



**Mitteilung des DIBt**  
Technische Regel

Referat I 8  
Bautechnisches Prüfam  
Grundlagen der Standsicherheit

## **Richtlinie für Windenergieanlagen**

### **Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung**

Stand: Oktober 2012 – Korrigierte Fassung März 2015

Diese Richtlinie wurde im Rahmen der Projektgruppe "Windenergieanlagen" des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Berlin erarbeitet<sup>1</sup>. An der Richtlinie haben folgende Personen mitgearbeitet:

Prof. Dr.-Ing. Achmus	Institut für Geotechnik, Leibniz Universität Hannover
Dr.-Ing. Andres	Krätzig & Partner Ingenieurgesellschaft mbH, Bochum
Dipl.-Ing. Baars	DNV GL, Hamburg
Dipl.-Ing. Bechtel	Institut für Stahlbau, Leibniz Universität Hannover
Prof. Dr.-Ing. Faber	Institut für Windenergietechnik, Fachhochschule Flensburg
Dr. Freudenreich	DNV GL, Hamburg
Dipl.-Ing. Gehlhaar	TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH, Nürnberg
Dr.-Ing. Goralski	H+P Ingenieure GmbH & Co. KG, Aachen
Dr.-Ing. Göhlmann	grbv Ingenieure im Bauwesen GmbH & Co. KG, Hannover
Prof. Dr.-Ing. Harte	Statik und Dynamik der Tragwerke, Bergische Universität Wuppertal
Dr.-Ing. Hauschildt	DNV GL, Hamburg
Dipl.-Ing. Häusler (bis Juni 2014)	Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
Prof. Dr.-Ing. Hegger	Institut für Massivbau, RWTH Aachen
Dipl.-Ing. Hering	TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG, Hamburg
Dr.-Ing. Hortmanns	Eusani-Hortmanns-Zahlten Ingenieurgesellschaft mbH, Solingen
Dipl.-Ing. Jepsen	ENERCON GmbH, Aurich
Dipl.-Ing. Klose	Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Hamburg
Dr.-Ing. Kupzok	TÜV SÜD Industrie Service GmbH, München
Dr.-Ing. Marten	Senvion SE, Hamburg
Dipl.-Ing. Nath (bis Oktober 2011)	Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Hamburg
Dipl.-Ing. Neumann (bis Mai 2014)	Innenministerium des Landes Schleswig-Holstein, Kiel
Dipl.-Ing. Petruschke (bis Februar 2015)	TÜV NORD CERT GmbH, Essen
Prof. Dr.-Ing. Rauch	TÜV SÜD Industrie Service GmbH, München
Dr.-Ing. Rosenbusch	Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
Prof. Dr.-Ing. Schaumann	Institut für Stahlbau, Leibniz Universität Hannover
Dr.-Ing. Seidel (bis Mai 2014)	REpower Systems SE, Hamburg
Dipl.-Ing. Winkler	Niedersächsisches Sozialministerium, Hannover
Dipl.-Ing. Wolf	AMSC Austria GmbH, Klagenfurt

---

<sup>1</sup> Anmerkung: Die korrigierte Fassung März 2015 enthält gegenüber der Fassung Oktober 2012 keine inhaltlichen Änderungen, sondern lediglich Klarstellungen sowie redaktionelle Korrekturen. Daher wurde auch die Bezeichnung der Fassung 2012 beibehalten mit dem Zusatz "Korrigierte Fassung März 2015".

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Geltungsbereich</b> .....	<b>6</b>
<b>2 Begriffe und Bezeichnungen</b> .....	<b>7</b>
2.1 Begriffe.....	7
2.2 Bezeichnungen .....	9
2.3 Gegenüberstellung von Begriffen und Bezeichnungen .....	11
<b>3 Bautechnische Unterlagen</b> .....	<b>11</b>
<b>4 Technische Baubestimmungen</b> .....	<b>12</b>
<b>5 Werk- und Baustoffe, Bauprodukte und Ausführung</b> .....	<b>12</b>
<b>6 Ausführungsklassen</b> .....	<b>13</b>
<b>7 Einwirkungen</b> .....	<b>13</b>
7.1 Allgemeines .....	13
7.2 Trägheits- und Gravitationslasten.....	13
7.2.1 Ständige Gravitationslasten (Eigenlasten) .....	13
7.2.2 Trägheitskräfte aus Massensexzentrizitäten .....	13
7.2.3 Erdbeben .....	13
7.3 Aerodynamische Lasten .....	13
7.3.1 Allgemeines .....	13
7.3.2 Windbedingungen .....	14
7.3.2.1 Extremwindbedingungen .....	14
7.3.2.2 Betriebswindbedingungen .....	14
7.3.3 Einflüsse benachbarter baulicher Anlagen, Geländerauhigkeit und Topografie auf die Standorteignung.....	15
7.3.4 Windlasten für den Zustand während der Montage oder Wartung.....	16
7.3.5 Windlast bei Eisansatz.....	17
7.3.6 Einwirkungen aus Wirbelablösungen.....	17
7.4 Sonstige Einwirkungen .....	17
7.4.1 Imperfektionen, Einwirkungen aus ungleichmäßigen Setzungen.....	17
7.4.2 Vorspannkraft.....	17
7.4.3 Erddruck.....	17
7.4.4 Sohlwasserdruck.....	17
7.4.5 Wärmeeinwirkung .....	18
7.4.6 Eislasten .....	19
<b>8 Einwirkungskombinationen</b> .....	<b>19</b>
<b>9 Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen</b> .....	<b>23</b>

9.1	Allgemeines .....	23
9.2	Gesamtdynamische Berechnung.....	23
9.2.1	Allgemeines .....	23
9.2.2	Anforderungen .....	24
9.2.3	Berücksichtigung der Gründung .....	25
9.2.4	Schnittgrößen.....	25
9.3	Vereinfachte Berechnung .....	27
9.3.1	Allgemeines .....	27
9.3.2	Durch Wind erregte Schwingungen des Turmes in Windrichtung.....	28
9.4	Wirbelerregte Querschwingungen .....	28
9.5	Logarithmisches Dämpfungsdekrement .....	28
9.6	Schnittgrößen für den Ermüdungssicherheitsnachweis .....	29
9.6.1	Anforderungen .....	29
9.6.2	Beanspruchungskollektive .....	29
<b>10</b>	<b>Sicherheitskonzept.....</b>	<b>30</b>
10.1	Allgemeines .....	30
10.2	Grenzzustände der Tragfähigkeit .....	30
10.3	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit .....	32
<b>11</b>	<b>Nachweise für den Turm .....</b>	<b>32</b>
11.1	Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.....	32
11.1.1	Teilsicherheitsbeiwerte .....	32
11.1.2	Festigkeitsversagen.....	32
11.1.3	Stabilitätsversagen.....	33
11.1.4	Ermüdungsversagen von Stahlkonstruktionen .....	33
11.1.5	Ermüdungsversagen von Stahl- und Spannbetonkonstruktionen .....	35
11.2	Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit.....	38
11.2.1	Einwirkungskombinationen .....	38
11.2.2	Teilsicherheitsbeiwert .....	38
11.2.3	Verformungsbegrenzung .....	38
11.2.4	Spannungsbegrenzung.....	38
11.2.5	Rissbreitenbegrenzung.....	38
<b>12</b>	<b>Nachweise für die Gründung.....</b>	<b>38</b>
12.1	Gründungskörper .....	38
12.1.1	Sicherheitskonzept.....	38
12.1.2	Stahleinbauteile .....	38
12.1.3	Stahlbetonbauteile .....	39

12.1.4	Bemessung von Pfählen .....	39
12.2	Baugrund .....	39
12.2.1	Beschaffenheit des Baugrunds.....	39
12.2.2	Sicherheitskonzept.....	39
12.2.3	Flachgründungen .....	40
12.2.3.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit .....	40
12.2.3.2	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit .....	40
12.2.4	Pfahlgründungen (äußere Tragfähigkeit).....	41
<b>13</b>	<b>Konstruktionsdetails .....</b>	<b>41</b>
13.1	Ringflanschverbindungen bei stählernen Türmen .....	41
13.2	Öffnungen in der Wand von Stahlrohtürmen.....	44
13.3	Scherbeanspruchte Schraubenverbindungen .....	45
13.4	Stahlsortenauswahl.....	46
13.4.1	Einwirkungen für die Wahl der Stahlsorte .....	46
13.4.2	Maßgebende Erzeugnisdicke bei Ringflanschverbindungen .....	46
13.4.3	Auswahl der Stahlsorten im Hinblick auf Eigenschaften in Dickenrichtung.....	47
<b>14</b>	<b>Bauabnahme und Inbetriebnahme.....</b>	<b>48</b>
<b>15</b>	<b>Wiederkehrende Prüfungen.....</b>	<b>48</b>
15.1	Allgemeines .....	48
15.2	Umfang der Wiederkehrenden Prüfung.....	48
15.3	Unterlagen der zu prüfenden Windenergieanlage.....	48
15.4	Maßnahmen.....	49
15.4.1	Reparaturen .....	49
15.4.2	Außerbetriebnahme und Wiederinbetriebnahme.....	49
15.5	Dokumentation.....	49
<b>16</b>	<b>Standorteignung von Windenergieanlagen .....</b>	<b>50</b>
16.1	Bestehende Anlagen im Falle einer Parkerweiterung/Parkänderung.....	50
16.2	Neuanlagen.....	50
<b>17</b>	<b>Weiterbetrieb von Windenergieanlagen .....</b>	<b>51</b>
17.1	Anwendung der "Richtlinie für den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen" – Beurteilung von Turm und Gründung .....	51
17.2	Sachverständige .....	52
<b>18</b>	<b>In Bezug genommene Normen .....</b>	<b>53</b>
	<b>Anhang A .....</b>	<b>55</b>

## 1 Geltungsbereich

Diese Richtlinie gilt für die Nachweise der Standsicherheit des Turmes und der Gründung von Windenergieanlagen. Sie enthält zugleich, basierend auf den Festlegungen von DIN EN 61400-1, Regelungen über Einwirkungen auf die gesamte Windenergieanlage einschließlich der zugehörigen Sicherheitsbeiwerte, die der Ermittlung der aus der Maschine auf den Turm und die Gründung wirkenden Schnittgrößen (siehe Abschnitt 9.2.4) zu deren Beurteilung zugrunde zu legen sind. Die Beurteilung der Maschine selbst ist nicht Gegenstand dieser Richtlinie. Auf die neunte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Maschinenverordnung) (9. ProdSV) zur Umsetzung der Richtlinie RL 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (ABl. L 157 vom 09.06.2006, S. 24, L 76 vom 16.03.2007, S. 35) wird verwiesen.

Weiter sind gegebenenfalls Anforderungen des anlagenbezogenen Gewässerschutzes nach § 62 WHG (Wasserhaushaltsgesetz) zu berücksichtigen.

Für die Sicherheitsanforderungen an die Maschine gilt DIN EN 61400-1.

Darüber hinaus muss das Sicherheitssystem zwei oder mehrere Bremssysteme enthalten (mechanisch, elektrisch oder aerodynamisch), die geeignet sind, den Rotor aus jedem Betriebszustand in den Stillstand oder Leerlauf zu bringen. Mindestens ein Bremssystem muss in der Lage sein, das System auch bei Netzausfall in einem eigensicheren Zustand zu halten.

Zur Ermittlung der Einwirkungen wird die Anwendung der nachfolgend angegebenen Ausgaben der DIN EN 61400-1 zugelassen. Es gilt jeweils die Norm mit allen zugehörigen Berichtigungen und Anhängen, wobei im Text dieser Richtlinie nur auf das jeweilige Basisdokument mit Angabe des Ausgabejahres (nachfolgend fett gedruckt) verwiesen wird.

<b>DIN EN 61400-1:2011-08</b>	<b>Alternativ: DIN EN 61400-1:2004-08</b>
	DIN EN 61400-1 Berichtigung 1:2005-12

Die jeweils angewendete Ausgabe ist in ihrer Gesamtheit bzgl. der Ermittlung der Einwirkungen anzuwenden. Eine Mischung ist nicht zulässig. Dies betrifft z.B. Details bzgl. der Lastfalldefinitionen und der Auswertemethoden. Ggf. vorhandene Vorgaben zu Konstruktion, Bemessung und Ausführung des Turmes und der Gründung gelten im Zusammenhang mit dieser Richtlinie nicht.

Wenn in dieser Richtlinie auf DIN EN 61400-1 ohne Angabe des Ausgabedatums verwiesen wird, dann gelten entsprechend die Regelungen der jeweils zur gesamtheitlichen Anwendung ausgewählten Ausgabe.

Eine Ausnahme betrifft die Bestimmung der effektiven Turbulenz innerhalb eines Windparks, die nach DIN EN 61400-1:2011-08 zu erfolgen hat.

Windenergieanlagen, deren überstrichene Rotorfläche kleiner als 200 m<sup>2</sup> ist und die eine Spannung erzeugen, die unter 1000 V Wechselspannung oder 1500 V Gleichspannung liegt, dürfen nach DIN EN 61400-2 nachgewiesen werden. Insbesondere muss auch für kleine Windenergieanlagen das Sicherheitssystem zwei oder mehrere Bremssysteme enthalten (mechanisch, elektrisch oder aerodynamisch), die geeignet sind, den Rotor aus jedem Betriebszustand in den Stillstand oder Leerlauf zu bringen. Mindestens ein Bremssystem muss in der Lage sein, das System auch bei Netzausfall in einem eigensicheren Zustand zu halten.

Konstruktion, Bemessung und Ausführung des Turmes und der Gründung von Windenergieanlagen richten sich nach den einschlägigen Technischen Baubestimmungen für vergleichbare Konstruktionen, wie Antennentragwerke, Schornsteine, Masten u. ä., sofern in dieser Richtlinie keine anderen Regelungen getroffen werden.

Außerdem werden Anforderungen bezüglich Inspektion und Wartung der Anlage gestellt, damit die Standsicherheit des Turmes und der Gründung über die vorgesehene Entwurfslebensdauer sichergestellt ist.

Die Richtlinie berücksichtigt nicht die Besonderheiten von Windenergieanlagen, die im offenen Wasser von Nord- und Ostsee errichtet werden (Offshore-Anlagen). Auch werden in dieser Richtlinie die Besonderheiten von Vertikalachsenanlagen und abgespannten Systemen nicht berücksichtigt. Allerdings können die hier angegebenen Regelungen sinngemäß auch auf solche Anlagen angewendet werden.

## 2 Begriffe und Bezeichnungen

### 2.1 Begriffe

Die Definitionen der folgenden Begriffe sind im Zusammenhang mit den Regeln dieser Richtlinie zu verstehen. Sie können u. U. von den in Energieertragsberechnungen und in anderen Regelwerken verwendeten Definitionen abweichen.

■ **Windenergieanlage (WEA):**

Anlage, die die kinetische Energie des Windes in elektrische Energie umwandelt

■ **Fundament und Boden-Bauwerksinteraktion (Bodendrehfeder):**

Das Fundament ist ein erdberührtes Stahl-, Stahlbeton- oder Spannbetonbauteil inkl. Betonsockel über natürlicher bzw. aufgefüllter Gründungssohle und Boden. Die Boden-Bauwerksinteraktion beeinflusst die dynamischen Eigenschaften des Tragwerks. Ein wesentlicher Parameter der Boden-Bauwerksinteraktion ist die Einspannsteifigkeit, die mit Hilfe der Bodendrehfeder beschrieben wird. Diese ist unter Berücksichtigung der statischen bzw. dynamischen Bodenkennwerte zu ermitteln.

■ **Turm:**

Teil einer Windenergieanlage oberhalb des Fundamentes, der die Maschine trägt, einschließlich eventueller Abspannungen

- **Stahlurm:** Turm bestehend aus ein oder mehreren Stahlrohrsegmenten
- **Spannbetonturm:** vorgespannter Ortbeton- oder Fertigteilturm
- **Hybridurm:** Stahlbeton- oder Spannbetonturm mit aufgesetztem Stahlrohrturm

■ **Maschine:**

Der auf dem Turm angeordnete maschinentechnische Teil der Windenergieanlage, hierzu zählen u. a. die Rotorblätter sowie die Nabe, die Welle, das Getriebe, die regelungs- und elektrotechnischen Komponenten, der Generator, die Lager und die Bremsen

■ **Entwurfslebensdauer:**

die der Auslegung der Windenergieanlage zugrunde gelegte rechnerische Zeitdauer

■ **Nennleistung:**

maximale Dauerleistung, die sich aus der Leistungskurve ergibt

■ Nenndrehzahl  $n_R$ :

Drehzahl des Rotors bei Nennwindgeschwindigkeit

■ Leerlauf:

betriebsbereiter Zustand einer Windenergieanlage ohne Leistungsabgabe, bei dem sich der Rotor langsam dreht

■ mittlere Windgeschwindigkeit  $v_m(z)$ :

(10-Minuten-Mittel) der Windgeschwindigkeit in einer Höhe  $z$  über Grund

■ mittlere 50-Jahreswindgeschwindigkeit  $v_{m50}(z)$ :

mittlere Windgeschwindigkeit, in der Höhe  $z$  über Grund, abhängig von der Topographie des Standortes, die statistisch im Mittel einmal in 50 Jahren erreicht oder überschritten wird (entspricht einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,02). Entspricht  $v_m(z)$  nach DIN EN 1991-1-4 unter Berücksichtigung von DIN EN 1991-1-4/NA

■ mittlere 1-Jahreswindgeschwindigkeit  $v_{m1}(z)$ :

mittlere Windgeschwindigkeit in der Höhe  $z$  über Grund, abhängig von der Topographie des Standortes, die statistisch im Mittel einmal jährlich erreicht oder überschritten wird

■ 50-Jahresböengeschwindigkeit  $v_{p50}(z)$ :

Extremwert der Windgeschwindigkeit (3-Sekunden-Mittel) in der Höhe  $z$  über Grund, abhängig von der Topographie des Standortes, die einmal in 50 Jahren erreicht oder überschritten wird; entspricht  $v_p(z)$  nach DIN EN 1991-1-4/NA.

■ 1-Jahresböengeschwindigkeit  $v_{p1}(z)$ :

Extremwert der Windgeschwindigkeit (3-Sekunden-Mittel) in der Höhe  $z$  über Grund, abhängig von der Topographie des Standortes, die einmal jährlich erreicht oder überschritten wird.

■ Basiswindgeschwindigkeit  $v_b$ :

50-Jahres-Wind in 10 m Höhe in ebenem offenem Gelände, der über eine Zeitspanne von 10 Minuten gemittelt wird ( $v_b = v_{b,0}$  da  $c_{season}$  und  $c_{dir} = 1$ , siehe DIN EN 1991-1-4 in Verbindung mit DIN EN 1991-1-4/NA)

■ Jahresmittel der Windgeschwindigkeit  $v_{ave}$ :

über mehrere Jahre gemittelte Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe

■ Nennwindgeschwindigkeit  $v_r$ :

die kleinste mittlere Windgeschwindigkeit, bei der die Nennleistung erreicht wird

■ Einschaltwindgeschwindigkeit  $v_{in}$ :

die kleinste mittlere Windgeschwindigkeit, bei der die Windenergieanlage betrieben wird

■ Abschaltwindgeschwindigkeit  $v_{out}$ :

die größte mittlere Windgeschwindigkeit, bei der die Windenergieanlage betrieben wird

## 2.2 Bezeichnungen

$A$	Fläche
$a$	horizontaler Abstand zwischen den Turmachsen zweier benachbarter Windenergieanlagen
$c_{dir}$	Richtungsbeiwert nach DIN EN 1991-1-4
$C_f$	aerodynamischer Kraftbeiwert
$C_s C_d$	Strukturbeiwert nach DIN EN 1991-1-4
$C_{season}$	Jahreszeitenbeiwert nach DIN EN 1991-1-4
$D$	Rotordurchmesser
$F$	Kraft, Last
$f_0$	Eigenfrequenz
$f_R$	Erregerfrequenz des laufenden Rotors
$h$	Höhe des Rotormittelpunktes (Nabenhöhe) über Gelände, Turmhöhe
$I_T$	Turbulenzintensität
$M$	Moment
$m$	Anzahl der Rotorblätter, Exponent der Wöhlerkurve
$m_E$	Eismasse
$N$	Lastspielzahl
$n_R$	Nenn Drehzahl des Rotors
$q$	Geschwindigkeitsdruck (Staudruck)
$R$	Rotorradius
$s$	auf den Rotordurchmesser bezogener dimensionsloser horizontaler Abstand zwischen den Turmachsen zweier benachbarter Anlagen
$T_{ed}$	Bezugstemperatur
$T_0$	Einwirkungsdauer
$t_s$	Tiefe des Rotorblattes an der Spitze bei linearer Extrapolation der Vorder- und Hinterkante
$t_w$	größte Tiefe des Rotorblattes in der Nähe der Wurzel
$v_b$	Basiswindgeschwindigkeit
$v_{m50}$	mittlere 50-Jahreswindgeschwindigkeit
$v_{m1}$	mittlere 1-Jahreswindgeschwindigkeit
$v_{p50}$	50-Jahresböengeschwindigkeit
$v_{p1}$	1-Jahresböengeschwindigkeit
$v_{hub}$	Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe
$v_{ave}$	Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe
$v_{out}$	Abschaltwindgeschwindigkeit in Nabenhöhe
$v_{in}$	Einschaltwindgeschwindigkeit in Nabenhöhe
$v_r$	Nennwindgeschwindigkeit in Nabenhöhe
	$\left. \begin{array}{l} x \\ y \\ z \end{array} \right\} \text{Koordinaten (siehe Bild 4)}$
$\alpha$	Geländerauhigkeitsexponent
$\beta$	Anströmwinkel

$\gamma_F$	Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkung
$\gamma_M$	Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand
$\delta$	logarithmisches Dämpfungsdekrement
$\varrho$	Verhältniswert bezüglich der Tiefe des Rotorblattes, $\varrho = t_s/t_w$ .
$\xi$	dimensionslose Längsordinate auf dem Rotorblatt
$\rho$	Luftdichte
$\rho_E$	Dichte des Eises
$\sigma$	Spannung
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite

### **Fußzeiger**

d	Bemessungswerte
k	charakteristische Werte
1	1-Jahreswert
50	50-Jahreswert

## 2.3 Gegenüberstellung von Begriffen und Bezeichnungen

Tabelle 1

DIN EN 61400-1:2004	DIN EN 61400-1:2011	DIBt-Richtlinie
<b>Formelzeichen Bezeichnung/Bedeutung</b>	<b>Formelzeichen Bezeichnung/Bedeutung</b>	<b>Formelzeichen Bezeichnung/Bedeutung</b>
$V_{ref}$ Bezugswindgeschwindigkeit  Grundlagenparameter zur Definition der Typklassen. Weitere relevante Auslegungsparameter werden hiervon abgeleitet. 10-min-Mittelwert der extremen Windgeschwindigkeit <b>in Nabenhöhe</b> mit einem Wiederkehrzeitraum von 50 Jahren.	$V_{ref}$ Bezugswindgeschwindigkeit  Grundlagenparameter zur Definition der Typklassen. Weitere relevante Auslegungsparameter werden hiervon abgeleitet. 10-min-Mittelwert der extremen Windgeschwindigkeit <b>in Nabenhöhe</b> mit einem Wiederkehrzeitraum von 50 Jahren.	$V_{m50}(h)$ Mittlere 50-Jahreswindgeschwindigkeit  Mittlere Windgeschwindigkeit <b>in Nabenhöhe</b> errechnet nach DIN EN 1991-1-4 + NA oder nach Kapitel 7.3.2.1 unter Berücksichtigung der Windzone und Geländekategorie mit einem Wiederkehrzeitraum von 50 Jahren.
$V_r$ Bemessungswindgeschwindigkeit	$V_r$ Bemessungswindgeschwindigkeit	$V_r$ Nennwindgeschwindigkeit
<b>Bemessungsleistung</b>	<b>Bemessungsleistung</b>	<b>Nennleistung</b>
A (Anormal) Art des Auslegungszustandes	A (Anormal) Art des Auslegungszustandes	A (Außergewöhnlich) Gruppe der Einwirkungskombinationen

Ein detaillierter Vergleich der Windgeschwindigkeitsbezeichnungen kann dem Anhang A (informativ) entnommen werden.

## 3 Bautechnische Unterlagen

Zu den bautechnischen Unterlagen gehören:

- A.** Technische Daten der Windenergieanlage mit insbesondere folgenden Angaben:
1. Modellbezeichnung
  2. Hersteller
  3. Konfiguration (Typenblatt)
  4. Regelungs- und Bremssystem
  5. Rotorblatttyp
  6. Betriebsdaten, die für die Ermittlung der Einwirkungen und für die Bemessung des Turmes erforderlich sind
- B.** Gesamtübersicht der Anlage und ggf. Lageplan
- C.** Baubeschreibung von Turm und Gründung mit folgenden Angaben:
1. Windgeschwindigkeitszone (Auslegung und ggf. Standort)
  2. Entwurfslebensdauer
  3. Baugrundverhältnisse
- D.** Schnittgrößen zum Nachweis von Turm und Gründung und weitere Grundlagen für die Bemessung (siehe Abschnitt 9)

- E. Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung (Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit) einschließlich der Schwingungsuntersuchungen
- F. Konstruktionszeichnungen für Turm und Gründung mit allen notwendigen Informationen und technischen Anforderungen für die Ausführung von Stahlkonstruktionen (siehe Normenreihe Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten) und von Stahl- und Spannbetonkonstruktionen (siehe Normenreihe Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken).
- G. Montageanleitung (z.B. Spannanweisung, Herstellenweisung für die Gründung gemäß DIN EN 13670)
- H. Gutachtliche Stellungnahme eines Sachverständigen zur Gründung (Baugrundgutachten)

Außerdem müssen für Windenergieanlagen folgende Unterlagen vorliegen:

- I. Gutachtliche Stellungnahmen, in denen ggf. Auflagen zum Bau und Betrieb der Windenergieanlage zu formulieren sind:
  1. Gutachtliche Stellungnahme eines Sachverständigen zur Bestätigung der Schnittgrößen für den Nachweis von Turm und Gründung, Rotorblätter und Maschinenbau (Lastgutachten)
  2. Gutachtliche Stellungnahme eines Sachverständigen zu den Nachweisen der Sicherheitseinrichtungen (Sicherheitsgutachten)
  3. Gutachtliche Stellungnahme eines Sachverständigen zu den Nachweisen der Rotorblätter
  4. Gutachtliche Stellungnahme eines Sachverständigen zu den Nachweisen der maschinenbaulichen Komponenten und der Verkleidung von Maschinenhaus, Nabe (Maschinengutachten)
  5. Gutachtliche Stellungnahme eines Sachverständigen zu den Nachweisen für die elektrotechnischen Komponenten und den Blitzschutz

Weitere Unterlagen, die von dem Sachverständigen des Maschinengutachtens begutachtet sein müssen:

- J. Bedienungsanleitung
- K. Inbetriebnahmeprotokoll (Vordruck)
- L. Wartungspflichtenbuch (siehe Abschnitt 15)

## 4 Technische Baubestimmungen

Sofern in dieser Richtlinie nicht anderes bestimmt ist, gelten die Technischen Baubestimmungen, insbesondere hinsichtlich der Einwirkungen DIN EN 1991-1-1, -1-3 und -1-4, für Stahlkonstruktionen die Grundnormen der Normenreihe DIN EN 1993, für Stahlbeton- und Spannbetonkonstruktionen die Normenreihe DIN EN 1992, sowie für den Baugrund DIN EN 1997. Alle Normen der Eurocode-Reihe sind stets in Verbindung mit ihren Nationalen Anhängen anzuwenden.

Weiterhin dürfen für Stahlvollwandtürme die Regelungen der DIN EN 1993-3-2, Kapitel 5.2 angewendet werden.

## 5 Werk- und Baustoffe, Bauprodukte und Ausführung

Es dürfen nur Werkstoffe verwendet werden, die den Technischen Baubestimmungen entsprechen. Die Verwendung anderer Werkstoffe bedarf nach den bauaufsichtlichen Vorschriften eines besonderen Nachweises der Verwendbarkeit, z.B. durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder durch eine Zustimmung im Einzelfall.

Die Ausführung von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen erfolgt nach DIN EN 13670.

Spannverfahren, die zum Vorspannen von Windenergieanlagen verwendet werden, müssen für den vorgesehenen Einsatzzweck in der Windenergieanlage, bzw. für diesen entsprechenden Anwendungsbereich, geeignet sein.

## 6 Ausführungsklassen

Stahltürme von Windenergieanlagen oder Teile von Windenergieanlagen in Stahlbauweise sind gemäß DIN EN 1090-2 Anhang B der Beanspruchungskategorie SC2 und der Schadensfolgeklasse CC2 zuzuordnen. Demzufolge gilt als Mindestanforderung für Windenergieanlagen die Ausführungsklasse EXC3. Entsprechende Anforderungen für die Ausführung sind DIN EN 1090-2 Anhang A.3 zu entnehmen.

## 7 Einwirkungen

### 7.1 Allgemeines

Einwirkungen auf die Windenergieanlage sind entsprechend DIN EN 61400-1 anzunehmen, siehe auch Abschnitt 1. Ergänzend sind weitere Einwirkungen nach diesem Abschnitt sowie Einwirkungskombinationen nach Abschnitt 8 zu berücksichtigen.

### 7.2 Trägheits- und Gravitationslasten

#### 7.2.1 Ständige Gravitationslasten (Eigenlasten)

Die charakteristischen Werte der Eigenlasten sind mit den Rechenwerten nach DIN EN 1991-1-1 zu ermitteln. Werden Werkstoffe verwendet, die nicht in diesen Normen enthalten sind, so sind deren tatsächliche Wichten der Lastermittlung zugrunde zu legen.

#### 7.2.2 Trägheitskräfte aus Massenexzentrizitäten

Es sind die in DIN EN 61400-1 beschriebenen Rotorunwuchten anzusetzen. Außerdem sind die zusätzlichen Trägheitskräfte aus Massenexzentrizitäten infolge Eislasten für den Fall zu ermitteln, dass 1 Rotorblatt nicht vereist ist (siehe Abschnitt 7.4.6), sofern der Betrieb unter Eislasten nicht sicher ausgeschlossen werden kann.

#### 7.2.3 Erdbeben

Einwirkungen aus Erdbeben sind gemäß DIN EN 1998-1 einschließlich DIN EN 1998-1/NA zu berücksichtigen, wobei Bedeutungskategorie 1 angenommen werden darf.

Die Überlagerung mit den Lasten der WEA anhand der Lastfälle D.5 und D.6 ist hierbei eine vereinfachte Betrachtung. Alternativ kann eine genauere Betrachtung nach DIN EN 61400-1:2011 erfolgen.

### 7.3 Aerodynamische Lasten

#### 7.3.1 Allgemeines

Die aerodynamischen Lasten sind nach DIN EN 1991-1-4 unter Berücksichtigung der besonderen Festlegungen von DIN EN 61400-1 und dieser Richtlinie zu ermitteln.

Im Allgemeinen gelten die Windbedingungen nach DIN EN 61400-1. Abweichungen von DIN EN 61400-1 werden nachfolgend angegeben.

Als Rechenwert für die Luftdichte darf abweichend von DIN EN 1991-1-4  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$  angenommen werden.

Die Windgeschwindigkeit ist unabhängig von der Himmelsrichtung wirkend anzunehmen ( $c_{dir} = 1$ ).

## 7.3.2 Windbedingungen

### 7.3.2.1 Extremwindbedingungen

Die entsprechend der Windzone der Windenergieanlage anzunehmende Windgeschwindigkeit des mittleren 50-Jahreswindes,  $v_{m50}(h)$  ist nach DIN EN 1991-1-4 einschließlich NA zu ermitteln.

Die Berechnung des Höhenprofils der mittleren 50-Jahreswindgeschwindigkeit  $v_{m50}(z)$  und der Turbulenz  $I_v(z)$  für Geländerauhigkeiten bis maximal Geländekategorie III erfolgt grundsätzlich mit den Formeln gemäß Tabelle NA-B.2 bzw. NA-B.4 in DIN EN 1991-1-4/NA.

Rauhigkeiten größer als in Geländekategorie III dürfen nicht angesetzt werden.

Bei Standorten in Geländekategorie I und Geländekategorie II dürfen vereinfacht die Gleichungen (GL 1) und (GL 2) verwendet werden.

Die Turbulenzintensität darf vereinfacht wie folgt angenommen werden:

$$I_v(z) = 0,128 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{-0,05} \quad (\text{GL 1})$$

Das zugehörige Höhenprofil für die mittlere 50-Jahreswindgeschwindigkeit (einschließlich des mittleren Windprofils für das turbulente Windfeld) darf wie folgt angenommen werden:

$$v(z) = 1,15 \cdot v_{b,0} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,121} \quad (\text{GL 2})$$

Die Werte für den mittleren 1-Jahreswind,  $v_{m1}(z)$ , ermitteln sich aus dem mittleren 50-Jahreswind,  $v_{m50}(z)$ , durch Multiplikation mit dem Faktor 0,8.

Diese Festlegungen betreffen das Windmodell EWM, d.h. dass für die entsprechenden Lastfälle aus DIN EN 61400-1 die Windbedingungen entsprechend anzupassen sind.

### 7.3.2.2 Betriebswindbedingungen

Das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe,  $v_{ave}$ , ist nach Gleichung (GL 3) bzw. Gleichung (GL 4) anzunehmen, sofern standortspezifisch keine geringeren Werte nachgewiesen werden.

$$v_{ave} = 0,18 \cdot v_{m50}(h) \quad (\text{GL 3})$$

$$v_{ave} = 0,20 \cdot v_{m50}(h) \quad (\text{GL 4})$$

Die Gleichung (GL 4) gilt für Inseln der Nordsee.

Das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit  $v_{ave}$  in WZ 1 und WZ 2 ist mit dem Wert von WZ 3 anzusetzen.

Es wird empfohlen, die Anlage für die Turbulenzintensität der Turbulenzkategorie A nach DIN EN 61400-1 nachzuweisen, um die Abdeckung aller deutschen Standorte bei Errichtung von Einzelanlagen zu gewährleisten. Wird hiervon abgewichen, ist eine standortbezogene Turbulenzbeurteilung erforderlich, siehe Kapitel 16.

Es ist zulässig, für Windenergieanlagen Betriebs- und Extremwindbedingungen einschließlich der Turbulenzkategorie unabhängig von Windzonen gemäß DIN EN 1991-1-4 zu spezifizieren und dafür im Rahmen einer Typenprüfung nachzuweisen.

Diese Angaben müssen in der Typenprüfung und im Lastgutachten enthalten sein. Abgedeckte Windzonen und Geländekategorien sind dabei explizit anzuführen.

### **7.3.3 Einflüsse benachbarter baulicher Anlagen, Geländerauhigkeit und Topografie auf die Standorteignung**

Standortspezifisch ist zu untersuchen, ob durch lokale Turbulenzerhöhungen infolge der Einflüsse benachbarter Windenergieanlagen oder durch die Standortwindbedingungen die Standorteignung gefährdet wird.

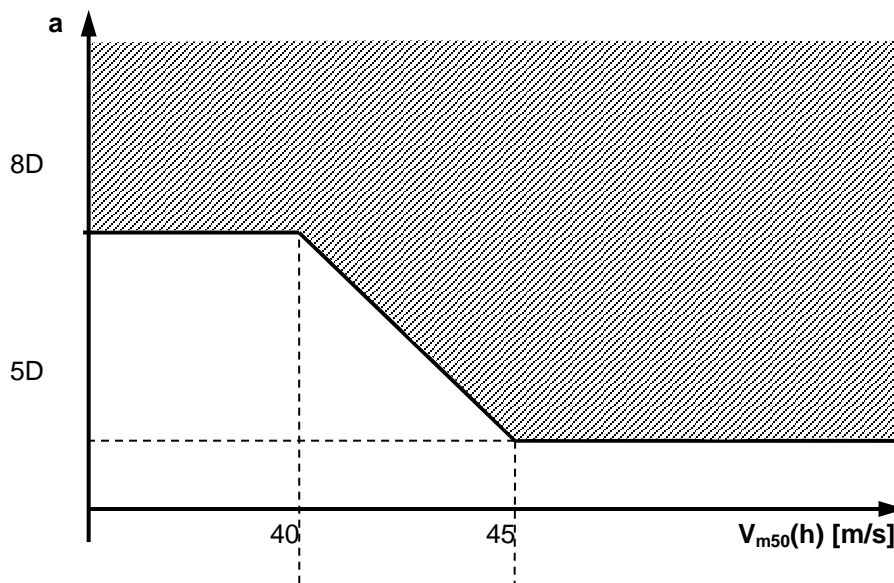
Die Prüfung der Standorteignung ist entsprechend nach Kapitel 16 „Standorteignung von Windenergieanlagen“ durchzuführen.

Die auf die Windenergieanlage einwirkenden Lasten sind mindestens mit den standortspezifischen Werten der Windparameter zu ermitteln.

Wenn die Anlage für die Turbulenzkategorie A ausgelegt wurde, braucht der Einfluss der lokalen Turbulenzerhöhung auf die Standorteignung nicht untersucht zu werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

$$a \geq 8D \quad \text{für} \quad v_{m50}(h) \leq 40 \text{ m/s} \quad (\text{GL 5})$$

$$a \geq 5D \quad \text{für} \quad v_{m50}(h) \geq 45 \text{ m/s} \quad (\text{GL 6})$$



**Bild 1:** Schematische Darstellung der erforderlichen Abstände (schraffierter Bereich)

Dabei ist:

- |              |   |
|--------------|---|
| a            | Abstand zwischen den Turmachsen benachbarter Windenergieanlagen |
| D            | der jeweils größere Rotordurchmesser                            |
| $v_{m50}(h)$ | Mittlerer 50-Jahreswind in Nabenhöhe                            |

Für Zwischenwerte von  $v_{m50}(h)$  ist  $a$  linear zu interpolieren. Dabei sind die in Deutschland auftretenden Kombinationen von Windgeschwindigkeit und Geländekategorie bereits berücksichtigt.

### 7.3.4 Windlasten für den Zustand während der Montage oder Wartung

Für die Untersuchung der Zustände während der Montage dürfen die Windgeschwindigkeit  $v_b$  bzw. der Geschwindigkeitsdruck, der sich aus der Windgeschwindigkeit ergibt, in Abhängigkeit von der Dauer dieses Zustandes sowie ggf. der gewählten Schutzmaßnahmen nach DIN EN 1991-1-4 unter Berücksichtigung von DIN EN 1991-1-4/NA reduziert werden.

Für die Untersuchung der Wartungszustände muss die maximal zulässige mittlere Windgeschwindigkeit vom Hersteller angegeben werden. Es ist sicherzustellen, dass die Wartungsarbeiten nur bis zu der vom Hersteller angegebenen maximalen mittleren Windgeschwindigkeit durchgeführt werden.

Zur Erreichung eines ausreichenden Sicherheitsabstandes zur zulässigen mittleren Windgeschwindigkeit ist die Windgeschwindigkeit für die Ermittlung der Lasten geeignet zu erhöhen. Hierfür sind folgende Werte anzunehmen:

- Bei Anwendung eines deterministischen Windfeldes ist eine EOG (= extreme operating gust) gemäß DIN EN 61400-1:2006, basierend auf einer mittleren Windgeschwindigkeit von 10 m/s über der zulässigen mittleren Windgeschwindigkeit, zu berücksichtigen.
- Bei Anwendung eines turbulenten Windfeldes ist die mittlere Windgeschwindigkeit um 5 m/s gegenüber der zulässigen mittleren Windgeschwindigkeit zu erhöhen.

### 7.3.5 Windlast bei Eisansatz

Bei Eisansatz ist die Windlast auf die durch den allseitigen Eisansatz (siehe Abschnitt 7.4.6) vergrößerte Bezugsfläche des Tragwerkes zu ermitteln. Bei Fachwerken sind die aerodynamischen Kraftbeiwerte dem durch die Vereisung veränderten Völligkeitsgrad entsprechend anzusetzen.

### 7.3.6 Einwirkungen aus Wirbelablösungen

Einwirkungen aus Wirbelablösungen können insbesondere bei Türmen mit kreisförmigen oder annähernd kreisförmigen Querschnitten zu Schwingungen rechtwinklig zur Windrichtung (Querschwingungen) führen, siehe Abschnitt 9.4.

## 7.4 Sonstige Einwirkungen

### 7.4.1 Imperfektionen, Einwirkungen aus ungleichmäßigen Setzungen

Neben den elastischen Verformungen der Tragkonstruktion und des Baugrunds unter Einwirkung der äußeren Lasten sind folgende ungewollte Abweichungen der Turmachse von der Lotrechten als ständige Einwirkungen zu berücksichtigen:

- Schiefstellung der Turmachse mit 5 mm/m zur Erfassung von Herstellungs- und Montageungenauigkeiten und Einflüssen aus einseitiger Sonneneinstrahlung
- Schiefstellung infolge ungleichmäßiger Setzungen des Baugrunds oder Änderung der Stützbedingungen<sup>2</sup>

Einwirkungen aus Imperfektionen und ungleichmäßigen Setzungen müssen in ungünstiger Richtung wirkend zu den Einwirkungen addiert werden, die aus der gesamt dynamischen Berechnung resultieren.

### 7.4.2 Vorspannkraft

Die Berücksichtigung der Vorspannung von Betonkonstruktionen erfolgt gemäß DIN EN 1992-1-1.

### 7.4.3 Erddruck

Ungünstig wirkende resultierende Erddrücke (z.B. bei Hanglagen) sind zu berücksichtigen.

### 7.4.4 Sohlwasserdruck

Ungünstig wirkende Sohlwasserdrücke sind zu berücksichtigen. Falls keine anderen Werte belegt werden, ist ein Bemessungswasserstand in Höhe der Geländeoberkante anzusetzen. In Überschwemmungsgebieten sind entsprechend höhere Wasserstände zu berücksichtigen.

Bei Typenberechnungen ist der zugrunde gelegte Bemessungswasserstand in den Planunterlagen anzugeben.

#### Hinweis:

Der Sohlwasserdruck ist als ständige Last anzusetzen. Wird der Wasserstand bis OK-Gelände angesetzt, darf mit  $\gamma_F = 1,1$  gerechnet werden.

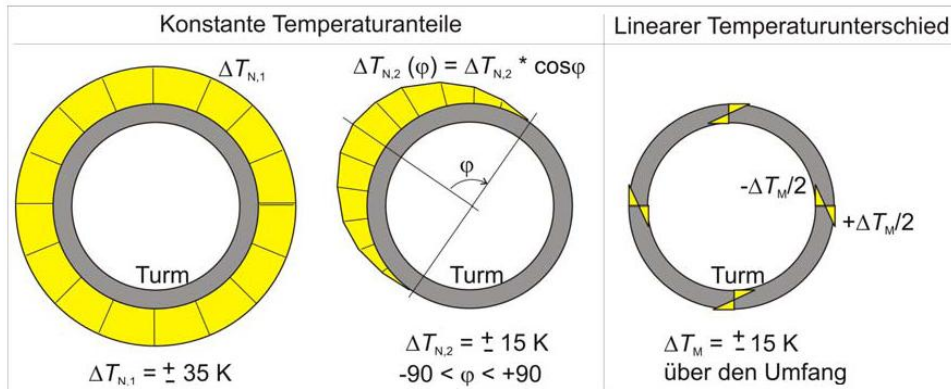
---

<sup>2</sup> Für Typenberechnungen kann als sinnvoller Wert für diese Einwirkung eine Setzungsdifferenz zwischen den Außenkanten des Fundamentes von 40 mm oder eine Schiefstellung des Turmes von 3 mm/m angenommen werden. Im Einzelfall ist die Richtigkeit dieser Annahme durch ein Bodengutachten zu bestätigen.

### 7.4.5 Wärmeeinwirkung

Um die Auswirkungen aus Temperatur gegenüber der Aufstelltemperatur von 15 °C und aus Effekten der Sonneneinstrahlung zu erfassen, sind bei Türmen aus Spannbeton folgende Temperaturanteile zu berücksichtigen (Bild 2):

- ein über den Umfang und die Querschnittsdicke konstant wirkender Anteil  $\Delta T_{N,1} = \pm 35 \text{ K}$
- ein über den Umfang entlang eines Umfangssektors von 180° cosinusförmig verlaufender, über die Querschnittsdicke konstanter Anteil  $\Delta T_{N,2} = \pm 15 \text{ K}$
- ein über die Wanddicke in Längs- und Ringrichtung linear veränderlicher Temperaturunterschied  $\Delta T_M = \pm 15 \text{ K}$



**Bild 2:** Darstellung der Temperaturanteile  $\Delta T_{N,1}$ ,  $\Delta T_{N,2}$  und  $\Delta T_M$

Aus dem Betrieb der Anlage kann sich ein größerer linear veränderlicher Temperaturunterschied einstellen, der anstelle von  $\Delta T_M = \pm 15 \text{ K}$  zu berücksichtigen ist.

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit sind die Temperaturlastfälle (Gleichung (GL 7)) mit dem charakteristischen Wert der Gruppe N (Tabelle 2: LF D.1) zu überlagern. Dabei ist der Kombinationsbeiwert  $\psi_{temp} = 0,6$  anzusetzen.

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist der Temperaturlastfall in Abhängigkeit von der Art der Vorspannung mit dem zugehörigen Lastfall nach Tabelle 2 zu überlagern:

**Spannbeton ohne Verbund:** quasi-ständige Kombination: D.3  
**Spannbeton mit Verbund:** häufige Kombination: D.2

Dabei ist in beiden Fällen der Kombinationsbeiwert  $\psi_{temp} = 0,6$  anzusetzen.

Bei der Überlagerung sind die Temperaturanteile jeweils einzeln oder in Kombination nach Gleichung (GL 7) anzusetzen.

$$\max. \left\{ \begin{array}{l} \Delta T_{N,1} + \Delta T_{N,2} \\ \Delta T_M \\ (\Delta T_{N,1} + \Delta T_{N,2}) + 0,75 \Delta T_M \\ 0,35 (\Delta T_{N,1} + \Delta T_{N,2}) + \Delta T_M \end{array} \right. \quad (\text{GL 7})$$

#### 7.4.6 Eislasten

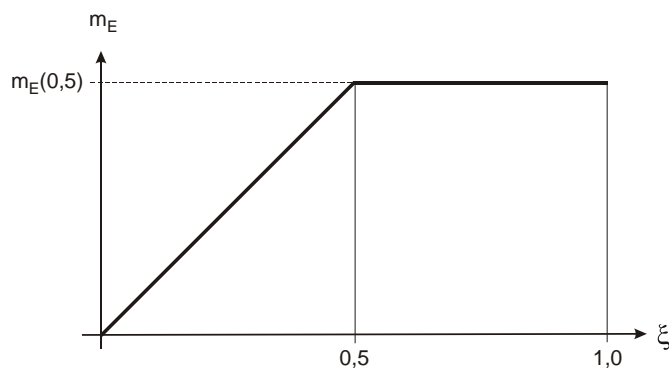
Bei stillstehenden Anlagen sind die Eislasten für alle der Witterung ausgesetzten Konstruktionsteile nach DIN 1055-5 zu ermitteln.

Sofern der Betrieb unter Eislasten nicht sicher ausgeschlossen werden kann, ist der Eisansatz an den Rotorblättern durch eine über die Länge des Rotorblattes verteilt anzunehmende Masse  $m_E(\xi)$  nach Bild 3 und Gleichung (GL 8) zu berücksichtigen. Die Eismasse ist als an der Profilvorderkante des Rotorblattes wirkend anzunehmen.

$$m_E(0,5) = c_E(R) \cdot \vartheta(1 + \vartheta) \cdot \rho_E \cdot t_w^2 \quad (\text{GL 8})$$

Dabei ist:

$$c_E(R) = 0,3 \cdot e^{-0,32 R} + 0,00675 \quad (\text{GL 9})$$



$\xi$ : dimensionslose Längenkoordinate auf dem Rotorblatt

**Bild 3:** Eisansatz an Rotorblättern bei Anlagen in Betrieb

## 8 Einwirkungskombinationen

Zur Ermittlung der Beanspruchungen sind die in DIN EN 61400-1 aufgeführten äußeren Bedingungen und Einwirkungen unter Berücksichtigung der zusätzlichen Festlegungen aus Tabelle 2 und Tabelle 3 zu kombinieren, siehe Absatz 1 von DIN EN 61400-1.

Mit den entsprechend zugeordneten Gruppen der Einwirkungskombinationen sind die jeweils anzuwendenden Teilsicherheitsbeiwerte nach Tabelle 5 oder Tabelle 6 definiert.

Für die mit F (Fatigue) bezeichneten Gruppen der Einwirkungskombinationen ist nur der Ermüdungssicherheitsnachweis zu führen. Hierbei sind die Einwirkungen der einzelnen Betriebszustände zu akkumulieren.

Die Einwirkungskombinationen der Gruppen N (Normal und Extrem), A (Außergewöhnlich) und T (Transport und Errichtung) sind getrennt zu untersuchen.

Das Extreme Windgeschwindigkeitsmodell (EWM) ist ein turbulentes Extremwindmodell, basierend auf der mittleren Windgeschwindigkeit (50-Jahreswind  $v_{m50}(z)$  bzw. 1-Jahreswind  $v_{m1}(z)$ ).

Alternativ darf ein stationäres Extremwindmodell, basierend auf der Böenwindgeschwindigkeit, (50-Jahresbö  $v_{p50}(z)$  bzw. 1-Jahresbö  $v_{p1}(z)$ ) angewendet werden. Die Werte für die 1-Jahres-Böenwindgeschwindigkeit,  $v_{p1}(z)$  ermitteln sich aus der 50-Jahres-Böenwindgeschwindigkeit,  $v_{p50}(z)$  durch Multiplikation mit dem Faktor 0,8.

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit sind die Temperaturlastfälle nach Kapitel 7.4.5 mit dem charakteristischen Wert der Gruppe N (Tabelle 2: LF D.1) zu überlagern.

Die Temperaturlasten sind beim Nachweis der Dekompression bzw. dem Nachweis der Rissbreitenbegrenzung entsprechend Abschnitt 11.2.5 zu berücksichtigen.

**Tabelle 2: Zusätzliche Lastfälle**

Betriebsbedingungen (Bezug auf DIN EN 61400-1)	DLC	Windbedingungen	Sonstige Bedingungen	Gruppe der Einwirkungskombinationen bzw. auszuwertende Lastfallgruppen
Verschiedene Betriebsbedingungen entsprechend der auszuwertenden Lastfälle	D.1	Hinweis: Die angegebenen Lastfälle finden Anwendung für Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. $v_{in} \leq v_{hub} \leq v_{out}$	<b>Charakteristischer Wert:</b> Bemessungswert aller ausgewerteten Lastfälle (Auswertung gemäß DIN EN 61400-1)	N und T (ohne Erdbeben)
	D.2		<b>Häufige Einwirkungen:</b> Beanspruchungen mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von $p = 10^{-4}$ (entspricht 17.5 Stunden in 20 Jahren)	Die Auswertung umfasst alle Lastfälle der Tabelle 3
	D.3		<b>Quasi-ständige Einwirkungen:</b> Beanspruchungen mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von $p = 10^{-2}$ (entspricht 1.750 Stunden in 20 Jahren)	
1. Produktionsbetrieb	D.4	NWP $v_{hub} = v_r$	Eislasten (siehe 7.4.6)	F
	D.5	NWP $v_{hub} = v_r$	Erdbeben	A
5. Notabschaltung	D.6	NWP $v_{hub} = v_r$	Erdbeben	A
6. Parken (Stillstand oder Leerlauf)	D.7	EWM Wiederkehrperiode 50 Jahre $v_{hub} = v_{m50}(h)$	Gierfehler $\beta = 0^\circ$	N ( $\gamma_F = 1.5$ )
	D.8	EWM Wiederkehrperiode 50 Jahre $v_{hub} = v_{m50}(h)$	Analog DLC 6.1 gemäß DIN EN 61400-1, jedoch mit Windbedingungen gemäß Abschnitt 7.3.2	N
	D.9	EWM Wiederkehrperiode 50 Jahre $v_{hub} = v_{m50}(h)$	Analog DLC 6.2 gemäß DIN EN 61400-1, jedoch mit Windbedingungen gemäß Abschnitt 7.3.2	A
	D.10	EWM Wiederkehrperiode 1 Jahr $v_{hub} = v_{m1}(h)$	Analog DLC 6.3 gemäß DIN EN 61400-1, jedoch mit Windbedingungen gemäß Abschnitt 7.3.2	N
7. Parken (Stillstand mit Fehler)	D.11	EWM Wiederkehrperiode 1 Jahr $v_{hub} = v_{m1}(h)$	Analog DLC 7.1 gemäß DIN EN 61400-1, jedoch mit Windbedingungen gemäß Abschnitt 7.3.2	A
8. Transport, Wartung, Reparatur	D.12	EWM Wiederkehrperiode 1 Jahr $v_{hub} = v_{m1}(h)$	Analog DLC 8.2 gemäß DIN EN 61400-1, jedoch mit Windbedingungen gemäß Abschnitt 7.3.2	A

**Tabelle 3:** Lastfälle für den Nachweis der Ermüdungssicherheit

Betriebsbedingungen (Bezug auf DIN EN 61400-1)	DLC (DIN EN 61400-1:2006)	DLC (DIN EN 61400-1:2004)	Windbedingungen	Sonstige Bedingungen	Anzusetzende Häufigkeit
<b>1. Produktionsbetrieb</b>	D.4	D.4	NWP $v_{hub} = v_r$	Eislasten	7 Tage pro Jahr
	1.2	1.2	NTM $v_{in} \leq v_{hub} \leq v_{out}$		Entsprechend Windgeschwindigkeitsverteilung
<b>2. Produktionsbetrieb mit Auftreten eines Fehlers</b>	2.4	2.3	NTM $v_{in} \leq v_{hub} \leq v_{out}$	1. Überdrehzahl @ $v_r$ 1. Überdrehzahl @ $v_{out}$	7 x pro Jahr 3 x pro Jahr
			NTM $v_{in} \leq v_{hub} \leq v_{out}$	Betrieb mit extremen Gierfehler	24 h pro Jahr
			NTM	Netzausfall	20 x pro Jahr, Ansatz verschiedener Windgeschwindigkeiten entsprechend der Windgeschwindigkeitsverteilung
<b>3. Start</b>	3.1	3.1	NWP	Start @ $v_{in}$ Start @ $v_r$ Start @ $v_{out}$	1000 x pro Jahr 50 x pro Jahr 50 x pro Jahr
<b>4. Stopp</b>	4.1	4.1	NWP	Stop @ $v_{in}$ Stop @ $v_r$ Stop @ $v_{out}$	1000 x pro Jahr 50 x pro Jahr 50 x pro Jahr
<b>6. Parken (Stillstand oder Leerlauf)</b>	6.4	6.2	NTM $v_{hub} \leq 0,7$ $v_{m50}(h)_{,0}$		Entsprechend Windgeschwindigkeitsverteilung

#### Hinweise

- Entsprechend Anlagenkonzept (Regelung, Betriebsführung, Wartung, etc.) müssen ggf. weitere Lastfälle oder andere Häufigkeiten für die Ermüdung (Fatigue - Auswertung) berücksichtigt werden.
- Lastfall D.4 muss berücksichtigt werden, wenn der Betrieb unter Eislasten nicht sicher ausgeschlossen werden kann.

## 9 Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen

### 9.1 Allgemeines

Die Schnittgrößen zur Bemessung von Turm und Gründung sind durch eine gesamtdynamische Berechnung unter Berücksichtigung der Regelungen nach Abschnitt 9.2 zu ermitteln.

Abweichend hiervon darf für Horizontalachsenanlagen auch eine vereinfachte Berechnung der Turmstruktur entsprechend Abschnitt 9.3 durchgeführt werden, wenn im dauernden Betrieb ein ausreichender Abstand der Eigenfrequenzen  $f_{0,n}$  des Turmes von den Erregerfrequenzen  $f_R$  bzw.  $f_{R,m}$  entsprechend der Gleichung (GL 10) und der Gleichung (GL 11) gewährleistet ist. Das vereinfachte Verfahren darf auch bei Anlagen im Zustand "außer Betrieb" angewendet werden.

Im dauernden Betrieb ist ein ausreichender Abstand der Eigenfrequenzen  $f_{0,n}$  des Turmes von den Erregerfrequenzen  $f_R$  bzw.  $f_{R,m}$  entsprechend der Gleichungen (GL 10) und (GL 11) nachzuweisen.

$$\frac{f_R}{f_{0,1}} \leq 0,95 \quad (\text{GL 10})$$

$$\frac{f_{R,m}}{f_{0,n}} \leq 0,95 \quad \text{oder} \quad \frac{f_{R,m}}{f_{0,n}} \leq 1,05 \quad (\text{GL 11})$$

Dabei ist:

- $f_R$  max. Drehfrequenz des Rotors im normalen Betriebsbereich
- $f_{0,1}$  erste Eigenfrequenz des Turms
- $f_{R,m}$  Durchgangsfrequenz der m Rotorblätter
- $f_{0,n}$  n-te Eigenfrequenz des Turms

Die Anzahl n der zu ermittelnden Eigenfrequenzen muss mindestens so groß gewählt werden, dass die höchste berechnete Eigenfrequenz um mindestens 20 % höher liegt als die Blattdurchgangsfrequenz.

Die Eigenfrequenzen des Turmes sind für das zu untersuchende Schwingungssystem unter der Annahme elastischen Werkstoffverhaltens zu ermitteln und anzugeben. Dabei ist auch der Einfluss der Gründung zu berücksichtigen.

Um Unsicherheiten bei der Berechnung der Eigenfrequenzen zu berücksichtigen, sind die rechnerisch ermittelten Werte um  $\pm 5\%$  zu variieren.

Bei Anlagen, bei denen im dauernden Betrieb die Gleichung (GL 10) und Gleichung (GL 11) nicht erfüllt sind, d. h., die im resonanznahen Bereich betrieben werden, ist eine betriebliche Schwingungsüberwachung durchzuführen.

### 9.2 Gesamtdynamische Berechnung

#### 9.2.1 Allgemeines

Beanspruchungen des Gesamtsystems mittels einer gesamtdynamischen Berechnung sind nach der Elastizitätstheorie zu ermitteln. Es ist zu beachten, dass Einwirkungskomponenten für einige Nachweise auch günstig wirken können. Die einzelnen Komponenten der Schnittgrößen haben im

Allgemeinen keinen phasengleichen Verlauf, so dass hier die ungünstigsten Zeitpunkte herauszugreifen sind.

Bei einer gesamtdynamischen Berechnung im Zeitbereich kann das Verfahren der Teilsicherheitsbeiwerte nicht angewendet werden. In diesem Fall ist entsprechend Abschnitt 10.2 zu verfahren.

### 9.2.2 Anforderungen

Bei einer gesamtdynamischen Berechnung der Windenergieanlage sind die folgenden Einflussparameter bezüglich Windmodell, Aerodynamik, Strukturdynamik sowie Funktion zu berücksichtigen.

#### ■ Windmodell

Das Windmodell muss den Bedingungen nach DIN EN 61400-1 entsprechen.

Zusätzlich ist Folgendes zu beachten:

Die Einflüsse aus Turmschatten dürfen nach der Potenzialtheorie abgeschätzt werden.

#### ANMERKUNG:

Befriedigende Ergebnisse können im Allgemeinen bei einer Windgeschwindigkeitsabtastrate von 4 pro Sekunde und einer Lastabtastrate von 20 pro Sekunde erzielt werden.

Es wird eine Anzahl von mindestens  $10 \cdot 10$  Punkten (durchmesserabhängig), bezogen auf den Rotor, empfohlen.

Bei Ermüdungssicherheitsnachweisen wird eine Simulationszeit von 600 Sekunden pro Windgeschwindigkeitsklasse bei einer Klassenbreite von ca. 2,0 m/s empfohlen.

#### ■ Aerodynamik

Bei der Berechnung der aerodynamischen Lasten sind zusätzlich folgende Einflüsse zu berücksichtigen:

- Naben- und Spitzenwirbel
- Blattverstellung, Pendeln usw.
- Strömungsabriss (dynamic stall)
- Dynamisches Nachströmverhalten (dynamic wake)

#### ANMERKUNG:

Im Allgemeinen können befriedigende Ergebnisse bei Anwendung der Blattelementtheorie bei 15 Elementen pro Rotorblatt erzielt werden.

#### ■ Strukturdynamik

Bei der Untersuchung der Strukturdynamik sind zusätzlich die folgenden Einflüsse zu berücksichtigen:

- Einfluss der Fliehkraft auf die Rotorblattsteifigkeit
- Torsionssteifigkeit des Antriebstranges
- Elastische Lagerung der Maschine
- Steifigkeit und Dämpfung des Generators (Netz kann als unendlich steif angesehen werden)
- Gründung mit Bodeneigenschaften

#### ANMERKUNG:

Im Allgemeinen ist es ausreichend, nur die Eigenfrequenzen  $< 5$  Hz zu berücksichtigen.

## ■ Funktion

Reglereigenschaften sind realitätsnah abzubilden. Dabei sind die zeitlichen Verläufe, wie z.B. beim Gieren und Bremsen zu berücksichtigen.

Für alle Einwirkungskombinationen mit Ausnahme der DLC 6.1, 6.2 und 6.3 nach DIN EN 61400-1 ist mit einem Gierfehler entsprechend der Betriebsführung, mindestens jedoch mit einem Gierfehlerwinkel im Bereich zwischen  $\beta = 0^\circ$  und  $\beta = \pm 8^\circ$  zu rechnen.

Für die Einwirkungskombinationen DLC 6.1, 6.2 und 6.3 ist der Gierfehlerwinkel nach DIN EN 61400-1 anzunehmen.

### 9.2.3 Berücksichtigung der Gründung

Für das Betriebsverhalten von Windenergieanlagen ist die Baugrundsteifigkeit von besonderer Bedeutung. Die Boden-Bauwerks-Interaktion ist stets zu berücksichtigen. Bei einer gesamtdynamischen Berechnung kann diese in guter Näherung durch Federn für Rotation und Horizontalverschiebung frequenzunabhängig mit dynamischen Bodenkennwerten (siehe Abschnitt 12.2.1) erfasst werden.

Die Festlegung der Federsteifigkeiten bzw. der Bodenkennwerte für die gesamtdynamische Berechnung kann unter Berücksichtigung der Steifigkeit des Gründungskörpers und der im Boden auftretenden Schubverzerrungen ermittelt werden. Dabei sind die Schubverzerrungen für das Lastniveau zu ermitteln, welches sich aus dem Lastfall D.3 (quasi-ständige Einwirkungen) ergibt.

Näherungsweise kann der Steifemodul für sehr kleine Dehnungen  $E_{s,max}$  abhängig vom Steifemodul für statische Lasten abgeschätzt werden, wobei ohne genaueren Nachweis der untere Wert der angegebenen Bandbreite anzusetzen ist.

Hinweise zur Größe dynamischer Bodenkennwerte enthalten die Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugrunddynamik"<sup>3</sup>.

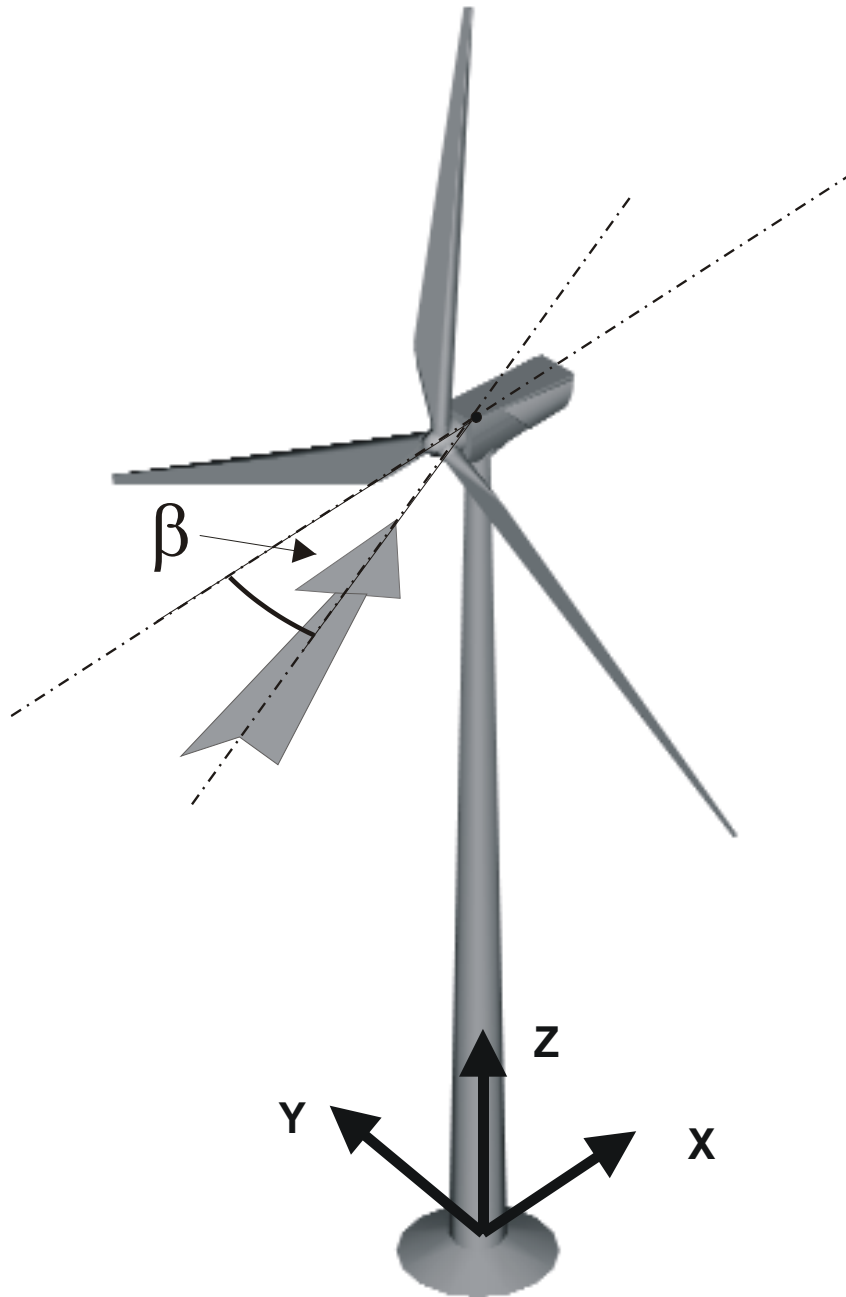
### 9.2.4 Schnittgrößen

Als Ergebnis der gesamtdynamischen Berechnung ergeben sich die Zeitverläufe aller Schnittgrößen für die untersuchten Einwirkungskombinationen in den für die Auslegung von Turm und Fundament relevanten Querschnitten. Diese Schnittgrößen sind für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu ermitteln.

---

<sup>3</sup> Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugrunddynamik", Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Berlin 2002





**Bild 4:** Koordinatensystem für den Turm

### 9.3 Vereinfachte Berechnung

#### 9.3.1 Allgemeines

Die vereinfachte Berechnung darf nur für Nachweise der Turmstruktur im Rahmen der Regelungen von Abschnitt 9.1 angewendet werden. Dabei sind die aus einer gesamt-dynamischen Berechnung ermittelten und entsprechend Tabelle 4 angegebenen Schnittgrößen an der Schnittstelle Maschine/Turm als Einwirkungen auf den Turm zu verwenden. Die Schnittgrößen an allen anderen Stellen des Turmes werden dann aus diesen Einwirkungen abgeleitet. Hierbei ist die Windlast auf den Turm der jeweiligen Einwirkungskombination nach Betrag und Richtung zu berücksichtigen (siehe Abschnitt 9.6.2).

Vereinfachend dürfen alle Einwirkungskomponenten als gleichzeitig mit ihrem Maximalwert oder, falls günstig wirkend, mit ihrem Minimalwert wirkend angenommen werden.

Die Einwirkungen an der Schnittstelle Maschine/Turm dürfen auch für andere Turmvarianten verwendet werden, sofern diese mindestens die gleiche Biege- und Torsionssteifigkeit besitzen und im dauernden Betrieb ebenfalls die Bedingung nach Gleichung (GL 10) erfüllen.

Bei der Anwendung der vereinfachten Berechnung sind außer den Schnittgrößen an der Schnittstelle Maschine/Turm nach Abschnitt 9.2.4 die Massen und Massenträgheitsmomente der Maschine sowie die der Berechnung zugrunde gelegten Eigenfrequenzen des Turmes anzugeben.

### 9.3.2 Durch Wind erregte Schwingungen des Turmes in Windrichtung

Bei Nachweisen nach Abschnitt 9.3.1 für Anlagen im Zustand "außer Betrieb" ist die durch die Böigkeit des Windes hervorgerufene Schwingungswirkung des Turmes in Windrichtung durch den Ansatz einer statischen Ersatzlast zu erfassen. Bei Verwendung des turbulenten extremen Windmodells EWM in einer quasi-statischen Berechnung ist die auf den Turm direkt einwirkende Windlast in Windrichtung infolge der Böenwindgeschwindigkeit (3 s-Mittelwert der 50-Jahresbö  $v_{p50}(z)$  bzw. 1-Jahresbö  $v_{p1}(z)$ ) mit dem Strukturbeiwert  $c_s c_d$  zu vervielfachen. Ein entsprechendes Verfahren zur Ermittlung von  $c_s c_d$  ist in DIN EN 1991-1-4 unter Berücksichtigung von DIN EN 1991-1-4/NA angegeben.

Wird bei nach DIN EN 1991-1-4 nicht schwingungsanfälligen Turmkonstruktionen mit dem stationären extremen Windmodell EWM, basierend auf der Böenwindgeschwindigkeit (3 s-Mittelwert der 50-Jahresbö  $v_{p50}(z)$  bzw. 1-Jahresbö  $v_{p1}(z)$ ), gerechnet, so darf der Strukturbeiwert zu  $c_s c_d = 1$  angenommen werden.

Bei Nachweisen nach Abschnitt 9.6.1 für Anlagen im Zustand "in Betrieb" darf die durch die Böigkeit des Windes hervorgerufene Schwingungswirkung des Turmes in Windrichtung unberücksichtigt bleiben, d.h. der Strukturbeiwert darf zu  $c_s c_d = 1$  angenommen werden.

## 9.4 Wirbelerregte Querschwingungen

Die durch wirbelerregte Schwingungen rechtwinklig zur Windrichtung (Querschwingungen) hervorgerufenen Beanspruchungen bei Türmen mit kreisförmigen oder annähernd kreisförmigen Querschnitten sind nach dem in DIN EN 1991-1-4 angegebenen Verfahren zu ermitteln.

Die durch wirbelerregte Querschwingungen verursachte Schädigung darf bis zu einem Wert von  $D = 0.10$  vernachlässigt werden. Andernfalls sind die Schädigung aus wirbelerregten Querschwingungen und die Schädigung in Querrichtung infolge der in Tabelle 3 definierten Lastfälle für den Ermüdungssicherheitsnachweis zu addieren.

Bei der Berechnung der Beanspruchungen aus wirbelerregten Querschwingungen darf die aerodynamische Dämpfung (siehe 9.5) nicht angesetzt werden.

## 9.5 Logarithmisches Dämpfungsdekrement

Die Gesamtdämpfung setzt sich aus den beiden Anteilen Strukturdämpfung und aerodynamischer Dämpfung zusammen (siehe jedoch 9.4). Das logarithmische Dekrement  $\delta$  für die Gesamtdämpfung ergibt sich dabei zu

$$\delta = \delta_s + \delta_a \quad (\text{GL 12})$$

Dabei ist:

- $\delta_s$  logarithmisches Dekrement der Strukturdämpfung  
 $\delta_a$  logarithmisches Dekrement der aerodynamischen Dämpfung

Soweit keine genaueren Werte belegt sind, darf als logarithmisches Dekrement für die Strukturdämpfung

- bei Stahltürmen  $\delta_s = 0,015$
- bei Spannbetontürmen  $\delta_s = 0,04$

angenommen werden.

Bei Hybridtürmen sind genauere Überlegungen unter Berücksichtigung der Geometrie, Material und Eigenformen erforderlich.

Das logarithmische Dekrement der aerodynamischen Dämpfung  $\delta_a$  darf zur Ermittlung von Einwirkungen aus Erdbeben nach der Modalmethode, soweit keine genauere Berechnung erfolgt, für alle Turmart mit  $\delta_a = 0,05$  angenommen werden.

## 9.6 Schnittgrößen für den Ermüdungssicherheitsnachweis

### 9.6.1 Anforderungen

Zur Ermittlung der Schnittgrößen für den Ermüdungssicherheitsnachweis sind die Einwirkungen nach DIN EN 61400-1 und Abschnitt 7, die Einflussparameter nach Abschnitt 9.2.2 und die folgenden Festlegungen zu berücksichtigen:

- In der Regelung sind Start- und normale Abschaltvorgänge unter Berücksichtigung der dynamischen Erhöhungen beim Durchfahren der Turmresonanz mit den Häufigkeiten nach Tabelle 3 anzunehmen.
- Sofern der Betrieb unter Eislasten nicht sicher ausgeschlossen werden kann, sind an 7 Tagen pro Jahr bei Nennleistung Eislasten nach Abschnitt 7.4.6 anzunehmen, wobei 1 Rotorblatt nicht vereist ist, die übrigen mit 50 % der Eismasse nach Bild 3 vereist sind.
- Sofern nicht anders bestimmt, darf die Einwirkungsdauer der Schnittgrößen aus Wirbelablösungen mit folgenden Werten angenommen werden:
  - 0,5 Jahre für den Zustand der Montage, ohne Maschine
  - 1 Jahr für den Zustand des Stillstandes und der Wartung, mit Maschine
- Die Entwurfslebensdauer der Anlage ist mit mindestens 20 Jahren anzunehmen.

### 9.6.2 Beanspruchungskollektive

Wird der Ermüdungssicherheitsnachweis auf der Grundlage von Beanspruchungskollektiven geführt, so sind diese auf rechnerischem Weg für die betrachteten Querschnitte durch Simulation der für die Ermüdung maßgebenden Anforderungen nach Abschnitt 9.6.1 zu ermitteln und ggf. durch Messungen nach IEC TS 61400-13 zu unterstützen. Die Schwingbreiten der Schnittgrößen sind hierbei ungünstig zu überlagern.

Die Kollektive können vereinfacht als Einhüllende (z.B. in Trapezform) der aus der Simulation erhaltenen Beanspruchungskollektive dargestellt werden. Für alle Einwirkungskomponenten sollten dabei einheitliche Lastwechselzahlen festgelegt werden. Die zugehörigen Mittelwerte sind anzugeben.

#### ANMERKUNG:

Im Allgemeinen (wenn  $\Delta M_y > \Delta M_x$ ) ist die Berücksichtigung der Einwirkungskomponenten Rotorschub  $F_x$ , Nickmoment  $M_y$  und Turmtorsionsmoment  $M_z$  ausreichend. Dabei dürfen das Nick- und Turmtorsionsmoment 90° phasenverschoben zueinander wirkend angenommen werden.

## 10 Sicherheitskonzept

### 10.1 Allgemeines

Die Nachweise sind für verschiedene Grenzzustände durch Verfahren mit Hilfe von Teilsicherheitsbeiwerten zu führen. Diese Grenzzustände, bei deren Überschreitung das Tragwerk die Entwurfsanforderungen nicht mehr erfüllt, sind

- Grenzzustände der Tragfähigkeit
- Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit.

### 10.2 Grenzzustände der Tragfähigkeit

Bei einer gesamtdynamischen Berechnung (nach Abschnitt 9.2) müssen die Einwirkungen mit  $\gamma_F = 1,0$  angenommen werden. Ist eine Differenzierung einzelner Einwirkungsanteile in den Schnittgrößen nicht möglich, müssen die Tragsicherheitsnachweise mit  $\gamma_F$ -fachen Schnittgrößen geführt werden, wobei der größte Teilsicherheitsbeiwert der jeweiligen Gruppe der Einwirkungskombinationen nach Tabelle 5 oder Tabelle 6 anzusetzen ist.

**Tabelle 5:** Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_F$  der Einwirkungen für Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit bei Nachweis nach DIN EN 61400-1:2004

Einwirkung	Gruppe der Einwirkungskombinationen		
	N normal und extrem	A außergewöhnlich	T Transport/Errichtung
Trägheits- und Gravitationslasten			
ungünstig	1,35 <sup>*)</sup>	1,1	1,25
günstig	1,0	1,0	1,0
Vorspannung <sup>**)</sup>	1,0	1,0	1,0
Windlasten	1,35 <sup>***)</sup>	1,1	1,5
Funktionskräfte	1,35	1,1	1,5
Wärmeeinwirkung	1,35	-	-
Erdbeben	-	1,0	-

<sup>\*)</sup> Sofern nachgewiesen wird, z.B. durch Wiegen des maschinentechnischen Teils der Anlage, dass die tatsächlichen Wichten um nicht mehr als 5 % von den angenommenen abweichen, darf mit  $\gamma_F = 1,1$  gerechnet werden.

<sup>\*\*)</sup> Mögliche Streuungen der Vorspannung sind im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nach DIN EN 1992-1-1, 5.10.9 zu berücksichtigen. Im Grenzzustand der Ermüdung ist der jeweils maßgebende Wert  $r_{inf}$ ,  $r_{sup}$  nach DIN EN 1992-1-1, 5.10.9 anzusetzen.

<sup>\*\*\*)</sup> Die Schnittkräfte für Turm und Gründung der Einwirkungskombination DLC 6.1 nach DIN EN 61400-1 sind sowohl mit  $\gamma_F = 1,35$  als auch mit  $\gamma_F = 1,5$  zu ermitteln, wobei im Falle  $\gamma_F = 1,5$  keine Schräganströmung (Anströmwinkel  $\beta = 0$ , siehe DLC D.7 nach Tabelle 2) berücksichtigt zu werden braucht. Die ungünstigste Schnittgrößenkombination der beiden Varianten ist maßgebend.

**Tabelle 6:** Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_F$  der Einwirkungen für Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit bei Nachweis nach DIN EN 61400-1:2011

Einwirkung	Ungünstige Lasten Art des Auslegungszustandes (siehe Tabelle 3)			Günstige Lasten <sup>1)</sup>
	Normal (N)	Anormal (A)	Transport und Errichtung (T)	Alle Auslegungszustände
Trägheits- und Gravitationslasten, Windlasten, Funktionskräfte	1,35 <sup>*)</sup> , <sup>***)</sup>	1,1	1,5	0,9
Vorspannung <sup>**)</sup>	1,0	1,0	1,0	0,9
Wärmeeinwirkung	1,35	-	-	0,9
	-	1,0	-	1,0

1) Vorspannung und Gravitationslasten, die die Gesamtbeanspruchung erheblich verringern, sind günstige Lasten.

\*) Für den Auslegungslastfall DLC 1.1 ist bei Lastberechnung mittels statistischer Extrapolation für Windgeschwindigkeiten zwischen  $v_{in}$  und  $v_{out}$  ein Teilsicherheitsbeiwert für die Lasten von  $\gamma_F = 1,25$  anzunehmen.

Wenn für normale Auslegungszustände der charakteristische Wert der Gravitationsbelastung  $F_{gravity}$  für den betreffenden Auslegungszustand berechnet werden kann und Gravitation eine ungünstige Last ist, darf der Teilsicherheitsbeiwert für die kombinierte Beanspruchung von Gravitation und anderen Einflüssen wie folgt angenommen werden:

$$\gamma_t = 1,1 + \varphi \zeta^2$$

$$\varphi = \begin{cases} 0,15 & \text{für DLC1.1} \\ 0,25 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\zeta = \begin{cases} 1 - \left| \frac{F_{gravity}}{F_k} \right| ; |F_{gravity}| \leq |F_k| \\ 0 ; |F_{gravity}| \geq |F_k| \end{cases}$$

\*\*\*) Mögliche Streuungen der Vorspannung sind im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nach DIN EN 1992-1-1, 5.10.9 zu berücksichtigen. Im Grenzzustand der Ermüdung ist der jeweils maßgebende Wert  $r_{inf}$ ,  $r_{sup}$  nach DIN EN 1992-1-1, 5.10.9 anzusetzen. Der Wert  $\gamma_F = \gamma_P = 0,9$  bezieht sich auf die Ermittlung der Einwirkungen nach DIN EN 61400-1:2011. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit gilt für die Bemessung von Spannbetontragwerken DIN EN 1992-1-1, 2.4.2.2 und 5.10.8. Danach gilt abweichend von Tabelle 6 i. d. R.  $\gamma_P = 1,0$ .

\*\*\*) Die Schnittkräfte für Turm und Gründung der Einwirkungskombination DLC 6.1 nach DIN EN 61400-1 sind sowohl mit  $\gamma_F = 1,35$  als auch mit  $\gamma_F = 1,5$  zu ermitteln, wobei im Falle  $\gamma_F = 1,5$  keine Schräganströmung (Anströmwinkel  $\beta = 0$ , siehe DLC D.7 nach Tabelle 2) berücksichtigt zu werden braucht. Die ungünstigste Schnittgrößenkombination der beiden Varianten ist maßgebend.

Bei Nachweisen gegen Festigkeits- und Stabilitätsversagen ist die Erhöhung der Schnittgrößen infolge nichtlinearer Einflüsse (z.B. Theorie 2. Ordnung, Zustand II) zu berücksichtigen. Im Falle einer gesamt-dynamischen Berechnung mit dynamischen Bodenkennwerten ergeben sich bei diesen Nachweisen zusätzliche Effekte aus Theorie 2. Ordnung. Diese zusätzlichen Effekte sind unter Verwendung statischer Bodenkennwerte, die sich für ein Belastungsniveau bei charakteristischen Einwirkungen (Lastfall D.1) ergeben, zu ermitteln.

Für den Nachweis gegen Ermüdung ist mit  $\gamma_F = 1,0$  zu rechnen.

Es sind folgende Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit zu führen:

**Nachweis** gegen

- **Festigkeitsversagen** nach Abschnitt 11.1.2
- **Stabilitätsversagen** nach Abschnitt 11.1.3
- **Ermüdung** nach Abschnitt 11.1.4

Hinweise zur Größe dynamischer Bodenkennwerte enthalten die Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugrunddynamik"<sup>5</sup>.

### 10.3 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

Die Bemessungswerte der Einwirkungen sind für die Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit mit den charakteristischen Werten ( $\gamma_F = 1,0$ ) zu ermitteln.

Es sind folgende Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit zu führen:

**Nachweis** der

- **Verformungsbegrenzung** nach Abschnitt 11.2.3
- **Spannungsbegrenzung** nach Abschnitt 11.2.4
- **Rissbreitenbegrenzung** nach Abschnitt 11.2.5

## 11 Nachweise für den Turm

### 11.1 Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit

#### 11.1.1 Teilsicherheitsbeiwerte

Die Widerstände sind unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  nach den relevanten Regelwerken (siehe Abschnitt 4) zu ermitteln. Bezüglich der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  beim Nachweis gegen Ermüdung siehe Abschnitt 11.1.4.

#### 11.1.2 Festigkeitsversagen

Die Nachweise sind mit den ungünstigsten aller Einwirkungskombinationen der Gruppen N, A und T zu führen.

Beim Nachweis für Stahlbeton und Spannbeton ist DIN EN 1992-1-1 anzuwenden. Dabei dürfen die Schnittgrößen des Turmschaftes nach der Rohrbiegetheorie ermittelt werden, sofern die Wanddicke mindestens  $1/20$  des Radius beträgt. Dies gilt nicht für örtliche Nachweise im Bereich von Turmöffnungen und für die Ermittlung der Beanspruchungen aus Wärmeeinwirkungen nach Abschnitt 7.4.5.

Beim Nachweis für Stahltürme ist die Normenreihe DIN EN 1993-1 anzuwenden.

In zylindrischen und konischen Stahlrohrtürmen dürfen die für den Tragsicherheitsnachweis benötigten Spannungen nach der Schalenmembrantheorie berechnet werden. Das bedeutet z.B. für die Abtragung der Windlasten, dass die elementare Rohrbiegetheorie angewendet werden darf. Schalenbiegemomente aus ungleichmäßig über den Turmumfang verteiltem Winddruck oder Zwängungsspannungen aus Randstörungen an Flanschen oder Steifen brauchen nicht berücksichtigt zu werden.

---

<sup>5</sup> Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugrunddynamik", Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Berlin 2002

An Übergängen mit unterschiedlicher Konizität sind die aus Kraftumlenkung entstehenden lokalen Umfangsmembrankräfte und Schalenbiegemomente zu berücksichtigen. Für openinggeschwächte Turmbereiche ist Abschnitt 13.2 zu beachten.

**ANMERKUNG:**

Die hier beschriebene Nachweisführung entspricht in der Terminologie von DIN EN 1993-1-1 einer elastischen Tragwerksberechnung mit plastischen Querschnittsbeanspruchbarkeiten für die lokalen Turmwandschnittgrößen, jedoch elastischen Querschnittsbeanspruchbarkeiten für die globalen Turmschnittgrößen.

**11.1.3 Stabilitätsversagen**

Die Nachweise sind mit den ungünstigsten aller Einwirkungskombinationen der Gruppen N, A und T zu führen.

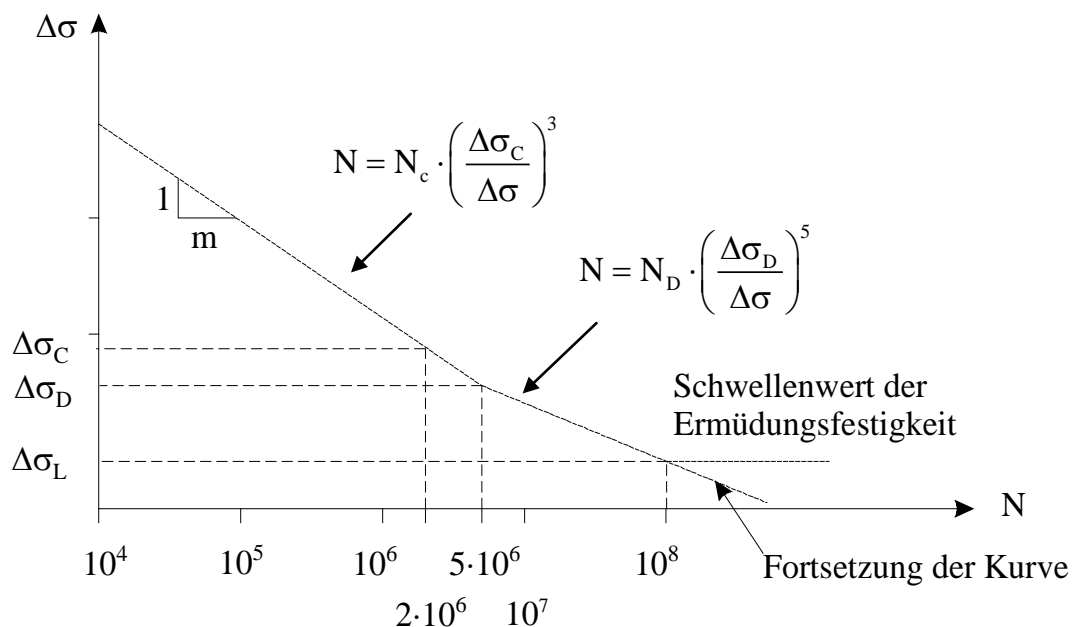
Der Beulsicherheitsnachweis für die Wand eines Stahlrohrturmes oder anderer schalenförmiger Stahlbauteile darf auch als numerisch gestützter Beulsicherheitsnachweis entsprechend Absatz 8.6 und 8.7 von DIN EN 1993-1-6 geführt werden.

**11.1.4 Ermüdungsversagen von Stahlkonstruktionen**

Die Nachweise sind mit den Einwirkungskombinationen der Gruppe F nach Tabelle 3 zu führen.

Bei Turmkonstruktionen aus Stahl richtet sich der Nachweis nach DIN EN 1993-1-9. Dabei werden eine regelmäßige Wartung und die Wiederkehrende Prüfung nach Abschnitt 15 vorausgesetzt. Der anzusetzende Teilsicherheitsbeiwert ist Tabelle 7 zu entnehmen.

Abweichend von den Regelungen in DIN EN 1993-1-9 darf kein Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit für Lastspielzahlen  $N > 10^8$  angesetzt werden (siehe Bild 5).



**Bild 5:** Ermüdungsfestigkeit für Stahl (Wöhlerlinie)

**Tabelle 7:** Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  für Nachweise gegen Ermüdung bei Türmen aus Stahl

Inspizierbar	$\gamma_M$	
	Schadenstolerante Bauteile	Nicht-schadenstolerante Bauteile
Ja	1,0	1,15
Nein	1,15	1,25

**ANMERKUNG:**

Bei Windenergieanlagen sind in der Regel nicht-schadenstolerante Bauteile vorhanden.

Im Allgemeinen ist ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,15 für inspizierbare Bauteile anzuwenden.

Als "inspizierbar" werden alle Bauteile angesehen, die zugänglich sind. Dazu gehören z.B. alle Rund- und Längsnähte von Stahlrohrtürmen sowie die Schrauben von Ringflanschverbindungen. Diese Bauteile sind im Rahmen der wiederkehrenden Prüfungen zu untersuchen (siehe Kapitel 15).

Abweichend davon ist ein Beiwert von 1,25 zu berücksichtigen, wenn Überwachungsmaßnahmen im Rahmen der Inspektion nicht möglich sind, z.B. bei einbetonierten Bauteilen.

Der Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_c$  ist entsprechend der vorliegenden Kerbfallklasse den Kerbfallkatalogen von DIN EN 1993-1-9, Tabellen 8.1 bis 8.10 und DIN EN 1993-3-2 Anhang C zu entnehmen.

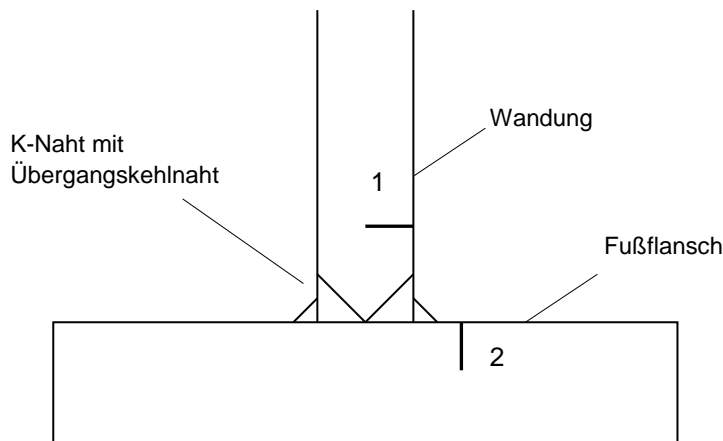
**ANMERKUNG zu DIN EN 1993-3-2 C2(1):**

Eine Erhöhung der Kerbfallklassen ist nicht allein durch Änderung der Qualitätsstufe der Schweißnaht zulässig. Eine Erhöhung der Kerbfallklasse ist experimentell z.B. nach den Regeln von DIN EN 1990 zu begründen.

Alternativ zum Nennspannungskonzept darf das Strukturspannungskonzept nach DIN EN 1993-1-9 Anhang B verwendet werden. Es ist hierbei für Blechstärken  $t > 25$  mm eine Blechdickenabminderung  $k_s = (25/t)^{0,2}$  zu verwenden, wobei  $t$  in [mm] einzusetzen ist.

Ergänzend zu den Kerbfallkatalogen wird das Kerbdetail T-Flansch/Mantelblech wie folgt geregelt:

- Für das Mantelblech (Kerbstelle 1 in Bild 6) ist die Kerbfallklasse gemäß DIN EN 1993-1-9 Tabelle 8.5 Detail 1 zu verwenden.
- Für den T-Flansch (Kerbstelle 2 in Bild 6) ist der konservative Ansatz einer Kerbfallklasse 90 und einer Blechdickenabminderung  $k_s = (25/t_F)^{0,2}$  für Blechstärken  $t_F > 25$  mm zu verwenden. Die maßgebenden Biegespannungen sind durch Ansatz einer gleichmäßigen Spannungsverteilung aus den Betonpressungen zu ermitteln, sofern nicht durch genauere Untersuchungen günstigere Ansätze begründet werden.



**Bild 6:** Nachweisstellen für das Detail "T-Flansch/Mantelblech"

**ANMERKUNG:**

Durchgeführte Untersuchungen ergaben, dass andere Regelungen des Eurocode für den Parameterbereich von Windenergieanlagen zu stark konservativen Auslegungen führen können.

**11.1.5 Ermüdungsversagen von Stahl- und Spannbetonkonstruktionen**

Bei Türmen und Fundamenten aus Spannbeton bzw. Stahlbeton sind Ermüdungssicherheitsnachweise für den Beton, den Betonstahl und den Spannstahl zu führen. Die rechnerischen Schädigungen unterschiedlicher Schwingbreiten dürfen beim Nachweis gegen Ermüdung nach der Palmgren-Miner-Regel addiert werden. Dabei muss die Schädigungssumme  $D_{Ed}$  infolge der maßgebenden Ermüdungsbeanspruchung die folgende Bedingung erfüllen:

$$D_{Ed} = \sum [n(\Delta\sigma_i) / N(\Delta\sigma_i)] < 1,0 \quad (\text{GL 13})$$

Dabei ist:

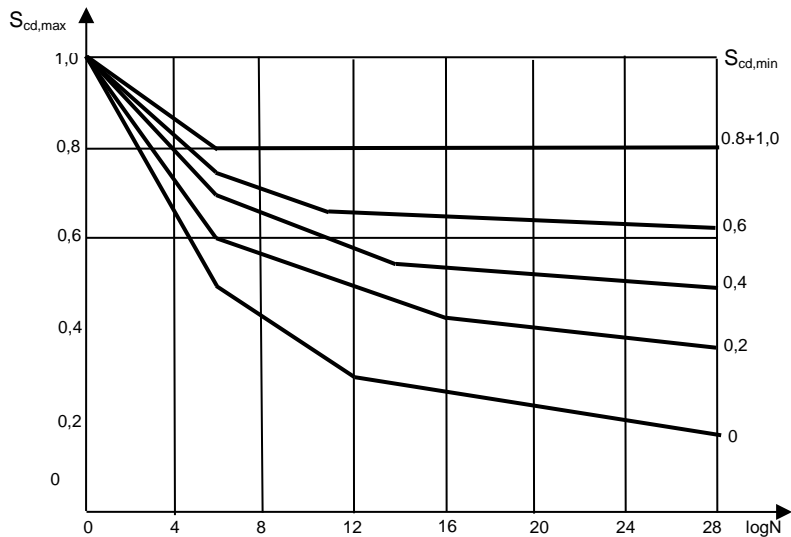
$n(\Delta\sigma_i)$  die Zahl der aufgetragenen Lastwechsel für eine Schwingbreite  $\Delta\sigma_i$

$N(\Delta\sigma_i)$  die Zahl der aufnehmbaren Lastwechsel für eine Schwingbreite  $\Delta\sigma_i$

Für den Nachweis des Beton- und Spannstahls sind die Wöhlerlinien nach DIN EN 1992-1-1, Absatz 6.8.4 anzusetzen.

Die Ermüdungsnachweise für Spannbetontragwerke sind sowohl für die Vorspannkraft direkt nach dem Absetzen der Presse als auch für die Vorspannkraft nach Kriechen, Schwinden und Relaxation zu führen, wenn keine genauere Berechnung über die Zeit durchgeführt wird. Dabei sind die zeitabhängigen Verluste infolge Kriechen, Schwinden und Relaxation nach DIN EN 1992-1-1, Absatz 3.1.4 zu berücksichtigen.

Für den Nachweis des Betons unter Druck oder Querkraftbeanspruchung sind die Wöhlerlinien für den Beton anzusetzen:



**Bild 7:** Wöhlerlinien des Betons unter Druckbeanspruchung

Der Wöhlerlinie nach Bild 7 liegen die folgenden Gleichungen<sup>6</sup> zugrunde:

Für  $0 < S_{cd,min} < 0,8$

$$\log N_1 = (12 + 16 \cdot S_{cd,min} + 8 \cdot S_{cd,min}^2) \cdot (1 - S_{cd,max})$$

$$\log N_2 = 0,2 \cdot \log N_1 \cdot (\log N_1 - 1)$$

$$\log N_3 = \log N_2 \cdot (0,3 - (3S_{cd,min} / 8)) / \Delta S_{cd}$$

wenn  $\log N_1 \leq 6$  dann  $\log N = \log N_1$

wenn  $\log N_1 > 6$  und  $\Delta S_{cd} \geq 0,3 - (3S_{cd,min} / 8)$   
dann  $\log N = \log N_2$

wenn  $\log N_1 > 6$  und  $\Delta S_{cd} < 0,3 - (3S_{cd,min} / 8)$

dann  $\log N = \log N_3$

mit  $S_{cd,min} = \gamma_{Sd} \cdot \sigma_{c,min} \cdot \eta_c / f_{cd,fat}$   
 $S_{cd,max} = \gamma_{Sd} \cdot \sigma_{c,max} \cdot \eta_c / f_{cd,fat}$   
 $\Delta S_{cd} = S_{cd,max} - S_{cd,min}$

Für Windenergieanlagen mit einer nominellen Lastspielzahl  $N_{nom} = m \cdot n_R \cdot T_0 \leq 2 \cdot 10^9$  ist ein detaillierter Nachweis für den Beton nicht erforderlich, wenn die Bedingung nach (GL 14) eingehalten ist:

$$S_{cd,max} \leq 0,40 + 0,46 \cdot S_{cd,min} \quad (\text{GL 14})$$

<sup>6</sup> Aus: CEB-FIP Model Code 1990, Bulletin d'Information No. 213/214

Dabei ist:

$$S_{cd,min} = \gamma_{Sd} \cdot \sigma_{c,min} \cdot \eta_c / f_{cd,fat}$$

$$S_{cd,max} = \gamma_{Sd} \cdot \sigma_{c,max} \cdot \eta_c / f_{cd,fat}$$

$\gamma_{Sd} = 1,1$	Teilsicherheitsbeiwert zur Erfassung der Ungenauigkeiten des Modells zur Spannungsberechnung
$\sigma_{c,max}$	Betrag der maximalen Betondruckspannung unter den Einwirkungskombinationen der Gruppe F nach Tabelle 2
$\sigma_{c,min}$	Betrag der minimalen Betondruckspannung in der Druckzone an der gleichen Stelle, an der $\sigma_{c,max}$ auftritt, ermittelt für den unteren Wert der Einwirkung (bei Zugspannungen ist $\sigma_{c,min} = 0$ zu setzen)
$\eta_c$	Faktor zur Berücksichtigung der ungleichmäßigen Verteilung der Betondruckspannungen gemäß Heft 439 <sup>7</sup> , Gl. (8); vereinfachend darf $\eta_c = 1,0$ gesetzt werden.
$f_{cd,fat}$	Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit des Betons unter Druckbeanspruchung: $f_{cd,fat} = 0,85 \cdot \beta_{cc}(t) \cdot f_{ck} \cdot (1 - f_{ck}/250) / \gamma_c$
$f_{ck}$	charakteristische Zylinderdruckfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_c$	Teilsicherheitsbeiwert für Beton
$\beta_{cc}(t)$	Koeffizient zur Berücksichtigung des zeitabhängigen Festigkeitsanstiegs des Betons. $\beta_{cc}(t)$ darf bei Anwendung der vereinfachten Gleichung (GL 14) nicht größer als 1,0 angesetzt werden, entsprechend einer zyklischen Erstbelastung in einem Betonalter $\geq 28$ Tagen. Im Falle zyklischer Erstbelastung in früherem Betonalter ist $\beta_{cc}(t) < 1,0$ zu ermitteln und beim Nachweis zu berücksichtigen; $\beta_{cc}(t)$ ist nach DIN EN 1992-1-1, Absatz 3.1.2 (6) zu bestimmen.

#### Grundsätzlich sind beim vereinfachten Nachweisverfahren zu untersuchen:

- Maximale Schwingbreite,
- Schwingbreite mit der größten Betondruckspannung  $\sigma_{c,max}$ ,
- Schwingbreite mit der kleinsten Betondruckspannung  $\sigma_{c,min}$ ,
- Schwingbreite mit dem größten Mittelwert der Betondruckspannung.

---

<sup>7</sup> Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Heft 439 "Ermüdungsfestigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen mit Erläuterungen zu den Nachweisen gemäß CEB-FIP Model Code 1990", Ausgabe 1994, Beuth Verlag Berlin

## 11.2 Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit

### 11.2.1 Einwirkungskombinationen

Für die Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit sind die Einwirkungen in Tabelle 2 definiert:

- DLC D.1: Charakteristische (seltene) Einwirkungen
- DLC D.2: Häufige Einwirkungen
- DLC D.3: Quasi-ständige Einwirkungen

Diese Einwirkungen sind für die in den entsprechenden Fachnormen definierten Nachweise in Kombination mit Einwirkungen aus Temperatur anzuwenden.

### 11.2.2 Teilsicherheitsbeiwert

Für Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit beträgt der Teilsicherheitsbeiwert für die Widerstandsgrößen  $\gamma_M = 1,0$ .

### 11.2.3 Verformungsbegrenzung

Sofern aus dem Betrieb der Anlage keine besonderen Anforderungen entstehen, ist eine Begrenzung von Verformungen nicht erforderlich.

### 11.2.4 Spannungsbegrenzung

Bei Türmen und Fundamenten aus Spannbeton bzw. Stahlbeton sind die Betondruckspannungen für die seltene Einwirkungskombination D.1 nach Tabelle 2 auf  $0,6 f_{ck}$  zu begrenzen. Anderenfalls sind Ersatzmaßnahmen nach DIN EN 1992-1-1, Absatz 7.2 (2) zu treffen.

Zusätzlich sind bei Türmen und Fundamenten aus Spannbeton die Betondruckspannungen unter den ständigen Einwirkungen aus Eigenlasten und Vorspannung auf  $0,45 f_{ck}$  entsprechend DIN EN 1992-1-1, Absatz 7.2 (3) zu begrenzen.

Bei Türmen aus Spannbeton mit Verbund ist der Nachweis der Dekompression für die quasi-ständige Einwirkungskombination D.3 nach Tabelle 2 zu führen.

### 11.2.5 Rissbreitenbegrenzung

Der Nachweis der Rissbreitenbegrenzung ist für eine rechnerische Rissbreite von 0,2 mm zu führen. Dabei sind für Bauteile aus Stahlbeton und Spannbeton ohne Verbund die quasi-ständige Einwirkungskombination D.3 nach Tabelle 2 zu verwenden, für Bauteile aus Spannbeton mit Verbund die häufigen Einwirkungskombinationen D.2 nach Tabelle 2. Die Wärmeeinwirkungen sind nach Abschnitt 7.4.5 anzusetzen.

## 12 Nachweise für die Gründung

### 12.1 Gründungskörper

#### 12.1.1 Sicherheitskonzept

Für Nachweise von Bauteilen aus Stahlbeton und Spannbeton sowie für Bauteile aus Stahl ist das in den Abschnitten 10, 11 und 12 beschriebene Sicherheitskonzept anzuwenden.

#### 12.1.2 Stahleinbauteile

Stahleinbauteile sind nach Abschnitt 11.1.4 nachzuweisen.

### 12.1.3 Stahlbetonbauteile

Stahlbetonbauteile sind nach den Abschnitten 11.1 und 11.2.5 nachzuweisen. Die Nachweise gegen Ermüdung für den Beton, den Betonstahl, den Spannstahl und die Verbindungsmittel sind nach Abschnitt 11.1.5 dieser Richtlinie zu führen.

Bauteile des Gründungskörpers, die höchstens einen halben Meter in das Erdreich hineinreichen, sind mit einer Rissbreite von 0,2 mm nachzuweisen, alle übrigen mit einer Rissbreite von 0,3 mm.

Werden auf Fundamenten Sockel ausgeführt, so sind die Nachweise für die Spannungs- und Rissbreitenbegrenzung wie beim Turm zu führen (s. auch 11.2.4 und 11.2.5).

### 12.1.4 Bemessung von Pfählen

Die innere Tragfähigkeit von Gründungspfählen ist nach den Abschnitten 12.1.2 und 12.1.3 zu ermitteln. Der Nachweis der äußeren Pfahltragfähigkeit ist nach Abschnitt 12.2.4 zu führen.

## 12.2 Baugrund

### 12.2.1 Beschaffenheit des Baugrunds

Es ist sicherzustellen, dass die Eigenschaften des Baugrunds am Standort den Anforderungen in der statischen und dynamischen Berechnung entsprechen.

Hinsichtlich der Mindestanforderungen an Umfang und Qualität geotechnischer Untersuchungen sind die Gründungen von Windenergieanlagen der Geotechnischen Kategorie 3 nach DIN EN 1997-1, Absatz 2.1 bzw. DIN 1054, Absatz A 2.1.2 zuzuordnen.

Für dynamische Berechnungen sind der Steife- oder Schubmodul für Ent- und Wiederbelastungsvorgänge maßgebend, für statische dagegen in der Regel – sofern der Boden nicht vorbelastet ist – die Moduln für Erstbelastung. Die Bodensteifigkeit ist allgemein abhängig von der Größe der durch die Last induzierten Schubverzerrungen. Für sehr kleine Schubverzerrungen ist die Steifigkeit maximal und darüber hinaus sind die Moduln für Ent-/Wiederbelastung und Erstbelastung identisch, weil Boden in diesem Bereich annähernd linear elastisch reagiert. Sie werden auch als „dynamische“ Schubmodul bzw. Steifemodul bezeichnet, weil bei hochfrequenten Belastungen in aller Regel entsprechend kleine Schubverzerrungen auftreten. Der für viele Bodenarten tabellierte Schubmodul  $G_{\max}$  für sehr kleine Dehnungen gilt allgemein nur bei hochfrequenten Belastungen. Für Gründungen von Windenergieanlagen kann – insbesondere bei Flachgründungen auf relativ kompressiblen Böden – eine Abminderung dieses Wertes erforderlich sein.

Im Baugrundgutachten sind sowohl die dynamischen Bodensteifigkeiten für sehr kleine Schubverzerrungen für die gesamtdynamische Berechnung als auch die statischen Bodensteifigkeiten für die Setzungsberechnung anzugeben.

Hinweise zur Größe dynamischer Bodenkennwerte enthalten die Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugrunddynamik"<sup>3</sup>.

### 12.2.2 Sicherheitskonzept

Die Sicherheitsnachweise für den Baugrund sind nach DIN EN 1997-1 und DIN 1054:2010-12 unter Berücksichtigung der besonderen Festlegungen dieser Richtlinie für die Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit zu führen. Die Beanspruchungen sind aus den charakteristischen Werten der Einwirkungen zu ermitteln, wobei nichtlineare Einflüsse nach Abschnitt 9.2.3 zu berücksichtigen sind.

Die Beanspruchungen sind im Sinne von DIN 1054, Absatz A 2.4.2.1 A(8a) als übliche dynamische Beanspruchungen einzustufen und dürfen somit als veränderliche statische Einwirkungen berücksichtigt werden.

Bei den Nachweisen sind den Bemessungssituationen BS-P, BS-T oder BS-A nach DIN 1054, 2.2 A(4) die Einwirkungskombinationen nach Abschnitt 8 dieser Richtlinie entsprechend Tabelle 8 zuzuordnen. Die Nachweise sind mit den ungünstigsten aller Einwirkungskombinationen zu führen.

**Tabelle 8:** Zuordnung der Einwirkungskombinationen nach DIN EN 61400-1 zu den Bemessungssituationen nach DIN 1054

Einwirkungskombination DLC nach DIN EN 61400-1	Bemessungssituation nach DIN EN 1997-1 bzw. DIN 1054
Lastfallgruppe N und T	BS-P
DLC 8.2	BS-T
Lastfallgruppe A (ohne 8.2)	BS-A

### 12.2.3 Flachgründungen

#### 12.2.3.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Es ist der Nachweis der Grundbruchsicherheit (Grenzzustand GEO-2 gemäß DIN 1054) sowie der Nachweis der Lage- bzw. Kippsicherheit (Grenzzustand EQU) zu erbringen. In Ausnahmefällen, z.B. wenn die Gründung auf einer Böschung oder neben einem Stützbauwerk angeordnet ist, ist ergänzend auch die Gesamtstandsicherheit (Geländebruch, Grenzzustand GEO-3 gemäß DIN 1054) nachzuweisen.

Der Nachweis der Grundbruchsicherheit ist nach DIN EN 1997-1 für die Einwirkungen der Bemessungssituationen BS-P, BS-T und BS-A nach Tabelle 8 zu führen. Dabei ist gemäß DIN 1054 die Nachweismethode GEO-2 anzuwenden und der charakteristische Grundbruchwiderstand nach DIN 4017 zu ermitteln. Der Bemessungswert ergibt sich durch Division des charakteristischen Grundbruchwiderstands mit den Teilsicherheitsbeiwerten nach DIN 1054 A 2.4.7.6.3, Tabelle A 2.3. Der Bemessungswert der Beanspruchungen senkrecht zur Sohlfläche ergibt sich aus der Summe der mit den zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerten multiplizierten ständigen und veränderlichen Beanspruchungen, wobei abweichend von DIN 1054 die Teilsicherheitsbeiwerte nach Tabelle 5 oder 6 dieser Richtlinie anzusetzen sind, d. h. für die ungünstig wirkenden Windlasten darf unter Beachtung der Fußnote in Tabelle 5 oder 6 ein Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_F = 1,35$  für Einwirkungskombinationen der Bemessungssituationen BS-P angesetzt werden.

Der Nachweis der Lage- bzw. Kippsicherheit des Bauwerks (Grenzzustand EQU) ist nach DIN EN 1997-1, 2.4.7.2, sowie DIN 1054, 6.5.4 A (3) unter Ansatz der Teilsicherheitsbeiwerte gemäß DIN 1054, A 2.4.7.6.1, Tabelle A 2.1 zu führen. Abweichend von DIN 1054 darf auch hier für die ungünstig wirkenden Windlasten unter Beachtung der Fußnote in Tabelle 5 oder Tabelle 6 ein Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_F = 1,35$  für Einwirkungskombinationen der Bemessungssituationen BS-P angesetzt werden.

#### 12.2.3.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Infolge der aus den Einwirkungen der Bemessungssituationen BS-P und BS-T nach Tabelle 8 resultierenden charakteristischen Beanspruchung in der Sohlfläche darf ein Klaffen der Sohlfuge höchstens bis zum Schwerpunkt der Sohlfläche auftreten.

Infolge der aus der Einwirkungskombination D.3 nach Tabelle 2 resultierenden charakteristischen Beanspruchung darf in der Sohlfläche keine klaffende Fuge auftreten.

#### 12.2.4 Pfahlgründungen (äußere Tragfähigkeit)

Der Nachweis der äußeren Pfahltragfähigkeit ist nach DIN EN 1997-1 und DIN 1054 für die Einwirkungen der Bemessungssituationen BS-P, BS-T und BS-A nach Tabelle 8 dieser Richtlinie zu führen. Gemäß DIN 1054 ist das Nachweisverfahren GEO-2 anzuwenden.

Der Bemessungswert der Pfahltragfähigkeit ergibt sich durch Division der charakteristischen Pfahltragfähigkeit mit den Teilsicherheitsbeiwerten nach DIN 1054 A 2.4.7.6.3, Tabelle A 2.3. Der Bemessungswert der Beanspruchungen ergibt sich aus der Summe der mit den zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerten multiplizierten ständigen und veränderlichen Beanspruchungen, wobei abweichend von DIN 1054 die Teilsicherheitsbeiwerte nach Tabelle 5 dieser Richtlinie anzusetzen sind.

Anstelle eines Nachweises gegen Ermüdung hinsichtlich der äußeren Tragfähigkeit darf ersatzweise der Nachweis geführt werden, dass unter den charakteristischen Werten der Einwirkungskombination D.3 nach Tabelle 2 keine Zugbeanspruchungen in den Pfählen auftreten.

#### ANMERKUNG:

Zur Aufnahme von horizontalen Kräften sollten die Pfähle geneigt angeordnet werden.

### 13 Konstruktionsdetails

#### 13.1 Ringflanschverbindungen bei stählernen Türmen

Ringflanschverbindungen müssen nach DIN EN 1993-1-8 kontrolliert vorgespannt werden. Die Vorspannkraft ist auf die Regelvorspannkraft nach  $F_{p,C}$  DIN EN 1993-1-8/NA zu begrenzen.

Beim Tragsicherheitsnachweis der Flanschverbindungen gilt die Anmerkung in Absatz 11.1.2 entsprechend. Die Vorspannkraft der Schrauben braucht nicht berücksichtigt zu werden, d. h. der Tragsicherheitsnachweis darf wie für eine nicht vorgespannte Schraubenverbindung geführt werden.

Lokale Plastizierungen (Fließgelenke im Flansch und/oder im Turmmantel) dürfen dabei berücksichtigt werden. Vereinfachend dürfen die Bauteilwiderstände für Ringflanschverbindungen mit Hilfe plastischer Versagenszustände (VZ) nach Petersen<sup>8</sup> (VZ A und B) sowie nach Seidel<sup>9</sup> (VZ D und E) ermittelt werden.

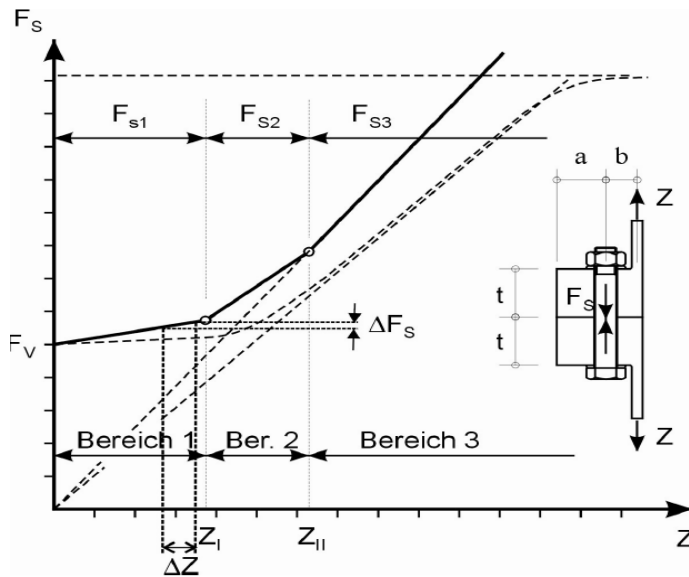
Beim Ermüdungssicherheitsnachweis der Flanschverbindung darf die Ermüdungsbeanspruchung der Schrauben unter Berücksichtigung der Druckvorspannung der Flansche mit Hilfe des trilinearen Modells (siehe Bild 8) nach Schmidt/Neuper<sup>10</sup> ermittelt werden, wenn nachfolgend beschriebene Toleranzen eingehalten sind:

- Nach Abschluss der Fertigung der einzelnen Turmsegmente darf die Ebenheitsabweichung pro Flansch einen Wert von 2,0 mm über den gesamten Umfang und max. 1,0 mm über ein Segment von 30° nicht überschreiten; wobei der Bereich an der Turmwand maßgebend ist.
- Es ist durch sorgfältiges Fertigen der Flansche und ihrer Schweißverbindungen sowie durch sorgfältiges Vorspannen sicherzustellen, dass die Vorspannkraft jeder einzelnen Schraube in ausreichendem Maße in lokale Druckvorspannung der Flanschkontaktflächen in ihrem anteiligen Bereich umgesetzt wird.
- Die Neigungen  $\alpha_S$  der Flanschaußenflächen (siehe Bild 10) darf nach dem Vorspannen den Grenzwert 2° nicht übersteigen.

<sup>8</sup> Petersen, C.: Stahlbau, 3. Auflage. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1997

<sup>9</sup> Seidel, M.: „Zur Bemessung geschraubter Ringflanschverbindungen von Windenergieanlagen“, Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover (Heft 20). Aachen: Shaker Verlag, 2001

<sup>10</sup> Schmidt, Herbert; Neuper, Meike: „Zum elastostatischen Tragverhalten exzentrisch gezogener L-Stöße mit vorgespannten Schrauben“. Verlag Ernst & Sohn, Stahlbau 66 (1997), Heft 3, S. 163-168



**Bild 8:** Schraubenkraftfunktionen vorgespannter Ringflanschverbindungen nach Schmidt/Neuper<sup>10</sup>

**ANMERKUNG 1:**

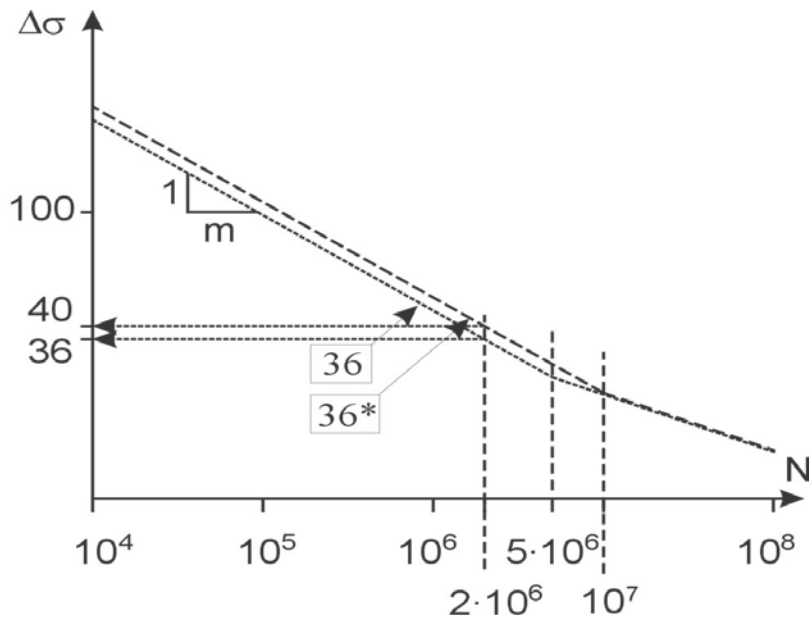
Größere Neigungen  $\alpha_s$  vor dem Vorspannen haben keinen Einfluss auf die Ermüdungsschädigung, sofern sie beim Vorspannen bis unter den Grenzwert reduziert werden. Beim Nachweis der Ermüdungssicherheit dürfen höchstens 90 % der planmäßigen Vorspannkraft angesetzt werden. Grundsätzlich ist die Vorspannung der Schrauben innerhalb des 1. Halbjahres nach der Montage, frühestens aber nach der im Wartungspflichtenbuch festgelegten Anzahl Betriebsstunden, zu kontrollieren und ggf. nachzuspannen. Dem Ermüdungssicherheitsnachweis ist die nichtlineare Schraubenkraftfunktion  $F_s = f(Z)$  zugrunde zu legen, aus der für vorgegebene Schwingbreiten  $\Delta Z$  der Turmmantelkraft die ermüdungsrelevante Schwingbreite  $\Delta F_s$  der Schraubenkraft abgelesen wird (siehe Bild 8).

**ANMERKUNG 2:**

Hierfür wird anstelle der Beanspruchungskollektive ggf. die vollständige Markow- oder Rainflow-Matrix benötigt.

Bei der Ermittlung der Schraubenkraftfunktion mit FEM sind die bei der Ausführung tolerierten Flanschklaffungen als Imperfektionen zu berücksichtigen.

Wird ein vereinfachtes Berechnungsmodell verwendet, das nur Schraubennormalkräfte liefert, so ist der Nachweis gegen Kerbfallklasse 36\* zu führen, siehe Bild 9.

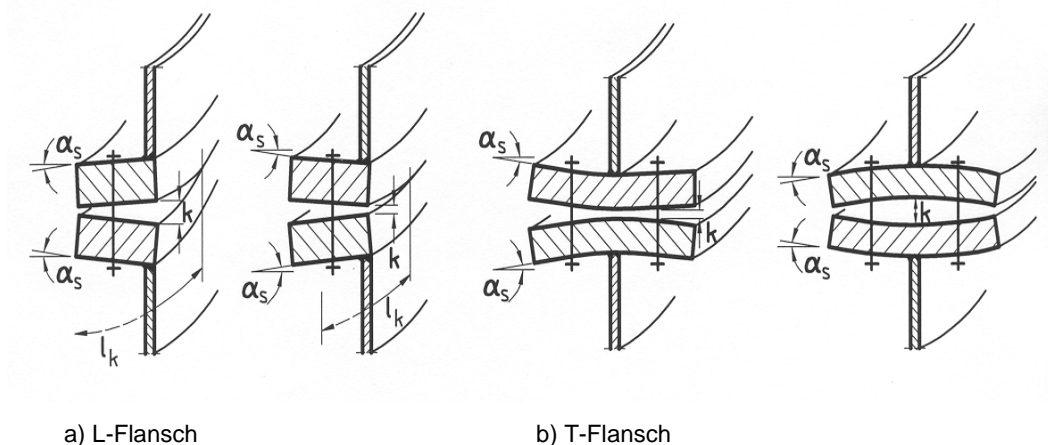


**Bild 9:** Kerbfallklassen für Schrauben

Bei Nichteinhalten der in den Ausführungsunterlagen angegebenen Grenzwerte für die Flanschklaffungen sind geeignete Maßnahmen zu ergreifen, z.B. Ausfüttern der schadigungsrelevanten Klaffungshohlräume vor dem Vorspannen. Wird der Grenzwert für die Neigung  $\alpha_s$  nach dem Vorspannen überschritten, so sind anstelle der flachen Unterlegscheiben geeignete Keilscheiben ausreichender Härte einzubauen.

**ANMERKUNG 3:**

Schädigungsrelevant für die Ermüdungsbeanspruchung der Schrauben sind alle Flanschklaffungen  $k$  im Bereich der Turmwand (siehe Bild 10), insbesondere dann, wenn sie sich nur über einen Teil des Umfangs erstrecken. Dabei wächst der Schädigungseinfluss mit abnehmender Erstreckungslänge  $l_k$  über den Umfang, d. h. maßgebend ist das Verhältnis von  $k/l_k$ .



**Bild 10:** Ringflanschverbindungen in stählernen Türmen

### 13.2 Öffnungen in der Wand von Stahlrohtürmen

Im Allgemeinen muss die Beulsicherheit der Turmwand im Öffnungsbereich mit Hilfe von Finite-Elemente-Analysen nachgewiesen werden. Es ist ein „Numerisch gestützter Beulsicherheitsnachweis mittels globaler MNA- und LBA-Berechnung“ nach DIN EN 1993-1-6, 8.6, zu führen. Dabei ist der ideale Beulwiderstand  $R_{cr}$  aus einer geometrisch nichtlinearen elastischen Berechnung (GNA) zu ermitteln. Bei der Festlegung der maßgebenden Stelle für die Ermittlung des plastischen Referenzwiderstandes  $F_{Rpl}$  darf der engere Bereich um die Öffnung herum unberücksichtigt bleiben; dieser engere Bereich darf nicht breiter als  $2 (r-t)^{0,5}$  angesetzt werden.

Im Bereich umlaufend randversteifter Öffnungen ohne vorgebundene Längssteifen ("Kragensteifen", siehe Bild 11a) darf der Beulsicherheitsnachweis vereinfacht wie für eine ungeschwächte Turmwand geführt werden, wenn anstelle der Bemessungsbeulspannungen nach DIN EN 1993-1-6 die reduzierte Bemessungsbeulspannung nach Gleichung (GL 15) verwendet wird:

$$\sigma_{xS,R,d} = C_1 \cdot \sigma_{x,Rd_{EC}} \quad (\text{GL 15})$$

Dabei ist:

$\sigma_{x,Rd_{EC}}$  Bemessungsbeulspannung nach DIN EN 1993-1-6

$C_1$  Reduktionsfaktor gemäß Gleichung (GL 16) zur Erfassung des Öffnungseinflusses.

$$C_1 = A_1 - B_1 \cdot (r/t) \quad (\text{GL 16})$$

mit  $A_1$  und  $B_1$  nach Tabelle 9

**Tabelle 9:** Beiwerte für Gleichung (GL 16)

Festigkeitsklasse	S 235		S 355	
	$A_1$	$B_1$	$A_1$	$B_1$
Öffnungswinkel				
$\delta = 20^\circ$	1,00	0,0019	0,95	0,0021
$\delta = 30^\circ$	0,90	0,0019	0,85	0,0021
$\delta = 60^\circ$	0,75	0,0022	0,70	0,0024

$\delta$  ist der Öffnungswinkel in Umfangsrichtung

**Die vorstehenden Regeln sind gültig für:**

- Turmwände mit  $(r/t) \leq 160$ ,
- Öffnungswinkel  $\delta \leq 60^\circ$ ,
- Öffnungsmaße  $h_1 / b_1 \leq 3$ ,

sowie für Öffnungsrandsteifen,

- die mit konstantem Querschnitt um die ganze Öffnung laufen,
- deren Querschnittsfläche mindestens einem Drittel der Öffnungsfehlfläche entspricht, deren Querschnitt an den Öffnungslängsrändern mittig zur Wandmittelfläche angeordnet ist (siehe Bild 11b) und
- deren Querschnittsteile die maximalen  $c/t$ -Verhältnisse nach DIN EN 1993-1-1, Tabelle 5.2 für die Querschnittsklassen 2 unterschreiten.

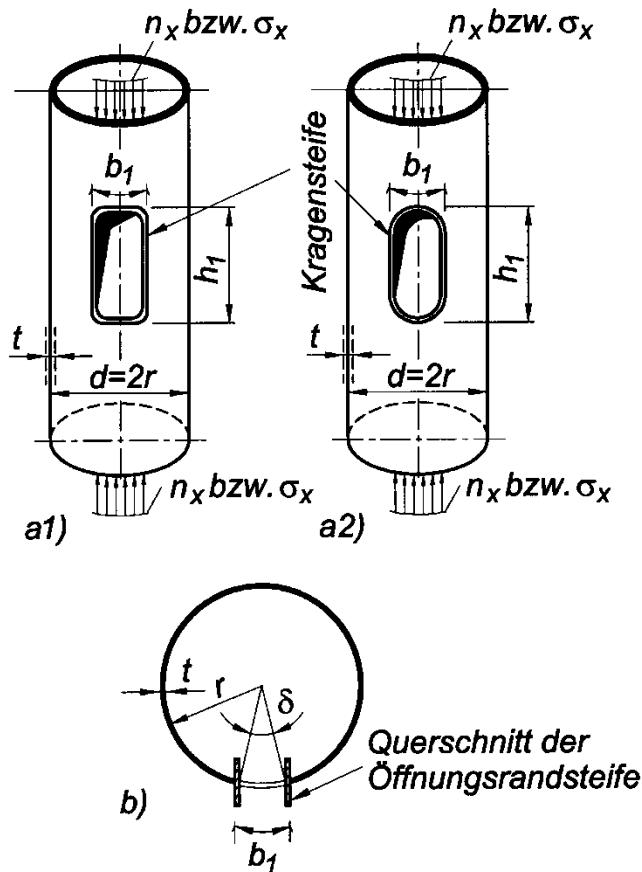


Bild 11: Öffnungen in der Wand von Stahlrohrtürmen

### 13.3 Scherbeanspruchte Schraubenverbindungen

Schraubenverbindungen bei Anschlüssen und Stößen von Bauteilen des Haupttragwerkes müssen als Scher-Lochleibungs-Passverbindungen (SLP, SLVP) oder als gleitfest planmäßig vorgespannte Verbindungen (GV, GVP) ausgeführt werden.

Bei SLP- und SLVP-Verbindungen sind für die gelochten Bauteile und die Schrauben die Nachweise nach den Abschnitten 11.1.2 und 11.1.4 zu führen.

Bei GV- und GVP-Verbindungen ist nachzuweisen, dass im Grenzzustand der Tragsicherheit die maximale auf eine Schraube in einer Scherfuge entfallene Kraft die Grenzgleitkraft nach Gleichung (GL 16) nicht überschreitet:

$$F_{s,Rd} = 0,9 \cdot \frac{\mu}{\gamma_{M,3}} \cdot F_{p,C} \quad (\text{GL 17})$$

Dies gilt im Allgemeinen nicht für geschraubte Ringflanschverbindungen.

Dabei ist:

$F_{p,C}$	Regel-Vorspannkraft nach DIN EN 1993-1-8/NA Tabelle A.1 und A.2 Diese Vorspannkraft ist durch Überprüfung und ggf. Nachspannen innerhalb des 1. Halbjahres nach der Montage, jedoch nicht unmittelbar nach Inbetriebnahme, sicherzustellen.
$\mu \leq 0,5$	Reibungszahl für die Ausführung der Kontaktflächen nach DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.7 oder durch Versuche nach Bezugsnormengruppe 7 in DIN EN 1993-1-8, Absatz 1.2.7 (Verweis auf DIN EN 1090-2) für die jeweilige Reiboberfläche zu ermitteln
$\gamma_{M,3} = 1,25$	Sicherheitsbeiwert bei Einwirkungskombinationen der Gruppe N und den Betriebsbedingungen 1 bis 4 nach DIN EN 61400-1
$\gamma_{M,3} = 1,1$	Sicherheitsbeiwert bei allen anderen Einwirkungskombinationen

#### **ANMERKUNG 1:**

Bei Passverbindungen mit feuerverzinkten Bauteilen sind spezielle Korrosionsschutzmaßnahmen zu treffen.

Außerdem sind die Nachweise der Tragsicherheit für die gelochten Bauteile und die Schrauben hinsichtlich Abscheren und Lochleibung zu führen.

#### **ANMERKUNG 2:**

Durch diese Nachweise ist der Nachweis der Ermüdungssicherheit für die Schraube abgedeckt.

### **13.4 Stahlsortenauswahl**

#### **13.4.1 Einwirkungen für die Wahl der Stahlsorte**

Das Auftreten der niedrigsten Bauteiltemperatur entspricht einer "außergewöhnlichen" Bemessungssituation, d. h. die Schnittgrößen zur Bestimmung der maßgebenden Spannungen sind mit dem Lastfall D.2 (häufige Lasten) zu bestimmen, siehe auch DIN EN 1993-1-10, Absatz 2.2 (4).

Windenergieanlagen sind für die Ermittlung der Bezugstemperatur  $T_{Ed}$  wie Brücken einzuordnen. Gemäß DIN EN 1993-1-10/NA kann damit angesetzt werden:

$$T_{Ed} = -30^{\circ}\text{C}$$

Temperaturverschiebungen infolge Kaltumformung und erhöhter Dehnungsgeschwindigkeit können i. A. vernachlässigt werden.

Der Teilsicherheitsbeiwert der Einwirkungen ist jeweils  $\gamma_F = 1,0$ .

Das maßgebende Spannungsniveau  $\sigma_{Ed}$  ist als Nennspannung im maßgebenden Querschnitt und Tragwerksteil an der Stelle der erwarteten Rissentstehung (z.B. in umlaufenden Kragenversteifungen) zu ermitteln. In der Anwendung kommt der anerkannte Stand der Technik zum Tragen, nach dem Spannungsüberhöhungen an Öffnungen und Turmkopf (und ggf. anderen relevanten Strukturdetails) nicht gesondert berücksichtigt werden.

#### **13.4.2 Maßgebende Erzeugnisdicke bei Ringflanschverbindungen**

Die maßgebende Erzeugnisdicke ist für Ringflansche wie folgt zu wählen:

- Bei Ringflanschen mit Ansatz (Vorschweißflansch) die Blechdicke der anschließenden Turmwand (b gemäß Bild 12); der Abstand vom Schweißnahtübergang einschließlich des Übergangsradius ( $l + r$  gemäß Bild 12) muss dabei mindestens der halben anschließenden Blechdicke entsprechen, ansonsten ist der Flansch als "ohne Ansatz" zu bewerten.

Zusätzlich ist bei geschweißten Ringflanschen die Erzeugnisdicke des Flansches ( $t_{ges}$  gemäß Bild 12) mit dem Spannungsniveau  $\sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t)$  zu bewerten. Dieser zusätzliche Nachweis darf für nahtlos hergestellte oder mit Abbrennstumpf-Verfahren geschweißte Ringflansche entfallen.

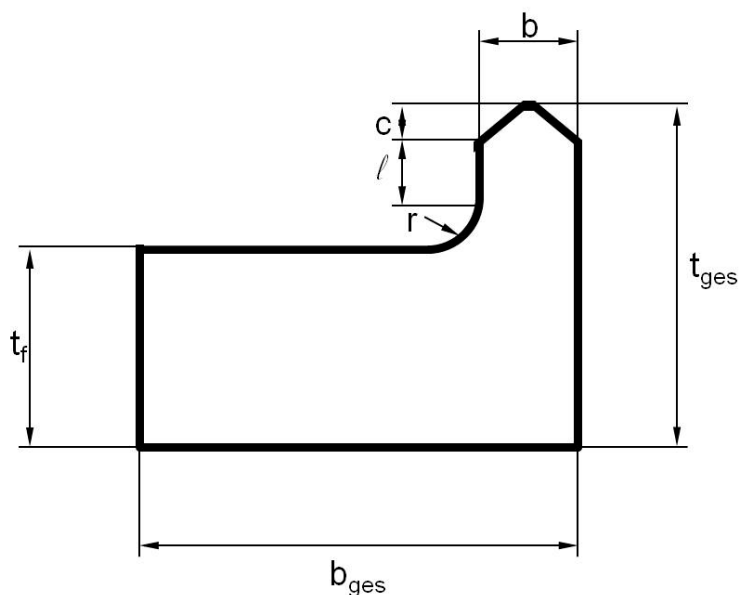
- Bei Ringflanschen ohne Ansatz die Dicke ( $t_f = t_{ges}$  gemäß Bild 12) des Ringflansches.

### 13.4.3 Auswahl der Stahlsorten im Hinblick auf Eigenschaften in Dickenrichtung

Bei Blechen, die quer zur Erzeugungsrichtung beansprucht werden, ist eine Z-Güte nach DIN EN 1993-1-10, Kapitel 3, nachzuweisen.

Bei aus Blechen hergestellten Flanschen (Blechedicke = Flanschhöhe  $t_f$  bzw.  $t_{ges}$  gemäß Bild 12) kann ein Vorschweißflansch hierbei nur dann günstig wirkend angesetzt werden, wenn der Abstand vom Schweißnahtübergang zum Auslauf des Übergangsradius ( $l$  gemäß Bild 12) dabei mindestens der halben anschließenden Blechedicke ( $b$  gemäß Bild 12) entspricht.

Bei aus Blechen hergestellten Flanschen, die längs zur Erzeugungsrichtung beansprucht werden (Blechedicke = Flanscbreite  $b_{ges}$  gemäß Bild 12), sowie bei Flanschen, die aus einem nahtlos gewalzten Ring oder aus einem allseitig gewalzten Stab hergestellt werden, braucht eine Z-Güte nach DIN EN 1993-1-10 nicht nachgewiesen zu werden.



**Bild 12:** Flanschbezeichnungen am Beispiel eines L-Flansches

$t_f$	Flanschdicke
$t_{ges}$	Gesamte Flanschdicke einschließlich Vorschweißflansch
$b_{ges}$	Flanscbreite
$r$	Übergangsradius
$c$	Flankenhöhe der Schweißnahtvorbereitung
$b$	Ansatzdicke (in der Regel gleich der Blechedicke des anschließenden Bleches)
$l$	Abstand vom Übergangsradius zur Schweißnahtvorbereitung ( $= t_{ges} - t_f - r - c$ )

## 14 Bauabnahme und Inbetriebnahme

Vor Inbetriebnahme ist im Rahmen der Bauüberwachung und/oder Bauzustandsbesichtigung seitens der zuständigen Bauaufsicht oder des Prüfindgenieurs zu bescheinigen, dass die Windenergieanlage nach den geprüften bautechnischen Unterlagen errichtet worden ist. Der Umfang der Maßnahmen zur Überprüfung und Überwachung kann den „Empfehlungen für die Bauüberwachung von Windenergieanlagen“ des Bauüberwachungsvereins BÜV entnommen werden. Die Abnahme der Maschine ist nicht Gegenstand dieser Empfehlungen und erfolgt auf der Grundlage der gutachterlichen Stellungnahmen zur Maschine (siehe Abschnitt 3, Ziff. I).

Gegebenenfalls sind Bauüberwachung und Prüfungen durch Sachverständigen-Organisationen nach VAWS auf der Grundlage der gutachterlichen Stellungnahme zum anlagenbezogenen Gewässerschutz zu beachten.

## 15 Wiederkehrende Prüfungen

### 15.1 Allgemeines

Wiederkehrende Prüfungen sind in regelmäßigen Intervallen durch Sachverständige an Maschine und Rotorblättern sowie an der Tragstruktur (Turm und zugängliche Bereiche der Fundamente) durchzuführen. Die Prüfintervalle hierfür ergeben sich aus den gutachterlichen Stellungnahmen zur Maschine (siehe Abschnitt 3, Ziff. I). Sie betragen höchstens 2 Jahre, dürfen jedoch auf vier Jahre verlängert werden, wenn durch von der Herstellerfirma autorisierte Sachkundige eine laufende (mindestens jährliche) Überwachung und Wartung der Windenergieanlage durchgeführt wird.

### 15.2 Umfang der Wiederkehrenden Prüfung

Die Maschine einschließlich der elektrotechnischen Einrichtungen des Betriebsführungs- und Sicherheitssystems sowie der Rotorblätter ist im Hinblick auf einen mängelfreien Zustand zu untersuchen. Dabei müssen die Prüfungen nach den Vorgaben in dem begutachteten Wartungspflichtenbuch und ggf. weiteren Auflagen in den übrigen Gutachten durchgeführt werden (siehe Abschnitt 3, Ziff. I).

Es ist sicherzustellen, dass die sicherheitsrelevanten Grenzwerte entsprechend den begutachteten Ausführungsunterlagen eingehalten werden.

Für den Turm und das Fundament (Fundamentkeller und Sockel) ist mindestens eine Sichtprüfung durchzuführen, wobei die einzelnen Bauteile aus unmittelbarer Nähe zu untersuchen sind.

Es ist zu prüfen, ob die Turmkonstruktion im Hinblick auf die Standsicherheit Schäden (z.B. Korrosion, Risse, Abplatzungen in den tragenden Stahl- bzw. Betonkonstruktionen) oder unzulässige Veränderungen gegenüber der genehmigten Ausführung (z.B. bezüglich der Vorspannung der Schrauben, der zulässigen Schiefstellung, der erforderlichen Erdauflast auf dem Fundament) aufweist.

Bei planmäßig vorgespannten Schrauben ist mindestens eine Sicht- und Lockerheitskontrolle durchzuführen.

### 15.3 Unterlagen der zu prüfenden Windenergieanlage

Für die Wiederkehrende Prüfung sind mindestens die folgenden Unterlagen einzusehen:

- Wartungspflichtenbuch
- Prüfberichte der bautechnischen Unterlagen für Turm und Gründung
- Maschinengutachten

- Auflagen im Lastgutachten
- Auflagen im Bodengutachten
- Baugenehmigungsunterlagen
  
- Bedienungsanleitung
- Inbetriebnahmeprotokoll
- Berichte der früheren Wiederkehrenden Prüfungen und der Überwachungen und Wartungen
- Dokumentation von Änderungen und ggf. Reparaturen an der Anlage und ggf. Genehmigungen

## 15.4 Maßnahmen

### 15.4.1 Reparaturen

Für die vom Sachverständigen festgestellten Mängel ist ein Zeitrahmen für eine fachgerechte Reparatur vorzugeben.

Die Reparatur muss vom Hersteller der Windenergieanlage, von einer vom Hersteller autorisierten oder von einer auf diesem Gebiet spezialisierten Fachfirma, die über alle notwendigen Kenntnisse, Unterlagen und Hilfsmittel verfügt, durchgeführt werden.

### 15.4.2 Außerbetriebnahme und Wiederinbetriebnahme

Bei Mängeln, die die Standsicherheit der Windenergieanlage ganz oder teilweise gefährden oder durch die unmittelbare Gefahren von der Maschine und den Rotorblättern ausgehen können, ist die Anlage unverzüglich außer Betrieb zu setzen.

Die Wiederinbetriebnahme nach Beseitigung der Mängel setzt die Freigabe durch den Sachverständigen voraus.

## 15.5 Dokumentation

Das Ergebnis der Wiederkehrenden Prüfung ist in einem Bericht festzuhalten, der mindestens die folgenden Informationen enthalten muss:

- Prüfender Sachverständiger
- Hersteller, Typ und Seriennummer der Windenergieanlage sowie der Hauptbestandteile (Rotorblätter, Getriebe, Generator, Turm)
- Standort und Betreiber der Windenergieanlage
- Gesamtbetriebsstunden
- Windgeschwindigkeit und Temperatur am Tag der Prüfung
- Anwesende bei der Prüfung
- Beschreibung des Prüfungsumfanges
- Prüfergebnis und ggf. Auflagen

Über durchgeführte Reparaturen aufgrund von standsicherheitsrelevanten Auflagen ist ein Bericht anzufertigen.

Diese Dokumentation ist vom Betreiber über die gesamte Nutzungsdauer der Windenergieanlage aufzubewahren.

## 16 Standorteignung von Windenergieanlagen

Voraussetzung für eine Prüfung der Standorteignung ist, dass für die Anlage eine Typenprüfung bzw. eine Einzelprüfung vorliegt.

### 16.1 Bestehende Anlagen im Falle einer Parkerweiterung/Parkänderung

Für bestehende Anlagen, denen die DIBt-Richtlinie für Windkraftanlagen (Fassung 1995) oder DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen (Fassung 2004) zugrunde liegt, darf im Falle einer Parkänderung der Nachweis der Standorteignung auch weiterhin nach dem Verfahren gemäß DIBt-Richtlinie 2004 geführt werden.

### 16.2 Neuanlagen

Der Ermittlung der Standortbedingungen ist eine Standortbesichtigung zu Grunde zu legen. Anwendung sollten hierbei einschlägige Richtlinien finden. Für den Nachweis der Standorteignung von Windenergieanlagen in Windparks wird das folgende Verfahren alternativ zur DIN EN 61400-1:2011-08 empfohlen.

#### a. Folgende Angaben auf Nabenhöhe werden für einen Nachweis der Standorteignung benötigt:

- i. Mittlere Windgeschwindigkeit ( $v_{ave}$ )
- ii. Formparameter der Weibull-Funktion ( $k$ )
- iii. Mittlerer Höhenexponent ( $\alpha$ )
- iv. Mittlere Luftdichte ( $\rho$ )
- v. Mittlere Turbulenzintensität sowie die Standardabweichung der Turbulenzintensität bei 15 m/s (zur Ermittlung der charakteristischen oder repräsentativen Turbulenzintensität).
- vi. 50-Jahreswindgeschwindigkeit ( $v_{m50}(h)$ ) gemäß Windzonenkarten bzw. ermittelt z.B. nach Gumbel-Methode<sup>11</sup>, sofern erforderlich (dies ist z.B. der Fall, wenn die Anlage in einer höheren Windzone als in der Typenprüfung bzw. Einzelprüfung abgedeckt errichtet werden soll)
- vii. Windrichtungsverteilung der zu betrachtenden Anlagen

#### b. Anhand der in 16.2.a genannten Angaben wird ein vereinfachter Vergleich durchgeführt. Werden die folgenden Bedingungen erfüllt, kann die Standorteignung der WEA bestätigt werden.

- i. Vergleich mittlere Windgeschwindigkeit
  - (1) Mittlere Windgeschwindigkeit am Standort ist um mindestens 5% kleiner als gemäß Typen-/Einzelprüfung oder
  - (2) Mittlere Windgeschwindigkeit am Standort ist kleiner als gemäß Typen-/Einzelprüfung und Formparameter  $k$  der Weibull-Funktion ist größer gleich 2.
- ii. Vergleich der effektiven Turbulenzintensität nach DIN EN 61400-1:2011-08 zwischen  $0.2 v_{m50}(h)$  und  $0.4 v_{m50}(h)$  der Auslegungsturbulenz NTM
- iii. Vergleich der 50-Jahreswindgeschwindigkeit:
  - (1) Windzone gemäß Typen-/Einzelprüfung deckt die Windzone des betrachteten Standortes gemäß Windzonenkarte ab (die detaillierten Regelungen gemäß DIN EN 1991-1-4, Absatz 4.3.3 einschließlich NA für nicht ebene Geländelagen sind ggf. zu beachten) oder

<sup>11</sup> European Wind Turbines Standards II oder Harris I, "Gumbel revisited: A new look at extreme value statistics applied to wind speeds", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 59, 1996

- (2) 50-Jahreswindgeschwindigkeit ( $v_{m50}(h)$ ) gemäß Typen-/Einzelprüfung deckt die 50-Jahreswindgeschwindigkeit am Standort ab (siehe 16.2.a.vi)

**c. Wird eine der Bedingungen nicht erfüllt, kann unter Berücksichtigung aller Angaben in 16.2.a. wie folgt verfahren werden:**

- i. Wenn die Bedingungen 16.2.b.i oder 16.2.b.ii nicht erfüllt sind, kann die Standorteignung auf Basis eines Lastvergleiches der Betriebsfestigkeitslasten (Vergleich der standortspezifischen Lasten zu den Lastannahmen der Typen-/Einzelprüfung) nachgewiesen werden. Um diesen Nachweis zu führen, müssen die effektiven Turbulenzen mindestens von  $v_{in}$  bis  $0.4 v_{m50}(h)$  vorliegen. Die Turbulenzintensität für Windgeschwindigkeiten, die im Gutachten nicht abgedeckt sind, müssen für die Bestimmung der Betriebsfestigkeitslasten als konstant mit dem Wert für die größte ermittelte Windgeschwindigkeit angenommen werden.
- ii. Wenn die Bedingung 16.2.b.iii nicht erfüllt ist, kann die Standorteignung auf Basis eines Lastvergleiches der Extremlasten (Vergleich der standortspezifischen Lasten zu den Lastannahmen der Typen-/Einzelprüfung) nachgewiesen werden.

Einflüsse durch Geländerauhigkeit und Topographie sind in der Beurteilung entsprechend zu berücksichtigen. Das Verfahren kann für alle Standorte angewendet werden, die als nicht topografisch komplex zu bezeichnen sind. Die topografische Komplexität kann hierbei durch das Verfahren nach DIN EN 61400-1:2011-08 bestimmt werden.

## 17 Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

### 17.1 Anwendung der "Richtlinie für den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen"<sup>12</sup> – Beurteilung von Turm und Gründung

Mit der „Richtlinie für den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen“ besteht die Möglichkeit einer Bewertung von Windenergieanlagen hinsichtlich ihres Weiterbetriebs nach Ablauf der Entwurfslebensdauer, die im Rahmen dieser Richtlinie i. d. R. mit 20 Jahren angenommen wird.

Die in der "Richtlinie für den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen" festgelegten Prüfmethode ermöglichen die Beurteilung für den Weiterbetrieb der Windenergieanlage gemäß dem aktuellen Stand der Technik. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Sicherheit bezüglich der Aussage zur Standsicherheit von Umfang und Auswahl der Prüfmethode und der mit der Probenahme, Durchführung und Bewertung beauftragten Sachverständigen abhängt.

Grundsätzlich gibt es zwei unterschiedliche Vorgehensnachweise, die analytische und die praktische Methode.

Die analytische Methode ist eine Prüfung durch Neuberechnung der Windenergieanlage unter Berücksichtigung der standortspezifischen Anlage und deren lokalen Randbedingungen.

Die praktische Methode ist eine Prüfung durch Inspektion der Windenergieanlage, dies beinhaltet sowohl die visuelle Inspektion als auch zerstörungsfreie Prüfmethode und, falls erforderlich, auch eine Probenahme aus dem Tragwerk.

Abweichend von der "Richtlinie für den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen" gilt:

---

<sup>12</sup> Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH: Richtlinie für den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen, in : IV Vorschriften und Richtlinien Industriedienste, 1 Windenergie, Ausgabe 2009, Germanischer Lloyd, Hamburg

- Die praktische Methode ist durch zusätzliche statische Berechnungen unter Einbeziehung des derzeit geltenden Regelwerks zu belegen (hiermit ist nicht die analytische Methode gemeint).
- Die analytische Methode muss durch zusätzliche repräsentative Materialprüfungen am Turm und eine Begutachtung der Gründung unterstützt werden.

## 17.2 Sachverständige

Alle im Rahmen der Beurteilung auf Weiterbetrieb gemäß dieser Richtlinie anfallenden Inspektionen der WEA sowie Beurteilungen von Lasten und/oder Komponenten der WEA müssen von geeigneten unabhängigen Sachverständigen für Windenergieanlagen durchgeführt werden.

Die für die Beurteilung zum Weiterbetrieb von Windenergieanlagen eingeschalteten Sachverständigen müssen eine entsprechende Ausbildung haben und die fachlichen Anforderungen für die Beurteilung der Gesamtanlage erfüllen. Eine Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17020 oder DIN EN ISO 17065 oder gleichwertig ist erforderlich.

Die Beurteilung der Anforderungen des anlagenbezogenen Gewässerschutzes und deren Umsetzung erfolgt durch eine Sachverständigen-Organisation nach VAwS (Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen).

## 18 In Bezug genommene Normen

DIN 1054:2010-12	Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1
DIN 1055-5:2005-07	Einwirkungen auf Tragwerke Teil 5: Schnee- und Eislasten
DIN 4017:2006-03	Baugrund – Berechnung des Grundbruchwiderstands von Flachgründungen
DIN EN 1090-2:2011-10	Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche Fassung EN 1090-2:2008 + A1:2011
DIN EN 1991-1-1:2010-12	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau; Deutsche Fassung EN 1991-1-1:2002 + AC:2009
DIN EN 1991-1-3:2010-12	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-3:2003 + AC:2009
DIN EN 1991-1-4:2010-12	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-4:2005 + A1:2010 + AC:2010
DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12	Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten
DIN EN 1992-1-1:2011-01	Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010
DIN EN 1993-1-1:2010-12	Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009
DIN EN 1993-1-6:2010-12	Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen; Deutsche Fassung EN 1993-1-6:2007 + AC:2009
DIN EN 1993-1-8:2010-12	Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005 + AC:2009
DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12	Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauteilen - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen
DIN EN 1993-1-9:2010-12	Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009
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; Deutsche Fassung EN 1993-1-10:2005 + AC:2009

DIN EN 1993-1-10/NA:2010-12	Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauteilen - Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung
DIN EN 1993-3-2:2010-12	Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 3-2: Türme, Maste und Schornsteine - Schornsteine; Deutsche Fassung EN 1993-3-2:2006
DIN EN 1997-1:2009-09	Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC:2009
DIN EN 1998-1:2010-12	Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009
DIN EN 1998-1/NA:2011-01	Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau
DIN EN 13670:2011-03	Ausführung von Tragwerken aus Beton; Deutsche Fassung EN 13670:2009
DIN EN 45011-1998-03	Allgemeine Anforderungen an Stellen, die Produktzertifizierungssysteme betreiben (ISO/IEC Guide 65:1996); Dreisprachige Fassung EN 45011:1998
DIN EN 61400-1:2004-08	Windenergieanlagen - Teil 1: Sicherheitsanforderungen (IEC 61400-1:1999, modifiziert); Deutsche Fassung EN 61400-1:2004
DIN EN 61400-1 Berichtigung 1:2005-12	Windenergieanlagen - Teil 1: Sicherheitsanforderungen (IEC 61400-1:1999, modifiziert); Deutsche Fassung EN 61400-1:2004
DIN EN 61400-1:2006-07	Windenergieanlagen - Teil 1: Auslegungsanforderungen (IEC 61400-1:2005); Deutsche Fassung EN 61400-1:2005
DIN EN 61400-1:2011-08	Windenergieanlagen - Teil 1: Auslegungsanforderungen (IEC 61400-1:2005 + A1:2010); Deutsche Fassung EN 61400-1:2005 + A1:2010
DIN EN 61400-2:2007-02	Windenergieanlagen - Teil 2: Sicherheit kleiner Windenergieanlagen (IEC 61400-2:2006); Deutsche Fassung EN 61400-2:2006
IEC/TS 61400-13:2001-06	Windenergieanlagen - Teil 13: Messung von mechanischen Lasten
DIN EN ISO/IEC 17020:2012-07	Konformitätsbewertung - Anforderungen an den Betrieb verschiedener Typen von Stellen, die Inspektionen durchführen (ISO/IEC 17020:2012); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17020:2012
DIN EN ISO/IEC 17065:2013-01	Konformitätsbewertung - Anforderungen an Stellen, die Produkte, Prozesse und Dienstleistungen zertifizieren (ISO/IEC 17065:2012); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17065:2012

## Anhang A (Informativ)

**Tabelle:** Vergleich der Windgeschwindigkeitsbezeichnungen verschiedener Normen und Richtlinien (Informativ)

Bezeichnung	Beschreibung	Mittelungsintervall	Bezugs- höhe	Wiederkehr- periode N	DIN EN 61400-1	DIN EN 1991-1-4/NA	DIBt 2015
					Formelzeichen	Formelzeichen	Formelzeichen
<b>Bezugswind- geschwindigkeit</b>	Grundlagenparameter zur Definition der Typklassen. Weitere relevante Auslegungsparameter werden hiervon abgeleitet. 10-min-Mittelwert der extremen Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe	10 Minuten	Naben- höhe h	50 Jahre	$v_{ref}$	- / -	- / -
<b>Grundwert der Basiswind- geschwindigkeit</b>	Grundlagenparameter zur Festlegung der Windgeschwindigkeit abhängig von der Windzone der WEA	10 Minuten	10m	50 Jahre	- / -	$v_{b,0}$	- / -
<b>Basiswind- geschwindigkeit</b>	Grundlagenparameter zur Festlegung der Windgeschwindigkeit abhängig von der Windzone unter Berücksichtigung von Richtung und Jahreszeit	10 Minuten	10m	50 Jahre	- / -	$v_b =$ $v_{b,0} \times C_{dir} \times C_{season}$ $= v_{b,0}$  (siehe DIN EN 1991-1-4/NA)	$v_b$
<b>50-Jahreswind</b>	Extreme mittlere Wind- geschwindigkeit in Nabenhöhe	10 Minuten	Naben- höhe h	50 Jahre	$v_{50}(h) = v_{rev}$	$v_m(h)$	$v_{m50}(h)$
<b>1-Jahreswind</b>	Extreme mittlere Wind- geschwindigkeit in Nabenhöhe	10 Minuten	Naben- höhe h	1 Jahr	$v_1(h) = 0,8 v_{50}(h)$	$v_m(h) \times C_{prob} (1 \text{ Jahr})$	$v_{m1}(h) =$ $0,8 v_{m50}(h)$
<b>50-Jahresbö</b>	Extremwert der Windgeschwindigkeit gemittelt über 3 Sekunden	3 Sekunden	Naben- höhe h	50 Jahre	$v_{e50}$	$v_p(h)$	$v_{p50}(h)$
<b>1-Jahresbö</b>	Spitzenwert bzw. Extremwert der Windgeschwindigkeit gemittelt über 3 Sekunden	3 Sekunden	Naben- höhe h	1 Jahr	$v_{e1}$	$v_p(h) \times C_{prob} (1 \text{ Jahr})$	$v_{p1}(h) =$ $0,8 v_{p50}(h)$

Bezeichnung	Beschreibung	Mittelungsintervall	Bezugs- höhe	Wiederkehr- periode N	DIN EN 61400-1	DIN EN 1991-1-4/NA	DIBt 2015
					Formelzeichen	Formelzeichen	Formelzeichen
<b>Jahresmittelwert der Wind- geschwindigkeit</b>	Mittelwert über mindestens 1 Jahr	>1a	Naben- höhe h	- / -	$v_{ave}$ entsprechend Typenklasse	- / -	$v_{av} =$ $0,18 \times v_{m50}(h)$ oder $0,20 \times v_{m50}(h)$
<b>Bemessungswind- geschwindigkeit / Nennwind- geschwindigkeit</b>	Windgeschwindigkeit, bei der die Bemessungsleistung / Nennleistung der WEA erreicht wird	10 Minuten	Naben- höhe h	- / -	$v_r$	- / -	$v_r$

## **Impressum**

Herausgeber:  
Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)  
vertreten durch den Präsidenten Gerhard Breitschaft  
Kolonnenstraße 30 B  
10829 Berlin  
DEUTSCHLAND

Telefon: +49 (0)30 / 78730 0  
Telefax: +49 (0)30 / 78730 320  
E-Mail: [dibt@dibt.de](mailto:dibt@dibt.de)  
[www.dibt.de](http://www.dibt.de)

Verantwortlich:  
Dr.-Ing. Doris Kirchner  
Telefon: +49 (0)30 / 78730 423  
E-Mail: [dki@dibt.de](mailto:dki@dibt.de)

Erscheinungshinweis:  
Diese Publikation wird im Internet unter [www.dibt.de](http://www.dibt.de) veröffentlicht und ist kostenfrei verfügbar.  
Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Herausgebers.