

Inhalt

	Seite
Vorwort	2
Einleitung	9
1 Anwendungsbereich	10
2 Normative Verweisungen	10
3 Begriffe und Vereinbarungen	12
3.1 Begriffe	12
3.2 Vereinbarungen	15
4 Symbole, Abkürzungen und Einheiten	17
4.1 Symbole und Einheiten	17
4.2 Abkürzungen	22
5 Zuverlässigkeitsgerechter Entwurf (Design for Reliability)	23
5.1 Betriebslebensdauer und Zuverlässigkeit	23
5.2 Entwurfsprozess	24
5.3 Dokumentation	26
5.4 Qualitätsplan	27
6 Betriebsbedingungen für den Antriebsstrang und Belastungen am Antriebsstrang	27
6.1 Beschreibung des Antriebsstranges	27
6.1.1 Allgemeines	27
6.1.2 Definition der Schnittstellen	27
6.1.3 Festgelegte Anforderungen über Schnittstellen hinaus	28
6.2 Ableitung der Belastungen des Antriebsstranges	28
6.2.1 Belastungssimulationsmodell für Windenergieanlagen	28
6.2.2 Berechnungen der Belastung von Windenergieanlagen	29
6.2.3 Zuverlässigkeit von Lastannahmen	29
6.3 Ergebnisse der Belastungsberechnungen für Windenergieanlagen	30
6.3.1 Allgemeines	30
6.3.2 Zeitreihen	30
6.3.3 Betriebsfestigkeit	30
6.3.4 Extremlasten	31
6.4 Betriebsbedingungen	31
6.4.1 Allgemeines	31
6.4.2 Umgebungsbedingungen	31
6.4.3 Betriebsstrategien	32
6.5 Analyse des Antriebsstranges	32
7 Entwurf, Auslegungsdaten und Herstellungsanforderungen für das Getriebe	33
7.1 Getriebekühlung	33
7.2 Stirnräder	33

	Seite
7.2.1	Betrachtungen zur Zuverlässigkeit von Stirnrädern 33
7.2.2	Stirnradauslegung 33
7.2.3	Kraffaktoren 35
7.2.4	Werkstoffe für Stirnräder 37
7.2.5	Unter der Oberfläche beginnende Ermüdung 37
7.2.6	Stirnradverzahnungsqualität..... 37
7.2.7	Stirnradherstellung 38
7.3	Lager..... 39
7.3.1	Allgemeines 39
7.3.2	Betrachtungen zur Zuverlässigkeit von Lagern..... 39
7.3.3	Anforderungen an die Stahlqualität für Lager 39
7.3.4	Allgemeine Betrachtungen zum Entwurf 40
7.3.5	Schnittstellenanforderungen für Lager 43
7.3.6	Entwurfsaspekte für Lager 44
7.3.7	Lagerschmierung 46
7.3.8	Auslegungsberechnung..... 48
7.4	Wellen, Passfedern, Gehäuseverbindungen, Keilwellen und Schrauben..... 51
7.4.1	Wellen..... 51
7.4.2	Verbindungen zwischen Welle und Nabe 51
7.4.3	Flexible Keilwellen 52
7.4.4	Wellendichtungen 52
7.4.5	Schrauben 52
7.4.6	Sprengringe (Federringe)..... 53
7.5	Strukturelemente 53
7.5.1	Einleitung 53
7.5.2	Zuverlässigkeitsbetrachtungen..... 54
7.5.3	Verformungsanalyse 54
7.5.4	Festigkeitsnachweis 54
7.5.5	Bewertung der statischen Festigkeit 56
7.5.6	Bewertung der Betriebsfestigkeit..... 59
7.5.7	Werkstoffprüfungen 64
7.5.8	Dokumentation 64
7.6	Schmierung 65
7.6.1	Allgemeine Betrachtungen 65
7.6.2	Schmierstoffart 66
7.6.3	Schmierstoffkennwerte..... 66
7.6.4	Schmierverfahren 68
7.6.5	Ölmenge 69
7.6.6	Betriebstemperaturen..... 69

	Seite	
7.6.7	Temperaturregelung.....	70
7.6.8	Zustandsüberwachung des Schmierstoffes.....	71
7.6.9	Schmierstoffreinheit	71
7.6.10	Schmierstofffilter	72
7.6.11	Anschlüsse	72
7.6.12	Ölstandsanzeige	73
7.6.13	Magnetfilter	73
7.6.14	Entlüftung	73
7.6.15	Durchflusssensoren	74
7.6.16	Wartungsfähigkeit	74
8	Verifizierung der Konstruktion	74
8.1	Allgemeines	74
8.2	Prüfungsplanung	74
8.2.1	Bestimmen der Prüfungskriterien.....	74
8.2.2	Neue Konstruktionen oder wesentliche Änderungen.....	75
8.2.3	Gesamtprüfungsplan.....	75
8.2.4	Spezifische Prüfungspläne	75
8.3	Werkstatt-Prototypprüfung	76
8.3.1	Allgemeines	76
8.3.2	Prüfung von Komponenten	76
8.3.3	Werkstattprüfung eines Prototypgetriebes.....	76
8.3.4	Prüfung des Schmierungssystems	77
8.4	Feldprüfung	77
8.4.1	Allgemeines.....	77
8.4.2	Validierung von Belastungen	77
8.4.3	Typprüfung des Getriebes in der Windenergieanlage	79
8.5	Fertigungsprüfungen	79
8.5.1	Abnahmeprüfung.....	79
8.5.2	Schallemissionsprüfung	79
8.5.3	Schwingprüfung	79
8.5.4	Betrachtungen zum Schmierungssystem	79
8.5.5	Systemtemperatur.....	79
8.6	Prüfung der Widerstandsfähigkeit.....	80
8.7	Temperatur und Reinheit von Schmierstoffen	80
8.8	Lagerspezifische Validierung	80
8.8.1	Entwurfsüberprüfung.....	80
8.8.2	Verifizierung/Validierung des Prototyps	80
8.9	Prüfdokumentation	81
9	Betriebs-, Kundendienst- und Wartungsanforderungen	81

	Seite
9.1 Kundendienst- und Wartungsanforderungen	81
9.2 Inspektionsanforderungen	82
9.3 Inbetriebnahme und Einlauf	82
9.4 Transport, Handhabung und Lagerung	82
9.5 Reparatur	82
9.6 Montage und Austausch	82
9.7 Zustandsüberwachung	83
9.8 Schmierstoff	83
9.8.1 Anforderungen an den Öltyp	83
9.8.2 Schmierungssystem	83
9.8.3 Ölprüfung und -analyse	83
9.9 Betriebs- und Wartungsdokumentation	83
Anhang A (informativ) Beispiele für die Spezifikation von Schnittstellen und Belastungen des Antriebsstranges	84
Anhang B (informativ) Betrachtungen zum Entwurf und zur Herstellung von Getrieben	96
Anhang C (informativ) Betrachtungen zur Getriebeauslegung	99
Anhang D (informativ) Betrachtungen zu Strukturelementen von Getrieben	126
Anhang E (informativ) Empfehlungen für die Leistungsfähigkeit von Schmierstoffen in Windenergieanlagenanwendungen	129
Anhang F (informativ) Dokumentation der Verifizierung des Entwurf	145
Anhang G (informativ) Dokumentation der Lagerberechnung	149
Literaturhinweise	157
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	162
 Bilder	
Bild 1 – Wellenbezeichnung in dreistufigen Getrieben mit parallelen Wellen	15
Bild 2 – Wellenbezeichnung in dreistufigen Getrieben mit einer Planetenstufe	16
Bild 3 – Wellenbezeichnung in dreistufigen Getrieben mit zwei Planetenstufen	17
Bild 4 – Ablaufplan des Entwurfsprozesses	25
Bild 5 – Beispiele für die Auswahlkriterien für Lager	40
Bild 6 – Blindmontage eines Lagers	46
Bild 7 – Definition der Stützzahl $n_{pl,\sigma}$ eines gekerbten Bauteils	57
Bild 8 – Idealisierte elastisch-plastische Spannungs-Dehnungs-Kurve	58
Bild 9 – Synthetische Wöhler-Kurve (abgeleitet von Haibach, 2006)	62
Bild A.1 – Modularer Antriebsstrang	84
Bild A.2 – Modularer Antriebsstrang mit Dreipunktlagerung	85
Bild A.3 – Integrierter Antriebsstrang	85
Bild A.4 – Referenzsystem für einen modularen Antriebsstrang	87
Bild A.5 – Rückansicht eines Antriebsstranges	88

	Seite
Bild A.6 – Referenzsystem für einen modularen Antriebsstrang mit Dreipunktlagerung	89
Bild A.7 – Referenzsystem für einen integrierten Antriebsstrang.....	90
Bild A.8 – Beispiel für eine Rainflow-Klassifizierung nach Lastfällen.....	92
Bild A.9 – Beispiel für die Last-Drehzahl-Verteilung (LRD).....	93
Bild C.1 – Verringerung der Last-Bins durch Zusammenfassung benachbarter Last-Bins	100
Bild C.2 – Index der verbrauchten Lebensdauer (<i>CLI</i>).....	103
Bild C.3 – Verteilung der Zeitanteile.....	103
Bild C.4 – Auswirkungen des Spiels und der Vorspannung auf die Druckverteilung in Radialkugellagern (aus Brandlein u. a., 1999).....	105
Bild C.5 – Bezeichnungssystem für die Lagerradien	106
Bild C.6 – Spannungsverteilung über der elliptischen Kontaktfläche.....	108
Bild C.7 – Beispiele für Fest- und Loslageranordnungen.....	117
Bild C.8 – Beispiele für Festlageranordnungen.....	117
Bild C.9 – Beispiele für die Aufnahme von axialen Verschiebungen	117
Bild C.10 – Beispiele für Stützlageranordnungen	118
Bild C.11 – Beispiele für paarweise Lageranordnungen	118
Bild D.1 – Ausfallstellen für einen lokalen Ausfall (A) und einen globalen Ausfall (B)	127
Bild D.2a) – Die Grenzdehnung ϵ_{lim} wird vor der plastischen Belastungsgrenze erreicht.....	127
Bild D.2b) – Die plastische Belastungsgrenze wird vor der Grenzdehnung ϵ_{lim} erreicht.....	127
Bild D.2 – Lokaler und globaler Ausfall an zwei verschiedenen Kerbradien.....	127
Bild D.3 – Haigh-Diagramm für die Bewertung des Einflusses der Mittelspannung (Haibach, 2006)	128
Bild E.1 – Viskositätsanforderungen in Abhängigkeit von der Teilkreisgeschwindigkeit	130
Bild E.2 – Prüfvorrichtung für die Bewertung der Filtrierbarkeit	139
Bild E.3 – Beispiel für eine Schaltungsanordnung eines kombinierten Filter- und Kühlsystems.....	143
 Tabellen	
Tabelle 1 – Im vorliegenden Dokument benutzte Symbole.....	18
Tabelle 2 – Abkürzungen.....	22
Tabelle 3 – Lastaufteilungsfaktor K_γ für Planetenstufen	35
Tabelle 4 – Geforderte Stirnradqualität	38
Tabelle 5 – Temperaturgradienten für die Berechnung des Betriebsspiels	44
Tabelle 6 – Temperatur des Lagerschmierstoffes zur Berechnung des Viskositätsverhältnisses κ	47
Tabelle 7 – Leitwerte für die maximale Kontaktpressung bei der Miner-Summe der äquivalenten dynamischen Lagerbelastung	50
Tabelle 8 – Mindestsicherheiten für die verschiedenen Verfahren	51
Tabelle 9 – Teilsicherheiten für Werkstoffe	56
Tabelle 10 – Teilsicherheiten γ_m für synthetische Wöhler-Kurven für Gusseisen	63
Tabelle 11 – Empfohlene Reinheitsklassen	71
Tabelle A.1 – Elemente des Antriebsstranges und lokale Koordinatensysteme.....	86

	Seite
Tabelle A.2 – Abmessungen der Schnittstellen für Elemente des Antriebsstranges	87
Tabelle A.3 – Schnittstellenanforderungen für einen modularen Antriebsstrang	88
Tabelle A.4 – Schnittstellenanforderungen für einen modularen Antriebsstrang mit Dreipunktlagerung	89
Tabelle A.5 – Schnittstellenanforderungen für einen integrierten Antriebsstrang	90
Tabelle A.6 – Technische Daten und erforderliche Beschreibungen der Auslegungsbelastung	91
Tabelle A.7 – Beispiel für eine Rainflow-Matrix	92
Tabelle A.8 – Beispiel für die Verteilung der Belastungsdauer (LDD).....	94
Tabelle A.9 – Beispiel für eine Extremlastmatrix	95
Tabelle B.1 – Empfohlene Oberflächenrauheit der Verzahnung	97
Tabelle C.1 – Leitwerte für die nominelle Lebensdauer L_{h10} für die Vorauswahl von Lagern	99
Tabelle C.2 – Statische Lastfaktoren für Radiallager	104
Tabelle C.3 – Lagerarten für zusammengesetzte Lasten mit beidseitig wirkenden Axiallasten	113
Tabelle C.4 – Lagerarten für zusammengesetzte Lasten mit einseitig wirkenden Axiallasten	114
Tabelle C.5 – Lagerarten für reine Radiallasten.....	115
Tabelle C.6 – Lagerarten für Axiallasten	116
Tabelle C.7 – Legende zur Lagerauswahl	119
Tabelle C.8 – Lagerauswahl: langsamlaufende Welle (LSS)/Planetenträger	121
Tabelle C.9 – Lagerauswahl: langsamlaufende Zwischenwelle (LSIS).....	122
Tabelle C.10 – Lagerauswahl: schnelllaufende Zwischenwelle (HSIS)	123
Tabelle C.11 – Lagerauswahl: schnelllaufende Welle (HSS).....	124
Tabelle C.12 – Lagerauswahl: Planetenlager.....	125
Tabelle D.1 – Typische Werkstoffeigenschaften	126
Tabelle E.1 – Viskositätsgrad bei Betriebstemperatur für Öle mit $VI = 90$	131
Tabelle E.2 – Viskositätsgrad bei Betriebstemperatur für Öle mit $VI = 120$	132
Tabelle E.3 – Viskositätsgrad bei Betriebstemperatur für Öle mit $VI = 160$	133
Tabelle E.4 – Viskositätsgrad bei Betriebstemperatur für Öle mit $VI = 240$	134
Tabelle E.5 – Genormte Prüfverfahren für die Bewertung der Schmierstoffe für Windenergieanlagen (Frischöl).....	136
Tabelle E.6 – Nicht genormte Prüfverfahren für die Bewertung der Leistungsfähigkeit von Schmierstoffen (Frischöl).....	137
Tabelle E.7 – Leitfaden für die Grenzwerte von Schmierstoffparametern.....	141
Tabelle F.1 – Dokumentation der Entwurfsvalidierung und -verifizierung (1 von 4).....	145