

ENTWURF

Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik

Reihe B

Heft 8

Richtlinie für Windenergieanlagen

Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise
für Turm und Gründung

ENTWURF Januar 2012

Überarbeitung der Fassung von 2004

Deutsches Institut für Bautechnik - DIBt -, Berlin

Dieser Richtlinienentwurf wurde in der Projektgruppe „Windenergieanlagen“ des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Berlin erarbeitet.

Er wird hiermit der Öffentlichkeit zur Kenntnis gegeben, um interessierten Kreisen die Möglichkeit zu geben, sich dazu bis zum 23. März zu äußern.

Stellungnahmen bitten wir Sie vorzugsweise per E-Mail an RiLiWEA@dibt.de unter Verwendung des beigefügten oder unter der Adresse www.dibt.de eingestellten Formblattes abzugeben.

Stellungnahmen in Papierform bitten wir Sie an

Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstraße 30B
10829 Berlin

zu richten.

Kommentare, die uns nach dem 23. März erreichen, können wir leider nicht berücksichtigen.

Die beabsichtigte Richtlinie kann von der vorliegenden Fassung abweichen, die Anwendung des Entwurfs muss daher mit besonderer Sorgfalt erfolgen und ist besonders zu vereinbaren.

Inhaltsverzeichnis

1	GELTUNGSBEREICH		6
2	BEGRIFFE UND BEZEICHNUNGEN		7
2.1	Begriffe		7
2.2	Bezeichnungen		8
2.3	Gegenüberstellung von Begriffen und Bezeichnungen		10
3	BAUTECHNISCHE UNTERLAGEN		11
4	TECHNISCHE BAUBESTIMMUNGEN		12
5	WERKSTOFFE UND AUSFÜHRUNG		12
6	EINWIRKUNGEN		12
6.1	Allgemeines		12
6.2	Trägheits- und Gravitationslasten		13
6.2.1	Ständige Gravitationslasten (Eigenlasten)	13	
6.2.2	Trägheitskräfte aus Massensexzentrizitäten	13	
6.2.3	Erdbeben	13	
6.3	Aerodynamische Lasten		13
6.3.1	Allgemeines	13	
6.3.2	Windbedingungen	13	
6.3.3	Einflüsse benachbarter baulicher Anlagen auf die Standorteignung	14	
6.3.4	Windlasten für den Zustand während der Montage oder Wartung	15	
6.3.5	Windlast bei Eisansatz	15	
6.3.6	Einwirkungen aus Wirbelablösungen	15	
6.4	Sonstige Einwirkungen		15
6.4.1	Imperfektionen, Einwirkungen aus ungleichmäßigen Setzungen	15	
6.4.2	Vorspannkraft	16	
6.4.3	Erddruck	16	
6.4.4	Sohlwasserdruck	16	
6.4.5	Wärmeeinwirkung bei Spannbetontürmen	16	
6.4.6	Eislasten	17	
7	EINWIRKUNGSKOMBINATIONEN		18
8	ERMITTLUNG DER BEMESSUNGSSCHNITTGRÖßEN		20
8.1	Allgemeines		20
8.2	Gesamtdynamische Berechnung		20
8.2.1	Allgemeines	20	
8.2.2	Anforderungen	20	
8.2.3	Berücksichtigung der Gründung	22	
8.2.4	Schnittgrößen	22	

8.3	Wirbelerregte Querschwingungen		24
8.4	Logarithmisches Dämpfungsdekrement		24
8.5	Schnittgrößen für den Ermüdungssicherheitsnachweis		24
8.5.1	Anforderungen	24	
8.5.2	Beanspruchungskollektive	25	
9	SICHERHEITSKONZEPT		25
9.1	Allgemeines		25
9.2	Grenzzustände der Tragfähigkeit		25
9.3	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit		27
10	NACHWEISE FÜR DEN TURM		28
10.1	Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit		28
10.1.1	Teilsicherheitsbeiwerte	28	
10.1.2	Festigkeitsversagen	28	
10.1.3	Stabilitätsversagen	28	
10.1.4	Ermüdungsversagen von Stahlkonstruktionen	28	
10.1.5	Ermüdungsversagen von Stahl- und Spannbetonkonstruktionen	30	
10.2	Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit		32
10.2.1	Einwirkungskombinationen	32	
10.2.2	Teilsicherheitsbeiwert	32	
10.2.3	Verformungsbegrenzung	33	
10.2.4	Spannungsbegrenzung	33	
10.2.5	Rissbreitenbegrenzung	33	
11	NACHWEISE FÜR DIE GRÜNDUNG		33
11.1	Gründungskörper		33
11.1.1	Sicherheitskonzept	33	
11.1.2	Stahleinbauteile	33	
11.1.3	Stahlbetonbauteile	33	
11.1.4	Bemessung von Pfählen	33	
11.2	Baugrund		34
11.2.1	Beschaffenheit des Baugrunds	34	
11.2.2	Sicherheitskonzept	34	
11.2.3	Flachgründungen	35	
11.2.4	Pfahlgründungen (äußere Tragfähigkeit)	35	
12	KONSTRUKTIONSDetails		36
12.1	Ringflanschverbindungen bei stählernen Türmen		36
12.2	Öffnungen in der Wand von Stahlrohtürmen		38
12.3	Scherbeanspruchte Schraubenverbindungen		40
12.4	Stahlsortenauswahl		40
12.4.1	Einwirkungen für die Wahl der Stahlsorte	40	
12.4.2	Maßgebende Erzeugnisdicke bei Ringflanschverbindungen	41	

12.4.3	Auswahl der Stahlsorten im Hinblick auf Eigenschaften in Dickenrichtung	41
13	BAUABNAHME UND INBETRIEBNAHME	42
14	WIEDERKEHRENDE PRÜFUNGEN	42
14.1	Allgemeines	42
14.2	Umfang der Wiederkehrenden Prüfung	42
14.3	Unterlagen der zu prüfenden Windenergieanlage	43
14.4	Maßnahmen	43
14.4.1	Reparaturen	43
14.4.2	Außerbetriebnahme und Wiederinbetriebnahme	43
14.5	Dokumentation	43
15	STANDORTEIGNUNG VON WINDENERGIEANLAGEN	44
15.1	Bestehende Anlagen im Falle einer Parkerweiterung	44
15.2	Neuanlagen	44
16	WEITERBETRIEB VON WINDENERGIEANLAGEN	45
16.1	Anwendung der "Richtlinie für den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen"	45
16.2	Sachverständige	46
17	IN BEZUG GENOMMENE NORMEN	46

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 8.2.3) zu deren Beurteilung zugrunde zu legen sind. Die Beurteilung der Maschine selbst ist nicht Gegenstand dieser Richtlinie.

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

Darüber hinaus muss das Sicherheitssystem zwei oder mehrere Bremsysteme 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.

DIN EN 61400-1: 2006	Alternativ: DIN EN 61400-1: 2004
DIN EN 61400-1: 2006-07 DIN EN 61400-1/A1: 2011-04	DIN EN 61400-1: 2004-08 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 der jeweils neuesten Ausgabe zu erfolgen hat.

Windenergieanlagen, deren überstrichene Rotorfläche kleiner als 200 m² 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)
Erdberührtes Stahl-, Stahlbeton oder Spannbetonbauteil inkl. Betonsockel bis max. 50 cm über natürlicher bzw. aufgefüllter Geländeoberkante und Boden
- Turm:
Teil einer Windenergieanlage oberhalb des Fundamentes, der die Maschine trägt, einschließlich eventueller Abspannungen
Stahlurm: Turm bestehend aus ein oder mehreren Stahlrohrsegmenten
Spannbetonturm: vorgespannter Ort beton- oder Fertigteilurm
Hybridurm: Stahlbeton- oder Spannbetonturm mit aufgesetztem Stahlrohrurm
- 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 pro Minute, bei der bei Nennwindgeschwindigkeit die Nennleistung erreicht wird
- Leerlauf:
betriebsbereiter Zustand einer Windenergieanlage ohne Leistungsabgabe, bei dem sich der Rotor langsam dreht
- mittlere Windgeschwindigkeit $v_m(z)$:
Mittlere Windgeschwindigkeit (10-Minuten-Mittel), abhängig von der Topographie des Standortes
- 50-Jahres-Wind v_{50} :
mittlere Windgeschwindigkeit, die statistisch im Mittel einmal in 50 Jahren erreicht oder überschritten wird (entspricht einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,02)
- Referenzgeschwindigkeit $v_{b,0}$
50-Jahres-Wind in 10 m Höhe in ebenem offenem Gelände die über eine Zeitspanne von 10 Minuten gemittelte Windgeschwindigkeit
- 1-Jahres-Wind v_1 :
mittlere Windgeschwindigkeit, die statistisch im Mittel jährlich einmal erreicht oder überschritten wird
- Jahresmittel der Windgeschwindigkeit v_{ave} :
über mehrere Jahre gemittelte Windgeschwindigkeit
- 50-Jahres-Bö v_p :
über 3 s gemittelte Windgeschwindigkeit, die statistisch im Mittel einmal in 50 Jahren erreicht oder überschritten wird (s. Tabelle NA.B2 zu DIN EN 1991-1-4)
- 1-Jahres-Bö v_{e1} :
über 3 s gemittelte Windgeschwindigkeit, die statistisch im Mittel jährlich einmal erreicht oder überschritten wird
- 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_f	aerodynamischer Kraftbeiwert
D	Rotordurchmesser
F	Kraft, Last
f_0	Eigenfrequenz
f_R	Erregerfrequenz des laufenden Rotors
G	Böenreaktionsfaktor
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	Nenndrehzahl des Rotors
q	Geschwindigkeitsdruck (Staudruck)
R	Rotorradius
s	auf den Rotordurchmesser bezogener dimensionsloser horizontaler Abstand zwischen den Turmachsen zweier benachbarter Anlagen
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_1	1-Jahres-Wind
v_p	50-Jahres-Bö
v_{e1}	1-Jahres-Bö
v_{hub}	Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe
v_{ref}	Referenzgeschwindigkeit
v_{ave}	Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe
v_{out}	Abschaltwindgeschwindigkeit
v_{in}	Einschaltwindgeschwindigkeit
v_r	Nennwindgeschwindigkeit
x	} Koordinaten (siehe Bild 3)
y	
z	
α	Geländerauhigkeitsexponent
β	Anströmwinkel

γ_F	Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkung
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand
δ	logarithmisches Dämpfungsdekrement
g	Verhältniswert bezüglich der Tiefe des Rotorblattes, $g = t_s/t_w$.
ξ	dimensionslose Längenkoordinate auf dem Rotorblatt
ρ	Luftdichte
ρ_E	Dichte des Eises
σ	Spannung
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite

Fußzeiger

d	Bemessungswerte
k	charakteristische Werte

2.3 Gegenüberstellung von Begriffen und Bezeichnungen

DIN EN 61400-1: 2004	DIN EN 61400-1: 2006	DIBt-Richtlinie
Formelzeichen Bezeichnung / Bedeutung	Formelzeichen Bezeichnung / Bedeutung	Formelzeichen Bezeichnung / Bedeutung
V_{ref} Bezugswindgeschwindigkeit Grundlagenparameter zur Definition der Typklassen. Weitere relevante Auslegungsparameter werden hiervon abgeleitet. 10-min-Mittelwert der extremen Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe 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 in Nabenhöhe mit einem Wiederkehrzeitraum von 50 Jahren.	V_{ref} Referenzgeschwindigkeit 50-Jahreswind in 10 m Höhe in ebenem offenes Gelände
V_r Bemessungswindgeschwindigkeit	V_r Bemessungswindgeschwindigkeit	V_r Nennwindgeschwindigkeit
Bemessungsleistung	Bemessungsleistung	Nennleistung
A (Anormal) Art des Auslegungszustandes	A (Anormal) Art des Auslegungszustandes	A (Außergewöhnlich) Gruppe der Einwirkungskombinationen

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 8)
- 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 14)

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 im Verbindung mit ihren Nationalen Anhängen anzuwenden.

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

5 Werkstoffe 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.

Stahltürme von Windenergieanlagen 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.

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

6 Einwirkungen

6.1 Allgemeines

Einwirkungen auf die Windenergieanlage sind entsprechend DIN EN 61400-1 anzunehmen, siehe auch Abschnitt 1. Ergänzend sind weitere Einwirkungen nach Abschnitt 6 zu berücksichtigen.

6.2 Trägheits- und Gravitationslasten

6.2.1 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.

6.2.2 Trägheitskräfte aus Massenexzentrizitäten

Die für die Rotorfertigung festgelegten maximalen Massen- und aerodynamischen Unwuchten sind zu berücksichtigen.

Außerdem sind die zusätzlichen Trägheitskräfte aus Massenexzentrizitäten infolge Eislasten für den Fall zu ermitteln, dass 1 Rotorblatt nicht vereist ist (siehe Abschnitt 6.4.6), sofern der Betrieb unter Eislasten nicht sicher ausgeschlossen werden kann.

6.2.3 Erdbeben

Einwirkungen aus Erdbeben brauchen im Allgemeinen nicht berücksichtigt zu werden. Ausgenommen sind Windenergieanlagen in der Erdbebenzonen 3 nach DIN EN 1998-1/NA:2011-01, Tabelle NA 3, wenn aufgrund ihres Aufstellortes mit einer Gefährdung von Personen zu rechnen ist.

Die Anwendung der Lastfälle D. und D. ist hierbei eine vereinfachte Betrachtung. Alternativ kann eine genauere Betrachtung nach DIN EN 61400-1:2006 erfolgen.

6.3 Aerodynamische Lasten

6.3.1 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, z.B. für anzusetzende Höhenexponenten. 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.

6.3.2 Windbedingungen

Die am Standort der Windenergieanlage anzunehmenden Windgeschwindigkeiten des 50-Jahres-Windes, $v_{b,0}$ und der 50-Jahres-Bö, v_p , sind nach DIN EN 1991-1-4 einschließlich NA zu ermitteln.

Die Windenergieanlage ist bei Typenberechnungen mindestens für Windzone 2 auszulegen.

6.3.2.1 Betriebswindbedingungen

Das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe, v_{ave} , ist nach Gleichung (6.1a) bzw. (6.1b) anzunehmen, sofern standortspezifisch keine geringeren Werte nachgewiesen werden.

$$v_{ave} = 0,18 \cdot v_{b,0}(h) \quad (6.1a)$$

$$v_{ave} = 0,20 \cdot v_{b,0}(h) \quad (6.1b)$$

Gleichung (6.1b) gilt für Inseln der Nordsee und für norddeutsche Binnenlandstandorte (WZ 2 GK II).

Eine Zuordnung des anzunehmenden Wertes v_{ave} Geländekategorien gemäß DIN EN 1991-1-4, Anhang A bzw. DIN EN 1991-1-4/NA, Anhang NA.B findet sich in Tabelle 1:

Tabelle 1: Zuordnung von v_{ave} zu Windzonen / Geländekategorien

	GK I	Mischprofil Küste	GK II	Mischprofil Binnenland	GK III	GK IV
WZ4 ausser Nordseeinseln	6.1a					
WZ4 Nordseeinseln	6.1b					
WZ3	6.1a					
WZ2	6.1a		6.1b		6.1a	
WZ1	6.1a					

Es wird empfohlen, die Anlage für die Turbulenzintensität der Turbulenzkategorie A nach DIN EN 61400-1 nachzuweisen, um die Abdeckung aller deutschen Standorte außerhalb von Windparks zu gewährleisten. Wird hiervon abgewichen, ist eine standortbezogene Turbulenzbeurteilung erforderlich, siehe Kapitel 15.

6.3.2.2 Extremwindbedingungen

Mit den Festlegungen von $v_{b,0}$ und v_b nach DIN EN 1991-1-4 Bild NA A 1 gilt die entsprechende Beziehung zwischen diesen beiden Windgeschwindigkeiten nach DIN EN 61400-1 nicht mehr. Dies trifft auch auf den Nachweis der maschinentechnischen Komponenten zu.

Für die zur über einen Zeitraum von 10 Minuten gemittelte Windgeschwindigkeit $v_{b,0}(z)$ zugehörige Turbulenzintensität $I_v(z)$ gilt abweichend von DIN EN 1991-1-4 die Turbulenz nach folgender Formel:

$$I_v(z) = 0,128 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{-0,05} \quad (6.2)$$

Das zugehörige Höhenprofil für die mittlere Windgeschwindigkeit ist wie folgt anzunehmen:

$$v(z) = 1,15 \cdot v_{b,0} \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0,121} \quad (6.3)$$

Anmerkung: Turbulenzintensität und Höhenprofil werden unabhängig von der Geländekategorie angenommen. Der Höhenexponent für das turbulente Windfeld ist nach DIN EN 61400-1 anzusetzen

Die Werte für den 1-Jahres-Wind, $v_1(z)$, und die 1-Jahres-Bö, $v_{e1}(z)$, ermitteln sich aus dem 50-Jahres-Wind, $v_{b,0}$, bzw. der 50-Jahres-Bö, v_p , jeweils durch Multiplikation mit dem Faktor 0,8.

6.3.3 Einflüsse benachbarter baulicher Anlagen 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 15 „Standorteignung von Windenergieanlagen“ durchzuführen.

Die auf die Windenergieanlage einwirkenden Lasten sind mit den auf diesen Werten beruhenden Windparametern zu ermitteln.

Der Einfluss der lokalen Turbulenzerhöhung auf die Standorteignung braucht nicht untersucht zu werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

$$a \geq 8D \quad \text{für } v_{b,0}(h) \leq 40 \text{ m/s} \quad (6.4a)$$

$$a \geq 5D \quad \text{für } v_{b,0}(h) \geq 45 \text{ m/s}, \quad (6.4b)$$

Dabei ist:

a	Abstand zwischen den Turmachsen benachbarter Windenergieanlagen
D	der jeweils größere Rotordurchmesser
$v_{b,0}(h)$	50-Jahres-Wind in Nabenhöhe

Für Zwischenwerte von $v_{b,0}(h)$ ist a linear zu interpolieren.

6.3.4 Windlasten für den Zustand während der Montage oder Wartung

Für die Untersuchung der Zustände während der Montage dürfen die Windgeschwindigkeit $v_{b,0}$ 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 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 61 400-1:2006, 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.

6.3.5 Windlast bei Eisansatz

Bei Eisansatz ist die Windlast auf die durch den allseitigen Eisansatz (siehe Abschnitt 6.4.6 vergrößerte Bezugsfläche des Tragwerkes zu ermitteln. Bei Fachwerken sind die aerodynamischen Kraftbeiwerte dem durch die Vereisung veränderten Völligkeitsgrad, entsprechend anzusetzen.

6.3.6 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 8.3.

6.4 Sonstige Einwirkungen

6.4.1 Imperfektionen, Einwirkungen aus ungleichmäßigen Setzungen

Außer den elastischen Verformungen der Tragkonstruktion und des Baugrunds unter Einwirkung der äußeren Lasten sind folgende unge-

wollte 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 Stützbedingungen¹

6.4.2 Vorspannkraft

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

6.4.3 Erddruck

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

6.4.4 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.

6.4.5 Wärmeeinwirkung bei Spannbetontürmen

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 1).

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

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

¹ 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.

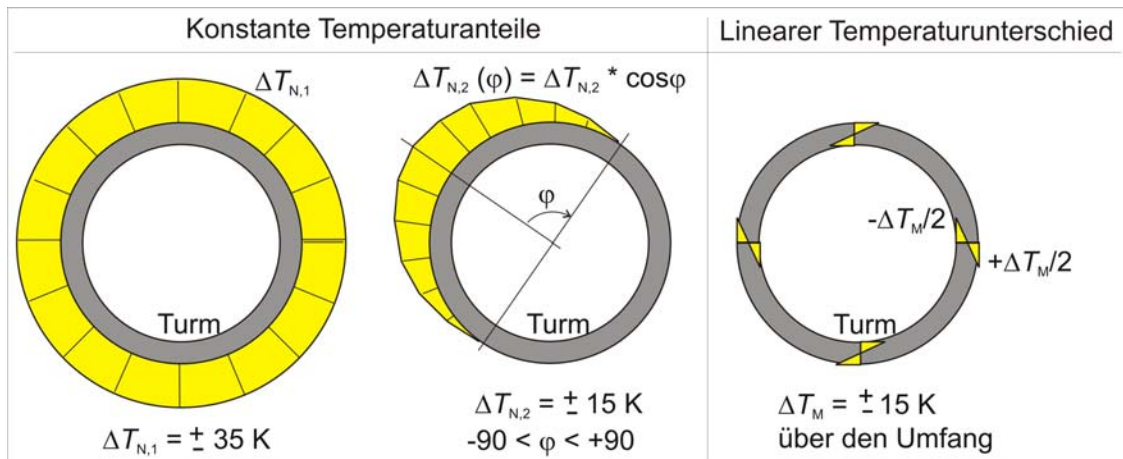


Bild 1: Darstellung der Temperaturanteile $\Delta T_{N,1}$, $\Delta T_{N,2}$ und ΔT_M

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 der Kombinationsbeiwert $\psi_{temp} = 0,6$ bzw. $\psi_{Betrieb} = 0,6$ anzusetzen.

Bei der Überlagerung sind die Temperaturanteile jeweils einzeln oder in Kombination nach Gl. 6.4 anzusetzen.

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \\ \end{array} \right. \begin{array}{l} \Delta T_{N,1} + \Delta T_{N,2} \\ \Delta T_M \\ (\Delta T_{N,1} + \Delta T_{N,2}) + 0,75 \Delta T_M \\ 0,35 (\Delta T_{N,1} + \Delta T_{N,2}) + \Delta T_M \end{array} \quad (6.5)$$

6.4.6 Eislasten

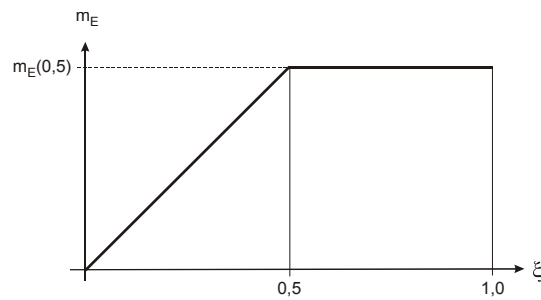
Bei stillstehenden Anlagen sind die Eislasten für alle der Witterung ausgesetzten Konstruktionsteile nach DIN 1055-5 zu ermitteln.

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 2 und Gleichung (6.5) zu berücksichtigen. Die Eismasse ist als an der Profilverderrkante des Rotorblattes wirkend anzunehmen.

$$m_E(0,5) = c_E(R) \cdot g(1+g) \cdot \rho_E \cdot t_w^2 \quad (6.5)$$

Dabei ist:

$$c_E(R) = 0,3 \cdot e^{-0,32R} + 0,00675 \quad (6.6)$$



ξ : dimensionslose Längenordinate auf dem Rotorblatt

Bild 2: Eisansatz an Rotorblättern bei Anlagen in Betrieb

7 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 Abschnitt 1.

Mit den entsprechend zugeordneten Gruppen der Einwirkungskombinationen sind die jeweils anzuwendenden Teilsicherheitsbeiwerte nach Tabelle 5a oder b 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) wird in Form eines turbulenten Extremwindmodells, basierend auf der mittleren Windgeschwindigkeit (50-Jahres-wind/1-Jahreswind). Für Anlagen nach DIN EN 61400-2 darf alternativ ein stationäres Extremwindmodell, basierend auf der Böenwindgeschwindigkeit (50 Jahresbö/1-Jahresbö) angewendet werden.

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit sind die Temperaturlastfälle nach Kapitel 6.4.5 mit dem charakteristischen Wert der Gruppe N (Tabelle 2: LF D.1) zu überlagern. Dabei ist der Kombinationsbeiwert $\psi_{temp} = 0,6$ entweder für die Windlasten oder für die Temperaturlasten anzusetzen.

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	<u>Hinweis:</u> Die angegebenen Lastfälle finden Anwendung für Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.	<u>Charakteristischer Wert:</u> Bemessungswert aller ausgewerteten Lastfälle (Auswertung gemäß DIN EN 61400-1)	N und T (ohne Erdbeben)
	D.2		<u>Häufige Einwirkungen:</u> Beanspruchungen mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von $p = 10^{-4}$ (entspricht 17,5 Stunden in 20 Jahren)	Die Auswertung umfasst alle Lastfälle Tabelle 3
	D.3		<u>Quasi-ständige Einwirkungen:</u> 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 6.4.6)	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	Gierfehler $\beta=0^\circ$	N ($\gamma_F=1.5$)

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
1. Produktionsbetrieb	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
2. Produktionsbetrieb mit Auftreten eines Fehlers	2.4	2.3	NTM $v_{in} \leq v_{hub} \leq v_{out}$	1. Überdrehzahl @ V_{rated} 1. Überdrehzahl @ V_{out}	7x pro Jahr 3x pro Jahr
			NTM $v_{in} \leq v_{hub} \leq v_{out}$	Betrieb mit extremen Gierfehler	24h pro Jahr
			NTM	Netzausfall	20x pro Jahr, Ansatz verschiedener Windgeschwindigkeiten entsprechend der Windgeschwindigkeitsverteilung
3. Start	3.1	3.1	NWP	Start @ V_{in} Start @ V_{rated} Start @ V_{out}	1000x pro Jahr 50x pro Jahr 50x pro Jahr
4. Stopp	4.1	4.1	NWP	Stop @ V_{in} Stop @ V_{rated} Stop @ V_{out}	1000x pro Jahr 50x pro Jahr 50x pro Jahr
6. Parken (Stillstand oder Leerlauf)	6.4	6.2	NTM $v_{hub} \leq 0,7 v_{b,0}$		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.

8 Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen

8.1 Allgemeines

Im Allgemeinen sind die Schnittgrößen zur Bemessung von Turm und Gründung durch eine gesamtdynamische Berechnung unter Berücksichtigung der Regelungen nach Abschnitt 8.2 zu ermitteln.

Im dauernden Betrieb ist ein ausreichender Abstand der Eigenfrequenzen $f_{0,n}$ des Turmes von den Erregerfrequenzen f_R bzw. $f_{R,m}$ entsprechend den Gleichungen (8.1) und (8.2) nachzuweisen.

$$\frac{f_R}{f_{0,1}} \leq 0,95 \quad (8.1)$$

$$\frac{f_{R,m}}{f_{0,n}} \leq 0,95 \quad \text{oder} \quad \frac{f_{R,m}}{f_{0,n}} \geq 1,05 \quad (8.2)$$

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 Gleichungen (8.1) und (8.2) nicht erfüllt sind, d.h., die im resonanznahen Bereich betrieben werden, ist eine betriebliche Schwingungsüberwachung durchzuführen.

8.2 Gesamtdynamische Berechnung

8.2.1 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 9.2 zu verfahren.

8.2.2 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 Nachstromverhalten (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:

- Steifigkeit infolge Rotation
- 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.

8.2.3 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 11.2.1) 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.

8.2.4 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.

Tabelle 4: Darstellung der Schnittgrößen für Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit bzw. Gebrauchstauglichkeit
(Bezeichnung der Koordinatenachsen siehe Bild 3)

Schnittstelle:											
Grenzzustand: Tragfähigkeit / Gebrauchstauglichkeit											
	DLC ^{*)}	$v(h)$ [m/s]	β °	F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]	M_x [kNm]	M_y [kNm]	M_z [kNm]	F_{res} [kNm]	M_{res} [kNm]
max F_x										
min F_x											
max F_y											
min F_y											
max F_z											
min F_z											
max M_x											
min M_x											
max M_y											
min M_y											
max M_z											
min M_z											
max F_{res}											
max M_{res}											

^{*)} Einwirkungskombination, siehe Abschnitt 7

Für den Nachweis gegen Festigkeits- und Stabilitätsversagen sowie für den Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit dürfen vereinfachend nur die Extremwerte der Schnittgrößen zusammen mit den übrigen zeitgleich

auftretenden Schnittgrößen für die betrachteten Querschnitte angegeben werden (siehe Tabelle 4).

Die Schnittgrößen für den Ermüdungssicherheitsnachweis dürfen in der Regel² vereinfacht in Form von Beanspruchungskollektiven, erforderlichenfalls mit den zugehörigen Mittelwerten angegeben werden (siehe Abschnitt 8.5.2).

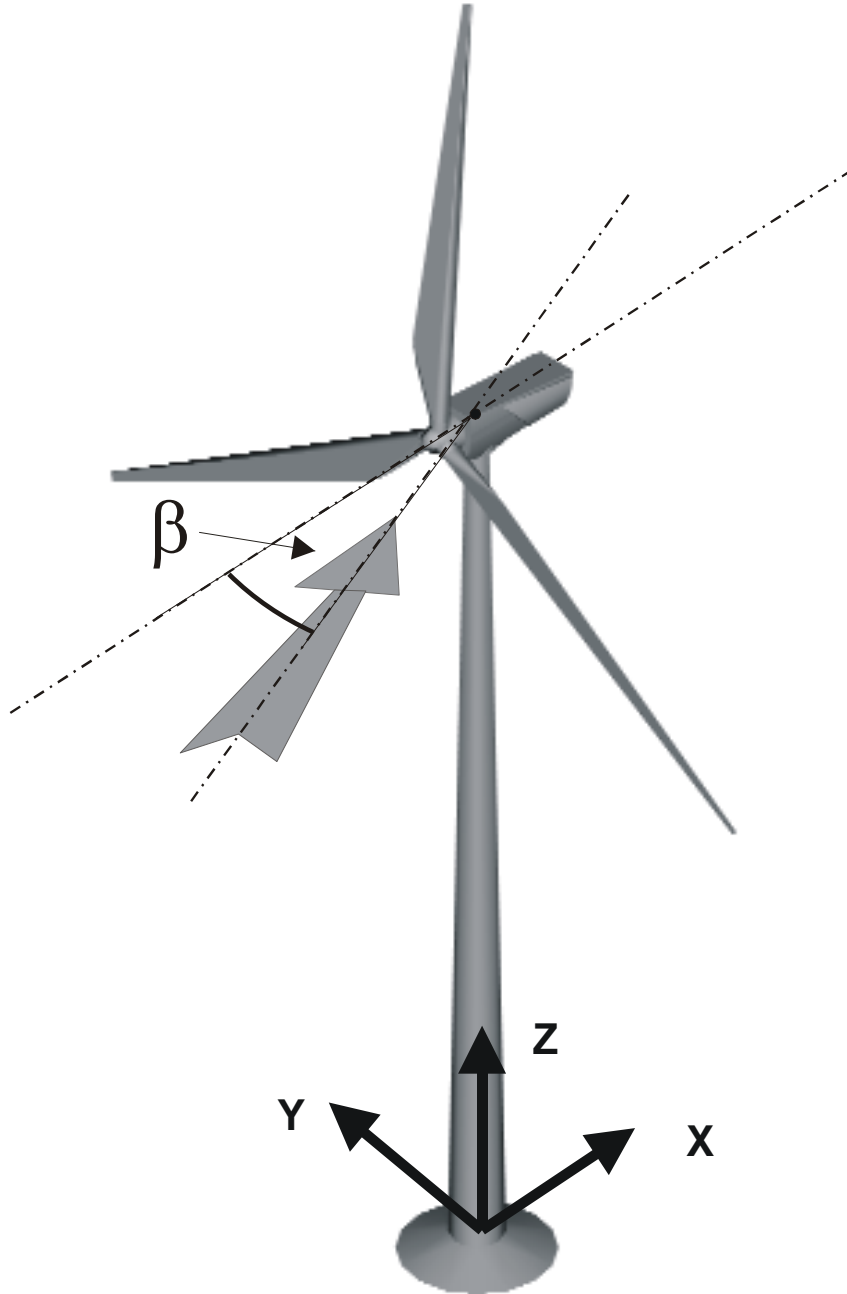


Bild 3: Koordinatensystem für den Turm

² Ausnahme siehe z.B. Abschnitt 12.1

8.3 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 entsprechend Absatz 8.6.1 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 8.4) nicht angesetzt werden.

8.4 Logarithmisches Dämpfungsdekrement

Die Gesamtdämpfung setzt sich aus den beiden Anteilen Strukturdämpfung und aerodynamischer Dämpfung zusammen (siehe jedoch 8.3). Das logarithmische Dekrement δ für die Gesamtdämpfung ergibt sich dabei zu

$$\delta = \delta_s + \delta_a \quad (8.3)$$

Dabei ist:

δ_s logarithmisches Dekrement der Strukturdämpfung

δ_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 δ_a darf zur Ermittlung von Einwirkungen aus Erdbeben nach der Modalmethode, soweit keine genauere Berechnung erfolgt, mit $\delta_a = 0,05$ angenommen werden.

8.5 Schnittgrößen für den Ermüdungssicherheitsnachweis

8.5.1 Anforderungen

Zur Ermittlung der Schnittgrößen für den Ermüdungssicherheitsnachweis sind die Einwirkungen nach DIN EN 61400-1 und Abschnitt 6, die Einflussparameter nach Abschnitt 8.2.2 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 2 anzunehmen
- Sofern der Betrieb unter Eislasten nicht sicher ausgeschlossen werden kann, sind an 7 Tagen pro Jahr bei Nennleistung Eislasten nach

Abschnitt 6.4.6 anzunehmen, wobei 1 Rotorblatt nicht vereist ist, die übrigen mit 50% der Eismasse nach Bild 2Bild 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.

8.5.2 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 8.5.1 zu ermitteln und ggf. durch Messungen nach IEC TS 61400-13 (ggf. Nachfolger) 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. F_x und M_y dürfen 90° phasenverschoben zu F_y und M_x angenommen werden.

9 Sicherheitskonzept

9.1 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.

9.2 Grenzzustände der Tragfähigkeit

Bei einer gesamtdynamischen Berechnung (nach Abschnitt 8.2) müssen die Einwirkungen mit $\gamma_F = 1,0$ angenommen werden. Ist eine Differenzierung einzelner Einwirkungsanteile in den Schnittgrößen nicht möglich, müssen die Tragsicherheitsnachweise mit γ_F -fachen Schnittgrößen geführt werden, wobei der größte Teilsicherheitsbeiwert der jeweiligen Gruppe der Einwirkungskombinationen nach Tabelle 5a oder 5b anzusetzen ist.

Tabelle 5a: Teilsicherheitsbeiwerte γ_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 *)	1,1	1,25
günstig	1,0	1,0	1,0
Vorspannung **	1,0	1,0	1,0
Windlasten	1,35 ***)	1,1	1,5
Funktionskräfte	1,35	1,1	1,5
Wärmeeinwirkung	1,35	-	-
Erdbeben	-	1,0	-

*) 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.

** mögliche Streuungen der Vorspannung sind im Grenzzustand der Tragfähigkeit sowie im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und Ermüdung nach EC2, 5.10.8 bzw. 5.10.9 zu berücksichtigen. Im Grenzzustand der Ermüdung ist $\gamma_F = 1,0$ und der jeweils maßgebende Wert γ_{inf} , γ_{sup} anzusetzen.

***) 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 5b: Teilsicherheitsbeiwerte γ_F der Einwirkungen für Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit bei Nachweis nach DIN EN 61400-1:2011

Einwirkung	Ungünstige Lasten			Günstige ¹⁾ Lasten
	Art des Auslegungszustandes (siehe Tabelle 3)			
	Normal (N)	Anormal (A)	Transport und Er- richtung (T)	Alle Ausle- gungszu- stände
Trägheits- und Gravitationslasten, Windlasten, Funktionskräfte	1,35 ^{*)} , ***)	1,1	1,5	0,9
Vorspannung **)	1,0	1,0	1,0	0,9
Wärmeeinwirkung	1,35	--	--	0,9
	--	1,0	--	1,0

*) 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

<p>Teilsicherheitsbeiwert für die kombinierte Beanspruchung von Gravitation und anderen Einflüssen wie folgt angenommen werden:</p> $\gamma = 1,1 + \varphi \zeta^2$ $\varphi = \begin{cases} 0,15 & \text{für DLC1.1} \\ 0,25 & \text{sonst} \end{cases} \quad (9.1)$ $\zeta = \begin{cases} 1 - \frac{ F_{\text{gravity}} }{ F_k }; & F_{\text{gravity}} \leq F_k \\ 1; & F_{\text{gravity}} > F_k \end{cases}$	
1)	<p>Vorspannung und Gravitationslasten, die die Gesamtbeanspruchung erheblich verringern, sind günstige Lasten. Im Falle günstiger und ungünstiger Lasten wird Gleichung (9.1):</p> $\zeta = \begin{cases} 1 - \frac{ F_{\text{gravity}} }{ F_k }; & F_{\text{gravity}} \leq F_k \\ 1; & F_{\text{gravity}} > F_k \end{cases}$
**)	<p>mögliche Streuungen der Vorspannung sind im Grenzzustand der Tragfähigkeit sowie im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und Ermüdung nach EC2, 5.10.8 bzw. 5.10.9 zu berücksichtigen. Im Grenzzustand der Ermüdung ist $\gamma_F = 1,0$ und der jeweils maßgebende Wert r_{inf}, r_{sup} anzusetzen.</p>
***)	<p>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.</p>

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 gesamtdynamischen 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 10.1.2
- Stabilitätsversagen nach Abschnitt 10.1.3
- Ermüdung nach Abschnitt 10.1.4

9.3 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 10.2.3
- Spannungsbegrenzung nach Abschnitt 10.2.4
- Rissbreitenbegrenzung nach Abschnitt 10.2.5

10 Nachweise für den Turm

10.1 Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit

10.1.1 Teilsicherheitsbeiwerte

Die Widerstände sind unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte γ_M nach den relevanten Regelwerken (siehe Abschnitt 4) zu ermitteln. Bezüglich der Teilsicherheitsbeiwerte γ_M beim Nachweis gegen Ermüdung siehe Abschnitt 10.1.4.

10.1.2 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 6.4.5.

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

In zylindrischen und konischen Stahlrohtürmen 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. An Übergängen mit unterschiedlicher Konizität sind die aus Kraftumlenkung entstehenden lokalen Umfangsmembrankräfte und Schalenbiegemomente zu berücksichtigen. Für öffnungsgeschwächte Turmbereiche ist Abschnitt 12.2 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.

10.1.3 Stabilitätsversagen

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

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

10.1.4 Ermüdungsversagen von Stahlkonstruktionen

Die Nachweise sind mit den Einwirkungskombinationen der Gruppe F nach Tabelle 2 zu führen.

Bei Turmkonstruktionen aus Stahl richtet sich der Nachweis nach DIN EN 1993-1-9. Dabei wird eine regelmäßige Wartung und die Wiederkehrende Prüfung nach Abschnitt 14 vorausgesetzt. Der anzusetzende Teilsicherheitsbeiwert ist Tabelle 6 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 4)

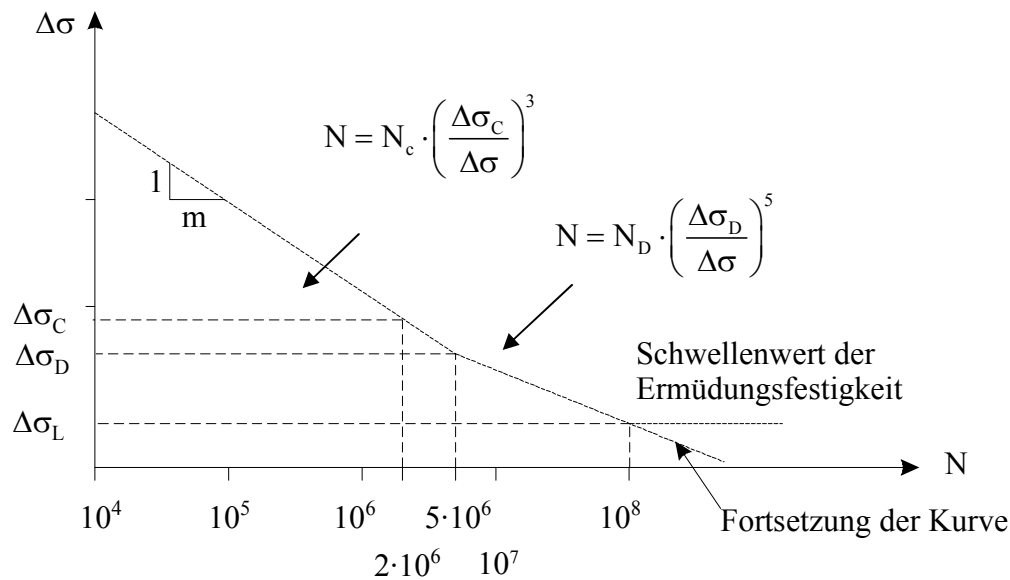


Bild 4: Ermüdungsfestigkeit für Stahl (Wöhlerlinie)

Tabelle 6: Teilsicherheitsbeiwert γ_M für Nachweise gegen Ermüdung bei Türmen aus Stahl

Inspizierbar	γ_M	
	Schadenstolerante Bauteile	Nicht-schadenstolerante Bauteile
Ja	1,0	1,15
nein	1,15	1,25

Anmerkung: Bei Windenergieanlagen sind in der Regel ausschließlich 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 14).

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 durch experimentelle Untersuchungen zu begründen.

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

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

- Für das Mantelblech (Kerbstelle 1 in Bild 5) ist die Kerbfallklasse gemäß DIN EN 1993-1-9 Tabelle 8.5 Detail 1 zu verwenden.
- Für den T-Flansch (Kerbstelle 2 in Bild 5) ist der konservative Ansatz einer Kerbfallklasse 90 mit Blechdickenabminderung $k_s = (25/t_f)^{0,2}$ 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.

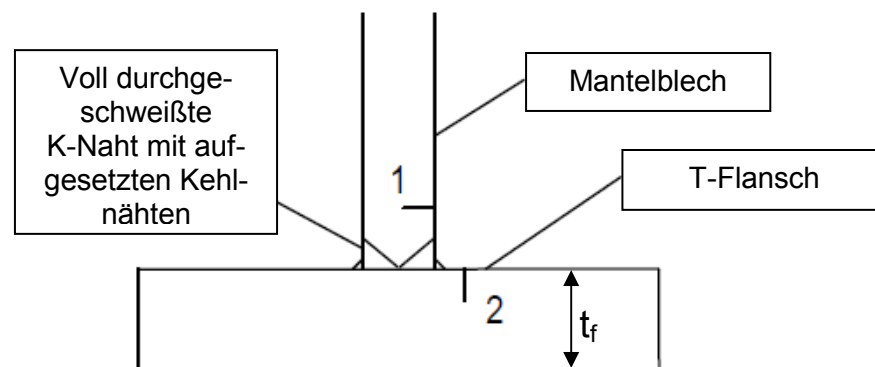


Bild 5: Nachweisstellen für das Detail "T-Flansch/Mantelblech"

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

10.1.5 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:

$$D_{Ed} = \sum [n(\Delta\sigma_i) / N(\Delta\sigma_i)] < 1,0 \quad (10.1)$$

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, 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, 3.1.4 zu berücksichtigen.

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

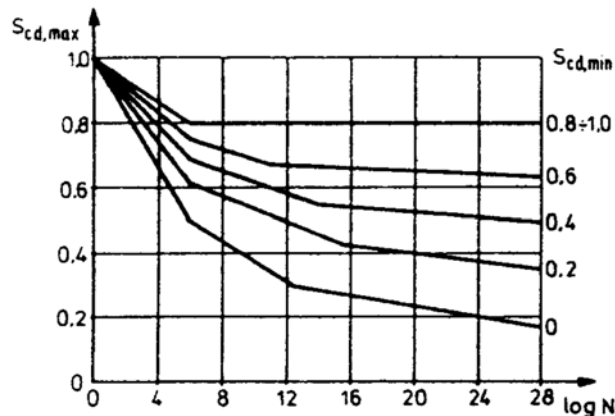


Bild 6: Wöhlerlinien des Betons unter Druckbeanspruchung

Der Wöhlerlinie nach Bild 6 liegen die folgenden Gleichungen³ zugrunde:

Für $0 < S_{cd,min} < 0,8$

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

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

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

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

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

wenn $\log N_1 > 6$ und $\Delta S_{cd} < 0,3 - 3 S_{cd,min}/8$
dann $\log N = \log N_3$

mit

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

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

$$\Delta S_{cd} = S_{cd,max} - S_{cd,min}$$

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 Gleichung (10.1) eingehalten ist:

$$S_{cd,max} \leq 0,40 + 0,46 \cdot S_{cd,min} \quad (10.2)$$

³ 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)
η_c	Faktor zur Berücksichtigung der ungleichmäßigen Verteilung der Betondruckspannungen gemäß Heft 439, 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 ²
γ_c	Teilsicherheitsbeiwert für Beton
$\beta_{cc}(t)$	Koeffizient zur Berücksichtigung des zeitabhängigen Festigkeitsanstiegs des Betons. $\beta_{cc}(t)$ darf bei Anwendung der vereinfachten Gleichung (10.1) nicht größer als 1,0 angesetzt werden, entsprechend einer zyklischen Erstbelastung in einem Betonalter ≥ 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, Abschnitt 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.

10.2 Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit

10.2.1 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 anzuwenden.

10.2.2 Teilsicherheitsbeiwert

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

10.2.3 Verformungsbegrenzung

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

10.2.4 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, 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, 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.

10.2.5 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 6.4.5 anzusetzen.

11 Nachweise für die Gründung

11.1 Gründungskörper

11.1.1 Sicherheitskonzept

Für Nachweise von Bauteilen aus Stahlbeton und Spannbeton sowie für Bauteile aus Stahl ist das in den Abschnitten 9 und 10 beschriebene Sicherheitskonzept anzuwenden.

11.1.2 Stahleinbauteile

Stahleinbauteile sind nach Abschnitt 10.1.4 nachzuweisen.

11.1.3 Stahlbetonbauteile

Stahlbetonbauteile sind nach den Abschnitten 10.1 und 10.2 nachzuweisen. Die Nachweise gegen Ermüdung für den Beton, den Betonstahl, den Spannstahl und die Verbindungsmittel sind nach Abschnitt 10.1.5 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.

11.1.4 Bemessung von Pfählen

Die innere Tragfähigkeit von Gründungspfählen ist nach den Abschnitten 11.1.2 und 11.1.3 zu ermitteln. Der Nachweis der äußeren Pfahltragfähigkeit ist nach Abschnitt 11.2.4 zu führen.

11.2 Baugrund

11.2.1 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, Abschnitt 2.1 bzw. DIN 1054, Abschnitt A2.1.2 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“ Schubmoduln bzw. Steifemoduln 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

11.2.2 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, Absatz 2 zu berücksichtigen sind.

Die Beanspruchungen sind im Sinne von DIN 1054, Abschnitt 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 7 dieser Richtlinie entsprechend Tabelle 6 zuzuordnen.

Die Nachweise sind mit den ungünstigsten aller Einwirkungskombinationen zu führen.

Tabelle 7: 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

11.2.3 Flachgründungen

11.2.3.1 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 7 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 5a oder 5b dieser Richtlinie anzusetzen sind, d.h. für die ungünstig wirkenden Windlasten darf unter Beachtung der Fußnote in Tabelle 5a oder 5b 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 5a oder 5b ein Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_F = 1,35$ für Einwirkungskombinationen der Bemessungssituationen BS-P angesetzt werden.

11.2.3.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Infolge der aus den Einwirkungen der Bemessungssituationen BS-P und BS-T nach Tabelle 7 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.

11.2.4 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 7 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 5a 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.

12 Konstruktionsdetails

12.1 Ringflanschverbindungen bei stählernen Türmen

Ringflanschverbindungen müssen nach DIN EN 1993-1-8 kontrolliert vorgespannt werden. Die Vorspannkraft ist auf die Regelvorspannkraft nach DIN EN 1993-1-8/NA zu begrenzen.

Beim Tragsicherheitsnachweis der Flanschverbindungen gilt die Anmerkung in Absatz 10.1.2 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 Petersen⁴ (VZ A und B) sowie nach Seidel⁵ (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 7) nach Schmidt/Neuper⁶ 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 α_S der Flanschaußenflächen (siehe Bild 9) darf nach dem Vorspannen den Grenzwert 2% nicht übersteigen.

⁴ Petersen, C. Stahlbau, 3.Auflage Braunschweig: Wiesbaden: Vieweg 1997

⁵ Seidel, M.: „Zur Bemessung geschraubter Ringflanschverbindungen von Windenergieanlagen“, Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover (Heft 20) Aachen: Shaker Verlag, 2001

⁶ 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

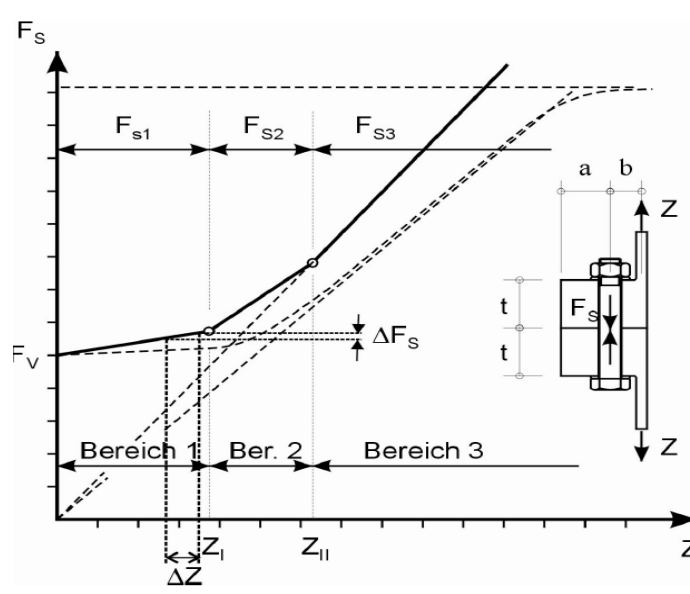


Bild 7: Schraubenkraftfunktionen vorgespannter Ringflanschverbindungen nach Schmidt/Neuper

Anmerkung 1: Größere Neigungen α_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 zu kontrollieren und ggf. Nachzuspannen. Dem Ermüdungssicherheitsnachweis ist die nichtlineare Schraubenkraftfunktion $F_s = f(Z)$ zugrunde zu legen, aus der für vorgegebene Schwingbreiten ΔZ der Turmmantelkraft die ermüdungsrelevante Schwingbreite ΔF_s der Schraubenkraft abgelesen wird (siehe Bild 7).

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 8

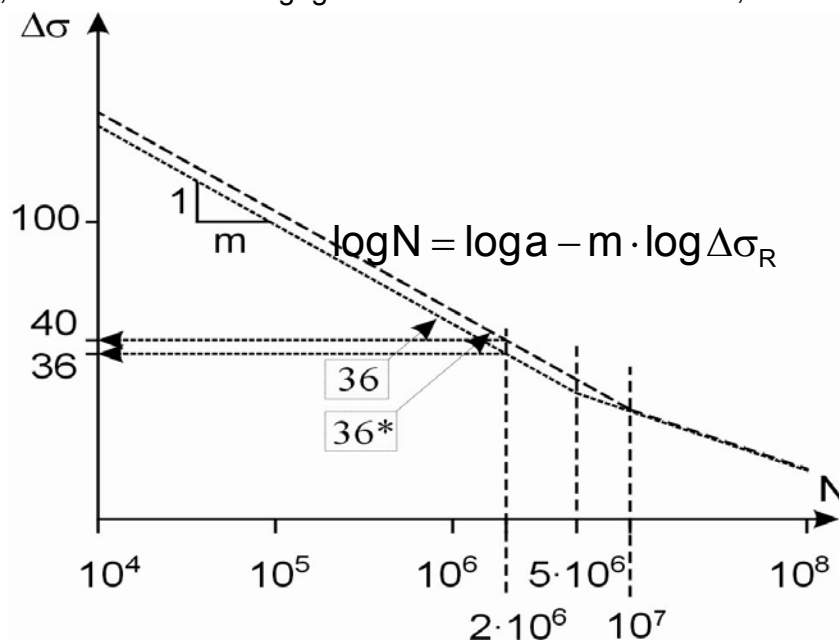


Bild 8: Kerbfallklassen für Schrauben

Bei Nichteinhalten der in den Ausführungsunterlagen angegebenen Grenzwerte für die Flanschklaffungen sind geeignete Maßnahmen zu ergreifen, z.B. Ausfüttern der

schädigungsrelevanten Klaffungshohlräume vor dem Vorspannen. Wird der Grenzwert für die Neigung α_s nach dem Vorspannen überschritten, so sind anstelle der normalen Unterlegscheiben geeignete Keilscheiben ausreichender Härte einzubauen.

Anmerkung 3: Schädigungsrelevant für die Ermüdungsbeanspruchung der Schrauben sind alle Flanschklaffungen k im Bereich der Turmwand (siehe Bild 9), 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 .

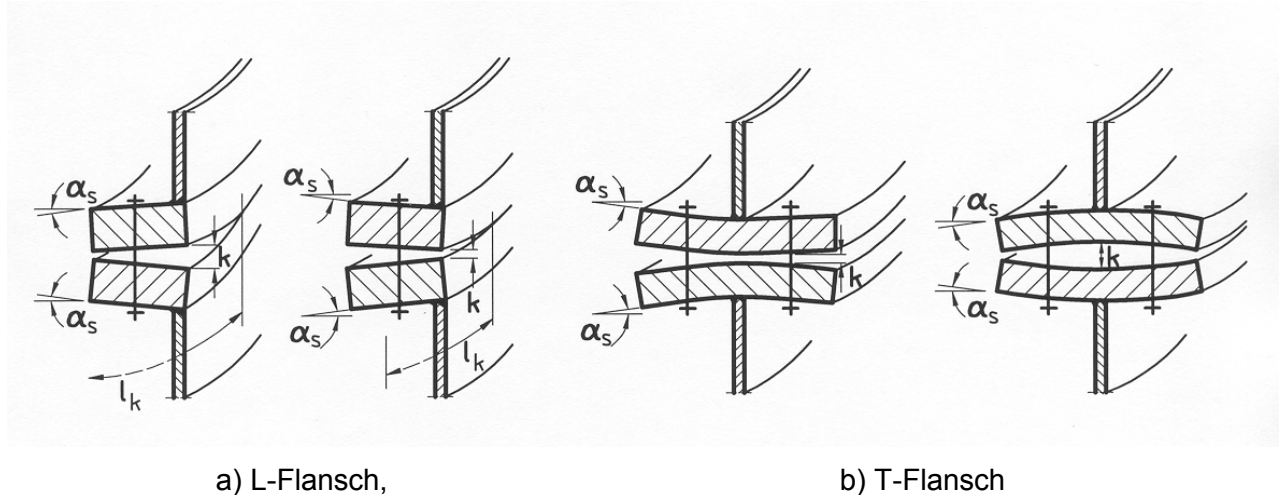


Bild 9: Ringflanschverbindungen in stählernen Türmen

12.2 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 $2(r \cdot t)^{0,5}$ angesetzt werden.

Im Bereich umlaufend randversteifter Öffnungen ohne vorgebundene Längssteifen ("Kragensteifen", siehe Bild 10 a) darf der Beulsicherheitsnachweis vereinfacht wie für eine ungeschwächte Turmwand geführt werden, wenn anstelle der Bemessungsbeulspannungen nach EN 1993-1-6 die reduzierte Bemessungsbeulspannung nach Gleichung (12.1) verwendet wird:

$$\sigma_{x,R,d} = C_1 \cdot \sigma_{x,Rd_{EC}} \quad (12.1)$$

Dabei ist:

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

C_1 Reduktionsfaktor gemäß Gleichung (12.2) zur Erfassung des Öffnungseinflusses.

$$C_1 = A_1 - B_1 \cdot (r/t) \quad (12.2)$$

mit A_1 und B_1 nach Tabelle 8

Tabelle 8: Beiwerte für Gleichung (12.2)

Festigkeitsklasse	S 235		S 355	
	A_1	B_1	A_1	B_1
$\delta = 20^\circ$	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

δ 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 Öffnungsöffnungsfläche entspricht,

deren Querschnitt an den Öffnungslängsrändern mittig zur Wandmittelfläche angeordnet ist (siehe Bild 10b) und

deren Querschnittsteile die maximalen c/t -Verhältnisse nach DIN EN 1993-1-1, Tabelle 5.2 für die Querschnittsklassen 2 unterschreiten.

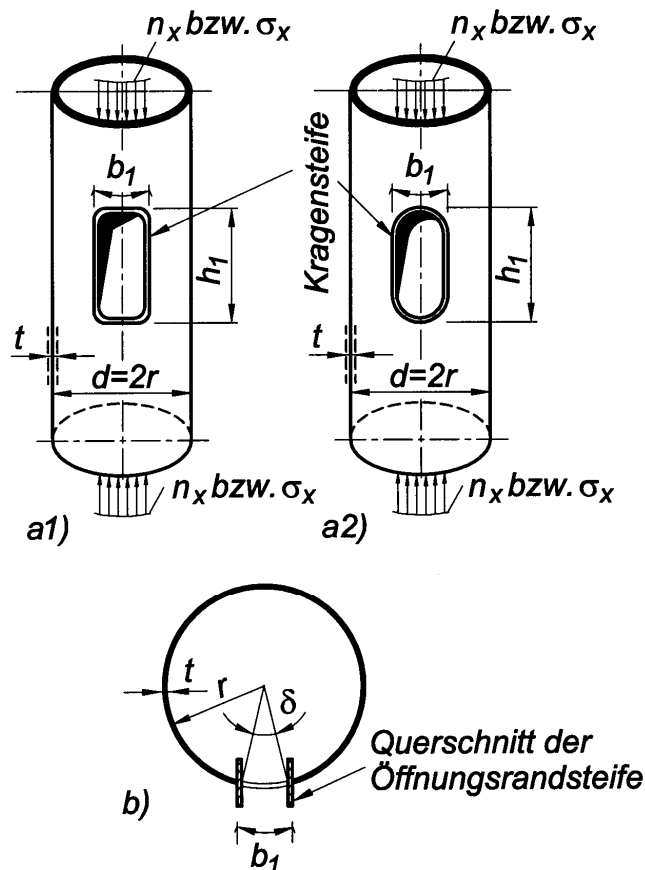


Bild 10: Öffnungen in der Wand von Stahlrohtürmen

12.3 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 10.1.2 und 10.1.4 zu führen. Bei Passverbindungen mit feuerverzinkten Bauteilen sind spezielle Korrosionsschutzmaßnahmen zu treffen.

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 (12.3) nicht überschreitet:

$$F_{s,Rd} = 0,9 \cdot \frac{\mu}{\gamma_{M,3}} \cdot F_{p,C^*} \quad (12.3)$$

Dabei ist:

F_{p,C^*}	<i>Regel</i> -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 1993-1-8:2005 Tabelle 3.7 oder durch Versuche nach Bezugsnormengruppe 7 in DIN EN 1993-1-8:2005 Abschnitt 1.2.7 (Verweis auf 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

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

ANMERKUNG: Durch diese Nachweise ist der Nachweis der Ermüdungssicherheit abgedeckt.

12.4 Stahlsortenauswahl

12.4.1 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).

WEA 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 σ_{Ed} ist als Nennspannung im maßgebenden Querschnitt und Tragwerksteil (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, siehe auch DIN EN 1993-1-10, Absatz 2.2. (4).

12.4.2 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 laut Bild 11); der Abstand vom Schweißnahtübergang einschließlich des Übergangsradius ($l + r$ laut Bild 11) 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} laut Bild 11) mit dem Spannungsniveau $\sigma_{Ed} = 0,25 \cdot f_y(t)$ zu bewerten. Dieser zusätzliche Nachweis darf für nahtlos hergestellte oder mit Abbrennstumpf-Verfahren geschweißte Ringflansche entfallen.

- Bei Ringflanschen ohne Ansatz die Dicke ($t_f = t_{ges}$ laut Bild 11) des Ringflansches.

12.4.3 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 (Blechdicke = Flanschhöhe t_f bzw. t_{ges} laut Bild 11) kann ein Vorschweißflansch hierbei nur dann günstig wirkend angesetzt werden, wenn der Abstand vom Schweißnahtübergang zum Auslauf des Übergangsradius (l laut Bild 11) dabei mindestens der halben anschließenden Blechdicke (b laut Bild 11) entspricht.

Bei aus Blechen hergestellten Flanschen, die längs zur Erzeugungsrichtung beansprucht werden (Blechdicke = Flanschbreite b_{ges} laut Bild 11), 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.

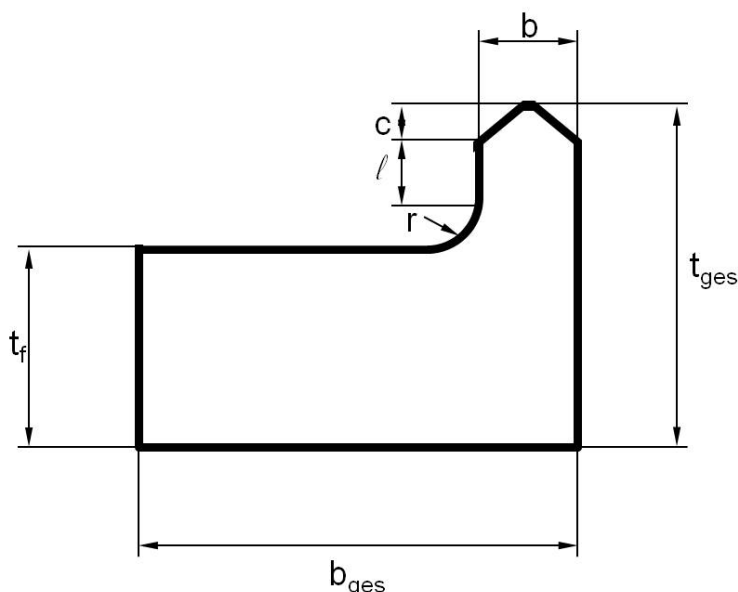


Bild 11: Flanschbezeichnungen am Bsp. eines L-Flansches

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 Blechdicke des anschließenden Bleches)
l	Abstand vom Übergangsradius zur Schweißnahtvorbereitung (= $t_{ges} - t_f - r - c$)

13 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).

14 Wiederkehrende Prüfungen

14.1 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.

14.2 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) und 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.

14.3 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

14.4 Maßnahmen

14.4.1 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.

14.4.2 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.

14.5 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.

15 Standorteignung von Windenergieanlagen

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

15.1 Bestehende Anlagen im Falle einer Parkerweiterung

Für bestehende Anlagen, die nach DIBt 1995 oder DIBt 2004 errichtet wurden, darf im Falle einer Windparkerweiterung der Nachweis der Standorteignung weiterhin nach DIBt 2004 geführt werden.

15.2 Neuanlagen

Für den Nachweis der Standorteignung von Windenergieanlagen in Windparks wird das folgende vereinfachte Verfahren empfohlen. Im Rahmen der Ermittlung der Standortbedingungen ist eine Standortbesichtigung durchzuführen sowie die "Mindeststandards zur Dokumentation von Gutachten zur Ermittlung der Umgebungsturbulenz"⁷ zu beachten.

- 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 (α)
 - iv. Mittlere Luftdichte (ρ)
 - v. Charakteristische Turbulenzintensität I_{15} (für 15 m/s)
 - vi. 50-Jahres-Windgeschwindigkeit ($v_{b,0}$) gemäß Windzonenkarten bzw. ermittelt z.B. nach Gumbel-Methode⁸, 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 14.2.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 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.

⁷ vom BWE-Windgutachterbeirat am 20.05.2009 beschlossene Fassung
<http://www.windenergie.de/sites/default/files/files/page/2011/windgutachterbeirat/mindeststandards-turbulenzgutachten-bwe-windgutachterbeirat.pdf>

⁸ 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

- ii. Vergleichende Bewertung der effektiven Turbulenzintensität nach DIN EN 61400-1:2006 zwischen v_{in} und v_{out}
- iii. Vergleich der 50-Jahres-Windgeschwindigkeit:
 - (1) Windzone gemäß Typen-/Einzelprüfung deckt die Windzone des betrachteten Standortes gemäß Windzonenkarte ab (die detaillierten Regelungen gemäß DIN EN 1991-1-4, Abschnitt 4.3.3 einschließlich NA für nicht ebene Geländelagen sind ggf. zu beachten) oder
 - (2) 50-Jahres-Windgeschwindigkeit gemäß Typen-/Einzelprüfung deckt die 50-Jahres-Windgeschwindigkeit am Standort ab (siehe 14.2.a.vi)
- c. Wird eine der Bedingungen nicht erfüllt, kann unter Berücksichtigung aller Angaben in 14.2.a. wie folgt verfahren werden:
 - i. Wenn die Bedingungen 14.2.b.i oder 14.2.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
 - ii. Wenn die Bedingung 14.2.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 vereinfachte Verfahren kann für alle Standorte angewendet werden, die als nicht komplex zu bezeichnen sind.

Alternativ kann das Verfahren gemäß DIN EN 61400-1:2006 angewendet werden.

16 Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

16.1 Anwendung der "Richtlinie für den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen"⁹

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.

9

Richtlinie für Windenergieanlagen, Teil: Weiterbetrieb von Windenergieanlagen, Germanischer Lloyd;
<http://www.gl-group.com/en/certification/renewables/CertificationGuidelines.php>

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

Abweichend von der Richtlinie gilt:

- Die praktische Methode durch zusätzliche statische Berechnungen unter Einbeziehung des derzeit geltenden Regelwerks zu belegen.
- Die analytische Methode muss durch zusätzliche repräsentative Probenahmen am Turm und eine Begutachtung der Gründung unterstützt werden.

16.2 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 45011 oder gleichwertig ist erforderlich.

17 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 1991-1-4:2010-12	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 1993-1-6:2010-12	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 1993-1-9:2011-12	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:200
DIN EN 1993-3-2	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/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

DIN EN 61400-1: 2006

Windenergieanlagen - Teil 1: Auslegungsanforderungen (IEC 61400-1:2005); Deutsche Fassung EN 61400-1:2005)