmessungen und Achsen für nicht ausgesteifte Plattenfelder

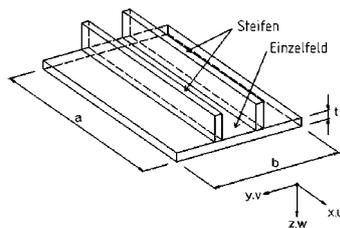


Bild 1.5 — Abmessungen und Achsen für ausgesteifte Blechfelder; die Steifen können offen oder geschlossen sein

2 Grundlagen der Bemessung

2.1 Anforderungen

(1)P Die Bemessung hat nach EN 1990 zu erfolgen.

(2)P Die folgenden Grenzzustände sind für plattenartige Tragwerke nachzuweisen:

- plastisches Versagen, siehe 2.2.2;
- zyklische Plastizierung, siehe 2.2.3;
- Beulen, siehe 2.2.4;
- Ermüdung, siehe 2.2.5.

(3) Der Entwurf der plattenartigen Tragwerke sollte den Gebrauchstauglichkeitsanforderungen der entsprechenden Anwendungsnorm genügen.

2.2 Grundsätze der Grenzzustandsnachweise

2.2.1 Allgemeines

(1)P Die Grundsätze der Grenzzustandsnachweise nach EN 1993-1-1, Abschnitt 2 und EN 1993-1-6 gelten auch für plattenartige Tragwerke.

2.2.2 Plastisches Versagen

(1) Plastisches Versagen wird als der Zustand bezeichnet, bei dem ein Teil des Tragwerks solche plastische Verformungen entwickelt, dass sich ein plastischer Mechanismus bildet. Das plastische Versagen wird in der Regel mit einem Mechanismus unter Zugrundelegung kleiner Verformungen nachgewiesen.

2.2.3 Zyklische Plastizierung

(1) Zyklische Plastizierung sollte als eine Grenzbedingung für zyklische Belastungen und Entlastungen angesehen werden, bei der an einem Punkt Fließen unter Zug- oder Druckbeanspruchung oder unter beidem auftritt und plastische Arbeit abgefordert wird. Dieses wechselnde Fließen kann infolge Begrenzung des plastischen Arbeitsvermögens zu lokalen Rissen führen und stellt deshalb eine niedrig-zyklische Form der Ermüdung dar. Die Spannungen für diesen Grenzzustand entwickeln sich aus der Kombination der Einwirkungen und den Verträglichkeitsbedingungen für die Verformungen des Tragwerks.

2.2.4 Beulen

(1) Beulen wird als die Grenzbedingung angesehen, bei der das Tragwerk infolge der Instabilität des Plattenfeldes unter Druck- und/oder Schubspannungen große Verformungen entwickelt. Dies kann zu Instabilitätsverhalten führen, so dass weitere Laststeigerungen nicht mehr aufgenommen werden können.

(2) Zu lokalem Plattenbeulen siehe EN 1993-1-5.

(3) Zur Tragfähigkeit der Steifen bei Biegeknicken, Biegedrillknicken und Knicken mit Querschnittsverformung siehe EN 1993-1-5.

2.2.5 Ermüdung

(1) Ermüdung wird als die Grenzbedingung angesehen, bei der sich infolge wiederholter Zyklen von anwachsenden und abfallenden Spannungen Risse entwickeln und/oder Risse weiterwachsen können.

2.3 Einwirkungen

(1) Die charakteristischen Werte der Einwirkungen sollten nach den entsprechenden Teilen von EN 1991 bestimmt werden.

2.4 Bemessung mit Versuchsunterstützung

(1) Für die Bemessung mit Versuchsunterstützung sollte EN 1993-1-1, 2.5 und wo erforderlich EN 1993-1-3, Abschnitt 9 herangezogen werden.

3 Werkstoffeigenschaften

(1) Diese Norm gilt für plattenartige Tragwerke aus Werkstoffen, die den Produktnormen EN 1993-1-1 und EN 1993-1-12 entsprechen.

(2) Die Werkstoffeigenschaften für kaltgeformte, dünnwandige Bauteile und Bleche sollten EN 1993-1-3 entnommen werden.

(3) Die Werkstoffeigenschaften von nichtrostenden Stählen sollten EN 1993-1-4 entnommen werden.

4 Dauerhaftigkeit

(1) Zur Dauerhaftigkeit siehe EN 1993-1-1, Abschnitt 4.

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

5 Statische Berechnung

5.1 Allgemeines

- (1)P Die Berechnungsmodelle sind so zu wählen, dass sie das Bauteilverhalten im betrachteten Grenzzustand zutreffend wiedergeben.
- (2) Bei der Wahl sicherer Randbedingungen (d.h. eingespannter oder nicht eingespannter Rand) darf ein Tragwerk in einzelne Plattenfelder aufgeteilt werden, die unabhängig voneinander betrachtet werden können.
- (3)P Die Gesamtstabilität des gesamten Tragwerks ist, wie in den entsprechenden Teilen von EN 1993 geregelt, nachzuweisen.

5.2 Schnittgrößen in der Platte

5.2.1 Allgemeines

- (1) Das Berechnungsmodell und die grundsätzlichen Annahmen für die Bestimmung der Schnittgrößen oder Spannungen sollten das erwartete Tragwerksverhalten bei Belastung im Grenzzustand der Tragfähigkeit wiedergeben.
- (2) Das Berechnungsmodell kann in dem Maße vereinfacht werden, wie nachgewiesen werden kann, dass die Vereinfachungen auf der sicheren Seite liegende Resultate liefern.
- (3) Ein elastisches Tragwerksmodell darf grundsätzlich für plattenartige Tragwerke benutzt werden. Tritt Ermüdung auf, sollte kein plastisches Tragwerksmodell benutzt werden.
- (4) Mögliche Abweichungen der Richtung oder des Angriffspunktes der Einwirkungen sollten berücksichtigt werden.
- (5) Die Fließlinienmethode darf im Grenzzustand der Tragfähigkeit benutzt werden, wenn die Druck- oder Schubbeanspruchungen in der Plattenebene kleiner als 10 % der entsprechenden Tragfähigkeit sind. Die Momenten Tragfähigkeit der Platte darf mit

$$m_{Rd} = \frac{0,25 \times f_y \times t^2}{\gamma_{M0}}$$

angesetzt werden.

5.2.2 Randbedingungen für die Platte

- (1) Die Randbedingungen, die für die Berechnung angenommen werden, sollten für den betrachteten Grenzzustand angemessen sein.
- (2)P Wird ein plattenartiges Tragwerk in einzelne Plattenfelder aufgeteilt, sind die rechnerischen Annahmen für die Randbedingungen der Steifen der einzelnen Plattenfelder in den Ausführungszeichnungen zu berücksichtigen.

5.2.3 Berechnungsmodelle für plattenartige Tragwerke

5.2.3.1 Allgemeines

- (1) Die Spannungen eines Plattenfeldes eines plattenartigen Tragwerks sollten nach einem der folgenden Verfahren ermittelt werden:

- Standardformeln für Plattenschnittgrößen, siehe 5.2.3.2;
- Gesamtberechnung, siehe 5.2.3.3;

— vereinfachte Modelle, siehe 5.2.3.4.

(2) Die Berechnungsmodelle in (1) sollten je nach Anforderung die lineare oder nicht-lineare Plattentheorie berücksichtigen.

(3) Die lineare Plattentheorie geht von kleinen Verformungen aus und nimmt eine lineare Abhängigkeit zwischen Lasten und Verformungen an. Diese darf angewendet werden, wenn die Druckbeanspruchung oder Schubbeanspruchung in der Plattenebene kleiner als 10 % der entsprechenden Beanspruchbarkeit ist.

(4) Die nicht-lineare Plattentheorie beruht auf der Annahme großer Verformungen und berücksichtigt die Wirkung der Verformungen auf das Gleichgewicht.

(5) Die Tabelle 5.1 zeigt verschiedene Berechnungsmöglichkeiten, auf denen die Berechnungsmodelle nach (1) beruhen können.

Tabelle 5.1 — Berechnungsmöglichkeiten

Berechnungsmöglichkeit	Plattentheorie	Werkstoffverhalten	Plattengeometrie
Linear elastische Plattenberechnung (LA)	linear	linear	perfekt
Geometrisch nicht-lineare elastische Berechnung (GNA)	nicht-linear	linear	perfekt
Werkstofflich nicht-lineare Berechnung (MNA)	linear	nicht-linear	perfekt
Geometrisch und werkstofflich nicht-lineare Berechnung (GMNA)	nicht-linear	nicht-linear	perfekt
Geometrisch nicht-lineare elastische Berechnung mit Imperfektionen (GNIA)	nicht-linear	linear	imperfekt
Geometrisch und werkstofflich nicht-lineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA)	nicht-linear	nicht-linear	imperfekt

ANMERKUNG 1 Im Anhang A sind die verschiedenen Berechnungsmöglichkeiten definiert.

ANMERKUNG 2 Die für ein Tragwerk anzuwendende Berechnungsmethode sollte vorab festgelegt werden.

ANMERKUNG 3 Die Verwendung eines Modells mit perfekter Geometrie lässt darauf schließen, dass geometrische Imperfektionen entweder nicht relevant sind oder implizit in den Bemessungsregeln berücksichtigt werden.

ANMERKUNG 4 Bei imperfekter Geometrie wird die Amplitude der geometrischen Imperfektionen so gewählt, dass die Ergebnisse im Vergleich mit Versuchsergebnissen an Prüfkörpern, die mit Toleranzen nach EN 1090-2 gefertigt wurden, sicher sind. Die Amplituden der geometrischen Imperfektionen unterscheiden sich daher im Allgemeinen von den in EN 1090-2 angegebenen Toleranzen.

5.2.3.2 Nutzung von Standardformeln

(1) Für ein einzelnes Plattenfeld eines plattenartigen Tragwerks kann der Spannungsnachweis für die maßgebende Einwirkungskombination mit geeigneten Berechnungsformeln durchgeführt werden, die für die Berechnungsmöglichkeiten nach 5.2.3.1 aufgestellt wurden.

ANMERKUNG Die Anhänge B und C liefern Tabellenwerke für rechteckige, nicht ausgesteifte Platten mit Querbelaugung. Für Kreisplatten sind Berechnungsformeln in EN 1993-1-6 angegeben. Weitere Berechnungsformeln können verwendet werden, wenn deren Genauigkeit den Anforderungen in EN 1990 entspricht.

(2) Treten bei Anwendung der Membrantheorie zweidimensionale Spannungsfelder auf, kann die v. Mises-Vergleichsspannung mit

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

$$\sigma_{\text{eq,Ed}} = \frac{1}{t} \sqrt{n_{x,\text{Ed}}^2 + n_{y,\text{Ed}}^2 - n_{x,\text{Ed}} n_{y,\text{Ed}} + 3n_{xy,\text{Ed}}^2} \quad (5.1)$$

ermittelt werden.

(3) Im Falle zweidimensionaler Spannungsfelder, gerechnet nach der elastischen Plattentheorie, darf die v. Mises-Vergleichsspannung $\sigma_{\text{eq,Ed}}$ wie folgt ermittelt werden:

$$\sigma_{\text{eq,Ed}} = \sqrt{\sigma_{x,\text{Ed}}^2 + \sigma_{y,\text{Ed}}^2 - \sigma_{x,\text{Ed}} \sigma_{y,\text{Ed}} + 3\tau_{xy,\text{Ed}}^2} \quad (5.2)$$

Dabei gilt

$$\sigma_{x,\text{Ed}} = \frac{n_{x,\text{Ed}}}{t} \pm \frac{m_{x,\text{Ed}}}{t^2/4}$$

$$\sigma_{y,\text{Ed}} = \frac{n_{y,\text{Ed}}}{t} \pm \frac{m_{y,\text{Ed}}}{t^2/4}$$

$$\tau_{xy,\text{Ed}} = \frac{n_{xy,\text{Ed}}}{t} \pm \frac{m_{xy,\text{Ed}}}{t^2/4}$$

wobei $n_{x,\text{Ed}}$, $n_{y,\text{Ed}}$, $n_{xy,\text{Ed}}$, $m_{x,\text{Ed}}$, $m_{y,\text{Ed}}$ und $m_{xy,\text{Ed}}$ in 1.4(1) und (2) definiert sind.

ANMERKUNG Die oben angegebenen Gleichungen ergeben eine vereinfachte, auf der sicheren Seite liegende Vergleichsspannung für die Bemessung.

5.2.3.3 Gesamtberechnung: numerisches Verfahren

(1) Werden die Spannungen eines plattenartigen Tragwerks mit einem numerischen Verfahren ermittelt, das auf einem linearen Werkstoffmodell aufbaut, sollte die größte v. Mises-Vergleichsspannung $\sigma_{\text{eq,Ed}}$ in dem Blechtragwerk für die maßgebende Einwirkungskombination berechnet werden.

(2) Die v. Mises-Vergleichsspannung $\sigma_{\text{eq,Ed}}$ wird mit den Spannungskomponenten an einem Punkt des Blechtragwerks bestimmt.

$$\sigma_{\text{eq,Ed}} = \sqrt{\sigma_{x,\text{Ed}}^2 + \sigma_{y,\text{Ed}}^2 - \sigma_{x,\text{Ed}} \sigma_{y,\text{Ed}} + 3\tau_{\text{Ed}}^2} \quad (5.3)$$

wobei $\sigma_{x,\text{Ed}}$ und $\sigma_{y,\text{Ed}}$ mit positivem Vorzeichen bei Zug eingeführt werden.

(3) Wird mit dem numerischen Verfahren der Beulnachweis geführt, sind die Wirkungen von Imperfektionen zu berücksichtigen. Diese Imperfektionen können sein:

(a) geometrische Imperfektionen:

- Abweichungen von den Nennmaßen der Form der Platte (Vorverformungen, Durchbiegungen aus der Ebene);
- imperfekte Schweißnähte (kleinere Exzentrizitäten);
- Abweichungen von den Nennwerten der Blechdicken;

(b) Werkstoffimperfectionen:

- Eigenspannungen aus dem Walz-, Formungs-, Schweiß- oder Richtprozess;
- Inhomogenitäten und Anisotropien.

(4) Die geometrischen und werkstofflichen Imperfectionen sollten durch eine äquivalente geometrische Anfangsimperfection der perfekten Platte berücksichtigt werden. Die Form der äquivalenten geometrischen Anfangsimperfection ist mit der maßgebenden kritischen Beulform zu bestimmen.

(5) Die Amplitude der äquivalenten geometrischen Ersatzimperfection e_0 eines rechteckigen Plattenfeldes darf durch Kalibration mit Versuchsergebnissen bestimmt werden, wobei die verwendeten Versuchskörper in Bezug auf Herstellung und Werkstoff repräsentativ sein müssen, oder mit Hilfe der Beulkurve in EN 1993-1-5 ermittelt werden. In diesem Fall gilt:

AC

$$e_0 = \frac{(1 - \rho \bar{\lambda}_p)(1 - \rho)}{\rho \zeta} \quad \text{AC (5.4)}$$

wobei

$$\zeta = \frac{6 b^2 (b^2 + \nu a^2)}{t (a^2 + b^2)^2} \quad \text{und} \quad \alpha < \sqrt{2}$$

ρ Abminderungsbeiwert für das Plattenbeulen nach 4.4 in EN 1993-1-5,

a, b geometrische Abmessungen der Platte, siehe Bild 5.1,

t Blechdicke,

α Seitenverhältnis $a/b < \sqrt{2}$,

$\bar{\lambda}_p$ Schlankheitsgrad der Platte, siehe EN 1993-1-5.

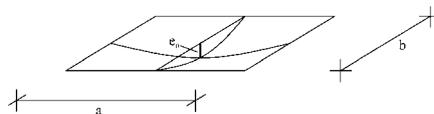


Bild 5.1 — Äquivalente geometrische Anfangsimperfection e_0 eines Plattenfeldes

(6) Auf der sicheren Seite darf die Amplitude $e_0 = a/200$ angesetzt werden, wenn $b \leq a$ ist.

(7) Der Ansatz für die äquivalente geometrische Ersatzimperfection sollte, wenn erforderlich, an die gewählte konstruktive Ausbildung und die aus der Herstellung erwarteten Vorverformungen angepasst werden.

(8)P In jedem Fall ist die Zuverlässigkeit von numerischen Berechnungen anhand bekannter Versuchsergebnisse oder den Ergebnissen vergleichbarer Berechnungen zu prüfen.

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

5.2.3.4 Vereinfachte Modelle

5.2.3.4.1 Allgemeines

(1) Die Schnittgrößen oder Spannungen eines plattenartigen Tragwerks, das mit Querlasten und Lasten in der Ebene belastet ist, dürfen mit einem vereinfachten Modell berechnet werden, wenn dieses Resultate auf der sicheren Seite liefert.

(2) Dazu kann das plattenartige Tragwerk in einzelne ausgesteifte und nicht ausgesteifte Plattenfelder aufgeteilt werden.

5.2.3.4.2 Unausgesteifte Plattenfelder

(1) Eine nicht ausgesteifte rechteckige Platte mit Querbelastung kann mit dem Modell eines Ersatzbalkens in Richtung der vorherrschenden Lastabtragung berechnet werden, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt werden:

- das Seitenverhältnis a/b ist größer als 2;
- die Plattenbelastung besteht aus einer gleichmäßig verteilten Querbelastung mit konstanter Größe oder linearem Verlauf;
- die Festigkeit, Stabilität und Steifigkeit der Randglieder, auf denen das Plattenfeld aufgelagert ist, erfüllen die Randbedingungen, die für den Ersatzbalken angenommen werden.

(2) Die Schnittgrößen des Ersatzbalkens sollten mit einer elastischen Berechnung gemäß EN 1993-1-1 ermittelt werden.

(3) Ist die Durchbiegung der Platte infolge Querbelastung, gerechnet nach Theorie 1. Ordnung, ähnlich der Beulform infolge Druck in der Plattenebene, dann muss die Interaktion zwischen Biegung und Druck berücksichtigt werden.

(4) Trifft (3) zu, darf die Interaktionsformel in EN 1993-1-1, 6.3.3 für den Ersatzträger verwendet werden.

5.2.3.4.3 Ausgesteifte Plattenfelder

(1) Eine ausgesteifte Platte oder ein ausgesteiftes Plattenfeld darf bei regelmäßiger Aussteifung in Längs- und Querrichtung als Trägerrost berechnet werden.

(2) Bei der Bestimmung der Querschnittsfläche A_i des mittragenden Blechs eines einzelnen Trägers i des Trägerrostes sollte die mittragende Breite mit dem Beiwert β nach EN 1993-1-5 bestimmt werden.

(3) Bei der Bestimmung der Querschnittsfläche A_i eines Trägers i des Trägerrostes, der in Richtung der Druckkräfte im Plattenfeld angeordnet ist, ist die wirksame Breite der angrenzenden Einzelfelder infolge lokalen Beulens entsprechend EN 1993-1-5 zu berücksichtigen.

(4) Die Interaktion zwischen mittragender Breite und wirksamer Breite sollte mit nachfolgender Beziehung berücksichtigt werden, siehe Bild 5.2:

$$A_i = [\rho_c (A_{L,eff} + \sum \rho_{pan,i} b_{pan,i} t_{pan,i})] \beta^\kappa \quad (5.5)$$

Dabei ist

$A_{L,eff}$ die wirksame Fläche der Steife infolge lokalen Beulens der Steife;

- ρ_c der Abminderungsbeiwert aufgrund globalen Beulens des Plattenfeldes nach 4.5.4(1) in EN 1993-1-5;
- $\rho_{pan,i}$ der Abminderungsbeiwert infolge lokalen Beulens des Einzelfeldes i , nach 4.4(1) in EN 1993-1-5;
- $b_{pan,i}$ die Breite des Einzelfeldes i , siehe 4.5.1(3) in EN 1993-1-5.
- $t_{pan,i}$ die Blechdicke des Einzelfeldes i
- β der Beiwert für die mittragende Breite nach 3.2.1 in EN 1993-1-5.
- κ das Verhältnis nach 3.3 in EN 1993-1-5.

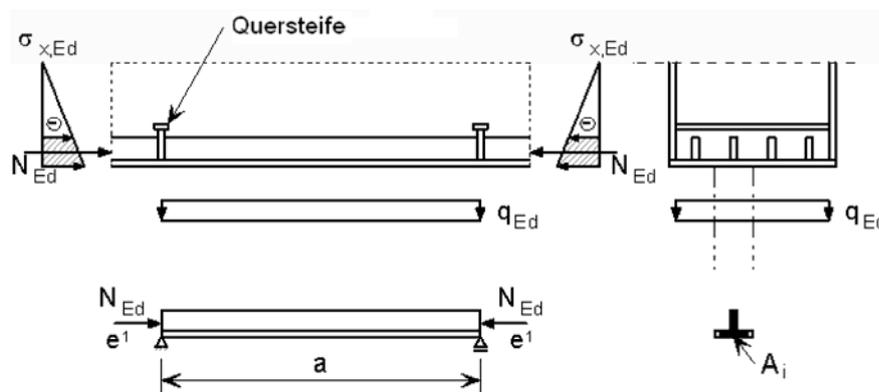


Bild 5.2 — Definition der Querschnittsfläche A_i

(5) Der Nachweis des Trägers i des Trägerrostes kann mit der Interaktionsformel in 6.3.3 in EN 1993-1-1 erfolgen, wobei Folgendes berücksichtigt wird:

- Querbelastung;
- Normalkraft N_{Ed} im Querschnitt A_i aus den Längsspannungen in der Platte;
- Exzentrizität e der Normalkraft N_{Ed} bezogen auf den Schwerpunkt der Querschnittsfläche A_i .

(6) Sind die Steifen einer Platte oder eines Plattenfeldes nur in der Achse der Druckkraft in der Plattenebene angeordnet, darf die ausgesteifte Platte als Ersatzbalken auf elastischen Federn abgebildet werden, siehe EN 1993-1-5.

(7) Sind die Steifen einer Platte oder eines Plattenfeldes nur senkrecht zur Achse der Druckkraft in der Plattenebene angeordnet, sollten die Einzelfelder zwischen den Steifen nach 5.2.3.4.2(4) nachgewiesen werden.

- (8) Die Längssteifen sollten den Bedingungen in Abschnitt 9 in EN 1993-1-5 genügen.
- (9) Die Quersteifen sollten den Bedingungen in Abschnitt 9 in EN 1993-1-5 genügen.

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

6 Grenzzustand der Tragfähigkeit

6.1 Allgemeines

- (1) Alle Teile eines plattenartigen Tragwerks sind so zu bemessen, dass die grundlegenden Anforderungen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit nach Abschnitt 2 eingehalten werden.
- (2) Der Teilsicherheitsbeiwert γ_M für die Beanspruchbarkeit von plattenartigen Tragwerken ist den entsprechenden Anwendungsteilen von EN 1993 zu entnehmen.
- (3) Zum Teilsicherheitsbeiwert γ_M für Verbindungen von plattenartigen Tragwerken siehe EN 1993-1-8.

6.2 Plastische Grenzbeanspruchbarkeit

6.2.1 Allgemeines

- (1)P An jedem Punkt eines plattenartigen Tragwerks sollte für den Bemessungswert der Spannung $\sigma_{eq,Ed}$ die folgende Bedingung eingehalten werden:

$$\sigma_{eq,Ed} \leq \sigma_{eq,Rd} \quad (6.1)$$

Dabei ist

$\sigma_{eq,Ed}$ der Größtwert der v.Mises-Vergleichsspannung nach 5.2.3.

- (2) Bei Verwendung des elastischen Widerstandes eines Plattenfeldes zum Nachweis gegen plastisches Versagen oder Materialbruch infolge Zug oder Biegung ist die Beanspruchbarkeit $\sigma_{eq,Rd}$ durch:

$$\sigma_{eq,Rd} = f_{yk} / \gamma_{M0} \quad (6.2)$$

definiert.

ANMERKUNG Für den Zahlenwert für γ_{M0} siehe 1.1 (2).

6.2.2 Ergänzende Regelungen für die Gesamtberechnung

- (1) Liegt der numerischen Berechnung die Annahme linearen Werkstoffverhaltens zugrunde, sollte der Nachweis gegen plastisches Versagen oder Materialbruch bei Zug nach 6.2.1 erfolgen.
- (2) Bei Anwendung einer werkstofflich nicht-linearen Berechnung unter Verwendung eines Spannungs-Dehnungsdiagramms mit f_{yd} ($= f_y / \gamma_{M0}$), sollten die Bemessungslasten F_{Ed} , die infolge der Einwirkungen am Tragwerk angreifen, schrittweise so gesteigert werden, bis mit dem Lastvergrößerungsfaktor α_R die plastische Grenzbelastbarkeit F_{Rd} erreicht ist.
- (3) Als Resultat der Berechnung lautet der Nachweis:

$$F_{Ed} \leq F_{Rd} \quad (6.3)$$

wobei

$$F_{Rd} = \alpha_R F_{Ed}$$

Dabei ist

α_R der Lastvergrößerungsfaktor an den Bemessungslasten F_{Ed} , bei dem der Grenzzustand erreicht wird.

6.2.3 Ergänzende Regelungen für die Anwendung vereinfachter Modelle

6.2.3.1 Unausgesteifte Platten

(1) Wird eine unausgesteifte Platte als Ersatzbalken berechnet, ist die Querschnittsbeanspruchbarkeit des Ersatzbalkens für das Zusammenwirken von Lasten in der Plattenebene und von Querlasten mit den Bemessungsregeln in EN 1993-1-1 nachzuweisen.

6.2.3.2 Ausgesteifte Platten

(1) Wird eine ausgesteifte Platte gemäß 5.2.3.4 als Trägerrost berechnet, sollten die Querschnittstragfähigkeit und die Knickstabilität der einzelnen Träger i für das Zusammenwirken von Lasten in der Plattenebene und von Querlasten mit der Interaktionsformel in 6.3.3 in EN 1993-1-1 nachgewiesen werden.

(2) Wird eine ausgesteifte Platte gemäß 5.2.3.4 als Ersatzträger berechnet, sollten die Querschnittstragfähigkeit und die Knickstabilität des Ersatzträgers für das Zusammenwirken von Lasten in der Plattenebene und von Querlasten mit der Interaktionsformel in 6.3.3 in EN 1993-1-1 nachgewiesen werden.

(3) Die Schnittgrößen oder Spannungen der Einzelfelder sollten gegen plastisches Versagen oder Werkstoffbruch bei Zug nach 5.2.3.2, 5.2.3.3 oder 5.2.3.4 nachgewiesen werden.

6.3 Zyklisches Plastizieren

6.3.1 Allgemeines

(1) An jedem Punkt des plattenartigen Tragwerks sollte der Bemessungswert der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{Ed}$ folgende Bedingung erfüllen:

$$\Delta\sigma_{Ed} \leq \Delta\sigma_{Rd} \quad (6.4)$$

Dabei ist

$\Delta\sigma_{Ed}$ der Größtwert der Schwingbreite der v. Mises-Vergleichsspannung

$$\Delta\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\Delta\sigma_{x,Ed}^2 + \Delta\sigma_{y,Ed}^2 - \Delta\sigma_{x,Ed} \Delta\sigma_{y,Ed} + 3\Delta\tau_{Ed}^2} \text{ infolge der maßgebenden Lastkombination.}$$

(2) Bei werkstofflich linearer Berechnung darf für die Beanspruchbarkeit eines Plattenfeldes des plattenartigen Tragwerks gegen zyklische Plastizierung/Kurzzeitermüdung der Wert

$$\Delta\sigma_{Rd} = 2,0 f_{yk} / \gamma_{M0} \quad (6.5)$$

angesetzt werden.

ANMERKUNG Für den Zahlenwert für γ_{M0} siehe 1.1 (2).

6.3.2 Ergänzende Regelungen für die Gesamtberechnung

(1) Wird eine werkstofflich nicht-lineare Berechnung durchgeführt, sind die Bemessungswerte der Einwirkungen aufzubringen.

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

(2) Aus der Berechnung der Belastungszyklen während der Nutzungszeit des Tragwerks ist die Dehnungsakkumulation $\varepsilon_{\text{eq,Ed}}$ der v. Mises-Vergleichsdehnungen am Ende der Nutzungszeit zu ermitteln.

(3) Wenn nicht anders geregelt, darf die akkumulierte plastische Dehnung $\varepsilon_{\text{eq,Ed}}$ der v. Mises-Vergleichsdehnung wie folgt bestimmt werden

$$\varepsilon_{\text{eq,Ed}} = m \Delta\varepsilon_{\text{eq,Ed}} \quad (6.6)$$

Dabei ist

m Anzahl der Zyklen während der Nutzungszeit,

$\Delta\varepsilon_{\text{eq,Ed}}$ größter Zuwachs der v.Mises-Vergleichsdehnung während eines kompletten Belastungszyklus am maßgebenden Punkt des Tragwerks nach dem 3. Zyklus.

(4) Wird kein genauere Nachweis der Kurzzeitermüdung geführt, sollte der Gesamtwert $\varepsilon_{\text{eq,Ed}}$ der akkumulierten v. Mises-Vergleichsdehnung folgende Bedingungen erfüllen

$$\varepsilon_{\text{p,eq,Ed}} \leq n_{\text{eq}} \frac{f_{\text{yk}}}{E \gamma_{\text{M0}}} \quad (6.7)$$

ANMERKUNG 1 Der Wert für n_{eq} kann im Nationalen Anhang festgelegt werden. Der Wert $n_{\text{eq}} = 25$ wird empfohlen.

ANMERKUNG 2 Für den Zahlenwert für γ_{M0} siehe 1.1 (2).

6.4 Beulnachweise

6.4.1 Allgemeines

(1) Plattenfelder mit Belastungen aus Druck oder Schub in der Plattenebene sollten nach EN 1993-1-5 nachgewiesen werden.

(2) Die Tragfähigkeit der Steifen bei Biegeknicken, Biegedrillknicken und Knicken mit Querschnittsverformung ist entsprechend EN 1993-1-5 nachzuweisen, siehe auch 5.2.3.4.2 (8) und (9).

(3) Zum Zusammenwirken von Belastungen in der Plattenebene und aus der Plattenebene siehe Abschnitt 5.

6.4.2 Ergänzende Regeln für die Gesamtberechnung

(1) Wird die Beulsicherheit für kombinierte Belastung in der Plattenebene und aus der Plattenebene numerisch nachgewiesen, sollten die Bemessungswerte der Lasten F_{Ed} folgende Bedingung erfüllen:

$$F_{\text{Ed}} \leq F_{\text{Rd}} \quad (6.8)$$

(2) Die Beulbeanspruchbarkeit F_{Rd} eines plattenartigen Tragwerks wird definiert als:

$$F_{\text{Rd}} = k F_{\text{Rk}} / \gamma_{\text{M1}} \quad (6.9)$$

Dabei ist

F_{Rk} charakteristischer Wert des Beulwiderstandes des Blechtragwerks;

k Kalibrationsfaktor nach (6).

ANMERKUNG Für den Zahlenwert für γ_{M1} siehe 1.1 (2).

(3) Der charakteristische Wert des Beulwiderstandes F_{Rk} sollte aus einer Last-Verformungskurve ermittelt werden, der für den maßgebenden Punkt des Tragwerks für die maßgebende Lastkombination F_{Ed} berechnet wird. Dabei sind die Imperfektionen nach 5.2.3.2 zu berücksichtigen.

(4) Der charakteristische Wert des Beulwiderstandes F_{Rk} wird nach dem maßgebenden der folgenden zwei Kriterien ermittelt:

— Maximallast der Last-Verformungskurve (Traglast),

— größte tolerierbare Verformung, falls diese vor Erreichen der Verzweigungslast oder der Maximallast auftritt, sofern relevant.

(5) Die Zuverlässigkeit der numerischen Bestimmung des kritischen Beulwiderstandes sollte wie folgt geprüft werden:

a) entweder durch Kontrolle mit der Berechnung anderer Beulfälle, für die die charakteristischen Beulwiderstände $F_{Rk,known}$ bekannt sind und für die vergleichbare Imperfektionsansätze gewählt wurden. Die Kontrollfälle sollten hinsichtlich der wesentlichen Parameter (Plattenschlankheit, Nachbeulverhalten, Imperfektionsempfindlichkeit, Werkstoffverhalten) vergleichbar sein;

b) oder durch Vergleich mit Versuchsergebnissen $F_{Rk,known}$.

(6) Abhängig vom Ergebnis der Zuverlässigkeitsüberprüfung sollte der Kalibrationsfaktor k wie folgt ermittelt werden:

$$k = F_{Rk,known,check} / F_{Rk,check} \quad (6.10)$$

Dabei gilt

$F_{Rk,known,check}$ Resultat aus Vorkenntnissen;

$F_{Rk,check}$ Resultate der numerischen Ermittlungen.

6.4.3 Ergänzende Regelungen für die Anwendung vereinfachter Modelle

(1) Wird ein ausgesteiftes Plattenfeld in Einzelfelder und wirksame Steifen nach 5.2.3.4 unterteilt, kann der Beulwiderstand dieses Plattenfeldes nach EN 1993-1-5 zunächst ohne Berücksichtigung der Querbewehrung durchgeführt werden. Seitliches Ausweichen freier Gurte von Stegen kann nach EN 1993-1-1, 6.3.3 nachgewiesen werden.

(2) Danach kann die Knicksicherheit der wirksamen Steifen nach Abschnitt 5.2.3.4 mit dem Verfahren nach EN 1993-1-1 nachgewiesen werden.

7 Ermüdung

(1) Anforderungen an die Ermüdung sollten für plattenartige Tragwerke den maßgebenden Anwendungsnormen von EN 1993 entnommen werden.

(2) Der Ermüdungsnachweis sollte nach EN 1993-1-9 geführt werden.

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

8 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

8.1 Allgemeines

- (1) Auch für plattenartige Tragwerken sollten die Grundsätze für Gebrauchstauglichkeits-Grenzzustände in Abschnitt 7 von EN 1993-1-1 angewendet werden.
- (2) Bei plattenartigen Tragwerken sollten insbesondere die Grenzzustandskriterien in 8.2 und 8.3 nachgewiesen werden.

8.2 Plattendurchbiegungen

- (1) Die Plattendurchbiegung w sollte begrenzt werden, wenn dadurch die Nutzung des Plattenfeldes eingeschränkt wird.

ANMERKUNG Zu Durchbiegungsgrenzen siehe Anwendungsnorm.

8.3 Exzessive Schwingungen

- (1) Grenzbedingungen für exzessive Schwingungen sind so zu definieren, dass entweder Versagen des plattenartigen Tragwerks durch Ermüdung an den Verbindungen der Platten oder die Gebrauchstauglichkeitsgrenzen angegeben werden.

ANMERKUNG Zu Schlankheitsbegrenzungen zur Vermeidung exzessiver Schwingungen siehe die Anwendungsnorm.

Anhang A (informativ)

Berechnungsverfahren für den Entwurf von plattenartigen Tragwerken

A.1 Allgemeines

(1) Zur Bestimmung der Spannungen von ausgesteiften und unausgesteiften Platten dürfen die folgenden Berechnungsverfahren angewendet werden:

- LA: Linear-elastische Berechnung;
- GNA: Geometrisch nicht-lineare Berechnung;
- MNA: Werkstofflich nicht-lineare Berechnung;
- GMNA: Geometrisch und werkstofflich nicht-lineare Berechnung;
- GNIA: Geometrisch nicht-lineare Berechnung mit Imperfektionen;
- GMNIA: Geometrisch und werkstofflich nicht-lineare Berechnung mit Imperfektionen.

A.2 Linear-elastische Plattenberechnung (LA)

(1) Die linear-elastische Berechnung beschreibt das Verhalten eines dünnwandigen, perfekten, plattenartigen Tragwerks auf der Grundlage der linearen Plattentheorie. Das lineare Verhalten ergibt sich aus der Annahme des linear-elastischen Werkstoffverhaltens und der Annahme kleiner Verformungen.

(2) Die linear-elastische Berechnung (LA) erfüllt sowohl die Gleichgewichtsbedingungen als auch die Verformungsverträglichkeit. Spannungen und Verformungen verändern sich linear mit der Querbelastung der Platte.

(3) Als Beispiel für die linear-elastische Berechnung wird auf die folgende partielle Differentialgleichung 4. Ordnung einer isotropen dünnen Platte hingewiesen, die nur durch eine quergerichtete Flächenlast $p(x,y)$ belastet wird:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p(x,y)}{D} \quad (\text{A.1})$$

Dabei ist

$$D = \frac{E t^3}{12(1-\nu^2)}$$

A.3 Geometrisch nicht-lineare Berechnung (GNA)

(1) Die geometrisch nicht-lineare Berechnung (GNA) verwendet die nicht-lineare Plattentheorie für eine perfekte Struktur, bei der das Werkstoffverhalten linear-elastisch angenommen wird und die Nichtlinearität durch die Berücksichtigung großer Verformungen entsteht.

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

(2) Das GNA-Verfahren erfüllt sowohl die Gleichgewichtsbedingungen als auch die Verträglichkeit der großen Verformungen.

(3) Die nicht-lineare Plattentheorie berücksichtigt die Interaktion von Biege- und Membranspannungen in der Platte. Verformungen und Spannungen verändern sich nicht-linear mit der Größe der Querbelastung.

(4) Als Beispiel für das GNA-Verfahren wird auf die folgende partielle Differentialgleichung 4. Ordnung einer isotropen dünnen Platte hingewiesen, die nur durch eine quergerichtete Flächenlast $p(x,y)$ belastet wird.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - \frac{t}{D} \left[\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) + \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] = \frac{p(x,y)}{D} \quad (\text{A.2a})$$

$$\frac{\partial^4 f}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 f}{\partial y^4} = E \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \quad (\text{A.2b})$$

Dabei ist

f die Airy's Spannungsfunktion und

$$D = \frac{E t^3}{12(1-\nu^2)}$$

A.4 Werkstofflich nicht-lineare Berechnung (MNA)

(1) Die werkstofflich nicht-lineare Berechnung basiert auf der linearen Plattentheorie für das perfekte Tragwerk mit der Annahme kleiner Verformungen wie in A.2. Im Unterschied dazu wird jedoch das nicht-lineare Werkstoffverhalten berücksichtigt.

A.5 Geometrisch und werkstofflich nicht-lineare Berechnung (GMNA)

(1) Die geometrisch und werkstofflich nicht-lineare Berechnung basiert auf der nicht-linearen Plattentheorie für das perfekte Tragwerk. Das Werkstoffverhalten wird als nicht-linear elastisch-plastisch angenommen, und es werden große, nicht-lineare Verformungen berücksichtigt.

A.6 Geometrisch nicht-lineare Berechnung mit Imperfektionen (GNIA)

(1) Die geometrisch nicht-lineare Berechnung (GNIA) mit Imperfektionen entspricht dem GNA-Verfahren, siehe A.3. Dabei werden jedoch anstelle des geometrisch perfekten Tragwerks geometrische Imperfektionen berücksichtigt, die beispielsweise bei einer Platte Vorverformungen sein können, die durch die maßgebenden Beulformen bestimmt werden.

(2) Das GNIA-Verfahren wird angewendet, wenn bei Blechtragwerken Druck- oder Schubspannungen in der Blechebene vorherrschen. Mit dem Verfahren werden die elastischen Beulwiderstände von wirklichkeitsnahen imperfekten Blechtragwerken bestimmt.

A.7 Geometrisch und werkstofflich nicht-lineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA)

- (1) Die geometrisch und werkstofflich nicht-lineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA) entspricht dem GMNA-Verfahren, siehe A.5. Es werden jedoch geometrische Imperfektionen berücksichtigt. Dies kann zum Beispiel bei einer Platte eine Vorimperfektion sein, die durch die maßgebende Beulform bestimmt wird.
- (2) Das GMNIA-Verfahren wird angewendet, wenn Druck- oder Schubspannungen in der Platte dominieren. Mit dem Verfahren werden elastisch-plastische Beulwiderstände von „wirklichkeitsnahen“ imperfekten Blechtragwerken bestimmt.

Anhang B (informativ)

Spannungen in unausgesteiften Rechteckplatten aus der Theorie kleiner Verformungen

B.1 Allgemeines

(1) In diesem Anhang werden Bemessungsformeln für die Berechnung von Spannungen unausgesteifter Rechteckplatten angegeben, die auf der linearen Plattentheorie basieren. Daher werden Membrankräfte in den Bemessungsformeln dieses Anhangs nicht berücksichtigt.

(2) Die Bemessungsformeln werden für die folgenden Belastungen angegeben:

- gleichmäßig über der gesamten Platte verteilte Flächenlast siehe B.3;
- auf eine Teilfläche der Platte gleichmäßig verteilte Flächenlast, siehe B.4.

(3) Mit Koeffizienten, die in den Tabellen von B.3 und B.4 angegeben sind, können die Durchbiegung w und die Beigespannungen σ_{bx} und σ_{by} einer Platte berechnet werden. Für die Koeffizienten gilt die Querkontraktionszahl $\nu = 0,3$.

B.2 Symbole

(1) Die verwendeten Bezeichnungen sind:

- q_{Ed} Bemessungswert der gleichmäßig verteilten Flächenlast;
- p_{Ed} Bemessungswert der auf einer Teilfläche konzentrierten Flächenlast;
- a kurze Seitenabmessung der Platte;
- b lange Seitenabmessung der Platte;
- t Dicke der Platte;
- E Elastizitätsmodul;
- k_w Koeffizient für die Durchbiegung w der Platte, entsprechend den in der Tabelle angegebenen Randbedingungen;
- $k_{\sigma_{bx}}$ Koeffizient für die Biegespannung σ_{bx} der Platte, entsprechend den in der Tabelle angegebenen Randbedingungen;
- $k_{\sigma_{by}}$ Koeffizient für die Biegespannung σ_{by} der Platte, entsprechend den in der Tabelle angegebenen Randbedingungen.

B.3 Gleichmäßig verteilte Flächenlast

B.3.1 Plattendurchbiegungen

(1) Die Durchbiegung w eines Plattenfeldes unter einer gleichmäßig verteilten Flächenlast p kann wie folgt berechnet werden:

$$w = k_w \frac{q_{Ed} a^4}{E t^3} \quad (\text{B.1})$$

ANMERKUNG Die Gleichung (B.1) gilt nur bei kleinem w gegenüber t .

B.3.2 Plattenspannungen

(1) Die Biegespannungen σ_{bx} und σ_{by} in einem Plattenfeld dürfen mit folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$\sigma_{bx,Ed} = k_{\sigma_{bx}} \frac{q_{Ed} a^2}{t^2} \quad (\text{B.2})$$

$$\sigma_{by,Ed} = k_{\sigma_{by}} \frac{q_{Ed} a^2}{t^2} \quad (\text{B.3})$$

(2) Mit den Biegespannungen nach (1) darf die Vergleichsspannung in einem Plattenfeld wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{bx,Ed}^2 + \sigma_{by,Ed}^2 - \sigma_{bx,Ed} \sigma_{by,Ed}} \quad (\text{B.4})$$

ANMERKUNG Die in den Tabellen angegebenen Spannungen sind definiert für Punkte, die entweder auf den Plattenachsen oder an den Rändern liegen, so dass aufgrund von Symmetrieeigenschaften oder geforderten Randbedingungen die Biegeschubspannungen τ_b null sind.

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

B.3.3 Koeffizienten k für gleichmäßig verteilte Flächenlasten

Tabelle B.1 — Koeffizienten k

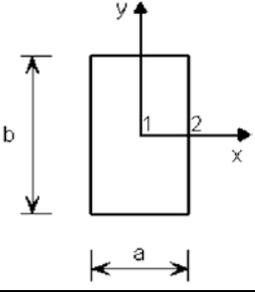
		Belastung: Gleichmäßig verteilte Flächenlast	
		Randbedingungen: Alle Ränder sind frei drehbar gelagert	
b/a	k_{w1}	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$
1,0	0,044 34	0,286	0,286
1,5	0,084 38	0,486	0,299
2,0	0,110 70	0,609	0,278
3,0	0,134 20	0,712	0,244

Tabelle B.2 — Koeffizienten k

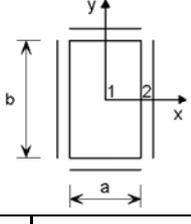
		Belastung: Gleichmäßig verteilte Flächenlast		
		Randbedingungen: Alle Ränder sind eingespannt.		
b/a	k_{w1}	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{bx2}}$
1,0	0,013 75	0,136 0	0,136 0	-0,308
1,5	0,023 93	0,218 0	0,121 0	-0,454
2,0	0,027 63	0,245 0	0,094 5	-0,498
3,0	0,028 70	0,248 0	0,075 4	-0,505

Tabelle B.3 — Koeffizienten k

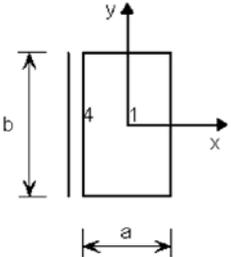
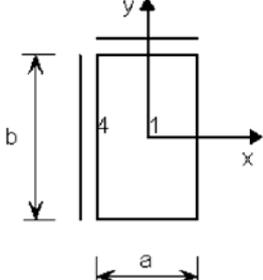
		Belastung: Gleichmäßig verteilte Flächenlast		
		Randbedingungen: Drei Ränder sind frei drehbar gelagert. Ein Rand ist eingespannt.		
b/a	k_{w1}	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{bx4}}$
1,5	0,048 94	0,330	0,177	-0,639
2,0	0,056 50	0,368	0,146	-0,705

Tabelle B.4 — Koeffizienten k

		Belastung: Gleichmäßig verteilte Flächenlast		
		Randbedingungen: Zwei aneinander angrenzende Ränder sind frei drehbar gelagert; die anderen beiden Ränder sind eingespannt.		
b/a	k_{w1}	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{bx4}}$
1,0	0,024 49	0,185	0,185	-0,375
1,5	0,044 11	0,302	0,180	-0,588
2,0	0,054 21	0,355	0,152	-0,683

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

Tabelle B.5 — Koeffizienten k

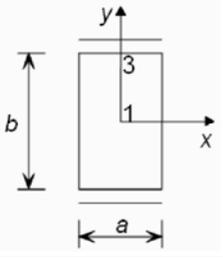
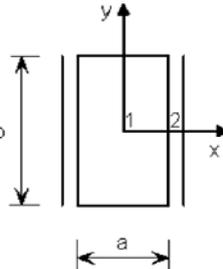
		Belastung: Gleichmäßig verteilte Flächenlast		
		Randbedingungen: Zwei gegenüberliegende kurze Ränder sind eingespannt; die anderen beiden Ränder sind frei drehbar gelagert.		
b/a	k_{w1}	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{by3}}$
1,0	0,020 89	0,145	0,197	-0,420
1,5	0,058 03	0,348	0,274	-0,630
2,0	0,092 22	0,519	0,284	-0,717

Tabelle B.6 — Koeffizienten k

		Belastung: Gleichmäßig verteilte Flächenlast		
		Randbedingungen: Zwei gegenüberliegende lange Ränder sind eingespannt; die anderen beiden Ränder sind frei drehbar gelagert.		
b/a	k_{w1}	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{bx2}}$
1,5	0,027 06	0,240	0,106	-0,495
2,0	0,028 52	0,250	0,0848	-0,507

B.4 Auf eine Teilfläche der Platte gleichmäßig verteilte Flächenlast

B.4.1 Plattendurchbiegungen

(1) Die Durchbiegung w eines Plattenfeldes unter einer Last p , die gleichmäßig über die Teilfläche $u \times v$ in Plattenmitte verteilt ist, kann wie folgt berechnet werden:

$$w = k_w \frac{p E d}{E t^3} a^4 \quad (\text{B.5})$$

B.4.2 Plattenspannungen

(1) Die Biegespannungen σ_{bx} und σ_{by} in einem Plattenfeld können mit folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$\sigma_{bx,Ed} = k_{\sigma_{bx}} \frac{p E d}{t^2} \quad (\text{B.6})$$

$$\sigma_{by,Ed} = k_{\sigma_{by}} \frac{p E d}{t^2} \quad (\text{B.7})$$

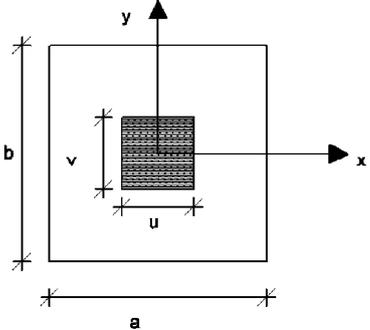
(2) Mit den Biegespannungen nach (1) kann die Vergleichsspannung in einem Plattenfeld wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{bx,Ed}^2 + \sigma_{by,Ed}^2 - \sigma_{bx,Ed} \sigma_{by,Ed}} \quad (\text{B.8})$$

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

B.4.3 Koeffizienten k für eine auf eine Teilfläche konzentrierte Last

Tabelle B.7 — Koeffizienten k

		Belastung: Gleichmäßig verteilte Teilflächenlast		
		Randbedingungen: Alle Ränder sind frei drehbar gelagert.		
		Parameter: $\alpha = u/a$ $\beta = v/a$		
b/a	$\alpha \times \beta$	k_{w1}	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$
1	0,1 × 0,1	0,125 4	1,72	1,72
	0,2 × 0,2	0,121 0	1,32	1,32
	0,3 × 0,3	0,112 6	1,04	1,04
	0,2 × 0,3	0,116 7	1,20	1,12
	0,2 × 0,4	0,111 7	1,10	0,978
1,5	0,1 × 0,1	0,166 4	1,92	1,70
	0,2 × 0,2	0,161 6	1,51	1,29
	0,3 × 0,3	0,152 8	1,22	1,01
	0,2 × 0,3	0,157 7	1,39	1,09
	0,2 × 0,4	0,153 2	1,29	0,953
2,0	0,1 × 0,1	0,179 5	1,97	1,67
	0,2 × 0,2	0,174 6	1,56	1,26
	0,3 × 0,3	0,165 7	1,28	0,985
	0,2 × 0,3	0,170 8	1,45	1,07
	0,2 × 0,4	0,166 5	1,35	0,929
3,0	0,1 × 0,1	0,184 0	1,99	1,66
	0,2 × 0,2	0,179 1	1,58	1,25
	0,3 × 0,3	0,170 1	1,30	0,975
	0,2 × 0,3	0,175 3	1,47	1,06
	0,2 × 0,4	0,171 1	1,37	0,918

Anhang C (informativ)

Spannungen in unausgesteiften Rechteckplatten aus der Theorie großer Verformungen

C.1 Allgemeines

(1) In diesem Anhang werden Bemessungsformeln für die Berechnung der Spannungen unausgesteifter Rechteckplatten angegeben, die mit der nicht-linearen Plattentheorie ermittelt wurden.

(2) Die Bemessungsformeln werden für die folgenden Belastungen angegeben:

- gleichmäßig über der gesamten Platte verteilte Flächenlast, siehe C.3
- auf Teilflächen der Platte gleichmäßig verteilte Flächenlast, siehe C.4

(3) Mit den Koeffizienten, die in den Tabellen in C.3 und C.4 angegeben sind, dürfen die Biege- und Membranspannungen in der Platte und die Durchbiegung w der Platte berechnet werden. Für die Koeffizienten gilt die Poissonzahl $\nu = 0,3$.

C.2 Symbole

(1) Die verwendeten Bezeichnungen sind:

q_{Ed}	Bemessungswert der gleichmäßig über die Gesamtfläche verteilten Last;
p_{Ed}	Bemessungswert der gleichmäßig verteilten Last auf die Teilfläche $u \times v$;
a	kurze Seitenabmessung der Platte;
b	lange Seitenabmessung der Platte;
t	Dicke der Platte;
E	Elastizitätsmodul;
FBC	Randbedingungen für plattenartiges Verhalten;
MBC	Randbedingungen für das Membranverhalten;
k_w	Koeffizient für die Durchbiegung w der Platte, entsprechend den in den Tabellen angegebenen Randbedingungen;
$k_{\sigma_{bx}}$	Koeffizient für die Biegespannung σ_{bx} der Platte, entsprechend den in den Tabellen angegebenen Randbedingungen;
$k_{\sigma_{by}}$	Koeffizient für die Biegespannung σ_{by} der Platte, entsprechend den in den Tabellen angegebenen Randbedingungen;
$k_{\sigma_{mx}}$	Koeffizient für die Membranspannung σ_{mx} der Platte, entsprechend den in den Tabellen angegebenen Randbedingungen;
$k_{\sigma_{my}}$	Koeffizient für die Membranspannung σ_{my} der Platte, entsprechend den in den Tabellen angegebenen Randbedingungen.

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

C.3 Auf die Gesamtläche der Platte gleichmäßig verteilte Flächenlast

C.3.1 Plattendurchbiegungen

(1) Die Durchbiegung w eines Plattenfeldes unter einer gleichmäßig verteilten Flächenlast p kann wie folgt berechnet werden:

$$w = k_w \frac{q_{Ed} a^4}{E t^3} \quad (C.1)$$

C.3.2 Plattenspannungen

(1) Die Biegespannungen σ_{bx} und σ_{by} in einem Plattenfeld können mit folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$\sigma_{bx,Ed} = k_{\sigma_{bx}} \frac{q_{Ed} a^2}{t^2} \quad (C.2)$$

$$\sigma_{by,Ed} = k_{\sigma_{by}} \frac{q_{Ed} a^2}{t^2} \quad (C.3)$$

(2) Die Membranspannungen σ_{mx} und σ_{my} in einem Plattenfeld können wie folgt bestimmt werden:

$$\sigma_{mx,Ed} = k_{\sigma_{mx}} \frac{q_{Ed} a^2}{t^2} \quad (C.4)$$

$$\sigma_{my,Ed} = k_{\sigma_{my}} \frac{q_{Ed} a^2}{t^2} \quad (C.5)$$

(3) An der belasteten Oberfläche lassen sich die Gesamtspannungen aus den Biege- und Membranspannungen nach (1) und (2) wie folgt berechnen:

$$\sigma_{x,Ed} = -\sigma_{bx,Ed} + \sigma_{mx,Ed} \quad (C.6)$$

$$\sigma_{y,Ed} = -\sigma_{by,Ed} + \sigma_{my,Ed} \quad (C.7)$$

(4) An der nicht belasteten Oberfläche lassen sich die Gesamtspannungen aus den Biege- und Membranspannungen nach (1) und (2) wie folgt berechnen:

$$\sigma_{x,Ed} = \sigma_{bx,Ed} + \sigma_{mx,Ed} \quad (C.8)$$

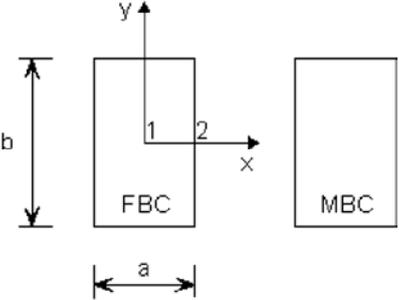
$$\sigma_{y,Ed} = \sigma_{by,Ed} + \sigma_{my,Ed} \quad (C.9)$$

(5) Mit den Spannungen nach (3) und (4) kann für eine Platte die Vergleichspannung $\sigma_{v,Ed}$ wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{y,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \sigma_{y,Ed}} \quad (C.10)$$

ANMERKUNG Die in den Tabellen angegebenen Spannungen sind definiert für Punkte, die entweder auf den Plattenachsen oder an den Rändern liegen, so dass aufgrund von Symmetrieeigenschaften oder geforderten Randbedingungen die Membranschubspannungen τ_m und die Biegeschubspannungen τ_b null sind. Eine Aufsummierung der entsprechenden Biege- und Membranspannungen an den Punkten in den Tabellen ergibt die maximalen und minimalen Oberflächenspannungen an diesen Punkten.

C.3.3 Koeffizienten k für gleichmäßig verteilte FlächenlastenTabelle C.1 — Koeffizienten k

				Belastung: Gleichmäßig verteilte Flächenlast			
				Randbedingungen: Platte: Alle Ränder sind frei drehbar gelagert. Membran: Normalspannungen = 0; Schubspannungen = 0.			
				Parameter: $Q = \frac{q_{Ed} a^4}{E t^4}$			
b/a	Q	k_{w1}	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$	$k_{\sigma_{my2}}$
1,0	20	0,039 6	0,243 1	0,243 1	0,030 2	0,030 2	-0,058 9
	40	0,033 4	0,189 3	0,189 3	0,040 3	0,040 3	-0,084 1
	120	0,021 4	0,096 1	0,096 1	0,041 1	0,041 1	-0,102 4
	200	0,016 6	0,065 8	0,065 8	0,037 2	0,037 2	-0,100 4
	300	0,013 5	0,048 0	0,048 0	0,033 5	0,033 5	-0,095 8
1,5	400	0,011 6	0,038 3	0,038 3	0,030 6	0,030 6	-0,091 5
	20	0,068 5	0,371 3	0,215 6	0,024 3	0,069 4	-0,124 4
	40	0,054 6	0,277 0	0,154 6	0,023 8	0,082 2	-0,149 2
	120	0,033 2	0,144 8	0,080 7	0,017 0	0,078 9	-0,146 8
	200	0,025 7	0,100 1	0,058 3	0,014 1	0,071 5	-0,136 3
2,0	300	0,020 7	0,072 4	0,044 0	0,012 6	0,064 6	-0,127 1
	400	0,017 6	0,056 9	0,035 9	0,011 7	0,059 5	-0,120 5
	20	0,092 1	0,490 9	0,216 6	0,008 5	0,080 1	-0,134 6
	40	0,074 6	0,383 7	0,168 7	0,007 9	0,098 4	-0,165 7
	120	0,046 2	0,213 8	0,095 9	0,007 3	0,099 2	-0,170 7
	200	0,035 6	0,151 6	0,069 5	0,006 7	0,091 4	-0,161 0
	300	0,028 7	0,112 1	0,052 8	0,006 1	0,084 0	-0,151 0
	400	0,024 5	0,088 3	0,042 8	0,006 1	0,078 1	-0,143 4

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

Tabelle C.2 — Koeffizienten k

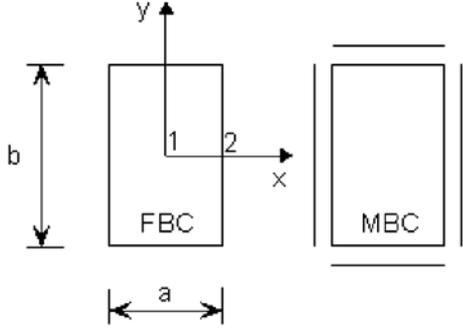
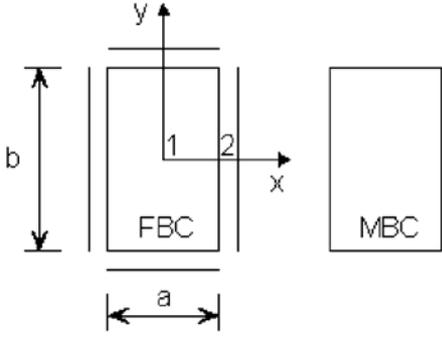
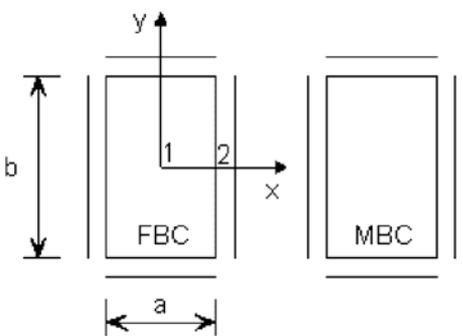
		Belastung: Gleichmäßig verteilte Flächenlast						
		Randbedingungen: Platte: Alle Ränder sind frei drehbar gelagert. Membran: Alle Ränder bleiben gerade, Resultierende der Normalspannungen = 0; Schubspannungen = 0.						
		Parameter: $Q = \frac{q_{Ed} a^4}{E I^4}$						
b/a	Q	k_{w1}	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$	$k_{\sigma_{mx2}}$	$k_{\sigma_{my2}}$
1	20	0,036 9	0,229 1	0,229 1	0,031 5	0,031 5	0,035 2	-0,034 3
	40	0,029 3	0,172 7	0,172 7	0,038 3	0,038 3	0,045 5	-0,042 9
	120	0,017 0	0,088 7	0,088 7	0,036 0	0,036 0	0,047 8	-0,042 3
	200	0,012 6	0,062 1	0,062 1	0,031 7	0,031 7	0,044 3	-0,038 0
	300	0,009 9	0,046 6	0,046 6	0,028 0	0,028 0	0,040 3	-0,033 7
1,5	400	0,008 2	0,038 3	0,038 3	0,025 5	0,025 5	0,037 2	-0,030 9
	20	0,055 4	0,302 3	0,161 2	0,061 7	0,028 7	0,070 5	-0,029 6
	40	0,040 0	0,211 4	0,100 2	0,058 3	0,028 4	0,071 0	-0,029 3
	120	0,021 4	0,107 9	0,042 8	0,041 8	0,022 4	0,055 9	-0,022 4
	200	0,015 7	0,077 8	0,029 6	0,034 5	0,019 1	0,047 1	-0,018 8
2	300	0,012 2	0,060 3	0,022 4	0,029 6	0,016 7	0,040 8	-0,016 1
	400	0,010 3	0,050 5	0,018 8	0,026 7	0,015 2	0,036 9	-0,014 7
	20	0,062 1	0,323 4	0,110 9	0,062 7	0,014 2	0,071 9	-0,014 2
	40	0,043 8	0,222 9	0,068 9	0,053 0	0,012 0	0,063 9	-0,012 0
	120	0,023 4	0,116 3	0,033 6	0,036 5	0,008 6	0,045 7	-0,008 3
3	200	0,017 2	0,084 7	0,024 7	0,030 5	0,007 5	0,038 4	-0,006 7
	300	0,013 5	0,065 8	0,019 5	0,026 8	0,006 7	0,033 5	-0,005 8
	400	0,011 3	0,054 8	0,016 4	0,024 4	0,006 4	0,030 5	-0,005 0
	20	0,068 6	0,351 0	0,102 2	0,047 7	0,002 0	0,050 6	-0,000 7
	40	0,049 0	0,247 1	0,072 5	0,042 0	0,002 0	0,044 1	0,000 0
4	120	0,026 7	0,131 7	0,039 0	0,032 0	0,002 7	0,033 5	0,001 0
	200	0,019 6	0,095 4	0,028 3	0,027 1	0,004 4	0,028 5	0,002 7
	300	0,015 3	0,073 3	0,021 7	0,024 2	0,005 9	0,025 6	0,004 4
	400	0,012 7	0,060 5	0,017 8	0,022 1	0,006 6	0,023 5	0,005 1

Tabelle C.3 — Koeffizienten k

		Belastung: Gleichmäßig verteilte Flächenlast						
		Randbedingungen: Platte: Alle Ränder sind eingespannt. Membran: Normalspannungen = 0; Schubspannungen = 0.						
		Parameter: $Q = \frac{q_{Ed} a^4}{E t^4}$						
b/a	Q	k_{w1}	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$	$k_{\sigma_{mx2}}$	$k_{\sigma_{my2}}$
1	20	0,013 6	0,133 6	0,133 6	0,006 1	0,006 1	-0,306 2	-0,007 3
	40	0,013 1	0,126 8	0,126 8	0,011 3	0,011 3	-0,300 6	-0,013 7
	120	0,010 8	0,093 3	0,093 3	0,021 2	0,021 2	-0,272 0	-0,028 6
	200	0,009 2	0,071 1	0,071 1	0,023 3	0,023 3	-0,248 6	-0,034 7
	300	0,007 8	0,054 7	0,054 7	0,023 3	0,023 3	-0,227 3	-0,038 3
	400	0,006 9	0,044 6	0,044 6	0,022 6	0,022 6	-0,211 3	-0,039 9
1,5	20	0,023 4	0,211 7	0,116 2	0,006 1	0,013 3	-0,447 2	-0,018 1
	40	0,022 2	0,196 4	0,105 0	0,009 8	0,023 4	-0,429 9	-0,032 2
	120	0,017 3	0,140 6	0,069 6	0,012 4	0,038 5	-0,359 1	-0,055 9
	200	0,014 4	0,110 3	0,053 7	0,011 6	0,041 5	-0,316 0	-0,062 0
	300	0,012 2	0,087 9	0,043 0	0,010 5	0,041 6	-0,281 5	-0,063 6
	400	0,010 7	0,073 7	0,036 4	0,009 8	0,040 9	-0,258 3	-0,063 5
2	20	0,027 3	0,241 8	0,093 2	0,001 0	0,010 8	-0,493 5	-0,015 0
	40	0,026 5	0,233 0	0,089 7	0,001 7	0,019 8	-0,481 6	-0,027 7
	120	0,022 3	0,190 1	0,074 0	0,003 2	0,039 2	-0,422 3	-0,055 1
	200	0,019 2	0,157 8	0,062 1	0,003 9	0,045 6	-0,378 0	-0,064 7
	300	0,016 5	0,130 6	0,051 8	0,004 2	0,048 3	-0,339 6	-0,069 0
	400	0,014 7	0,112 0	0,044 6	0,004 4	0,048 7	-0,313 2	-0,070 2
3	20	0,028 8	0,249 2	0,076 7	-0,001 5	0,002 7	-0,506 5	-0,003 3
	40	0,029 0	0,251 7	0,079 5	-0,00 22	0,006 6	-0,509 5	-0,008 4
	120	0,028 1	0,244 0	0,081 2	-0,00 10	0,024 7	-0,498 4	-0,033 1
	200	0,026 0	0,223 0	0,075 0	0,000 0	0,036 8	-0,470 2	-0,049 7
	250	0,024 7	0,209 6	0,070 7	0,000 2	0,041 5	-0,452 0	-0,056 4

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

Tabelle C.4 — Koeffizienten k

					Belastung: Gleichmäßig verteilte Flächenlast				
					Randbedingungen: Platte: Alle Ränder sind eingespannt. Membran: Alle Ränder bleiben gerade, Resultierende der Normalspannungen = 0; Schubspannungen = 0.				
					Parameter: $Q = \frac{q_{Ed} a^4}{E t^4}$				
b/a	Q	k_{w1}	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$	$k_{\sigma_{bx2}}$	$k_{\sigma_{mx2}}$	$k_{\sigma_{my2}}$
1	20	0,013 6	0,133 3	0,133 3	0,006 5	0,006 5	-0,305 8	0,003 1	-0,005 5
	40	0,013 0	0,125 8	0,125 8	0,011 8	0,011 8	-0,300 0	0,005 9	-0,010 3
	120	0,010 5	0,090 8	0,090 8	0,021 6	0,021 6	-0,270 4	0,012 3	-0,020 2
	200	0,008 7	0,068 8	0,068 8	0,023 4	0,023 4	-0,247 3	0,015 1	-0,023 3
	300	0,007 3	0,052 8	0,052 8	0,023 1	0,023 1	-0,226 7	0,016 9	-0,024 4
	400	0,006 3	0,043 0	0,043 0	0,022 3	0,022 3	-0,211 9	0,017 6	-0,024 6
1,5	20	0,023 0	0,206 4	0,112 5	0,013 7	0,009 7	-0,443 1	0,011 8	-0,008 2
	40	0,021 0	0,183 3	0,095 7	0,021 8	0,015 5	-0,419 5	0,020 0	-0,013 3
	120	0,014 9	0,117 5	0,053 2	0,027 5	0,020 2	-0,344 1	0,029 5	-0,018 5
	200	0,011 8	0,087 6	0,036 9	0,025 9	0,019 5	-0,302 8	0,030 4	-0,018 2
	300	0,009 6	0,067 8	0,027 5	0,023 8	0,018 0	-0,271 0	0,030 0	-0,017 3
	400	0,008 3	0,056 2	0,022 1	0,022 0	0,016 8	-0,249 2	0,029 1	-0,016 3
2	20	0,026 2	0,228 8	0,085 3	0,014 0	0,006 0	-0,481 1	0,014 9	-0,005 2
	40	0,023 4	0,199 4	0,070 1	0,020 6	0,008 6	-0,449 2	0,023 4	-0,007 7
	120	0,016 2	0,127 6	0,040 4	0,023 8	0,009 4	-0,361 1	0,029 9	-0,008 6
	200	0,012 9	0,096 3	0,029 6	0,022 3	0,008 5	-0,316 2	0,028 9	-0,007 9
	300	0,010 5	0,075 2	0,023 0	0,020 8	0,007 7	-0,282 4	0,027 4	-0,007 2
	400	0,009 0	0,062 7	0,019 0	0,019 6	0,007 1	-0,260 0	0,025 9	-0,006 6
3	20	0,027 2	0,233 1	0,070 0	0,010 2	0,0010	-0,487 8	0,011 1	-0,000 8
	40	0,024 7	0,207 1	0,061 5	0,014 9	0,001 1	-0,457 5	0,016 7	-0,000 9
	120	0,017 7	0,139 6	0,041 3	0,018 6	0,000 9	-0,372 7	0,020 2	-0,000 5
	200	0,014 3	0,107 4	0,031 9	0,018 4	0,000 9	-0,327 2	0,019 7	-0,000 3
	300	0,011 7	0,084 8	0,025 1	0,017 6	0,000 8	-0,292 4	0,019 2	-0,000 2
	400	0,010 1	0,070 9	0,021 0	0,016 9	0,000 8	-0,268 7	0,018 2	0,000 0

C.4 Auf eine Teilfläche der Platte gleichmäßig verteilte Flächenlast

C.4.1 Allgemeines

(1) Die Durchbiegung w eines Plattenfeldes unter einer Last p_{Ed} , die gleichmäßig über die Teilfläche $u \times v$ in Plattenmitte verteilt ist, kann wie folgt berechnet werden:

$$w = k_w \frac{p_{Ed} a^4}{E t^3} \quad (C.11)$$

C.4.2 Plattenspannungen

(1) Die Biegespannungen σ_{bx} und σ_{by} in einem Plattenfeld dürfen mit folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$\sigma_{b,x,Ed} = k_{\sigma_{bx}} \frac{p_{Ed} a^2}{t^2} \quad (C.12)$$

$$\sigma_{b,y,Ed} = k_{\sigma_{by}} \frac{p_{Ed} a^2}{t^2} \quad (C.13)$$

(2) Die Membranspannungen σ_{mx} und σ_{my} in einem Plattenfeld dürfen wie folgt bestimmt werden:

$$\sigma_{m,x,Ed} = k_{\sigma_{mx}} \frac{p_{Ed} a^2}{t^2} \quad (C.14)$$

$$\sigma_{m,y,Ed} = k_{\sigma_{my}} \frac{p_{Ed} a^2}{t^2} \quad (C.15)$$

(3) An der belasteten Oberfläche lassen sich die Gesamtspannungen aus den Biege- und Membranspannungen nach (1) und (2) wie folgt berechnen:

$$\sigma_{x,Ed} = -\sigma_{bx,Ed} + \sigma_{mx,Ed} \quad (C.16)$$

$$\sigma_{y,Ed} = -\sigma_{by,Ed} + \sigma_{my,Ed} \quad (C.17)$$

(4) An der nicht belasteten Oberfläche lassen sich die Gesamtspannungen aus den Biege- und Membranspannungen nach (1) und (2) wie folgt berechnen:

$$\sigma_{x,Ed} = \sigma_{bx,Ed} + \sigma_{mx,Ed} \quad (C.18)$$

$$\sigma_{y,Ed} = \sigma_{by,Ed} + \sigma_{my,Ed} \quad (C.19)$$

(5) Mit den Spannungen nach (3) und (4) können für eine Platte die Vergleichsspannungen $\sigma_{v,Ed}$ wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{y,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \sigma_{y,Ed}} \quad (C.20)$$

ANMERKUNG Die in den Tabellen angegebenen Spannungen sind definiert für Punkte, die entweder auf den Plattenachsen oder an den Rändern liegen, so dass aufgrund von Symmetrieeigenschaften oder geforderten Randbedingungen die Membranschubspannungen τ_m und die Biegeschubspannungen τ_b null sind. Eine Aufsummierung der entsprechenden Biege- und Membranspannungen an den Punkten in den Tabellen ergibt die maximalen und minimalen Oberflächenspannungen an diesen Punkten.

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

C.4.3 Koeffizienten k für auf Teilflächen konzentrierte Last

Tabelle C.5 — Koeffizienten k

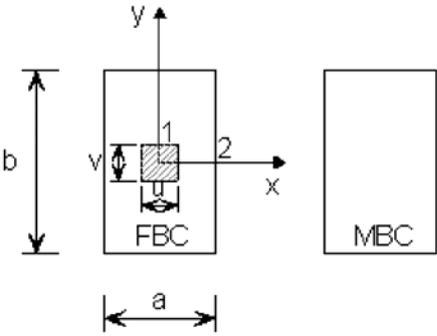
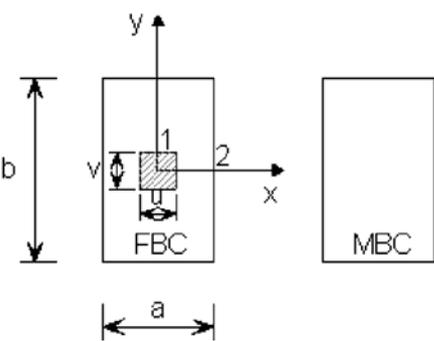
		Belastung: Gleichmäßig verteilte Flächenlast				
		Randbedingungen: Platte: Alle Ränder sind frei drehbar gelagert. Membran: Normalspannungen = 0; Schubspannungen = 0.				
Parameter:						
$\alpha = u/a; \beta = v/a$						
$P = \frac{pEd a^4}{Et^4}$						
$b/a = 1$						
$\alpha \times \beta$	P	k_{w1}	$k_{\sigma_{bx}1}$	$k_{\sigma_{by}1}$	$k_{\sigma_{mx}1}$	$k_{\sigma_{my}1}$
0,1 × 0,1	10	0,102 1	1,458 6	1,458 6	0,154 8	0,154 8
	20	0,080 8	1,214 3	1,214 3	0,192 6	0,192 6
	60	0,048 5	0,827 3	0,827 3	0,204 7	0,204 7
	100	0,037 2	0,674 2	0,674 2	0,197 8	0,197 8
	150	0,029 8	0,569 3	0,569 3	0,189 2	0,189 2
	200	0,025 5	0,500 5	0,500 5	0,182 3	0,182 3
0,2 × 0,2	10	0,099 8	1,085 0	1,085 0	0,139 9	0,139 9
	20	0,079 5	0,859 3	0,859 3	0,172 9	0,172 9
	60	0,047 8	0,510 8	0,510 8	0,175 6	0,175 6
	100	0,036 4	0,388 1	0,388 1	0,162 4	0,162 4
	150	0,029 3	0,308 9	0,308 9	0,150 5	0,150 5
	200	0,024 9	0,261 4	0,261 4	0,141 2	0,141 2
0,3 × 0,3	10	0,094 5	0,850 7	0,850 7	0,114 4	0,114 4
	20	0,075 9	0,661 4	0,661 4	0,142 5	0,142 5
	60	0,045 9	0,370 2	0,370 2	0,142 5	0,142 5
	100	0,035 1	0,270 4	0,270 4	0,130 0	0,130 0
	150	0,028 2	0,210 1	0,210 1	0,118 6	0,118 6
	200	0,024 0	0,174 7	0,174 7	0,110 2	0,110 2
0,2 × 0,3	10	0,097 1	0,988 8	0,912 8	0,122 4	0,128 8
	20	0,077 6	0,780 0	0,710 1	0,151 2	0,160 2
	60	0,046 8	0,459 6	0,402 1	0,148 8	0,162 4
	100	0,035 8	0,346 8	0,295 7	0,136 8	0,151 2
	150	0,028 7	0,276 0	0,230 7	0,124 8	0,138 9
	200	0,024 5	0,234 0	0,192 6	0,115 2	0,131 0
0,2 × 0,4	10	0,093 9	0,911 9	0,796 1	0,107 8	0,118 3
	20	0,075 5	0,721 6	0,614 2	0,132 0	0,148 7
	60	0,045 7	0,423 5	0,335 5	0,128 7	0,151 6
	100	0,035 0	0,320 1	0,243 5	0,116 6	0,140 8
	150	0,028 0	0,254 1	0,186 8	0,104 5	0,130 1
	200	0,023 9	0,215 6	0,154 5	0,096 8	0,121 3

Tabelle C.6 — Koeffizienten k

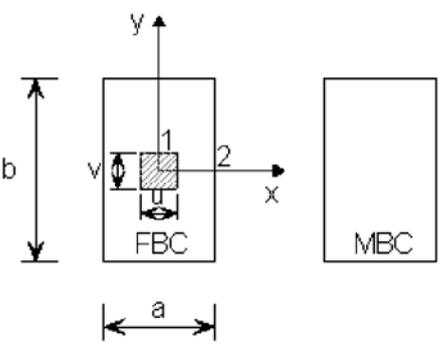
		Belastung: Gleichmäßig verteilte Flächenlast				
		Randbedingungen: Platte: Alle Ränder sind frei gelagert. Membran: Normalspannungen = 0; Schubspannungen = 0.				
		Parameter:				
		$\alpha = u/a; \beta = v/a$ $P = \frac{p_{Ed} a^4}{Et^4}$ $b/a = 1,5$				
$\alpha \times \beta$	P	k_{w1}	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$
0,1 × 0,1	10	0,130 3	1,578 2	1,385 5	0,151 7	0,192 1
	20	0,101 8	1,305 6	1,137 3	0,178 6	0,229 5
	60	0,061 2	0,898 6	0,770 1	0,182 4	0,238 0
	100	0,046 9	0,741 1	0,627 3	0,174 7	0,229 5
	150	0,037 8	0,629 8	0,528 7	0,167 0	0,219 3
	200	0,032 3	0,556 8	0,464 1	0,159 4	0,212 5
0,2 × 0,2	10	0,128 1	1,197 4	1,004 9	0,134 4	0,178 0
	20	0,100 7	0,945 3	0,776 6	0,155 5	0,211 6
	60	0,060 5	0,578 3	0,455 4	0,146 5	0,210 3
	100	0,046 2	0,448 5	0,345 7	0,132 9	0,197 4
	150	0,037 2	0,362 4	0,274 8	0,120 8	0,184 5
	200	0,031 7	0,311 1	0,232 2	0,113 3	0,174 2
0,3 × 0,3	10	0,122 9	0,958 9	0,773 7	0,107 4	0,152 5
	20	0,097 2	0,740 5	0,582 8	0,123 2	0,181 8
	60	0,058 5	0,428 2	0,316 1	0,111 0	0,178 8
	100	0,044 9	0,322 1	0,235 3	0,098 8	0,166 7
	150	0,036 1	0,255 0	0,1828	0,087 8	0,153 5
	200	0,030 9	0,214 7	0,152 5	0,080 5	0,144 4
0,2 × 0,3	10	0,126 0	1,103 7	0,836 0	0,115 4	0,165 7
	20	0,099 4	0,868 8	0,632 2	0,132 1	0,198 4
	60	0,059 8	0,529 6	0,355 3	0,116 8	0,197 3
	100	0,045 9	0,411 4	0,264 9	0,104 3	0,185 3
	150	0,036 9	0,333 6	0,208 2	0,093 1	0,172 2
	200	0,031 4	0,287 7	0,175 5	0,084 8	0,162 4
0,2 × 0,4	10	0,123 5	1,029 4	0,7271	0,099 3	0,156 3
	20	0,097 7	0,810 1	0,543 2	0,110 9	0,187 7
	60	0,059 0	0,495 4	0,298 3	0,095 5	0,187 7
	100	0,045 3	0,385 7	0,222 0	0,082 6	0,175 4
	150	0,036 5	0,314 8	0,174 4	0,072 2	0,163 0
	200	0,031 1	0,272 2	0,146 8	0,065 8	0,154 4

DIN EN 1993-1-7:2010-12
EN 1993-1-7:2007 + AC:2009 (D)

Tabelle C.7 — Koeffizienten k

		Belastung: Gleichmäßig verteilte Flächenlast				
		Randbedingungen:				
		Platte: Alle Ränder sind frei gelagert.				
		Membran: Normalspannungen = 0; Schubspannungen = 0.				
$\alpha \times \beta$		Parameter:				
		$\alpha = u/a; \beta = v/a$ $P = \frac{p_{Ed} a^4}{Et^4}$ $b/a = 2$				
$\alpha \times \beta$	P	k_{w1}	$k_{\sigma_{bx}1}$	$k_{\sigma_{by}1}$	$k_{\sigma_{mx}1}$	$k_{\sigma_{my}1}$
0,1 × 0,1	10	0,143 8	1,635 1	1,356 0	0,151 7	0,190 4
	20	0,115 4	1,369 2	1,110 6	0,177 3	0,228 8
	60	0,072 5	0,963 3	0,749 8	0,175 3	0,243 8
	100	0,056 4	0,797 9	0,611 2	0,167 5	0,235 5
	150	0,045 6	0,679 7	0,512 7	0,159 6	0,227 1
	200	0,039 0	0,602 8	0,449 2	0,151 7	0,218 8
0,2 × 0,2	10	0,141 4	1,254 2	0,975 2	0,132 6	0,175 1
	20	0,113 8	1,007 8	0,751 0	0,151 3	0,210 4
	60	0,071 6	0,642 7	0,441 0	0,137 3	0,216 7
	100	0,055 5	0,505 4	0,333 9	0,123 2	0,205 4
	150	0,044 9	0,413 4	0,264 6	0,110 8	0,192 8
	200	0,038 4	0,357 2	0,223 0	0,103 0	0,182 7
0,3 × 0,3	10	0,136 2	1,022 7	0,750 6	0,106 2	0,151 7
	20	0,110 4	0,809 0	0,561 5	0,119 0	0,182 2
	60	0,069 8	0,494 1	0,309 3	0,102 4	0,186 2
	100	0,054 2	0,378 9	0,227 5	0,088 3	0,175 3
	150	0,042 1	0,304 6	0,178 3	0,079 4	0,164 5
	200	0,037 4	0,258 6	0,148 7	0,071 7	0,154 6
0,2 × 0,3	10	0,139 5	1,170 2	0,816 4	0,114 6	0,123 1
	20	0,112 9	0,939 6	0,615 3	0,126 2	0,199 0
	60	0,071 2	0,600 3	0,348 8	0,108 8	0,204 4
	100	0,055 3	0,474 2	0,261 1	0,094 3	0,194 7
	150	0,044 7	0,390 1	0,206 5	0,084 1	0,183 0
	200	0,038 3	0,337 9	0,174 4	0,075 4	0,173 3
0,2 × 0,4	10	0,137 5	1,097 6	0,705 1	0,095 9	0,155 1
	20	0,111 7	0,882 9	0,526 7	0,105 3	0,188 6
	60	0,070 6	0,567 0	0,294 5	0,085 1	0,194 2
	100	0,054 9	0,449 6	0,222 0	0,072 9	0,184 9
	150	0,044 5	0,371 3	0,176 5	0,063 5	0,173 7
	200	0,038 1	0,322 7	0,149 6	0,055 4	0,164 4

Tabelle C.8 — Koeffizienten k

		Belastung: Gleichmäßig verteilte Flächenlast				
		Randbedingungen: Platte: Alle Ränder sind frei gelagert. Membran: Normalspannungen = 0; Schubspannungen = 0.				
$\alpha \times \beta$		Parameter:				
		$\alpha = u/a; \beta = v/a$ $P = \frac{p_{Ed} a^4}{Et^4}$ $b/a = 2,5$				
$\alpha \times \beta$	P	k_{w1}	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$
0,1 × 0,1	10	0,149 6	1,663 6	1,346 3	0,155 2	0,182 6
	20	0,123 5	1,410 9	1,100 6	0,181 1	0,217 5
	60	0,086 1	1,042 8	0,745 3	0,181 1	0,237 4
0,2 × 0,2	10	0,147 0	1,281 4	0,965 0	0,135 9	0,168 8
	20	0,121 8	1,049 1	0,740 0	0,154 8	0,200 0
	60	0,084 9	0,720 5	0,436 3	0,139 0	0,208 8
0,3 × 0,3	10	0,141 9	1,050 4	0,741 0	0,109 2	0,144 3
	20	0,118 2	0,848 9	0,551 9	0,122 2	0,172 6
	60	0,082 7	0,568 1	0,305 2	0,101 4	0,177 5
0,2 × 0,3	10	0,145 5	1,198 1	0,805 6	0,116 1	0,157 9
	20	0,121 0	0,982 0	0,605 3	0,129 4	0,187 6
	60	0,084 7	0,680 6	0,348 7	0,108 8	0,198 2
0,2 × 0,4	10	0,143 4	0,112 6	0,694 9	0,098 6	0,146 9
	20	0,119 9	0,926 1	0,516 8	0,106 9	0,176 3
	60	0,084 4	0,648 0	0,299 3	0,084 9	0,187 3

DIN EN 1993-1-7/NA

ICS 91.010.30; 91.080.10

**Nationaler Anhang –
National festgelegte Parameter –
Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-7: Plattenförmige Bauteile mit Querbelastung**

National Annex –
Nationally determined parameters –
Eurocode 3: Design of steel Structures –
Part 1-7: Plated structures subject to out of plane loading

Annexe Nationale –
Paramètres déterminés au plan national –
Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 1-7: Résistance et stabilité des structures en plaques planes
chargées hors de leur plan

Gesamtumfang 2 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

DIN EN 1993-1-7/NA:2010-12

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung“ erstellt.

Dieses Dokument bildet den Nationalen Anhang zu DIN EN 1993-1-7:2010-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-7 NA: Bauteile mit Querbelastrung*.

Die Europäische Norm EN 1993-1-7 räumt die Möglichkeit ein, eine Reihe von sicherheitsrelevanten Parametern national festzulegen. Diese national festzulegenden Parameter (en: Nationally determined parameters, NDP) umfassen alternative Nachweisverfahren und Angaben einzelner Werte, sowie die Wahl von Klassen aus gegebenen Klassifizierungssystemen. Die entsprechenden Textstellen sind in der Europäischen Norm durch Hinweise auf die Möglichkeit nationaler Festlegungen gekennzeichnet. Eine Liste dieser Textstellen befindet sich im Unterabschnitt NA 2.1

Dieser Nationale Anhang ist Bestandteil von DIN EN 1993-1-7: 2010-12.

NA 1 Anwendungsbereich

Dieser Nationale Anhang enthält nationale Festlegungen zu den Bemessungsregeln für den Entwurf nicht ausgesteifter und ausgesteifter Platten, die Teil von plattenartigen Tragwerken wie z. B. Silos und Behälter sind, welche einer Querbelastrung ausgesetzt sind, die bei der Anwendung von DIN EN 1993-1-7:2010-12 in Deutschland zu berücksichtigen sind.

Dieser Nationale Anhang gilt nur in Verbindung mit DIN EN 1993-1-7:2010-12.

NA 2 Nationale Festlegungen zur Anwendung von DIN EN 1993-1-7:2010-12

NA 2.1 Allgemeines

DIN EN 1993-1-7:2010-12 weist an den folgenden Textstellen die Möglichkeit nationaler Festlegungen aus (NDP).

— 6.3.2(4)

NA 2.2 Nationale Festlegungen

Die nachfolgende Nummerierung entspricht der Nummerierung von DIN EN 1993-1-7:2010-12.

NDP zu 6.3.2(4)

Es gilt die Empfehlung.

DIN EN 1993-1-9

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatzvermerk
siehe unten**Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-9: Ermüdung;
Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009**

Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-9: Fatigue;
German version EN 1993-1-9:2005 + AC:2009

Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 1-9: Fatigue;
Version allemande EN 1993-1-9:2005 + AC:2009

Ersatzvermerk

Ersatz für DIN EN 1993-1-9:2005-07;
mit DIN EN 1993-1-1:2010-12, DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-3:2010-12,
DIN EN 1993-1-3/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-5:2010-12, DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12,
DIN EN 1993-1-8:2010-12, DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-9/NA:2010-12,
DIN EN 1993-1-10:2010-12, DIN EN 1993-1-10/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-11:2010-12 und
DIN EN 1993-1-11/NA:2010-12 Ersatz für DIN 18800-1:2008-11;
Ersatz für DIN EN 1993-1-9 Berichtigung 1:2009-12

Gesamtumfang 43 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

DIN EN 1993-1-9:2010-12

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 1993-1-9:2005 + AC:2009) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird.

Die Arbeiten auf nationaler Ebene wurden durch die Experten des NABau-Spiegelausschusses NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung (Sp CEN/TC 250/SC 3)“ begleitet.

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 16. April 2005 angenommen.

Die Norm ist Bestandteil einer Reihe von Einwirkungs- und Bemessungsnormen, deren Anwendung nur im Paket sinnvoll ist. Dieser Tatsache wird durch das Leitpapier L der Kommission der Europäischen Gemeinschaft für die Anwendung der Eurocodes Rechnung getragen, indem Übergangsfristen für die verbindliche Umsetzung der Eurocodes in den Mitgliedstaaten vorgesehen sind. Die Übergangsfristen sind im Vorwort dieser Norm angegeben.

Die Anwendung dieser Norm gilt in Deutschland in Verbindung mit dem Nationalen Anhang.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN [und/oder die DKE] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Der Beginn und das Ende des hinzugefügten oder geänderten Textes wird im Text durch die Textmarkierungen AC AC angezeigt.

Änderungen

Gegenüber DIN V ENV 1993-1-1:1993-04, DIN V ENV 1993-1-1/A1:2002-05 und DIN V ENV 1993-1-1/A2:2002-05 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Vornorm-Charakter wurde aufgehoben;
- b) in Teil 1-1, Teil 1-8, Teil 1-9 und Teil 1-10 aufgeteilt;
- c) die Stellungnahmen der nationalen Normungsinstitute wurden eingearbeitet und der Text vollständig überarbeitet und in einen eigenständigen Normteil überführt.

Gegenüber DIN EN 1993-1-9:2005-07, DIN EN 1993-1-9 Berichtigung 1:2009-12 und DIN 18800-1:2008-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) auf europäisches Bemessungskonzept umgestellt;
- b) Ersatzvermerke korrigiert;
- c) Vorgänger-Norm mit der Berichtigung 1 konsolidiert;
- d) redaktionelle Änderungen durchgeführt.

Frühere Ausgaben

DIN 1050: 1934-08, 1937xxxx-07, 1946-10, 1957x-12, 1968-06

DIN 1073: 1928-04, 1931-09, 1941-01, 1974-07

DIN 1073 Beiblatt: 1974-07

DIN 1079: 1938-01, 1938-11, 1970-09

DIN 4100: 1931-05, 1933-07, 1934xxxx-08, 1956-12, 1968-12

DIN 4101: 1937xxx-07, 1974-07

DIN 18800-1: 1981-03, 1990-11, 2008-11

DIN 18800-1/A1: 1996-02

DIN V ENV 1993-1-1: 1993-04

DIN V ENV 1993-1-1/A1: 2002-05

DIN V ENV 1993-1-1/A2: 2002-05

DIN EN 1993-1-9: 2005-07

DIN EN 1993-1-9 Berichtigung 1: 2009-12

DIN EN 1993-1-9:2010-12

— Leerseite —

EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE

EN 1993-1-9

Mai 2005

+AC

April 2009

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatz für ENV 1993-1-1:1992

Deutsche Fassung

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-9: Ermüdung

Eurocode 3: Design of steel structures —
Part 1-9: Fatigue

Eurocode 3: Calcul des structures en acier —
Partie 1-9: Fatigue

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 23. April 2004 angenommen.

Die Berichtigung tritt am 1. April 2009 in Kraft und wurde in EN 1993-1-9:2005 eingearbeitet.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Hintergrund des Eurocode-Programms	3
Status und Gültigkeitsbereich der Eurocodes	4
Nationale Fassungen der Eurocodes	5
Verbindung zwischen den Eurocodes und den harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte (EN und ETAG)	5
Nationaler Anhang zu EN 1993-1-9	5
1 Allgemeines	6
1.1 Anwendungsbereich	6
1.2 Normative Verweisungen	6
1.3 Begriffe	7
1.3.1 Allgemeines	7
1.3.2 Parameter für die Ermüdungsbelastung	7
1.3.3 Ermüdungsfestigkeit	9
1.4 Formelzeichen	9
2 Grundlegende Anforderungen und Verfahren	10
3 Bemessungskonzepte	11
4 Ermüdungsbeanspruchungen	12
5 Berechnung der Spannungen	13
6 Berechnung der Spannungsschwingbreiten	14
6.1 Allgemeines	14
6.2 Bemessungswert der Spannungsschwingbreite der Nennspannungen	15
6.3 Bemessungswert der Spannungsschwingbreite korrigierter Nennspannungen	15
6.4 Bemessungswert der Spannungsschwingbreite für geschweißte Hohlprofilknoten	15
6.5 Bemessungswert der Spannungsschwingbreite der Strukturspannungen (Kerbspannungen)	16
7 Ermüdungsfestigkeit	17
7.1 Allgemeines	17
7.2 Modifizierung der Ermüdungsfestigkeit	20
7.2.1 Nicht geschweißte oder spannungsarm geglühte geschweißte Konstruktionen unter Druckbeanspruchung	20
7.2.2 Größenabhängigkeit	21
8 Ermüdungsnachweis	21
Anhang A (normativ) Bestimmung von ermüdungsrelevanten Lastkenngrößen und Nachweisformate	36
A.1 Bestimmung von Belastungszyklen	36
A.2 Spannungszeitverlauf am Kerbdetail	36
A.3 Zählverfahren	36
A.4 Spektrum der Spannungsschwingbreiten	36
A.5 Anzahl der Spannungsschwingspiele bis zum Versagen	37
A.6 Nachweisformate	37
Anhang B (normativ) Ermüdungsfestigkeit bei Verwendung von Strukturspannungen (Kerbspannungen)	39

Vorwort

Dieses Dokument (EN 1993-1-9:2005 + AC:2009) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird. CEN/TC 250 ist verantwortlich für alle Eurocode-Teile.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis November 2005, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis März 2010 zurückgezogen werden.

Dieses Dokument ersetzt ENV 1993-1-1.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Hintergrund des Eurocode-Programms

1975 beschloss die Kommission der Europäischen Gemeinschaften, für das Bauwesen ein Programm auf der Grundlage des Artikels 95 der Römischen Verträge durchzuführen. Das Ziel des Programms war die Beseitigung technischer Handelshemmnisse und die Harmonisierung technischer Normen.

Im Rahmen dieses Programms leitete die Kommission die Bearbeitung von harmonisierten technischen Regelwerken für die Tragwerksplanung von Bauwerken ein, die im ersten Schritt als Alternative zu den in den Mitgliedsländern geltenden Regeln dienen und sie schließlich ersetzen sollten.

15 Jahre lang leitete die Kommission mit Hilfe eines Steuerkomitees mit Repräsentanten der Mitgliedsländer die Entwicklung des Eurocode-Programms, das zu der ersten Eurocode-Generation in den 80'er Jahren führte.

Im Jahre 1989 entschieden sich die Kommission und die Mitgliedsländer der Europäischen Union und der EFTA, die Entwicklung und Veröffentlichung der Eurocodes über eine Reihe von Mandaten an CEN zu übertragen, damit diese den Status von Europäischen Normen (EN) erhielten. Grundlage war eine Vereinbarung¹⁾ zwischen der Kommission und CEN. Dieser Schritt verknüpft die Eurocodes de facto mit den Regelungen der Ratsrichtlinien und Kommissionsentscheidungen, die die Europäischen Normen behandeln (z. B. die Ratsrichtlinie 89/106/EWG zu Bauprodukten, die Bauproduktenrichtlinie, die Ratsrichtlinien 93/37/EWG, 92/50/EWG und 89/440/EWG zur Vergabe öffentlicher Aufträge und Dienstleistungen und die entsprechenden EFTA-Richtlinien, die zur Einrichtung des Binnenmarktes eingeleitet wurden).

Das Eurocode-Programm umfasst die folgenden Normen, die in der Regel aus mehreren Teilen bestehen:

EN 1990, *Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung*;

EN 1991, *Eurocode 1: Einwirkung auf Tragwerke*;

EN 1992, *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbetonbauten*;

EN 1993, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten*;

EN 1994, *Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Stahl-Beton-Verbundbauten*;

1) Vereinbarung zwischen der Kommission der Europäischen Gemeinschaft und dem Europäischen Komitee für Normung (CEN) zur Bearbeitung der Eurocodes für die Tragwerksplanung von Hochbauten und Ingenieurbauwerken (BC/CEN/03/89).

DIN EN 1993-1-9:2010-12 **EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)**

EN 1995, *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten*;

EN 1996, *Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten*;

EN 1997, *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik*;

EN 1998, *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben*;

EN 1999, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumkonstruktionen*.

Die Europäischen Normen berücksichtigen die Verantwortlichkeit der Bauaufsichtsorgane in den Mitgliedsländern und haben deren Recht zur nationalen Festlegung sicherheitsbezogener Werte berücksichtigt, so dass diese Werte von Land zu Land unterschiedlich bleiben können.

Status und Gültigkeitsbereich der Eurocodes

Die Mitgliedsländer der EU und von EFTA betrachten die Eurocodes als Bezugsdokumente für folgende Zwecke:

- als Mittel zum Nachweis der Übereinstimmung der Hoch- und Ingenieurbauten mit den wesentlichen Anforderungen der Richtlinie 89/106/EWG, besonders mit der wesentlichen Anforderung Nr. 1: Mechanischer Festigkeit und Standsicherheit und der wesentlichen Anforderung Nr. 2: Brandschutz;
- als Grundlage für die Spezifizierung von Verträgen für die Ausführung von Bauwerken und dazu erforderlichen Ingenieurleistungen;
- als Rahmenbedingung für die Herstellung harmonisierter, technischer Spezifikationen für Bauprodukte (EN's und ETA's)

Die Eurocodes haben, da sie sich auf Bauwerke beziehen, eine direkte Verbindung zu den Grundlagendokumenten²⁾, auf die in Artikel 12 der Bauproduktenrichtlinie hingewiesen wird, wenn sie auch anderer Art sind als die harmonisierten Produktnormen³⁾. Daher sind die technischen Gesichtspunkte, die sich aus den Eurocodes ergeben, von den Technischen Komitees von CEN und den Arbeitsgruppen von EOTA, die an Produktnormen arbeiten, zu beachten, damit diese Produktnormen mit den Eurocodes vollständig kompatibel sind.

Die Eurocodes liefern Regelungen für den Entwurf, die Berechnung und Bemessung von kompletten Tragwerken und Baukomponenten, die sich für die tägliche Anwendung eignen. Sie gehen auf traditionelle Bauweisen und Aspekte innovativer Anwendungen ein, liefern aber keine vollständigen Regelungen für ungewöhnliche Baulösungen und Entwurfsbedingungen, wofür Spezialistenbeiträge erforderlich sein können.

2) Entsprechend Artikel 3.3 der Bauproduktenrichtlinie sind die wesentlichen Angaben in Grundlagendokumenten zu konkretisieren, um damit die notwendigen Verbindungen zwischen den wesentlichen Anforderungen und den Mandaten für die Erstellung harmonisierter Europäischer Normen und Richtlinien für die Europäische Zulassungen selbst zu schaffen.

3) Nach Artikel 12 der Bauproduktenrichtlinie hat das Grundlagendokument

- a) die wesentliche Anforderung zu konkretisieren, in dem die Begriffe und, soweit erforderlich, die technische Grundlage für Klassen und Anforderungshöhen vereinheitlicht werden,
- b) die Methode zur Verbindung dieser Klasse oder Anforderungshöhen mit technischen Spezifikationen anzugeben, z. B. rechnerische oder Testverfahren, Entwurfsregeln,
- c) als Bezugsdokument für die Erstellung harmonisierter Normen oder Richtlinien für Europäische Technische Zulassungen zu dienen.

Die Eurocodes spielen de facto eine ähnliche Rolle für die wesentliche Anforderung Nr. 1 und einen Teil der wesentlichen Anforderung Nr. 2.

Nationale Fassungen der Eurocodes

Die Nationale Fassung eines Eurocodes enthält den vollständigen Text des Eurocodes (einschließlich aller Anhänge), so wie von CEN veröffentlicht, mit möglicherweise einer nationalen Titelseite und einem nationalen Vorwort sowie einem Nationalen Anhang.

Der Nationale Anhang darf nur Hinweise zu den Parametern geben, die im Eurocode für nationale Entscheidungen offen gelassen wurden. Diese national festzulegenden Parameter (NDP) gelten für die Tragwerksplanung von Hochbauten und Ingenieurbauten in dem Land, in dem sie erstellt werden. Sie umfassen:

- Zahlenwerte für γ -Faktoren und/oder Klassen, wo die Eurocodes Alternativen eröffnen;
- Zahlenwerte, wo die Eurocodes nur Symbole angeben;
- landesspezifische, geographische und klimatische Daten, die nur für ein Mitgliedsland gelten, z. B. Schneekarten;
- Vorgehensweise, wenn die Eurocodes mehrere zur Wahl anbieten;

Des weiteren dürfen enthalten sein:

- Entscheidungen über die Anwendung der informativen Anhänge, und
- Verweise zu ergänzenden, nicht widersprechenden Informationen, die dem Nutzer bei der Anwendung der Eurocodes helfen.

Verbindung zwischen den Eurocodes und den harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte (EN und ETAZ)

Die harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte und die technischen Regelungen für die Tragwerksplanung⁴⁾ müssen konsistent sein. Insbesondere sollten die Hinweise, die mit den CE-Zeichen an den Bauprodukten verbunden sind und die die Eurocodes in Bezug nehmen, klar erkennen lassen, welche national festzulegenden Parameter (NDP) zugrunde liegen.

Nationaler Anhang zu EN 1993-1-9

Diese Norm enthält alternative Methoden, Zahlenangaben und Empfehlungen in Verbindung mit Anmerkungen, die darauf hinweisen, wo Nationale Festlegungen getroffen werden können. EN 1993-1-9 wird bei der nationalen Einführung einen Nationalen Anhang enthalten, der alle national festzulegenden Parameter enthält, die für die Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten im jeweiligen Land erforderlich sind

Eine nationale Wahl darf für folgende Abschnitte erfolgen:

- 1.1(2);
- 2(2);
- 2(4);
- 3(2);
- 3(7);
- 5(2);
- 6.1(1);
- 6.2(2);
- 7.1(3);
- 7.1(5);
- 8(4).

4) Siehe Artikel 3.3 und Art. 12 der Bauproduktenrichtlinie, ebenso wie 4.2, 4.3.1, 4.3.2 und 5.2 des Grundlagendokumentes Nr. 1

DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

1 Allgemeines

1.1 Anwendungsbereich

(1) EN 1993-1-9 enthält Nachweisverfahren zur Prüfung der Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen, Verbindungen und Anschlüssen, die unter Ermüdungsbeanspruchung stehen.

(2) Die Nachweisverfahren basieren auf Ergebnissen von Ermüdungsversuchen mit bauteilähnlichen Prüfkörpern mit geometrischen und strukturellen Imperfektionen, die von der Stahlproduktion und Bauteilherstellung herrühren (z. B. Herstellungstoleranzen und Eigenspannungen infolge Schweißens).

ANMERKUNG 1 Zu Toleranzen siehe EN 1090. Solange EN 1090 noch nicht veröffentlicht ist, darf die Wahl der Ausführungsnorm im Nationalen Anhang geregelt werden.

ANMERKUNG 2 Informationen zu Anforderungen an die Herstellungsüberwachung dürfen im Nationalen Anhang gegeben werden.

(3) Die Regelungen gelten für Bauteile, die nach EN 1090 ausgeführt werden.

ANMERKUNG Gegebenenfalls sind zusätzliche Anforderungen in den Kerbschlagtabellen angegeben.

(4) Die in EN 1993-1-9 angegebenen Nachweisverfahren gelten in gleicher Weise für Baustähle, nicht-rostende Stähle und ungeschützte wetterfeste Stähle, soweit in den Kerbfalltabellen keine anderen Angaben gemacht werden. EN 1993-1-9 gilt nur für Werkstoffe, die den Zähigkeitsanforderungen nach EN 1993-1-10 genügen.

(5) Diese Norm enthält das Nachweisverfahren mit Ermüdungsfestigkeitskurven (Wöhlerlinien). Andere Verfahren oder Konzepte wie das Kerbgrundkonzept oder das bruchmechanische Konzept werden in EN 1993-1-9 nicht behandelt.

(6) Andere Nachbehandlungsmethoden als Spannungsarmglühen zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit werden in dieser Norm nicht behandelt.

(7) Die in dieser Norm angegebenen Ermüdungsfestigkeiten gelten für Konstruktionen unter normalen atmosphärischen Bedingungen und ausreichendem Korrosionsschutz. Korrosionserscheinungen infolge Seewasser werden nicht behandelt; Zeitschäden aus hohen Temperaturen (>150 °C) werden ebenfalls nicht behandelt.

1.2 Normative Verweisungen

(1) Diese Europäische Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend angeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Europäischen Norm, falls sie durch Änderungen oder Überarbeitungen eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation (einschließlich Änderungen).

EN 1090, *Anforderungen für die Ausführung von Stahlbauten*

EN 1990, *Grundlagen der Tragwerksplanung*

EN 1991, *Einwirkungen auf Tragwerke*

EN 1993, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten*

EN 1994-2, *Bemessung und Konstruktion von Stahl-Beton-Verbundbauten — Teil 2: Brücken*

1.3 Begriffe

(1) Für die Anwendung dieser Europäischen Norm gelten die folgenden Begriffe.

1.3.1 Allgemeines

1.3.1.1

Ermüdung

Prozess der Rissbildung und des Rissfortschritts in einem Bauteil, hervorgerufen durch wiederholte Spannungsschwankungen

1.3.1.2

Nennspannung

Spannung im Grundwerkstoff oder einer Schweißnaht unmittelbar an der erwarteten Rissstelle, berechnet nach der elastischen Spannungstheorie ohne Berücksichtigung der örtlichen Kerbwirkung

ANMERKUNG Mit Spannungen sind Längsspannungen oder Schubspannungen, Hauptspannungen oder Vergleichspannungen gemeint.

1.3.1.3

korrigierte Nennspannung

Nennspannung, vergrößert um den geometrischen Kerbfaktor k_f , der die geometrischen Abweichungen erfasst, die nicht im Kerbfall des Konstruktionsdetails berücksichtigt sind

1.3.1.4

Strukturspannung

Kerbspannung

maximale Hauptspannung im Grundwerkstoff unmittelbar an der potenziellen Rissstelle am Schweißnahtübergang einschließlich der lokalen Spannungsspitze aufgrund der geometrischen Ausbildung des Bauteils

ANMERKUNG Die Kerbwirkung infolge Nahtausbildung braucht nicht berücksichtigt zu werden, da diese in der Ermüdungsfestigkeitskurve enthalten ist, siehe Anhang B.

1.3.1.5

Eigenspannung

Die Eigenspannung ist eine ständige im Gleichgewicht befindliche Spannungsverteilung im Bauteil ohne äußere Lasteinwirkung. Eigenspannungen können vom Walzprozess, Schneiden, Schweißschrumpf oder von Zwängungen aus dem Zusammenbau herrühren. Sie entstehen auch bei Überschreitung der Streckgrenze infolge äußerer Belastung.

1.3.2 Parameter für die Ermüdungsbelastung

1.3.2.1

Belastungszyklus

ein bestimmter Ablauf der Belastung auf ein Tragwerk, der zu einem Spannungs-Zeit-Verlauf führt, mit einer in der Regel definierten Anzahl von Wiederholungen während der Nutzungsdauer des Tragwerks

1.3.2.2

Spannungs-Zeit-Verlauf

gemessene oder berechnete Zeitfolge der Spannungen an einem bestimmten Tragwerkspunkt für einen Belastungszyklus

1.3.2.3

Rainflow-Methode

Zählverfahren zur Bestimmung des Spektrums der Spannungsschwingbreiten aus einem Spannungs-Zeit-Verlauf

DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

1.3.2.4

Reservoir-Methode

Zählverfahren zur Bestimmung des Spektrums der Spannungsschwingbreiten aus einem Spannungs-Zeit-Verlauf

ANMERKUNG Zur mathematischen Vorgehensweise siehe Anhang A.

1.3.2.5

Spannungsschwingbreite

algebraische Differenz zwischen zwei Extremwerten einer Spannungsänderung in einem Spannungs-Zeit-Verlauf

1.3.2.6

Spektrum der Spannungsschwingbreiten

Darstellung der Auftretenshäufigkeit der Spannungsschwingbreiten verschiedener Größe aus Messungen oder Berechnungen für einen bestimmten Belastungszyklus

1.3.2.7

Bemessungsspektrum

Gesamtheit aller Spektren der Spannungsschwingbreiten während der Nutzungsdauer, die für den Ermüdungsnachweis zugrunde gelegt werden

1.3.2.8

Nutzungsdauer

Bezugszeitraum, für den mit ausreichender Zuverlässigkeit planmäßiges Verhalten des Tragwerks ohne Versagen durch Ermüdungsrisse verlangt wird

1.3.2.9

Lebensdauer (Zeitgröße)

voraussichtlicher Zeitraum mit der Gesamtzahl von Spannungsschwingspielen, die zu Ermüdungsversagen führen können

1.3.2.10

Miner-Regel

lineare Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner

1.3.2.11

schadensäquivalente konstante Spannungsschwingbreite

konstante Spannungsschwingbreite, die nach der Miner-Regel zu derselben Lebensdauer führen würde wie das Spektrum nicht konstanter Spannungsschwingbreiten

ANMERKUNG Zur mathematischen Bestimmung der schadensäquivalenten konstanten Spannungsschwingbreite siehe Anhang A.

1.3.2.12

Ermüdungsbelastung

eine Reihe von Einwirkungsparametern, die mit typischen Belastungszyklen bestimmt wurden und die Anordnung und Größe der Lasten, ihre relative Auftretenshäufigkeit und ihre Zeitfolge beschreiben

ANMERKUNG 1 Bei den Ermüdungseinwirkungen in EN 1991 handelt es sich um obere Grenzwerte, die anhand von Messauswertungen nach Anhang A bestimmt wurden.

ANMERKUNG 2 Die Einwirkungsparameter in EN 1991 sind entweder:

- Q_{\max}, n_{\max} , standardisiertes Spektrum oder
- $Q_{E, n_{\max}}$ bezogen auf n_{\max} oder
- $Q_{E, 2}$ bezogen auf $n = 2 \cdot 10^6$ Lastwechsel.

Dynamische Effekte sind, soweit nicht anders geregelt, in diesen Parametern enthalten.

1.3.2.13**schadensäquivalente konstante Ermüdungsbelastung**

vereinfachte konstante Ermüdungsbelastung, die nach der Miner-Regel zu der gleichen Lebensdauer führt wie die wirklichen Belastungszyklen mit veränderlicher Belastung

1.3.3 Ermüdungsfestigkeit**1.3.3.1****Ermüdungsfestigkeitskurve****Wöhlerlinie**

quantitative Beziehung zwischen den Spannungsschwingbreiten und der Anzahl der Spannungsspiele, die zum Ermüdungsversagen führen; sie wird für den Ermüdungsnachweis für einen bestimmten Kerbfall angewendet

ANMERKUNG Die Ermüdungsfestigkeiten in diesem Normenteil sind untere Grenzwerte, die anhand von Auswertungen von Ermüdungsversuchen mit bauteilähnlichen Prüfkörpern nach EN 1990, Anhang D bestimmt wurden.

1.3.3.2**Kerbfall**

Zahlenwert, der einem bestimmten Konstruktionsdetail für eine bestimmte Beanspruchung zugeordnet ist, um die Ermüdungsfestigkeitskurve für den Ermüdungsnachweis festzulegen (die Kerbfallzahl bezeichnet den Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ in N/mm^2)

1.3.3.3**Dauerfestigkeit**

Grenze für die Schwingbreite der Längsspannung oder Schubspannung, unterhalb derer im Versuch mit konstanten Schwingbreiten kein Ermüdungsschaden auftritt. Bei variablen Spannungsschwingbreiten müssen alle Schwingbreiten unterhalb dieser Grenze liegen, damit kein Ermüdungsschaden auftritt.

1.3.3.4**Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit**

Grenze, unterhalb derer Spannungsschwingbreiten von Bemessungsspektren nicht mehr zur Akkumulation des Ermüdungsschadens beitragen

1.3.3.5**Lebensdauer (Anzahl der Spannungsschwingspiele)**

in Spannungsschwingspielen ausgedrückte Zeit bis zum Versagen bei Einwirkung konstanter Spannungsschwingbreiten

1.3.3.6**Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit**

konstante Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_C$ oder $\Delta\tau_C$ für einen bestimmten Kerbfall, die zu der Lebensdauer $N = 2 \times 10^6$ Schwingspiele gehört

1.4 Formelzeichen

$\Delta\sigma$ Spannungsschwingbreite (Längsspannungen);

$\Delta\tau$ Spannungsschwingbreite (Schubspannungen);

$\Delta\sigma_E, \Delta\tau_E$ schadensäquivalente konstante Spannungsschwingbreite bezogen auf n_{max} ;

$\Delta\sigma_{E,2}, \Delta\tau_{E,2}$ schadensäquivalente konstante Spannungsschwingbreite bezogen auf 2×10^6 Schwingspiele;

$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$ Bezugswert für die Ermüdungsfestigkeit bei $N_C = 2 \times 10^6$ Schwingspielen;

$\Delta\sigma_D, \Delta\tau_D$ Dauerfestigkeit bei N_D Schwingspielen;

DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

$\Delta\sigma_L, \Delta\tau_L$	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit bei N_L Schwingspielen;
$\Delta\sigma_{eq}$	äquivalentes Spannungsschwingpiel bei Steganschlussdetails von orthotropen Platten;
$\Delta\sigma_{C,red}$	reduzierter Bezugswert für die Ermüdungsfestigkeit;
γ_{Ff}	γ -Faktor für die schadensäquivalenten Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_E, \Delta\tau_E$;
γ_{Mf}	γ -Faktor für die Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$;
m	Neigung der Ermüdungsfestigkeitskurve;
λ_i	Schadensäquivalenzfaktor;
ψ_1	Faktor für den häufig auftretenden Wert einer variablen Last;
Q_k	charakteristischer Wert einer einzeln auftretenden variablen Last;
k_s	Abminderungsfaktor für den Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit zur Berücksichtigung der Größenabhängigkeit;
k_1	Erhöhungsfaktor für die Nennspannungsschwingbreite zur Berücksichtigung sekundärer Anschlussmomente in Fachwerken;
k_f	Kerbfaktor (Spannungskonzentrationsfaktor);
N_R	Lebensdauer, ausgedrückt als Anzahl von Spannungsschwingspielen mit konstanter Spannungsschwingbreite.

2 Grundlegende Anforderungen und Verfahren

(1) **AC** P **AC** Tragende Bauteile sind im Hinblick auf den Grenzzustand der Ermüdung so auszubilden, dass ihr Verhalten mit ausreichender Wahrscheinlichkeit während der gesamten Nutzungsdauer zufrieden stellend ist.

ANMERKUNG Für Tragwerke, die mit Ermüdungslasten nach EN 1991 und Ermüdungsfestigkeiten nach diesem Teil bemessen werden, darf diese Anforderung als erfüllt gelten.

(2) Anhang A darf für die Bestimmung von Ermüdungslasten im Einzelfall verwendet werden, wenn

- in EN 1991 keine Ermüdungsbelastung angegeben wird oder
- ein realistischeres Ermüdungslastmodell gefordert wird.

ANMERKUNG Anforderungen für die Bestimmung von Ermüdungslastmodellen dürfen im Nationalen Anhang gegeben werden.

(3) Ermüdungsversuche können durchgeführt werden

- um Ermüdungsfestigkeiten für Details zu bestimmen, die nicht in diesem Teil enthalten sind;
- um die Lebensdauer von Prototypen unter wirklichen oder schadensäquivalenten Ermüdungsbelastungen zu bestimmen.

(4) Bei der Durchführung und Auswertung von Ermüdungsversuchen ist in der Regel EN 1990 heranzuziehen, siehe auch 7.1.

ANMERKUNG Zu Anforderungen für die Bestimmung von Ermüdungslasten im Einzelfall siehe Nationaler Anhang.

(5) Der Ermüdungsnachweis in diesem Normenteil folgt dem üblichen Nachweiskonzept, bei dem Beanspruchungen und Beanspruchbarkeiten verglichen werden. Ein solcher Vergleich ist nur möglich, wenn die Ermüdungsbeanspruchungen mit Parametern der Ermüdungsfestigkeit nach diesem Normteil bestimmt werden.

(6) Die Ermüdungslasten werden entsprechend den Anforderungen des Ermüdungsnachweises bestimmt. Sie unterscheiden sich von denen für Tragfähigkeit- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise.

ANMERKUNG Treten Risse während der Betriebszeit auf, so bedeutet dies nicht notwendigerweise das Ende der Nutzungsdauer. Werden Risse repariert, ist hierbei besondere Sorgfalt erforderlich, um ungünstigere Kerbbedingungen als bereits vorhanden zu vermeiden.

3 Bemessungskonzepte

(1) Der Ermüdungsnachweis ist in der Regel nach einem der folgenden Konzepte durchzuführen:

- Konzept der Schadenstoleranz;
- Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung.

(2) Durch planmäßige Inspektionen und Wartung während der Nutzungsdauer des Tragwerks können eventuelle Ermüdungsschäden erkannt und beseitigt werden. Das Konzept der Schadenstoleranz sollte hier zu der geforderten Zuverlässigkeit für zufrieden stellendes Verhalten während der Nutzungsdauer führen.

ANMERKUNG 1 Das Konzept der Schadenstoleranz darf angewendet werden, wenn bei Auftreten von Ermüdungsrissen Lastumlagerungen im tragenden Querschnitt oder zwischen Bauteilen möglich sind.

ANMERKUNG 2 Die Bestimmungen für ein Inspektionsprogramm sind im Nationalen Anhang geregelt.

ANMERKUNG 3 Tragwerke, die nach diesem Normenteil konstruiert und bemessen und für die Werkstoffe nach EN 1993-1-10 gewählt werden sowie regelmäßige Überwachung vorgesehen ist, können als schadenstolerant angesehen werden.

(3) Das Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung gewährt in der Regel die geforderte Zuverlässigkeit für zufrieden stellendes Verhalten während der Nutzungsdauer, ohne dass planmäßige Inspektionen zum rechtzeitigen Erkennen von Ermüdungsschäden notwendig sind. Dieses Konzept ist in der Regel dann anzuwenden, wenn die lokale Ausbildung von Rissen in einer Bauteilkomponente zu unangekündigtem Versagen des Bauteils oder des gesamten Tragwerks führen kann.

(4) Bei Ermüdungsnachweisen nach diesem Normenteil kann die geforderte Zuverlässigkeit durch Festlegung des γ_{Mf} -Faktors für die Ermüdungsfestigkeit in Abhängigkeit von dem gewählten Bemessungskonzept und den Schadensfolgen erreicht werden.

(5) Die Ermüdungsfestigkeitswerte werden durch das konstruktive Detail mit seinen metallurgischen und geometrischen Kerbeffekten bestimmt. In den konstruktiven Details dieses Normenteils ist die wahrscheinliche Stelle der Rissbildung angegeben.

(6) Das angegebene Nachweisverfahren benutzt Ermüdungsfestigkeitswerte in Form von Wöhlerlinien für:

- Standardkerbfälle (Nennspannungen);
- Kerbfälle bei bestimmten Schweißdetails (Strukturspannungen).

DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

(7) Die geforderte Zuverlässigkeit kann wie folgt erreicht werden:

a) Konzept der Schadenstoleranz:

- Wahl des konstruktiven Details, des Werkstoffs und des Beanspruchungsniveaus, so dass im unwahrscheinlichen Fall von Rissen ein langsames Risswachstum und große kritische Risslängen erreicht werden könnten;
- Konstruktionen mit Umlagerungsvermögen;
- Konstruktionen, die in der Lage sind, Rissentwicklungen zu hemmen;
- leichte Zugänglichkeit für regelmäßige Inspektionen.

b) Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung:

- Wahl der Konstruktion und des Beanspruchungsniveaus, so dass am Ende der rechnerischen Nutzungsdauer $\langle AC \rangle$ Zuverlässigkeitswerte (β -Werte) mindestens so hoch wie bei Tragsicherheitsnachweisen gefordert $\langle AC \rangle$ erreicht werden können.

ANMERKUNG Die Wahl des Bemessungskonzeptes, die Definitionen der Schadensfolgeklassen sowie die Zahlenwerte für γ_{Mf} dürfen im Nationalen Anhang geregelt werden. Empfohlene γ_{Mf} -Werte sind in Tabelle 3.1 angegeben.

Tabelle 3.1 — Empfehlungen für γ_{Mf} -Faktoren für die Ermüdungsfestigkeit

Bemessungskonzept	Schadensfolgen	
	niedrig	hoch
Schadenstoleranz	1,00	1,15
Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung	1,15	1,35

4 Ermüdungsbeanspruchungen

(1) Die Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Nennspannungen beruhen auf elastischem Verhalten von Bauteilen und Verbindungen; sie müssen in der Regel alle Lastwirkungen (auch Wirkungen aus Verformungen unter der Last) realistisch wiedergeben.

(2) Bei Fachwerkträgern mit geschweißten Hohlprofilknoten darf von der Annahme gelenkiger Verbindungen an den Anschlüssen ausgegangen werden. Wenn die Spannungen infolge äußerer Lasten auf Bauteile zwischen den Knoten berücksichtigt werden, dürfen die Wirkungen von sekundären Anschlussmomenten aus der Steifigkeit der Verbindungen mit k_1 -Faktoren nach 6.4 berücksichtigt werden, $\langle AC \rangle$ siehe Tabelle 4.1 für Kreisquerschnitte, Tabelle 4.2 für Rechteckquerschnitte; bei diesen Querschnitten sind die geometrischen Einschränkungen in Tabelle 8.7 zu beachten. $\langle AC \rangle$

Tabelle 4.1 — k_1 -Faktoren für Hohlprofile mit Kreisquerschnitten bei Belastung in der Fachwerksebene

Knotenausbildung		Gurte	Pfosten	Diagonalen
Anschlüsse mit Spalt	K-Knoten	1,5	$\langle AC \rangle - \langle AC \rangle$	1,3
	N-Knoten/KT-Knoten	1,5	1,8	1,4
Anschlüsse mit Überlappung	K-Knoten	1,5	$\langle AC \rangle - \langle AC \rangle$	1,2
	N-Knoten/KT-Knoten	1,5	1,65	1,25

Tabelle 4.2 — k_1 -Faktoren für Hohlprofile mit Rechteckquerschnitt bei Belastung in der Fachwerksebene

Knotenausbildung		Gurte	Pfosten	Diagonalen
Anschlüsse mit Spalt	K-Knoten	1,5	AC - AC	1,5
	N-Knoten/KT-Knoten	1,5	2,2	1,6
Anschlüsse mit Überlappung	K-Knoten	1,5	AC - AC	1,3
	N-Knoten/KT-Knoten	1,5	2,0	1,4

AC ANMERKUNG 1 AC Zur Begriffserklärung der Knotenausbildungen siehe EN 1993-1-8.

AC ANMERKUNG 2 Gültigkeitsgrenzen für die Geometrie:

Bei ebenen Knoten mit Kreisquerschnitten (K-, N-, KT-Knoten):

$$0,30 \leq \beta \leq 0,60$$

$$12,0 \leq \gamma \leq 30,0$$

$$0,25 \leq \tau \leq 1,00$$

$$30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$$

Bei Knoten mit Rechteckquerschnitten (K-, N-, KT-Knoten):

$$0,40 \leq \beta \leq 0,60$$

$$6,25 \leq \gamma \leq 12,5$$

$$0,25 \leq \tau \leq 1,00$$

$$30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$$

AC

5 Berechnung der Spannungen

- (1) Spannungen sind in der Regel auf Gebrauchsniveau zu bestimmen.
- (2) Querschnitte der Querschnittsklasse 4 sind für Ermüdungslasten nach EN 1993-1-5 nachzuweisen.

ANMERKUNG 1 Hinweise sind EN 1993-2 bis EN 1993-6 zu entnehmen.

ANMERKUNG 2 Der Nationale Anhang darf Gültigkeitsgrenzen für Klasse-4-Querschnitte angeben.

(3) Nennspannungen sind in der Regel an der Stelle der potenziellen Rissentstehung zu bestimmen. Abweichungen von den Konstruktionsdetails in den Tabellen 8.1 bis 8.10, die zusätzliche Spannungskonzentrationen erzeugen, werden durch (mit Spannungskonzentrationsfaktoren k_f) korrigierten Nennspannungen nach 6.3 berücksichtigt.

(4) Bei Verwendung von Strukturspannungen (Kerbspannungen) für die Details in Tabelle B.1 sind die Spannungen nach 6.5 zu ermitteln.

(5) Die maßgebenden Spannungen im Grundwerkstoff sind:

- die Längsspannungen σ ;
- die Schubspannungen τ .

ANMERKUNG Bei gleichzeitiger Wirkung von Längs- und Schubspannungen AC siehe 8(3). AC

DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

(6) Die maßgebenden Spannungen in den Schweißnähten sind, siehe Bild 5.1:

- die Längsspannungen σ_{wf} quer zur Nahtachse: $\sigma_{wf} = \sqrt{\sigma_{\perp f}^2 + \tau_{\perp f}^2}$;
- die Schubspannungen τ_{wf} längs der Nahtachse: $\tau_{wf} = \tau_{\parallel f}$;

für die in der Regel zwei getrennte Nachweise zu führen sind.

ANMERKUNG Diese Vorgehensweise unterscheidet sich von den Tragsicherheitsnachweisen von Kehlnähten nach EN 1993-1-8.

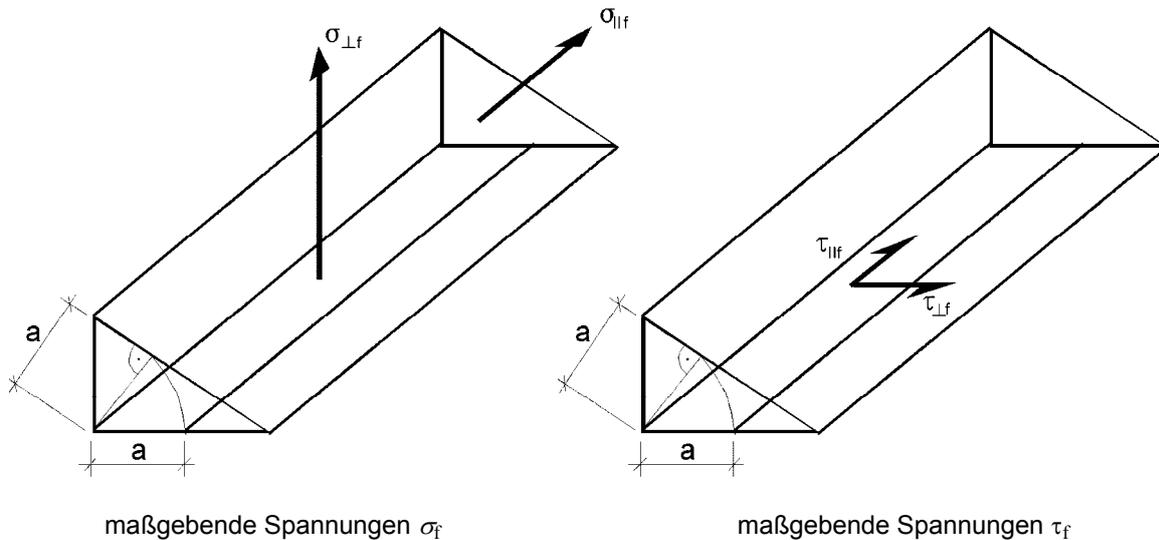


Bild 5.1 — Maßgebende Spannungen in Kehlnähten

6 Berechnung der Spannungsschwingbreiten

6.1 Allgemeines

(1) Der Ermüdungsnachweis ist in der Regel auf der Basis der Spannungsschwingbreiten zu führen mit:

- Nennspannungen für die Kerbfälle nach Tabelle 8.1 bis Tabelle 8.10;
- korrigierten Nennspannungen, z. B. bei abrupten Querschnittsänderungen in der Nähe der Rissentstehung, die nicht in den Tabellen 8.1 bis Tabelle 8.10 enthalten sind;
- Strukturspannungen (Kerbspannungen), wo große Spannungsgradienten am Schweißnahtübergang entsprechend Tabelle B.1 auftreten.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang darf weitere Informationen zu Nennspannungen, korrigierten Nennspannungen und Strukturspannungen (Kerbspannungen) geben. Kerbfälle für Strukturspannungen (Kerbspannungen) sind im Anhang B angegeben.

(2) Der für den Ermüdungsnachweis maßgebende Bemessungswert der Spannungsschwingbreite wird in der Regel durch die Spannungsschwingbreite $\gamma_{ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}$ bezogen auf $N_C = 2 \times 10^6$ Schwingspiele ausgedrückt.

6.2 Bemessungswert der Spannungsschwingbreite der Nennspannungen

(1) Der Bemessungswert der Spannungsschwingbreite für Nennspannungen $\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}$ und $\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E,2}$ ist in der Regel wie folgt zu bestimmen:

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \cdot \dots \cdot \lambda_n \cdot \Delta \sigma(\gamma_{Ff} Q_k) \quad (6.1)$$

$$\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E,2} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \cdot \dots \cdot \lambda_n \cdot \Delta \tau(\gamma_{Ff} Q_k)$$

Dabei ist

$\Delta \sigma(\gamma_{Ff} Q_k), \Delta \tau(\gamma_{Ff} Q_k)$ die Spannungsschwingbreite aus den Ermüdungsbelastungen nach EN 1991;

λ_i die Schadensäquivalenzfaktoren abhängig von den Bemessungsspektren der Anwendungsteile von EN 1993 sind.

(2) Wenn keine λ_i -Werte zur Verfügung stehen, dürfen die Bemessungswerte der Nennspannungen nach Anhang A bestimmt werden.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang darf Informationen in Ergänzung zum Anhang A geben.

6.3 Bemessungswert der Spannungsschwingbreite korrigierter Nennspannungen

(1) Der Bemessungswert der Spannungsschwingbreite der korrigierten Nennspannungen $\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}$ und $\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E,2}$ ist in der Regel wie folgt zu bestimmen:

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2} = k_f \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \cdot \dots \cdot \lambda_n \cdot \Delta \sigma(\gamma_{Ff} Q_k) \quad (6.2)$$

$$\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E,2} = k_f \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \cdot \dots \cdot \lambda_n \cdot \Delta \tau(\gamma_{Ff} Q_k)$$

Dabei ist

k_f der Spannungskonzentrationsfaktor zur Berücksichtigung der lokalen Spannungserhöhung in Bezug auf die Kerbfallsituation der Bezugs-Wöhlerlinie ist.

ANMERKUNG k_f -Werte können der Literatur entnommen oder durch geeignete Finite Element Berechnungen ermittelt werden.

6.4 Bemessungswert der Spannungsschwingbreite für geschweißte Hohlprofilknoten

(1) Wenn kein genauere Nachweis geführt wird, sollte der Bemessungswert der Spannungsschwingbreite für die korrigierten Nennspannungen $\gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma_{E,2}$ mit dem vereinfachten Verfahren in 4(2) bestimmt werden

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2} = k_1 (\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}^*) \quad (6.3)$$

Dabei ist

$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}^*$ der Bemessungswert der Spannungsschwingbreite, gerechnet mit dem vereinfachten Fachwerksmodell mit gelenkigen Anschlüssen;

k_1 der Vergrößerungsfaktor nach Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2.

DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

**6.5 Bemessungswert der Spannungsschwingbreite der Strukturspannungen
(Kerbspannungen)**

(1) Der Bemessungswert der Spannungsschwingbreite von Strukturspannungen $\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}$ wird in der Regel ermittelt mit

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2} = k_f (\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}^*) \quad (6.4)$$

Dabei ist

k_f der Spannungskonzentrationsfaktor.

7 Ermüdungsfestigkeit

7.1 Allgemeines

(1) Für Nennspannungen werden die Ermüdungsfestigkeiten durch eine Reihe von $(\log \Delta\sigma_R) - (\log N)$ -Kurven und $(\log \Delta\tau_R) - (\log N)$ -Kurven bestimmt, wobei jede Kurve einer bestimmten Kerbfallkategorie zugeordnet wird. Jeder Kerbfall ist durch die Kerbfallkategorie gekennzeichnet, die den Bezugswert $\Delta\sigma_C$ oder $\Delta\tau_C$ in N/mm² der Ermüdungsfestigkeitskurve bei 2 Millionen Spannungsspielen darstellt.

(2) Die Ermüdungsfestigkeitskurven für konstante Spannungsschwingbreiten sind definiert durch:

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m 2 \times 10^6 \quad \text{mit } m = 3 \text{ für } N \leq 5 \times 10^6, \text{ siehe Bild 7.1}$$

$$\Delta\tau_R^m N_R = \Delta\tau_C^m 2 \times 10^6 \quad \text{mit } m = 5 \text{ für } N \leq 10^8, \text{ siehe Bild 7.2}$$

Dabei ist

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \cdot \Delta\sigma_C = 0,737 \Delta\sigma_C \quad \text{die Dauerfestigkeit, siehe Bild 7.1;}$$

$$\Delta\tau_L = \left(\frac{2}{100}\right)^{1/5} \cdot \Delta\tau_C = 0,457 \Delta\tau_C \quad \text{der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit, siehe Bild 7.2.}$$

(3) Bei Spannungsspektren mit Längsspannungsschwingbreiten oberhalb und unterhalb der Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ ist in der Regel der Ermüdungsschaden mit den erweiterten Ermüdungsfestigkeitskurven zu ermitteln.

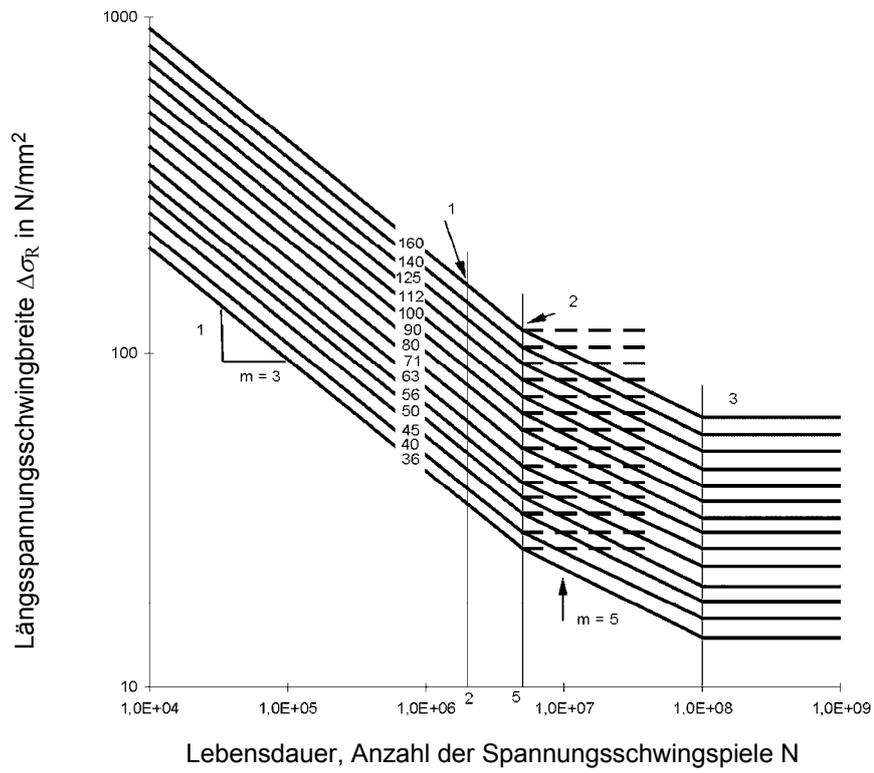
$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m 2 \times 10^6 \quad \text{mit } m = 3 \text{ für } N \leq 5 \times 10^6$$

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_D^m 5 \times 10^6 \quad \text{mit } m = 5 \text{ für } 5 \times 10^6 \leq N \leq 10^8$$

Dabei ist

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \times \Delta\sigma_D = 0,549 \Delta\sigma_D \quad \text{der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit, siehe Bild 7.1.}$$

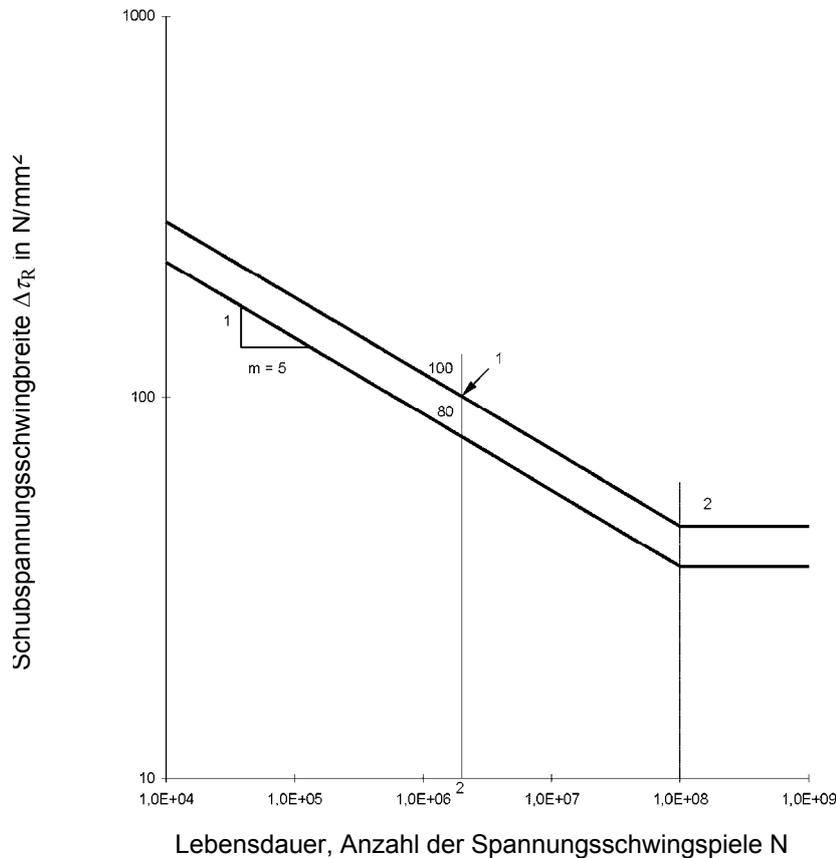
DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)



Legende

- 1 Kerbfall $\Delta\sigma_C$
- 2 Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$
- 3 Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$

Bild 7.1 — Ermüdungsfestigkeitskurve für Längsspannungsschwingbreiten

**Legende**

- 1 Kerbfall $\Delta\tau_C$
2 Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\tau_L$

Bild 7.2 — Ermüdungsfestigkeitskurve für Schubspannungsschwingbreiten

ANMERKUNG 1 Soweit Ergebnisse von Ermüdungsversuchen benutzt wurden, um den Bezugswert $\Delta\sigma_C$ für einen bestimmten Kerbfall zu bestimmen, ist $\Delta\sigma_C$ für 2 Millionen Spannungsspiele statistisch als 95 %-Quantil für Überleben mit etwa 75 % Vertrauenswahrscheinlichkeit ermittelt worden. Dabei wurden Standardabweichungen, Probekörpergröße und Eigenspannungen berücksichtigt. Die Anzahl der Proben (mindestens 10) wurde nach EN 1990, Anhang D berücksichtigt.

ANMERKUNG 2 Der Nationale Anhang darf die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit für den Einzelfall regeln, wenn die Auswertung nach den Vorgaben in Anmerkung 1 erfolgt.

ANMERKUNG 3 Die Testdaten einiger Kerbdetails lassen sich nicht eindeutig den Ermüdungsfestigkeitskurven in Bild 7.1 zuordnen. Die Kerbfallkategorien, die mit einem Stern gekennzeichnet sind, wurden eine Kategorie tiefer eingestuft, um die Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ den Ergebnissen von Versuchen anzupassen. Die Kerbfallkategorien $\Delta\sigma_C$ dürfen in diesen Fällen um eine Kategorie angehoben werden, wenn die S-N-Kurve mit $m = 3$ bis zur Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_C^*$ bei $N_D^* = 10^7$ verlängert wird, siehe Bild 7.3.

DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

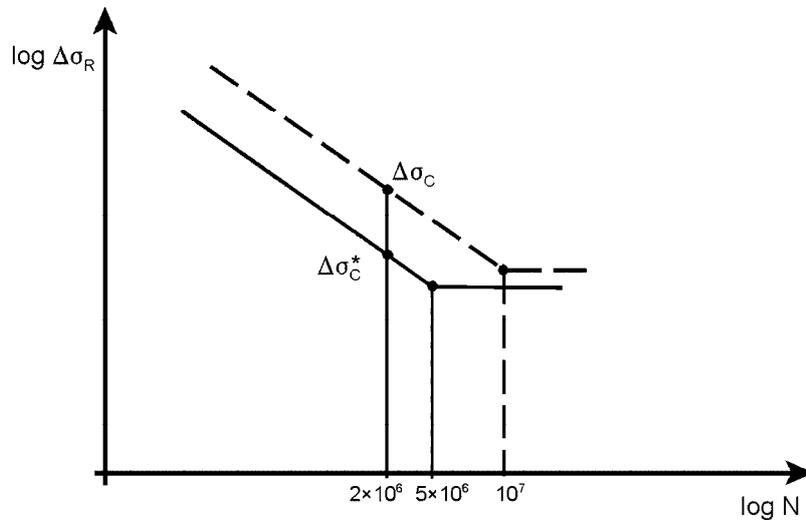


Bild 7.3 — Alternative Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ für Kerbfälle, die mit $\Delta\sigma_C^*$ bezeichnet sind

(4) Die Kerbfalkategorien $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ für Nennspannungen sind wie folgt angegeben:

- Tabelle 8.1 für ungeschweißte Bauteile und Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmitteln;
- Tabelle 8.2 für geschweißte zusammengesetzte Querschnitte;
- Tabelle 8.3 für quer laufende Stumpfnähte;
- Tabelle 8.4 für angeschweißte Anschlüsse und Steifen;
- Tabelle 8.5 für geschweißte Stöße;
- Tabelle 8.6 für Hohlprofile;
- Tabelle 8.7 für geschweißte Knoten von Fachwerkträgern;
- Tabelle 8.8 für orthotrope Platten mit Hohlrippen;
- Tabelle 8.9 für orthotrope Platten mit offenen Rippen;
- Tabelle 8.10 für die Obergurt-Stegblech Anschlüsse von Kranbahnträgern.

(5) Die Kerbfalkategorien $\Delta\sigma_C$ für Strukturspannungen (Kerbspennungen) werden in Anhang B angegeben.

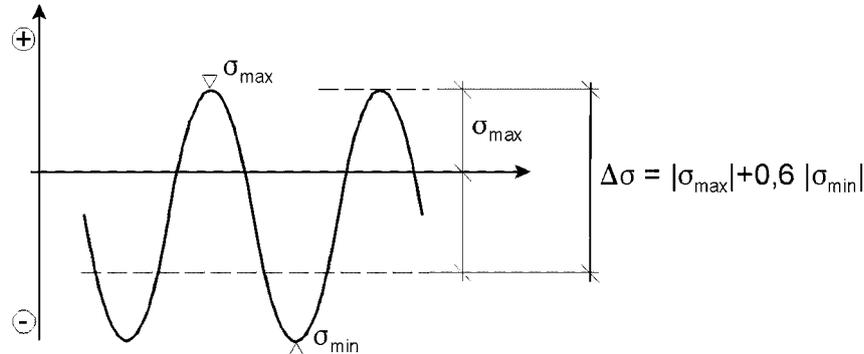
ANMERKUNG Kerbfalkategorien $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ für Kerbdetails, die nicht in Tabelle 8.1 bis Tabelle 8.10 und im Anhang B enthalten sind, dürfen im Nationalen Anhang angegeben werden.

7.2 Modifizierung der Ermüdungsfestigkeit

7.2.1 Nicht geschweißte oder spannungsarm geglühte geschweißte Konstruktionen unter Druckbeanspruchung

(1) Bei nicht geschweißten Konstruktionen oder bei geschweißten Konstruktionen, die spannungsarm geglüht werden, darf der Mittelspannungseinfluss auf die Ermüdungsfestigkeit dadurch berücksichtigt werden, dass die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{E,2}$ im Ermüdungsnachweis reduziert wird, wenn sie ganz oder teilweise im Druckbereich liegt.

(2) Die reduzierte Spannungsschwingbreite darf als Summe des Zuganteils der Spannungsschwingbreite und 60 % des Druckanteils der Spannungsschwingbreite ermittelt werden, siehe Bild 7.4.



Legende

- + Zugspannungen
- Druckspannungen

Bild 7.4 — Modifizierte Spannungsschwingbreiten für nicht geschweißte und spannungsarm geglühte geschweißte Konstruktionen

7.2.2 Größenabhängigkeit

(1) Die Größenabhängigkeit aus Effekten der Blechdicke oder anderer Abmessungen ist in der Regel entsprechend Tabelle 8.1 bis Tabelle 8.10 zu berücksichtigen. Die Ermüdungsfestigkeit lautet dann:

$$\Delta\sigma_{C,red} = k_s \Delta\sigma_C \quad (7.1)$$

8 Ermüdungsnachweis

(1) Die Spannungsschwingbreiten für Nennspannungen, korrigierte Nennspannungen oder Strukturspannungen (Kerbspannungen) infolge der häufig auftretenden Lasten $\psi_1 Q_k$, siehe EN 1990, sind in der Regel zu begrenzen durch:

$$\Delta\sigma \leq 1,5 f_y \quad \text{für Längsspannungen;} \quad (8.1)$$

$$\Delta\tau \leq 1,5 f_y / \sqrt{3} \quad \text{für Schubspannungen.}$$

(2) Folgende Ermüdungsnachweise sind zu führen:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

und (8.2)

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0.$$

ANMERKUNG Die Tabellen 8.1 bis 8.9 erfordern für einige Kerbfälle die Verwendung von Spannungsschwingbreiten für Hauptspannungen.

DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

(3) Bei gleichzeitiger Wirkung von Längs- und Schubspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{E,2}$ und $\Delta\tau_{E,2}$ ist in der Regel nachzuweisen, dass

$$\left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}}\right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}}\right)^5 \leq 1,0 \quad (8.3)$$

falls nicht bei den Kerbfallkategorien in Tabelle 8.8 und Tabelle 8.9 ein anderes Nachweisformat angegeben ist.

(4) Wenn keine Angaben zu $\Delta\sigma_{E,2}$ oder $\Delta\tau_{E,2}$ vorliegen, darf der Nachweis nach Anhang A erfolgen.

ANMERKUNG 1 Die in Anhang A dargestellten Regelungen für Längsspannungsschwingspiele \overline{AC} können auch analog für Schubspannungsschwingspiele \overline{AC} verwendet werden.

ANMERKUNG 2 Hinweise zur Anwendung von Anhang A dürfen im Nationalen Anhang gegeben werden.

Tabelle 8.1 — Ungeschweißte Bauteile und Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmitteln

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
160	<p>ANMERKUNG Der Kerbfall 160 ist der höchst mögliche; kein Kerbfall kann bei irgendeiner Anzahl an Spannungsschwingspielen eine höhere Ermüdungsfestigkeit erreichen.</p>	<p>AC Gewalzte oder gepresste Erzeugnisse: AC</p> <p>1) AC Bleche und Flachstähle mit gewalzten Kanten; AC</p> <p>2) AC Walzprofile mit gewalzten Kanten; AC</p> <p>3) Nahtlose rechteckige oder runde Hohlprofile.</p>	<p>Kerbfälle 1) bis 3): Scharfe Kanten, Oberflächen- und Walzfehler sind durch Schleifen zu beseitigen und ein nahtloser Übergang herzustellen.</p>
140		<p>Gescherte oder brenngeschnittene Bleche:</p> <p>4) Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung</p> <p>5) Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit seichten und regelmäßigen Brennriefen oder von Hand brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung.</p> <p>Maschinell brenngeschnittener Werkstoff der Schnittqualität entsprechend EN 1090.</p>	<p>4) Alle sichtbaren Randkerben sind zu beseitigen, Schnittflächen zu überschleifen und Kanten zu brechen.</p> <p>Riefen infolge mechanischer Bearbeitung (z. B. Schleifen) müssen parallel zu den Spannungen verlaufen.</p>
125		<p>Maschinell brenngeschnittener Werkstoff der Schnittqualität entsprechend EN 1090.</p>	<p>Kerbfälle 4) und 5): Einspringende Ecken sind durch Schleifen (Neigung $\leq 1/4$) zu bearbeiten oder durch einen entsprechenden Spannungskonzentrationsfaktor zu berücksichtigen keine Ausbesserungen durch Verfüllen mit Schweißgut</p>
100 $m = 5$		<p>6) und 7) AC Gewalzte oder gepresste Erzeugnisse entsprechend der Kerbfälle 1), 2), 3) AC</p>	<p>Kerbfälle 6) und 7): $\Delta \tau$ berechnet nach: $\tau = \frac{V \cdot S(t)}{I \cdot t}$</p>
Für Kerbfälle 1–5 ist bei Einsatz von wetterfestem Stahl der nächsttiefere Kerbfall zu verwenden.			
112		<p>8) Symmetrische zweischnittige Verbindung mit hochfesten vorgespannten Schrauben.</p> <p>8) Symmetrische zweischnittige Verbindung mit vorgespannten Injektionsschrauben</p>	<p>8) $\Delta \sigma$ ist am Bruttoquerschnitt zu ermitteln.</p> <p>8) ... Bruttoquerschnitt ...</p>
90		<p>9) Zweischnittige Verbindung mit Passschrauben.</p> <p>9) Zweischnittige Verbindung mit nicht vorgespannten Injektionsschrauben.</p>	<p>9) ... Nettoquerschnitt ...</p> <p>9) ... Nettoquerschnitt ...</p>
		<p>10) Einschnittige Verbindung mit hochfesten vorgespannten Schrauben.</p> <p>10) Einschnittige Verbindung mit vorgespannten Injektionsschrauben.</p>	<p>10) ... Bruttoquerschnitt ...</p> <p>10) ... Bruttoquerschnitt ...</p>
		<p>11) Bauteile mit Löchern unter Biegung und Normalkraft.</p> <p>12) Einschnittige Verbindung mit Passschrauben.</p>	<p>11) ... Nettoquerschnitt ...</p> <p>12) ... Nettoquerschnitt ...</p>
		<p>12) Einschnittige Verbindung mit Passschrauben.</p> <p>12) Einschnittige Verbindung mit nicht vorgespannten Injektionsschrauben.</p>	<p>12) ... Nettoquerschnitt ...</p> <p>12) ... Nettoquerschnitt ...</p>
50		<p>13) Einschnittige oder symmetrische zweischnittige Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben. Keine Lastumkehr.</p>	<p>13) ... Nettoquerschnitt ...</p>

DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

Tabelle 8.1 (fortgesetzt)

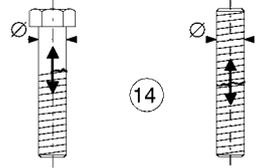
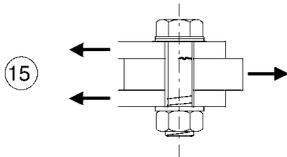
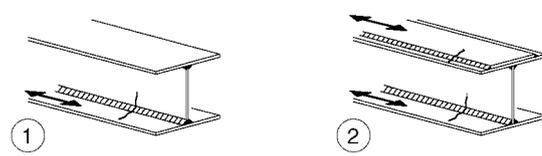
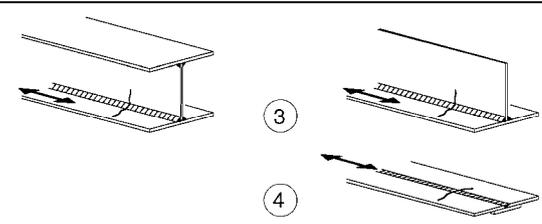
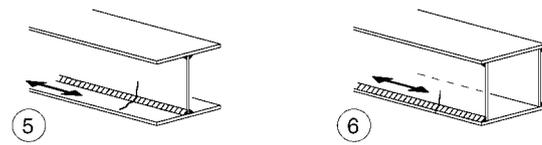
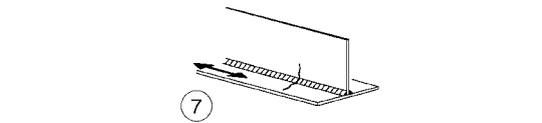
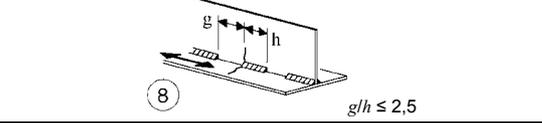
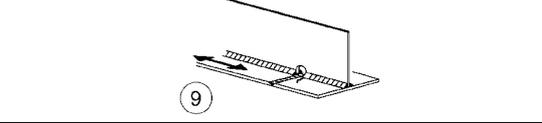
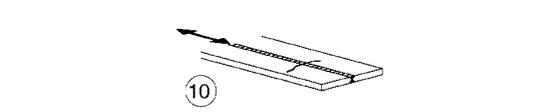
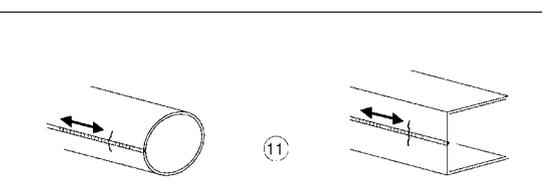
Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
50	<p>Größenabhängigkeit für $\varnothing > 30$ mm: $k_s = (30/\varnothing)^{0,25}$</p> 	<p>14) Schrauben und Gewindestangen mit gerolltem oder geschnittenen Gewinde unter Zug. Bei großen Durchmessern (Ankerschrauben) muss der Größeneffekt mit k_s berücksichtigt werden.</p>	<p>14) $\Delta\sigma$ ist am Spannungsquerschnitt der Schraube zu ermitteln. Biegung und Zug infolge Abstützkräften sowie weitere Biegespannungen (z. B. sekundäre Biegespannungen) sind zu berücksichtigen. Bei vorgespannten Schrauben darf die reduzierte Spannungsschwingbreite berücksichtigt werden.</p>
100 $m=5$		<p><u>Schrauben in ein- oder zweiseitigen Scher-Lochleibungsverbindungen</u> (Gewinde nicht in der Scherfläche) 15) – Passschrauben – Schrauben ohne Lastumkehr (Schraubengüten 5.6, 8.8 oder 10.9)</p>	<p>15) $\Delta\tau$ ist am Schaftquerschnitt zu ermitteln.</p>

Tabelle 8.2 — Geschweißte zusammengesetzte Querschnitte

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
125		Durchgehende Längsnähte: 1) \overline{AC} Mit Automaten oder voll mechanisiert \overline{AC} beidseitig durchgeschweißte Nähte. 2) \overline{AC} Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte \overline{AC} Kehlnähte. Die Enden von aufgeschweißten Gurtplatten sind gem. Kerbfall 6) oder 7) in Tabelle 8.5 nachzuweisen.	Kerbfälle 1) und 2): Es dürfen keine Schweißansatzstellen vorhanden sein, ausgenommen bei Durchführung einer Reparatur mit anschließender Überprüfung der Reparaturschweißung.
112		3) \overline{AC} Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte \overline{AC} Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte, beide mit Ansatzstellen. 4) \overline{AC} Mit Automaten oder voll mechanisiert \overline{AC} einseitig durchgeschweißte Naht mit nicht unterbrochener Schweißbadsicherung, aber ohne Ansatzstellen.	4) Weist dieser Kerbfall Ansatzstellen auf, ist er der Kerngruppe 100 zuzuordnen.
100		5) Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte. 6) \overline{AC} Von Hand oder mit Automaten oder voll mechanisiert \overline{AC} einseitig durchgeschweißte Nähte, speziell bei Hohlkästen.	5) und 6) Zwischen Flansch und Stegblech ist eine sehr gute Passgenauigkeit erforderlich. Dabei ist bei HV-Nähten das Stegblech so anzuschrägen, dass die Wurzel ausreichend und ohne Herausfließen von Schweißgut erfasst werden kann.
100		7) \overline{AC} Ausgebesserte automaten- oder voll mechanisiert geschweißte \overline{AC} oder handgeschweißte Kehlnähte oder Stumpfnahten nach Kerbfall 1) bis 6).	7) Durch Nachschleifen aller sichtbaren Fehlstellen durch einen Spezialisten sowie einer entsprechenden Überprüfung kann der ursprüngliche Kerbfall wiederhergestellt werden.
80		8) Unterbrochene Längsnähte.	8) $\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Flansch berechnet.
71		9) Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten (kleiner 60 mm). Bei Freischnitten > 60 mm gilt Kerbfall 1) in Tabelle 8.4.	9) $\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Flansch berechnet.
125		10) Längsbeanspruchte Stumpfnaht, beidseitig in Lastrichtung blecheben geschliffen, 100 % ZFP.	
112		10) Ohne Schleifen und ohne Ansatzstellen.	
90		10) Mit Ansatzstellen.	
140		11) \overline{AC} Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte \overline{AC} Längsnaht in Hohlprofilen ohne Ansatzstellen.	11) \overline{AC} gestrichener Text \overline{AC} Wanddicke $t \leq 12,5$ mm
125		11) \overline{AC} Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte \overline{AC} Längsnaht in Hohlprofilen ohne Ansatzstellen.	11) Wanddicke $t > 12,5$ mm
90		11) Mit Ansatzstellen.	

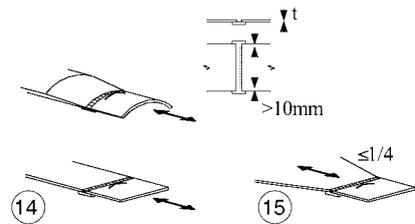
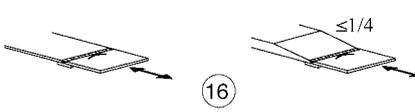
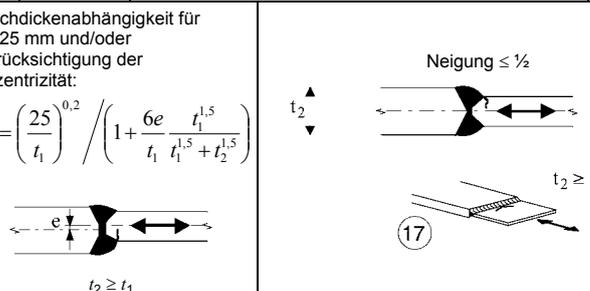
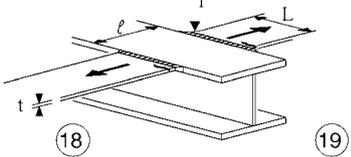
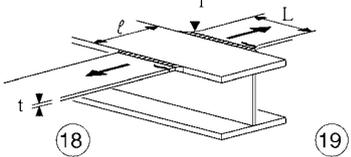
Werden die Kerbfälle 1 bis 11 mit voll mechanisierter Schweißung ausgeführt, gelten die Kerbfallkategorien für Automaten-schweißung.

DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

Tabelle 8.3 — Quer laufende Stumpfnähte

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
112		<p><u>Ohne Schweißbadsicherung:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Querstöße in Blechen und Flachstählen. 2) Vor dem Zusammenbau geschweißte Flansch- und Stegstöße in geschweißten Blechträgern. 3) Vollstöße von Walzprofilen mit Stumpfnähten ohne Freischnitte. 4) Querstöße in Blechen oder Flachstählen, abgeschrägt in Breite oder Dicke mit einer Neigung $\leq 1/4$. 	<ul style="list-style-type: none"> – Alle Nähte blecheben in Lastrichtung geschliffen. – Schweißnahtan- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließend zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen. – Beidseitige Schweißung mit ZFP. <p><u>Kerbfälle 3):</u> Walzprofile mit denselben Abmessungen ohne Toleranzunterschiede</p>
90		<ol style="list-style-type: none"> 5) Querstöße von Blechen oder Flachstählen. 6) Vollstöße von Walzprofilen mit Stumpfnähten ohne Freischnitte. 7) Querstöße von Blechen oder Flachstählen, abgeschrägt in Breite oder Dicke mit einer Neigung $\leq 1/4$. Der Übergang muss kerbfrei ausgeführt werden. 	<ul style="list-style-type: none"> – Die Nahtüberhöhung muss $\leq 10\%$ der Nahtbreite und mit verlaufendem Übergang in die Blechoberfläche ausgeführt werden. – Schweißnahtan- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließend zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen. – Beidseitige Schweißung mit ZFP. <p><u>Kerbfälle 5 und 7):</u> Die Nähte sind in Wannenlage zu schweißen.</p>
90		<ol style="list-style-type: none"> 8) Vollstöße von Walzprofilen mit Stumpfnähten mit Freischnitten. 	<ul style="list-style-type: none"> – Alle Nähte blecheben in Lastrichtung geschliffen. – Schweißnahtan- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließen zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen. – Beidseitige Schweißung mit ZFP. – Walzprofile mit denselben Abmessungen ohne Toleranzunterschiede
80		<ol style="list-style-type: none"> 9) Querstöße in geschweißten Blechträgern ohne Freischnitte. 10) Vollstöße von Walzprofilen mit Stumpfnähten mit Freischnitten. 11) Querstöße in Blechen, Flachstählen, Walzprofilen oder geschweißten Blechträgern. 	<ul style="list-style-type: none"> – Die Nahtüberhöhung muss $\leq 20\%$ der Nahtbreite und mit verlaufendem Übergang in die Blechoberfläche ausgeführt werden. – keine Schweißnahtnachbehandlung – Schweißnahtan- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließen zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen. – Beidseitige Schweißung mit ZFP. <p><u>Kerbfälle 10):</u> Die Nahtüberhöhung muss $\leq 10\%$ der Nahtbreite und mit verlaufendem Übergang in die Blechoberfläche ausgeführt werden.</p>
63		<ol style="list-style-type: none"> 12) Querstöße in Walzquerschnitten (ohne Freischnitt). 	<ul style="list-style-type: none"> – Schweißnahtan- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließen zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen. – Beidseitige Schweißung

Tabelle 8.3 (fortgesetzt)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
36		13) Einseitig geschweißte Stumpfnahte.	13) Ohne Schweißbadsicherung.
71	Blechdickenabh. f. $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0,2}$ 	13) Einseitig geschweißte Stumpfnahte mit Inspektion der Wurzel-lage durch ZFP.	
71	Blechdickenabhangigkeit für $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0,2}$ 	<u>Mit Schweißbadsicherung:</u> 14) Querstöße 15) Querstöße von Blechen, abgeschrägt in Breite oder Dicke mit einer Neigung $\leq 1/4$. Auch gültig für gekrumnte Bleche.	<u>Kerbfälle 14) und 15):</u> Die Kehlnaht, mit der die Schweißbadsicherung angeschweißt wird, muss mindestens 10 mm von den Rändern des beanspruchten Bleches entfernt enden. Die Heft-naht muss innerhalb der späteren Stumpfnaht liegen.
50	Blechdickenabhangigkeit für $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0,2}$ 	16) Quernähte mit verbleibender Schweißbadsicherung, abgeschrägt in Breite oder Dicke mit einer Neigung $\leq 1/4$. Auch gültig für gekrumnte Bleche.	16) Wenn eine gute Passgenauigkeit nicht sichergestellt ist oder wenn die Anschlussnahte der Wurzelunterlage ≤ 10 mm von den Blechrandern entfernt enden.
71	Blechdickenabhangigkeit für $t > 25$ mm und/oder Berücksichtigung der Exzentrizität: $k_s = \left(\frac{25}{t_1}\right)^{0,2} \left/ \left(1 + \frac{6e}{t_1} \frac{t_1^{1,5}}{t_1^{1,5} + t_2^{1,5}}\right)\right.$ 	17) Quernaht zwischen Blechen unterschiedlicher Dicke ohne Übergang und ohne Exzentrizität.	
AC 40 AC		18) Quernaht an sich kreuzenden Gurten	<u>Kerbfälle 18) und 19):</u> Die Ermüdungsfestigkeit senkrecht zur Lastrichtung ist nach Tabelle 8.4, Kerbfall 4 oder 5 nachzuweisen.
wie 4 in Tabelle 8.5		19) Mit Übergang entsprechend Tabelle 8.4, Kerbfall 4.	

DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

Tabelle 8.4 — Angeschweißte Anschlüsse und Steifen

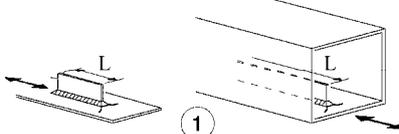
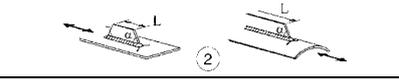
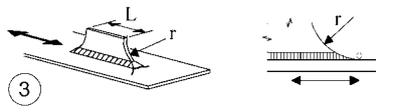
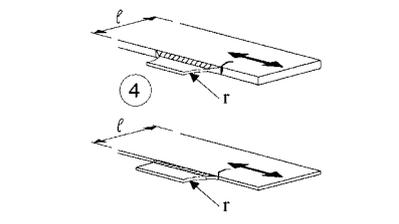
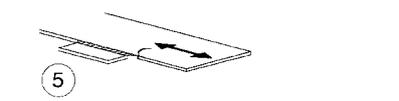
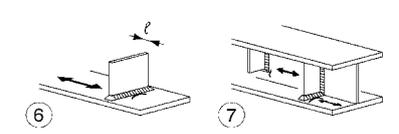
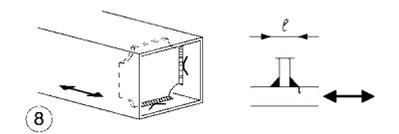
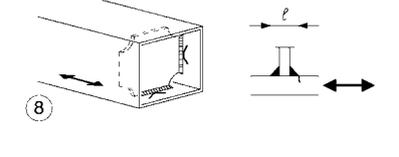
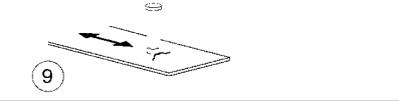
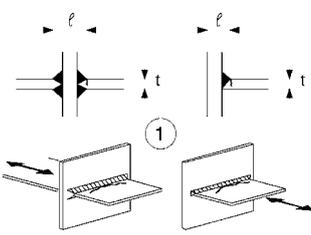
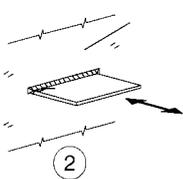
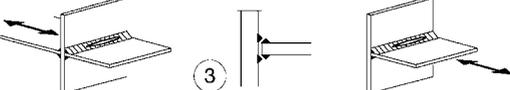
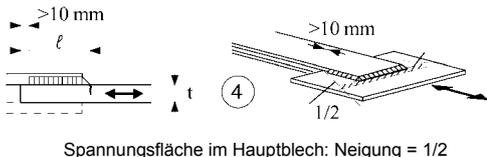
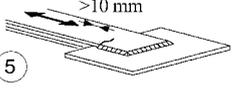
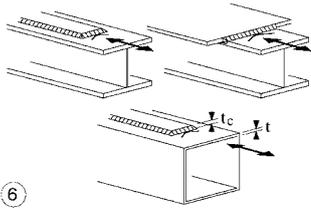
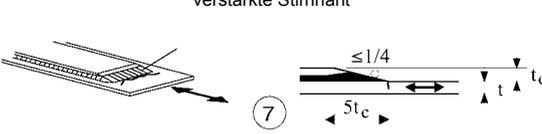
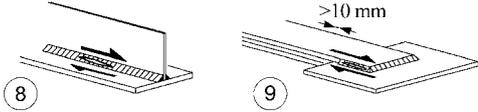
Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
80	$L \leq 50 \text{ mm}$	 <p>1) Die Kerbgruppe hängt von der Länge L der Längsrippe ab.</p>	Die Dicke der Steifen muss kleiner sein als ihre Höhe, sonst siehe Tabelle 8.5, Kerbfälle 5 oder 6.
71	$50 < L \leq 80 \text{ mm}$		
63	$80 < L \leq 100 \text{ mm}$		
56	$L > 100 \text{ mm}$		
71	$L > 100 \text{ mm}$ $\alpha < 45^\circ$	 <p>2) Längsrippen an ebenen oder gekrümmten Blechen</p>	
80	$r > 150 \text{ mm}$	 <p>3) Längsgeschweißte Anschlussbleche mit Ausrundung an ebenen oder gekrümmten Blechen, Endverstärkung der Kehlnaht (voll durchgeschweißt); Länge der Verstärkungsnah $> r$.</p>	Kerbfälle 3) und 4): Am Knotenblech muss ein gleichmäßiger Übergang hergestellt werden, und zwar vor dem Schweißen mit dem Radius r durch maschinelle Bearbeitung oder Brennschneiden und nach dem Schweißen durch Schleifen der Schweißzone parallel zur Lastrichtung, so dass der Schweißnahtübergang der Quernaht vollständig entfernt ist.
90	$\frac{AC}{AC} \frac{r}{l} \geq \frac{1}{3}$ oder $r > 150 \text{ mm}$	 <p>4) An den Blech- oder Trägerflanschrändern angeschweißtes Knotenblech.</p>	
71	$\frac{AC}{AC} \frac{1}{6} \leq \frac{r}{l} \leq \frac{1}{3}$		
50	$\frac{AC}{AC} \frac{r}{l} < \frac{1}{6}$		
40		 <p>5) Ohne Nachbehandlung, ohne Ausrundungsradius.</p>	
80	$l \leq 50 \text{ mm}$	 <p>6) Quersteifen auf Blechen</p>  <p>7) Vertikalsteifen in Walz- oder geschweißten Blechträgern.</p>	Kerbfälle 6) und 7): Die Schweißnahtenden sind sorgfältig zu schleifen, um Einbrandkerben zu entfernen.
71	$50 < l \leq 80 \text{ mm}$	 <p>8) Am Steg oder Flansch angeschweißte Querschotte in Kastenträgern. Nicht für Hohlprofile. Die Kerbfälle gelten auch für Ringsteifen.</p>	7) Wenn die Steife, Fall 7) links, im Stegblech abschließt, wird $\Delta\sigma$ mit den Hauptspannungen berechnet.
80		 <p>9) Einfluss geschweißter Kopfbolzendübel auf den Grundwerkstoff.</p>	

Tabelle 8.5 — Geschweißte Stöße

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Beschreibung	Anforderungen
80	$\ell < 50$	alle t		<p>Kreuz- und T-Stöße: 1) Riss am Schweißnahtübergang in voll durchgeschweißten Stumpfnähten und allen nicht durchgeschweißten Nähten.</p>
71	$50 < \ell \leq 80$	alle t		
63	$80 < \ell \leq 100$	alle t		
56	$100 < \ell \leq 120$	alle t		
56	$\ell > 120$	$t \leq 20$		
50	$120 < \ell \leq 200$ $\ell > 200$	$t > 20$ $20 < t \leq 30$		
45	$200 < \ell \leq 300$ $\ell > 300$	$t > 30$ $30 < t \leq 50$		
40	$\ell > 300$	$t > 50$		
wie Kerbfall 1 in Tabelle 8.5	<p>verformbares Anschlussblech</p> 		<p>2) Riss am Schweißnahtübergang, ausgehend von der Kante des Anschlussbleches, mit Spannungskonzentrationen an den Schweißnahtenden infolge Blechverformungen.</p>	<p>1) Nach Prüfung frei von Diskontinuitäten und Exzentrizitäten außerhalb der Toleranzen nach EN 1090.</p> <p>2) $\Delta\sigma$ ist mit korrigierten Nennspannungsschwingbreiten zu ermitteln.</p> <p>3) Es sind 2 Ermüdungsnachweise erforderlich: zum einen der Nachweis gegen Riss der Schweißnahtwurzel mit Spannungen nach Abschnitt 5 mit Kerbgruppe 36* für σ_w und Kerbgruppe 80 für τ_w, zum anderen der Nachweis des Nahtüberganges mit Bestimmung von $\Delta\sigma$ in den belasteten Blechen.</p> <p><u>Kerbfälle 1) bis 3):</u></p> <p>Die Ausmittigkeit der belasteten Bleche muss $\leq 15\%$ der Dicke des Zwischenblechs sein.</p>
36*			<p>3) Wurzelriss bei nicht voll durchgeschweißten T-Stößen oder Kehlverbindungen oder in T-Stößen nach Bild 4.6 in EN 1993-1-8:2005. AC</p>	
wie Kerbfall 1 in Tabelle 8.5	 <p>Spannungsfläche im Hauptblech: Neigung = 1/2</p>		<p>ANSCHLÜSSE MIT ÜBERLAPPENDEN BAUTEILEN: 4) Mit Kehlverbindungen geschweißte Laschenverbindung.</p>	<p>4) Berechnung von $\Delta\sigma$ im Hauptblech mit der in der Skizze gezeigten Fläche.</p> <p>5) Berechnung von $\Delta\sigma$ in den überlappenden Laschen.</p> <p><u>Kerbfälle 4) und 5):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Die Schweißnahtenden müssen ≥ 10 mm vom Blechende entfernt sein. Ein Schubabriss in der Schweißnaht ist mit Kerbfall 8) zu überprüfen.
45*			<p>5) Mit Kehlverbindungen geschweißte Laschenverbindung.</p>	
56*	$t_c < t$	$t_c \geq t$		<p>Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Blechträgern: 6) Endbereiche von einlagig oder mehrlagig aufgeschweißten Gurtplatten mit und ohne Stirrnaht.</p> <p>6) Wenn die Lamellen breiter sind als der Flansch, ist eine Stirrnaht, die sorgfältig ausgeschliffen wird, um Einbrandkerben zu entfernen, erforderlich.</p> <p>Die minimale Lamellenlänge beträgt 300 mm.</p> <p>Für kürzere Lamellen siehe Abstufung für Kerbfall 1.</p>
50	$t \leq 20$	–		
45	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$		
40	$30 < t \leq 50$	$20 < t \leq 30$		
40	$t > 50$	$30 < t \leq 50$		
36	–	$t > 50$		
56	<p>verstärkte Stirrnaht</p> 		<p>7) Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Blechträgern. 5) t_c ist die Minimallänge der Verstärkungsnaht.</p>	<p>7) Die Stirrnaht ist blechen zu schleifen. Zusätzlich ist für $t_c > 20$ mm die Lamelle mit einer Neigung $< 1/4$ auszubilden.</p>
80 $m=5$			<p>8) Durchgehende Kehlverbindungen, die einen Schubfluss übertragen, wie z. B. Halskehlnähte zwischen Stegblech und Flansch bei geschweißten Blechträgern.</p> <p>9) Mit Kehlverbindungen geschweißte Laschenverbindung.</p>	<p>8) $\Delta\tau$ ist auf die Schweißnahtdicke bezogen zu berechnen.</p> <p>9) $\Delta\tau$ ist auf die Schweißnahtdicke bezogen unter Berücksichtigung der Gesamtlänge der Schweißnaht zu berechnen. Schweißnahtenden müssen ≥ 10 mm vom Blechende entfernt sein.</p>

DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

Tabelle 8.5 (fortgesetzt)

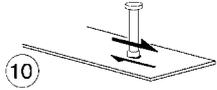
Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
siehe EN 1994-2 (90 $m=8$)		<p><u>Schweißnähte unter Querkraftbeanspruchung:</u></p> <p>10) Kopfbolzendübel in Verbundwirkung</p>	<p>10) Δr wird am Nennquerschnitt des Dübels ermittelt.</p>
71		<p>11) Ringflanschanschluss mit zu 80 % durchgeschweißten Stumpfnähten.</p>	<p>11) Der Schweißnahtübergang ist zu überschleifen. $\Delta\sigma$ wird am Rohrquerschnitt berechnet.</p>
40		<p>12) Ringflanschanschluss mit Kehlnähten</p>	<p>12) $\Delta\sigma$ wird am Rohrquerschnitt berechnet.</p>

Tabelle 8.6 — Hohlprofile ($t \leq 12,5$ mm)

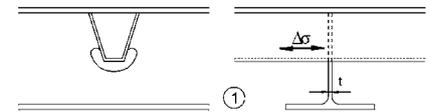
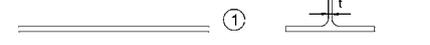
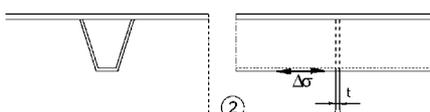
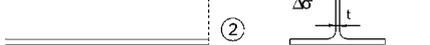
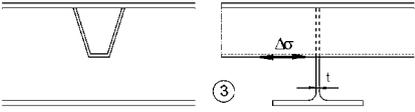
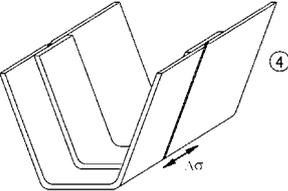
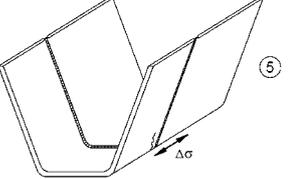
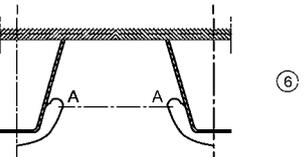
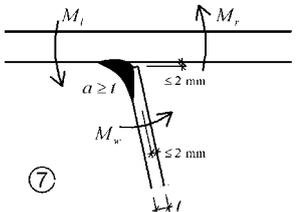
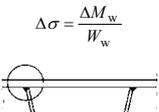
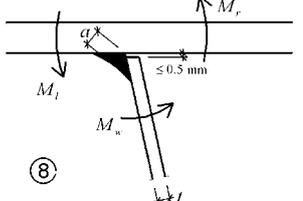
Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
71		1) Ringflanschanchluss mit zusammengedrücktem Endquerschnitt, Stumpfnahht (X-Naht).	1) $\Delta\sigma$ ist am Rohrquerschnitt zu berechnen. Rohrdurchmesser <200 mm
71	$\alpha \leq 45^\circ$	2) Rohr-Blech-Anschluss, Rohr geschlitzt und an das Blech geschweißt, Loch am Schlitzende.	2) $\Delta\sigma$ ist am Rohrquerschnitt zu berechnen. Schubriss in der Schweißnaht sind nach Tabelle 8.5, Kerbfall 8) nachzuweisen.
63	$\alpha > 45^\circ$		
71	③	<u>Quernähte:</u> 3) Stöße von Rundhohlprofilen mit durchgeschweißten Stumpfnähten.	<u>Kerbfälle 3) und 4):</u> – Nahtüberhöhung $\leq 10\%$ der Schweißnahtdicke mit verlaufendem Übergang in das Grundmaterial. – In Wannelage geschweißte Nähte und nachweisbar frei von erkennbaren Fehlern außerhalb der Toleranzen nach EN 1090. – Konstruktionsdetails mit $t > 8$ mm dürfen 2 Kerbfalkategorien höher eingestuft werden.
56	④	4) Stöße von Rechteckhohlprofilen mit durchgeschweißten Stumpfnähten.	
71		<u>Nicht tragende Schweißnähte:</u> 5) Mit Kehlnähten an ein anderes Bauteil angeschweißte runde oder rechteckige Hohlprofile.	5) – Nicht tragende Schweißnähte. – Querschnittsbreite parallel zur Spannungsrichtung $l \leq 100$ mm. – für andere Fälle siehe Tabelle 8.4.
50	⑥	<u>Tragende Schweißnähte:</u> 6) Kopfplattenstoß von Rundhohlprofilen mit durchgeschweißten Nähten.	<u>Kerbfälle 6) und 7):</u> – Tragende Schweißnähte. – Schweißnahtinspektion und nachweisbar frei von erkennbaren Fehlern außerhalb der Toleranzen nach EN 1090. – Konstruktionsdetails mit Wanddicken $t > 8$ mm dürfen eine Kerbfalkategorien höher eingestuft werden.
45	⑦	7) Kopfplattenstoß von Rechteckhohlprofilen mit durchgeschweißten Nähten.	
40	⑧	8) Kopfplattenstoß von Rundhohlprofilen mit Kehlnähten.	<u>Kerbfälle 8) und 9):</u> – Tragende Schweißnähte. – Wanddicken $t \leq 8$ mm.
36	⑨	9) Kopfplattenstoß von Rechteckhohlprofilen mit Kehlnähten.	

DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

Tabelle 8.7 — Geschweißte Knoten von Fachwerkträgern

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Anforderungen
90 <i>m</i> = 5	<p>Anschluss mit Spalt: Kerbdetail 1): K- und N-Knoten, Rundhohlprofile:</p>	<p>Kerbfälle 1) und 2):</p> <ul style="list-style-type: none"> – Es sind getrennte Nachweise für Gurte und Diagonalen zu führen. – Bei Zwischenwerten von t_o/t_i ist zwischen den Kerbgruppen linear zu interpolieren. – Bei Diagonalen mit $t \leq 8$ mm sind Kehlnähte erlaubt. – t_o und $t_i \leq 8$ mm – $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ – $b_o/t_o \cdot t_o/t_i \leq 25$ – $d_o/t_o \cdot t_o/t_i \leq 25$ – $0,4 \leq b_o/b_o \leq 1,0$ – $0,25 \leq d_o/d_o \leq 1,0$ – $b_o \leq 200$ mm – $d_o \leq 300$ mm – $-0,5h_o \leq e_{i/p} \leq 0,25h_o$ – $-0,5d_o \leq e_{i/p} \leq 0,25d_o$ – $e_{o/p} \leq 0,02b_o$ oder $\leq 0,02d_o$
45 <i>m</i> = 5	<p>$\frac{t_o}{t_i} = 1,0$</p>	<p>①</p>
71 <i>m</i> = 5	<p>Anschluss mit Spalt: Kerbdetail 2): K- und N-Knoten, Rechteckprofile:</p>	<p>Kerbfälle 1) und 2):</p> <ul style="list-style-type: none"> – $0,5(b_o - b_i) \leq g \leq 1,1(b_o - b_i)$ und $g \geq 2t_o$
36 <i>m</i> = 5	<p>$\frac{t_o}{t_i} = 1,0$</p>	<p>②</p>
71 <i>m</i> = 5	<p>Anschluss mit Überlappung: Kerbdetail 3): K-Knoten, Rechteck- oder Rundhohlprofile:</p>	<p>Kerbfälle 3) und 4):</p> <ul style="list-style-type: none"> – 30 % ≤ Überlappung ≤ 100 % – Überlappung = $(g/p) \times 100$ % – Es sind getrennte Nachweise für Gurte und Diagonalen zu führen. – Bei Zwischenwerten von t_o/t_i ist zwischen den Kerbgruppen linear zu interpolieren.. – Bei Diagonalen mit $t \leq 8$ mm sind Kehlnähte erlaubt. – t_o und $t_i \leq 8$ mm – $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ – $b_o/t_o \cdot t_o/t_i \leq 25$ – $d_o/t_o \cdot t_o/t_i \leq 25$ – $0,4 \leq b_o/b_o \leq 1,0$ – $0,25 \leq d_o/d_o \leq 1,0$ – $b_o \leq 200$ mm – $d_o \leq 300$ mm – $-0,5h_o \leq e_{i/p} \leq 0,25h_o$ – $-0,5d_o \leq e_{i/p} \leq 0,25d_o$ – $e_{o/p} \leq 0,02b_o$ oder $\leq 0,02d_o$
56 <i>m</i> = 5	<p>$\frac{t_o}{t_i} = 1,0$</p>	<p>③</p>
71 <i>m</i> = 5	<p>Anschluss mit Überlappung: Kerbdetail 4): N-Knoten, Rechteck- oder Rundhohlprofile:</p>	<p>Kerbfälle 3) und 4):</p> <ul style="list-style-type: none"> – $e_{o/p} \leq 0,02b_o$ oder $\leq 0,02d_o$
50 <i>m</i> = 5	<p>$\frac{t_o}{t_i} = 1,0$</p>	<p>④</p> <p>Definition von p und q:</p>

Tabelle 8.8 — Orthotrope Platten mit Hohlrippen

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
80	$t \leq 12 \text{ mm}$ 	1) Durchgehende Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger.	1) Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.
71	$t > 12 \text{ mm}$ 		
80	$t \leq 12 \text{ mm}$ 	2) Durchgehende Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger.	2) Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.
71	$t > 12 \text{ mm}$ 		
36		3) Längsrippen am Querträger stoßen.	3) Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.
71		4) Rippenstoß, voll durchgeschweißte Stumpfnah mit Badsicherung.	4) Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen. AC Die Haftnaht der Badsicherung ist nur innerhalb der späteren Stumpfnah zulässig. AC
112	wie 1, 2, 4 in Tabelle 8.3 	5) Von beiden Seiten voll durchgeschweißte Stumpfnah ohne Badsicherung.	5) Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen. AC gestrichener Text AC
90	wie 5, 7 in Tabelle 8.3		
80	wie 9, 11 in Tabelle 8.3		
71		6) Kritischer Schnitt im Querträgersteg mit Ausschnitten.	6) Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite im kritischen Schnitt unter Berücksichtigung von Vierendeel Effekten zu führen. ANMERKUNG Wird die Spannungsschwingbreite nach EN 1993-2, 9.4.2.2(3) ermittelt, darf Kerbfall 112 verwendet werden.
71		<u>Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe:</u> 7) Versenkte Naht mit $a \geq t$	7) Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite infolge Blechbiegung zu führen. W_w ist mit t zu berechnen.
71			
50		8) Kehlnaht oder nicht voll durchgeschweißte Naht, wenn nicht durch Kerbfall 7) abgedeckt.	8) Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite infolge Biegung in der Schweißnaht oder im Blech zu führen. W_w ist mit a zu berechnen.

DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

Tabelle 8.9 — Orthotrope Platten mit offenen Rippen

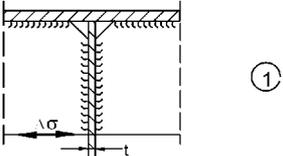
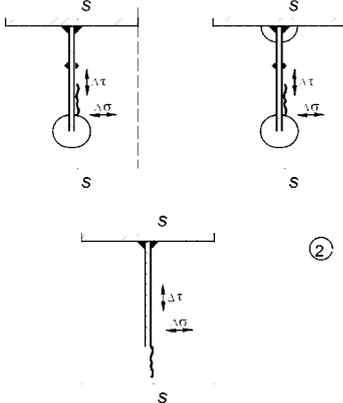
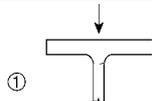
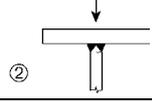
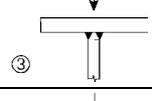
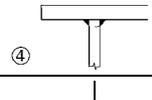
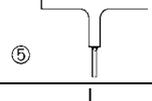
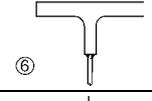
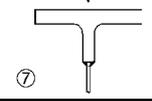
Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
80	$t \leq 12 \text{ mm}$		<p>1) Anschluss einer Längsrippe an den Querträger.</p> <p>1) Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe infolge Biegung zu führen.</p>
71	$t > 12 \text{ mm}$		
56		<p>2) Anschluss einer durchgehenden Längsrippe an den Querträger.</p> $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_s}{W_{\text{net},s}}$ $\Delta\tau = \frac{\Delta V_s}{A_{w,\text{net},s}}$ <p>Spannungsschwingspiele zwischen den Längsrippen sind ebenfalls entsprechend EN 1993-2 nachzuweisen.</p>	<p>2) Der Nachweis ist mit der Kombination der Spannungsschwingbreite $\Delta\tau$ infolge Querkraft und der Spannungsschwingbreite infolge Biegung $\Delta\sigma$ im Querträgersteg mit einer äquivalenten Spannungsschwingbreite zu führen:</p> $\Delta\sigma_{\text{eq}} = \frac{1}{2} \left(\Delta\sigma + \sqrt{\Delta\sigma^2 + 4\Delta\tau^2} \right)$

Tabelle 8.10 — Obergurt-Stegblech Anschlüsse von Kranbahnträgern

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
160		1) Gewalzte I- oder H-Querschnitte.	1) Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{\text{vert.}}$ im Steg infolge vertikaler Druckkräfte aus Radlasteinleitung.
71		2) Voll durchgeschweißter T-Stumpfstoß.	2) Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{\text{vert.}}$ im Steg infolge vertikaler Druckkräfte aus Radlasteinleitung.
36*		3) Nicht voll durchgeschweißter T-Stumpfstoß oder wirksam voll durchgeschweißter T-Stumpfstoß in Übereinstimmung mit EN 1993-1-8	3) Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{\text{vert.}}$ in der Schweißnaht infolge vertikaler Druckkräfte aus Radlasteinleitung.
36*		4) Kehlnähte	4) Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{\text{vert.}}$ in der Schweißnaht infolge vertikaler Druckkräfte aus Radlasteinleitung.
71		5) Gurt aus einem T-Profil mit voll durchgeschweißtem T-Stumpfstoß.	5) Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{\text{vert.}}$ im Steg infolge vertikaler Druckkräfte aus Radlasteinleitung.
36*		6) Gurt aus einem T-Profil mit nicht voll durchgeschweißtem T-Stumpfstoß oder wirksam voll durchgeschweißtem T-Stumpfstoß in Übereinstimmung mit EN 1993-1-8	6) Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{\text{vert.}}$ in der Schweißnaht infolge vertikaler Druckkräfte aus Radlasteinleitung.
36*		7) Gurt aus einem T-Profil mit Kehlnähten.	7) Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{\text{vert.}}$ in der Schweißnaht infolge vertikaler Druckkräfte aus Radlasteinleitung.

Anhang A **(normativ)**

Bestimmung von ermüdungsrelevanten Lastkenngrößen und Nachweisformate

A.1 Bestimmung von Belastungszyklen

(1) Typische Last-Zeit-Verläufe können aus Erfahrungswerten ähnlicher Lastsituationen angesetzt werden, solange diese eine konservative Abschätzung aller erwarteten Belastungszyklen innerhalb der Nutzungsdauer darstellen, siehe Bild A.1 a).

A.2 Spannungszeitverlauf am Kerbdetail

(1) Aus den Belastungszyklen sollte ein Spannungszeitverlauf am Kerbdetail unter Berücksichtigung der Art und des Verlaufs der Einflusslinien sowie dynamischer Vergrößerungsfaktoren ermittelt werden, siehe Bild A.1 b).

(2) Spannungszeitverläufe dürfen auch auf der Basis von Messungen an ähnlichen Tragwerken oder durch eine dynamische Berechnung des Tragwerkes bestimmt werden.

A.3 Zählverfahren

(1) Spannungszeitverläufe können durch folgende Zählverfahren bestimmt werden:

- Rainflow-Methode;
- Reservoir-Methode, siehe Bild A.1 c).

Hierbei werden folgende Parameter bestimmt:

- die Spannungsschwingbreiten sowie deren Anzahl;
- die Mittelspannung, falls der Mittelspannungseinfluss zu berücksichtigen ist.

A.4 Spektrum der Spannungsschwingbreiten

(1) Ein Spektrum der Spannungsschwingbreiten wird bestimmt, indem die Spannungsschwingbreiten mit der zugehörigen Anzahl der Schwingspiele in absteigender Reihenfolge geordnet werden, siehe Bild A.1 d).

(2) Bei der Bestimmung der Spektren der Spannungsschwingbreiten dürfen Spitzenwerte der Spannungsschwingbreiten vernachlässigt werden, wenn diese weniger als 1 % der Gesamtschädigung ausmachen; dies gilt auch für kleine Spannungsschwingbreiten, wenn diese unterhalb des Schwellenwertes der Ermüdungsfestigkeit liegen.

(3) Spektren der Spannungsschwingbreiten können entsprechend ihrer Völligkeit standardisiert werden, z. B. mit den normierten Achsen $\Delta\sigma = 1,0$ und $\overline{\Sigma n} = 1,0$.

A.5 Anzahl der Spannungsschwingspiele bis zum Versagen

(1) Werden die Bemessungsspektren der Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_i$, multipliziert mit γ_{Ff} und die Ermüdungsfestigkeitswerte $\Delta\sigma_C$, dividiert durch γ_{Mf} zur Bestimmung der Lebensdauerwerte N_{Ri} verwendet, so darf die Schadenakkumulation wie folgt durchgeführt werden:

$$D_d = \sum_i^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \quad (\text{A.1})$$

Dabei ist

n_{Ei} die Anzahl der Spannungsschwingspiele, bezogen auf den Streifen i mit der Spannungsschwingbreite $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_i$;

N_{Ri} die Lebensdauer als Anzahl der Schwingspiele, bezogen auf die Bemessungs-Wöhlerlinie $\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf} - N_R$ für die Spannungsschwingbreite $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_i$.

(2) Mit der Annahme gleicher Schädigung D_d darf das Bemessungsspektrum der Spannungsschwingbreiten in ein beliebiges äquivalentes Bemessungsspektrum der Spannungsschwingbreiten umgerechnet werden. So kann z. B. nach der Umwandlung in eine äquivalente konstante Spannungsschwingbreite eine weitere Transformation in eine äquivalente Ermüdungslast Q_e , abhängig von der Anzahl der Spannungsschwingspiele $n_{\max} = \sum n_i$, oder in $Q_{E,2}$ mit $N_C = 2 \times 10^6$ Spannungsschwingspielen erfolgen.

A.6 Nachweisformate

(1) In der Regel ist der Ermüdungsnachweis auf der Grundlage der Schadensakkumulation erbracht, wenn

— bei Anwendung der Schadensakkumulation:

$$D_d \leq 1,0 \quad (\text{A.2})$$

— bei der Anwendung der Spannungsschwingbreite:

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} \leq \sqrt[m]{D_d} \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \quad (\text{A.3})$$

Dabei ist $m = 3$.

DIN EN 1993-1-9:2010-12
EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 (D)

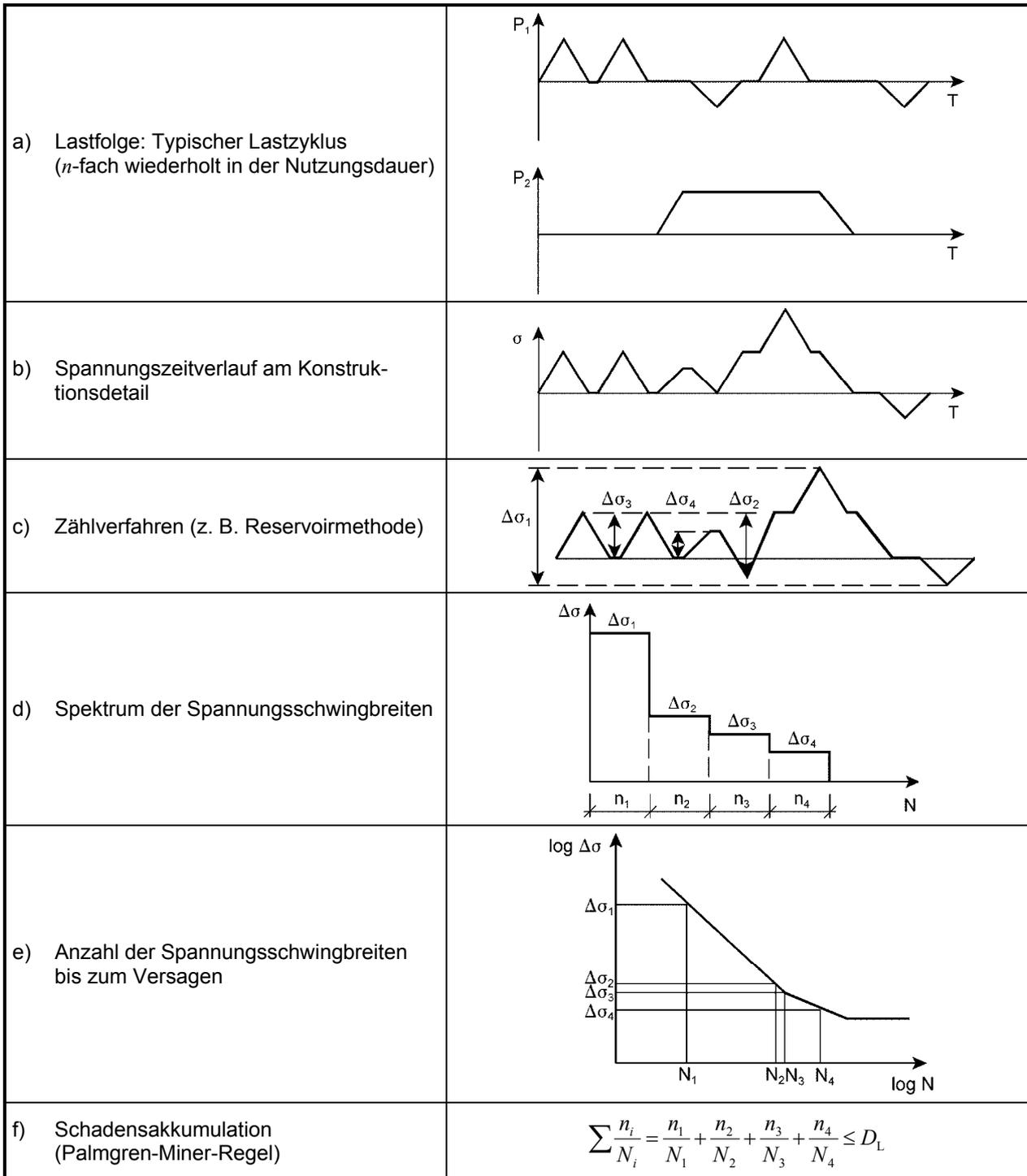


Bild A.1 — Schadensakkumulation

Anhang B (normativ)

Ermüdungsfestigkeit bei Verwendung von Strukturspannungen (Kerbspannungen)

(1) Die Kerbfälle für die Anwendung des Verfahrens mit Strukturspannungen (Kerbspannungen) sind in Tabelle B.1 für folgende Orte der Rissbildung zusammengestellt:

- Nahtübergang von Stumpfnähten;
- Nahtübergang von Kehlnähten an Anschlüssen;
- Nahtübergang von Kehlnähten in Kreuzstößen.

Tabelle B.1 — Kerbfälle bei Verwendung von Strukturspannungen (Kerbspannungen)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
112		1) Voll durchgeschweißte Stumpfnäht.	1) – Alle Nähte blecheben in Lastrichtung geschliffen. – Schweißnahtan- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließen zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen. – Beidseitige Schweißung mit ZFP. – Für Exzentrizitäten siehe Anmerkung 1 unten.
100		2) Voll durchgeschweißte Stumpfnäht.	2) – Nähte nicht blecheben geschliffen – Schweißnahtan- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließen zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen. – Beidseitige Schweißung. – Für Exzentrizitäten siehe Anmerkung 1 unten.
100		3) Kreuzstoß mit voll durchgeschweißten K-Nähten.	3) – Anstellwinkel $\leq 60^\circ$. – Für Exzentrizitäten siehe Anmerkung 1 unten.
100		4) Unbelastete Kehlnähte.	4) Anstellwinkel $\leq 60^\circ$, siehe auch Anmerkung 2.
100		5) Enden von Anschlussblechen und Längssteifen.	5) Anstellwinkel $\leq 60^\circ$, siehe auch Anmerkung 2
100		6) Enden von Gurtlamellen und ähnliche Anschlüsse.	6) Anstellwinkel $\leq 60^\circ$, siehe auch Anmerkung 2
90		7) Kreuzstöße mit belasteten Kehlnähten.	7) – Anstellwinkel $\leq 60^\circ$. – Für Exzentrizitäten siehe Anmerkung 1 unten. – siehe auch Anmerkung 2

ANMERKUNG 1 In Tabelle B.1 sind keine Exzentrizitäten enthalten; diese müssen bei der Spannungsermittlung explizit berücksichtigt werden.

ANMERKUNG 2 Tabelle B.1 gilt nicht für Rissbildung an der Nahtwurzel, gefolgt von Risswachstum durch die Naht.

ANMERKUNG 3 Anstellwinkel der Schweißnaht ist in EN 1090 definiert.

DIN EN 1993-1-9/NA

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatzvermerk
siehe unten

**Nationaler Anhang –
National festgelegte Parameter –
Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-9: Ermüdung**

National Annex –
Nationally determined parameters –
Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-9: Fatigue

Annexe Nationale –
Paramètres déterminés au plan national –
Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 1-9: Fatigue

Ersatzvermerk

Mit DIN EN 1993-1-1:2010-12, DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-3:2010-12, DIN EN 1993-1-3/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-5:2010-12, DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-8:2010-12, DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-9:2010-12, DIN EN 1993-1-10:2010-12, DIN EN 1993-1-10/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-11:2010-12 und DIN EN 1993-1-11/NA:2010-12 Ersatz für DIN 18800-1:2008-11;
mit DIN EN 1993-1-1:2010-12, DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-8:2010-12, DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-9:2010-12, DIN EN 1993-1-10:2010-12 und DIN EN 1993-1-10/NA:2010-12 Ersatz für DIN V ENV 1993-1-1:1993-04, DIN V ENV 1993-1-1/A1:2002-05 und DIN V ENV 1993-1-1/A2:2002-05

Gesamtumfang 6 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

DIN EN 1993-1-9/NA:2010-12

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung“ erstellt.

Dieses Dokument bildet den Nationalen Anhang zu DIN EN 1993-1-9:2010-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-9: Ermüdung*.

Die Europäische Norm EN 1993-1-9 räumt die Möglichkeit ein, eine Reihe von sicherheitsrelevanten Parametern national festzulegen. Diese national festzulegenden Parameter (en: *Nationally determined parameters*, NDP) umfassen alternative Nachweisverfahren und Angaben einzelner Werte, sowie die Wahl von Klassen aus gegebenen Klassifizierungssystemen. Die entsprechenden Textstellen sind in der Europäischen Norm durch Hinweise auf die Möglichkeit nationaler Festlegungen gekennzeichnet. Eine Liste dieser Textstellen befindet sich im Unterabschnitt NA 2.1. Darüber hinaus enthält dieser nationale Anhang ergänzende nicht widersprechende Angaben zur Anwendung von DIN EN 1993-1-9:2010-12 (en: *non-contradictory complementary information*, NCI).

Dieser Nationale Anhang ist Bestandteil von DIN EN 1993-1-9:2010-12.

DIN EN 1993-1-9:2010-12 und dieser Nationale Anhang DIN EN 1993-1-9/NA:2010-12 ersetzen:

— zusammen mit DIN EN 1993-1-1, DIN EN 1993-1-1/NA, DIN EN 1993-1-3, DIN EN 1993-1-3/NA, DIN EN 1993-1-5, DIN EN 1993-1-5/NA, DIN EN 1993-1-8, DIN EN 1993-1-8/NA, DIN EN 1993-1-10, DIN EN 1993-1-10/NA, DIN EN 1993-1-11 und DIN EN 1993-1-11/NA die nationale Norm DIN 18800-1:2008-11.

Änderungen

Gegenüber DIN 18800-1:2008-11, DIN V ENV 1993-1-1:1993-04, DIN V ENV 1993-1-1/A1:2002-05 und DIN V ENV 1993-1-1/A2:2002-05 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

a) nationale Festlegungen zu DIN EN 1993-1-9:2010-12 aufgenommen.

Frühere Ausgaben

DIN 1050: 1934-08, 1937xxxx-07, 1946-10, 1957x-12, 1968-06

DIN 1073: 1928-04, 1931-09, 1941-01, 1974-07

DIN 1073 Beiblatt: 1974-07

DIN 1079: 1938-01, 1938-11, 1970-09

DIN 4100: 1931-05, 1933-07, 1934xxxx-08, 1956-12, 1968-12

DIN 4101: 1937xxx-07, 1974-07

DIN 18800-1: 1981-03, 1990-11, 2008-11

DIN 18800-1/A1: 1996-02

DIN V ENV 1993-1-1: 1993-04

DIN V ENV 1993-1-1/A1: 2002-05

DIN V ENV 1993-1-1/A2: 2002-05

NA 1 Anwendungsbereich

Dieser Nationale Anhang enthält nationale Festlegungen für Nachweisverfahren zur Prüfung der Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen, Verbindungen und Anschlüssen, die unter Ermüdungsbeanspruchung stehen, die bei der Anwendung von DIN EN 1993-1-9:2010-12 in Deutschland zu berücksichtigen sind.

Dieser Nationale Anhang gilt nur in Verbindung mit DIN EN 1993-1-9:2010-12.

NA 2 Nationale Festlegungen zur Anwendung von DIN EN 1993-1-9:2010-12

NA 2.1 Allgemeines

DIN EN 1993-1-9:2010-12 weist an den folgenden Textstellen die Möglichkeit nationaler Festlegungen aus (NDP, en: *Nationally determined parameters*).

- 1.1(2);
- 2(2);
- 2(4);
- 3(2);
- 3(7);
- 5(2);
- 6.1(1);
- 6.2(2);
- 7.1(3);
- 7.1(5);
- 8(4).
- 6.1(1);
- 6.2(2);
- 7.1(3);
- 7.1(5);
- 8(4).

Darüber hinaus enthält NA 2.2 ergänzende nicht widersprechende Angaben zur Anwendung von DIN EN 1993-1-9:2010-12. Diese sind durch ein vorangestelltes „NCI“ (en: *non-contradictory complementary information*) gekennzeichnet.

- 1.2
- Literaturhinweise

DIN EN 1993-1-9/NA:2010-12

NA 2.2 Nationale Festlegungen

Die nachfolgende Nummerierung entspricht der Nummerierung von DIN EN 1993-1-9:2010-12 bzw. ergänzt diese.

NDP zu 1.1(2) Anmerkung 1

Es gilt DIN EN 1090-2. Weitere Toleranzen für spezielle Kerbfälle sind in den Tabellen 8.1 bis 8.10 von DIN EN 1993-1-9:2010-12 allgemein und für Stahlbrücken in DIN EN 1993-2:2010-12, Anhang C geregelt.

NDP zu 1.1(2) Anmerkung 2

Es gilt DIN EN 1090-1.

NCI zu 1.2 Normative Verweisungen

NA DIN EN 1993-2:2010-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 2: Stahlbrücken; Deutsche Fassung EN 1993-2:2006*

NDP zu 2(2) Anmerkung

Die Ermüdungslasten sind nach DIN EN 1993-1-9:2010-12, Anhang A entsprechend den Betriebsbedingungen zu ermitteln; weitere Hinweise sind in [1] angegeben.

NDP zu 2(4) Anmerkung

Die Anwendung von Ermüdungsfestigkeitswerten aus Versuchen bedarf eines bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweises (Zustimmung im Einzelfall oder allgemeine bauaufsichtliche Zulassung). Hinweise zur Bestimmung von Ermüdungsfestigkeiten sind in [1] angegeben.

NDP zu 3(2) Anmerkung 2

Die Festlegungen zu Inspektionsprogrammen erfolgen in den jeweiligen Nationalen Anhängen zu den für die Anwendung geltenden Normen (z. B. DIN EN 1993-2 bis DIN EN 1993-6).

NDP zu 3(7) Anmerkung

Im Allgemeinen ist das *Konzept der Schadenstoleranz* anzuwenden und das Inspektionsprogramm danach auszurichten. In Sonderfällen, in denen regelmäßige Inspektionen unzumutbar oder unmöglich sind, ist das *Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung* anzuwenden, siehe [1]. Weiteres ist den Normenteilen DIN EN 1993-2 bis DIN EN 1993-6 zu entnehmen. Für andere Fälle werden die in DIN EN 1993-1-9:2010-12, Tabelle 3.1 angegebenen Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Mf} für die Ermüdungsfestigkeit festgelegt.

NDP zu 5(2) Anmerkung 2

Die Regeln dürfen für Querschnitte der Klasse 4 angewendet werden, wenn nach den entsprechenden Anwendungsnormen unter häufigen Lasten kein Blech- bzw. Stegblechatmen auftritt.

NDP zu 6.1(1) Anmerkung

Informationen zu Nennspannungen, korrigierten Nennspannungen und Strukturspannungen sind in [1] angegeben.

NDP zu 6.2(2) Anmerkung

Es werden keine weiteren Hinweise gegeben.

NDP zu 7.1(3) Anmerkung 2

Hinweise zur Versuchsauswertung sind in [1] angegeben.

NDP zu 7.1(5) Anmerkung

Es werden keine weiteren Hinweise gegeben.

NDP zu 8(4) Anmerkung 2

Es werden keine weiteren Hinweise gegeben.

DIN EN 1993-1-9/NA:2010-12

NCI

Literaturhinweise

- [1] Stahlbau-Kalender 2006, Schwerpunkt: Dauerhaftigkeit, Kuhlmann, Ulrike (Hrsg.), Ernst und Sohn, Berlin

DIN EN 1993-1-10

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatzvermerk
siehe unten**Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und
Eigenschaften in Dickenrichtung;
Deutsche Fassung EN 1993-1-10:2005 + AC:2009**

Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-10: Material toughness and through-thickness properties;
German version EN 1993-1-10:2005 + AC:2009

Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Parie 1-10: Choix des qualités d'acier vis à vis de la ténacité et des propriétés dans le
sens de l'épaisseur;
Version allemande EN 1993-1-10:2005 + AC:2009

Ersatzvermerk

Ersatz für DIN EN 1993-1-10:2005-07;
mit DIN EN 1993-1-1:2010-12, DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-3:2010-12,
DIN EN 1993-1-3/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-5:2010-12, DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12,
DIN EN 1993-1-8:2010-12, DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-9:2010-12,
DIN EN 1993-1-9/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-10/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-11:2010-12 und
DIN EN 1993-1-11/NA:2010-12 Ersatz für DIN 18800-1:2008-11;
Ersatz für DIN EN 1993-1-10 Berichtigung 1:2010-05

Gesamtumfang 22 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

DIN EN 1993-1-10:2010-12

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 1993-1-10:2005 + AC:2009) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird.

Die Arbeiten auf nationaler Ebene wurden durch die Experten des NABau-Spiegelausschusses NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung (Sp CEN/TC 250/SC 3)“ begleitet.

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 16. April 2005 angenommen.

Die Norm ist Bestandteil einer Reihe von Einwirkungs- und Bemessungsnormen, deren Anwendung nur im Paket sinnvoll ist. Dieser Tatsache wird durch das Leitpapier L der Kommission der Europäischen Gemeinschaft für die Anwendung der Eurocodes Rechnung getragen, indem Übergangsfristen für die verbindliche Umsetzung der Eurocodes in den Mitgliedsstaaten vorgesehen sind. Die Übergangsfristen sind im Vorwort dieser Norm angegeben.

Die Anwendung dieser Norm gilt in Deutschland in Verbindung mit dem Nationalen Anhang.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN [und/oder die DKE] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Der Beginn und das Ende des hinzugefügten oder geänderten Textes wird im Text durch die Textmarkierungen AC AC angezeigt.

Änderungen

Gegenüber DIN V ENV 1993-1-1:1993-04, DIN V ENV 1993-1-1/A1:2002-05 und DIN V ENV 1993-1-1/A2:2002-05 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Vornorm-Charakter wurde angenommen;
- b) in Teil 1-1, Teil 1-8, Teil 1-9 und Teil 1-10 aufgeteilt;
- c) die Stellungnahmen der nationalen Normungsinstitute wurden eingearbeitet und der Text vollständig überarbeitet und in einen eigenständigen Normteil überführt.

Gegenüber DIN EN 1993-1-10:2005-07, DIN EN 1993-1-10 Berichtigung 1:2010-05 und DIN 18800-1:2008-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) auf europäisches Bemessungskonzept umgestellt;
- b) Ersatzvermerke korrigiert;
- c) Vorgänger-Norm mit der Berichtigung 1 konsolidiert;
- d) redaktionelle Änderungen durchgeführt.

Frühere Ausgaben

DIN 1050: 1934-08, 1937xxxx-07, 1946-10, 1957x-12, 1968-06

DIN 1073: 1928-04, 1931-09, 1941-01, 1974-07

DIN 1073 Beiblatt: 1974-07

DIN 1079: 1938-01, 1938-11, 1970-09

DIN 4100: 1931-05, 1933-07, 1934xxxx-08, 1956-12, 1968-12

DIN 4101: 1937xxx-07, 1974-07

DIN 18800-1: 1981-03, 1990-11, 2008-11

DIN 18800-1/A1: 1996-02

DIN V ENV 1993-1-1: 1993-04

DIN V ENV 1993-1-1/A1: 2002-05

DIN V ENV 1993-1-1/A2: 2002-05

DIN EN 1993-1-10: 2005-07

DIN EN 1993-1-10 Berichtigung 1: 2010-05

DIN EN 1993-1-10:2010-12

— Leerseite —

EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE

EN 1993-1-10

Mai 2005

+AC

März 2009

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatz für ENV 1993-1-1:1992

Deutsche Fassung

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung

Eurocode 3: Design of steel structures —
Part 1-10: Material toughness and through-Thickness
properties

Eurocode 3: Calcul des structures en acier —
Partie 1-10: Choix des qualités d'acier vis à vis de la
ténacité et des propriétés dans le sens de l'épaisseur

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 23. April 2004 angenommen.

Die Berichtigung tritt am 25. März 2009 in Kraft und wurde in EN 1993-1-10:2005 eingearbeitet.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

DIN EN 1993-1-10:2010-12
EN 1993-1-10:2005 + AC:2009 (D)

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Hintergrund des Eurocode-Programms	3
Status und Gültigkeitsbereich der Eurocodes	4
Nationale Fassungen der Eurocodes	5
Verbindung zwischen den Eurocodes und den harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte (EN und ETAZ)	5
Nationaler Anhang zu EN 1993-1-10	5
1 Allgemeines	6
1.1 Anwendungsbereich	6
1.2 Normative Verweisungen	6
1.3 Begriffe	7
1.4 Formelzeichen	8
2 Auswahl der Stahlsorten im Hinblick auf die Bruchzähigkeit	8
2.1 Allgemeines	8
2.2 Vorgehensweise	9
2.3 Zulässige Erzeugnisdicken	11
2.3.1 Allgemeines	11
2.3.2 Ermittlung der zulässigen Erzeugnisdicken	12
2.4 Anwendung der Bruchmechanik	13
3 Auswahl der Stahlsorten im Hinblick auf Eigenschaften in Dickenrichtung	14
3.1 Allgemeines	14
3.2 Vorgehensweise	15

Vorwort

Dieses Dokument (EN 1993-1-10:2005 + AC:2009) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird. CEN/TC 250 ist auch für alle anderen Eurocode-Teile verantwortlich.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis November 2005, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis März 2010 zurückgezogen werden.

Dieses Dokument ersetzt ENV 1993-1-1.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Hintergrund des Eurocode-Programms

1975 beschloss die Kommission der Europäischen Gemeinschaften, für das Bauwesen ein Programm auf der Grundlage des Artikels 95 der Römischen Verträge durchzuführen. Das Ziel des Programms war die Beseitigung technischer Handelshemmnisse und die Harmonisierung technischer Normen.

Im Rahmen dieses Programms leitete die Kommission die Bearbeitung von harmonisierten technischen Regelwerken für die Tragwerksplanung von Bauwerken ein, die im ersten Schritt als Alternative zu den in den Mitgliedsländern geltenden Regeln dienen und sie schließlich ersetzen sollten.

15 Jahre lang leitete die Kommission mit Hilfe eines Steuerkomitees mit Repräsentanten der Mitgliedsländer die Entwicklung des Eurocode-Programms, das zu der ersten Eurocode-Generation in den 80'er Jahren führte.

Im Jahre 1989 entschieden sich die Kommission und die Mitgliedsländer der Europäischen Union und der EFTA, die Entwicklung und Veröffentlichung der Eurocodes über eine Reihe von Mandaten an CEN zu übertragen, damit diese den Status von Europäischen Normen (EN) erhielten. Grundlage war eine Vereinbarung¹⁾ zwischen der Kommission und CEN. Dieser Schritt verknüpft die Eurocodes de facto mit den Regelungen der Ratsrichtlinien und Kommissionsentscheidungen, die die Europäischen Normen behandeln (z. B. die Ratsrichtlinie 89/106/EWG zu Bauprodukten, die Bauproduktenrichtlinie, die Ratsrichtlinien 93/37/EWG, 92/50/EWG und 89/440/EWG zur Vergabe öffentlicher Aufträge und Dienstleistungen und die entsprechenden EFTA-Richtlinien, die zur Einrichtung des Binnenmarktes eingeleitet wurden).

Das Eurocode-Programm umfasst die folgenden Normen, die in der Regel aus mehreren Teilen bestehen:

EN 1990, *Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung*;

EN 1991, *Eurocode 1: Einwirkung auf Tragwerke*;

EN 1992, *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbetonbauten*;

EN 1993, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten*;

EN 1994, *Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Stahl-Beton-Verbundbauten*;

EN 1995, *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten*;

1) Vereinbarung zwischen der Kommission der Europäischen Gemeinschaft und dem Europäischen Komitee für Normung (CEN) zur Bearbeitung der Eurocodes für die Tragwerksplanung von Hochbauten und Ingenieurbauwerken (BC/CEN/03/89).

DIN EN 1993-1-10:2010-12 EN 1993-1-10:2005 + AC:2009 (D)

EN 1996, *Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten*;

EN 1997, *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik*;

EN 1998, *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben*;

EN 1999, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumkonstruktionen*.

Die Europäischen Normen berücksichtigen die Verantwortlichkeit der Bauaufsichtsorgane in den Mitgliedsländern und haben deren Recht zur nationalen Festlegung sicherheitsbezogener Werte berücksichtigt, so dass diese Werte von Land zu Land unterschiedlich bleiben können.

Status und Gültigkeitsbereich der Eurocodes

Die Mitgliedsländer der EU und von EFTA betrachten die Eurocodes als Bezugsdokumente für folgende Zwecke:

- als Mittel zum Nachweis der Übereinstimmung der Hoch- und Ingenieurbauten mit den wesentlichen Anforderungen der Richtlinie 89/106/EWG, besonders mit der wesentlichen Anforderung Nr. 1: Mechanischer Festigkeit und Standsicherheit und der wesentlichen Anforderung Nr. 2: Brandschutz;
- als Grundlage für die Spezifizierung von Verträgen für die Ausführung von Bauwerken und dazu erforderlichen Ingenieurleistungen;
- als Rahmenbedingung für die Herstellung harmonisierter, technischer Spezifikationen für Bauprodukte (EN's und ETA's)

Die Eurocodes haben, da sie sich auf Bauwerke beziehen, eine direkte Verbindung zu den Grundlagendokumenten²⁾, auf die in Artikel 12 der Bauproduktenrichtlinie hingewiesen wird, wenn sie auch anderer Art sind als die harmonisierten Produktnormen³⁾. Daher sind die technischen Gesichtspunkte, die sich aus den Eurocodes ergeben, von den Technischen Komitees von CEN und den Arbeitsgruppen von EOTA, die an Produktnormen arbeiten, zu beachten, damit diese Produktnormen mit den Eurocodes vollständig kompatibel sind.

Die Eurocodes liefern Regelungen für den Entwurf, die Berechnung und Bemessung von kompletten Tragwerken und Baukomponenten, die sich für die tägliche Anwendung eignen. Sie gehen auf traditionelle Bauweisen und Aspekte innovativer Anwendungen ein, liefern aber keine vollständigen Regelungen für ungewöhnliche Baulösungen und Entwurfsbedingungen, wofür Spezialistenbeiträge erforderlich sein können.

2) Entsprechend Artikel 3.3 der Bauproduktenrichtlinie sind die wesentlichen Angaben in Grundlagendokumenten zu konkretisieren, um damit die notwendigen Verbindungen zwischen den wesentlichen Anforderungen und den Mandaten für die Erstellung harmonisierter Europäischer Normen und Richtlinien für die Europäische Zulassungen selbst zu schaffen.

3) Nach Artikel 12 der Bauproduktenrichtlinie hat das Grundlagendokument

- a) die wesentliche Anforderung zu konkretisieren, in dem die Begriffe und, soweit erforderlich, die technische Grundlage für Klassen und Anforderungshöhen vereinheitlicht werden,
- b) die Methode zur Verbindung dieser Klasse oder Anforderungshöhen mit technischen Spezifikationen anzugeben, z. B. rechnerische oder Testverfahren, Entwurfsregeln,
- c) als Bezugsdokument für die Erstellung harmonisierter Normen oder Richtlinien für Europäische Technische Zulassungen zu dienen.

Die Eurocodes spielen de facto eine ähnliche Rolle für die wesentliche Anforderung Nr. 1 und einen Teil der wesentlichen Anforderung Nr. 2.

Nationale Fassungen der Eurocodes

Die Nationale Fassung eines Eurocodes enthält den vollständigen Text des Eurocodes (einschließlich aller Anhänge), so wie von CEN veröffentlicht, mit möglicherweise einer nationalen Titelseite und einem nationalen Vorwort sowie einem Nationalen Anhang.

Der Nationale Anhang darf nur Hinweise zu den Parametern geben, die im Eurocode für nationale Entscheidungen offen gelassen wurden. Diese national festzulegenden Parameter (NDP) gelten für die Tragwerksplanung von Hochbauten und Ingenieurbauten in dem Land, in dem sie erstellt werden. Sie umfassen:

- Zahlenwerte für γ -Faktoren und/oder Klassen, wo die Eurocodes Alternativen eröffnen;
- Zahlenwerte, wo die Eurocodes nur Symbole angeben;
- landesspezifische, geographische und klimatische Daten, die nur für ein Mitgliedsland gelten, z. B. Schneekarten;
- Vorgehensweise, wenn die Eurocodes mehrere zur Wahl anbieten;
- Verweise zur Anwendung des Eurocodes, soweit diese ergänzen und nicht widersprechen.

Verbindung zwischen den Eurocodes und den harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte (EN und ETAZ)

Die harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte und die technischen Regelungen für die Tragwerksplanung⁴⁾ müssen konsistent sein. Insbesondere sollten die Hinweise, die mit den CE-Zeichen an den Bauprodukten verbunden sind und die die Eurocodes in Bezug nehmen, klar erkennen lassen, welche national festzulegenden Parameter (NDP) zugrunde liegen.

Nationaler Anhang zu EN 1993-1-10

Diese Norm enthält alternative Methoden, Zahlenangaben und Empfehlungen in Verbindung mit Anmerkungen, die darauf hinweisen, wo Nationale Festlegungen getroffen werden können. EN 1993-1-10 wird bei der nationalen Einführung einen Nationalen Anhang enthalten, der alle national festzulegenden Parameter enthält, die für die Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten im jeweiligen Land erforderlich sind.

Nationale Festlegungen werden in EN 1993-1-10 in folgenden Abschnitten ermöglicht:

- 2.2(5);
- 3.1(1).

4) Siehe Artikel 3.3 und Art. 12 der Bauproduktenrichtlinie, ebenso wie 4.2, 4.3.1, 4.3.2 und 5.2 des Grundlagendokumentes Nr. 1

DIN EN 1993-1-10:2010-12
EN 1993-1-10:2005 + AC:2009 (D)

1 Allgemeines

1.1 Anwendungsbereich

(1) EN 1993-1-10 enthält eine Anleitung für die Auswahl der Stahlsorten im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung, wenn bei der Fertigung von Schweißkonstruktionen auf die Gefahr von Terrassenbruch zu achten ist.

(2) Abschnitt 2 gilt für Stähle S235 bis S690. Abschnitt 3 gilt nur für Stähle S235 bis S460.

ANMERKUNG Der Anwendungsbereich von EN 1993-1-1 ist auf Stähle S235 bis S460 begrenzt.

(3) Die Regelungen und Hinweise in den Abschnitten 2 und 3 gelten nur, wenn die Ausführung der Stahlkonstruktion nach EN 1090 erfolgt.

1.2 Normative Verweisungen

(1) Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ANMERKUNG In normativen Abschnitten wird auf die folgenden Europäischen Normen, die bereits veröffentlicht oder in Vorbereitung sind, verwiesen:

EN 1011-2, *Empfehlungen für das Schweißen von Metallen — Teil 2: Empfehlungen für das Lichtbogenschweißen von ferritischen Stählen*

EN 1090, *Anforderungen für die Ausführung von Stahlbauten*

EN 1990, *Grundlagen der Tragwerksplanung*

EN 1991, *Einwirkungen auf Tragwerke*

EN 1998, *Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben*

EN 10002, *Metallische Werkstoffe — Zugversuch*

EN 10025, *Warmgewalzte Erzeugnisse aus unlegierten Baustählen. Technische Lieferbedingungen*

EN 10045-1, *Metalle — Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy — Teil 1: Prüfverfahren*

AC gestrichener Text **AC**

EN 10160, *Ultraschallprüfung von Flacherzeugnissen aus Stahl mit einer Dicke größer oder gleich 6 mm (Reflexionsverfahren)*

EN 10164, *Stahlerzeugnisse mit verbesserten Verformungseigenschaften senkrecht zur Erzeugnisoberfläche — Technische Lieferbedingungen*

EN 10210-1, *Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen — Teil 1: Technische Lieferanforderungen*

EN 10219-1, *Kaltgefertigte geschweißte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen — Teil 1: Technische Lieferbedingungen*

1.3 Begriffe

1.3.1

KV -Wert

der KV -Wert ist die Kerbschlagarbeit KV gestrichener Text in J, die für den Bruch einer Charpy V-Kerbschlagprobe bei einer bestimmten Prüftemperatur T benötigt wird; die Prüfanforderung in den Normen für Stahlerzeugnisse spezifiziert im Allgemeinen, dass die Kerbschlagarbeit für eine festgelegte Prüftemperatur nicht geringer als 27 J ist

1.3.2

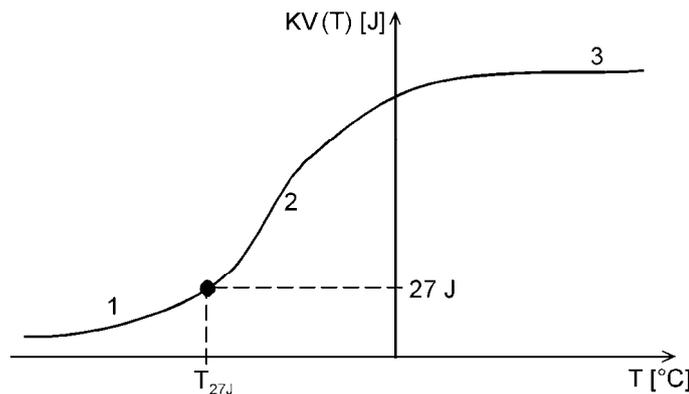
Übergangstemperaturbereich

der Temperaturbereich im Zähigkeits-Temperaturdiagramm $KV(T)$, in dem die Zähigkeit des Werkstoffes mit der Temperatur abfällt und die Versagensart von zäh nach spröde wechselt; der in den Produktnormen geforderte Zähigkeitswert T_{27J} liegt in der Nähe der Tieflage des Übergangsbereichs

1.3.3

Hochlagenbereich

der Temperaturbereich im Zähigkeits-Temperaturdiagramm $KV(T)$, in dem Stahlbauteile elastisch-plastisches Verhalten mit duktilem Bruchverhalten zeigen; dabei können fertigungsbedingt kleine Werkstofffehler oder Schweißnahtfehler vorhanden sein



Legende

- 1 Tieflagenbereich
- 2 Übergangsbereich
- 3 Hochlagenbereich

Bild 1.1 — Kerbschlagarbeit in Abhängigkeit von der Temperatur

1.3.4

T_{27J}

Temperatur, bei der in der Kerbschlagprüfung mit Charpy-V-Kerbschlagproben mindestens eine Kerbschlagarbeit $KV = 27J$ erreicht wird

1.3.5

Z-Wert

Prozentwert der Brucheinschnürung einer Zugprobe nach EN 10002, für die Duktilitätsprüfung in Dickenrichtung

1.3.6

K_{Ic}

Der kritische Wert des Spannungsintensitätsfaktors in $N/mm^{3/2}$ als Maß für die Bruchzähigkeit für den ebenen Dehnungsfall und für elastisches Werkstoffverhalten.

DIN EN 1993-1-10:2010-12
EN 1993-1-10:2005 + AC:2009 (D)

ANMERKUNG International werden für den Spannungsintensitätsfaktor K die Dimensionen $\text{N/mm}^{3/2}$ und $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ (d. h. $\text{MN/m}^{3/2}$), wobei $1 \text{ N/mm}^{3/2} = 0,032 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, verwendet.

1.3.7

Kaltumformungsgrad

bleibende Dehnung aus Kaltumformung in Prozent

1.4 Formelzeichen

$\langle \text{AC} \rangle$ $KV(T)$ $\langle \text{AC} \rangle$ Kerbschlagarbeit in J bei der Prüfung einer V-Kerbschlagprobe bei der Temperatur T ;

Z Z-Güte, in %;

T Temperatur in $^{\circ}\text{C}$;

T_{Ed} Bezugstemperatur;

δ Risspitzenöffnung (CTOD) in mm, an einer Kleinprobe zur Bestimmung der elastisch-plastischen Bruchzähigkeit gemessen;

J Maß für die elastisch-plastische Bruchzähigkeit (J -Integral) in N/mm , als Integral über den Rand eines Gebietes ermittelt, das die Rissfront von einem Rissufer zum anderen umfasst;

$\langle \text{AC} \rangle$ K Spannungsintensitätsfaktor; $\langle \text{AC} \rangle$

K_{1c} $\langle \text{AC} \rangle$ der kritische Wert des Spannungsintensitätsfaktors in $\text{N/mm}^{3/2}$ als Maß für die Bruchzähigkeit für den ebenen Dehnungsfall und für elastisches Werkstoffverhalten; $\langle \text{AC} \rangle$

ε_{cf} Kaltumformungsgrad in Prozent;

σ_{Ed} Bemessungswert der angelegten Spannungen, die zusammen mit der Bezugstemperatur T_{Ed} auftreten.

2 Auswahl der Stahlsorten im Hinblick auf die Bruchzähigkeit

2.1 Allgemeines

(1) Die Regelungen in Abschnitt 2 sind für die Auswahl der Stahlsorten bei Neukonstruktionen und nicht für die Einschätzung der Eignung von eingebautem Stahl bestimmt. Die Regelungen eignen sich zur Auswahl der Stahlsorte mit Bezug auf die Europäischen Normen für Stahlerzeugnisse, die in EN 1993-1-1 aufgeführt sind.

(2) Die Regelungen gelten für geschweißte und ungeschweißte Bauteile mit reiner oder teilweiser Zugbeanspruchung und mit Ermüdungsbeanspruchung.

ANMERKUNG Die Regelungen können für Bauteile, die nicht den Bedingungen wie Zugbeanspruchung, Schweißung und Ermüdung unterliegen, auf der sicheren Seite liegen. In diesen Fällen kann die Anwendung der Bruchmechanik zweckmäßig sein, siehe 2.4. Für Bauteile, die nur auf Druck beansprucht werden, braucht keine Bruchzähigkeit spezifiziert zu werden.

(3) $\langle \text{AC} \rangle$ P $\langle \text{AC} \rangle$ Die Regelungen gelten für Stahlsorten in ihren jeweiligen Gütegruppen nach den Normen für Stahlerzeugnisse. Stahlsorten, die nach dieser Regelung nicht ausreichen, sollten nicht verwendet werden, auch wenn Einzelprüfungen bestimmter Lieferungen ausreichende Zähigkeitskennwerte nachweisen.

2.2 Vorgehensweise

- (1) Die Stahlsorte ist in der Regel unter Berücksichtigung folgender Gesichtspunkte auszuwählen.
 - (i) Eigenschaften des Stahlwerkstoffs:
 - Streckgrenze $f_y(t)$ abhängig von der Erzeugnisdicke;
 - Stahlgüte ausgedrückt durch die Zähigkeitswerte T_{27J} oder T_{40J} .
 - (ii) Bauteileigenschaften:
 - Bauteilform und Detailgestaltung;
 - Kerbeffekt entsprechend den Kerbfällen in EN 1993-1-9;
 - Erzeugnisdicke (t);
 - Geeignete Annahmen zu rissähnlichen Fehlern (z. B. durchgehende Risse oder halbelliptische Oberflächenrisse).
 - (iii) Bemessungssituation:
 - Bemessungswert der niedrigsten Bauteiltemperatur;
 - Maximale Spannungen aus ständigen und veränderlichen Einwirkungen, die zu der Bemessungssituation nach (4) gehören;
 - Geeignete Annahmen für Eigenspannungen;
 - soweit zutreffend: Annahmen zum ermüdungsbedingtem Risswachstum in dem Betriebszeitintervall zwischen Bauwerksprüfungen;
 - soweit zutreffend: Dehnungsgeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}$ aus Stoßwirkungen in Sonderlastfällen;
 - soweit zutreffend: Kaltumformungsgrad ε_{cf} .
- (2) Für den Sicherheitsnachweis bei der Auswahl der Stahlsorten gelten die Regelungen in 2.3 und Tabelle 2.1.
- (3) Als Alternative zum Zähigkeitsnachweis mit Tabellenwerten können folgende Methoden angewendet werden:
 - die bruchmechanische Methode:
der Bemessungswert der Zähigkeitsanforderung liegt unterhalb des Bemessungswertes der Zähigkeitseigenschaft;
 - Versuchsnachweis:
dieser kann mit einem oder mehreren bauteilähnlichen Prüfkörpern durchgeführt werden. Aus Gründen der Realitätsnähe werden die Prüfkörper in der Regel ähnlich wie die zu beurteilende Konstruktion hergestellt und belastet.
- (4) Folgende Bemessungssituation ist in der Regel zugrunde zu legen:
 - (i) Die Einwirkungen sind mit folgender Kombination anzusetzen:

DIN EN 1993-1-10:2010-12
EN 1993-1-10:2005 + AC:2009 (D)

$$E_d = E \{A[T_{Ed}] \text{ "+" } \sum G_k \text{ "+" } \psi_1 Q_{k1} \text{ "+" } \sum \psi_{2,i} Q_{ki}\} \quad (2.1)$$

wobei die Leiteinwirkung A die Wirkung der Bezugstemperatur T_{Ed} ist, die in der Abminderung der Werkstoffzähigkeit des betrachteten Bauteils besteht und sich auch in Spannungen aus Behinderung der Temperaturbewegungen äußern kann. $\sum G_k$ sind die ständigen Einwirkungen, $\psi_1 Q_k$ ist der häufig auftretende Wert der veränderlichen Last und $\psi_{2,i} Q_{ki}$ sind die quasiständigen Anteile der veränderlichen Begleitwirkungen, die zusammen die Höhe der Spannungen im Werkstoff bestimmen.

(ii) Die Kombinationsbeiwerte ψ_1 und $\psi_{2,i}$ sind entsprechend EN 1990 anzunehmen.

(iii) Die maximale angelegte Spannung σ_{Ed} ist als Nennspannung an der Stelle der erwarteten Rissentstehung für die Einwirkungskombinationen zu bestimmen. Die ständigen und veränderlichen Einwirkungen sind in EN 1991 geregelt.

ANMERKUNG 1 Die zugrunde gelegte Einwirkungskombination entspricht einer außergewöhnlichen Bemessungssituation, da gleichzeitig das Auftreten der niedrigsten Bauwerkstemperatur, ungünstiger Rissgrößen, Rissstelle und Werkstoffeigenschaften angenommen wird.

ANMERKUNG 2 σ_{Ed} kann Spannungen aus Behinderung von Bauteilbewegungen infolge Temperaturdifferenzen enthalten.

ANMERKUNG 3 Da die Bezugstemperatur T_{Ed} die Leiteinwirkung darstellt, wird die maximal angelegte Spannung σ_{Ed} 75% der Streckgrenze im Allgemeinen nicht überschreiten.

(5) Die Bezugstemperatur T_{Ed} an der potenziellen Rissstelle wird in der Regel mit folgender Beziehung ermittelt:

$$T_{Ed} = T_{md} + \Delta T_r + \Delta T_\sigma + \Delta T_R + \Delta T_{\dot{\epsilon}} + \Delta T_{\epsilon_{cf}} \quad (2.2)$$

Dabei ist

T_{md} die niedrigste Lufttemperatur mit spezifizierter Wiederkehrperiode, siehe EN 1991-1-5;

ΔT_r die Temperaturverschiebung infolge von Strahlungsverlusten, siehe EN 1991-1-5;

ΔT_σ die Temperaturverschiebung infolge der Spannungen und der Streckgrenze des Werkstoffs, der angenommenen rissähnlichen Imperfektionen, der Bauteilform und der Abmessungen, siehe 2.4(3);

ΔT_R der zusätzliche Sicherheitsterm zur Anpassung an andere Zuverlässigkeitsanforderungen als zugrunde gelegt;

$\Delta T_{\dot{\epsilon}}$ die Temperaturverschiebung für andere Dehnungsgeschwindigkeiten als der zugrunde gelegten Geschwindigkeit $\dot{\epsilon}_0$, siehe Gleichung (2.3);

$\Delta T_{\epsilon_{cf}}$ die Temperaturverschiebung infolge des Kaltumformungsgrades ϵ_{cf} , siehe Gleichung (2.4).

ANMERKUNG 1 Der Sicherheitsterm ΔT_R , mit dem die Bezugstemperatur T_{Ed} an andere Zuverlässigkeitsanforderungen angepasst werden kann, darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Bei Anwendung der Tabellenwerte in 2.3 wird $\Delta T_R = 0 \text{ °C}$ empfohlen.

ANMERKUNG 2 Zur Bestimmung der Tabellenwerte in 2.3 wurde für die Temperaturverschiebung ΔT_σ eine standardisierte Kurve benutzt, die die Bemessungswerte der \overline{AC} Spannungsintensitätsfaktorfunktion \overline{AC} K infolge angelegter Spannungen σ_{Ed} und Eigenspannungen einhüllt und die Wallin-Sanz-Korrelation zwischen der \overline{AC} Spannungsintensitätsfaktorfunktion \overline{AC} K und der Temperatur T einschließt. Bei Anwendung der Tabellenwerte in 2.3 darf $\Delta T_\sigma = 0 \text{ °C}$ angenommen werden.

ANMERKUNG 3 Der Nationale Anhang kann die Spanne zwischen der Bezugstemperatur T_{Ed} und der Prüftemperatur begrenzen und die Spanne von σ_{Ed} festlegen, mit welcher der Gültigkeitsbereich der zulässigen Blechdicken in Tabelle 2.1 eingeschränkt werden kann.

ANMERKUNG 4 Im Nationalen Anhang kann die Anwendung von Tabelle 2.1 auf Stähle bis S460 begrenzt werden.

(6) Die Bezugsspannung σ_{Ed} ist in der Regel als Nennspannung mit Hilfe eines elastischen Tragwerkmodells zu berechnen. Nebenspannungen aus Zwängungen sind dabei zu berücksichtigen.

2.3 Zulässige Erzeugnisdicken

2.3.1 Allgemeines

(1) Tabelle 2.1 liefert die größten zulässigen Erzeugnisdicken als Funktion der Stahlfestigkeit, der Zähigkeit $\langle AC \rangle$ (KV -Wert), $\langle AC \rangle$ der Bezugsspannung σ_{Ed} und der Bezugstemperatur T_{Ed} .

(2) Den Tabellenwerten liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Es gelten die Zuverlässigkeitsanforderungen nach EN 1990 unter Zugrundelegung üblicher Lieferqualität;
- Als Dehnungsgeschwindigkeit wurde $\dot{\varepsilon}_0 = 4 \times 10^{-4}/s$ angesetzt. Dieser Wert deckt die dynamischen Effekte ab, die in üblichen kurzzeitigen und langzeitigen Bemessungssituationen auftreten können. Bei anderen Dehnungsgeschwindigkeiten $\dot{\varepsilon}$ (z. B. bei Stoßwirkungen) können die Tabellenwerte mit Eingangswerten T_{Ed} benutzt werden, die um den Wert $\Delta T_{\dot{\varepsilon}}$ zu tieferen Temperaturen hin verschoben werden:

$$\Delta T_{\dot{\varepsilon}} = -\frac{1440 - f_y(t)}{550} \times \left(\ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{1,5} \quad \text{in } ^\circ\text{C} \quad (2.3)$$

- Es wurden Werkstoffe mit $\varepsilon_{cf} = 0\%$ ohne Kaltumformung zugrunde gelegt. Kaltumformungen können berücksichtigt werden, indem die Werte T_{Ed} um den Wert $\Delta T_{\varepsilon_{cf}}$ zu tieferen Temperaturen hin verschoben werden:

$$\Delta T_{\varepsilon_{cf}} = -3 \times \varepsilon_{cf} \quad \text{in } ^\circ\text{C} \quad (2.4)$$

- Als Zähigkeitskennwerte werden die Nennwerte T_{27J} aus folgenden Produktnormen verwendet: EN 10025, $\langle AC \rangle$ gestrichener Text $\langle AC \rangle$ EN 10210-1 und EN 10219-1.

Für andere Werte wurde folgende Umrechnung benutzt:

$$T_{40J} = T_{27J} + 10 \quad \text{in } ^\circ\text{C} \quad (2.5)$$

$$T_{30J} = T_{27J} + 0 \quad \text{in } ^\circ\text{C}$$

- Für ermüdungsbeanspruchte Bauteile sind alle Kerbfälle von EN 1993-1-9 abgedeckt.

ANMERKUNG Die Ermüdung wurde berücksichtigt, indem zusätzlich zu einem Anfangsriss an der Kerbstelle des Bauteils ein Risswachstum aus einer Ermüdungsbelastung entsprechend einem Viertel des ertragbaren Ermüdungsschadens entsprechend EN 1993-1-9 angesetzt wurde. Dieser Ansatz erlaubt, die Anzahl der „sicheren Betriebszeitintervalle“ zwischen den Hauptprüfungen zu bestimmen, wenn diese für ausreichende Schadenstoleranz nach EN 1993-1-9 festzulegen sind. Die erforderliche Anzahl n von Hauptprüfungen hängt von den γ -Faktoren γ_{FF} und γ_{Mf} für den Ermüdungsnachweis nach EN 1993-1-9 nach folgender Beziehung ab $n = \frac{4}{(\gamma_{FF} \gamma_{Mf})^m} - 1$, wobei $m = 5$ für

langlebige Bauwerke wie Brücken gilt. Das "sichere Betriebszeitintervall" zwischen Hauptprüfungen kann auch in der vollen Nutzungszeit des Bauwerks bestehen.

DIN EN 1993-1-10:2010-12
EN 1993-1-10:2005 + AC:2009 (D)

2.3.2 Ermittlung der zulässigen Erzeugnisdicken

(1) Tabelle 2.1 gibt die größten zulässigen Erzeugnisdicken in Abhängigkeit von drei Spannungsstufen an, die als Teile der Nennwerte der Streckgrenze $f_y(t)$ festgelegt sind:

- a) $\sigma_{Ed} = 0,75 f_y(t)$ in N/mm²;
 b) $\sigma_{Ed} = 0,50 f_y(t)$ in N/mm²; (2.6)
 c) $\sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t)$ in N/mm².

Hierbei darf der Blechdickenabhängige charakteristische Wert der Streckgrenze $f_y(t)$ entweder aus

$$f_y(t) = f_{y,nom} - 0,25 \frac{t}{t_0} \quad \text{in N/mm}^2$$

Dabei ist

t die Erzeugnisdicke, in mm;

$t_0 = 1$ mm.

oder direkt als $f_y(t) = R_{eH}$ -Werte aus den maßgebenden Werkstoffnormen bestimmt werden.

Die Tabellenwerte gelten für die Bezugstemperaturen:

- + 10 °C;
- 0 °C;
- - 10 °C;
- - 20 °C;
- - 30 °C;
- - 40 °C;
- - 50 °C.

Tabelle 2.1 — Größte zulässige Erzeugnisdicken t in mm

Stahlsorte		\overline{KV}		Bezugstemperatur T_{Ed} °C																							
Stahl- sorte	Stahl- güte- gruppe	bei T °C	J_{min}	$\sigma_{Ed} = 0,75 f_y(t)$								$\sigma_{Ed} = 0,50 f_y(t)$								$\sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t)$							
				10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50			
S235	JR	20	27	60	50	40	35	30	25	20	90	75	65	55	45	40	35	135	115	100	85	75	65	60			
	J0	0	27	90	75	60	50	40	35	30	125	105	90	75	65	55	45	175	155	135	115	100	85	75			
	J2	-20	27	125	105	90	75	60	50	40	170	145	125	105	90	75	65	200	200	175	155	135	115	100			
S275	JR	20	27	55	45	35	30	25	20	15	80	70	55	50	40	35	30	125	110	95	80	70	60	55			
	J0	0	27	75	65	55	45	35	30	25	115	95	80	70	55	50	40	165	145	125	110	95	80	70			
	J2	-20	27	110	95	75	65	55	45	35	155	130	115	95	80	70	55	200	190	165	145	125	110	95			
	M,N	-20	40	135	110	95	75	65	55	45	180	155	130	115	95	80	70	200	200	190	165	145	125	110			
	ML,NL	-50	27	185	160	135	110	95	75	65	200	200	180	155	130	115	95	230	200	200	200	190	165	145			
S355	JR	20	27	40	35	25	20	15	15	10	65	55	45	40	30	25	25	110	95	80	70	60	55	45			
	J0	0	27	60	50	40	35	25	20	15	95	80	65	55	45	40	30	150	130	110	95	80	70	60			
	J2	-20	27	90	75	60	50	40	35	25	135	110	95	80	65	55	45	200	175	150	130	110	95	80			
	K2,M,N	-20	40	110	90	75	60	50	40	35	155	135	110	95	80	65	55	200	200	175	150	130	110	95			
	ML,NL	-50	27	155	130	110	90	75	60	50	200	180	155	135	110	95	80	210	200	200	200	175	150	130			
S420	M,N	-20	40	95	80	65	55	45	35	30	140	120	100	85	70	60	50	200	185	160	140	120	100	85			
	ML,NL	-50	27	135	115	95	80	65	55	45	190	165	140	120	100	85	70	200	200	200	185	160	140	120			
S460	Q	-20	30	70	60	50	40	30	25	20	110	95	75	65	55	45	35	175	155	130	115	95	80	70			
	M,N	-20	40	90	70	60	50	40	30	25	130	110	95	75	65	55	45	200	175	155	130	115	95	80			
	QL	-40	30	105	90	70	60	50	40	30	155	130	110	95	75	65	55	200	200	175	155	130	115	95			
	ML,NL	-50	27	125	105	90	70	60	50	40	180	155	130	110	95	75	65	200	200	200	175	155	130	115			
	QL1	-60	30	150	125	105	90	70	60	50	200	180	155	130	110	95	75	215	200	200	200	175	155	130			
S690	Q	0	40	40	30	25	20	15	10	10	65	55	45	35	30	20	20	120	100	85	75	60	50	45			
	Q	-20	30	50	40	30	25	20	15	10	80	65	55	45	35	30	20	140	120	100	85	75	60	50			
	QL	-20	40	60	50	40	30	25	20	15	95	80	65	55	45	35	30	165	140	120	100	85	75	60			
	QL	-40	30	75	60	50	40	30	25	20	115	95	80	65	55	45	35	190	165	140	120	100	85	75			
	QL1	-40	40	90	75	60	50	40	30	25	135	115	95	80	65	55	45	200	190	165	140	120	100	85			
	QL1	-60	30	110	90	75	60	50	40	30	160	135	115	95	80	65	55	200	200	190	165	140	120	100			

ANMERKUNG 1 Bei Anwendung der Tabelle 2.1 darf linear interpoliert werden. Für die meisten Anwendungen liegen die σ_{Ed} -Werte zwischen $\sigma_{Ed} = 0,75 f_y(t)$ und $\sigma_{Ed} = 0,50 f_y(t)$. Die Werte für $\sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t)$ sind aus Interpolationsgründen mit angegeben. Extrapolationen in Bereiche außerhalb der angegebenen Grenzen sind nicht zulässig.

ANMERKUNG 2 Bei Bestellung von Erzeugnissen aus S690 sind die \overline{KV} T_{KV} -Werte \overline{KV} in der Regel anzugeben.

ANMERKUNG 3 Tabelle 2.1 liegen die nominellen \overline{KV} KV -Werte \overline{KV} in Walzrichtung zugrunde.

2.4 Anwendung der Bruchmechanik

(1) Bei Anwendung der Bruchmechanik können die Zähigkeitsanforderungen und die Bemessungswerte der Zähigkeitseigenschaften des Werkstoffs mit CTOD-Werten, J -Integralwerten, K_{Ic} -Werten oder \overline{KV} -Werten \overline{KV} ausgedrückt werden. Die Nachweise müssen in der Regel auf bruchmechanischen Kennwerten basieren.

DIN EN 1993-1-10:2010-12
EN 1993-1-10:2005 + AC:2009 (D)

(2) Folgende Bedingung ist einzuhalten:

$$\boxed{\text{AC}} T_{\text{Ed}} \geq T_{\text{Rd}} \boxed{\text{AC}} \quad (2.7)$$

Dabei ist

T_{Rd} die Temperatur, bei der ausreichend zuverlässig ein bestimmter Wert der Zähigkeitseigenschaft unter den Nachweisbedingungen angenommen werden kann.

(3) Für die Bruchauslösung ist ein geeigneter rissähnlicher Fehler anzunehmen, der die bruchmechanische Beanspruchung im Nettoquerschnitt erzeugt. Der rissähnliche Fehler muss in der Regel folgenden Bedingungen genügen:

- er ist an einer Stelle und mit einer Form anzunehmen, die zu dem betrachteten Kerbfall passen. Die Kerbfallskizzen in EN 1993-1-9 geben Hinweise zu geeigneten Rissstellen;
- bei Bauteilen, die nicht ermüdungsbelastet sind, ist der größte anzunehmende Fehler in der Regel so anzunehmen, dass er mit den Prüfmethode, die nach EN 1090 anzuwenden sind, ohne Reparatur im Bauteil belassen worden wäre. Die Lage des Fehlers ist an der Stelle mit höchstem Kerbeffekt anzusetzen;
- bei Bauteilen mit Ermüdungsbelastung ist die Fehlergröße aus einem Anfangsfehler und einem Zuwachs aus ermüdungsbedingtem Risswachstum zusammzusetzen. Die Größe des Anfangsfehlers ist dabei in der Regel so zu wählen, dass er dem kleinsten mit den Prüfmethode nach EN 1090 erkennbaren Fehler entspricht. Die Berechnung des ermüdungsbedingten Risswachstums ist mit geeigneten bruchmechanischen Verfahren durchzuführen. Für die Ermüdungslasten sind in der Regel die Betriebslasten während eines Betriebszeitintervalls zwischen den Hauptprüfungen oder der gesamten Nutzungsdauer je nach Voraussetzung anzunehmen.

(4) Wenn eine Bauteil Ausbildung den Kerbfällen in EN 1993-1-9 nicht zugeordnet werden kann, oder weitergehende Methoden für genauere Ergebnisse als die in Tabelle 2.1 nötig sind, ist in der Regel ein besonderer Einzelfallnachweis zu führen. Dieser Einzelfallnachweis kann mit Bruchversuchen an bauteilähnlichen Großproben durchgeführt werden.

ANMERKUNG Die rechnerische Auswertung der Versuchsergebnisse kann mit den in EN 1990, Anhang D angegebenen Methoden erfolgen.

3 Auswahl der Stahlsorten im Hinblick auf Eigenschaften in Dickenrichtung

3.1 Allgemeines

(1) Die Auswahl der Stahlsorten ist hinsichtlich der Folgen von Terrassenbrüchen in der Regel nach einer der beiden Klassen nach Tabelle 3.1 zu treffen.

Tabelle 3.1 — Auswahl der Stahlsorten

Klasse	Auswahl der Anwendungsbereiche
1	Für alle Stahlerzeugnisse und alle Erzeugnisdicken nach Europäischen Normen und für alle Anwendungen.
2	Für ausgewählte Stahlerzeugnisse und Erzeugnisdicken nach Europäischen Normen und/oder für ausgewählte Anwendungen.

ANMERKUNG Die Wahl der Klasse kann im Nationalen Anhang erfolgen. Die Anwendung der Klasse 1 in Tabelle 3.1 wird empfohlen.

- (2) Abhängig von der Wahl der Klasse nach Tabelle 3.1 können entweder
- Eigenschaften des Stahls in Dickenrichtung nach EN 10164 festgelegt werden (Klasse 1) oder
 - Prüfungen im Fertigungsbetrieb zur Feststellung von Terrassenbrüchen durchgeführt werden (Klasse 2).
- (3) Die folgenden Aspekte sind in der Regel bei der Prüfung der Terrassenbruch-Empfindlichkeit der Ausbildung der Nähte oder Anschlüsse zu beachten:
- die Bedeutung des Anschlusses im Hinblick auf Zugkraftübertragung und Redundanz;
 - die Dehnungsbeanspruchung des Blechs in Dickenrichtung nach dem Schweißen. Diese Dehnungsbeanspruchung entsteht durch Schrumpfverformungen beim Abkühlen. Sie nimmt zu, wenn zusätzlich die Verformungsmöglichkeiten durch andere Bauteile behindert sind;
 - die Lage und Anordnung der Anlussteile insbesondere in Kreuzstößen, T- und Eck-Verbindungen. In Bild 3.1 kann z. B. das horizontale Blech eine geringe Duktilität in Dickenrichtung haben. Die Wahrscheinlichkeit von Terrassenbrüchen steigt, wenn sich die Dehnungsbeanspruchung in der Schweißverbindung in Dickenrichtung des Werkstoffs auswirkt. Dies liegt dann vor, wenn die Schmelzbadoberfläche in etwa parallel zur Blechoberfläche und die entstehende Schrumpfdehnung rechtwinklig zur Walzrichtung im Grundwerkstoff verlaufen. Je dicker die Naht, um so größer ist die Empfindlichkeit;
 - die chemische Analyse des in Dickenrichtung beanspruchten Blechs. Insbesondere können hohe Schwefelgehalte, auch wenn sie erheblich unter den Grenzwerten der Liefornormen liegen, die Terrassenbruch-Empfindlichkeit erhöhen.



Bild 3.1 — Terrassenbruch

- (4) Die Empfindlichkeit von Stahlwerkstoffen wird nach EN 10164 geprüft. Dort werden Güteklassen in Form von Z-Werten angegeben.

ANMERKUNG 1 Terrassenbruch ist eine schweißinduzierte Gefügetrennung, die im Allgemeinen mit Ultraschalluntersuchungen erkennbar wird. Das wesentliche Risiko für Terrassenbruch besteht bei Kreuz-, T- und Eckverbindungen und bei voll durchgeschweißten Nähten.

ANMERKUNG 2 Anleitungen zur Vermeidung von Terrassenbruch beim Schweißen sind EN 1011-2 zu entnehmen.

3.2 Vorgehensweise

- (1) Die Terrassenbruchgefahr darf vernachlässigt werden, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$Z_{Ed} \leq Z_{Rd} \quad (3.1)$$

DIN EN 1993-1-10:2010-12
EN 1993-1-10:2005 + AC:2009 (D)

Dabei ist

Z_{Ed} der erforderliche Z -Wert, der sich aus der Größe der Dehnungsbeanspruchung des Grundwerkstoffs infolge behinderter Schweißnahtschrumpfung ergibt;

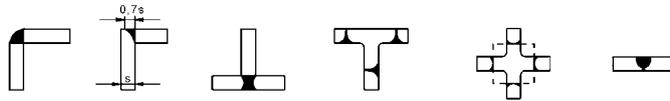
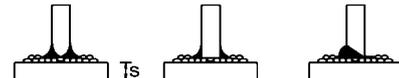
Z_{Rd} der verfügbare Z -Wert des Werkstoffs nach EN 10164, d. h. Z15, Z25 oder Z35.

Der erforderliche Z -Wert Z_{Ed} kann ermittelt werden:

$$Z_{Ed} = Z_a + Z_b + Z_c + Z_d + Z_e \quad (3.2)$$

Dabei sind die Anteile Z_a , Z_b , Z_c , Z_d und Z_e in Tabelle 3.2 angegeben.

Tabelle 3.2 — Einflüsse auf die Anforderung Z_{Ed}

a)	Schweißnahtdicke, die für die Dehnungsbeanspruchung durch Schweißschumpfung verantwortlich ist	\overline{AC} Effektive Schweißnahtdicke a_{eff} , siehe Bild 3.2 \overline{AC}	\overline{AC} Nahtdicke bei Kehlnähten \overline{AC}	Z_i
		$a_{eff} \leq 17 \text{ mm}$	$a = 5 \text{ mm}$	$Z_a = 0$
		$17 < a_{eff} \leq 10 \text{ mm}$	$a = 7 \text{ mm}$	$Z_a = 3$
		$10 < a_{eff} \leq 20 \text{ mm}$	$a = 14 \text{ mm}$	$Z_a = 6$
		$20 < a_{eff} \leq 30 \text{ mm}$	$a = 21 \text{ mm}$	$Z_a = 9$
		$30 < a_{eff} \leq 40 \text{ mm}$	$a = 28 \text{ mm}$	$Z_a = 12$
		$40 < a_{eff} \leq 50 \text{ mm}$	$a = 35 \text{ mm}$	$Z_a = 15$
	$50 < a_{eff}$	$a > 35 \text{ mm}$	$Z_a = 15$	
b)	Nahtform und Anordnung der Naht in T-, Kreuz- und Eckverbindungen			$Z_b = -25$
		Eckverbindungen		$Z_b = -10$
		Einlagige Kehlnahtdicke mit $Z_a = 0$ oder Kehlnähte mit $Z_a > 1$ mit Buttern mit niedrigstem Schweißgut		$Z_b = -5$
		Mehrlagige Kehlnähte		$Z_b = 0$
		Voll durchgeschweißte und nicht voll durchgeschweißte Nähte	mit geeigneter Schweißfolge, um Schrumpfeffekte zu reduzieren 	$Z_b = 3$
		Voll durchgeschweißte und nicht voll durchgeschweißte Nähte		$Z_b = 5$
		Eckverbindungen		$Z_b = 8$
c)	Auswirkung der Werkstoffdicke s auf die lokale Behinderung der Schumpfung	$s \leq 10 \text{ mm}$		$Z_c = 2^a$
		$10 < s \leq 20 \text{ mm}$		$Z_c = 4^a$
		$20 < s \leq 30 \text{ mm}$		$Z_c = 6^a$
		$30 < s \leq 40 \text{ mm}$		$Z_c = 8^a$
		$40 < s \leq 50 \text{ mm}$		$Z_c = 10^a$
		$50 < s \leq 60 \text{ mm}$		$Z_c = 12^a$
		$60 < s \leq 70 \text{ mm}$		$Z_c = 15^a$
		$70 < s$		$Z_c = 15^a$
d)	Auswirkung der großräumigen Behinderung der Schweißschumpfung durch andere Bauteile	Schwache Behinderung:	Freie Schumpfung möglich (z. B. T-Anschlüsse)	$Z_d = 0$
		Mittlere Behinderung:	Freie Schumpfung behindert (z. B. Querschott in Kastenträgern)	$Z_d = 3$
		Starke Behinderung:	Freie Schumpfung verhindert (z. B. Längsrippe in orthotroper Fahrbahnplatte)	$Z_d = 5$
e)	Einfluss der Vorwärmung	Ohne Vorwärmung		$Z_e = 0$
		Vorwärmung $\geq 100^\circ\text{C}$		$Z_e = -8$

^a Darf um 50 % reduziert werden, wenn der Werkstoff in Dickenrichtung vorherrschend statisch und nur durch Druckkräfte belastet wird.

DIN EN 1993-1-10:2010-12
EN 1993-1-10:2005 + AC:2009 (D)

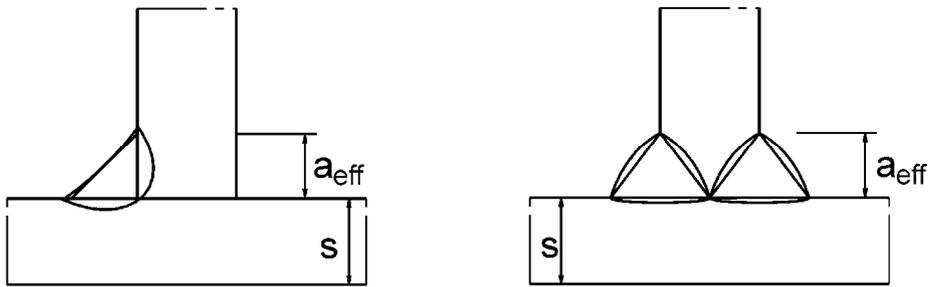


Bild 3.2 — Effektive Schweißnahtdicke a_{eff} für den Schrumpfprozess

(3) Die erforderliche Güteklasse Z_{Rd} nach EN 10164 kann ermittelt werden, indem die Anforderungen Z_{Ed} klassifiziert und den Güteklassen Z_{Rd} gegenübergestellt werden.

ANMERKUNG Klassifikationen sind in EN 1993-1-1 sowie EN 1993-2 bis EN 1993-6 angegeben.

DIN EN 1993-1-10/NA

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatzvermerk
siehe unten

**Nationaler Anhang –
National festgelegte Parameter –
Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und
Eigenschaften in Dickenrichtung**

National Annex –
Nationally determined parameters –
Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-10: Material toughness and through-thickness properties

Annexe Nationale –
Paramètres déterminés au plan national –
Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 1-10: Choix des qualités d'acier vis à vis de la ténacité et
des propriétés dans le sens de l'épaisseur

Ersatzvermerk

Mit DIN EN 1993-1-1:2010-12, DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-3:2010-12, DIN EN 1993-1-3/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-5:2010-12, DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-8:2010-12, DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-9:2010-12, DIN EN 1993-1-9/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-10:2010-12, DIN EN 1993-1-11:2010-12 und DIN EN 1993-1-11/NA:2010-12 Ersatz für DIN 18800-1:2008-11; mit DIN EN 1993-1-1:2010-12, DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-8:2010-12, DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-9:2010-12, DIN EN 1993-1-9/NA:2010-12 und DIN EN 1993-1-10:2010-12 Ersatz für DIN V ENV 1993-1-1:1993-04, DIN V ENV 1993-1-1/A1:2002-05 und DIN V ENV 1993-1-1/A2:2002-05

Gesamtumfang 5 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

DIN EN 1993-1-10/NA:2010-12

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung“ erstellt.

Dieses Dokument bildet den Nationalen Anhang zu DIN EN 1993-1-10:2010-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung*.

Die Europäische Norm EN 1993-1-10 räumt die Möglichkeit ein, eine Reihe von sicherheitsrelevanten Parametern national festzulegen. Diese national festzulegenden Parameter (en: Nationally determined parameters, NDP) umfassen alternative Nachweisverfahren und Angaben einzelner Werte, sowie die Wahl von Klassen aus gegebenen Klassifizierungssystemen. Die entsprechenden Textstellen sind in der Europäischen Norm durch Hinweise auf die Möglichkeit nationaler Festlegungen gekennzeichnet. Eine Liste dieser Textstellen befindet sich im Unterabschnitt NA 2.1.

Dieser Nationale Anhang ist Bestandteil von DIN EN 1993-1-10:2010-12.

DIN EN 1993-1-10:2010-12 und dieser Nationale Anhang DIN EN 1993-1-10/NA:2010-12 ersetzen

— zusammen mit DIN EN 1993-1-1, DIN EN 1993-1-1/NA, DIN EN 1993-1-3, DIN EN 1993-1-3/NA, DIN EN 1993-1-5, DIN EN 1993-1-5/NA, DIN EN 1993-1-8, DIN EN 1993-1-8/NA, DIN EN 1993-1-9, DIN EN 1993-1-9/NA, DIN EN 1993-1-11 und DIN EN 1993-1-11/NA die nationale Norm DIN 18800-1:2008-11.

Änderungen

Gegenüber DIN 18800-1:2008-11, DIN V ENV 1993-1-1:1993-04, DIN V ENV 1993-1-1/A1:2002-05 und DIN V ENV 1993-1-1/A2:2002-05 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

a) national festzulegende Parameter entsprechend DIN EN 1993-1-10:2010-12 aufgenommen.

Frühere Ausgaben

DIN 1050: 1934-08, 1937xxxx-07, 1946-10, 1957x-12, 1968-06

DIN 1073: 1928-04, 1931-09, 1941-01, 1974-07

DIN 1073 Beiblatt: 1974-07

DIN 1079: 1938-01, 1938-11, 1970-09

DIN 4100: 1931-05, 1933-07, 1934xxxx-08, 1956-12, 1968-12

DIN 4101: 1937xxx-07, 1974-07

DIN 18800-1: 1981-03, 1990-11, 2008-11

DIN 18800-1/A1: 1996-02

DIN V ENV 1993-1-1: 1993-04

DIN V ENV 1993-1-1/A1: 2002-05

DIN V ENV 1993-1-1/A2: 2002-05

NA 1 Anwendungsbereich

Dieser Nationale Anhang enthält nationale Festlegungen für die Auswahl der Stahlsorten im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung, die bei der Anwendung von DIN EN 1993-1-10:2010-12 in Deutschland zu berücksichtigen sind.

Dieser Nationale Anhang gilt nur in Verbindung mit DIN EN 1993-1-10:2010-12.

NA 2 Nationale Festlegungen zur Anwendung von DIN EN 1993-1-10:2010-12

NA 2.1 Allgemeines

DIN EN 1993-1-10:2010-12 weist an den folgenden Textstellen die Möglichkeit nationaler Festlegungen aus (NDP, en: Nationally determined parameters).

— 2.2(5);

— 3.1(1).

Darüber hinaus enthält NA 2.2 ergänzende nicht widersprechende Angaben zur Anwendung von DIN EN 1993-1-10:2010-12. Diese sind durch ein vorangestelltes „NCI“ (en: *non-contradictory complementary information*) gekennzeichnet.

NA 2.2 Nationale Festlegungen

Die nachfolgende Nummerierung entspricht der Nummerierung von DIN EN 1993-1-10:2010-12.

NCI zu 1.2

NA DIN EN 1993-1-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlgüten bis S700*

NDP zu 2.2(5) Anmerkung 1

Es gilt die Empfehlung.

NDP zu 2.2(5) Anmerkung 3

Bei Bauteilen, die ausschließlich Druckspannungen ausgesetzt sind, ist das Spannungsniveau $\sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t)$ anzuwenden.

NDP zu 2.2(5) Anmerkung 4

Es gilt DIN EN 1993-1-10:2010-12, Tabelle 2.1 ohne Einschränkungen. Zu weiteren Stahlsorten siehe DIN EN 1993-1-12.

NDP zu 3.1(1) Anmerkung

Es gilt die Empfehlung.

Anhang NA.A (informativ)

Zusätzliche Hinweise

(1) Die Werte $T_{\text{mdr}} = T_{\text{md}} + \Delta T_{\text{r}}$ in DIN EN 1993-1-10:2010-12, Gleichung (2.2) sind für einige Anwendungsgebiete in Tabelle A.1 angegeben. Andere Bauteile können sinngemäß eingeordnet werden.

Tabelle NA.A.1 — Einsatztemperaturen T_{mdr} für verschiedene Bauteile

Zeile	Bauteil	Einsatztemperatur T_{mdr} °C
1	Stahl- und Verbundbrücken	-30
2	Stahltragwerke im Hochbau	
2a	Außen liegende Bauteile	-30
2b	Innen liegende Bauteile	0
3	Kranbahnen (Außenliegende Bauteile)	-30
4	Stahlwasserbau	
4a	Verschlusskörper, die zeitweilig ganz oder zu einem großen Teil aus dem Wasser herausgenommen werden	-30
4b	Einseitig von Wasser benetzte Verschlusskörper	-15
4c	Beidseitig teilweise von Wasser benetzte Verschlusskörper	-15
4d	Verschlusskörper, die sich vollständig unter Wasser befinden	-5

(2) Bei Berücksichtigung von Dehngeschwindigkeiten $\dot{\epsilon} \geq 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ infolge außergewöhnlicher Einwirkungen, z. B. Anprall, darf die gleichzeitig wirkende Temperatur $T_{\text{mdr}} = 0 \text{ °C}$ angesetzt werden.

(3) Hinweise zur Bestimmung von ϵ_{cf} befinden sich in [1].

(4) Die in DIN EN 1993-1-10:2010-12, Tabelle 2.1, Spalte 4 angegebenen Kerbschlagarbeitswerte KV beziehen sich auf Längsproben mit V-Kerbe nach DIN EN 10045-1. Werden die in den Technischen Lieferbedingungen (Produktnormen) spezifizierten Werte an V-gekerbten Querproben erfüllt, dürfen diese als gleichwertig angesehen werden.

NCI

Literaturhinweise

- [1] Stahlbau-Kalender 2006, Schwerpunkt: Dauerhaftigkeit, Kuhlmann, Ulrike (Hrsg.), Ernst und Sohn, Berlin
- [2] DAST-Richtlinie 009: Stahlsortenauswahl für geschweißte Stahlbauten

DIN EN 1993-1-11

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatzvermerk
siehe unten

**Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-11: Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit
Zuggliedern aus Stahl;
Deutsche Fassung EN 1993-1-11:2006 + AC:2009**

Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-11: Design of structures with tension components;
German version EN 1993-1-11:2006 + AC:2009

Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 1-11: Calcul des structures à câbles ou éléments tendus;
Version allemande EN 1993-1-11:2006 + AC:2009

Ersatzvermerk

Ersatz für DIN EN 1993-1-11:2007-02;
mit DIN EN 1993-1-1:2010-12, DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-3:2010-12,
DIN EN 1993-1-3/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-5:2010-12, DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12,
DIN EN 1993-1-8:2010-12, DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-9:2010-12,
DIN EN 1993-1-9/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-10:2010-12, DIN EN 1993-1-10/NA:2010-12 und
DIN EN 1993-1-11/NA:2010-12 Ersatz für DIN 18800-1:2008-11;
mit DIN EN 1993-1-1:2010-12, DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-8:2010-12,
DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12 und DIN EN 1993-1-11/NA:2010-12 Ersatz für DIN 18801:1983-09;
Ersatz für DIN EN 1993-1-11 Berichtigung 1:2009-11

Gesamtumfang 45 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

DIN EN 1993-1-11:2010-12

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 1993-1-11:2006 + AC:2009) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Die Arbeiten auf nationaler Ebene wurden durch die Experten des NABau-Spiegelausschusses NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung“ begleitet.

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 13. Januar 2006 angenommen.

Die Norm ist Bestandteil einer Reihe von Einwirkungs- und Bemessungsnormen, deren Anwendung nur im Paket sinnvoll ist. Dieser Tatsache wird durch das Leitpapier L der Kommission der Europäischen Gemeinschaft für die Anwendung der Eurocodes Rechnung getragen, indem Übergangsfristen für die verbindliche Umsetzung der Eurocodes in den Mitgliedsstaaten vorgesehen sind. Die Übergangsfristen sind im Vorwort dieser Norm angegeben.

Die Anwendung dieser Norm gilt in Deutschland in Verbindung mit dem Nationalen Anhang.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN [und/oder die DKE] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Der Beginn und das Ende des hinzugefügten oder geänderten Textes wird im Text durch die Textmarkierungen **AC** <AC> angezeigt.

Änderungen

Gegenüber DIN V ENV 1993-2:2001-02 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) der Anhang A der DIN V ENV 1993-2:2001-02 wurde als eigenständiges Dokument DIN EN 1993-1-11 herausgelöst;
- b) die Stellungnahmen der nationalen Normungsinstitute wurden eingearbeitet;
- c) der Vornormcharakter wurde aufgehoben;
- d) der Text wurde vollständig überarbeitet.

Gegenüber DIN EN 1993-1-11:2007-02, DIN EN 1993-1-11 Berichtigung 1:2009-11, DIN 18800-1:2008-11 und DIN 18801:1983-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) auf europäisches Bemessungskonzept umgestellt;
- b) Ersatzvermerke korrigiert;
- c) Vorgänger-Norm mit der Berichtigung 1 konsolidiert;
- d) redaktionelle Änderungen durchgeführt.

Frühere Ausgaben

DIN 1050: 1934-08, 1937xxxx-07, 1946-10, 1957x-12, 1968-06

DIN 1073: 1928-04, 1931-09, 1941-01, 1974-07

DIN 1073 Beiblatt: 1974-07

DIN 1079: 1938-01, 1938-11, 1970-09

DIN 4100: 1931-05, 1933-07, 1934xxxx-08, 1956-12, 1968-12

DIN 4101: 1937xxx-07, 1974-07

DIN 18800-1: 1981-03, 1990-11, 2008-11

DIN 18800-1/A1: 1996-02

DIN 18801: 1983-09

DIN V ENV 1993-2: 2001-02

DIN EN 1993-1-11: 2007-02

DIN EN 1993-1-11 Berichtigung 1: 2009-11

DIN EN 1993-1-11:2010-12

— Leerseite —

EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE

EN 1993-1-11

Oktober 2006

+AC

April 2009

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatz für ENV 1993-2:1997

Deutsche Fassung

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-11: Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern aus Stahl

Eurocode 3: Design of steel structures —
Part 1-11: Design of structures with tension components

Eurocode 3: Calcul des structures en acier —
Partie 1-11: Calcul des structures à câbles ou éléments
tendus

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 13. Januar 2006 angenommen.

Die Berichtigung tritt am 29. April 2009 in Kraft und wurde in EN 1993-1-11:2006 eingearbeitet.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

DIN EN 1993-1-11:2010-12
EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

Inhalt

Seite

Vorwort	4
Nationaler Anhang zu EN 1993-1-11	4
1 Allgemeines	5
1.1 Anwendungsbereich	5
1.2 Normative Verweisungen	6
1.3 Begriffe	7
1.4 Formelzeichen	9
2 Grundlagen für die Tragwerksplanung	9
2.1 Allgemeines	9
2.2 Anforderungen	9
2.3 Einwirkungen	10
2.3.1 Eigengewicht von Zuggliedern	10
2.3.2 Windeinwirkungen	11
2.3.3 Eislasten	11
2.3.4 Thermische Einwirkungen	11
2.3.5 Vorspannung	11
2.3.6 Seiltausch und Seilausfall	12
2.3.7 Ermüdungsbelastung	12
2.4 Bemessungssituationen und Teilsicherheitsbeiwerte	12
2.4.1 Vorübergehende Bemessungssituationen während der Bauausführung	12
2.4.2 Ständige Bemessungssituationen unter Betriebsbedingungen	13
3 Werkstoffe	13
3.1 Stahlfestigkeiten und Drahtfestigkeiten	13
3.2 Elastizitätsmodul	13
3.2.1 Zugglieder der Gruppe A	13
3.2.2 Zugglieder der Gruppe B	13
3.2.3 Zugglieder der Gruppe C	15
3.3 Wärmeausdehnungskoeffizient	16
3.4 Längenzuschnitt für Zugglieder der Gruppe B	16
3.5 Längen und Herstellungstoleranzen	16
3.6 Reibbeiwerte	16
4 Dauerhaftigkeit von Drähten, Seilen und Litzen	17
4.1 Allgemeines	17
4.2 Korrosionsschutz der Einzeldrähte	17
4.3 Korrosionsschutz in den Drahtzwischenräumen bei Zuggliedern der Gruppe B	17
4.4 Korrosionsschutz der Oberfläche von Zuggliedern der Gruppe B	18
4.5 Korrosionsschutz bei Zuggliedern der Gruppe C	18
4.6 Korrosionsschutzmaßnahmen im Bereich von Anschlüssen	18
5 Tragwerksberechnung	19
5.1 Allgemeines	19
5.2 Vorübergehende Bemessungssituationen während der Bauausführung	19
5.3 Ständige Bemessungssituationen unter Betriebsbedingungen	19
5.4 Nichtlineare Wirkungen infolge Verformungen	20
5.4.1 Allgemeines	20
5.4.2 Wirkung des Seildurchhangs	20
5.4.3 Wirkung der Tragwerksverformung	20
6 Grenzzustände der Tragfähigkeit	20
6.1 Zugstabsysteme	20

6.2	Vorspannstäbe und Zugglieder der Gruppen B und C	21
6.3	Sättel	23
6.3.1	Geometrische Bedingungen.....	23
6.3.2	Rutschen der Seile auf dem Sattel	24
6.3.3	Querpressung	25
6.3.4	Bemessung der Sättel	26
6.4	Klemmen.....	26
6.4.1	Rutschen der Klemmen	26
6.4.2	Querpressung	26
6.4.3	Bemessung der Klemmen	27
7	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	27
7.1	Gebrauchstauglichkeitskriterien	27
7.2	Spannungsbegrenzungen	28
8	Seilschwingungen	29
8.1	Allgemeines	29
8.2	Maßnahmen zur Reduzierung von Seilschwingungen	30
8.3	Abschätzung der Gefährdung.....	30
9	Ermüdung.....	30
9.1	Allgemeines	30
9.2	Veränderliche Seilkräfte.....	31
Anhang A (informativ) Produkthanforderungen an Zugglieder aus Stahl		32
A.1	Anwendungsbereich	32
A.2	Grundlegende Anforderungen	32
A.3	Werkstoffe	33
A.4	Versuchsanforderungen	33
A.4.1	Allgemeines	33
A.4.2	Hauptzugelemente.....	34
A.4.3	Litzen und komplette Seile	34
A.4.4	Reibbeiwert	35
A.4.5	Korrosionsschutz	35
Anhang B (informativ) Transport, Lagerung und Handhabung		36
Anhang C (informativ) Glossar		37
C.1	Produkte der Gruppe A.....	37
C.2	Produkte der Gruppe B	37
C.3	Drahtseilendstücke	39
C.4	Produkte der Gruppe C	40

DIN EN 1993-1-11:2010-12
EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

Vorwort

Dieses Dokument (EN 1993-1-11:2006 + AC:2009) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird. CEN/TC 250 ist für alle Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau verantwortlich.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis April 2007, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis März 2010 zurückgezogen werden.

Dieses Dokument ersetzt  ENV 1993-2, Anhang A  teilweise.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Nationaler Anhang zu EN 1993-1-11

Diese Norm enthält alternative Vorgehensweisen, Zahlenwerte sowie Empfehlungen. Durch besonderen Hinweis (Anmerkungen) sind die Stellen gekennzeichnet, bei denen eine nationale Auswahl getroffen werden darf. EN 1993-1-11 enthält bei der nationalen Einführung einen Nationalen Anhang. Dieser Anhang legt die nationalen Parameter fest, die für die Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern aus Stahl verwendet werden müssen.

Eine nationale Wahl darf für folgende Abschnitte erfolgen:

2.3.6(1)	6.2(2)
2.3.6(2)	6.3.2(1)
2.4.1(1)	6.3.4(1)
3.1(1)	6.4.1(1)P
4.4(2)	7.2(2)
4.5(4)	A.4.5.1(1)
5.2(3)	A.4.5.2(1)
5.3(2)	B(6)

1 Allgemeines

1.1 Anwendungsbereich

(1) EN 1993-1-11 regelt die Bemessung und die Konstruktion von Zuggliedern aus Stahl, die aufgrund ihrer Anschlussausbildung nachstellbar und austauschbar sind, siehe Tabelle 1.1.

ANMERKUNG Aufgrund der Anforderung, dass die Zugglieder nachstellbar und austauschbar sind, handelt es sich bei Zuggliedern im Allgemeinen um vorgefertigte Produkte, die in dem Tragwerk installiert werden. Nicht nachstellbare oder austauschbare Zugglieder, z. B. luftgesponnene Hauptkabel von Hängebrücken oder externe Spannglieder im Spannbetonbau, befinden sich, obwohl ein Teil der hier angegebenen Regeln anwendbar wäre, außerhalb des Anwendungsbereiches von EN 1993-1-11.

(2) Die Regeln ermöglichen, technische Anforderungen an vorgefertigte Zugglieder festzulegen und ihre Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit nachzuweisen.

Tabelle 1.1 — Gruppen von Zuggliedern

Gruppe	Hauptsächlicher Bestandteil bzw. Grundelement	Zugglied
A	Zugstab	Zugstabsystem, Vorspannstab
B	Runddraht	Offenes Spiralseil
	Rund- und Z-Draht	Vollverschlossenes Spiralseil
	Rund- und Litzendraht	Rundlitzenseil
C	Runddraht	Paralleldrahtlitze
	Runddraht	Paralleldrahtbündel
	Sieben-Drähte-(Vorspann-)Litze	Litzenbündelseil

ANMERKUNG 1 Produkte der Gruppe A sind Zugstäbe und Zugstabsysteme, die im Allgemeinen aus runden Vollstäben bestehen, mit Gewinden an den Enden. Die Anwendung erfolgt im Wesentlichen bei

- Verbänden für Dächer, Wände und Träger;
- Abspannungen für Dachelemente und Pylone;
- Zugstabsystemen in Stahl-Holz-Fachwerken und Stahltragwerken sowie Raumfachwerken.

ANMERKUNG 2 Produkte der Gruppe B bestehen aus Drähten, die in Seilköpfen oder anderen Endstücken verankert sind. Sie werden hauptsächlich mit Durchmessern im Bereich von 5 mm bis 160 mm hergestellt, siehe EN 12385-2.

Offene Spiralseile finden hauptsächlich Verwendung als

- Abspannungen: für Antennen, Kamine, Maste und Brücken;
- Tragseile und Randseile: für Leichtbautragwerke;
- Hängern und Kabeln: für Hängebrücken;
- Stabilisierungsseile: für Seilnetzwerke und Holz- und Stahlfachwerke;
- Handlaufseile: für Geländer, Balkone, Brückengeländer und Leiteinrichtungen.

Vollverschlossene Spiralseile werden mit Durchmessern von 20 mm bis 180 mm hergestellt. Sie finden hauptsächlich Verwendung als

- Schrägseile, Hängeseile und Hänger: für Brückenbauwerke;
- Tragseile und Abspannseile: für Seiltragwerke;
- Randseile: für Seilnetze;
- Abspannseile: für Pylone, Maste und Antennen.

DIN EN 1993-1-11:2010-12 EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

Rundlitzenseile finden hauptsächlich Verwendung als

- Abspannseile: für Maste und Antennen;
- Hänger: von Hängebrücken;
- Dämpfer, Verbindungsseile: zwischen Schrägseilen;
- Randseile: für Membrankonstruktionen;
- Geländerseile: für Geländer, Balkone, Brücken und Leiteinrichtungen.

ANMERKUNG 3 Produkte der Gruppe C umfassen Paralleldrahtbündel und Litzenbündelseile, die entweder einzeln oder im Bündel verankert und gegen Korrosion geschützt sind.

Paralleldrahtbündel werden im Wesentlichen bei Schrägseilen, Hauptkabeln von Hängebrücken und als externe Vorspannglieder verwendet.

Litzenbündelseile finden hauptsächlich als Schrägseile für Verbund- oder Stahlbrücken Verwendung.

(4) Folgende Endverankerungen werden in EN 1993-1-11 für Produkte der Gruppe B oder C behandelt:

- Seilköpfe mit Metall- oder Kunstharzverguss, siehe EN 13411-4;
- Seilköpfe mit Zementmörtelverguss;
- verpresste Seilschlaufen, siehe EN 13411-3;
- angepresste Seilköpfe und Anschlussstücke;
- Reibverankerungen mit U-förmigem Klemmbügel, siehe EN 13411-5;
- Bündelverankerungen mit Keilen, kaltgeformten Drahtköpfen oder Muttern für Zugstäbe.

ANMERKUNG Anhang C gibt Hinweise zur Terminologie.

1.2 Normative Verweisungen

(1) Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 10138, *Spannstähle*

Teil 1: *Allgemeine Anforderungen*

Teil 2: *Draht*

Teil 3: *Litze*

Teil 4: *Stäbe*

EN 10244, *Stahldraht und Drahterzeugnisse — Überzüge aus Nichteisenmetall auf Stahldraht*

Teil 1: *Allgemeine Regeln*

Teil 2: *Überzüge aus Zink und Zinklegierungen*

Teil 3: *Überzüge aus Aluminium*

EN 10264, *Stahldraht und Drahterzeugnisse — Stahldraht für Seile*

Teil 1: *Allgemeine Anforderungen*

Teil 2: *Kaltgezogener Draht aus unlegiertem Stahl für Seile für allgemeine Verwendungszwecke*

Teil 3: *Runder und profilierter Draht aus unlegiertem Stahl für hohe Beanspruchungen*

Teil 4: *Draht aus nicht rostendem Stahl*

EN 12385, *Drahtseile aus Stahldraht — Sicherheit*

Teil 1: *Allgemeine Anforderungen*

Teil 2: *Begriffe, Bezeichnung und Klassifizierung*

Teil 3: *Information über Gebrauch und Instandhaltung*

Teil 4: *Litzenseile für allgemeine Hebezwecke*

Teil 10: *Spiralseile für den allgemeinen Baubereich*

EN 13411, *Endverbindungen für Drahtseile aus Stahldraht — Sicherheit*

Teil 3: *Verpresste Seilschlaufen*

Teil 4: *Vergießen mit Metall oder Kunstharz*

Teil 5: *Drahtseilklemmen mit U-förmigem Klemmbügel*

1.3 Begriffe

(1) Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

1.3.1

Litze

ein Seilelement, üblicherweise bestehend aus einer Anordnung von Drähten mit geeignetem Querschnitt und Abmessungen, die spiralförmig lagenweise gleichgerichtet oder gegengerichtet um ein Zentralstück gelegt sind

1.3.2

Rundlitzenseil

eine Anordnung von mehreren Litzen, die spiralförmig einlagig oder lagenweise um einen Kern (Seil mit einer Lage) oder ein Zentralstück (drillfreies oder parallel geschlossenes Seil) gelegt sind

1.3.3

Spiralseil

eine Anordnung von mindestens zwei Drahtlagen, die spiralförmig um ein Zentralstück (üblicherweise einen Draht) gelegt sind

1.3.4

Offenes Spiralseil

Spiralseil nur aus Runddrähten

1.3.5

Vollverschlossenes Spiralseil

Spiralseil mit einer äußeren Lage von vollverschlossenen (Z-)Drähten

DIN EN 1993-1-11:2010-12
EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

1.3.6

Füllfaktor

f

Verhältnis der Summe der Nennquerschnittsflächen A der Drähte in einem Seil und der umschriebenen Fläche A_U des Seiles mit dem Nenndurchmesser d

1.3.7

Seilverlustfaktor

k

im Bruchlastfaktor K enthaltener Abminderungsbeiwert infolge Verseilung

1.3.8

Bruchlastfaktor

K

ein empirischer Faktor für die Bestimmung der Mindestbruchlast eines Seiles:

$$K = \frac{\pi f k}{4}$$

Dabei ist

f der Füllfaktor des Seils;

k der Abminderungsfaktor für Verdrillung.

ANMERKUNG K -Faktoren werden für die häufigsten Seilklassen und Bauarten in den entsprechenden Teilen von EN 12385 angegeben.

1.3.9

Mindestbruchlast

F_{\min}

die Mindestbruchlast ist in der Regel folgendermaßen anzusetzen:

$$F_{\min} = \frac{d^2 R_r K}{1\,000} \text{ in kN}$$

Dabei ist

d der Nenndurchmesser in mm;

K der Bruchlastfaktor;

R_r die Seilfestigkeit in N/mm².

1.3.10

Seilfestigkeit

R_r

ein Niveau für die Anforderung an die Bruchlast, die durch einen Wert (z. B. 1 770 N/mm² oder 1 960 N/mm²) bezeichnet wird

ANMERKUNG Die Einzeldrahtfestigkeit für das Seil entspricht nicht notwendigerweise diesen Werten.

1.3.11

Einheitsgewicht

w

Seileigengewicht bezogen auf den metallischen Querschnitt A_m und die Einheitslänge unter Berücksichtigung der Wichten des Stahls und des Korrosionsschutzsystems

1.3.12**Seil**

Hauptzugelement in einem Tragwerk (z. B. einer Schrägseilbrücke), das aus einem Spiralseil, einem Rundlitzenseil, einem Paralleldrahtbündel oder einem Litzenbündelseil bestehen kann

1.4 Formelzeichen

- (1) Es gelten die Formelzeichen in EN 1993-1-1, 1.6 und EN 1993-1-9, 1.6.
 (2) Weitere Formelzeichen werden erklärt, wenn sie im Text zum ersten Mal erscheinen.

ANMERKUNG Formelzeichen dürfen verschiedene Bedeutungen haben.

2 Grundlagen für die Tragwerksplanung**2.1 Allgemeines**

- (1)P Für den Entwurf, die Bemessung und die Berechnung von Tragwerken mit Zuggliedern gelten die Anforderungen der EN 1990.
 (2) Zusätzlich gelten die in dieser Norm angegebenen Anforderungen an Zugglieder.
 (3) In Bezug auf die Dauerhaftigkeit darf nach den folgenden Anforderungsklassen unterschieden werden:

Tabelle 2.1 — Anforderungsklassen

Ermüdungsbeanspruchung	Korrosionsbeanspruchung	
	äußeren Umwelteinflüssen nicht ausgesetzt	äußeren Umwelteinflüssen ausgesetzt
keine signifikante Ermüdungsbeanspruchung	Klasse 1	Klasse 2
Ermüdungsbeanspruchung im Wesentlichen durch Längskräfte	Klasse 3	Klasse 4
Ermüdungsbeanspruchung durch Längskräfte und Biegung (Wind und Regen)	—	Klasse 5

- (4) Die Anschlüsse von Zuggliedern an das Tragwerk sind in der Regel austauschbar und nachstellbar auszubilden.

2.2 Anforderungen

- (1)P Bei Entwurf, Bemessung und Berechnung von Zuggliedern müssen folgende Grenzzustände beachtet werden:

- 1) Tragfähigkeit: Nachweis, dass der Bemessungswert der Längskräfte unter dem Bemessungswert der Zugtragfähigkeit liegt, siehe Abschnitt 6.
- 2) Gebrauchstauglichkeit: Begrenzung der Höhe der Spannungen und Dehnungen im Bauteil, siehe Abschnitt 7.

ANMERKUNG Wegen der vorherrschenden Dauerhaftigkeitsaspekte können die Gebrauchstauglichkeitsnachweise maßgebend sein und besondere Tragfähigkeitsnachweise überflüssig machen.

DIN EN 1993-1-11:2010-12
EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

- 3) Ermüdung: Begrenzung der Spannungsschwingbreiten aus veränderlichen Längskräften und aus Schwingungen infolge Wind- oder Regen-Wind-Erregung, siehe Abschnitt 8 und Abschnitt 9.

ANMERKUNG Aufgrund der Modellunsicherheit bei der Beschreibung des Erregungsmechanismus von Zuggliedern sind in der Regel ergänzend zu den Ermüdungsnachweisen zusätzliche Gebrauchstauglichkeitsnachweise zu führen.

(2) Zur Vermeidung einer möglichen Entlastung von Zuggliedern (d. h. Spannungsabfall unter null, der zu unkontrollierten Verformungen, Ermüdungsbeanspruchungen oder Beschädigungen von tragenden oder nicht tragenden Bauteilen führen kann) sowie bei bestimmten Arten von Seiltragwerken werden Zugelemente durch eingeprägte Verformungen (Vorspannungsmaßnahmen) vorgespannt.

Infolgedessen bestehen die ständigen Einwirkungen aus Schwerkraftwirkungen „G“ und der Vorspannung „P“, die in der Regel als eine einzige einheitliche Einwirkung „G + P“ anzusetzen und auf die der maßgebende Teilsicherheitsbeiwert γ_{Gi} anzuwenden ist, siehe Abschnitt 5.

ANMERKUNG Für andere Werkstoffe und Bauweisen können andere Regeln für die Kombination von „G“ und „P“ gelten.

(3) Anschlüsse an vorgefertigte Zugglieder, wie Sättel oder Klemmen, sind in der Regel für ausreichende Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit mit Einwirkungen zu bemessen, die der Bruchlast oder Prüflast des Seiles entsprechen, siehe Abschnitt 6. EN 1993-1-9 gibt Hinweise zur Ermüdungsfestigkeit.

ANMERKUNG Die Ermüdungsbelastung der Seile ist von dem kleinsten Radius (siehe Bild 6.1) am Sattel oder an der Verankerung abhängig.

2.3 Einwirkungen

2.3.1 Eigengewicht von Zuggliedern

(1) Der charakteristische Wert des Eigengewichts von Zuggliedern und ihren Anschlüssen ist in der Regel aus der Querschnittsfläche und den Wichten der verwendeten Werkstoffe zu ermitteln, wenn nicht auf Angaben in EN 12385 zurückgegriffen werden kann.

(2) Bei \overline{AC} offenen Spiralseilen, vollverschlossenen Spiralseilen und Rundlitzenseilen \overline{AC} darf der Nennwert des Eigengewichts g_k wie folgt bestimmt werden:

$$g_k = w A_m \quad (2.1)$$

Dabei ist

A_m die metallische Querschnittsfläche in mm^2 ;

w das Einheitsgewicht, das die Wichten des Stahls und des Korrosionsschutzes berücksichtigt, in N/mm^3 , siehe Tabelle 2.2.

(3) A_m darf wie folgt ermittelt werden:

$$A_m = \frac{\pi d^2}{4} f \quad (2.2)$$

Dabei ist

d der Außendurchmesser des Seiles oder der Litze (einschließlich Hüllrohr, falls vorhanden) in mm;

f der Füllfaktor, siehe Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2 — Einheitsgewicht w und Füllfaktor f

		Füllfaktor f						Einheits- Gewicht $w \times 10^{-7}$ $\frac{\text{N}}{\text{mm}^3}$	
		Kerndrähte + 1 Lage Z-Drähte	Kerndrähte + 2 Lagen Z-Drähte	Kerndrähte + > 2 Lagen Z-Drähte	Anzahl der Drahtlagen um Kerndraht				
					1	2	3–6		> 6
1	Offene Spiralseile				0,77	0,76	0,75	0,73	830
2	Vollverschlos- sene Spiralseile	0,81	0,84	0,88					830
3	Rundlitzenseile				0,56				930

(4) Bei Paralleldrahtbündeln oder Litzenbündelseilen darf der metallische Querschnitt wie folgt bestimmt werden:

$$A_m = n a_m \quad (2.3)$$

Dabei ist

n die Anzahl identischer Drähte oder Litzen im Seil;

a_m die Querschnittsfläche eines Drahtes (auf der Basis des Durchmessers) oder einer (Vorspann-)Litze (entsprechend der jeweiligen Produktnorm).

(5) Bei Zuggliedern der Gruppe C ist das Eigengewicht in der Regel aus dem Gewicht der einzelnen Drähte oder Litzen und dem Gewicht des Korrosionsschutzes (HDPE, Wachs usw.) zu ermitteln.

2.3.2 Windeinwirkungen

(1) Folgende Windeffekte sind in der Regel zu berücksichtigen:

- die statischen Auswirkungen der Windkräfte auf die Seile, siehe EN 1991-1-4, einschließlich der Durchbiegungen und Biegemomente an den Seilenden,
- aerodynamische und andere Erregungen, die zu Schwingungen führen können, siehe Abschnitt 8.

2.3.3 Eislasten

(1) EN 1993-3-1, Anhang B enthält Hinweise zu Eislasten.

2.3.4 Thermische Einwirkungen

(1) Bei thermischen Einwirkungen ist in der Regel auch die Wirkung von Temperaturunterschieden zwischen den Seilen und dem restlichen Tragwerk zu berücksichtigen.

(2) Bei äußeren Umwelteinflüssen ausgesetzten Seilen ist in der Regel die Wirkung von Temperaturunterschieden nach EN 1991-1-5 zu berücksichtigen.

2.3.5 Vorspannung

(1) Die erforderlichen Vorspannungen sind in der Regel so einzustellen, dass das Tragwerk nach Aufbringung aller ständigen Einwirkungen die geforderte geometrische Form und Spannungsverteilung erreicht.

DIN EN 1993-1-11:2010-12 EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

(2) Dazu sind in der Regel Möglichkeiten für Vorspann- und Nachspannmaßnahmen vorzusehen. Der zur Erfüllung der Anforderung in (1) notwendige Wert der Vorspannung ist in der Regel als charakteristischer Wert bei den jeweiligen Nachweisen zu berücksichtigen.

(3) Ist das Nachspannen nicht vorgesehen, ist in der Regel die Auswirkung einer möglichen Ungenauigkeit der Vorspannung bei Entwurf, Bemessung und Berechnung des Tragwerkes zu berücksichtigen.

2.3.6 Seilaustausch und Seilausfall

(1) Bei Entwurf und Bemessung des Tragwerkes ist in der Regel mindestens der Austausch von je einem Zugglied als vorübergehende Bemessungssituation vorzusehen.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang darf die Randbedingungen für diese vorübergehende Bemessungssituation sowie die Teilsicherheitsbeiwerte für den Austausch festlegen.

(2) Erforderlichenfalls ist die außergewöhnliche Bemessungssituation eines plötzlichen Seilausfalls ebenfalls zu berücksichtigen.

ANMERKUNG 1 Der Nationale Anhang darf die Bedingungen für die Berücksichtigung dieser außergewöhnlichen Bemessungssituation festlegen sowie die zugehörigen Schutzziele und die Belastungssituation angeben, z. B. für Brückenhänger.

ANMERKUNG 2 Anstelle einer genaueren dynamischen Berechnung darf der plötzliche Seilausfall auf der sicheren Seite durch Ansatz der folgenden statischen Ersatzschnittgrößen E_d berücksichtigt werden:

$$\boxed{\text{AC}} E_d = k(E_{d2} - E_{d1}) \boxed{\text{AC}} \quad (2.4)$$

Dabei ist

$$k = 1,5$$

E_{d1} die statischen Schnittgrößen bei intaktem Seil;

E_{d2} die statischen Schnittgrößen bei Weglassen des Seils.

2.3.7 Ermüdungsbelastung

(1) EN 1991 gibt Hinweise zu Ermüdungslasten.

2.4 Bemessungssituationen und Teilsicherheitsbeiwerte

2.4.1 Vorübergehende Bemessungssituationen während der Bauausführung

(1) Bei Montagenachweisen darf der Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen an den jeweiligen Grenzzustand und die jeweilige Bemessungssituation angepasst werden.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang darf Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Gi} für die Montagenachweise festlegen. Folgende Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Gi} werden empfohlen:

- $\gamma_G = 1,10$ für kurzzeitige Zustände (nur wenige Stunden) bei Einbau der ersten Litze bei Litze-für-Litze Montage,
- $\gamma_G = 1,20$ für den Einbau weiterer Litzen,
- $\gamma_G = 1,00$ bei günstiger Wirkung.

2.4.2 Ständige Bemessungssituationen unter Betriebsbedingungen

(1) Die Teilsicherheitsbeiwerte γ_M für Tragsicherheitsnachweise, Gebrauchstauglichkeitsnachweise und Ermüdungsnachweise dürfen abhängen von

- der Schärfe der Prüfbedingungen für die Qualifikationsprüfungen der Zugglieder;
- den Maßnahmen zur Unterdrückung von Seilbiegung.

ANMERKUNG Teilsicherheitsbeiwerte γ_M sind in Abschnitt 6 angegeben.

3 Werkstoffe

3.1 Stahlfestigkeiten und Drahtfestigkeiten

(1) Die charakteristischen Werte von f_y und f_u für Baustahl und $f_{0,2}$ oder $f_{0,1}$ und f_u für Drähte sind in der Regel den maßgebenden Produktnormen zu entnehmen.

ANMERKUNG 1 Zu Stählen siehe EN 1993-1-1 und EN 1993-1-4.

ANMERKUNG 2 Zu Drähten siehe EN 10264, Teil 1 bis Teil 4.

ANMERKUNG 3 Zu Seilen siehe EN 12385, Teil 4 und Teil 10.

ANMERKUNG 4 Zu Seilendstücken siehe EN 13411-3.

ANMERKUNG 5 Zu Litzen siehe EN 10138-3.

ANMERKUNG 6 Der Nationale Anhang darf den Größtwert von f_u aus Dauerhaftigkeitsgründen begrenzen. Folgende Größtwerte werden empfohlen:

- Stahldrähte: Runddrähte: Nennzugfestigkeit: 1 770 N/mm²,
Z-Drähte: Nennzugfestigkeit: 1 570 N/mm²,
- nichtrostende Stahldrähte: Runddrähte: Nennzugfestigkeit: 1 450 N/mm².

3.2 Elastizitätsmodul

3.2.1 Zugglieder der Gruppe A

(1) Der Elastizitätsmodul darf für Zugglieder der Gruppe A mit $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$ angesetzt werden; bei Verwendung von nichtrostendem Stahl gelten die Werte in EN 1993-1-4.

3.2.2 Zugglieder der Gruppe B

(1) Der Elastizitätsmodul für Zugglieder der Gruppe B ist in der Regel aus Versuchen abzuleiten.

ANMERKUNG 1 Der Elastizitätsmodul hängt vom Beanspruchungsniveau und der Belastungsgeschichte (Vorreckung und wiederholte Be- und Entlastung) ab.

ANMERKUNG 2 Bei Zuggliedern der Gruppe B oder C darf die Zugsteifigkeit des Seils aus dem Produkt aus Elastizitätsmodul und metallischem Querschnitt A_m bestimmt werden.

DIN EN 1993-1-11:2010-12
EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

(2) Um stabile Werte für den Elastizitätsmodul für die statische Berechnung für ständige Bemessungssituationen nach Fertigstellung zu erhalten, ist dieser in der Regel für jeden Seiltyp und jeden Durchmesser durch Messung des Sekantenmoduls nach ausreichender Anzahl von Lastzyklen zwischen F_{inf} und F_{sup} (mindestens 5 Zyklen) zu bestimmen. Dabei ist F_{inf} die kleinste Seilkraft und F_{sup} die größte Seilkraft infolge der charakteristischen Werte der ständigen und veränderlichen Lasten.

(3) Bei kurzen Prüfstücken (Probenlänge $\leq 10 \times$ Schlaglänge) ist in der Regel von geringeren Kriechverformungen als bei langen Seilprüfstücken auszugehen.

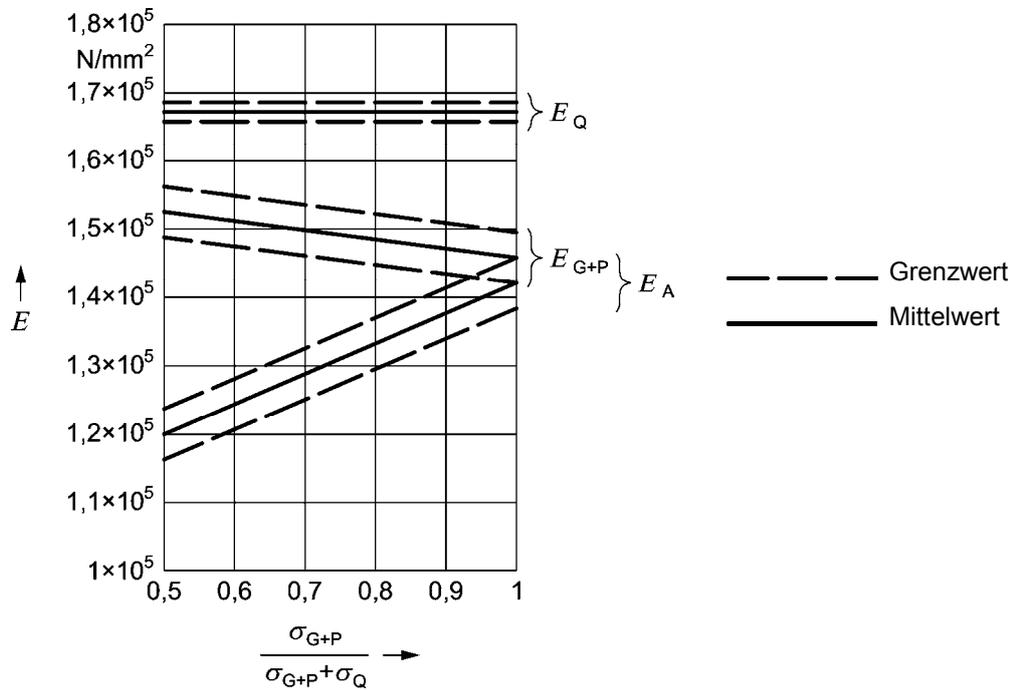
ANMERKUNG 1 Liegen keine genaueren Angaben vor, so darf diese Wirkung durch eine zusätzliche Verkürzung von 0,15 mm/m beim Zuschnitt der Prüfstücke berücksichtigt werden.

ANMERKUNG 2 Liegen keine Prüfergebnisse vor, dürfen die in Tabelle 3.1 angegebenen Nennwerte des Elastizitätsmoduls als erste Schätzwerte verwendet werden. Weitere Angaben sind in EN 10138 zu finden.

Tabelle 3.1 — Elastizitätsmodul E_Q für veränderliche Lasten Q

	Zugglied	E_Q kN/mm ²	
		Stahldrähte	nichtrostende Stahldrähte
1	Offene Spiralseile	150 ± 10	130 ± 10
2	vollverschlossene Spiralseile	160 ± 10	—
3	Rundlitzenseile mit CWR	100 ± 10	90 ± 10
4	Rundlitzenseile mit CF	80 ± 10	—
5	Paralleldrahtbündel	205 ± 5	—
6	Litzenbündelseil	195 ± 5	—

ANMERKUNG 3 Für die überschlägliche Ermittlung des Nennwertes des Elastizitätsmoduls von vollverschlossenen Spiralseilen darf Bild 3.1 verwendet werden. Diese Schätzwerte gelten für zyklische Belastung zwischen 30 % und 40 % der rechnerischen Bruchfestigkeit F_{uk} .



- σ_{G+P} Spannung unter charakteristischen ständigen Lasten
 σ_Q Maximalspannung unter charakteristischen veränderlichen Lasten
 E_Q Elastizitätsmodul für ständige Bemessungssituationen während der Nutzung
 E_{G+P} Elastizitätsmodul zur Verwendung bei Berechnungen für vorübergehende Bemessungssituationen während der Montage bis zum Niveau der ständigen Einwirkungen G+P
 E_A Elastizitätsmodul für den Längenzuschnitt
 $\boxed{\text{AC}}$ gestrichener Text $\boxed{\text{AC}}$

Bild 3.1 — Elastizitätsmodul E für nicht vorgereckte, voll verschlossene Seile für Brücken

ANMERKUNG 4 Da nicht vorgereckte Seile der Gruppe B bei Erstbelastung sowohl elastische als auch bleibende Verformungen zeigen, wird empfohlen, vor oder nach dem Einbau bis zu maximal $0,45 \sigma_{uk}$ vorzurecken. Für den Längenzuschnitt sind Seile in der Regel ebenfalls vorzurecken; die Nachstellmöglichkeiten bestimmen hierbei die erforderliche Präzision der Vorreckung.

ANMERKUNG 5 Für die Anwendbarkeit von Bild 3.1 gelten folgende Annahmen:

- Schlaglänge $> 10 \times$ Durchmesser
- Mindestspannung ist 100 N/mm^2 .

Die Mindestspannung ist der untere Grenzwert zur Erreichung linearen Verhaltens.

3.2.3 Zugglieder der Gruppe C

- (1) Der Elastizitätsmodul für Zugglieder der Gruppe C darf EN 10138 oder Tabelle 3.1 entnommen werden.

DIN EN 1993-1-11:2010-12
EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

3.3 Wärmeausdehnungskoeffizient

(1) Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist in der Regel wie folgt anzunehmen:

$$\alpha_T = 12 \times 10^{-6} \text{ in } 1/^\circ\text{C für Stahldrähte;} \quad (3.1)$$

$$\alpha_T = 16 \times 10^{-6} \text{ in } 1/^\circ\text{C für nichtrostende Stahldrähte.}$$

3.4 Längenzuschnitt für Zugglieder der Gruppe B

(1) Litzen dürfen für den Längenzuschnitt nur für die vorgeschriebene Vorrecklast markiert werden.

(2) Für einen exakten Längenzuschnitt sind in der Regel folgende Daten zu beachten:

- Messwerte der Seilverlängerung zwischen σ_A und σ_{G+P} nach zyklischer Belastung nach 3.2.2 (2),
- Temperaturunterschied zwischen der Bezugstemperatur (üblicherweise $T_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$) und der Temperatur beim Längenzuschnitt,
- Langzeitseilkriechen unter Lasten,
- zusätzliche Seilverlängerung nach Einbau von Seilklemmen,
- Verformungen nach Erstbelastung.

ANMERKUNG Das Seilkriechen und die Seilkopfsetzung nach Abkühlung des Vergusses und nach Erstbelastung werden erst nach einer gewissen Belastungszeit im Bauwerk zum Stillstand kommen, so dass während der Montage, wenn diese Verformungen noch nicht abgeklungen sind, größere Seilkräfte notwendig sein können.

3.5 Längen und Herstellungstoleranzen

(1) Die Gesamtlänge des Seiles und alle Messpunkte für den Anschluss von Sätteln oder Klemmen sind in der Regel unter definierter Vorspannung zu markieren.

ANMERKUNG Für die Prüfung der Gesamtlänge nach dem Einbau können zusätzliche Kontrollmarkierungen angebracht sein.

(2) Die Herstellungstoleranzen sind in der Regel auf den Zustand nach Vorreckung und zyklischer Vorbelastung zu beziehen.

(3) Reagieren Seilkonstruktionen empfindlich auf Abweichungen von den Nennabmessungen (z. B. durch Kriechen), sind in der Regel Nachstellmöglichkeiten vorzusehen.

3.6 Reibbeiwerte

(1) Der Reibbeiwert zwischen vollverschlossenen Spiralseilen und stählernen Anschlüssen (Klemmen, Sättel, Pressstücke) ist in der Regel aus Versuchen zu ermitteln.

ANMERKUNG Die Reibkräfte dürfen infolge der Erhöhung der Seilkraft und der damit verbundenen Querschnittsreduktion abnehmen.

(2) Bei anderen Seiltypen ist der Reibbeiwert in der Regel ebenfalls aus Versuchen zu bestimmen, siehe Anhang A.

4 Dauerhaftigkeit von Drähten, Seilen und Litzen

4.1 Allgemeines

(1) Bei Zuggliedern der Gruppe B oder C mit den Anforderungsklassen 2, 4 und 5 nach Tabelle 2.1 sollte das Korrosionsschutzsystem in der Regel aus folgenden Komponenten bestehen:

- 1) Korrosionsschutz der Einzeldrähte;
- 2) Korrosionsschutz in den Drahtzwischenräumen, um das Eindringen von Feuchtigkeit zu vermeiden;
- 3) Korrosionsschutz der Seiloberfläche.

(2) Die Zugglieder der Gruppe C nach Tabelle 1.1 sollten zwei Korrosionsschutzkomponenten besitzen; diese beiden Korrosionsschutzkomponenten sind durch eine Fuge oder Verfüllen der Zwischenräume zu trennen.

(3) An Fugen zu Klemmen und Verankerungen sind in der Regel zusätzliche Korrosionsschutzmaßnahmen vorzusehen, um das Eindringen von Wasser zu verhindern.

(4) Anhang B gibt Hinweise zu Transport, Lagerung und Handhabung.

4.2 Korrosionsschutz der Einzeldrähte

(1) Bei Stahldrähten der Gruppen B und C sind in der Regel Überzüge aus Zink oder Zinklegierungen vorzusehen.

(2) Bei Runddrähten in Zuggliedern der Gruppe B müssen die Überzüge aus Zink oder Zinklegierungen in der Regel EN 10264-2, Klasse A entsprechen; für Formdrähte gilt in der Regel EN 10264-3, Klasse A.

ANMERKUNG 1 Der Korrosionsschutz von Z-Drähten wird im Allgemeinen mit schwererem Zinküberzug bis zu 300 g/m² ausgeführt, um die Abminderung der Beschichtungsdicke an scharfen Ecken zu berücksichtigen.

ANMERKUNG 2 Drähte mit Zn95Al5-Überzügen liefern einen besseren Korrosionsschutz als verzinkte Drähte mit gleicher Verzinkungsdicke. Rund- und Z-Drähte sind mit Zn95Al5-Überzügen normaler Beschichtungsdicke herstellbar.

(3) Die Überzüge bei Drähten der Gruppe C müssen in der Regel EN 10138 entsprechen.

4.3 Korrosionsschutz in den Drahtzwischenräumen bei Zuggliedern der Gruppe B

(1) Alle inneren Zwischenräume sind in der Regel mit einem aktiven oder passiven Füllmittel zu verfüllen; die Füllmittel dürfen nicht durch Wasser, Hitze oder Schwingungen verdrängt werden.

ANMERKUNG 1 Aktive Füllmittel basieren auf Polyurethan-Öl mit Zinkstaub.

ANMERKUNG 2 Passive Füllmittel können dauerhaft elastisch-plastische Wachse oder Aluminiumflocken in Kohlenwasserstoff-Harzen sein.

ANMERKUNG 3 Füllmittel, die bei der Herstellung des Zuggliedes (Verseilen) aufgebracht werden, können bei Belastung des Seils ausbluten. In diesem Fall sind in der Regel entsprechende weitere Korrosionsschutzmaßnahmen an der Oberfläche zu treffen.

ANMERKUNG 4 Bei der Wahl der Füllstoffe ist in der Regel Unverträglichkeit mit den anderen Korrosionsschutzmaßnahmen auszuschließen.

DIN EN 1993-1-11:2010-12 EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

4.4 Korrosionsschutz der Oberfläche von Zuggliedern der Gruppe B

(1) Nach der Montage wird in der Regel ein weiterer Korrosionsschutz aufgebracht, um Verletzungen des ursprünglichen Korrosionsschutzes zu beseitigen und einen Zinkabtrag auszugleichen.

ANMERKUNG Dieser Korrosionsschutz darf aus einer Polyethylen-Ummantelung oder einer mit Zink angereicherten Beschichtung bestehen. Im Falle einer Polyethylen-Ummantelung beträgt die Mindestdicke in der Regel 1/15 des äußeren Seildurchmessers, mindestens jedoch 3 mm. In der Regel sind folgende Mindestdicken für Beschichtungen zu wählen:

- 2 × 50 µm Grundbeschichtungen, Polyurethan mit Zinkstaub;
- 2 × 125 µm Deckbeschichtungen, Polyurethan mit Eisenglimmer.

(2) Bei Seilen mit Drähten und Endstücken aus nichtrostendem Stahl ohne weiteren Korrosionsschutz ist in der Regel die maßgebliche Korrosionswiderstandsklasse zu beachten.

ANMERKUNG 1 Der Nationale Anhang darf Korrosionswiderstandsklassen für nichtrostenden Stahl festlegen.

ANMERKUNG 2 Bei Zn95Al5-beschichtete Drähten kann, bei gleichem Korrosionsangriff, von einem bis zu 3-fach höheren Korrosionswiderstand als bei Drähten mit schwererem Zinküberzug ausgegangen werden.

4.5 Korrosionsschutz bei Zuggliedern der Gruppe C

(1) Zugglieder der Gruppe C sollten üblicherweise ummantelt sein, wobei als Ummantelung in der Regel Stahlrohre oder Polyethylen-Rohre nach den maßgebenden Normen zu verwenden sind. Der Zwischenraum zwischen der Ummantelung und dem Seil ist in der Regel mit geeigneten Korrosionsschutzmedien bzw. Zementmörtel zu füllen.

(2) Es ist auch möglich, anstelle einer Außenummantelung jede Einzellitze oder jedes Einzelseil mit einer Polyethylenhülle oder einer Epoxidbeschichtung zu versehen.

(3) Die Ummantelung der Seile ist in der Regel an der Verbindungsstelle zur Verankerung vollständig **[AC]** wasserundurchlässig **[AC]** auszuführen. Die Enden und Stöße der Ummantelung sind in der Regel so auszulegen, dass diese bei der aufgetragenen Zugbeanspruchung nicht brechen.

(4) Zwischenräume sind in der Regel mit zusammenhängenden hydrophoben Materialien zu verfüllen, die keine schädigende Wirkung auf die Hauptzugglieder ausüben. Alternativ darf ein Seil durch in der Ummantelung zirkulierende trockene Luft geschützt werden.

ANMERKUNG 1 Als zusammenhängend hydrophob gelten weiche Füllmittel, z. B. Fett, Wachs und weiche Harze, oder harte Füllmittel, z. B. Zement. Die Eignung der Füllmittel ist in der Regel durch Versuche nachzuweisen. Die Wahl des Füllmittels darf im Nationalen Anhang festgelegt werden.

ANMERKUNG 2 Der Korrosionsschutz der Tragkabel von Hängebrücken erfordert besondere Anforderungen. Nach der Verdichtung des Tragkabels zu dem erforderlichen Querschnitt erhält das Kabel eine Umwicklung aus vorgespanntem, verzinktem, biegsamem Draht, wobei die Hohlstellen zwischen dem Tragkabel und der Umwicklung mit geeignetem Kitt gefüllt werden. Nach Beseitigung des überflüssigen Kitts auf der Wickeloberfläche wird diese gereinigt und beschichtet. Besondere Maßnahmen sind an den Kabelverankerungen erforderlich, wo die Umwicklung fehlt. Die Entfeuchtung der Luft um die Drähte ist eine gängige Schutzmethode.

4.6 Korrosionsschutzmaßnahmen im Bereich von Anschlüssen

(1) Konstruktiv ist zu verhindern, dass an den Seilen entlanglaufendes Wasser in Klemmen, Sättel und Verankerungen eindringen kann.

(2) Anschlüsse von Seiltragwerken sind in der Regel zu versiegeln.

5 Tragwerksberechnung

5.1 Allgemeines

(1)P Tragwerksberechnungen müssen für

- 1) vorübergehende Bemessungssituationen während der Montage,
- 2) ständige Bemessungssituationen unter Betriebsbedingungen

und die entsprechenden Grenzzustände durchgeführt werden.

5.2 Vorübergehende Bemessungssituationen während der Bauausführung

(1) Der Bauablauf mit der Konfektionierung der Seile, der Vorspannung sowie der spannungslosen Werkstattform des Tragwerks ist in der Regel so zu planen, dass die folgenden Bedingungen erfüllt werden:

- Erreichen der geforderten Tragwerksform;
- Erreichen einer ständigen Spannungsverteilung, die alle Gebrauchstauglichkeits- und Tragfähigkeitsanforderungen für die verschiedenen Bemessungssituationen erfüllt.

(2) Für die Durchführung von Prüfmaßnahmen während des gesamten Bauablaufes (z. B. für die Messung der Form, Gradienten, Verformungen, Frequenzen und Kräfte) sind in der Regel die dazugehörigen Berechnungen mit charakteristischen Werten der ständigen Lasten, eingepprägten Verformungen und Nutzlasten durchzuführen.

(3) Werden Grenzzustände der Tragfähigkeit während des Vorspannvorganges durch gegensätzliche Wirkungen des Eigengewichtes „G“ und der Vorspannung „P“ bestimmt, so ist in der Regel ein eigener Teilsicherheitsbeiwert γ_P für „P“ anzuwenden.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang darf Werte für γ_P angeben. Der Wert $\gamma_P = 1,0$ wird empfohlen.

5.3 Ständige Bemessungssituationen unter Betriebsbedingungen

(1) Bei allen ständigen Bemessungssituationen unter Betriebsbedingungen sind in der Regel die ständigen Einwirkungen „G“ aus Eigengewicht und aus den Vorbelastungen und Vorspannmaßnahmen „P“ in einer einzigen ständigen Einwirkung „G+P“, die zu der endgültigen Form des Tragwerks gehört, zusammenzufassen.

(2) Beim Gebrauchtauglichkeitsnachweis ist in der Regel die ständige Einwirkung „G+P“ in der maßgebenden Einwirkungskombination direkt zu verwenden; beim Nachweis der Grenzzustände der Tragfähigkeit EQU oder STR (siehe EN 1990) ist in der Regel die ständige Einwirkung „G+P“ mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{G\ sup}$ zu multiplizieren, wenn die Auswirkungen der ständigen und der veränderlichen Einwirkungen beide ungünstig sind. Sind die Auswirkungen der ständigen Einwirkung „G+P“ günstig, sind diese in der Regel mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{G\ inf}$ zu multiplizieren.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang darf angeben, inwieweit auch außerhalb des Anwendungsbereichs von EN 1993 ein einheitlicher Teilsicherheitsbeiwert γ_G auf „G+P“ angewendet werden darf.

(3) Sind nichtlineare Auswirkungen der Verformungen während des Betriebs nicht vernachlässigbar, sind diese in der Regel nach 5.4 zu berücksichtigen.

DIN EN 1993-1-11:2010-12
EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

5.4 Nichtlineare Wirkungen infolge Verformungen

5.4.1 Allgemeines

(1) Die Wirkungen der Verformungen aus Seildurchhang sowie die Längsverformungen der Zugglieder einschließlich Kriechverformungen sind zu berücksichtigen.

5.4.2 Wirkung des Seildurchhangs

(1) Die Wirkung des Seildurchhangs eines Seiles oder Seilsegmentes darf mit Hilfe des wirksamen E-Moduls erfasst werden:

$$E_t = \frac{E}{1 + \frac{w^2 \ell^2 E}{12 \sigma^3}} \quad (5.1)$$

Dabei ist

- E der Elastizitätsmodul des Seiles in N/mm²;
- w das Einheitsgewicht nach Tabelle 2.2 in N/mm³;
- ℓ die horizontale Komponente der Spannweite des Seiles oder Seilsegmentes in mm;
- σ die Spannung im Seil in N/mm²; für Bemessungssituationen nach 5.3 ist diese σ_{G+P} .

5.4.3 Wirkung der Tragwerksverformung

(1) Bei der Tragwerksberechnung nach Theorie II. Ordnung sind in der Regel Schnittgrößen und Verformungen aus veränderlichen Lasten auf die geometrische Ausgangsform des Tragwerks zu beziehen, die für die ständigen Einwirkungen „G+P“ und die spezifizierte Bezugstemperatur T_0 gefordert wird.

(2) Bei der Tragwerksberechnung nach Theorie II. Ordnung für Gebrauchstauglichkeitsnachweise ist in der Regel die charakteristischen Einwirkungskombination zur Ermittlung der Schnittgrößen zu verwenden. Nach 7.2 dürfen mit diesen Schnittgrößen auch Tragfähigkeitsnachweise geführt werden.

(3) Bei der Tragwerksberechnung nach Theorie II. Ordnung bei nichtlinearem (überlinearem) Tragwerksverhalten für Tragfähigkeitsnachweise ist in der Regel die für die spezifizierte Bezugstemperatur T_0 geforderte geometrische Form des Tragwerks mit der Spannungssituation infolge „ γ_G (G+P)“ zu verknüpfen. Auf diese geometrische Form dürfen die Bemessungswerte der veränderlichen Einwirkungen $\gamma_G Q_{k1} + \gamma_Q \psi_2 Q_{k2}$ in Verbindung mit den maßgebenden Tragwerksimperfektionen aufgebracht werden.

ANMERKUNG Hinweise zu γ_G sind in 5.3(2) angegeben.

6 Grenzzustände der Tragfähigkeit

6.1 Zugstabsysteme

(1) Zugstabsysteme sind in der Regel für den Grenzzustand der Tragfähigkeit nach EN 1993-1-1 bzw. EN 1993-1-4 je nach verwendetem Werkstoff nachzuweisen.

6.2 Vorspannstäbe und Zugglieder der Gruppen B und C

(1)P Im Grenzzustand der Tragfähigkeit muss nachgewiesen werden, dass gilt:

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1 \quad (6.1)$$

Dabei ist

F_{Ed} der Bemessungswert der Seilkraft;

F_{Rd} der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit unter Zugbeanspruchung.

(2) Der Bemessungswert F_{Rd} der Beanspruchbarkeit unter Zugbelastung ist in der Regel wie folgt zu bestimmen:

$$F_{Rd} = \min \left\{ \frac{F_{uk}}{1,5 \gamma_R}; \frac{F_k}{\gamma_R} \right\} \quad (6.2)$$

Dabei ist

F_{uk} der charakteristische Wert der rechnerischen Bruchfestigkeit;

F_k der charakteristische Wert der Prüffestigkeit nach Tabelle 6.1;

γ_R der Teilsicherheitsbeiwert.

ANMERKUNG 1 F_{uk} entspricht dem charakteristischen Wert der Zugfestigkeit.

Tabelle 6.1 — Gruppen der Zugglieder und ~~AC~~ maßgebender charakteristischer Wert der Prüffestigkeit F_k ~~AC~~

Gruppe	maßgebende Produktnorm	AC gestrichener Text AC F_k
A	EN 10138-1	$F_{0,1k}$ ^a
B	EN 10264	$F_{0,2k}$
C	EN 10138-1	$F_{0,1k}$
^a Zu Vorspannstäben siehe EN 1993-1-1 und EN 1993-1-4.		

ANMERKUNG 2 Durch den Nachweis gegenüber F_k wird erreicht, dass das Zugglied auch bei Erreichen der Bemessungswerte der Einwirkungen elastisch bleibt. Bei Zuggliedern (z. B. vollverschlossenen Spiralseilen), bei denen $F_k \geq \frac{F_{uk}}{1,50}$ gilt, ist der Nachweis gegenüber F_k nicht erforderlich.

DIN EN 1993-1-11:2010-12
EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

ANMERKUNG 3 Bei Abnahmeprüfungen vor Anlieferung wird nachgewiesen, dass die experimentellen Werte F_{uke} und F_{ke} die Bedingungen

$$F_{uke} > F_{uk},$$

$$F_{ke} > F_k$$

erfüllen, siehe EN 12385-1.

ANMERKUNG 4 Der Teilsicherheitsbeiwert γ_R darf im Nationalen Anhang festgelegt sein. Die Größe des Teilsicherheitsbeiwertes hängt davon ab, ob Maßnahmen zur Unterdrückung von Zusatzbiegung infolge Seilwinkeländerungen an den Seilverankerungen getroffen werden, siehe **AC** 7.1(2). **AC** Es wird die Verwendung der Werte γ_R in Tabelle 6.2 empfohlen.

Tabelle 6.2 — Empfohlene Teilsicherheitsbeiwerte γ_R

Maßnahmen zur Minimierung von Biegespannungen an der Seilverankerung	γ_R
Ja	0,90
Nein	1,00

(3) Bei Vorspannstäben und Zuggliedern der Gruppe C sind die charakteristischen Werte der Bruchfestigkeit in der Regel wie folgt zu bestimmen:

$$F_{uk} = A_m f_{uk} \quad (6.3)$$

Dabei ist

A_m der metallische Querschnitt, siehe 2.3.1;

f_{uk} der charakteristische Wert der Zugfestigkeit der Zugstäbe, Drähte oder (Vorspann-)Litzen entsprechend der maßgebenden Produktnorm.

(4) Bei Zuggliedern der Gruppe B ist F_{uk} in der Regel mit

$$F_{uk} = F_{min} k_e \quad (6.4)$$

zu bestimmen, wobei F_{min} nach EN 12385-2 wie folgt ermittelt wird:

$$F_{min} = \frac{K d^2 R_f}{1\,000} \text{ in kN} \quad (6.5)$$

Dabei ist

K der Bruchlastfaktor unter Berücksichtigung des Seilverlustes;

d der Nenndurchmesser des Seiles in mm;

R_f die Seilfestigkeit in N/mm²;

k_e der Verlustfaktor; Tabelle 6.3 enthält Verlustfaktoren ausgewählter Endverankerungstypen.

ANMERKUNG K , d und R_f sind für alle Seile in EN 12385-2 angegeben.

Tabelle 6.3 — Verlustfaktor k_e

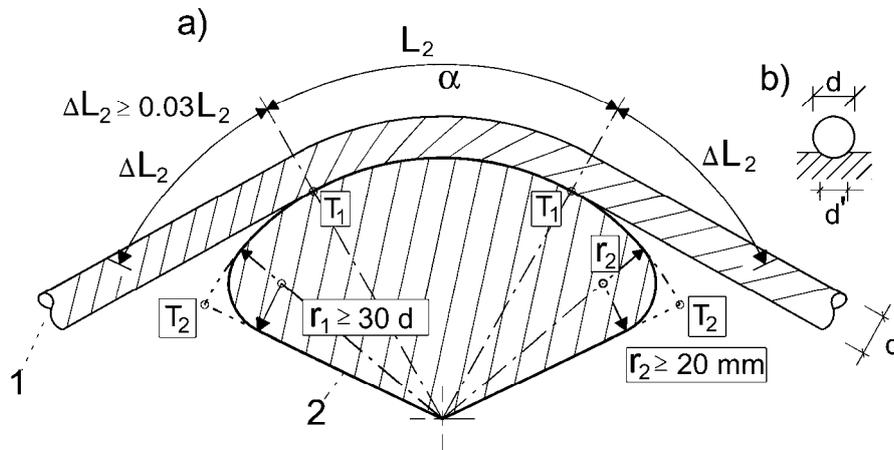
Endverankerungstyp	Verlustfaktor k_e
Seilkopf mit Metallfüllung	1,0
Seilkopf mit Kunstharzfüllung	1,0
Geklemmte Schlaufenverbindung	0,9
Pressendstück	0,9
U-förmiger Klemmbügel	0,8 ^a

^a Bei U-förmigen Klemmbügeln kann ein Verlust der Vorspannkraft auftreten.

6.3 Sättel

6.3.1 Geometrische Bedingungen

(1) Wenn die Sattelabmessungen den Vorgaben nach Bild 6.1 sowie (2) und (3) entsprechen, so dürfen die Zusatzspannungen infolge der Drahtkrümmungen vernachlässigt werden.



- 1 Litze/Seil
 2 Sattel
 L_2 Kontaktlänge zwischen den beiden theoretischen Berührungsendpunkten T_1 unter der ungünstigsten charakteristischen Lastkombination und der Wirkung des Seildurchhangs
 ΔL_2 zusätzliche Abwicklungslänge

Bild 6.1 — Sattelkontaktlänge einer Litze oder eines Seils

ANMERKUNG Bei Einhaltung der unter (1) genannten Bedingungen wird die charakteristische Bruchfestigkeit einer Litze oder eines Seils um nicht mehr als 3 % reduziert.

DIN EN 1993-1-11:2010-12
EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

(2) Der Radius r_1 des Sattels sollte die beiden Bedingungen erfüllen:

$$r_1 \geq 30d \text{ und } r_1 \geq 400 \varnothing$$

Dabei ist

- \varnothing der Drahtdurchmesser;
- d der Seildurchmesser;
- d' die Kontaktbreite.

(3) Die Größe des Radius r_1 darf auf $r_1 \geq 20d$ abgemindert werden, wenn das Seil über eine Breite von mindestens 60 % seines Durchmessers auf einem Weichmetallbett oder einer Zinkbeschichtung mit einer Mindestdicke von 1 mm gelagert ist.

(4) Noch kleinere Radien dürfen bei offenen Spiralseilen benutzt werden, wenn diese durch Versuche gerechtfertigt sind.

ANMERKUNG Die Lage der Punkte T_1 und T_2 ergibt sich in der Regel für den maßgebenden Belastungsfall unter Berücksichtigung der Bewegungen der Lager und der Seile.

6.3.2 Rutschen der Seile auf dem Sattel

(1) Zum Nachweis, dass kein Rutschen der Seile auf dem Sattel auftritt, ist in der Regel folgende Bedingung zu erfüllen:

$$\max \left\{ \frac{F_{Ed1}}{F_{Ed2}} \right\} \leq e^{\left\{ \frac{\mu \alpha}{\gamma_{M,fr}} \right\}} \quad (6.6)$$

Dabei ist

- F_{Ed1} und F_{Ed2} die Bemessungswerte der größeren bzw. kleineren Seilkraft rechts und links vom Sattel;
- μ der Reibbeiwert zwischen Seil und Sattel;
- α der Winkel des Seils auf dem Sattel in rad;
- $\gamma_{M,fr}$ der Teilsicherheitsbeiwert für Tragfähigkeit infolge Reibung.

ANMERKUNG Der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,fr}$ darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Der Wert $\gamma_{M,fr} = 1,65$ wird empfohlen.

(2) Wird (1) nicht erfüllt, dann sind in der Regel Klemmen zur Erzeugung einer zusätzlichen radial wirkenden Klemmkraft F_r anzubringen, so dass folgende Bedingung nachzuweisen ist:

$$\frac{F_{Ed1} - \frac{k F_r \mu}{\gamma_{M,fr}}}{F_{Ed2}} \leq e^{\left[\frac{\mu \alpha}{\gamma_{M,fr}} \right]} \quad (6.7)$$

Dabei ist

k die Anzahl der wirksamen Reibfugen; k ist üblicherweise mit 2,0 anzusetzen, wenn zwischen den Rillen im Sattel und in der Klemme die volle Reibung angenommen werden darf und die Klemmkraft F_r die Tragfähigkeit des Seiles gegenüber Klemmkraften nicht übersteigt, siehe 6.3.3. In anderen Fällen ist $k = 1,0$ anzusetzen;

$\gamma_{M,fr}$ der Teilsicherheitsbeiwert für Tragfähigkeit infolge Reibung.

(3) Bei der Bestimmung der Klemmkraft F_r aus der Vorspannung von Klemmschrauben sind in der Regel folgende Wirkungen zu berücksichtigen:

- a) Langzeitkriechen;
- b) die Verkleinerung des Seildurchmessers bei Vergrößerung der Seilkraft;
- c) die Verdichtung des Seilquerschnittes bzw. Ovalisierung;
- d) die Reduktion der Vorspannung in den Klemmschrauben durch äußere Kräfte an den Klemmen;
- e) Temperaturunterschiede.

6.3.3 Querpressung

(1)P Die Querpressung q_{Ed} infolge der radialen Klemmkraft F_r muss wie folgt begrenzt werden:

$$\frac{q_{Ed}}{q_{Rd}} \leq 1 \quad (6.8)$$

Dabei ist

$$q_{Ed} = \frac{F_r}{d' L_2} \text{ und } 0,6d \leq d' \leq d \text{ (siehe Bild 6.1b) für } d');$$

$$q_{Rd} = \frac{q_{Rk}}{\gamma_{M,bed}};$$

q_{Rk} der Grenzwert der Querpressung, der in der Regel aus Versuchen bestimmt wird;

$\gamma_{M,bed}$ der Teilsicherheitsbeiwert.

ANMERKUNG Bei der Berechnung von q_{Rd} braucht die Pressung infolge von F_{Ed1} nicht berücksichtigt zu werden, da diese durch die Regelungen in 6.3.1 erfasst ist.

(2) Liegen keine Versuchsergebnisse vor, sind in der Regel die Grenzspannungen für Querpressung q_{Rk} nach Tabelle 6.4 zu verwenden.

ANMERKUNG 1 Die Verwendung der Grenzwerte q_{Rk} mit $\gamma_{M,bed} = 1,00$ führt in der Regel zu einer Abminderung der Bruchfestigkeit des Seils um nicht mehr als 3 %.

DIN EN 1993-1-11:2010-12
EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

Tabelle 6.4 — Grenzwerte für Querpressung q_{Rk}

Seiltyp	q_{Rk} N/mm ²	
	Stahlklemmen und -sättel	gefutterte Klemmen und Sättel
Vollverschlossenes Spiralseil	40	100
Offenes Spiralseil	25	60

ANMERKUNG 2 Gefutterte Klemmen haben in der Regel eine Zwischenschicht aus Weichmetall oder einen Zinküberzug mit einer Mindestdicke von 1 mm.

6.3.4 Bemessung der Sättel

(1) Sättel sind in der Regel für eine hypothetische Seilkraft in Höhe der k -fachen charakteristischen Bruchfestigkeit F_{uk} zu bemessen.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang darf den Faktor k festlegen. Der Wert $k = 1,10$ wird empfohlen.

6.4 Klemmen

6.4.1 Rutschen der Klemmen

(1)P Wenn Klemmen Längskräfte in ein Seil übertragen sollen und nicht formschlüssig verbunden sind (siehe Bild 6.2), muss ein Rutschen vermieden werden, indem nachgewiesen wird:

$$F_{Ed||} \leq \frac{(F_{Ed\perp} + F_r) \mu}{\gamma_{M,fr}} \quad (6.9)$$

Dabei ist

$F_{Ed||}$ die zum Seil parallele Komponente der externen Bemessungslast;

$F_{Ed\perp}$ die zum Seil senkrechte Komponente der externen Bemessungslast;

F_r die radiale Klemmkraft, die durch die Einflüsse nach 6.3.2(3) abgemindert sein kann;

μ der Reibbeiwert;

$\gamma_{M,fr}$ der Teilsicherheitsbeiwert für Tragfähigkeit infolge Reibung.

ANMERKUNG 1 Der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,fr}$ darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Der Wert $\gamma_{M,fr} = 1,65$ wird empfohlen.

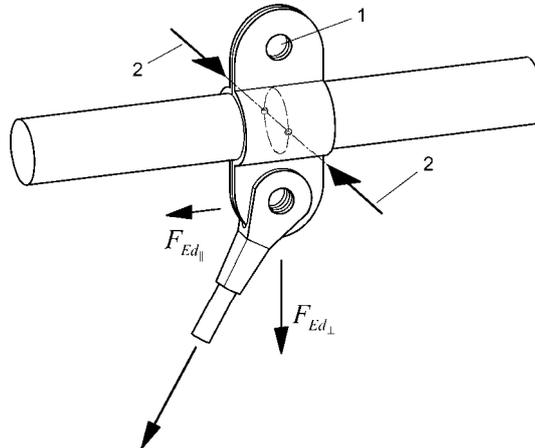
ANMERKUNG 2 Die Größe der radialen Klemmkraft F_r darf sich infolge äußerer Kräfte, abhängig von der Art der Lasteintragung in die Klemme, erhöhen oder verringern.

6.4.2 Querpressung

(1) Die Querpressung ist in der Regel für den größeren Wert von $F_{Ed\perp}$ oder $(F_{Ed\perp} + F_r)$ nach 6.3.3 nachzuweisen.

6.4.3 Bemessung der Klemmen

(1) Klemmen und ihre Einzelteile, mit denen Zugglieder verbunden werden (z. B. Hänger an ein Hauptkabel), sind in der Regel für eine hypothetische Kraft zu bemessen, die \overline{AC} dem 1,15fachen des charakteristischen Werts der Prüffestigkeit \overline{AC} ($1,15F_k$) des angeklebten sekundären Bauteile entspricht, siehe Bild 6.2.



- 1 Loch für vorgespannte Schrauben
- 2 Vorspannung F_r infolge der Schraubenvorspannung

Bild 6.2 — Seilklemmen

ANMERKUNG F_k ist nicht direkt auf die Kräfte im Grenzzustand der Tragfähigkeit bezogen. Durch die Verwendung von F_k wird eine \overline{AC} Kapazitätsbemessung (siehe EN 1993-1-1, 1.5.8) \overline{AC} durchgeführt.

7 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

7.1 Gebrauchstauglichkeitskriterien

(1) In der Regel sind folgende Gebrauchstauglichkeitskriterien zu beachten:

- 1) Verformungen oder Schwingungen;
- 2) elastische Gebrauchsbedingungen.

ANMERKUNG 1 Grenzwerte für Verformungen und Schwingungen dürfen sich als Anforderungen an die Steifigkeit auswirken, die durch das verwendete System des Seiltragwerks, die Abmessungen und die Vorspannung der Zugglieder und den Gleitwiderstand der Anschlüsse bereitgestellt wird.

ANMERKUNG 2 Grenzwerte für das elastische Verhalten und die Dauerhaftigkeit einzelner Zugglieder beziehen sich auf die Größt- und Kleinstwerte der Spannungen für die Einwirkungskombinationen für Gebrauchstauglichkeit.

(2) Biegespannungen im Bereich der Verankerung dürfen durch konstruktive Maßnahmen (z. B. durch Neopren-Unterlagen im Bereich von Querpressungen) reduziert werden.

DIN EN 1993-1-11:2010-12
EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

7.2 Spannungsbegrenzungen

- (1) Spannungsbegrenzungen für charakteristische Einwirkungskombinationen dürfen verwendet werden,
- um die Spannungen in den maßgebenden Bemessungssituationen während der Montage und unter Betriebsbedingungen im elastischen Bereich zu halten,
 - um die Dehnungen zu begrenzen, so dass Korrosionsschutzmaßnahmen nicht beeinträchtigt werden (z. B. zur Vermeidung von Rissen in Hüllrohren oder harten Füllmaterialien oder Klaffungen im Bereich von Anschlüssen usw.), und um den Unsicherheiten des Ermüdungsnachweises Rechnung zu tragen,
 - um indirekt Tragfähigkeitsnachweise bei linearer und nichtlinearer (unterlinearer) Tragwerksantwort auf die Einwirkungen durchzuführen.
- (2) Spannungsbegrenzungen sind in der Regel auf die Bruchfestigkeit

$$\sigma_{uk} = \frac{F_{uk}}{A_m} \quad (7.1)$$

zu beziehen, siehe Gleichung (6.3).

ANMERKUNG 1 Der Nationale Anhang darf Werte für die Spannungsbegrenzungen f_{const} und f_{SLS} festlegen. Empfohlene Spannungsbegrenzungen f_{const} für die Montage sind in Tabelle 7.1 angegeben. Tabelle 7.2 gibt Empfehlungen für Spannungsbegrenzungen f_{SLS} für Betriebsbedingungen.

Tabelle 7.1 — Spannungsbegrenzungen f_{const} für die Montage

Einbauphase	F_{const}
erste Zugglieder für nur wenige Stunden	$0,60 \sigma_{uk}$
nach Einbau weiterer Zugglieder	$0,55 \sigma_{uk}$

ANMERKUNG 2 Die Spannungsbegrenzungen folgen aus

$$f_{const} = \frac{\sigma_{uk}}{1,50 \gamma_R \gamma_F} = \frac{0,66 \sigma_{uk}}{\gamma_R \gamma_F} \quad (7.2)$$

mit:

$\gamma_R \times \gamma_F = 1,0 \times 1,10 = 1,10$ für kurzzeitige Bemessungssituationen;

$\gamma_R \times \gamma_F = 1,0 \times 1,20 = 1,20$ für langzeitige Bemessungssituationen.

Tabelle 7.2 — Spannungsbegrenzungen f_{SLS} für Betriebsbedingungen

Belastungsbedingungen	f_{SLS}
Ermüdungsbemessung mit Berücksichtigung der Biegespannungen ^a	$0,50 \sigma_{uk}$
Ermüdungsbemessung ohne Berücksichtigung der Biegespannungen	$0,45 \sigma_{uk}$
^a Biegespannungen dürfen durch konstruktive Maßnahmen reduziert werden, siehe AC 7.1(2). AC	

ANMERKUNG 3 Die Spannungsbegrenzungen folgen aus

$$f_{SLS} = \frac{\sigma_{uk}}{1,50 \gamma_R \gamma_F} = \frac{0,66 \sigma_{uk}}{\gamma_R \gamma_F} \quad (7.3)$$

mit:

$$\gamma_R \times \gamma_F = 0,9 \times 1,48 = 1,33 \text{ mit Berücksichtigung der Biegespannungen,}$$

$$\gamma_R \times \gamma_F = 1,0 \times 1,48 = 1,48 \text{ ohne Berücksichtigung der Biegespannungen,}$$

wobei gilt:

$$\gamma_F \approx \gamma_Q = 1,50 \approx 1,48.$$

ANMERKUNG 4 Die Spannungsbegrenzung $f_{SLS} = 0,45 \sigma_{uk}$ wird auch für Seilprüfungen nach Anhang A verwendet.

8 Seilschwingungen

8.1 Allgemeines

(1) Bei dem Klima ausgesetzten Seilen (z. B. Schrägseilen) ist in der Regel die Möglichkeit winderregter Schwingungen bei der Montage und unter Betriebsbedingungen zu prüfen und ihre Bedeutung für die Tragfähigkeit festzustellen.

(2) Aerodynamische Kräfte auf Seile können folgende Ursachen haben:

- a) Böenerregung (aus Turbulenz der anströmenden Luft);
- b) Wirbelerregung (durch Karmanwirbel im Nachlauf der Strömung);
- c) Galloping (Selbstinduktion);
- d) Interaktionsgalloping (Interaktion mit benachbarten Seilen);
- e) Wind-Regen-induzierte Schwingungen.

ANMERKUNG Aus Symmetriegründen kann Galloping bei Seilen mit kreisförmigem Querschnitt nicht auftreten. Das Phänomen des Galloping darf jedoch bei geänderter Querschnittsgeometrie (infolge Eisbildung oder Verschmutzung) in Erscheinung treten. Kräfte infolge c), d) und e) sind an die Seilbewegung gekoppelt (Selbstinduktion) und können infolge aeroelastischer Instabilität zu Schwingungsausschlägen größerer Amplituden führen. Sie setzen bei bestimmten kritischen Windgeschwindigkeiten ein. Da die Mechanismen der dynamischen Erregung noch nicht in ausreichend genaue Ingenieurmodelle umgesetzt werden können, um zuverlässig Schwingungen zu vermeiden, sind in der Regel immer Möglichkeiten für nachträgliche Maßnahmen vorzusehen, um unvorhergesehene Schwingungen nachträglich zu reduzieren.

(3) Seilschwingungen dürfen auch durch dynamische Kräfte verursacht werden, die auf andere Teile des Tragwerks einwirken (fußpunkterregte Schwingungen aus Träger- oder Pylonschwingungen).

ANMERKUNG Dieses Phänomen wird häufig als „Parametrische Anregung“ bezeichnet und ist für Schwingungen mit großen Amplituden verantwortlich, wenn sich Eigenfrequenzen von Schrägseilen und Eigenfrequenzen des restlichen Tragwerkes überlagern.

DIN EN 1993-1-11:2010-12
EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

8.2 Maßnahmen zur Reduzierung von Seilschwingungen

- (1) Das Schwingungsverhalten von Seiltragwerken ist in der Regel im Hinblick auf exzessive windinduzierte und Regen-Wind-induzierte Schwingungen zu überwachen. Dies kann entweder durch Beobachtung oder durch Messverfahren, die eine genauere Bestimmung der Amplituden, Schwingungsformen und Frequenzen ermöglichen, geschehen.
- (2) Beim Entwurf von Seiltragwerken sind in der Regel von vornherein schwingungsreduzierende Maßnahmen einzuplanen, die während der Montage oder nach der Fertigstellung durchgeführt werden können.
- (3) Solche Maßnahmen dürfen sein:
 - a) Veränderung der Seiloberfläche (aerodynamische Kontur);
 - b) Anbringung von Dämpfern;
 - c) Stabilisierungsseile (z. B. Abspannseile mit geeigneten Anschlüssen).

8.3 Abschätzung der Gefährdung

- (1) Regen-Wind-induzierte Schwingungen sind in der Regel durch einen geeigneten Entwurf zu vermeiden; dies kann durch die Wahl einer geeigneten Seiloberfläche geschehen.
- (2) Die Gefährdung infolge Schwingungen steigt mit der Spannweite des Seiles. Kurze Spannweiten (< 70 m bis 80 m) stellen generell, mit Ausnahme parametrischer Resonanzeffekte bei besonders instabilen Tragwerken, (bei weichen Brückenhauptträgern mit ungünstiger Querschnittsausbildung) keine Gefährdung dar. Daher brauchen bei kurzen Spannweiten keine Dämpfer vorgesehen zu werden.
- (3) Bei langen Spannweiten des Seiles (> 80 m) wird empfohlen, den Einbau von Dämpfern vorzusehen, um ein Lehr'sches Dämpfungsmaß > 0,5 % zu erreichen. Auf Dämpfer im Bereich der Rückspannseile darf verzichtet werden, wenn die Spannweiten so klein sind, dass wahrscheinlich keine nennenswerten Verschiebungen der Verankerungen zu erwarten sind.
- (4) Die Gefährdung infolge parametrischer Resonanzeffekte ist in der Regel im Entwurfsstadium durch die Bestimmung der Eigenformen des Tragwerkes und der Seile unter Berücksichtigung des Verhältnisses der Eigenfrequenzen und der Verschiebungen der Verankerungen für jede Eigenform abzuschätzen.
- (5) Eine Überlappung von Eigenfrequenzen sollte vermieden werden (d. h., die Seilerregerfrequenz Ω sollte weit entfernt (> 20 %) von der Eigenfrequenz des Tragwerkes ω_n oder $2\omega_n$ sein). Gegebenenfalls können Stabilisierungsseile vorgesehen werden, um die Eigenfrequenz der Seile zu verschieben.
- (6) Zur Einhaltung der Komfort- und Sicherheitsanforderungen ist die Seilschwingung in der Regel durch ein entsprechendes Kriterium der Bauwerksantwort zu begrenzen; so kann für eine mittlere Windgeschwindigkeit von 15 m/s die Amplitude der Seilschwingung auf $L/500$ begrenzt werden, wobei L die Seillänge ist.

9 Ermüdung

9.1 Allgemeines

- (1) Die Ermüdungssicherheit von Zuggliedern entsprechend den Klassen 3, 4 oder 5 nach Tabelle 2.1 ist in der Regel mit den Ermüdungslasten nach EN 1991 und geeigneten Ermüdungsfestigkeiten für die ermüdungsrelevanten Details nachzuweisen.
- (2) Ermüdungsversagen tritt bei Seilen gewöhnlich an Verankerungen, Sätteln und Klemmen infolge der dort entstehenden lokalen Wirkungen auf. Der maßgebende Kerbfall an diesen Stellen ist in der Regel vorzugsweise durch Versuche unter Berücksichtigung der wirklichen Situation insbesondere im Hinblick auf realistische Biegeeffekte und Querspannungen zu bestimmen. Die Versuchsauswertung erfolgt in der Regel nach EN 1990, Anhang D.

9.2 Veränderliche Seilkräfte

(1) Liegen keine Versuchsergebnisse nach 9.1(2) vor, dürfen die Ermüdungsfestigkeitskurven nach Bild 9.1 verwendet und die Kerbfalleinstufungen Tabelle 9.1 entnommen werden.

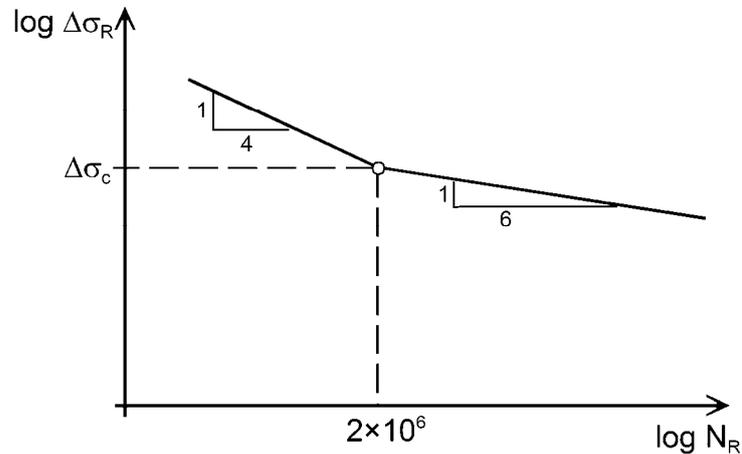


Bild 9.1 — Ermüdungsfestigkeitskurven für Zugglieder

Tabelle 9.1 — Kerbfalleinstufungen für die Ermüdungsfestigkeit nach EN 1993-1-9

Gruppe	Zugglied		Kerbfalleinstufung $\Delta\sigma_c$ N/mm ²
A	1	Vorspannstäbe	105
B	2	Vollverschlossenes Spiralseil mit metall- oder harzvergossenem Seilkopf	150
	3	Offenes Spiralseil mit metall- oder harzvergossenem Seilkopf	150
C	4	Paralleldrahtlitzen mit Epoxid-vergossenem Seilkopf	160
	5	Litzenbündelseil	160
	6	Paralleldrahtbündel	160

ANMERKUNG Die Kerbfalleinstufungen in Tabelle 9.1 beziehen sich auf die Anforderungsklassen 3 und 4 nach Tabelle 2.1. Bei Ermüdungsbelastungen in Längsrichtung und in seitlicher Richtung (Anforderungsklasse 5 nach Tabelle 2.1) werden zusätzliche konstruktive Schutzmaßnahmen erforderlich, um Biegespannungen zu minimieren.

(2) Die Kerbfalleinstufungen in (1) gelten nur für die folgenden Bedingungen:

- die Seile und Seilköpfe entsprechen den Anforderungen in Anhang A;
- die Bemessung der Seile, Sättel und Klemmen entspricht den Anforderungen in Abschnitt 6;
- übermäßige aerodynamische Seilschwingungen werden verhindert, siehe Abschnitt 8;
- es liegt ein ausreichender Korrosionsschutz vor, siehe Abschnitt 4.

(3) Zur Durchführung des Ermüdungsnachweises siehe EN 1993-1-9.

Anhang A **(informativ)**

Produktanforderungen an Zugglieder aus Stahl

A.1 Anwendungsbereich

- (1) Anhang A liefert Produkthanforderungen an Zugglieder aus Stahl mit Endstücken für die Anwendung im Hochbau und bei Ingenieurbauwerken.
- (2) Die Anforderungen hängen von den Einsatzbedingungen der vorgefertigten Zugglieder unter Berücksichtigung der Umgebungs- und Belastungsbedingungen ab.
- (3) Folgende Arten von Zuggliedern werden behandelt:
 - Gruppe A: Zugstabsysteme, Zugstäbe;
 - Gruppe C: Paralleldrahtbündel, Zugstabbündel und Litzenbündelseile.

A.2 Grundlegende Anforderungen

- (1) Zugglieder sollten den folgenden Anforderungen entsprechen:
 - 1) genügende Festigkeit und Duktilität von Zuggliedern und Endstücken,
 - 2) genügende Ermüdungsfestigkeit gegenüber veränderlichen Seilkräften sowie gegenüber Biegespannungen und Winkeländerungen, die infolge Durchhangveränderungen, Windkräften und Einbauungenauigkeiten entstehen,
 - 3) Sicherstellung ausreichender Längs- und Quersteifigkeit des Seilsystems (z. B. durch eine zuverlässige Vorspannung),
 - 4) ausreichender Korrosionsschutz des Seilsystems und der Verankerungsbereiche,
 - 5) Unempfindlichkeit gegenüber Reibkorrosion an Kontaktstellen von Stahlteilen.
- (2) Endstücke und Verankerungen von Zuggliedern sind in der Regel so zu entwerfen, dass
 - 1) die Grenztragfähigkeit des Zuggliedes erreicht wird, bevor Querschnittsfließen oder andere ständige Verformungen in der Verankerung oder anderen Tragelementen auftreten,
 - 2) ihre Ermüdungsfestigkeit die der Zugglieder übersteigt,
 - 3) Möglichkeiten zur Längenkorrektur des Zuggliedes bestehen, um die Anforderungen für Vorspannung, geometrische Toleranzen usw. zu erfüllen,
 - 4) ausreichende Verdrehmöglichkeiten an den Verankerungen bestehen, so dass Herstell- und Einbauungenauigkeiten ausgeglichen werden können,
 - 5) das Zugglied bei Bedarf ersetzt werden kann.

- (3) Die in (2) genannten Anforderungen sind in der Regel zu erfüllen durch
- geeignete Auswahl des Materials (Drähte, Litzen, Stähle und Schutzschichten),
 - geeignete Wahl der konstruktiven Ausbildung im Hinblick auf Tragfähigkeit, Steifigkeit, Duktilität, Dauerhaftigkeit sowie ausreichende Robustheit bei Herstellung, Transport, Handhabung und Einbau,
 - eine Qualitätskontrolle der Passgenauigkeit der Anschlussstücke zur Sicherstellung der genauen Ausrichtung des Zuggliedes im Betriebszustand.
- (4) Die Einhaltung der in (3) genannten Anforderungen ist in der Regel durch Versuche als Teil der Qualitätsüberwachung nachzuweisen.

A.3 Werkstoffe

- (1) Die Werkstoffe sollten den relevanten Europäischen Produktnormen entsprechen.
- (2) Die Eignung des Korrosionsschutzes einschließlich der Dauerhaftigkeit der Füllstoffe und Korrosionsschutzstoffe ist in der Regel durch entsprechende Versuche zu überprüfen.

ANMERKUNG Folgende Anforderungen dürfen durch Versuche überprüft werden:

- Schutz gegenüber aggressiven Einwirkungen (Chemikalien, Spannungsrisskorrosion, UV-Strahlung);
- Feuchtigkeitsschutz (Biegsamkeit und Dauerhaftigkeit bei Seilkrümmungen);
- Farbbeständigkeit (falls gefordert).

A.4 Versuchsanforderungen

A.4.1 Allgemeines

- (1) In der Regel sind folgende Versuche an Drähten, Litzen, Zugstäben und kompletten Zuggliedern zum Nachweis ihrer Eignung durchzuführen.
- (2) F_{ke} und F_{uke} (siehe 6.2) werden in der Regel im statischen Zugversuch ermittelt. Falls erforderlich (z. B. für die Ablängung (siehe 3.4) oder für die Tragwerksberechnung (siehe Abschnitt 5)), sollte der Versuch der vorhergesagten Belastungsgeschichte des Seils im Tragwerk folgen, damit alle wichtigen Daten erfasst werden können.
- (3) Ist die Bestimmung der Ermüdungsfestigkeitskurve notwendig, so ist eine repräsentative Anzahl von Zugversuchen mit einer Oberspannung $\sigma_{sup} = 0,45\sigma_{uk}$ (siehe 7.2(2)) mit verschiedenen Zugschwingspielen ΔF durchzuführen, siehe Tabelle A.4.1.

ANMERKUNG Ermüdungsversuche sind in der Regel lastgesteuert (nicht verformungsgesteuert) durchzuführen.

Tabelle A.4.1 — Anforderungen an Ermüdungsversuche

Versuchstyp		Ermüdungsbelastung vor Bruchversuch
1	Versuche mit alleinigem Zug (Klassen 3 und 4)	$\sigma_{sup} = 0,45\sigma_{uk}$ $\Delta\sigma$ entsprechend $\Delta\sigma_c$ nach Tabelle 9.1 $\Delta\alpha = 0$ $n = 2 \times 10^6$ Lastzyklen

DIN EN 1993-1-11:2010-12
EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

Tabelle A.4.1 (fortgesetzt)

Versuchstyp		Ermüdungsbelastung vor Bruchversuch
2	Versuche mit Zug und Biegung (Klasse 5)	$\sigma_{\text{sup}} = 0,45 \sigma_{\text{uk}}$ $\Delta\sigma$ entsprechend $\Delta\sigma_{\text{C}}$ nach Tabelle 9.1 $\Delta\alpha = 0 - 10 \text{ mrad}$ $(0 - 0,7^\circ)$ $n = 2 \times 10^6 \text{ Lastzyklen}$

(4) Wird das Zugglied einer Ermüdungsbelastung ausgesetzt und wird der Ermüdungsnachweis nach 9.2(2) geführt, so ist in der Regel mindestens ein Versuch für jeden Seildurchmesser durchzuführen. Es ist in der Regel zu prüfen, ob nach dem Ermüdungsversuch mit einer Oberspannung $\sigma_{\text{sup}} = 0,45 \sigma_{\text{uk}}$, dem Spannungsschwingspiel $\Delta\sigma = 1,25 \Delta\sigma_{\text{C}}$ (siehe Tabelle 9.1) und 2×10^6 Lastzyklen die Anzahl der Drahtbrüche unter 2 % der Anzahl aller Drähte geblieben ist. Es darf in der Regel kein Ankerversagen oder Versagen in einer Komponente der Verankerung bei den Ermüdungsversuchen auftreten. Auch in Zugstäben darf kein Ermüdungsversagen auftreten.

(5) Ist der Ausrundungsradius am Seilaustritt aus dem Seilkopf geringer als $30d$ (siehe Bild 6.1), so sind in der Regel die Ermüdungsversuche nach (2) und (3) zusätzlich mit Biegung durchzuführen, die den erwarteten Winkel $\Delta\alpha$ berücksichtigen.

(6) Nach den Ermüdungsversuchen ist der Prüfkörper in der Regel statisch bis zur Bruchlast zu belasten. Die zulässige Bruchlast sollte mindestens 92 % der wirklichen Zugtragfähigkeit des Seiles oder 95 % der rechnerischen Bruchlast betragen. Die zugehörige Bruchdehnung sollte bei einem Wert $\geq 1,5 \%$ liegen.

(7) Ermüdungsversuche nach EN 10138 sind in der Regel mit Einzellitzen, Einzeldrähten oder Zugstäben durchzuführen, die als Proben von jedem hergestellten Zugglied genommen werden.

A.4.2 Hauptzugelemente

A.4.2.1 Drähte

(1) Drähte mit Überzügen aus Zink oder Zinklegierungen sind in der Regel nach dem Verzinken in abgenommenen Prüfmaschinen zu prüfen.

A.4.2.2 Litzen

(1) In der Regel sind Versuche zur Zugfestigkeit, 0,1 % Prüffestigkeit und Bruchdehnung nach EN 10138 durchzuführen.

A.4.2.3 Zugstäbe

(1) In der Regel sind Versuche zur Zugfestigkeit, 0,1 % Prüffestigkeit und Bruchdehnung nach EN 10138 durchzuführen.

A.4.3 Litzen und komplette Seile

(1) Bei Verwendung desselben Litzen- bzw. Seiltyps mit unterschiedlichen Dimensionen sind in der Regel Versuche mit mindestens 3 repräsentativen Probestücken durchzuführen. Die Probestücke müssen in der Regel das an der Lastabtragung beteiligte Zubehör enthalten. Die Last ist in der Regel in derselben Weise einzutragen wie im Tragwerk.

A.4.4 Reibbeiwert

(1) Bei der Bestimmung des Reibbeiwertes zwischen Seilen und Sätteln, Klemmen usw. durch Versuche ist in der Regel Folgendes zu beachten:

- die Auswirkung der Seilkraft auf den Durchmesser der Seile,
- die Kriechverformungen infolge der Querbelastrung (auf Füllstoffe und die Zinküberzüge).

(2) Bei der Auswertung der Versuche ist in der Regel zu beachten, dass die Reibung sowohl günstig als auch ungünstig im Hinblick auf bestimmte Effekte sein kann.

A.4.5 Korrosionsschutz

A.4.5.1 Wasserdichtheit

(1) Um die Dauerhaftigkeit eines Seilsystems mit Wassereinwirkung nachzuweisen, ist in der Regel eine Versuchsanordnung mit „beschleunigter Alterung“ zu verwenden, mit der zyklische Veränderungen der Seilkraft, der Biegung und der Temperatur simuliert werden können. Die Versuche sind in der Regel für ein repräsentatives Seilprobestück am unteren Verankerungsende mit allen Verankerungselementen, Schutzhüllen usw. zu verwenden.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang darf weitere Hinweise zu den Versuchen geben.

A.4.5.2 Korrosionsbarrieren

ANMERKUNG Der Nationale Anhang darf Hinweise zu den Versuchen (z. B. Salznebeltests) geben.

DIN EN 1993-1-11:2010-12
EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

Anhang B **(informativ)**

Transport, Lagerung und Handhabung

- (1) Offene - und vollverschlossene Spiralseile werden in Haspeln oder auf Spulen gewickelt geliefert.
- (2) Der kleinste Wickeldurchmesser darf in der Regel bei vollverschlossenen Spiralseilen nicht unter dem 30-fachen Seildurchmesser, bei offenen Spiralseilen nicht unter dem 24-fachen Seildurchmesser und bei Rundlitzenseilen nicht unter dem 16-fachen Seildurchmesser liegen, um ein Aufspleißen der Seile zu vermeiden.

ANMERKUNG Der Mindestdurchmesser hängt auch vom Korrosionsschutzsystem, der Lagerzeit und der Temperatur ab. Vorsicht ist beim Abwickeln bei Temperaturen unter 5 °C geboten.

- (3) Werden Seile in Haspeln gelagert, ist in der Regel jede Haspel ausreichend zu lüften (kein direkter Bodenkontakt), um die Bildung von Weißrost durch Kondenswasser oder Feuchtigkeit zu vermeiden.
- (4) In der Regel sind Seile beim Einbau äußerst sorgfältig zu behandeln; beim horizontalen Abwickeln ist ein Drehtisch erforderlich.

- (5) Folgende allgemeine Regeln sind zu beachten:

- Hilfskonstruktionen dürften erst nach Seileinbau entfernt werden;
- Biegeradien müssen größer als der 30-fache Seildurchmesser sein;
- ein Ziehen über scharfe Kanten muss vermieden werden;
- Längsverdrehungen müssen vermieden werden (Längsmarkierung sind zu beachten).

- (6) Zugglieder sind in der Regel während ihrer Nutzungsdauer zu überwachen und zu inspizieren, um Abweichungen von den Bemessungsbedingungen, Korrosion und Beschädigungen feststellen zu können.

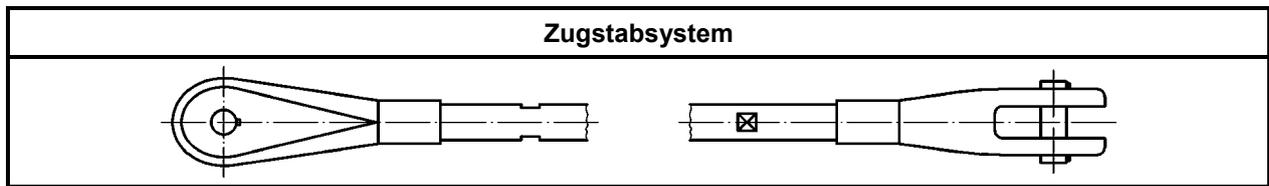
ANMERKUNG Der Nationale Anhang darf Hinweise zu Überwachung und Inspektionen festlegen.

Anhang C (informativ)

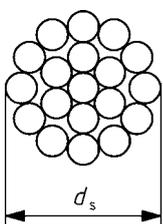
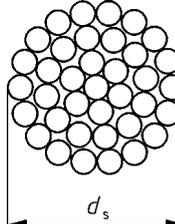
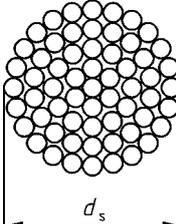
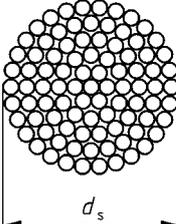
Glossar

ANMERKUNG Siehe EN 12385, Teil 2.

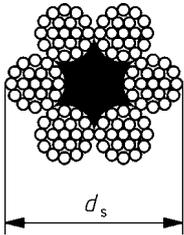
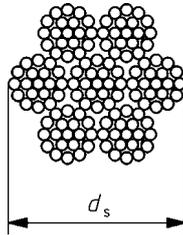
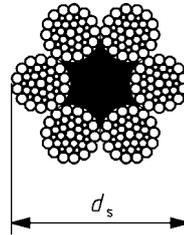
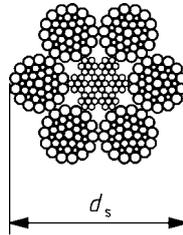
C.1 Produkte der Gruppe A

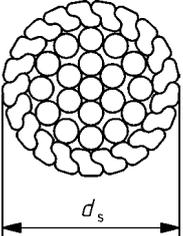
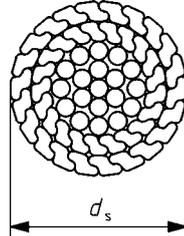
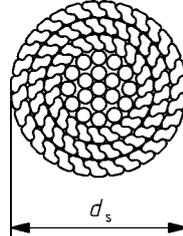


C.2 Produkte der Gruppe B

Offenes Spiralseil				
				
	d_s	d_s	d_s	d_s
Aufbau	1 × 19	1 × 37	1 × 61	1 × 91
Durchmesser d_s in mm	3 bis 14	6 bis 36	20 bis 40	30 bis 52
Litzen	1	1	1	1
Drähte je Litze	19	37	61	91
Äußere Drähte je Litze	12	18	24	30
Nomineller metallischer Querschnittsflächenfaktor C	0,6	0,59	0,58	0,58
Bruchlastfaktor K	0,525	0,52	0,51	0,51

DIN EN 1993-1-11:2010-12
EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

Rundlitzenseil				
				
Aufbau	6 × 19 — CF	6 × 19 — CWS	6 × 36 WS — CF	6 × 36 WS — CWR
Durchmesser d_s in mm	6 bis 40	6 bis 40	6 bis 40	6 bis 40
Litzen	6	6	6	6
Drähte je Litze	18	18	36	36
Äußere Drähte je Litze	12	12	14	14
Nomineller metallischer Querschnittsflächenfaktor C	0,357	0,414	0,393	0,455
Bruchlastfaktor K	0,307	0,332	0,329	0,355

Vollverschlossenes Spiralseil			
			
Aufbau	1 Lage Z-Drähte	2 Lagen Z-Drähte	≥ 3 Lagen Z- Drähte
Durchmesser d_s in mm	20 bis 40	25 bis 50	40 bis 180
Toleranz für d_s	+5 %	+5 %	+5 %
Nomineller metallischer Querschnittsflächenfaktor C	0,636	0,660	0,700
Bruchlastfaktor K	0,585	0,607	0,643
ANMERKUNG Nomineller metallischer Querschnittsflächenfaktor C und Bruchlastfaktor K nach EN 12385-2.			

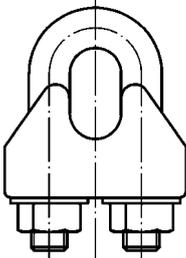
C.3 Drahtseilendstücke

Drahtseilendstücke — metall- oder harzvergossener Seilkopf nach EN 13411-4	
offener vergossener Seilkopf	
zylindrischer Seilkopf	
konischer Seilkopf mit Innengewinde und Verlängerungsstab	
zylindrischer Seilkopf mit Außengewinde und Mutter	
zylindrischer Seilkopf mit Innen- und Außengewinde und Mutter	
zylindrischer Seilkopf mit Innengewinde und Verlängerungsstab	

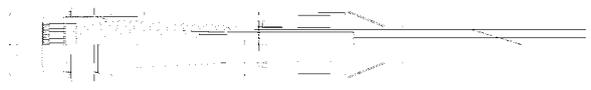
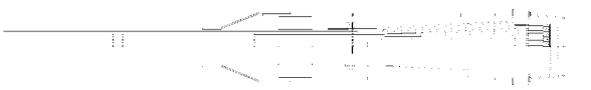
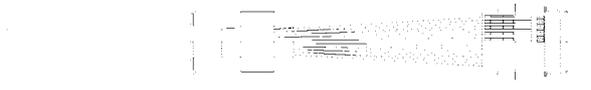
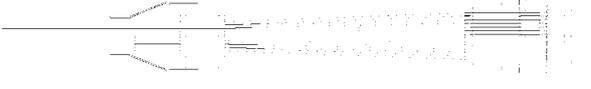
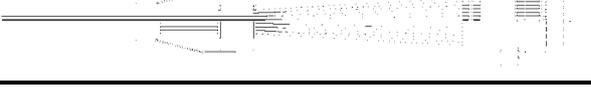
Gepresste Drahtseilendstücke	
offener gepresster Seilkopf	
geschlossener gepresster Seilkopf	
gepresstes Anschlussstück mit Gewinde	
Seilkausche mit gepresster Aluminiumhülse nach EN 13411-3	

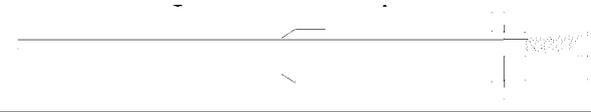
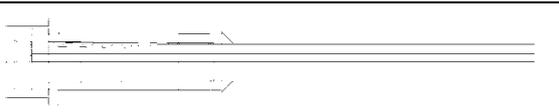
DIN EN 1993-1-11:2010-12
EN 1993-1-11:2006 + AC:2009 (D)

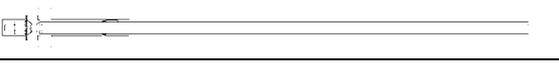
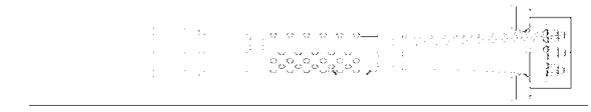
(fortgesetzt)

Gepresste Drahtseilendstücke	
<p>U-förmiger Klemmbügel nach EN 13411-5</p>	

C.4 Produkte der Gruppe C

unbeschichtete Litzen, PE-ummantelte- oder Epoxid-beschichtete Litzen	
Endverankerung	Endverankerung
Verankerung mit Keilen und nachträglich vermörteltem Litzenkopf — unbeschichtete Litzen, PE-ummantelte- oder Epoxid-beschichtete Litzen	
	
Verankerung mit Keilen und Abschlussblechen — PE-ummantelte Litzen	
	
Verankerung mit Keilen und vorher vermörteltem Rohr — PE-ummantelte Litzen	
	
Verankerung mit Keilen und wachsgefülltem Übergangrohr — PE-ummantelte Litzen	
	

Drähte	
Endverankerung	Endverankerung
Verankerung von Drähten und mit Verbundmaterial gefülltem Drahtkopf	
	
Verankerung von Drähten und mit Epoxidharz gefüllten Halbrundköpfen	
	

Zugstäbe	
Endverankerung	Endverankerung
Verankerung eines einzelnen Zugstabes	
	
Verankerung mehrerer Zugstäbe mit Stahlmantelung, vermörtelt	
	

DIN EN 1993-1-11/NA

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatzvermerk
siehe unten

**Nationaler Anhang –
National festgelegte Parameter –
Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-11: Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern
aus Stahl**

National Annex –
Nationally determined parameters –
Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-11: Design of structures with tension components

Annexe Nationale –
Paramètres déterminés au plan national –
Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 1-11: Calcul des structures à câbles ou éléments tendus

Ersatzvermerk

Mit DIN EN 1993-1-1:2010-12, DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-3:2010-12,
DIN EN 1993-1-3/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-5:2010-12, DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12,
DIN EN 1993-1-8:2010-12, DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-9:2010-12,
DIN EN 1993-1-9/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-10:2010-12, DIN EN 1993-1-10/NA:2010-12 und
DIN EN 1993-1-11:2010-12 Ersatz für DIN 18800-1:2008-11;
mit DIN EN 1993-1-1:2010-12, DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-8:2010-12,
DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12 und DIN EN 1993-1-11:2010-12 Ersatz für DIN 18801:1983-09

Gesamtumfang 8 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

DIN EN 1993-1-11/NA:2010-12**Vorwort**

Dieses Dokument wurde vom NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung“ erstellt.

Dieses Dokument bildet den Nationalen Anhang zu DIN EN 1993-1-11:2010-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-11: Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern aus Stahl*.

Die Europäische Norm EN 1993-1-11 räumt die Möglichkeit ein, eine Reihe von sicherheitsrelevanten Parametern national festzulegen. Diese national festzulegenden Parameter (en: Nationally determined parameters, NDP) umfassen alternative Nachweisverfahren und Angaben einzelner Werte, sowie die Wahl von Klassen aus gegebenen Klassifizierungssystemen. Die entsprechenden Textstellen sind in der Europäischen Norm durch Hinweise auf die Möglichkeit nationaler Festlegungen gekennzeichnet. Eine Liste dieser Textstellen befindet sich im Unterabschnitt NA 2.1. Darüber hinaus enthält dieser nationale Anhang ergänzende nicht widersprechende Angaben zur Anwendung von DIN EN 1993-1-11:2010-12 (en: non-contradictory complementary information, NCI).

Dieser Nationale Anhang ist Bestandteil von DIN EN 1993-1-11:2010-12.

DIN EN 1993-1-11:2010-12 und dieser Nationale Anhang DIN EN 1993-1-11/NA:2010-12 ersetzen

zusammen mit	DIN EN 1993-1-1, DIN EN 1993-1-1/NA; DIN EN 1993-1-3, DIN EN 1993-1-3/NA; DIN EN 1993-1-5, DIN EN 1993-1-5/NA; DIN EN 1993-1-8, DIN EN 1993-1-8/NA; DIN EN 1993-1-9, DIN EN 1993-1-9/NA; DIN EN 1993-1-10, DIN EN 1993-1-10/NA	DIN 18800-1:2008-11
zusammen mit	DIN EN 1993-1-1, DIN EN 1993-1-1/NA	DIN 18801:1993-09

Änderungen

Gegenüber DIN 18800-1:2008-11 und DIN 18801:1983-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) nationale Festlegungen zu DIN EN 1993-1-11:2010-12 aufgenommen.

Frühere Ausgaben

DIN 1050: 1934-08, 1937xxxx-07, 1946-10, 1957x-12, 1968-06

DIN 1073: 1928-04, 1931-09, 1941-01, 1974-07

DIN 1073 Beiblatt: 1974-07

DIN 1079: 1938-01, 1938-11, 1970-09

DIN 4100: 1931-05, 1933-07, 1934xxxx-08, 1956-12, 1968-12

DIN 4101: 1937xxx-07, 1974-07

DIN 18800-1:1 981-03, 1990-11, 2008-11

DIN 18800-1/A1: 1996-02

DIN 18801: 1983-09

NA 1 Anwendungsbereich

Dieser nationale Anhang enthält nationale Festlegungen für die Bemessung und Konstruktion von Zuggliedern aus Stahl, die aufgrund ihrer Anschlussausbildung nachstellbar und austauschbar sind, die bei der Anwendung von DIN EN 1993-1-11:2010-12 in Deutschland zu berücksichtigen sind.

Dieser Nationale Anhang gilt nur in Verbindung mit DIN EN 1993-1-11:2010-12.

NA 2 Nationale Festlegungen zur Anwendung von DIN EN 1993-1-11:2010-12**NA 2.1 Allgemeines**

DIN EN 1993-1-11:2010-12 weist an den folgenden Textstellen die Möglichkeit nationaler Festlegungen aus (NDP, en: Nationally determined parameters).

— 2.3.6(1)	— 6.2(2)
— 2.3.6(2)	— 6.3.2(1)
— 2.4.1(1)	— 6.3.4(1)
— 3.1(1)	— 6.4.1(1)P
— 4.4(2)	— 7.2(2)
— 4.5(4)	— A.4.5.1(1)
— 5.2(3)	— A.4.5.2(1)
— 5.3(2)	— B(6)

Darüber hinaus enthält NA 2.2 ergänzende nicht widersprechende Angaben zur Anwendung von DIN EN 1993-1-11:2010-11. Diese sind durch ein vorangestelltes "NCI" (en: non-contradictory complementary information) gekennzeichnet.

— 1.1(2)
— 1.2
— 2.1
— 5.3(2)
— 9.2
— A.1(3)
— C.4

DIN EN 1993-1-11/NA:2010-12

NA 2.2 Nationale Festlegungen

Die nachfolgende Nummerierung entspricht der Nummerierung von DIN EN 1993-1-11:2010-12 bzw. ergänzt diese.

NCI zu 1.1(2)

Seile für Brücken

Gemäß dem nationalen Anhang zu EN 1993-2 dürfen nur vollverschlossene Seile oder Seile mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung verwendet werden.

Die Anwendung der Bemessungsregeln dieses nationalen Anhangs zu DIN EN 1993-1-11 ist nur zulässig wenn die Anforderungen gemäß ZTV-ING, Teil 4 Abschnitte 4 und 5 eingehalten werden.

ANMERKUNG Offene Spiralseile werden in DIN EN 12385 als Spirallitzenseile bezeichnet. Litzebündelseile werden allgemein auch mit dem Begriff Parallellitzenbündel bezeichnet.

NCI zu 1.1(2), Anmerkung 1

Zugstäbe können auch ein über die gesamte Länge des Zugstabes durchgehendes Gewinde haben.

NCI zu 1.2

NA ZTV-ING, *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten*¹⁾

NCI zu 2.1

Geh- und Radwegbrücken sind in der Regel wie Hochbaukonstruktionen zu behandeln.

NDP zu 2.3.6(1) Anmerkung

Hochbau

Es braucht in der Regel kein Austausch von Zuggliedern berücksichtigt zu werden.

Straßen- und Eisenbahnbrücken

Bei Brücken ist der Austausch von mindestens einem Seil als vorübergehende Bemessungssituation vorzusehen. Eine Reduktion der Verkehrslasten und/oder der Teilsicherheitsbeiwerte für diesen Fall sind vom Auftraggeber im Einzelfall festzulegen. Seile, die nicht ohne weiteres ausgetauscht werden können (z.B. das Hauptkabel einer Hängebrücke), müssen ausreichend gegen Beschädigungen geschützt werden.

NDP zu 2.3.6(2) Anmerkung 1:

Hochbau

Es braucht in der Regel kein plötzlicher Zuggliedausfall berücksichtigt zu werden.

1) Zu beziehen bei: Verkehrsblatt-Verlag, Schleefstraße 14, 44287 Dortmund

Straßen- und Eisenbahnbrücken

Bei Brücken ist über die Berücksichtigung des Lastfalls plötzlicher Seilausfall durch den Auftraggeber im Einzelfall zu entscheiden.

NDP zu 2.4.1(1) Anmerkung:**Hochbau**

Es gilt die Empfehlung.

Straßen- und Eisenbahnbrücken

Bei Brücken ist eine Reduktion des Teilsicherheitsbeiwertes für ständige Lasten bei Montagenachweisen nicht zulässig.

NDP zu 3.1(1) Anmerkung 6:**Hochbau**

Es gelten die empfohlenen Größtwerte für f_u . Für Litzenbündelseile gilt $f_u \leq 1860 \text{ N/mm}^2$.

Straßen- und Eisenbahnbrücken

Es gilt für:

- a) Vollverschlossene Seile: $f_u \leq 1570 \text{ N/mm}^2$ (Rund- und Z-Drähte),
- b) Litzenbündelseile: $f_u \leq 1770 \text{ N/mm}^2$.

NDP zu 4.4(2) Anmerkung 1:

Es sind die technischen Bedingungen für das jeweilige Projekt zu beachten.

Für den Hochbau gilt zusätzlich:

Für Seile aus nichtrostendem Stahl ist die jeweilige Korrosionswiderstandsklasse im Rahmen eines bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweises festzulegen.

NDP zu 4.5(4) Anmerkung 1:**Hochbau**

Für Anwendungen im Gültigkeitsbereich der Landesbauordnungen ist die Eignung der Füllmittel über einen bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweis nachzuweisen.

Straßen- und Eisenbahnbrücken

Es dürfen nur die Seilbauarten verwendet werden, für die Festlegungen in DIN EN 1993-2/NA bestehen.

NDP zu 5.2(3) Anmerkung:

Es gilt der empfohlene Wert $\gamma_P = 1,0$.

DIN EN 1993-1-11/NA:2010-12**NCI zu 5.3(2)****Bemessung von Zuggliedern für Bauwerke außerhalb des Anwendungsbereichs von EN 1993**

Die Bemessung von Zuggliedern in Massiv-, Verbund-, Holz- oder Hybridkonstruktionen darf grundsätzlich nach DIN EN 1993-1-11 erfolgen. Das Materialverhalten ist bei der Bestimmung der Schnittgrößen und Verformungen zu berücksichtigen. Insbesondere sind zeitabhängiges Materialverhalten (z.B. Kriechen u. Schwinden) sowie beanspruchungsabhängiges Materialverhalten (z.B. Rissbildung) zu beachten. Ggf. ist die Steifigkeit bei der Tragwerksberechnung auf der sicheren Seite liegend mit oberen und unteren Grenzwerten abzuschätzen.

NDP zu 5.3(2) Anmerkung:

Regelungen zur Anwendung von EN 1993-1-11 auf Bauwerke außerhalb des Anwendungsbereichs von EN 1993 sind in den ergänzenden Regelungen dieses NA enthalten.

NDP zu 6.2(2) Anmerkung 4:**Hochbau**

Es gilt grundsätzlich $\gamma_R = 1,0$.

Straßen- und Eisenbahnbrücken

Seilwinkeländerungen an den Verankerungen sind durch konstruktive Maßnahmen zu reduzieren. Der Nachweis der Tragsicherheit ist mit $\gamma_R = 1,0$ zu führen.

NDP zu 6.3.2(1) Anmerkung:

Es gilt der empfohlene Wert $\gamma_{M,fr} = 1,65$.

NDP zu 6.3.4(1) Anmerkung:

Es gilt der empfohlene Wert $k = 1,10$.

NDP zu 6.4.1(1)P Anmerkung 1:

Es gilt der empfohlene Wert $\gamma_{M,fr} = 1,65$.

NDP zu 7.2(2) Anmerkung 1:**Hochbau**

Sowohl während der Montage als auch unter Betriebsbedingungen gilt für die Spannungsbegrenzungen $f_{const} = f_{SLS} = 0,45 \sigma_{uk}$.

Straßen- und Eisenbahnbrücken

Es gilt für die:

a) Montage

- 1) Vollverschlossene Seile: Der Nachweis der Spannungsbegrenzung im Montagezustand ist mit $f_{const} = 0,45 \sigma_{uk}$ zu führen.

- 2) Litzenbündelseile: Der Nachweis der Spannungsbegrenzung für kurzzeitige Montagezustände ist ohne Berücksichtigung von Biegeeffekten mit $f_{const} = 0,55 \sigma_{uk}$ zu führen.

b) Betriebsbedingungen

Der Nachweis der Spannungsbegrenzung im Betriebszustand ist mit $f_{SLS} = 0,45 \sigma_{uk}$ ohne Berücksichtigung von Biegeeffekten zu führen.

NCI zu 9.2

Ermüdungsnachweis von Seilen für Brücken

Seile von Straßen- und Eisenbahnbrücken sind der Klasse 5 gemäß DIN EN 1993-1-11:2010-12, Tabelle 2.1 zuzuordnen. Die Schwingungen der Seile sind soweit zu reduzieren, dass ihr Einfluss nicht ermüdungsrelevant wird.

Für den Ermüdungsnachweis gilt für

a) Vollverschlossene Seile

Zur Minimierung der Biegespannungen an den Seilverankerungen sind in der Regel konstruktive Schutzmaßnahmen erforderlich. Für den Nachweis sind die Seile in die Kerbfallgruppe $\Delta\sigma_c = 112 \text{ N/mm}^2$ einzuordnen.

b) Litzenbündelseile

Der Nachweis ist ohne Berücksichtigung von Biegespannungen zu führen. Die Seile sind dabei der Kerbgruppe $\Delta\sigma_c = 167 \text{ N/mm}^2$ zuzuordnen. Bei Seilwinkeländerungen an den Verankerungen infolge der Ermüdungslasten von mehr als $0,3^\circ$ ist zusätzlich der Nachweis unter Berücksichtigung der Biegespannungen zu führen. Die Seile sind dann der Kerbgruppe $\Delta\sigma_c = 194 \text{ N/mm}^2$ zuzuordnen.

NCI zu Anhang A.1 (3)

Es ist zu ergänzen:

- Gruppe B: offene Spiralseile, vollverschlossene Spiralseile, Rundlitzenseile;

NDP zu A.4.5.1(1) Anmerkung:

Für Anwendungen im Gültigkeitsbereich der Landesbauordnungen sind die experimentellen Korrosionsschutznachweise über einen bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweis nachzuweisen.

NDP zu A.4.5.2(1) Anmerkung:

Für Anwendungen im Gültigkeitsbereich der Landesbauordnungen sind die experimentellen Korrosionsschutznachweise über einen bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweis nachzuweisen.

NDP zu B(6)

Der erforderliche Umfang an Überwachung und Inspektionen ist in Abstimmung auf die technischen Bedingungen / Anforderungen des jeweiligen Projektes festzulegen.

DIN EN 1993-1-11/NA:2010-12

NCI zu C.4

Die Tabelle zu den Zugstäben ist in Abschnitt C.1 zu verschieben.

DIN EN 1993-1-12**DIN**

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatz für
DIN EN 1993-1-12:2007-07 und
DIN EN 1993-1-12
Berichtigung 1:2009-12

**Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf
Stahlgüten bis S700;
Deutsche Fassung EN 1993-1-12:2007 + AC:2009**

Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S700;
German version EN 1993-1-12:2007 + AC:2009

Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 1-12: Règles additionnelles pour l'utilisation de l'EN 1993 jusqu'à la nuance
d'acier S700;
Version allemande EN 1993-1-12:2007 + AC:2009

Gesamtumfang 12 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

DIN EN 1993-1-12:2010-12

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 1993-1-12:2007 + AC:2009) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Die Arbeiten auf nationaler Ebene wurden durch die Experten des NABau-Spiegelausschusses NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung“ begleitet.

Diese Europäische Norm wurde von CEN am 06. Juli 2006 angenommen.

Die Norm ist Bestandteil einer Reihe von Einwirkungs- und Bemessungsnormen, deren Anwendung nur im Paket sinnvoll ist. Dieser Tatsache wird durch das Leitpapier L der Kommission der Europäischen Gemeinschaft für die Anwendung der Eurocodes Rechnung getragen, indem Übergangsfristen für die verbindliche Umsetzung der Eurocodes in den Mitgliedsstaaten vorgesehen sind. Die Übergangsfristen sind im Vorwort dieser Norm angegeben.

Die Anwendung dieser Norm gilt in Deutschland in Verbindung mit dem Nationalen Anhang.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN [und/oder die DKE] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Der Beginn und das Ende des hinzugefügten oder geänderten Textes wird im Text durch die Textmarkierungen **[AC]** **<AC]** angezeigt.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 1993-1-12:2007-07 und DIN EN 1993-1-12 Berichtigung 1:2009-12 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Vorgänger-Norm mit der Berichtigung 1 konsolidiert;
- b) redaktionelle Änderungen durchgeführt.

Frühere Ausgaben

DIN EN 1993-1-12: 2007-07

DIN EN 1993-1-12 Berichtigung 1: 2009-12

EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE

EN 1993-1-12

Februar 2007

+AC

April 2009

ICS 91.010.30; 91.080.10

Deutsche Fassung

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlgüten bis S700

Eurocode 3: Design of steel structures —
Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up
to steel grades S700

Eurocode 3: Calcul des structures en acier —
Partie 1-12: Règles additionnelles pour l'utilisation de
l'EN 1993 jusqu'à la nuance d'acier S700

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 6. Juli 2006 angenommen.

Die Berichtigung tritt am 29. April 2009 in Kraft und wurde in EN 1993-1-12:2007 eingearbeitet.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

DIN EN 1993-1-12:2010-12
EN 1993-1-12:2007 + AC:2009 (D)

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
1 Allgemeines	4
1.1 Anwendungsbereich	4
1.2 Normative Verweisungen	5
1.3 Symbole	5
2 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-1 bis EN 1993-1-11	5
2.1 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-1	5
2.2 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-2	7
2.3 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-3	7
2.4 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-4	7
2.5 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-5	7
2.6 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-6	7
2.7 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-7	7
2.8 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-8	8
2.9 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-9	9
2.10 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-10	9
2.11 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-11	10
3 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung der Anwendungsnormen EN 1993-2 bis EN 1993-6	10

Vorwort

Dieses Dokument EN 1993-1-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlsorten bis S700* wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird. CEN/TC 250 ist verantwortlich für alle Eurocodes.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis August 2007, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis März 2010 zurückgezogen werden.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Nationaler Anhang zu EN 1993-1-12

Diese Norm enthält alternative Verfahren, Werte und Empfehlungen mit Anmerkungen, in denen angegeben wird, wann es erforderlich sein könnte, eine nationale Auswahl zu treffen. Daher sollte die nationale Norm, mit der EN 1993-1-12 umgesetzt wird, einen Nationalen Anhang enthalten, in dem alle national zu bestimmenden Parameter zur Anwendung bei der Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten im jeweiligen Land angegeben werden.

Nationale Auswahlmöglichkeiten bestehen zu den folgenden Regelungen von EN 1993-1-12:

- **2.1** (3.1(2))
- **2.1** (3.2.2(1))
- **2.1** (5.4.3(1))
- **2.1** (6.2.3(2))
- **2.8** (4.2(2))
- **3** (1)

DIN EN 1993-1-12:2010-12
EN 1993-1-12:2007 + AC:2009 (D)

1 Allgemeines

1.1 Anwendungsbereich

(1) Diese EN 1993-1-12 enthält Regeln, die im Zusammenhang mit den folgenden Teilen angewendet werden können, um die Bemessung von Stahlbauten mit Stahlsorten über S460 bis S700 zu ermöglichen:

- EN 1993-1-1
- EN 1993-1-2
- EN 1993-1-3
- EN 1993-1-4
- EN 1993-1-5
- EN 1993-1-6
- EN 1993-1-7
- EN 1993-1-8
- EN 1993-1-9
- EN 1993-1-10
- EN 1993-1-11
- EN 1993-2
- EN 1993-3-1
- EN 1993-3-2
- EN 1993-4-1
- EN 1993-4-2
- EN 1993-4-3
- EN 1993-5
- EN 1993-6.

(2) In den Fällen, in denen es erforderlich ist, eine in einem anderen Teil angegebene Regel zu ändern, um die Verwendung von Stahlsorten bis S700 zu ermöglichen, wird die hierzu notwendige Vorgehensweise angegeben. Die Änderungen erfolgen entweder in Form einer Anmerkung, dass die jeweilige Regel nicht für Stahlsorten über S460 gilt, mit anschließender Angabe der erforderlichen Regel oder durch Festlegung einer zusätzlichen Regel bzw. zusätzlicher Regeln.

1.2 Normative Verweisungen

(1) Diese Europäische Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend angeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Europäischen Norm, falls sie durch Änderungen oder Überarbeitungen eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation (einschließlich Änderungen).

EN 499, *Schweißzusätze — Umhüllte Stabelektroden zum Lichtbogenhandschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen — Einteilung*

EN 10025-6, *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen — Teil 6: Technische Lieferbedingungen für Flacherzeugnisse aus Stählen mit höherer Streckgrenze im vergüteten Zustand*

EN 10149-1, *Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen — Teil 1: Allgemeine Lieferbedingungen*

EN 10149-2, *Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen — Teil 2: Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte Stähle*

EN 12534, *Schweißzusätze — Drahtelektroden, Drähte, Stäbe und Schweißgut zum Schutzgasschweißen von hochfesten Stählen — Einteilung*

EN 12535, *Schweißzusätze — Fülldrahtelektroden zum Metall-Schutzgasschweißen von hochfesten Stählen — Einteilung*

1.3 Symbole

(1) Die in dieser Norm verwendeten Symbole sind in den zitierten Normen definiert.

2 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-1 bis EN 1993-1-11

2.1 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-1

3.1(2) Zusätzliche Anmerkung:

ANMERKUNG Im Nationalen Anhang dürfen Stahlsorten über S460 bis S700 zur allgemeinen Verwendung oder zur Verwendung in bestimmten Anwendungen festgelegt werden. Die in den Tabellen 1 und 2 festgelegten Stahlsorten und die Nennwerte, die für die Streckgrenzen und die Zugfestigkeit verwendet werden dürfen, sind für die Anwendung empfohlen, vorausgesetzt, dass die in diesem Teil 1-12 angegebenen Regeln befolgt werden.

Tabelle 1 — Nennwerte der Streckgrenze f_y und Zugfestigkeit f_u für warmgewalzten Baustahl

EN 10025-6 Stahlsorte und Stahlgüten	Nennstärke des Elementes t in mm					
	$t \leq 50$ mm		$50 \text{ mm} < t \leq 100$ mm		$100 \text{ mm} < t \leq 150$ mm	
	f_y N/mm ²	f_u N/mm ²	f_y N/mm ²	f_u N/mm ²	f_y N/mm ²	f_u N/mm ²
S500Q/QL/QL1	500	590	480	590	440	540
S550Q/QL/QL1	550	640	530	640	490	590
S620Q/QL/QL1	620	700	580	700	560	650
S690Q/QL/QL1	690	770	650	760	630	710

DIN EN 1993-1-12:2010-12
EN 1993-1-12:2007 + AC:2009 (D)

Tabelle 2 — Nennwerte der Streckgrenze f_y und Zugfestigkeit f_u für warmgewalzte Flacherzeugnisse

EN 10149-2 ^a	1,5 mm ≤ t ≤ 8 mm		8 mm < t ≤ 16 mm	
	f_y N/mm ²	f_u N/mm ²	f_y N/mm ²	f_u N/mm ²
S500MC	500	550	500	550
S550MC	550	600	550	600
S600MC	600	650	600	650
S650MC	650	700	630	700
S700MC	700	750	680	750

^a Es sollte festgelegt werden, dass die Schlagenergie nach EN 10149-1 Abschnitt 11, Option 5 nachzuweisen ist.

3.2.2(1) Zusätzliche Anmerkung:

ANMERKUNG Die Grenzwerte des Verhältnisses f_u/f_y , die Bruchdehnung und die Gleichmaßdehnung ε_u für Stahlsorten über S460 bis S700 dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Folgende Werte werden empfohlen:

— $f_u/f_y \geq 1,05$;

— Bruchdehnung mindestens 10 %;

— $\varepsilon_u \geq 15 \cdot f_y/E$

3.2.2(2) Zusätzliche Anmerkungen:

ANMERKUNG 1 Es sollte davon ausgegangen werden, dass Stahlsorten über S460 bis S700, die einer der in den Tabellen 1 und 2 aufgeführten Stahlsorten entsprechen, diese Anforderungen erfüllen.

ANMERKUNG 2 Der Verformungswiderstand von Stahltragwerken bezieht sich sowohl auf die Dehnung als auch auf die Zähigkeit der Stahlprodukte, aus denen ein Tragwerk besteht. Das geforderte Tragwerksverhalten hängt von den zu erwartenden Verformungen ab. Das geforderte örtliche Verhalten hängt von den verwendeten Bauteilen ab. Auf Grund der erhöhten Beanspruchungen ist sowohl bei der Kontrolle der Verformungen als auch bei der Detailausbildung der einzelnen Teile von Tragwerken aus Stählen nach den Tabellen 1 und 2 besondere Sorgfalt geboten, um Kerben und andere Spannungskonzentrationen zu vermeiden. Sofern erforderlich, sollten eingeprägte Verformungen in der Tragwerksberechnung berücksichtigt werden.

5.4.1(3) Zusätzliche Regel:

Gilt nicht für Stahlsorten über S460 bis S700.

5.4.1(4)B Zusätzliche Regel:

Gilt nicht für Stahlsorten über S460 bis S700.

5.4.3(1) Zusätzliche Regel:

Für Stahlsorten über S460 bis S700 gilt die Tragwerksberechnung mit einer nicht linearen plastischen Berechnung, in der die teilweise Plastifizierung von Bauteilen ausschließlich in plastischen Zonen berücksichtigt wird.

ANMERKUNG Im Nationalen Anhang dürfen zusätzliche Regeln für Stähle nach den Tabellen 1 und 2 festgelegt werden. Regeln für die Bemessung mit der Finite-Elemente-Methode sind dem informativen Anhang C von EN 1993-1-5 zu entnehmen.

6.2.3(2) Zusätzliche Regel:

Für Stahlsorten über S 460 bis S 700 sollte der Bemessungswert des Widerstandes des Nettoquerschnittes nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$N_{t,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{M12}} \quad (6.7a)$$

Dabei ist

γ_{M12} der Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand des Nettoquerschnittes für Stahlsorten über S 460 bis S 700.

ANMERKUNG Der Wert für γ_{M12} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Der Wert $\gamma_{M12} = \gamma_{M2} = 1,25$ wird empfohlen.

6.2.3(3) Zusätzliche Regeln:

Stahlsorten über S460 bis S700 sollten in den Fällen, in denen eine Kapazitätsbemessung erforderlich ist, nicht verwendet werden.

Tabelle 6.2 Zusätzliche Regel:

Die Regeln für die Stahlsorte S460 gelten ebenfalls für Stahlsorten über S460 bis S700.

2.2 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-2

Die Norm gilt ohne weitere zusätzliche Regeln für Stahlsorten über S460 bis S700.

2.3 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-3

Die Norm gilt ohne weitere zusätzliche Regeln für Stahlsorten über S460 bis S700.

2.4 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-4

EN 1993-1-4 ist nicht anwendbar.

2.5 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-5

Die Norm gilt ohne weitere zusätzliche Regeln für Stahlsorten über S460 bis S700.

2.6 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-6

Anhang B ist auf Stahlsorten über S460 bis S700 nicht anwendbar.

2.7 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-7

Die Norm gilt ohne weitere zusätzliche Regeln für Stahlsorten über S460 bis S700.

DIN EN 1993-1-12:2010-12
EN 1993-1-12:2007 + AC:2009 (D)

2.8 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-8

1.1(1) Zusätzliche Regeln:

EN 1993-1-8 darf auch auf Stahlsorten über S460 bis S700 angewendet, wenn die nachstehenden zusätzlichen Regeln befolgt werden.

3.6.1(1) Die Stahlsorten über S460 bis S700 sowie auf Abscheren beanspruchte Schrauben in übergroßen Löchern und in Langlöchern sollten nur für Anschlüsse der Kategorie C verwendet werden.

3.10.3(2) Gilt nicht für Stahlsorten über S460 bis S700.

3.10.4 Gilt nicht für Stahlsorten über S460 bis S700.

3.12(2) Dieser Abschnitt gilt ebenfalls für Anschlüsse mit Stahlsorten über S460 bis S700.

4.2(2) Zusätzliche Regel:

Bei Stahlsorten über S460 bis S700 darf die Festigkeit des Schweißgutes geringer als die des verschweißten Grundwerkstoffes sein.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang darf Einschränkungen in Bezug auf die Verwendung von Elektroden mit geringerer Güte festlegen.

4.5.3.2(6) Zusätzliche Regel:

Bei Verwendung von Elektroden geringerer Güte bei Stahlsorten über S460 bis S700 sollte bei Elektroden nach EN 499, EN 12534 und EN 12535 f_u durch die Bruchfestigkeit des Schweißgutes f_{eu} nach Tabelle 3 ersetzt werden. β_w sollte mit 1,0 angenommen werden.

Tabelle 3 — Bruchfestigkeit f_{eu} von Elektroden

Festigkeitsklasse	35	42	55	62	69
Bruchfestigkeit f_{eu} in N/mm²	440	500	640	700	770

4.7.1(1) Zusätzliche Regel:

Die Beanspruchbarkeit von Schweißverbindungen bei Verwendung von Elektroden mit geringerer Güte mit Stahlsorten über S460 bis S700 sollte auf der Festigkeit des Schweißgutes beruhen.

4.11 Zusätzliche Regel:

Für Stahlsorten über S460 bis S700 sollte die Länge von Kehlnähten in Längsrichtung in überlappten Stößen mit den Stahlsorten über S460 bis S700 maximal $50a$ betragen, es sei denn, die ungleichmäßige Spannungsverteilung wird bei der Bemessung berücksichtigt.

5.1.3 Gilt nicht für Stahlsorten über S460 bis S700.

5.1.4 Gilt nicht für Stahlsorten über S460 bis S700.

5.2.2.4 Gilt nicht für Stahlsorten über S460 bis S700.

6 Zusätzliche Regeln

Die Regeln für verformbare Anschlüsse gelten nicht für Stahlsorten über S460 bis S700. Bei Anwendung einer nicht linearen plastischen Tragwerksberechnung unter Berücksichtigung der teilweisen Plastifizierung von Bauteilen in plastischen Bereichen dürfen die Verbindungen zwischen den Bauteilen nur als volltragfähige Anschlüsse ausgebildet werden. Bei Anwendung einer elastischen Tragwerksberechnung dürfen Verbindungen als teiltragfähige Anschlüsse ausgebildet werden, vorausgesetzt, dass die Tragfähigkeit der Anschlüsse die $\overline{\text{AC}}$ Bemessungswerte der Schnittkräfte $\overline{\text{AC}}$ in den miteinander verbundenen Bauteilen übersteigt. In beiden Fällen sollte die Tragfähigkeit der Anschlüsse auf der Grundlage der elastischen Verteilung von Kräften über die Bauteile eines Anschlusses bestimmt werden.

6.2.6.9 bis 6.2.6.12 Zusätzliche Regeln:

Die Regeln für Stützenfüße auf Stahlsorten über S460 bis S700 brauchen nur angeordnet werden, wenn der Schraubenversagen-Modus für die statische Berechnung der Fußplatten bei Biegebeanspruchung auf der Zugseite der Verbindungen maßgebend ist und eine elastische Verteilung der Kräfte in den Ankerschrauben zu Grunde gelegt wird.

7.1.1(4) Zusätzliche Regel:

Für Stahlsorten über S460 bis S700 beträgt der Abminderungsbeiwert 0,8.

2.9 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-9

8(1) Zusätzliche Regel:

$\overline{\text{AC}}$ Bei den Flanschen von Hybridträgern aus Stahlsorten über S460 bis S700 sollte die Begrenzung $\Delta\sigma \leq 1,5 f_{yf}$ gelten, wobei f_{yf} die Streckgrenze im Flansch ist. $\overline{\text{AC}}$

2.10 Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993-1-10

2.3.2(1) Zusätzliche Regel:

Die Tabelle 4 darf auch für die Bestimmung der größten zulässigen Erzeugnisdicke für Stahlsorten über S460 bis S700.

ANMERKUNG 1 Bei Anwendung der Tabelle 4 darf linear interpoliert werden. Für die meisten Anwendungen liegen die σ_{Ed} -Werte zwischen $\sigma_{Ed} = 0,75 f_y(t)$ und $\sigma_{Ed} = 0,50 f_y(t)$. Die Werte für $\sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t)$ sind aus Interpolationsgründen mit angegeben. Extrapolationen in Bereiche außerhalb der angegebenen Grenzen sind nicht zulässig.

ANMERKUNG 2 Bei Bestellung von Stahlerzeugnissen nach Tabelle 4 sollten die T_J -Werte angegeben werden.

ANMERKUNG 3 $\overline{\text{AC}}$ Tabelle 4 $\overline{\text{AC}}$ liegen die nominellen Werte der Charpy V-Kerbschlagprobe in Walzrichtung zu Grunde.

DIN EN 1993-1-12/NA

ICS 91.010.30; 91.080.10

**Nationaler Anhang –
National festgelegte Parameter –
Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlgüten
bis S700**

National Annex –
Nationally determined parameters –
Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S700

Annexe Nationale –
Paramètres déterminés au plan national –
Eurocode 3: Calcul des structures en acier
Partie 1-12: Règles additionnelles pour l'utilisation de l'EN 1993 jusqu'à la nuance
d'acier S700

Gesamtumfang 5 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

DIN EN 1993-1-12/NA:2011-08

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
NA 1 Anwendungsbereich	4
NA 2 Nationale Festlegungen zur Anwendung von DIN EN 1993-1-12:2010-12	4
NA 2.1 Allgemeines	4
NA 2.2 Nationale Festlegungen	4

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung“ erstellt.

Dieses Dokument bildet den Nationalen Anhang zu DIN EN 1993-1-12:2010-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlsorten bis S 700*.

Die Europäische Norm EN 1993-1-12 räumt die Möglichkeit ein, eine Reihe von sicherheitsrelevanten Parametern national festzulegen. Diese national festzulegenden Parameter (en: Nationally Determined Parameters, NDP) umfassen alternative Nachweisverfahren und Angaben einzelner Werte, sowie die Wahl von Klassen aus gegebenen Klassifizierungssystemen. Die entsprechenden Textstellen sind in der Europäischen Norm durch Hinweise auf die Möglichkeit nationaler Festlegungen gekennzeichnet. Eine Liste dieser Textstellen befindet sich im Unterabschnitt NA 2.1. Darüber hinaus enthält dieser Nationale Anhang ergänzende nicht widersprechende Angaben zur Anwendung von DIN EN 1993-1-12:2010-12 (en: non-contradictory complementary information, NCI).

Dieser Nationale Anhang ist Bestandteil von DIN EN 1993-1-12:2010-12.

DIN EN 1993-1-12/NA:2011-08

NA 1 Anwendungsbereich

Dieser Nationale Anhang enthält nationale Festlegungen für die Regeln, die bei der Anwendung von DIN EN 1993-1-12:2010-12 in Deutschland zu berücksichtigen sind. Die Anwendung dieser Regeln im Zusammenhang mit den Teilen der Reihe DIN EN 1993 ermöglicht die Bemessung von Stahlbauten mit Stahlsorten über S 460 bis S 700.

Dieser Nationale Anhang gilt nur in Verbindung mit DIN EN 1993-1-12:2010-12.

NA 2 Nationale Festlegungen zur Anwendung von DIN EN 1993-1-12:2010-12

NA 2.1 Allgemeines

DIN EN 1993-1-12:2010-12 weist an den folgenden Textstellen die Möglichkeit nationaler Festlegungen aus (NDP, en: Nationally determined parameters).

- 2.1 (3.1(2))
- 2.1 (3.2.2(1))
- 2.1 (5.4.3(1))
- 2.1 (6.2.3(2))
- 2.8 (4.2(2))
- 3 (1)

Darüber hinaus enthält NA 2.2 an den folgenden Textstellen ergänzende nicht widersprechende Angaben zur Anwendung von DIN EN 1993-1-12:2010-12. Diese sind durch ein vorangestelltes "NCI" (en: non-contradictory complementary information) gekennzeichnet.

- 2.8 (4.5.3.2(6))

NA 2.2 Nationale Festlegungen

Die nachfolgende Nummerierung entspricht der Nummerierung von DIN EN 1993-1-12:2010-12.

NDP zu 2.1 (3.1(2))

Die Anwendung von DIN EN 1993-1-12 ist auf Stahlsorten und Stahlprodukte nach DIN EN 1993-1-12:2010-12, Tabelle 1 beschränkt.

Andere als die oben genannten Stahlsorten dürfen nur verwendet werden, wenn

- die chemische Zusammensetzung, die mechanischen Eigenschaften und die Schweißeignung in den Lieferbedingungen des Stahlherstellers festgelegt sind und diese Eigenschaften einer der oben genannten Stahlsorten zugeordnet werden können, oder
- sie in Fachnormen vollständig beschrieben und hinsichtlich ihrer Verwendung geregelt sind, oder
- ihre Verwendbarkeit durch einen bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweis (z. B. allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder Zustimmung im Einzelfall) nachgewiesen worden ist.

ANMERKUNG Diese Einschränkung gilt auch für Stähle nach DIN EN 1993-1-12:2010-12, Tabelle 2.

NDP zu 2.1 (3.2.2(1))

Es gelten die Empfehlungen.

NDP zu 2.1 (5.4.3(1))

Es gelten die getroffenen Festlegungen. Das elastisch-plastische und das starr-plastische Fließgelenkverfahren dürfen nicht angewendet werden.

NDP zu 2.1 (6.2.3(2))

Es gelten die Empfehlungen.

NDP zu 2.8 (4.2(2))

Es dürfen nur Schweißzusatzwerkstoffe mit einer Festigkeit, die gleich oder größer ist als die Festigkeit des Grundwerkstoffs, verwendet werden.

NCI Zu 2.8 (4.5.3.2(6))

Für Schweißverbindungen mit Schweißzusatzwerkstoffen mit einer Festigkeit, die gleich oder größer ist als die Festigkeit des Grundwerkstoffs, wird $\beta_w = 1,20$ festgelegt.

NDP zu 3 (1)

Für DIN EN 1993-2 „Stahlbrücken“, DIN EN 1993-3 „Türme, Maste und Schornsteine“, DIN EN 1993-4 „Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen“, DIN EN 1993-5 „Pfähle und Spundwände“ und DIN EN 1993-6 „Kranbahnen“ wird der Bereich der Stahlsorten nicht eingeschränkt.

