

**DIN EN 61400-5
(VDE 0127-5)**
DIN

Diese Norm ist zugleich eine **VDE-Bestimmung** im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.

VDE

ICS 27.180

Einsprüche bis 2019-05-29

Entwurf

**Windenergieanlagen –
Teil 5: Rotorblätter von Windenergieanlagen
(IEC 88/675/CDV:2018);
Deutsche und Englische Fassung prEN 61400-5:2018**

Wind energy generation systems –
Part 5: Wind turbine rotor blades
(IEC 88/675/CDV:2018);
German and English version prEN 61400-5:2018

Systèmes de génération d'énergie éolienne –
Partie 5: Pales d'éoliennes
(IEC 88/675/CDV:2018);
Version allemande et anglaise prEN 61400-5:2018

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2019-03-29 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 125 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist

Nationales Vorwort

Die Deutsche Fassung des europäischen Dokuments prEN 61400-5:2018 „Windenergieanlagen – Teil 5: Rotorblätter von Windenergieanlagen“ (Entwurf in der Umfrage) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden.

Die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dem entsprechend ist das internationale Dokument IEC 88/675/CDV:2018 „Wind energy generation systems – Part 5: Wind turbine rotor blades“ unverändert in den Entwurf prEN 61400-5:2018 übernommen worden.

Da die Deutsche Fassung noch nicht endgültig mit der Englischen und Französischen Fassung abgeglichen ist, ist die englische Originalfassung des IEC-CDV entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 88 „Wind energy generation systems“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet.

Bei der Abstimmung zu dem Europäischen Schluss-Entwurf bei CENELEC und dem Internationalen Schluss-Entwurf bei IEC [Final Draft International Standard (FDIS)] sind jeweils nur „JA/NEIN“-Entscheidungen möglich, wobei „NEIN“-Entscheidungen fundiert begründet werden müssen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium K 383 „Windenergieanlagen“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. IEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

**Windenergieanlagen –
Teil 5: Rotorblätter von Windenergieanlagen**

Inhalt

Seite

1	Anwendungsbereich.....	6
2	Normative Verweisungen	6
3	Begriffe	7
4	Bezeichnung.....	9
4.1	Symbole	9
4.2	Griechische Symbole	9
4.3	Indizes	9
4.4	Koordinatensysteme	10
5	Umgebungsbedingungen für die Auslegung.....	11
6	Auslegung	12
6.1	Prozess der Strukturauslegung.....	12
6.1.1	Allgemeine Anforderungen.....	12
6.1.2	Bausteinprinzip für die Strukturauslegung von Verbundwerkstoffen	12
6.1.3	Allgemeiner Prozess der Rotorblattauslegung.....	14
6.1.4	Auslegungslasten	19
6.1.4.1	Auslegungshüllkurve	19
6.1.4.2	Lastwechselwirkung	19
6.1.4.3	Lasteinhüllende	19
6.2	Kennwerte von Rotorblättern	20
6.2.1	Eigenschaften von Rotorblättern.....	20
6.2.2	Funktionsbedingte Auslegungstoleranzen	20
6.3	Aerodynamische Auslegung	21
6.3.1	Allgemeines.....	21
6.3.2	Aerodynamische Kennwerte	21
6.3.3	Beschreibung des Leistungsverhaltens (informativ)	22
6.3.4	Tragflächenschall (informativ).....	22
6.4	Anforderungen an Werkstoffe	22
6.4.1	Allgemeines.....	22
6.4.2	Werkstoffeigenschaften für die Auslegung von Rotorblättern.....	23
6.4.2.1	Beschreibung	23
6.4.2.2	Faserverstärkte Lamine	24
6.4.2.3	Strukturklebstoffe und Klebeverbindungen.....	25
6.4.2.4	Sandwichstrukturen	25
6.4.2.5	Metallische Strukturwerkstoffe	25
6.4.2.6	Oberflächenbearbeitung	26
6.4.2.7	Nichtstrukturelle Werkstoffe	26

6.4.3	Anerkennung von Werkstoffen für die Herstellung.....	26
6.5	Produktionsgerechte Entwicklung (Design for Manufacturing)	27
6.5.1	Allgemeines	27
6.5.2	Anforderungen an Fertigungstoleranzen.....	27
6.6	Strukturauslegung	28
6.6.1	Allgemeiner Auslegungsansatz	28
6.6.2	Strukturanalyse.....	29
6.6.2.1	Tragfähigkeitsnachweis.....	29
6.6.2.2	Betriebsfestigkeitsnachweis	29
6.6.2.3	Stabilitätsnachweis	30
6.6.2.4	Nachweis kritischer Verformungen	30
6.6.3	Nachweisanforderungen	30
6.6.3.1	Auflösung des Modells	30
6.6.3.2	Validierung des globalen Modells durch Prüfung.....	31
6.6.3.3	Validierung von Nachweismodellen und -verfahren.....	31
6.6.3.4	Prüfungen auf Zwischenebenen	31
6.6.4	Teilsicherheitsbeiwerte für Werkstoffe	32
6.6.4.1	Definitionen	32
6.6.4.2	γ_{m0} - Basis-Werkstoffbeiwert.....	33
6.6.4.3	γ_{m1} - Beiwert für den umweltbedingten Abbau (irreversible Wirkungen)	33
6.6.4.4	γ_{m2} - Beiwert für Temperatureffekte (reversible Wirkungen)	33
6.6.4.5	γ_{m3} - Beiwert für herstellungsbedingte Effekte.....	33
6.6.4.6	γ_{m4} - Beiwert für die Berechnungsgenauigkeit und Validierung des Verfahrens	35
6.6.4.7	γ_{m5} - Beiwert für die Beschreibung der Last	36
6.6.5	Nachweis der Strukturauslegung	36
6.6.5.1	Anforderungen an den Nachweis.....	36
6.6.5.2	Tragfähigkeitsnachweis des Laminates	37
6.6.5.3	Betriebsfestigkeitsnachweis des Laminates.....	38
6.6.5.4	Zwischenfaserbruch	39
6.6.5.5	Tragfähigkeitsnachweis des Sandwichkerns	40
6.6.5.6	Globale statische Stabilität (globales Beulen).....	42
6.6.5.7	Nachweis der lokalen Stabilität (Beulen der Deckschicht).....	43
6.6.5.8	Nachweis der Tragfähigkeit von Klebeverbindungen.....	44
6.6.5.9	Nachweis der Betriebsfestigkeit von Klebeverbindungen	45
6.6.5.10	Mechanisch befestigte strukturelle Grenzflächen	47
6.6.5.11	Nichtstrukturelle Merkmale.....	48
6.6.6	Weitere Ausfallarten	49

6.6.6.1	Blitze	49
6.6.6.2	Erosion	49
6.6.6.3	Weitere Auswirkungen der Umwelt.....	49
7	Anforderungen an die Herstellung	50
7.1	Herstellungsprozess.....	50
7.2	Anforderungen an Betriebsstätten	50
7.2.1	Allgemeines.....	50
7.2.2	Ausrüstung der Betriebsstätten.....	51
7.2.3	Handhabung der Werkstoffe und Lagerungseinrichtungen	51
7.2.4	Werkzeuge und Betriebsmittel	52
7.2.4.1	Formen und Werkzeuge	52
7.2.4.2	Instandhaltung.....	52
7.2.4.3	Kalibrierung	52
7.2.5	Personal	53
7.2.5.1	Ausbildung und Qualifikation	53
7.2.5.2	Umgebung, Gesundheit und Sicherheit.....	53
7.3	Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme.....	54
7.4	Anforderungen an den Herstellungsprozess.....	54
7.4.1	Allgemeine Anforderungen an die Herstellung	54
7.4.2	Auftragen von Gelcoat auf die Form	54
7.4.3	Aufbauen des Laminates	55
7.4.3.1	Allgemeines.....	55
7.4.3.2	Verfestigung des Laminates	55
7.4.3.3	Auftragen und Härten von Harz	55
7.4.4	Klebprozess	56
7.4.4.1	Vorbereitung der Oberfläche.....	56
7.4.4.2	Auftragen des Klebstoffes	56
7.4.4.3	Qualitätssicherung	57
7.4.5	Härten.....	57
7.4.6	Entformung.....	57
7.4.7	Entgraten, Abtragen und Schleifen	57
7.4.8	Oberflächenbearbeitung.....	58
7.4.9	Abdichtung	58
7.4.10	Montageprozesse für Zusatzkomponenten.....	58
7.4.11	Masse und Auswuchtung	59
7.4.12	Herstellungs- und Montageprozesse außerhalb von kontrollierten Umgebungsbedingungen	59
7.5	Herstellung von naturfaserverstärkten Rotorblättern	59
7.6	Weitere Herstellungsprozesse	60

	Seite
7.7 Qualitätslenkungsprozess	60
7.7.1 Qualitätsplan für die Herstellung	60
7.7.2 Wareneingangskontrolle.....	60
7.7.3 Herstellungs- und Qualitätsunterlagen	61
7.7.4 Nichtkonformität.....	61
7.7.4.1 Bestimmung und Protokollierung von Nichtkonformitäten	61
7.7.4.2 Bewertung und Korrektur von Nichtkonformitäten	61
7.7.5 Herstellungsinterne Korrekturmaßnahmen	62
7.7.6 Endkontrolle der Herstellung und Konformitätsprüfung	62
7.7.7 Dokumentation	63
7.7.7.1 Kennzeichnung von Rotorblättern	63
7.7.7.2 Dokumentation für das Rotorblatt	63
7.8 Anforderungen an die Bewertung der Herstellung	63
8 Errichtung, Betrieb und Instandhaltung des Rotorblattes.....	64
8.1 Allgemeines	64
8.2 Transport, Handhabung und Errichtung	64
8.3 Instandhaltung	65
8.3.1 Allgemeines	65
8.3.2 Planmäßige Überprüfungen	65
Bilder	
Bild 1 – Sehnenkoordinatensystem (in Lot- bzw. Sehnenrichtung).....	10
Bild 2 – Rotorkoordinatensystem (in Schlag- bzw. Schwenkrichtung)	11
Bild 3 – Bausteinprinzip	13
Bild 4 – Typischer Prozess der Auslegung und analytische Bewertung eines Rotorblattes	16
Bild 5 – Anwendung der Grenzzustandsanalyse für den Nachweis von Rotorblättern	18

Einleitung

Die Rotorblätter einer Windenergieanlage (WEA) werden im Allgemeinen als die kritischsten Bauteile des Systems angesehen. In der vorliegenden Norm werden die Mindestanforderungen für die Auslegung und Herstellung von WEA-Rotorblättern festgelegt.

Ein Ansatz für den Auslegungsprozess von Rotorblättern besteht in der Festlegung von allgemeinen Kennwerten von Rotorblättern, der aerodynamischen Auslegung, der Anforderungen an Werkstoffe und der Strukturauslegung. Darüber hinaus sind in der vorliegenden Norm Erfordernisse für die Herstellungsplanung enthalten, damit die Konstruktion des Rotorblattes wirkungsvoll in die Produktionsumgebung überführt werden kann.

Die Anforderungen an die Strukturauslegung von WEA-Rotorblättern wurden in einer Weise aufgestellt, dass Innovation, Validierung, Qualität und Prüfung besonders gefördert werden. Konkret heißt das, dass Konstrukteure unter anderem durch eine sorgfältige Validierung der Modelle und die Verknüpfung mit Prüfergebnissen geringere Teilsicherheitsbeiwerte beanspruchen können.

Die in der vorliegenden Norm enthaltenen Herstellungsanforderungen stellen die Mindestvoraussetzungen für ein Qualitätsmanagementsystem und die Bedingungen in den Betriebsstätten zur Einrichtung einer Produktionsumgebung, in der die Herstellung eines Rotorblattes in Übereinstimmung mit der Auslegung möglich ist, sicher. Darüber hinaus sind am Ende dieses Dokumentes Anforderungen an die Handhabung, den Betrieb und die Instandhaltung von Rotorblättern beschrieben.

Die Anforderungen dieser Norm dürfen geändert werden, wenn angemessen nachgewiesen werden kann, dass die Sicherheit der Windenergieanlage nicht beeinträchtigt wird.

1 Anwendungsbereich

Der vorliegende Teil von IEC 61400 legt die Anforderungen zur Sicherstellung der technischen Integrität von Rotorblättern von Windenergieanlagen (WEA) sowie ein angemessenes Betriebssicherheitsniveau während der Auslegungslbensdauer fest. Es sind Anforderungen enthalten für:

- die aerodynamische Auslegung und die Strukturauslegung;
- die Werkstoffauswahl, -bewertung und -prüfung;
- die Herstellung (einschließlich des zugehörigen Qualitätsmanagements);
- Transport, Errichtung, Betrieb und Instandhaltung der Rotorblätter.

Der Zweck dieser Norm ist die Bereitstellung technischer Quellen für Konstrukteure, Hersteller, Kunden, Betreiber, Drittorganisationen und Werkstofflieferanten sowie die Festlegung von Anforderungen für die Zertifizierung.

Für die Zertifizierung stellt diese Norm die ausführliche Grundlage für die Erfüllung der aktuellen Anforderungen von IEC 61400-22 und gegebenenfalls des IECRE-Systems sowie anderer IEC-Normen, die für WEA-Rotorblätter gelten, zur Verfügung. Für den Zweck der Zertifizierung sollte die Gültigkeit des jeweiligen Teils des vorliegenden Dokumentes nach dem Umfang der Zertifizierung und den zugehörigen Zertifizierungsmodulen nach IEC 61400-22 und/oder dem IECRE-System bestimmt werden.

Das Rotorblatt ist definiert als alle Komponenten, die zur Struktur des Rotorblattes gehören, ohne lösbare Schrauben im Verbindungselement zur Blattwurzel und tragende Strukturen für die Anlage.

Diese Norm ist zur Anwendung für Rotorblätter aller Windenergieanlagen vorgesehen. Für Rotorblätter kleiner Windenergieanlagen nach IEC 61400-2 dürfen stattdessen die Anforderungen des genannten Dokumentes (IEC 61400-2) angewendet werden.

Zum Zeitpunkt der Erarbeitung dieser Norm wurden die meisten Rotorblätter für Horizontalachs-Windturbinen hergestellt. Die Rotorblätter werden größtenteils aus faserverstärktem Kunststoff gefertigt. Die meisten in der vorliegenden Norm angegebenen Grundsätze sind jedoch für jeden Rotorblattaufbau, für jede Größe und jeden Werkstoff anwendbar.

Diese Norm sollte gemeinsam mit den entsprechenden in Abschnitt 2 angegebenen IEC- und ISO-Normen angewendet werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden normativen Dokumente enthalten Festlegungen, die durch Verweisung in diesem Text Bestandteil dieser Norm sind. Bei datierten Verweisungen gelten spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nicht. Anwender dieser Norm werden jedoch gebeten, die Möglichkeit zu prüfen, die jeweils neuesten Ausgaben der nachfolgend angegebenen normativen Dokumente anzuwenden. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen normativen Dokuments. Mitglieder von ISO und IEC führen Verzeichnisse der gültigen Internationalen Normen.

IEC 60050-415, Edition 1, 1999, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 415: Wind turbine generator systems*

IEC 61400-1, Edition 3.1 konsol. mit Am1, 2014, *Wind turbines – Part 1: Design requirements*

IEC 61400-2, Edition 3, 2013, *Wind turbines – Part 2: Small wind turbines*

IEC 61400-3, Edition 1, 2009, *Wind turbines – Part 3: Design requirements for offshore wind turbines*

IEC 61400-22, Edition 1, 2010, *Wind turbines – Part 22: Conformity testing and certification*

IEC 61400-23, Edition 1, 2014, *Wind turbines – Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades*

IEC 61400-24, Edition 1, 2010, *Wind turbines – Part 24: Lightning protection*

ISO 10474:2013, *Steel and steel products – Inspection documents*

ISO/IEC 17021:2011, *Conformity assessment – Requirements for bodies providing audit and certification of management systems*

ISO 2394: 2015, *General principles on reliability for structures*

ISO 9000:2005, *Quality management systems – Fundamentals and vocabulary*

ISO 9001:2008, *Quality management systems – Requirements*

EN 10204:2004, *Metallische Erzeugnisse – Arten von Prüfbescheinigungen*

ISO 16269-6, *Statistical interpretation of data – Part 6: Determination of statistical tolerance intervals*

3 Begriffe

Für die Anwendung der vorliegenden Norm gelten die für Windenergieanlagen oder Windenergie zutreffenden Begriffe nach IEC 60050-415. Außerdem gelten speziell für dieses Dokument die folgenden Begriffe.

3.1

Blattwurzel

Teil des Rotorblattes, der mit der Rotornabe/dem Rotorblattlager verbunden ist

3.2

Teilsystem des Rotorblattes

integrierte Konstruktionselemente, die einen festgelegten Zweck oder eine festgelegte Funktion innerhalb des Rotorblattes erfüllen (z. B. Blitzschutzanlage, aerodynamisches Bremssystem, Überwachungssystem, aerodynamisches Steuerungssystem usw.)

3.3

Beulen

Instabilität, die durch einen nichtlinearen Anstieg der Auslenkung aus der Ebene bei einer Änderung der örtlichen Druckkraft gekennzeichnet ist

3.4

charakteristischer Wert

Wert, der mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit nicht erreicht wird (d. h. eine Überschreitungswahrscheinlichkeit, die kleiner oder gleich einem vorgegebenen Wert ist)

3.5

Profilsehne

Länge einer Bezugsgerade, die über die Spannweite des Rotorblattes die Vorderkante und die Hinterkante des aerodynamischen Profilquerschnittes verbindet

3.6

Kriechen

zeitabhängige Vergrößerung der Dehnung bei einer gleichbleibenden Last

3.7

Auslegungsgrenzwerte

für die Auslegung verwendete Höchst- oder Mindestwerte

3.8

Auslegungslasten

Lasten, denen das Rotorblatt gemäß seiner Auslegung standhalten muss, einschließlich zu berücksichtigender Teilsicherheitsbeiwerte

3.9

Sehnenrichtung

Richtung, die parallel zur örtlichen Profilsehne liegt

3.10

Umweltbedingungen

Umweltparameter (Wind, Höhenlage, Temperatur, Luftfeuchte usw.), die das Betriebsverhalten des WEA-Rotorblattes beeinflussen können

3.11

Schlagrichtung

Richtung, die senkrecht zur überstrichenen Fläche der nicht verformten Achse des Rotorblattes liegt

3.12

Lotrichtung

Richtung, die senkrecht zur örtlichen Profilsehne und zur Längsachse des Rotorblattes liegt

3.13

nach innen gerichtet

zur Rotorblattwurzel hin gerichtet

3.14

Schwenkrichtung

Richtung, die parallel zur Ebene der überstrichenen Fläche und senkrecht zur Längsachse des nicht verformten Rotorblattes liegt

3.15

Grenzzustand

Zustand einer Struktur und der auf sie einwirkenden Belastungen, bei deren Überschreitung die Struktur nicht mehr den Auslegungsanforderungen entspricht

3.16

Lasteinhüllende

Zusammenfassung der größten Auslegungslasten in allen Richtungen und an allen Punkten der Blattlängsachse

3.17

Eigenfrequenz

Frequenz, bei der eine Struktur schwingt, wenn sie erregt wird und eine freie Schwingung möglich ist

3.18

Teilsicherheitsbeiwerte

Faktoren, die auf Lasten und Werkstofffestigkeiten aufgeschlagen werden, um Unsicherheiten in den repräsentativen (charakteristischen) Werten auszugleichen

3.19

Vorformung

Krümmung des Rotorblattes in der Ebene der Schlagrichtung ohne Belastung

3.20

Längsrichtung

Richtung parallel zur Längsachse eines Rotorblattes

3.21

Steifigkeit

Verhältnis der Änderung der Kraft zur entsprechenden Änderung der Verformung eines elastischen Körpers

3.22

Dehnung

Verhältnis der Längenänderung (oder der Schubverformung) eines Werkstoffes, der einer Spannung ausgesetzt ist, zur ursprünglichen Länge des Werkstoffes

3.23

Pfeilung

Krümmung des Rotorblattes in der Ebene der Schwenkrichtung ohne Belastung

3.24

Verwindung

Änderung des Winkels der Profilsehn des Rotorblattquerschnittes in Längsrichtung

3.25

CTQ (en: critical to quality)

qualitätskritische Merkmale – definieren Prozess- oder Auslegungswerte, die messbar sind und kritische Annahmekriterien für einen bestimmten Prozess oder eine bestimmte Komponente festlegen

4 Bezeichnung

4.1 Symbole

F	Last
F_d	Auslegungswert für die Last
F_k	charakteristischer Wert für die Last
R	Widerstand von Werkstoff oder Struktur beim entsprechenden Grenzzustand
R_k	charakteristischer Werkstoffwiderstand
PSF	Teilsicherheitsbeiwert (en: Partial Safety Factor)
$S()$	Funktion für die Strukturantwort auf die Last
T_g	Glasübergangstemperatur
$p_{\perp } (-)$	negativer Neigungsparameter nach Puck
$p_{\perp } (+)$	positiver Neigungsparameter nach Puck

4.2 Griechische Symbole

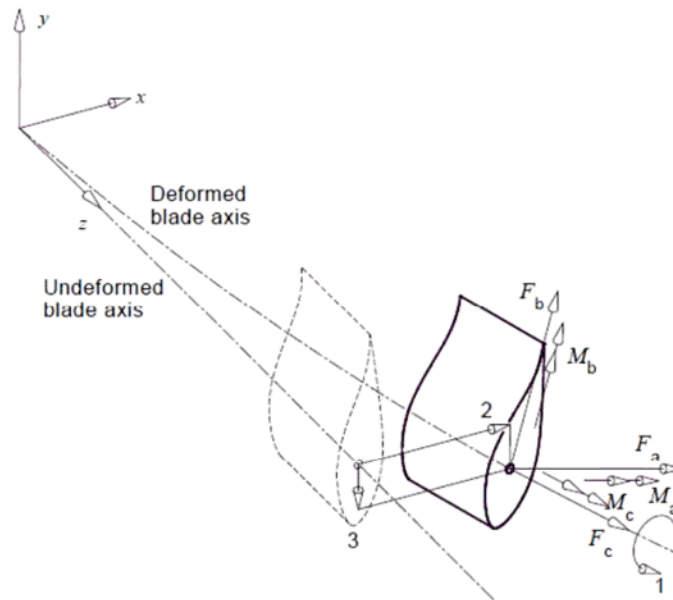
γ	Teilsicherheitsbeiwert
----------	------------------------

4.3 Indizes

m	Werkstoffe
m0	„Basis“-Werkstoffbeiwerte (in alle Nachweise einzubeziehen)
m1	Werkstoffbeiwerte für den umweltbedingten Abbau (irreversible Wirkungen)
m2	Werkstoffbeiwerte für Temperatureffekte (reversible Wirkungen)
m3	Werkstoffbeiwerte für herstellungsbedingte Effekte
m4	Werkstoffbeiwerte für die Berechnungsgenauigkeit und Validierung des Verfahrens
m5	Werkstoffbeiwerte für die Beschreibung der Last
n	Folgen des Versagens

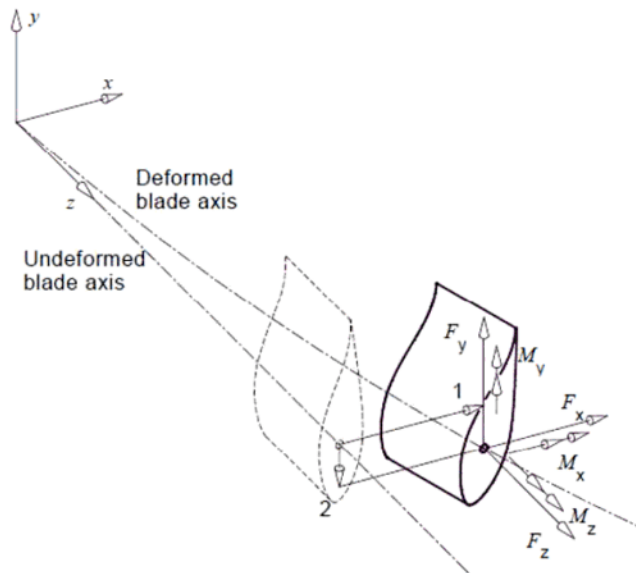
f Beiwert für Lasten

4.4 Koordinatensysteme



Deformed blade axis	verformte Rotorblattachse
Undeformed blade axis	nicht verformte Rotorblattachse
Loads are along and perpendicular to the local blade chord directions	Die Lasten liegen entlang und senkrecht zur örtlichen Profilsehne des Rotorblattes an.
M_a Edgewise bending moment	M_a Biegemoment parallel zur Profilsehne
M_b Flatwise bending moment	M_b Biegemoment senkrecht zur Profilsehne
M_c Torsion moment	M_c Torsionsmoment
F_a Flatwise shear force	F_a Querkraft senkrecht zur Profilsehne
F_b Edgewise shear force	F_b Querkraft parallel zur Profilsehne
F_c Axial force	F_c Axialkraft
1 Torsion angle	1 Torsionswinkel
2 Flapwise translation	2 Translationsbewegung in Schlagrichtung
3 Lead-lag translation	3 Translationsbewegung in Schwenkrichtung

Bild 1 – Sehnenkoordinatensystem (in Lot- bzw. Sehnenrichtung)



Deformed blade axis	verformte Rotorblattachse
Undeformed blade axis	nicht verformte Rotorblattachse
Loads are along the rotor plane reference directions	Die Lasten liegen entlang der Bezugsrichtung der Rotorblattebene an.
M_x Lead-lag bending moment	M_x Biegemoment in Schwenkrichtung
M_y Flapwise bending moment	M_y Biegemoment in Schlagrichtung
M_z Torsion moment	M_z Torsionsmoment
F_x Flapwise shear force	F_x Querkraft in Schlagrichtung
F_y Lead-lag shear force	F_y Querkraft in Schwenkrichtung
F_z Spanwise force	F_z Kraft in Richtung der Blattlängsachse
1 Flapwise translation	1 Translationsbewegung in Schlagrichtung
2 Lead-lag translation	2 Translationsbewegung in Schwenkrichtung

Bild 2 – Rotorkoordinatensystem (in Schlag- bzw. Schwenkrichtung)

5 Umgebungsbedingungen für die Auslegung

WEA-Rotorblätter sind Umgebungsbedingungen ausgesetzt, die sich auf ihre Belastung, ihre Haltbarkeit und ihren Betrieb auswirken können. Um das angemessene Sicherheits- und Zuverlässigkeitsniveau sicherzustellen, müssen die Umgebungsbedingungen für die Auslegung berücksichtigt und ausdrücklich in der Auslegungsdokumentation angegeben werden. Dazu gehören unter anderem die Umgebungsbedingungen nach IEC 61400-1 oder IEC 61400-3 und IEC 61400-24 (für den Blitzschutz)

Die Umgebungsbedingungen werden in normale und extreme Kategorien unterteilt. Die normalen Umgebungsbedingungen betreffen im Allgemeinen wiederkehrende strukturelle Belastungsbedingungen, während die extremen Umgebungsbedingungen seltene äußere Auslegungszustände darstellen. Die in

IEC 61400-1 und IEC 61400-3 definierten Auslegungslastfälle schließen Kombinationen dieser Umgebungsbedingungen mit WEA-Betriebsarten und anderen Auslegungssituationen ein.

Wenn vom Konstrukteur weitere Umgebungsbedingungen, die in den angegebenen Verweisungen nicht aufgeführt sind, festgelegt werden, müssen die Parameter und deren Werte in der Auslegungsdokumentation angegeben werden.

Dabei muss berücksichtigt werden, dass diese Umgebungsbedingungen in den verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus (Herstellung, Transport/Lagerung, Errichtung, Betrieb oder Demontage) voneinander abweichen dürfen.

6 Auslegung

6.1 Prozess der Strukturauslegung

6.1.1 Allgemeine Anforderungen

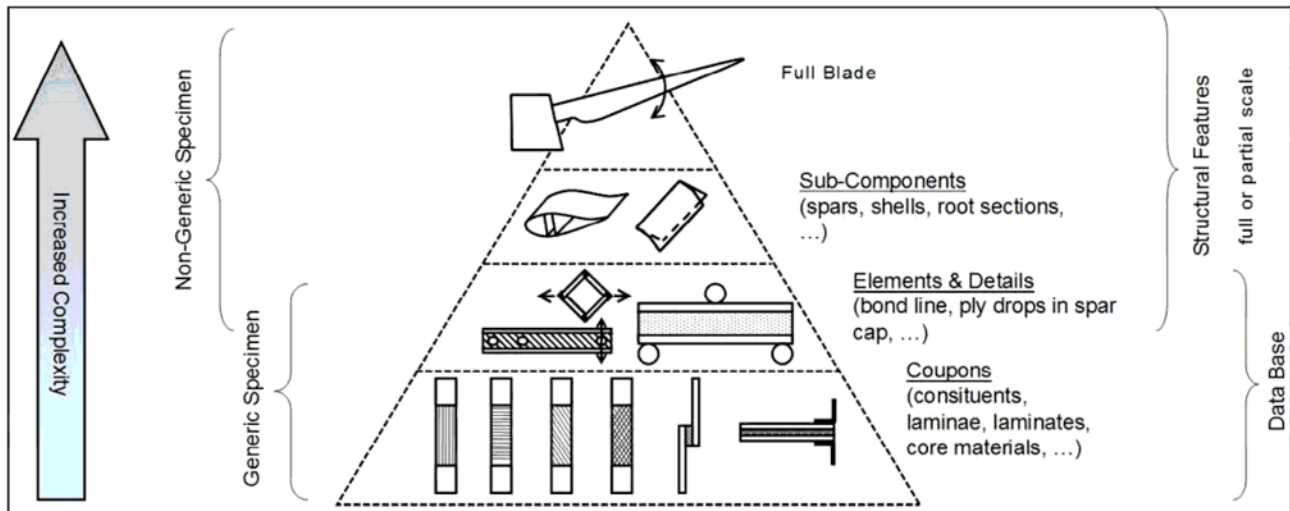
Mit dem Prozess der Strukturauslegung muss sichergestellt werden, dass das geforderte Niveau der Betriebssicherheit über die gesamte Auslegungslebensdauer und für sämtliche Belastungen des Rotorblattes eingehalten wird.

Die Auslegung muss ausreichend genau beschrieben und festgelegt werden, damit sichergestellt wird, dass die im Auslegungsprozess zugrunde gelegten Annahmen bei der Herstellung eingehalten werden können.

Der Konstrukteur muss zulässige Fertigungstoleranzen und Annahmekriterien festlegen und in der Auslegungsdokumentation angeben.

6.1.2 Bausteinprinzip für die Strukturauslegung von Verbundwerkstoffen

Die übliche ausführliche Auslegung (analytische und numerische Berechnung zusammen mit validierten Werkstoffdaten und einer Prüfung des gesamten Rotorblattes) von Strukturen aus faserverstärktem Kunststoff kann um ein Bausteinprinzip erweitert werden, das mit Prüfungen auf Couponebene beginnt, mit dem Nachweis und der Prüfung komplexerer Strukturen fortgeführt wird und mit einer Prüfung des gesamten Rotorblattes vollendet wird. Diese Beziehung ist in [Bild 1](#) dargestellt, wobei immer komplexere Prüfungen zur Bewertung komplizierter Lastbedingungen und Ausfallarten entwickelt werden.



Increased complexity	Zunehmende Komplexität
Non-Generic specimen	Nicht generischer Prüfling
Generic Specimen	Generischer Prüfling
Full blade	Gesamtes Rotorblatt
<u>Sub-Components</u> (spars, shells, root sections, ...)	<u>Teilkomponenten</u> (Holme, Schalen, Blattwurzel ...)
<u>Elements & Details</u> (bond line, ply drops in Spar cap, ...)	<u>Bauteile und Einzelheiten</u> (Klebefuge, Stufungen im Holmgurt ...)
<u>Coupons</u> (constituents, laminae, laminates, core materials, ...)	<u>Coupons</u> (Bestandteile, Lamina, Laminat, Kernwerkstoffe ...)
Structural Features full or partial scale	Strukturmerkmale Einsatzgröße oder verkleinerte Größe
Data Base	Datenbasis

Bild 3 – Bausteinprinzip

Das Prinzip kann wie folgt zusammengefasst werden:

Coupons: Eine Anzahl von Prüfungen wird auf der Couponebene durchgeführt, mit denen Vertrauen in reproduzierbare physikalische Eigenschaften entwickelt wird. Für die einzelnen Komponenten werden Beschaffungsspezifikationen entwickelt und für bestimmte Kombinationen von Lamina/Laminat werden zulässige Auslegungsvariablen aufgestellt.

Bauteile und Elemente: Kritische Bereiche des Auslegungsnachweises kennzeichnen Bauteile, die bei den Auslegungszuständen mit repräsentativen Prüflingen eingehender geprüft und nachgewiesen werden müssen. Dazu dürfen solche Prüfungen wie die Prüfung der Klebefuge zwischen Holmgurt und Holmsteg oder der Stufungen (Ply-drops) im Laminat des Holmgurtes gehören.

Teilkomponenten: Für die Auslegung des Rotorblattes repräsentative Teile und Abschnitte werden mit dem Ziel geprüft, spezielle Lastbedingungen und Ausfallarten zu bewerten. Beispiele dafür sind Holme, Schalen

und Blattwurzel. Die Prüfkomponten dürfen in der Einsatzgröße oder, wenn nachgewiesen wird, dass die Prüfung repräsentativ ist, in einer verkleinerten Größe geprüft werden.

Gesamtes Rotorblatt: Zur Bewertung spezieller Lastbedingungen und Ausfallarten wird das gesamte Rotorblatt oder ein entscheidender Teil davon, der für die Blattauslegung repräsentativ ist, geprüft. Das Rotorblatt darf in der Einsatzgröße oder, wenn nachgewiesen wird, dass die Prüfung repräsentativ ist, in einer verkleinerten Größe geprüft werden.

Die Anzahl der für jede Ebene geforderten Prüfungen sollte in Abhängigkeit von der jeweiligen Auslegungsaktivität zusammen mit dem für die Entwicklung des Rotorblattes verantwortlichen Konstrukteur unter Berücksichtigung einer sinnvollen Anzahl von Prüfungen für jede Stufe festgelegt werden.

Prüfungen auf der Ebene der Bauteile und Elemente sowie der Teilkomponenten erhöhen das Vertrauen in die Strukturauslegung.

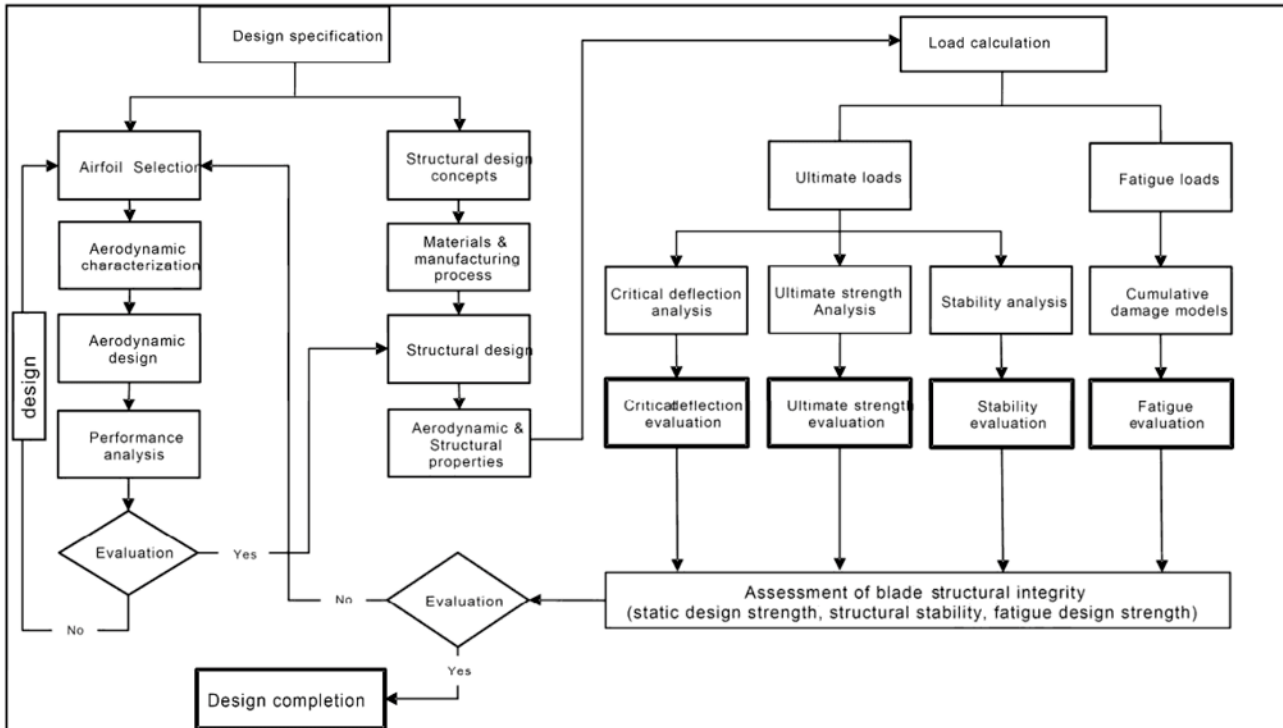
Die Gültigkeit der mit den Prüfungen auf jeder Bausteinebene (Werkstoffprobe, Teilkomponente usw.) aufgestellten Auslegungswerte (Festigkeit, Steifigkeit usw.) muss beschrieben und durch Annahmekriterien¹ und Toleranzen, die in der endgültigen Auslegung zu erfüllen sind, begrenzt werden.

6.1.3 Allgemeiner Prozess der Rotorblattauslegung

Bild 4 zeigt einen typischen Prozess für die Auslegung und die analytische Bewertung eines Rotorblattes, der hier nur als informativer Leitfaden angegeben ist. Zusätzlich zu den dargestellten Schritten kann der Auslegungsprozess die Entwicklung kritischer Eingangsgrößen wie die Aufstellung aerodynamischer Kennwerte von Tragflächen und die Beschreibung von Werkstoffeigenschaften umfassen.

Die dargestellten Iterationsschleifen sind nur Beispiele und bilden unter Umständen nicht alle spezifischen Auslegungsprozesse ab. Wenn beispielsweise die Bewertung der aerodynamischen Auslegung als nicht zufrieden stellend angesehen wird, darf der Konstrukteur die Tragflächen nachprüfen (wie im Bild angegeben) oder einen anderen Schritt des Prozesses der aerodynamischen Auslegung wiederholen.

¹ Für Annahmekriterien ist zu beachten (nur Beispiel): Für eine Couponprobe eines Laminates, deren Betriebsfestigkeit geprüft wird, können die Annahmekriterien unter anderem die Definition des Rohwerkstoffes (Verweisung auf die Werkstoffspezifikation), den Faservolumenanteil, die Faserausrichtungswinkel, den Herstellungs- und den Härtingsprozess usw. betreffen.



Design	Auslegung
Design specification	Auslegungsspezifikation
Airfoil Selection	Auswahl der Tragfläche
Aerodynamic characterization	Aerodynamische Beschreibung
Aerodynamic design	Aerodynamische Auslegung
Performance analysis	Nachweis des Betriebsverhaltens
Evaluation	Bewertung
Structural design concepts	Strukturauslegungskonzept
Materials & manufacturing process	Werkstoffe und Herstellungsprozess
Structural design	Strukturauslegung
Aerodynamic & Structural properties	Aerodynamische und strukturelle Eigenschaften
yes	ja
no	nein
Design completion	Auslegung abgeschlossen
Load calculation	Berechnung der Last

Ultimate loads	Tragfähigkeit
Fatigue loads	Betriebsfestigkeit
Critical deflection analysis	Nachweis kritischer Verformungen
Ultimate strength analysis	Tragfähigkeitsnachweis
Stability analysis	Stabilitätsnachweis
Cumulative damage models	Schadensakkumulationsmodelle
Critical deflection evaluation	Bewertung kritischer Verformungen
Ultimate strength evaluation	Bewertung der Bruchfestigkeit
Stability evaluation	Stabilitätsbewertung
Fatigue evaluation	Bewertung der Betriebsfestigkeit
Assessment of blade structural integrity static design strength, structural stability, fatigue design strength)	Beurteilung der strukturellen Integrität des Rotorblattes (Auslegung der statischen Festigkeit, strukturelle Stabilität, Auslegung der Betriebsfestigkeit)

Bild 4 – Typischer Prozess der Auslegung und analytische Bewertung eines Rotorblattes

Wie in Bild 4 angegeben, ist die strukturelle Integrität des Rotorblattes zu bewerten, damit spezifische Ausfallarten ausgeschlossen werden können. Bewertungen können auf Nachweisen oder auf Prüfungen oder auf einer Kombination aus Nachweis und Prüfungen basieren (siehe Bausteinprinzip, 6.1.1). Das steht im Einklang mit IEC-Normen (z. B. IEC 61400-1, IEC 61400-3), die die Nutzung der Grenzzustandsanalyse fordern, die eingehender in 6.1.1 beschrieben ist.

Ganz allgemein umfasst die Grenzzustandsanalyse die Beschreibung der Strukturantwort auf Belastungen (z. B. Spannung, Dehnung oder Verformung) und des Widerstandes auf diese Antwort (z. B. Festigkeit, Steifigkeit). Teilsicherheitsbeiwerte γ werden zur Berücksichtigung von Unsicherheiten der berechneten Antwort und des berechneten Widerstandes angewendet, sodass die Wahrscheinlichkeit der Überschreitung der Grenzzustände annehmbar niedrig ist.

Charakteristische Lasten sind diejenigen Lasten, deren Auftreten mit einer angegebenen Wahrscheinlichkeit vorhergesagt werden kann. Die Auslegungswerte für Lasten werden bestimmt durch Multiplikation mit Teilsicherheitsbeiwerten für Lasten γ_f .

Der Widerstand ist in der Regel eine Funktion der Werkstoffeigenschaften. Der charakteristische Widerstand wird aus den Prüfergebnissen berechnet, wobei der Standardwert nach ISO 16269-6 eine Überschreitung mit einer 95 %igen Wahrscheinlichkeit bei einem Vertrauensniveau von 95 % ist. Es sollte angegeben werden, ob statistische Faktoren für Toleranzgrenzen für eine bekannte oder eine unbekannte Standardabweichung der Grundgesamtheit verwendet werden.

Der Widerstand des Strukturwerkstoffes, wie er von der gesamten Rotorblattstruktur verkörpert wird, darf von den Messwerten auf der Couponebene abweichen. In einigen Fällen kann sich das unter Umständen aus den vorhersagbaren Auswirkungen von Skalierung, Geometrie und Lasteinleitung ergeben. Weitere Auswirkungen können Abweichungen der Werkstoffeigenschaften (z. B. Zusammensetzung, mechanische Eigenschaften, Ausrichtung) sein. Der Teilsicherheitsbeiwert für Werkstoffe γ_m bezieht kombinierte Unsicherheiten in die Beziehung zwischen dem Coupon-basierten Widerstand und dem Widerstand des Rotorblattes im Herstellungszustand ein. 6.6.3 enthält eine genaue Definition für γ_m .

Nach IEC 61400-1 müssen auch Teilsicherheitsbeiwerte für die Folgen des Versagens γ_n einbezogen werden. Wie in Bild 5 dargestellt, kann γ_n grundsätzlich entweder als eine Verstärkung der Antwort oder als Verringerung des Widerstandes angewendet werden.

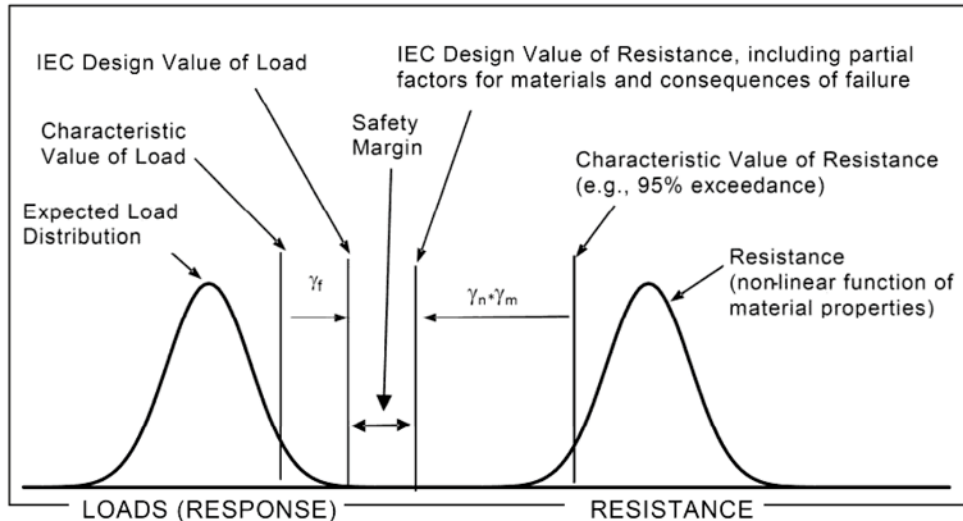
In keiner Nachweisprüfung darf der Auslegungswert der Antwort den Auslegungswert des Widerstandes überschreiten. Bild 5 zeigt diese beiden Werte getrennt durch einen Sicherheitsabstand. Für den Nachweis werden Werte des Sicherheitsabstandes von größer oder gleich null gefordert.

Für bestimmte Grenzzustände ist die Beziehung zwischen Werkstoffeigenschaften und Widerstand in Abhängigkeit von einem Ausfall im Grenzzustand nichtlinear (z. B. bei einem bruchmechanischen Festigkeits- und Beulnachweis). In diesen Fällen müssen die Teilsicherheitsbeiwerte so angewendet werden, dass sie sich linear zur Belastbarkeit verhalten, wie mit der folgenden Gleichung angegeben:

$$S(\gamma_f \cdot F_k) \leq \frac{R_k}{\gamma_m \gamma_n}$$

Dabei ist S eine Funktion der Strukturantwort auf eine Belastung und R_k ist der charakteristische Werkstoffwiderstand.

Die allgemeine Formulierung ist in Bild 5 dargestellt, wo Teilsicherheitsbeiwerte in die Beziehung zwischen der Strukturantwort bei Belastung und dem Widerstand für den entsprechenden Grenzzustand eingeführt werden.



IEC Design Value of Load	Auslegungswert der Last nach IEC
Characteristic Value of Load	Charakteristischer Lastwert
Expected Load Distribution	Erwartete Lastverteilung
Safety Margin	Sicherheitsabstand
IEC Design Value of Resistance, including partial factors for materials and consequences of failure	Auslegungswert des Widerstandes nach IEC einschließlich von Teilsicherheitsbeiwerten für Werkstoffe und Folgen des Versagens
Characteristic Value of Resistance (e.g., 95% exceedance)	Charakteristischer Widerstandswert (z. B. 95 %ige Überschreitungswahrscheinlichkeit)
Resistance (non-linear function of material properties)	Widerstand (nichtlineare Funktion der Werkstoffeigenschaften)
LOADS (RESPONSE)	Lasten (Antwort)
RESISTANCE	Widerstand

Bild 5 – Anwendung der Grenzzustandsanalyse für den Nachweis von Rotorblättern

Der Werkstoffwiderstand darf entweder als Spannung oder als Dehnung angegeben werden.

Wie in 6.6 erläutert, wird γ_m durch Berücksichtigung vieler Beiträge zur Gesamtunsicherheit des Widerstandes abgeleitet. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Norm entsprach die typische industrielle Praxis der Darstellung in Bild 5 mit einem Werkstoffwiderstand, der mit Prüfungen auf der Couponebene aufgestellt wird, um Werkstoffeigenschaften zu ermitteln, die dann anhand eines γ_m -Wertes in die Rotorblattebene überführt werden, wodurch eine große Anzahl von Unsicherheiten erfasst wird. Es sind zahlreiche Strategien möglich, mit denen die Unsicherheiten der Übertragung von Eigenschaften auf der Werkstoffebene in den Widerstand des Rotorblattes im Herstellungszustand verringert werden können.

Bei Anwendung des Bausteinprinzips wird beispielsweise eine Kombination von Ausfallarten und Grenzzuständen angewendet mit einer verringerten Unsicherheit bei einer zunehmenden Größe und Komplexität des geprüften Bausteins. Die ermittelten Festigkeits- und Stabilitätswerte definieren Ausfallarten für Werkstoffproben und Teilkomponenten und müssen für den Nachweis mit analytischen Methoden verglichen werden.

6.1.4 Auslegungslasten

6.1.4.1 Auslegungshüllkurve

Die Auslegungslasten für ein Rotorblatt können für eine einzelne WEA-Bauart festgelegt werden oder sie können als eine breite Lastenhüllende angegeben werden, die für einen Bereich von WEA-Bauarten gilt.

Die definierte(n) Lasten/Lastenhüllende darf auf den Auslegungslastfällen beruhen, die in IEC 61400-1, Abschnitt 7, festgelegt sind, einschließlich von Nichtbetriebszuständen (z. B. Transport, Handhabung, Errichtung, Instandhaltung, Belastung von Anschlagpunkten). Für Offshore-WEA sollten die Anforderungen in IEC 61400-3 berücksichtigt werden.

6.1.4.2 Lastwechselwirkung

Die Strukturkennwerte des Rotorblattes stehen in Wechselwirkung mit seiner aerodynamischen Belastung und der WEA-Betriebsführung. Für einen sicheren Betrieb des Rotorblattes bei Rotation und Stillstand muss sichergestellt sein, dass bei der Lastberechnung jegliche Instabilität (z. B. Flattern) oder Resonanz infolge der Wechselwirkung von aerodynamischer Belastung, Strukturauslegung des Rotorblattes, WEA-Betriebsführung (Drehzahl, Blatteinstellwinkel usw.) und tragender Struktur berücksichtigt wurde.

Die Strukturauslegung des Rotorblattes muss die definierte Lastenhüllende widerspiegeln und der strukturelle Nachweis muss zeigen, dass das Rotorblatt den festgelegten Auslegungslasten für die Tragfähigkeit und die Betriebsfestigkeit standhalten kann.

6.1.4.3 Lastenhüllende

Aufgrund der asymmetrischen Blattstrukturen spiegeln die beim Nachweis angenommenen Lasten unter Umständen nicht die kritischste Belastungsrichtung für eine gegebene Ausfallart wieder. Es gibt zwei Ansätze für die kritische Belastungsrichtung.

- Basisansatz: Anwendung von vier abgestimmten Lastreihen (Momente und Kräfte), die den Extremen der Lasten in Lotrichtung und Sehnenrichtung entsprechen. Es muss der resultierende Lastvektor betrachtet werden. Für bestimmte Nachweise ist das unter Umständen nicht ausreichend für die Einbeziehung der kritischsten Lastrichtungen von Lastkombinationen, was bei der Auslegung berücksichtigt werden muss.
- Erweiterter Ansatz: Betrachtung aller möglichen kritischen Belastungsrichtungen innerhalb eines Querschnittes. Ohne einen weiteren Nachweis kritischer Lasten wird eine Reihe von gleichmäßig über mindestens zwölf Richtungen verteilten Lasten als ausreichend für diesen Ansatz angesehen.

Die Komponenten einer Einhüllenden von Extremlasten treten im Allgemeinen nicht zeitgleich auf und deshalb stellt diese Lastenhüllende eine konservative Bedingung dar. Diese konservative Bedingung darf gemildert werden durch Bewertung der Struktur für jede der zeitgleich auftretenden Lasten, aus denen sich die Extremlast zusammensetzt.

Im Allgemeinen ist eine Auslegung für die resultierenden Biegemomente ausreichend. Das ist allerdings nicht immer der kritischste Belastungstyp für alle Ausfallarten. Die höchsten Schubkräfte stellen beispielsweise die kritischsten Lasten für den Nachweis der Klebefestigkeit dar. Des Weiteren sollte die Torsionsbelastung betrachtet werden.

Um sicherzustellen, dass Lasten an einer ausreichenden Anzahl von Längsabschnitten berechnet werden, müssen Lasten an mindestens 12 Querschnitten entlang der Blattlänge (in Längsrichtung) vorliegen.

Der Abstand in Längsrichtung zwischen den Abschnitten der Lastdefinition darf nicht größer sein als die zweifache Länge der kleinsten Profilsehne des betrachteten Abschnittes, und zwar für Abschnitte von der Blattwurzel bis zu 85 % der Blattlänge.

Bei der Auswahl der Abschnitte müssen Abweichungen der Geometrie oder der Steifigkeit berücksichtigt werden.

6.2 Kennwerte von Rotorblättern

6.2.1 Eigenschaften von Rotorblättern

Strukturelle und aerodynamische Eigenschaften des Rotorblattes sind entscheidend für die aeroelastische Belastung von Rotorblatt und WEA.

Die Kennwerte des Rotorblattes müssen als Eingangsgrößen für die Lastberechnung festgelegt werden. Diese Kennwerte müssen die mechanischen und physikalischen Eigenschaften an einzelnen Abschnitten entlang der Blattlänge für die jeweiligen Freiheitsgrade, die sich auf die entsprechenden Auslegungszustände beziehen, umfassen.

- Verteilung von aerodynamischen Profilen, Profilsehne, aerodynamische Verwindung und Dicke;
- aerodynamische Kennwerte (d. h. Koeffizienten des Auftriebs-, Widerstands- und Nickmoments als Funktion des Angriffswinkels) im Zusammenhang mit aerodynamischen Profilen;
- elastische Steifigkeit (z. B. Steifigkeit in Lotrichtung und Sehnenrichtung und, falls für die Auslegung entscheidend, Torsionssteifigkeit und Dehnsteifigkeit) mit ihren Bezugsachsen;
- Verteilungen von Masse und Massenträgheitsmomenten und die Bezugsachse;
- elastische Kopplung (z. B. Lotrichtung in Abhängigkeit von der Sehnenrichtung, Lotrichtung in Abhängigkeit von der Torsion oder dergleichen, falls für die Auslegung maßgeblich);
- Strukturdämpfung.

Strukturelle Eigenschaften müssen für eine Mindestanzahl von Abschnitten entlang des Rotorblattes festgelegt werden. Die Anzahl dieser Abschnitte darf nicht geringer sein als für den Strukturnachweis nach [6.6.3.1](#) festgelegt.

6.2.2 Funktionsbedingte Auslegungstoleranzen

Toleranzen müssen für die folgenden Parameter festgelegt werden:

- Form der aerodynamischen Profile, dazu gehören unter anderem:
 - Radius der Vorderkante des Profils;
 - relative Dicke des Profils;
 - Länge der lokalen Profilsehne;
- Rauigkeit der Profiloberfläche;
- aerodynamischer Verwindungswinkel;
- Blattlänge;
- geometrische Lage der aerodynamischen Blattprofile bezogen auf die Blattwurzel;
- Geometrie und Lage statischer und beweglicher aerodynamischer Einrichtungen (Wirbelgeneratoren, Klappen usw.);
- die 0°-Markierung für die Blattverstellung;
- Blattmasse;
- statisches Rotorblattmoment (für jedes einzelne Blatt und bezogen auf Blätter in einer Blattgruppe);
- Eigenfrequenzen des Rotorblattes;
- Winkel- und Ebenheitstoleranz für den Flansch der Blattdruckseite.

Die Toleranzbereiche der aufgeführten Parameter müssen bei der Bewertung der Auslegung von Lasten, Betriebsverhalten und struktureller Integrität berücksichtigt werden, falls sie nicht als vernachlässigbar für den sicheren Betrieb des Rotorblattes angesehen werden.

Die Istwerte der Toleranzen müssen angegeben und vom Konstrukteur berücksichtigt werden.

Wenn der Konstrukteur keine alternativen Werte festlegt, werden die folgenden Werte ohne eine weitere technische Begründung allgemein anerkannt.

- Profil²
 - Form des Profils $\pm 0,2 \% \times \text{Profilsehne}$
 - Rauigkeit der Profiloberfläche³ $R_z \leq 15 \mu\text{m}$
 - Länge der lokalen Profilsehne
(für die nach innen gerichteten 80 % in Längsrichtung) $\pm 1,0 \% \times \text{Profilsehne}$
- Verteilung des Verwindungswinkels $\pm 0,2^\circ$
- Blattlänge $\pm 0,1 \% \times \text{Länge}$
- Einstellung der 0°-Markierung $\pm 0,2^\circ$
- Blattmasse $\pm 3,0 \%$
- statisches Rotorblattmoment $\pm 4,5 \%$
- statisches Rotorblattmoment, Abweichung in einer Gruppe $\pm 0,2 \%$
- Eigenfrequenzen des Rotorblattes $\pm 5,0 \%$

6.3 Aerodynamische Auslegung

6.3.1 Allgemeines

Die Bewertung der Aerodynamik des Rotorblattes ergibt Eingangsdaten für Lastberechnungen und die Bewertung des Leistungsverhaltens beruht sowohl auf experimentellen als auch Berechnungsergebnissen.

6.3.2 Aerodynamische Kennwerte

Die Aerodynamik des Rotorblattes muss beschrieben werden. Dabei sollten der volle 360°-Angriffswinkel und alle Anströmungsformen betrachtet werden.

Die aerodynamischen Kennwerte des Rotorblattes müssen nach einem der folgenden Ansätze oder einer Kombination davon bewertet werden (gegebenenfalls müssen die angewendeten Modelle und Werkzeuge validiert werden):

- dreidimensionale Simulation (numerische Strömungsmechanik, Randelementemethode, Wirbelgitterverfahren usw.);
- zweidimensionale Simulation der aerodynamischen Kennwerte der Profile;
- begründete Annahmen für Kennwerte des aerodynamischen Profils für den Bereich des Angriffswinkels mit Strömungsablösung;
- Windkanalprüfungen für mindestens den Bereich des Angriffswinkels zur Ermittlung der aerodynamischen Kennwerte im Bereich des größten positiven und negativen Auftriebskoeffizienten.

Bei der Bewertung müssen realitätsnahe Reynolds- und Mach-Zahlen benutzt werden.

Zur Durchführung eines realistischen Last- und Betriebsverhaltensnachweises sollte die Auswirkung der Blattrauigkeit während des Betriebs berücksichtigt werden. Die zuvor beschriebene Bewertung muss für eine

² Der Einfluss dieser Toleranzen hängt von den profilspezifischen Kennwerten und vom Ort auf der Blattoberfläche ab; die Blattvorderkante und die Außenflächen sind am anfälligsten für Formabweichungen und Rauigkeit.

³ Diese Toleranz gilt für Gelcoat und beschichtete Oberflächen; für durch den Betrieb verschmutzte Blattoberflächen gilt diese Toleranz nicht, sondern muss durch geeignete Auslegungsannahmen berücksichtigt werden.

ausreichende Anzahl aerodynamischer Profile durchgeführt werden, damit das aerodynamische Verhalten des gesamten Rotorblattes bewertet werden kann.

Als Mindestanforderung müssen ein aerodynamisches Profil mit einer relativen Dicke zwischen 75 % und 50 %, ein Profil mit einer relativen Dicke zwischen 50 % und 30 % und zwei Profile mit einer relativen Dicke unter 30 % bewertet werden.

Dabei müssen 3D-Effekte berücksichtigt werden.

Alle zusätzlichen aerodynamischen Einrichtungen (Klappen, Wirbelgeneratoren, Kantenkämme usw.), deren Anwendung vorgesehen ist, müssen bewertet werden.

6.3.3 Beschreibung des Leistungsverhaltens (informativ)

Das Leistungsverhalten des Rotorblattes sollte auf seinen Wirkungsgrad hin bewertet werden. In eine zuverlässige Bewertung der Leistungskennwerte des Rotorblattes sollten Folgendes einbezogen werden:

- ein zuverlässiges aerodynamisches Modell des Rotorblattes, das nach 6.3.2 bewertet wird;
- eine angemessene Turbulenz des Windfeldes;
- eine angemessener vertikaler Gradient des Windfeldes;
- eine angemessene Luftdichte und Temperatur des Windfeldes;
- ein geeignetes Simulationsmodell der WEA-Betriebsführungseinheit (Drehzahl und (einfache und/oder gemeinsame) Steuerung des Blatteinstellwinkels);
- der Einfluss der Oberflächenrauigkeit der Tragfläche, die repräsentativ für den erwarteten Oberflächenzustand ist.

Für eine zuverlässige Leistungsbeschreibung sollte die Blattverformung (z. B. Verwindung und Umrissdeformationen) während des Betriebs berücksichtigt werden.

Weitere Einzelheiten können IEC 61400-12 entnommen werden.

6.3.4 Tragflächenschall (informativ)

Die Geräuscentwicklung des Rotorblattes sollte untersucht werden. Dabei sollten geeignete analytische oder rechentechnische Ansätze verwendet werden und besondere am Rotorblatt vorhandene aerodynamische Einrichtungen sollten einbezogen werden.

Weitere Einzelheiten können IEC 61400-11 entnommen werden.

6.4 Anforderungen an Werkstoffe

6.4.1 Allgemeines

Die Festigkeits- und Steifigkeitswerte von faserverstärkten Verbundwerkstoffen hängen von den Eigenschaften der Rohwerkstoffe und vom Herstellungsprozess ab.

Die folgenden Schritte sind maßgeblich, um sicherzustellen, dass die Werkstoffe die Auslegungsanforderungen erfüllen:

- Die Auslegungswerte für die Festigkeit und die Steifigkeit der Werkstoffe, die für strukturelle Verbundelemente verwendet werden, müssen festgelegt werden.
- Die Werkstoffe benötigen eine Anerkennung, die nachweist, dass sie die festgelegten Werte einhalten. Die Anerkennung muss dokumentiert sein und anhand eines Prozesses müssen die notwendigerweise durchzuführenden Prüfungen beschrieben werden.

- Für Rohwerkstoffe zur Herstellung von Verbundwerkstoffen sollte der Konstrukteur die kritischen Parameter oder Werte angeben, die bei der Wareneingangskontrolle nachzuweisen und/oder zu prüfen sind.

6.4.2 Werkstoffeigenschaften für die Auslegung von Rotorblättern

6.4.2.1 Beschreibung

Zu Werkstoffeigenschaften für die Blattauslegung gehören Auslegungswerte für Verbundwerkstoffe (z. B. Faserverbundwerkstoffe), Klebefugen (einschließlich Festigkeit des Klebstoffes und des vollständigen verklebten Verbindungsaufbaus), Sandwichaufbau (einschließlich Werkstoffe des Sandwichkerns und deren Wechselwirkung mit Deckschichten).

Durch die Werkstoffeigenschaften und Auslegungswerte wird die Erfüllung spezifischer Funktionsanforderungen des Rotorblattes durch den Werkstoff bestimmt und sie bilden als solche die Grundlage für die Werkstoffauswahl. Die Anforderungen an den Werkstoff für die Blattauslegung ergeben sich aus den Eigenschaften des resultierenden Werkstoffes, Produktes oder Teilsystems.

Der Konstrukteur muss die entsprechenden Prüflinge anhand von Herstellungsprozessen auswählen, die für die Serienproduktion des Rotorblattes repräsentativ sind. Empfehlenswert ist die Einhaltung des Bausteinprinzips nach 6.1.2. Für Zertifizierungszwecke müssen die Prüfungen für die Aufstellung der Auslegungswerte zum Zweck des Strukturnachweises nach den Anforderungen durchgeführt werden, die in dem jeweiligen Zertifizierungsprogramm festgelegt sind, z. B.:

- einer akkreditierten Prüfstelle;
- eines Unternehmens, das durch eine entsprechende Zertifizierungsstelle zugelassen ist;
- eines nicht zertifizierten Unternehmens, beglaubigt durch eine Zertifizierungsstelle.

Aufgrund der Beschaffenheit der Verbundwerkstoffe werden bestimmte Werkstoffeigenschaften für die Auslegung am besten mit Prüflingen der Bauteil- und/oder Komponentenebene durchgeführt.

Die Beschreibung der mechanischen Werkstoffeigenschaften muss auf eine statische Bewertung wie Mittelwerte, Standardabweichung usw. gestützt werden. Falls es nicht anders angegeben ist, muss eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 95 % mit einem Vertrauensniveau von 95 % zugrunde gelegt werden. Die Streuung von Ergebnissen der Prüfung großer Prüflinge darf anhand der Ergebnisse von Prüfungen an verkleinerten Größen geschätzt werden.

Falls keine Prüfverfahren verfügbar sind, dürfen die mechanischen Werkstoffeigenschaften nach nachgewiesenen Berechnungsverfahren wie die klassische Laminattheorie oder mit Ausfallmodellen dokumentiert werden, sofern die Genauigkeit der Modelle durch eine Nachweisprüfung belegt werden kann. Eine sich daraus ergebende Unsicherheit muss mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten berücksichtigt werden.

Die Verwendung von Auslegungswerten aus anerkannten Leitfäden ist zulässig. In diesem Fall muss die Quelle angegeben werden, es sollte jedoch beachtet werden, dass diese Werte oft sehr konservativ sind.

Vorbehandlung/Alterung der Prüflinge:

Die Nennauslegungseigenschaften der Prüflinge werden ohne Vorbehandlung und Alterung geprüft. Wenn es im Zusammenhang mit spezifischen Teilsicherheitsbeiwerten für Werkstoffe γ_{m1} nach 6.6.5.3 gefordert wird, müssen weitere Prüfungen an Prüflingen durchgeführt werden, die entsprechend der Auswahl der Teilsicherheitsbeiwerte vorbehandelt/gealtert worden sind.

Prüftemperatur:

Die Nennauslegungseigenschaften der Prüflinge müssen bei Raumtemperatur geprüft werden. Wenn es im Zusammenhang mit spezifischen Teilsicherheitsbeiwerten für Werkstoffe γ_{m2} nach 6.6.5.4 gefordert wird,

müssen weitere Prüfungen bei den geforderten Temperaturen entsprechend der Auswahl der Teilsicherheitsbeiwerte durchgeführt werden.

Elastizitätseigenschaften:

Bei Anwendungen über den extremen Temperaturbereich für WEA-Standardklassen nach IEC 61400-1 hinaus müssen die Änderungen der Elastizitätseigenschaften der Blattwerkstoffe berücksichtigt werden.

6.4.2.2 Faserverstärkte Lamine

Faserverstärkter Kunststoff besteht aus einem faserverstärktem Verbundwerkstoff, der die wichtigsten Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften bereitstellt, in Kombination mit einer Polymermatrixkomponente (Harz), die den Halt, die Spannungsübertragung und den Schutz der Fasern sicherstellt.

Jeder einzelne Laminattyp (unidirektional, biaxial und mehraxial) sollte einzeln geprüft werden. Der erforderliche Prüfumfang darf verringert werden (durch Verwendung eines höheren Wertes für γ_{m3} und/oder γ_{m4} , siehe 6.6.4), wenn die verschiedenen Lamine die gleichen Bestandteile besitzen (z. B. unidirektionale, biaxiale und mehraxiale Lamine, die aus den gleichen Fasern mit ähnlichen Lagendicken und mit der gleichen Harzmatrix hergestellt sind) oder wenn die Prüflinge aus Werkstoffkombinationen und Schichten aufgebaut sind, die für die Blattauslegung repräsentativ sind.

Die folgenden Werkstoffeigenschaften müssen geprüft und die charakteristischen Werte für die Festigkeitseigenschaften statistisch ermittelt werden.

Physikalische Eigenschaften für jede Prüftafel:

- Faservolumenanteil und Porengehalt;
- Härtungszustand (z. B. T_g für Epoxidharz);
- Dicke einer ausgehärteten Einzellage.

Statische Prüfungen:

- Längszug [0°]: Festigkeit, Modul, Dehnung, Poissonzahl;
- Querkzug [90°]: Festigkeit, Modul, Dehnung;
- Längsdruck [0°]: Festigkeit, Modul, Dehnung;
- Querkdruck [90°]: Festigkeit, Modul, Dehnung;
- Längsschub (in der Lagenebene): Festigkeit, Modul;
- interlaminare Scherung: Festigkeit (z. B. Prüfung mit kurzem Balken).

Dynamische Prüfungen:

- Längs [0°]: Festigkeit

Eine angemessene Anzahl von Zyklen muss geprüft werden, z. B. vier aufeinanderfolgende Dekaden mit drei Prüflingen in jeder Dekade. Eine der Dekaden muss dabei 10^6 Zyklen überschreiten. Werden die Prüfungen nur bei einem Widerstandsverhältnis R durchgeführt, sollte dieses Verhältnis $R = -1$ sein. Zur Einhaltung der Definition der „umfassenden Charakterisierung der Betriebsfestigkeit“ bei der Auswahl von Teilsicherheitsbeiwerten muss die folgende Prüfung durchgeführt werden: zyklische dynamische Prüfung mit mehr als einem repräsentativen Verhältnis R (gewöhnlich bei $R = -1$, $R = 10$ und $R = 0,1$).

Alternativ dürfen die folgenden inversen Anstiege der Wöhlerkurve in Kombination mit entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten (γ_{m4}) für den Nachweis der Betriebsfestigkeit ohne weitere Validierung angewendet werden (statische Festigkeit und angenommener Anstieg der Wöhlerkurve in Faserrichtung), sofern der Faservolumengehalt nicht 55 % (Glasfaser) oder 60 % (Kohlefaser; nur Tows ≤ 50 K) übersteigt:

- Glas-Epoxidharz-Lamine = 10
- Glas-Polyester-Lamine = 9

- Kohlenstoff-Epoxidharz-Lamine = 14

6.4.2.3 Strukturklebstoffe und Klebeverbindungen

Die Festigkeit von Klebeverbindungen (Tragfähigkeit und Betriebsfestigkeit) muss mit repräsentativen Prüflingen in Übereinstimmung mit den Teilsicherheitsbeiwerten nach 6.6.5.8 und 6.6.5.9 geprüft werden. Die Betriebsfestigkeit muss mit einer angemessenen Anzahl von Zyklen geprüft werden (z. B. vier aufeinanderfolgende Dekaden mit drei Prüflingen in jeder Dekade). Eine der Dekaden muss dabei 10^6 Zyklen überschreiten. Die Festigkeit der Klebeverbindung darf anhand von komplexen und realistischen Einzelheiten mit entsprechend niedrigeren Sicherheitsbeiwerten bewertet werden.

Die Anwendung eines bruchmechanischen Ansatzes ist möglich. In diesem Fall muss die Bruchzähigkeit geprüft und die charakteristischen Werte müssen statistisch bestimmt werden.

Die folgenden Eigenschaften müssen für den Klebstoff ermittelt werden:

- statisches Elastizitätsmodul und statisches Schubmodul;
- Härtungszustand (z. B. kleinste Glasübergangstemperatur T_g für Epoxidharz).

Die folgenden Eigenschaften des Klebstoffes sollten geprüft werden und es sollte ein Mindestkriterium als Anforderung für die Blattauslegung und die Werkstoffauswahl aufgestellt werden:

- Kriechen;
- Schrumpfen.

Klebstoffe sollten sich nicht nachteilig auf die zu klebenden Werkstoffe auswirken.

6.4.2.4 Sandwichstrukturen

Zur Einhaltung geringerer γ_{m3} - und γ_{m4} -Werte müssen die folgenden Eigenschaften von Kernwerkstoffen geprüft und die charakteristischen Werte für ihre Festigkeitseigenschaften statistisch ermittelt werden:

- Querdruck (aus der Lagenebene heraus) (Festigkeit, Modul);
- höchste Verarbeitungstemperatur.

Zur Ermittlung der geringeren γ_{m3} - und γ_{m4} -Werte müssen die folgenden Sandwicheigenschaften geprüft und die charakteristischen Werte für ihre Festigkeitseigenschaften statistisch ermittelt werden:

- Schub (aus der Lagenebene heraus) (Festigkeit, Modul, Dehnung);
- Abschälkraft oder Haftfestigkeit der Deckschicht;
- Faltenbildung der Deckschicht.

Die Werkstoffe des Sandwichelementes müssen repräsentativ für den Kernwerkstoff, die Deckschichten und die Grenzflächeneigenschaften sein, die bei der Auslegung des Rotorblattes angewendet werden. Wenn Kernwerkstoffe mit Schlitzen, Löchern oder Gittern verwendet werden, muss auch das berücksichtigt werden.

6.4.2.5 Metallische Strukturwerkstoffe

Die folgenden Eigenschaften jedes Werkstoffes müssen geprüft werden (oder durch anerkannte Normen sichergestellt werden):

- Zugfestigkeit;
- Streckgrenze;
- Bruchdehnung;
- Stoßabsorptionsenergie.

6.4.2.6 Oberflächenbearbeitung

Die folgenden Werkstoffeigenschaften müssen geprüft werden und es sollte ein Mindestkriterium als Anforderung für die Werkstoffauswahl aufgestellt werden:

- Haftung am Substrat (z. B. Abreißprüfungen);
- Flexibilität oder Reißdehnung;
- Erosionsbeständigkeit gegenüber Regen und Strahlpartikeln für Werkstoffe an der Vorderkante und im Bereich der Blattspitzen.

Es muss sichergestellt sein, dass die Werkstoffe ausreichend beständig gegenüber Umwelteinflüssen wie Luftfeuchte und UV-Strahlung sind.

Die Stoßfestigkeit (Hagel) sollte geprüft werden und es sollte ein Mindestkriterium als Anforderung für die Blattauslegung und die Werkstoffauswahl aufgestellt werden.

6.4.2.7 Nichtstrukturelle Werkstoffe

Alle nichtstrukturellen Werkstoffe (wie Dichtstoffe, Füllstoffe, Ausgleichsgewichte, Komponenten von Blitzschutzanlagen und andere Einrichtungen) müssen dokumentiert werden. Es muss sichergestellt werden, dass ihre Eigenschaften für den vorgesehenen Zweck geeignet sind, dass sie den Beanspruchungen, die sich aus der globalen Blattverformung ergeben, über die gesamte vorgesehene Betriebsdauer standhalten können und dass sie sich nicht ungünstig auf die Blattstruktur auswirken.

6.4.3 Anerkennung von Werkstoffen für die Herstellung

Es muss sichergestellt werden, dass die verwendeten Werkstoffarten die Auslegungsannahmen hinsichtlich der festgelegten Werkstoffeigenschaften (und in Bezug auf zusätzliche Prüfungen, die als Grundlage für die Auslegung durchgeführt wurden) erfüllen.

Der Hersteller muss einen Anerkennungsprogramm für geringfügige Änderungen und von neuen Herstellern gelieferte Werkstoffe festlegen. In diesem Programm müssen Anforderungen und durchgeführte Prüfverfahren angegeben werden, um nachzuweisen, dass der Werkstoff die Auslegungs- und Verarbeitungseigenschaften innerhalb der für die Auslegung festgelegten Werte und Toleranzen erfüllt.

Zu den Eigenschaften gehören Festigkeit und Steifigkeit sowie Verarbeitungseigenschaften oder -kennwerte bei der Herstellung, die das Werkstoffverhalten im Herstellungsprozess bestimmen. Die Beziehung zwischen diesen Werkstoffeigenschaften und Prozessparametern (Zeit, Temperatur, Druck usw.) sollte ermittelt werden.

Bei geringfügigen Änderungen wie die nachfolgend angegebenen ist ein verringertes Prüfprogramm zulässig.

- geringfügige Anpassungen des Rohwerkstoffes innerhalb der Weiterentwicklung durch den Werkstofflieferanten oder der Übergang zu einem neuen Lieferanten für einen identischen Werkstoff;
- geringfügige Änderungen des Produktionsprozesses (z. B. Anpassung der Aushärtungszeit).

Der Blathersteller muss mit Spezifikationen für Lamine und Rohwerkstoffe (z. B. Harze, Klebstoffe, Fasern) arbeiten, um kritische Parameter festzulegen, die bei der Anerkennung zu prüfen sind. Solche Spezifikationen müssen unter anderem umfassen:

- Rückverfolgbarkeit der Werkstoffe;
- Wiederholpräzision des Herstellungsprozesses für Werkstoffe;
- Nachweissysteme (z. B. Prüfverfahren) für Eigenschaften des angelieferten Werkstoffes;
- geeignete Lagerungsbedingungen für den Werkstoff.

6.5 Produktionsgerechte Entwicklung (Design for Manufacturing)

6.5.1 Allgemeines

In der Auslegungsdokumentation müssen alle Anforderungen für die Herstellung festgelegt werden, die zur Erfüllung der technischen und funktionalen Spezifikationen und zum Erzielen der angenommenen strukturellen Integrität des Rotorblattes wie Festigkeit, Steifigkeit, Masse, Massenmoment, Eigenfrequenzen und Stabilität notwendig sind.

Zu diesen Anforderungen gehören spezifische Herstellungsprozesse, Werkstoffe, Maße, Toleranzen und Annahmekriterien für Werkstoffe, Geometrien und Baugruppen.

Couponproben, Bauteile und Elemente, Teilkomponenten oder Baugruppen von Werkstoffen, die für die Festlegung der Auslegungswerte (Festigkeit, Steifigkeit und Stabilität) geprüft werden, müssen repräsentativ für das Rotorblatt im Herstellungszustand sein.

Die Validierung von Abweichungen vom Ausgangsprozess liegt im Verantwortungsbereich des Rotorblattherstellers. Der Hersteller muss während des Produktionsprozesses statistisch signifikante Änderungen der Auslegungswerte, die anhand des Ausgangsprozesses aufgestellt wurden, vermeiden.

Die wichtigsten Toleranzen, Prozesse oder Produktkennwerte und die Annahmeanforderungen müssen vom Konstrukteur oder Hersteller als qualitätskritische Parameter festgelegt werden, siehe auch 6.5.2. Diese qualitätskritischen Merkmale müssen für jedes hergestellte Produkt gemessen und aufgezeichnet werden, damit eine Dokumentation für die Einhaltung der Auslegung oder des Herstellungsprozesses sichergestellt wird.

Weitere Toleranzen, Prozesse oder Produktkennwerte und Annahmeanforderungen müssen untersucht werden und die Einhaltung der Auslegung oder des Herstellungsprozesses muss entweder durch eine fortlaufende Protokollierung, Überwachung oder einen Nachweis der Prozessstauglichkeit nachgewiesen werden.

Die Gültigkeit von Sicherheitsnachweisen muss sich über das gesamte hergestellte Produkt erstrecken und innerhalb einer angemessenen statistischen Sicherheit muss das berechnete Sicherheitsniveau eingehalten werden. Dazu darf die Definition von Fertigungstoleranzen ohne eine direkte Auswirkung auf strukturelle Berechnungen gehören. Zur Berücksichtigung solcher Auswirkungen ist nachfolgend eine Liste der mindestens geforderten Toleranzen festgelegt.

6.5.2 Anforderungen an Fertigungstoleranzen

Die Liste von Einzelheiten, für die Fertigungstoleranzen und/oder Annahmekriterien für die Herstellung festgelegt werden und die bei der Auslegung zu definieren sind, enthält, soweit anwendbar, unter anderem:

- Anordnung von Geweben/Lagen in Längsrichtung und Sehnenrichtung einschließlich Länge, Breite, Überlappungslänge und Verschiebung der Überlappung (Staggering);
- Ausrichtung von Geweben/Fasern (lokal und global);
- Fehlausrichtung der Fasern (einschließlich Falten) – in der Ebene (Lagenrichtung) und aus der Ebene heraus;
- Flächengewicht der Fasermatte;
- Faservolumenanteil;
- Abstand zwischen Stufungen (Ply-drops) – einschließlich von Blattfugen;
- Harzverarbeitung einschließlich Mischungsverhältnis und Porengehalt;
- Aushärtungsgrad und Verarbeitung des Harzes einschließlich von Temperatur, Zeit und Vakuumwert (soweit zutreffend);
- Anordnung des Werkstoffes des Sandwichkerns (Spalten, Fehlausrichtung);
- Maße des Werkstoffes des Sandwichkerns (Dicke, Schlitz/Rillen, Fasenwinkel);

- Anordnung und Ausrichtung von vorgefertigten Teilen;
- Klebstofffüllung (Geometrie und Poren);
- Mischungsverhältnis des Klebstoffes;
- klebstofffreie Kantenform;
- Aushärtungsgrad und Verarbeitung des Klebstoffes einschließlich von Temperatur, Zeit und Vakuumwert (soweit zutreffend);
- Maße der Klebefuge: Dicke und Breite sowie größte Größe und Höhe der zulässigen Abweichung (Maße, Poren, Risse, Prozentwert der Füllung/Abdeckung);
- Vorbereitung und Schutz der Klebefläche;
- Qualität der Beschichtung – Haftung und Dicke;
- kurzzeitige Lagerung nach der Oberflächenvorbereitung und vor dem Kleben;
- Lage von Bohrlöchern (Abweichung von der Nennlage);
- geometrische Anordnung von montierten Teilen außer den wichtigsten geklebten Strukturbauteilen (mit Ausgleichsmasse); geschraubte Verbindungen müssen eine festgelegte Vorspannung aufweisen;
- geometrische Ausrichtung und Durchmesser von Entwässerungslöchern;
- elektrischer Widerstand der Blitzschutzanlage.

6.6 Strukturauslegung

6.6.1 Allgemeiner Auslegungsansatz

Dieser Abschnitt enthält Anforderungen für die analytische und numerische Auslegung einer WEA-Blattstruktur. Die Integrität der Blattstruktur muss überprüft werden und es muss ein annehmbares Sicherheitsniveau nachgewiesen werden. Die Tragfähigkeit und die Betriebsfestigkeit des Rotorblattes müssen durch Berechnungen und/oder Prüfungen nachgewiesen werden.

In der vorliegenden Norm sind Anforderungen beschrieben, die einem deterministischen Ansatz entsprechen und unter Anwendung der Methode der Grenzzustandsanalyse nach ISO 2394 aufgestellt wurden.

Alternativ dazu ist eine auf der Zuverlässigkeit basierende Auslegung mit einem wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatz zulässig, die zu anderen Sicherheitsbeiwerten führen kann, als hier beschrieben. Wird der auf der Zuverlässigkeit basierende Ansatz verwendet, muss das Ausfallrisiko definiert und dokumentiert werden, wobei nach ISO 2394 als Leitfaden vorgegangen werden darf. Falls anstelle der Auslegung mit Sicherheitsbeiwerten nach der vorliegenden Norm eine Zuverlässigkeitsschätzung durchgeführt wird, muss das Zuverlässigkeitsmodell mindestens die Veränderlichkeit und die Unsicherheiten berücksichtigen, die in dieser Norm mit Teilsicherheitsbeiwerten beschrieben sind.

Die folgenden Abschnitte beziehen sich auf den Nachweis nach der Methode der Grenzzustandsanalyse.

Die Lasten für den Tragfähigkeitsnachweis nach den Festlegungen in IEC 61400-1 sind wie folgt definiert:

$$F_d = \gamma_f F_k$$

Dabei ist

F_d der Auslegungswert für die Last;

γ_f der Teilsicherheitsbeiwert für Lasten;

F_k der charakteristische Wert für die Last.

Nach IEC 61400-1 müssen die folgenden vier Arten des Nachweises durchgeführt werden, wenn für die Grenzzustandsanalyse der Tragfähigkeit erforderlich:

- Tragfähigkeitsnachweis;

- Betriebsfestigkeitsnachweis;
- Stabilitätsnachweis;
- Nachweis kritischer Verformungen (einschließlich Grenzfläche zwischen Rotorblatt und Turm usw.).

Darüber hinaus muss bei der Überprüfung des Laminates der Zwischenfaserbruch bewertet werden. Für diese Bewertung dürfen charakteristische Lasten F_k herangezogen werden (d. h. $\gamma_f = 1,0$).

Jede Nachweisart erfordert eine andere Formulierung der Grenzzustandsfunktion und berücksichtigt andere Unsicherheitsquellen durch die Verwendung von Sicherheitsbeiwerten. In den nachfolgenden Abschnitten werden die vier Nachweisarten bezogen auf WEA-Rotorblätter beschrieben.

Der Grad der Modellierung und des Nachweises muss an die betrachteten Ausfallarten, Werkstoffe und Einzelheiten der Struktur angepasst sein.

Bei allen Nachweisen müssen in den Strukturmodellen Mittelwerte für die Steifigkeit des Werkstoffes (Modul) verwendet werden. Unsicherheiten des Moduls werden durch Teilsicherheitsbeiwerte für Werkstoffe wie anwendbar für die Nachweisart berücksichtigt.

6.6.2 Strukturanalyse

6.6.2.1 Tragfähigkeitsnachweis

Für den Tragfähigkeitsnachweis müssen alle zu wertenden Ausfallarten der Blattstruktur unter Anwendung von Auslegungslasten überprüft werden. Dazu gehören unter anderem die Ausfallarten des Faser- und Zwischenfaserbruches.

Zwischenfaserbruch, Delaminierungsfehler oder Versagen der Klebeverbindung können zwischen aneinander angrenzenden Lagen, Kernen oder Klebstoffen aufgrund von Schubspannungen aus der Lagenebene heraus und Normalspannungen aus der Lagenebene heraus auftreten. Diese Ausfallarten treten in der Regel bei Auslegungseinzelheiten wie Übergängen der Dicke, Schraubverbindungen, Klebeverbindungen usw. auf und sollten berücksichtigt werden.

Ein Versagen der Werkstoffe des Sandwichkerns kann infolge von Zug-, Druck und Scherbelastungen auftreten. Diese Ausfallarten sollten berücksichtigt werden.

6.6.2.2 Betriebsfestigkeitsnachweis

Sämtliche Betriebsfestigkeitsnachweise müssen mit Auslegungswerten für Lasten durchgeführt werden.

Die Ausfallart für die Betriebsfestigkeit ist die lokale Schadensakkumulation (nach dem zutreffenden Akkumulationsmodell für eine Schädigung durch Betriebslasten) zusätzlich zu den Schäden, die durch die Betriebsfestigkeit des lokalen Werkstoffes während einer kürzeren Dauer als der Auslegungslebensdauer der Struktur zulässig sind.

Der Gesamtschaden darf mit der linearen Schadensakkumulation in Faserrichtung nach Palmgren und Miner ermittelt werden. In diesem Fall muss aus der verfügbaren charakteristischen Wöhlerkurve ein spannungs- oder dehnungsbasiertes Dauerfestigkeitsdiagramm erstellt werden. Aus dem Dauerfestigkeitsdiagramm muss die charakteristische Zyklenzahl bis zum Versagen für jede angewendete Verformungsbedingung (Amplitude und mittlere Stärke) entnommen werden. Die Anzahl der erwarteten Zyklen bis zum Versagen für die angewendeten Dehnungen/Spannungen muss ermittelt werden.

Der spannungs- oder dehnungsbasierte Nachweis darf durch Verfahren der Bruchmechanik ersetzt werden.

Die Berechnung der Betriebsfestigkeit darf auf schadensäquivalente Lasten, Markov-Matrizen oder Lastzeitreihen gestützt werden.

Der Betriebsfestigkeitsnachweis darf auf einem schadenstoleranten Ansatz basieren:

- Eine bestimmte Ausfallart der Betriebsfestigkeit darf zulässig sein, wenn nachgewiesen werden kann, dass der Schaden aufgrund dieser Ausfallart die strukturelle Integrität des Rotorblattes während dessen Auslegungslbensdauer nicht anderweitig gefährdet (z. B. statischer Bruch, übermäßige Verformung).
- Wenn eine Ausfallart als zulässig bewertet wird, müssen Folgeausfallarten bewertet werden. Die fortschreitende Entwicklung und die Wechselwirkung von Ausfallarten müssen berücksichtigt werden.
- Falls eine bestimmte Ausfallart in einer Ausfallfolge die strukturelle Integrität beeinträchtigt, muss die Struktur so ausgelegt werden, dass die vorangegangene Ausfallart nicht zu einem Fortschreiten führt.

Die Schadenstoleranz einer Folge von Ausfallarten muss durch Schadensentwicklungsnachweise sowie die Prüfung von Teilkomponenten oder des gesamten Rotorblattes sowohl bei statischen als auch dynamischen Lastbedingungen geprüft werden.

6.6.2.3 Stabilitätsnachweis

Stabilitätsnachweise müssen Auswirkungen sowohl der globalen als auch der lokalen Stabilität einbeziehen.

Globales Beulen bezieht sich auf einen Stabilitätsverlust eines vollständigen Bauteils oder Elements (z. B. Beulen von Oberflächen) und muss bewertet werden. Es findet statt, wenn eine geringe Lastzunahme zu einer starken und unbeständigen Zunahme der Verformung führt und damit das Aufnahmevermögen weiterer Lasten begrenzt wird.

Der Nachweis muss auf analytische oder numerische Methoden, eine experimentelle Prüfung oder eine Kombination daraus gestützt werden.

Die allgemeinen Auslegungskriterien für das Beulen basieren auf IEC 61400-1. Die die Hauptlast tragenden Strukturen (z. B. Holmgurte, Holmstege, Vorderkantenholme) müssen nachweislich frei von Beulen sein, wenn die Struktur den Auslegungslasten ausgesetzt wird.

Eine lokale Instabilität bezieht sich auf ein Bauteil (z. B. Faltenbildung oder Kräuseln der Deckschicht des Sandwichelements) und muss bewertet werden.

6.6.2.4 Nachweis kritischer Verformungen

Der Verformungsnachweis muss nach IEC 61400-1 durchgeführt werden, in der auch die entsprechenden Auslegungslastfälle und Teilsicherheitsbeiwerte definiert sind.

Der Wert γ_m für den Nachweis kritischer Verformungen nach den Festlegungen in IEC 61400-1 muss 1,1 sein, um die Unsicherheit der vorhergesagten globalen Steifigkeit und die Abweichungen unter den Rotorblättern zu berücksichtigen, wenn keine andere Begründung erfolgt.

Wenn die Elastizitätseigenschaften durch eine experimentelle Prüfung des Rotorblattes nachgewiesen wurden und die Kriterien von 6.6.3.2 erfüllt werden, darf γ_m ohne eine weitere Begründung auf 1,05 verringert werden.

Wenn die Beständigkeit der Steifigkeit des Rotorblattes durch Prüfungen der Blattverformung an mehreren gleichen oder ähnlichen Blattarten, die ein besseres Verhalten zeigen, statistisch nachgewiesen wird, darf γ_m auf Werte unter 1,05 verringert werden aber nicht unter 1,00.

Der Wert für γ_n muss in jedem Fall 1,0 betragen.

6.6.3 Nachweisanforderungen

6.6.3.1 Auflösung des Modells

Die Auflösung des für die Strukturanalyse des Rotorblattes verwendeten Modells in Längsrichtung und in Sehnenrichtung muss mindestens den nachfolgenden Angaben entsprechen.

Auflösung in Längsrichtung

Es muss eine ausreichende Anzahl von Abschnitten in Längsrichtung betrachtet werden.

Der Nachweis muss mindestens 12 Querschnitte entlang der Blattlänge (Längsrichtung) umfassen.

Der Abstand in Längsrichtung zwischen den überprüften Abschnitten darf nicht größer sein als die einfache kleinste Sehnenlänge für den gegebenen Abschnitt von der Wurzel bis zur größten Profelsehne.

Für Abschnitte von der größten Profelsehne bis zu 85 % der Blattlänge darf der Abstand in Längsrichtung zwischen den überprüften Abschnitten nicht größer sein als die doppelte kleinste Sehnenlänge für diesen Abschnitt.

Auflösung in Sehnenrichtung

Die Modellierung jedes Abschnittes muss mit einer ausreichend feinen Auflösung in Sehnenrichtung erfolgen. Die Auflösung darf an den durchgeführten Nachweis angepasst werden.

6.6.3.2 Validierung des globalen Modells durch Prüfung

Für eine Zertifizierung wird ein allgemeiner Nachweis der Auslegung durch einen Vergleich mit bei der experimentellen Prüfung des Rotorblattes erzielten Ergebnissen durchgeführt. Dazu gehört mindestens:

- ein Vergleich der berechneten und der gemessenen Werte;
- eine Bewertung der Messergebnisse.

Abweichungen von höchstens $\pm 7\%$ für die globale Verformung durch Biegen an der am weitesten außen liegenden Belastungsstelle, $\pm 5\%$ für die ersten Eigenfrequenzen in den beiden Hauptrichtungen und $\pm 10\%$ für die axiale Dehnung sind bei Lastpegeln der nach **IEC 61400-23** durchgeführten Prüfungen ohne weitere Begründung zulässig.

6.6.3.3 Validierung von Nachweismodellen und -verfahren

Die beim Auslegungsnachweis verwendeten Modelle und die zugrunde gelegten Annahmen wirken sich auf die Unsicherheit der berechneten Ergebnisse aus.

Diese Unsicherheiten werden bei den einzelnen Nachweisen durch Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt. Die Validierung numerischer/analytischer Modelle für eine spezifische Auslegung darf auf den Vergleich der numerischen/analytischen Modellierung mit Prüfergebnissen, die mit vergleichbaren Auslegungskonzepten erzielt wurden, gestützt werden. Die Auswahl von Teilsicherheitsbeiwerten hängt vom Umfang der Validierung der Modelle ab. Die Korrelation mit einer Prüfung unter Anwendung von Dehnungsmessstreifen in Längsrichtung erlaubt nur eine Verringerung der Teilsicherheitsbeiwerte für Laminat, bei dem eine Belastung in Längsrichtung in Übereinstimmung mit der Lage des Dehnungsmessstreifens vorherrscht. Die Teilsicherheitsbeiwerte für vorherrschend quer oder mehraxial belastete Strukturen werden nicht herabgesetzt. Für den spezifischen Nachweis und die Auswahl von Teilsicherheitsbeiwerten wird eine Validierung der entsprechenden Modelle durchgeführt. Für FE-Modelle oder ähnliche numerische Modelle dürfen als Übereinstimmungskriterium die Grenzwerte in 6.6.3.2 angewendet werden.

Für die Validierung von Modellen darf das geprüfte und für den Vergleich benutzte Rotorblatt eine ähnliche Auslegung aufweisen mit einer ausreichend repräsentativen Konstruktion und Belastung wie das auszulegende und/oder zu zertifizierende Rotorblatt.

6.6.3.4 Prüfungen auf Zwischenebenen

Zur Begründung verringerter Teilsicherheitsbeiwerte dürfen Prüfungen auf einer Zwischenebene (z. B. Ebene der Bauteile und Elemente oder der Teilkomponenten nach **Bild 3**) oder als Prüfung des gesamten Rotorblattes durchgeführt werden. Zu solchen Merkmalen gehören unter anderem Faltenbildung, Klebefugen, eingebettete Bolzen, T-Nutenschrauben und Stufungen (Ply-drops).

Zusätzlich zur genaueren Darstellung von Blatteinzelheiten als bei Couponprüfungen erlauben Prüfungen auf Zwischenebenen eine größere Anzahl von Prüfungen, als sie mit Prüfungen des gesamten Rotorblattes möglich sind, und ermöglichen damit:

- statistisch relevante Datensätze mit einem zusätzlichen Einblick in die Streuung der Ergebnisse;
- Prüfungen unter verschiedenen Umgebungsbedingungen;
- Vergleichsprüfungen verschiedener Strukturlösungen.

Um die geringsten Teilsicherheitsbeiwerte zu erzielen, sollten Prüfungen im Idealfall auf der Basis der tatsächlichen Randbedingungen durchgeführt werden. Zum Nachweis von Modellierungsergebnissen und um das geforderte Vertrauen in die Modellierung zu erlangen, dürfen jedoch vereinfachte Randbedingungen angewendet werden.

6.6.4 Teilsicherheitsbeiwerte für Werkstoffe

6.6.4.1 Definitionen

Der Teilsicherheitsbeiwert für Werkstoffe berücksichtigt die den faserverstärkten Kunststoffen, laminierten Sandwichstrukturen, Klebverbindungen, Verfahren und der Lastauflösung eigenen Veränderlichkeiten und Unsicherheiten. Um diesen Rechnung zu tragen, müssen speziell für jede Werkstoffart und -kombination Werkstoffbeiwerte aufgestellt werden. Dazu wird eigens ein zuverlässigkeitsbasiertes Prüfprogramm oder ein empirischer Ansatz verwendet. Für einen empirischen Ansatz müssen entsprechende Teilsicherheitsbeiwerte angewendet werden wie die folgenden:

$$\gamma_m = \gamma_{m0} \gamma_{m1} \gamma_{m2} \gamma_{m3} \gamma_{m4} \gamma_{m5}$$

Dabei ist

- γ_{m0} = der „Basis“-Werkstoffbeiwert (in alle Nachweise einzubeziehen);
- γ_{m1} = der Beiwert für den umweltbedingten Abbau (irreversible Wirkungen);
- γ_{m2} = der Beiwert für Temperatureffekte (reversible Wirkungen);
- γ_{m3} = der Beiwert für herstellungsbedingte Effekte;
- γ_{m4} = der Beiwert für die Berechnungsgenauigkeit und Validierung des Verfahrens;
- γ_{m5} = der Beiwert für die Beschreibung der Last.

Der Konstrukteur darf einen alternativen empirischen Ansatz definieren (einschließlich von entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten), sofern der Ansatz durch einen geeigneten Nachweis begründet wird, der ein gleichwertiges Sicherheits- und Zuverlässigkeitsniveau erfüllt, wie es durch den im vorliegenden Dokument beschriebenen Ansatz aufgestellt wird.

Ein zuverlässigkeitsbasiertes Prüfprogramm muss mindestens die Variablen einbeziehen, die in den empirischen Ansatz nach dem vorliegenden Dokument enthalten sind, und es darf auf IEC 61400-1 gestützt werden.

Werte für den jeweiligen Teilsicherheitsbeiwert für Werkstoffe sind in den nachfolgenden Abschnitten angegeben. Ein allgemeiner Grundsatz ist, dass alle Ausfallarten und zugehörigen Unsicherheiten bei der Überführung der Werkstoffeigenschaften auf das Rotorblatt im Herstellungszustand bei der Auswahl berücksichtigt werden müssen. Alle Anpassungen der Teilsicherheitsbeiwerte γ_{m0} bis γ_{m5} müssen vom Konstrukteur dokumentiert werden und eine Gesamtsicherheit und -zuverlässigkeit der Auslegung sicherstellen, die mit der Sicherheit und Zuverlässigkeit vergleichbar ist, die mit den nachfolgenden Werten erzielt wird.

6.6.4.2 γ_{m0} - Basis-Werkstoffbeiwert

Für sämtliche Festigkeits- und Stabilitätsnachweise ist der Basis-Werkstoffbeiwert γ_{m0} :

$$\gamma_{m0} = 1,20$$

Dieser Beiwert bezieht Unsicherheiten ein, die von anderen Sicherheitsbeiwerten nicht berücksichtigt werden.

γ_{m0} kann verringert werden, um $\gamma_n > 1,0$ zu kompensieren, sodass die kombinierten Wirkungen von γ_{m0} und γ_n nicht über 1,20 steigen.

6.6.4.3 γ_{m1} - Beiwert für den umweltbedingten Abbau (irreversible Wirkungen)

Der Teilsicherheitsbeiwert für umweltbedingte Wirkungen berücksichtigt die irreversible und langfristige Verschlechterung von Werkstoffeigenschaften im Vergleich zu den Anfangseigenschaften. Diese Wirkungen dürfen unter anderem umfassen:

- langfristiger Abbau, der durch Temperaturänderungen verursacht wird;
- chemische Alterung und chemischer Abbau;
- UV-Strahlung (falls zutreffend);
- Luftfeuchte und Salzmassenkonzentration;
- äußere chemische Einflüsse;
- Abhängigkeit der Steifigkeit von der Dauerfestigkeit;
- Abhängigkeit der Steifigkeit von Kriechen und Spannungsrelaxation.

Bei der Auslegung müssen die entsprechenden umweltbedingten Beiwerte für das Rotorblatt festgelegt werden. Wenn Prüfungen durchgeführt werden, sollte die Prüfung von Werkstoffen so durchgeführt werden, dass die Wirkungen dieser Beiwerte einbezogen werden. In der Regel werden in die Prüfung kombinierte Abbaueffekte durch Extremwerte von Temperatur und Feuchtigkeit oder langfristige Wirkungen von Temperaturänderungen einbezogen.

6.6.4.4 γ_{m2} - Beiwert für Temperatureffekte (reversible Wirkungen)

Der Teilsicherheitsbeiwert für Temperaturen berücksichtigt reversible und kurzzeitige Änderungen der Werkstofffestigkeit und der Steifigkeit bei veränderlichen Betriebstemperaturen und deren Veränderlichkeit und Unsicherheiten der Basiseigenschaften des Laminates.

6.6.4.5 γ_{m3} - Beiwert für herstellungsbedingte Effekte

Bei allen Nachweisen berücksichtigt der Teilsicherheitsbeiwert für herstellungsbedingte Effekte die Beeinflussung der Festigkeit durch Fertigungstoleranzen und Unsicherheiten des Rotorblattes im Herstellungszustand bezogen auf die Struktur im Idealzustand oder auf Auslegungswerte auf der Basis von Prüfungen von Teilkomponenten oder Werkstoffproben.

Es gibt drei Elemente für den Nachweis von Fertigungsleitsystemen:

- Bestimmung der Fertigungstoleranzen. Diese dürfen nach der besten branchenüblichen Praxis ermittelt werden oder speziell für die betreffende Struktur auf der Basis von Prozessvalidierung und Messungen bestimmt werden. Die verminderte Unsicherheit, die sich aus repräsentativen Versuchen ergibt, spiegelt sich im resultierenden Teilsicherheitsbeiwert wider.
- Lenkung qualitätskritischer Herstellungsmerkmale. Die während der Auslegung durchgeführte Spezifikation qualitätskritischer Herstellungsmerkmale, die für jedes gefertigte Produkt gemessen und aufgezeichnet werden, führt zu einer geringeren Unsicherheit. Dazu gehören die Anerkennung der Werkstoffe und eine Wareneingangskontrolle.

- Werkstoffverhalten an den Toleranzgrenzen. Die Beschreibung des Werkstoffes und des Verhaltens repräsentativer Teilstrukturen an den festgelegten Toleranzgrenzen führt zu einer stark verminderten Unsicherheit. Das spiegelt sich im Teilsicherheitsbeiwert wider.

Toleranzsummierung muss interpretiert werden als die Eigenschaften des Werkstoffes an den Grenzen aller Toleranzen und nicht als das Produkt einzelner Zuschläge.

Beim Nachweis von herstellungsbedingten Effekten muss das Vertrauensniveau berücksichtigt werden im Zusammenhang mit:

- Prüfverfahren;
- Fertigungskontrollen;
- Fertigungserfahrung, wenn sie durch messbare Prozessfähigkeiten dokumentiert ist (Dauer, Bedingungen, Schutz).

LEITFADEN – Abweichungsfolgenabschätzung

Dieser Abschnitt enthält Bestimmungen für die Bewertung der Widerstandsfähigkeit und Wiederholpräzision festgestellter kritischer Herstellungsprozesse bei der Bewertung der Auslegung des Rotorblattes.

Für die Bestimmung der Höhe von γ_{m3} sollte der Konstrukteur die bei den kritischen Herstellungsprozessen für eine bestimmte Komponente oder Baugruppe zulässigen Toleranzen quantitativ angeben.

Dafür kann es erforderlich sein, eine oder eine Kombination mehrerer der grundlegenden Toleranzen zu betrachten.

Bei der Bestimmung der grundlegenden Toleranz für einen bestimmten Herstellungsprozess sollte der Konstrukteur Folgendes bewerten:

- mögliche Abweichungen (mit dem Betrag) vom Herstellungsprozess;
- Nachweisbarkeit der Abweichungen;
- Herabsetzung des Strukturverhaltens aufgrund von Abweichungen.

Wenn der Konstrukteur den geringsten Wert für γ_{m3} übernimmt, muss der Nachweis des Strukturverhaltens mit einem Prüfprogramm zur Bestimmung der Werkstoffeigenschaften durchgeführt werden.

Für das Prüfprogramm müssen Proben verwendet werden, die die größten bei der Bewertung des Prozesses festgestellten Abweichungen und die Belastungsfolgen, die die kritischen Auslegungszustände darstellen, verkörpern. Es ist nicht verbindlich vorgeschrieben, die Auswirkung jeder Toleranz durch Prüfung nachzuweisen, wenn es ausreichende Nachweise dafür gibt, dass einige Toleranzen nicht erheblich sind oder durch einen Nachweis bewertet werden können.

Beim Ansatz nach der analytischen Methode müssen die größten bei der Bewertung des Prozesses festgestellten Abweichungen und die Belastungsfolgen, die die kritischen Auslegungszustände darstellen, berücksichtigt werden. Es ist nicht verbindlich vorgeschrieben, die Auswirkung jeder Toleranz quantitativ anzugeben, wenn es ausreichende Nachweise dafür gibt, dass einige Toleranzen nicht erheblich sind.

Die nachfolgende Tabelle darf als Vorlage für die Ermittlung typischer herstellungsbedingter Effekte (γ_{m3}) für spezifische Nachweise der Strukturauslegung angewendet werden.

Art der zu bewertenden Fertigungstoleranz Für den Nachweis von:	Fehlausrichtung der Faser/Ausrichtung/Falten	Faservolumenanteil	Porengehalt	Aushärtungsgrad/ T_g Mischungsverhältnis des Harzes	Anordnung (Lücken, Überlappungen)	Vorbereitung und Schutz der Klebefläche	Dicke der Klebefuge	klebstofffreie Kantenform	klebeoffene Zeit
Tragfähigkeit des Laminates									
Betriebsfestigkeit des Laminates									
Zwischenfaserbruch									
Tragfähigkeit des Sandwichkerns									
Globales Beulen									
Lokales Beulen									
Tragfähigkeit der Klebeverbindung									
Betriebsfestigkeit der Klebeverbindung									
Mechanische Befestigung (Tragfähigkeit und Betriebsfestigkeit)									
Nichtstrukturelle Merkmale									

ENDE DES LEITFADENS

6.6.4.6 γ_{m4} - Beiwert für die Berechnungsgenauigkeit und Validierung des Verfahrens

Der Teilsicherheitsbeiwert für die Berechnungsmethode muss Unsicherheiten berücksichtigen, die sich auf das verwendete Nachweisverfahren beziehen. Der Sicherheitsbeiwert muss die Genauigkeit des Nachweises und die Vollständigkeit von dessen Überprüfung betrachten.

Bei der Bewertung der Betriebsfestigkeit von Laminaten werden für den Beiwert für die Berechnung und Validierung zwei Komponenten berücksichtigt:

γ_{m4} ist das Produkt von γ_{m4a} und γ_{m4b} :

- γ_{m4a} ist der Beiwert für die Validierung des Modells: Die Korrelation von verwendeten Vorhersagemodellen verringert die Unsicherheit der Auslegung.

- γ_{m4b} ist der Beiwert für das Betriebsfestigkeitsmodell: Die Verwendung von Betriebsfestigkeitseigenschaften unterstützt von dynamischen Prüfungen und komplexen Schadensakkumulationsmodellen verringert die Unsicherheit.

6.6.4.7 γ_{m5} - Beiwert für die Beschreibung der Last

Dieser Teilsicherheitsbeiwert berücksichtigt Unsicherheiten in Bezug auf die Auflösung und die Kombination der jeweils angewendeten Lastkomponenten.

Im einfachsten Fall dürfen Lasten, die mit einem positiven und einem negativen Extremwert von zwei senkrecht zueinander verlaufenden Richtungen (z. B. Kleinstwert und Größtwert in Lotrichtung und Kleinstwert und Größtwert in Sehnenrichtung) in insgesamt vier Lastgruppen aufgelöst werden, einzeln angewendet werden.

Ein Nachweis von Rotorblättern mit Lastzwischenrichtungen und kombinierten Belastungsereignissen ergibt eine bessere Darstellung und rechtfertigt damit geringere Teilsicherheitsbeiwerte.

Bei der Bewertung der Betriebsfestigkeit von Laminaten werden für den Beiwert für die Auflösung von Lastkomponenten zwei Komponenten berücksichtigt:

γ_{m5} ist das Produkt von γ_{m5a} und γ_{m5b} :

- γ_{m5a} ist der Beiwert für die Auflösung der Lastrichtung;
- γ_{m5b} ist der Beiwert für die Formulierung der Betriebsfestigkeit.

6.6.5 Nachweis der Strukturauslegung

6.6.5.1 Anforderungen an den Nachweis

Die folgenden Strukturnachweise müssen durchgeführt werden:

Nachweise für das Laminat:

- Tragfähigkeit des Laminates;
- Betriebsfestigkeit des Laminates;
- Zwischenfaserbruch;
- Tragfähigkeit des Sandwichkerns.

Stabilitätsnachweis:

- globales Beulen;
- lokales Beulen.

Nachweis der Klebeverbindung:

- Berechnung der Tragfähigkeit der Klebeverbindung;
- Berechnung der Betriebsfestigkeit der Klebeverbindung.

Komponenten:

- Tragfähigkeit und Betriebsfestigkeit der mechanischen Befestigungselemente;
- nichtstrukturelle Merkmale.

Die nachfolgenden Abschnitte enthalten eine eingehende Beschreibung dieser Nachweise.