



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

**Master Thesis**

**Studiendepartment Maschinenbau und Produktion**

**Qualitätssicherung bei der Produktion von  
Windenergieanlagen durch Prüfungen an den  
Hauptkomponenten und der Maschinengondel**

**Stefan Pieper**

**13. Januar 2011**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1	Aufgabenstellung . . . . .	6
1.2	Vorgehensweise . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Windenergieanlagen</b>	<b>9</b>
2.1	Grundlagen . . . . .	9
2.1.1	Geschichte der Windenergienutzung . . . . .	9
2.1.2	Physikalisch-technische Grundlagen . . . . .	10
2.1.3	Aufbau und Bauformen einer Windenergieanlage . . . . .	11
2.1.4	Windparks . . . . .	12
2.2	Schäden an Windenergieanlagen . . . . .	14
2.3	Systemanalyse . . . . .	16
2.3.1	Rotorblatt . . . . .	16
2.3.2	Rotornabe . . . . .	17
2.3.3	Rotorblattverstellung . . . . .	18
2.3.4	Rotorlager . . . . .	19
2.3.5	Rotorwelle . . . . .	21
2.3.6	Getriebe . . . . .	21
2.3.7	Generator . . . . .	22
2.3.8	Maschinenträger . . . . .	23
2.3.9	Windrichtungsnachführung . . . . .	24
2.3.10	Turm . . . . .	25
2.3.11	Frequenzumrichter . . . . .	26
2.3.12	Transformator . . . . .	27
2.3.13	Mittelspannungsschaltanlage . . . . .	28
2.3.14	Sonstige Komponenten . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Qualitätssicherung an Windenergieanlagen</b>	<b>30</b>
3.1	Grundlagen und Begriffe . . . . .	30
3.1.1	Qualitätsmanagement . . . . .	30
3.1.2	Qualitätssicherung . . . . .	31
3.1.3	Qualitätsprüfung . . . . .	31
3.1.4	Zertifizierung von Windenergieanlagen . . . . .	32
3.2	Qualitätsprüfungen an Grundelementen . . . . .	34
3.2.1	Wälzlager . . . . .	34
3.2.2	Zahnräder und Zahnradgetriebe . . . . .	35
3.2.3	Schweißnähte . . . . .	36
3.2.4	Schraubverbindungen . . . . .	37
3.2.5	Gussteile . . . . .	37
3.2.6	Schmiedestücke . . . . .	38
3.3	Qualitätsprüfungen an mechanischen Komponenten der Windenergieanlage . . . . .	40
3.3.1	Rotorblatt . . . . .	40
3.3.2	Rotornabe . . . . .	42
3.3.3	Rotorlager . . . . .	42

3.3.4	Rotorwelle . . . . .	43
3.3.5	Getriebe . . . . .	43
3.3.6	Maschinenträger . . . . .	45
3.3.7	Turm . . . . .	45
3.4	Qualitätsprüfungen an elektrischen Komponenten der Windenergieanlage . . . . .	48
3.4.1	Generator . . . . .	48
3.4.2	Frequenzumrichter . . . . .	50
3.4.3	Transformator . . . . .	51
3.4.4	Mittelspannungsschaltanlage . . . . .	53
3.5	Qualitätsprüfungen an Teilsystemen der Windenergieanlage . . . . .	56
3.5.1	Antriebsstrang . . . . .	56
3.5.2	Rotorblattverstellung . . . . .	58
3.5.3	Windrichtungsnachführung . . . . .	59
3.5.4	Gondel . . . . .	60
<b>4</b>	<b>Studie zur Qualitätssicherung bei Herstellern von Windenergieanlagen</b>	<b>63</b>
4.1	Vorgehensweise . . . . .	63
4.2	Teilnehmer der Studie . . . . .	63
4.3	Ergebnisse der Hersteller- und Zuliefererbefragung . . . . .	64
4.3.1	Rotorblatt . . . . .	64
4.3.2	Rotornabe . . . . .	65
4.3.3	Rotorblattverstellung . . . . .	66
4.3.4	Rotorlager . . . . .	68
4.3.5	Rotorwelle . . . . .	70
4.3.6	Getriebe . . . . .	70
4.3.7	Generator . . . . .	72
4.3.8	Frequenzumrichter . . . . .	73
4.3.9	Transformator . . . . .	75
4.3.10	Schaltanlage . . . . .	76
4.3.11	Maschinenträger . . . . .	76
4.3.12	Windrichtungsnachführung . . . . .	77
4.3.13	Turm . . . . .	79
4.3.14	Gondel . . . . .	80
4.3.15	Antriebsstrang . . . . .	80
4.4	Ergebnisse der Befragung von Zertifizierungsstellen . . . . .	81
4.5	Zusammenfassung . . . . .	82
<b>5</b>	<b>Qualitätssicherung bei Betreibern von Windenergieanlagen</b>	<b>84</b>
5.1	Allgemeines . . . . .	84
5.2	Präqualifizierung von Windenergieanlagen-Typen . . . . .	84
5.2.1	Ziele der Präqualifizierung . . . . .	84
5.2.2	Bedingungen für eine Präqualifizierung . . . . .	85
5.2.3	Zusammenfassung des Präqualifizierungsprozesses und zeitlicher Ablauf . . . . .	87
5.3	Projektbezogene Qualitätssicherung bei Windenergieanlagen . . . . .	88
5.3.1	Ziele der projektbezogenen Qualitätssicherung . . . . .	88
5.3.2	Nachweis von Qualitätsmerkmalen durch Prüfzeugnisse . . . . .	88
5.3.3	Werksabnahmen von Komponenten und der Gondel vor Auslieferung . . . . .	89
5.3.4	Überprüfung von spezifizierten und gelieferten Komponenten . . . . .	89
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>90</b>
6.1	Fazit . . . . .	90
6.2	Ausblick . . . . .	91

---

<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>93</b>
A.1	Übersicht über verwendete Normen . . . . .	93
A.2	Checkliste für die Präqualifizierung von Anlagentypen . . . . .	95
A.3	Ergänzende Diagramme der Herstellerbefragung . . . . .	106

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Windpark in Niedersachsen mit Anlagen von Enercon [26]	6
1.2	Vorgehensweise und Arbeitsschritte der Master Thesis	7
2.1	Enercon E126 in Estinnes, Belgien [21]	10
2.2	Aufbau einer Windenergieanlage [25]	12
2.3	Durchschnittliche Verfügbarkeit für verschiedene Leistungs- und Standortklassen [15]	14
2.4	Häufigkeit verschiedener Ursachen für Schäden und Reparaturen [15]	14
2.5	Häufigkeit der Schäden und typische Ausfallzeiten nach Schadenseintritt [15]	15
2.6	Rotorblatt für eine 5 MW Anlage von REpower [20]	16
2.7	Rotornabe hergestellt von der Meuselwitz Guss Eisengießerei GmbH [17]	17
2.8	System zur Rotorblattverstellung (links) und Windrichtungsnachführung (rechts) der Firma Bosch-Rexroth [8]	18
2.9	Pendelrollenlager zur Lagerung der Rotorwelle der Firma NKE [9]	19
2.10	Rotorwelle mit Lagerung bei der Nordex N80 [14]	20
2.11	Getriebe Redulus GPV von Bosch-Rexroth [7]	21
2.12	Generator von ABB [3]	23
2.13	Schematischer Aufbau der Windrichtungsnachführung [27]	24
2.14	Mittelspannungs-Frequenzumrichter PCS 6000 von ABB [4]	27
2.15	Gießharztransformator der Firma SGB [19]	28
3.1	Zeitliche Positionierung der Prüfungen im Entwicklungs- und Produktionsprozess	31
3.2	Zertifizierung von Windenergieanlagen gemäß IEC 61400-22 [2]	33
3.3	Informationen über Schleifbrand	36
3.4	Rotorblattprüfstand beim Fraunhofer IWES in Bremerhaven [12]	40
3.5	Belastung bei der Rotorblattprüfung	41
3.6	Informationen über Wärmefluss-Thermographie	43
3.7	Prüfstand für Getriebe von Windenergieanlagen der Firma ZF [28]	45
3.8	Messung des Ausbreitmaß von Frischbeton	46
3.9	Elektrischen Typen- und Stückprüfungen am Generator	48
3.10	Prüfungen an Frequenzumrichtern nach IEC 60146-1-1	51
3.11	Spannungsprüfungen an Transformatoren nach IEC 60076-3	52
3.12	Stückprüfungen an Transformatoren nach IEC 60076-1	53
3.13	Schematische Darstellung eines Antriebsstrangprüfstands	56
3.14	Informationen zum Highly Accelerated Life Test	57
3.15	Geplanter Gondelprüfstand beim Fraunhofer IWES in Bremerhaven [11]	58
3.16	Zahnräder und Wälzlager im Getriebemotor einer Rotorblattverstellung [18]	59
4.1	Typprüfungen am Rotorblatt	64
4.2	Herstellungsprüfungen am Rotorblatt	65
4.3	Typprüfung an der Rotornabe	65
4.4	Herstellungsprüfungen an der Rotornabe	66
4.5	Typprüfungen an der Rotorblattverstellung	67
4.6	Prüfungen an elektrischen Systemen zur Rotorblattverstellung	67
4.7	Prüfungen an hydraulischen Systemen zur Rotorblattverstellung	68

4.8	Prüfungen am Rotorblattlager . . . . .	68
4.9	Typprüfungen am Rotorlager . . . . .	69
4.10	Herstellungsprüfungen am Rotorlager . . . . .	69
4.11	Funktionsprüfungen am Rotorlager . . . . .	69
4.12	Typprüfungen an der Rotorwelle . . . . .	70
4.13	Typprüfungen am Getriebe . . . . .	71
4.14	Prüfungen an den Zahnrädern im Getriebe . . . . .	71
4.15	Funktionsprüfungen am Getriebe . . . . .	72
4.16	Typprüfungen am Generator . . . . .	72
4.17	Herstellungsprüfungen am Generator . . . . .	73
4.18	Funktionsprüfungen am Generator . . . . .	73
4.19	Typprüfungen am Umrichter . . . . .	74
4.20	Prüfungen am Kühlsystem vom Umrichter . . . . .	74
4.21	Funktionsprüfungen am Umrichter . . . . .	75
4.22	Typprüfungen am Transformator . . . . .	75
4.23	Prüfungen am Kühlsystem vom Transformator . . . . .	76
4.24	Funktionsprüfungen am Transformator . . . . .	76
4.25	Funktionsprüfungen an der Schaltanlage . . . . .	77
4.26	Allgemeine Herstellungsprüfungen am Maschinenträger . . . . .	77
4.27	Prüfungen an Schweißnähten am Maschinenträger . . . . .	78
4.28	Prüfungen an Schraubverbindungen am Maschinenträger . . . . .	78
4.29	Typprüfungen an der Windrichtungsnachführung . . . . .	78
4.30	Funktionsprüfungen an der Windrichtungsnachführung . . . . .	79
4.31	Herstellungsprüfungen am Turm . . . . .	79
4.32	Prüfungen bei Betoneinsatz am Turm . . . . .	79
4.33	Funktions- und Montageprüfungen an der montierten Gondel . . . . .	80
4.34	Prüfung der Sicherheitsfunktionen an der montierten Gondel . . . . .	80
4.35	Prüfungen auf einem Antriebsstrangprüfstand . . . . .	81
5.1	Bedingungen für eine Präqualifizierung von Windenergieanlagen . . . . .	87
6.1	Zusammenhang zwischen Kosten und Einsparungen durch Qualitätssicherung . . . . .	92
A.1	Herstellungsprüfungen an der Rotorwelle . . . . .	107
A.2	Prüfungen an der Lagerung im Getriebe . . . . .	107
A.3	Prüfungen am Generatorlager . . . . .	108
A.4	Herstellungsprüfungen an Gussteilen im Maschinenträger . . . . .	108
A.5	Prüfungen an verzahnten Bauteilen für die Windrichtungsnachführung . . . . .	109
A.6	Prüfungen am Lager der Windrichtungsnachführung . . . . .	109
A.7	Prüfungen an Schweißnähten am Turm . . . . .	109
A.8	Prüfungen an Schraubverbindungen am Turm . . . . .	110
A.9	Prüfungen an den Schweißnähten der montierten1 Gondel . . . . .	110
A.10	Prüfungen an Schraubverbindungen an der montierten2 Gondel . . . . .	110

# 1 Einleitung

## 1.1 Aufgabenstellung

Windenergieanlagen sind im Betrieb besonders vielfältigen dynamischen Belastungen ausgesetzt. Dies hat zur Folge, dass die einzelnen Bauteile der Windenergieanlage hohen dynamischen Beanspruchungen standhalten müssen. Qualitätsmängel jeglicher Art der Bauteile, können zu einem Versagen und Ausfall der Windenergieanlage führen. Für den Betreiber verursachen die notwendigen Reparaturen, Wartungsarbeiten und der damit verbundene Ausfall der Stromproduktion hohe Kosten. Beim Hersteller der Anlagen fallen Kosten für die Gewährleistung an. Ziel einer sorgfältigen Qualitätssicherung, bereits während der Entwicklung und Produktion der Anlagen, ist die Entdeckung von Qualitätsmängeln und damit die Reduzierung von Kosten.



Abb. 1.1: Windpark in Niedersachsen mit Anlagen von Enercon [26]

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Konzepte für entwicklungs- und produktionsbegleitende Prüfungen entwickelt werden, nach denen die Hersteller von Windenergieanlagen und deren Zulieferer ihr Produkt und die einzelnen Komponenten auf die Erfüllung der Qualitätsanforderungen testen können. Dabei sind insbesondere Prüfungen von Interesse, die die speziellen Anforderungen und Belastungen nachempfinden, die bei einem Einsatz in Windenergieanlagen auftreten.

Die einzelnen Komponenten der Windenergieanlage werden zumeist von unterschiedlichen Zulieferern gefertigt und anschließend beim Hersteller zusammengebaut. Zwischen den einzelnen Herstellern von Windenergieanlagen und deren Zulieferern gibt es dabei bedeutende Unterschiede im Niveau der Qualitätssicherung. Ein weiterer Teil dieser Arbeit ist die Durchführung einer Erhebung, welche Prüfungen bei den Herstellern von Windenergieanlagen aktuell durchgeführt werden.

Ziel der Arbeit ist die Zusammenstellung von verschiedenen Qualitätsprüfungen, deren Durchführung ein Betreiber von Windenergieanlagen, vor der Inbetriebnahme, von den Herstellern verlangen kann. Zudem sollen Kriterien aufgezeigt werden anhand derer man Hersteller von Windenergieanlagen, im Hinblick auf die Qualität, vergleichen kann, und nach denen eine Präqualifizierung von Windenergieanlagen möglich ist.

## 1.2 Vorgehensweise

Eine graphische Abbildung der Vorgehensweise in dieser Arbeit ist in Abbildung 1.2 dargestellt. Nach einer Einarbeitung in das Themengebiet Windenergieanlagen wird zunächst eine Systemanalyse durchgeführt. Im Rahmen der Systemanalyse wird das System Windenergieanlage in die wesentlichen Komponenten zerlegt, für die anschließend mögliche Qualitätsprüfungen aufgeführt werden sollen. Die Systemgrenzen sind dabei der Turmfuß bei den mechanischen Komponenten und die Mittelspannungsschaltanlage bei den elektrischen Komponenten. Für die einzelnen Komponenten werden Funktion, Fehlermöglichkeiten und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem herausgearbeitet.

In den anschließenden Arbeitsschritten werden dann mögliche Qualitätsprüfungen recherchiert. Dabei sollen alle Phasen des Produktionsprozesses bis zur Inbetriebnahme betrachtet werden. Dazu gehören Prüfungen an Prototypen, die bereits während der Entwicklungsphase durchgeführt werden, Prüfungen zur Überwachung der Herstellung und Prüfungen die am fertig hergestellten Produkt ausgeführt werden, um die ordnungsgemäße Funktion sicherzustellen.

Zunächst werden diese Qualitätsprüfungen für Grundelemente, wie Wälzlager, Zahnräder oder Gussteile, die in mehreren Komponenten verbaut sind, aufgeführt, anschließend für alle weiteren in der Systemanalyse betrachteten Komponenten und Teilsysteme. Bei der Recherche nach möglichen Prüfungen werden auch Vorgaben aus Normen und Zertifizierungsrichtlinien mit einbezogen.

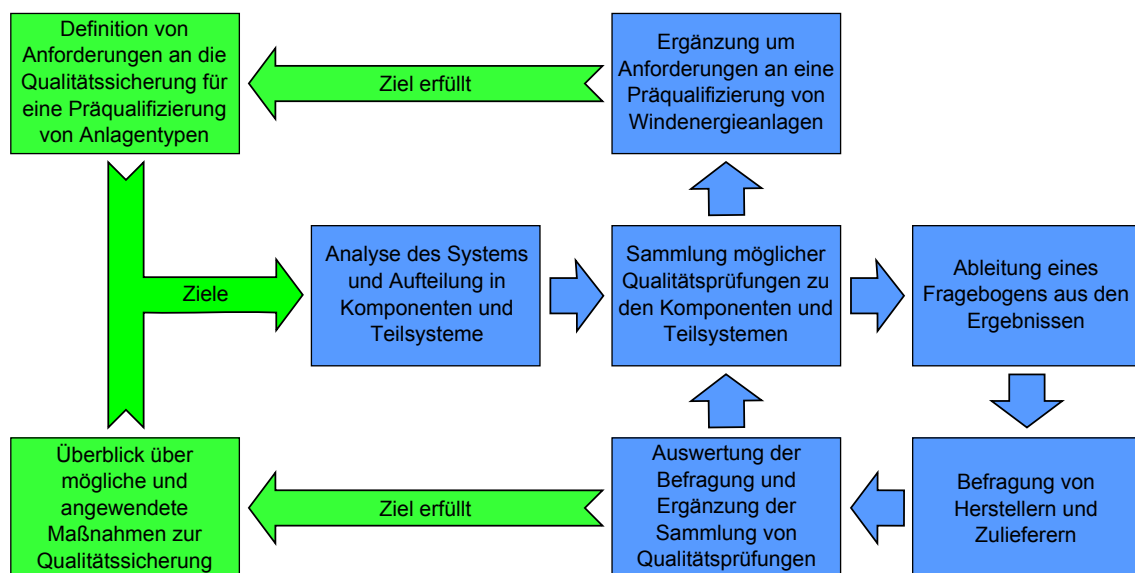


Abb. 1.2: Vorgehensweise und Arbeitsschritte der Master Thesis

Zusätzlich wird bei den Herstellern und Zulieferern der Windindustrie mit Hilfe eines Fragebogens, der gegliedert nach den Komponenten alle möglichen Prüfungen beinhaltet, eine Erhebung durchgeführt. Die Hersteller sollen den Fragebogen, den Prüfungen entsprechend, die bei ihnen durchgeführt werden, ausfüllen. Auf diese Weise wird ermittelt und bewertet, auf welchem Niveau



eine Qualitätssicherung ausgeübt wird und an welchen Stellen Verbesserungspotential besteht. Zusätzlich bietet der Fragebogen die Möglichkeit, die vorher recherchierten Prüfungen umfassend zu ergänzen.

Im letzten Teil dieser Arbeit werden die Ergebnisse der Recherche und Erhebung auf die Sichtweise eines Käufers und Betreibers von Windenergieanlagen projiziert. Dafür wird ein Präqualifizierungsprozess entwickelt, der Anforderungen definiert, die sicherstellen, dass präqualifizierte Windenergieanlagen ein Mindestniveau an Qualität erfüllen. Zusätzlich wird aufgeführt, welche Kontrollen durch Dokumentenprüfung und Werksabnahmen ein Käufer oder Betreiber von Windenergieanlagen durchführen sollte, um die Qualität der gelieferten Anlagen zu prüfen.

## 2 Windenergieanlagen

Grundlage zur Festlegung der Prüfungen, die einer Qualitätssicherung dienen, ist ein umfassendes Verständnis vom Aufbau einer Windenergieanlage. Dieses Kapitel beschreibt zunächst die theoretischen Grundlagen der Windenergienutzung und die Funktionsweise und den Aufbau einer Windenergieanlage. Abschließend wird das System Windenergieanlage bezüglich der Hauptelemente analysiert. Hier gilt es, die Komponenten mit ihrer Funktionsweise zu beschreiben und Fehlermöglichkeiten aufzuzeigen.

### 2.1 Grundlagen

#### 2.1.1 Geschichte der Windenergienutzung

Die Windenergie ist eine der ältesten, durch den Menschen genutzten, Energieformen. Wann zum ersten Mal Windmühlen eingesetzt wurden, lässt sich nicht genau festlegen. Bereits um 1750 v. Chr. werden die ältesten Windmühlen in Babylon vermutet. Andere Quellen weisen darauf hin, dass im Jahr 644 in Persien Windmühlen mit vertikaler Drehachse eingesetzt wurden [14, S. 2]. Einsatzzweck der damaligen Windmühlen war vermutlich als Mahlwerk für Getreide. Die ersten Windmühlen mit horizontaler Drehachse entstanden wahrscheinlich im 12. Jahrhundert in Europa [14, S. 3]. Auch dort wurden sie zum Mahlen von Getreide eingesetzt. Zusätzlich wurden in Holland vom Wind angetriebene Schöpfwerke zur Trockenlegung und Entwässerung verwendet.

Die ersten Windenergieanlagen zur Stromerzeugung wurden gegen Ende des 19. Jahrhunderts in Dänemark von Poul La Cours<sup>1</sup> entwickelt [24]. Motivation war die Versorgung der ländlichen Gebiete mit der neu entdeckten Energieform Elektrizität. Im Gegensatz zu den Großstädten gab es dort noch keine flächendeckende Elektrifizierung und der Einsatz von Windenergieanlagen zur Stromerzeugung versprach eine lokale Lösung. Mit den, besonders nach dem Ersten Weltkrieg, fallenden Preisen für fossile Treibstoffe und der flächendeckenden Installation von Stromnetzen, verschwand das Interesse an Windenergieanlagen zur Stromerzeugung jedoch zunehmend. In der Zeit bis zur *Energiekrise* 1973 gab es in verschiedenen Ländern immer wieder Versuche zur Stromerzeugung aus Windenergie, jedoch kamen diese über den Status eines Prototypen nicht hinaus. Die Versorgung mit elektrischer Energie wurde und wird auch heute noch in erster Linie durch konventionelle und nukleare Kraftwerke sichergestellt.

Erst als im Laufe der 1970er Jahre der Rohölpreis innerhalb weniger Monate auf ein Vielfaches anstieg und die Abhängigkeit von den erdölexportierenden Ländern immer deutlicher wurde, begann in den westlichen Staaten die Suche nach alternativen Energiequellen. In diesem Rahmen wurde auch die Forschung und Entwicklung von Windenergieanlagen zur Stromerzeugung wieder aufgenommen. Staatliche Förderprogramme, unter anderem in den USA, Kanada, Dänemark und Deutschland, unterstützten zunächst den Bau von Anlagen im Megawatt-Leistungsbereich [14, S. 45]. Aufgrund von Materialproblemen kamen diese *großen* Anlagen jedoch nicht über den Einsatz als Versuchsanlage hinaus. Eine kommerzielle Nutzung von Anlagen im Megawatt-Bereich setzte sich erst Ende der 1990er Jahre durch. Kommerziell erfolgreich, unter anderem durch staatliche Subventionen, waren zunächst die kleineren Anlagen. In den 1980er Jahren spezialisierten sich in Dänemark einige kleinere und mittlere Unternehmen auf den Bau derartiger Anlagen. Es entstanden auch die ersten kleineren Windparks.

<sup>1</sup>dänischer Meteorologe, \* 13. April 1846 in Jütland, † 24. April 1908 in Askov



Abb. 2.1: Enercon E126 in Estinnes, Belgien [21]

Den Durchbruch in Deutschland schaffte die Windenergie in den 1990er Jahren. Durch das Stromeinspeisungsgesetz von 1991 wurden die Stromnetz-Betreiber zur Abnahme des erzeugten Stroms verpflichtet, 2001 wurde diese Entwicklung mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) noch einmal verstärkt [22]. Parallel zu dieser Entwicklung stieg auch die Leistung der neu entwickelten Anlagen immer weiter. Im Jahr 2010 ist die Windenergieanlage mit der zur Zeit höchsten Nennleistung von 6 bis 7,5 MW die E-126 der Firma Enercon (siehe Abbildung 2.1). Verschiedene Hersteller und Forschungseinrichtungen arbeiten jedoch bereits an Anlagen in noch höheren Leistungsbereichen [5].

## 2.1.2 Physikalisch-technische Grundlagen

### 2.1.2.1 Leistungsaufnahme

Windenergieanlagen sind in ihrer Hauptfunktion zunächst Energiewandler, die einen Teil der kinetischen Energie der bewegten Luftmassen, also den Wind, in mechanische Arbeit an der Rotorwelle umwandeln. Die kinetische Energie des Windes, der senkrecht durch die Fläche einer Windenergieanlage strömt, lässt sich mit folgender Formel beschreiben:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} A \rho v^3 t \quad (2.1)$$

Die entsprechende Leistung lässt sich dann folgendermaßen darstellen:

$$P_{Wind} = \frac{\Delta E_{kin}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 = \frac{1}{2} A \rho v^3 \quad (2.2)$$

Die Leistung, die ein idealisierter Windenergiekonverter dem Windstrom entziehen kann, entspricht der Leistungsdifferenz des Luftstromes vor und hinter der Windenergieanlage.

$$P_{mech} = \frac{1}{2} A_1 \rho_1 v_1^3 - \frac{1}{2} A_2 \rho_2 v_2^3 = \frac{1}{2} \dot{m}_1 v_1^2 - \frac{1}{2} \dot{m}_2 v_2^2 \quad (2.3)$$

Da durch die Kontinuitätsbedingung der Massenstrom der Luft erhalten bleiben muss, kann die mechanische Arbeit nur durch eine Verringerung der Windgeschwindigkeit erzeugt werden:

$$P_{mech} = \frac{1}{2} \dot{m} v_1^2 - \frac{1}{2} \dot{m} v_2^2 = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.4)$$

Da die Abströmgeschwindigkeit  $v_2$  nicht zu Null werden kann, in diesem Fall müsste auch die Anströmgeschwindigkeit  $v_1$  zu Null werden, muss es ein optimales Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten geben, bei dem die Leistung maximal wird. Albert Betz<sup>2</sup> war der Erste, der sich ausführlich mit der Aerodynamik von Windrotoren beschäftigte. Betz untersuchte den Zusammenhang zwischen dem Leistungsbeiwert  $c_p$  (Verhältnis der mechanischen Leistung des Wandlers zu der Leistung des ungestörten Luftstromes) und verschiedenen Verhältnissen von Ab- zu Anströmgeschwindigkeit und wies nach, dass  $c_p$  maximal 0,593 werden kann [6]. Dieser sogenannte ideale Leistungsbeiwert wird bei einem Verhältnis von  $\frac{1}{3}$  von Ab- zu Anströmgeschwindigkeit erreicht und häufig als *Betz-Faktor* oder *Betzscher Wert* bezeichnet.

Der *Betz-Faktor* stellt die physikalische Grenze für die mechanische Leistungsentnahme aus einer Strömung dar und gilt für eine ideale reibungsfreie Strömung unabhängig von der Bauart des Wandlers. Bei realen Anlagen wird dieser maximale Wert für  $c_p$ , unter anderem durch Reibungsverluste, jedoch nicht erreicht. Zudem hängt er, wie oben bereits beschrieben, von der Geschwindigkeit ab. Die mechanische Leistung an der Rotorwelle wird somit zu:

$$P_{mech} = c_p(v) \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.5)$$

Um die elektrische Leistung hinter dem Generator zu erhalten, ist die mechanische Leistung mit dem Wirkungsgrad des Generators (und ggf. des Getriebes) zu multiplizieren:

$$P_{el} = \eta c_p(v) \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.6)$$

### 2.1.2.2 Bauarten von Windenergieanlagen

Generell werden bei Windenergieanlagen zwei grundsätzliche Bauarten unterschieden:

- **Widerstandsläufer:** Die Luft trifft senkrecht auf eine Widerstandsfläche. Genutzt wird nur die sich ergebende Luftwiderstandskraft und keine Auftriebskräfte.
- **Auftriebsnutzende Rotoren:** Hier sind Rotorblätter so gestaltet, dass sich bei Anströmung eine Auftriebskraft ergibt, analog zu den Verhältnissen an einem Flugzeugtragflügel.

Widerstandsläufer erreichen einen maximalen Leistungsbeiwert von  $c_p \approx 0,2$ , also nur rund ein Drittel des idealen Leistungsbeiwertes [16, S. 291]. Auftriebsnutzende Rotoren können hier deutlich höhere Leistungsbeiwerte erreichen. Moderne Dreiblattwindenergieanlagen erreichen heute im optimalen Betriebsbereich Werte bis zu 0,47 [16, S. 283]. Beim Bau von heutigen kommerziellen betriebenen Windenergieanlagen spielen Widerstandsläufer daher keine bedeutende Rolle mehr. Aus diesem Grund wird sich im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf auftriebsnutzende Rotoren beschränkt.

### 2.1.3 Aufbau und Bauformen einer Windenergieanlage

Nachdem in der Anfangszeit der kommerziellen Windenergienutzung mit den verschiedensten Anlagenbauarten experimentiert wurde, hat sich inzwischen die in Abbildung 2.2 dargestellte Bauweise durchgesetzt. Diese Bauweise zeichnet sich durch eine horizontal angeordnete Drehachse mit drei Rotorblättern aus.

Durch die Anströmung durch den Wind erfahren die Rotorblätter eine Auftriebskraft die ein Drehmoment an der Rotornabe und der damit verbundenen Rotorwelle erzeugt. Moderne Anlagen besitzen eine Blattverstellung, mit der die Rotorblätter um die Längsachse gedreht werden können. Auf diese Weise, auch als Pitch-Regelung bekannt, lässt sich die Leistung der Anlage den Windverhältnissen entsprechend anpassen. Anlagen mit einer Blattverstellung bezeichnet man auch als *pitch-geregelte* Anlagen.

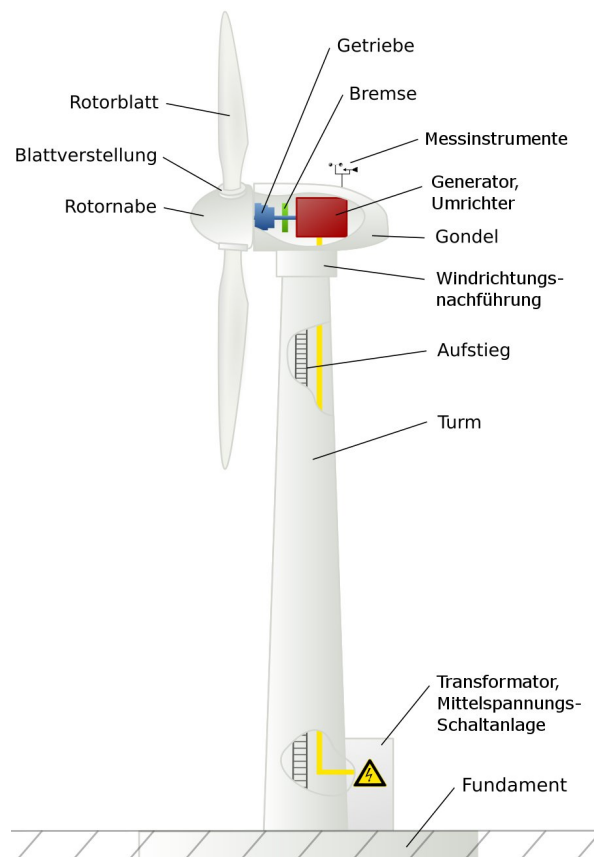


Abb. 2.2: Aufbau einer Windenergieanlage [25]

Anlagen ohne eine Blattverstellung werden auch als *stall-geregelte* Anlagen bezeichnet. Hier sind die Rotorblätter so geformt, dass ab einer bestimmten Anströmgeschwindigkeit ein Strömungsabriss<sup>3</sup> erfolgt. Auf diese Weise wird die Leistung der Anlage und damit die Belastung des Rotors begrenzt. Aktuelle Anlagen sind fast ausschließlich mit einer Pitch-Regelung ausgestattet.

Da die Drehzahl an der Rotorwelle für marktübliche Generatoren zu gering ist, wird sie über ein Getriebe auf die schnelle Generatorwelle übersetzt. Es ist allerdings auch möglich, Anlagen ohne ein Getriebe zu betreiben. Bei diesen sogenannten getriebelosen Anlagen wird jedoch kein herkömmlicher Generator eingesetzt, sondern ein speziell an die Anlage angepasster Ringgenerator, der direkt mit dem Rotor verbunden ist. Über den Generator wird schließlich die mechanische Leistung in elektrische Leistung umgewandelt. Da der, von der Windenergieanlage erzeugte, Drehstrom mit einer konstanten Frequenz, in Europa 50 Hz, ins Stromnetz eingespeist werden muss, wird bei drehzahlvariablen Anlagen ein Frequenzumrichter eingesetzt. Die Spannungstransformation auf in Windparks übliches Mittelspannungsniveau erfolgt dann abschließend über einen Transformator.

### 2.1.4 Windparks

Ein Standort an dem mehrere Windenergieanlagen aufgestellt sind (siehe Abbildung 1.1) wird als Windpark bezeichnet. Besonders in windreichen Regionen werden häufig mehrere Anlagen nebeneinander aufgestellt, um möglichst viel Strom zu erzeugen. Um die gegenseitige Beeinflussung der Windenergieanlagen untereinander zu minimieren, muss jedoch ein bestimmter Abstand, abhängig von Anlagengröße und Hauptwindrichtung, eingehalten werden.

<sup>2</sup>deutscher Physiker, \* 25. Dezember 1885 in Schweinfurt, † 16. April 1968 in Göttingen

<sup>3</sup>englisch: stall

In wirtschaftlicher Hinsicht hat das Betreiben eines Windparks mehrere Vorteile. Zum einen kann die benötigte Infrastruktur zur Netzeinspeisung zentralisiert betrieben und von allen Anlagen genutzt werden. Zum anderen können bei Aufbau und Inbetriebnahme der Anlagen die benötigten Kräne direkt weiterverwendet werden. Auf diese Weise lassen sich die Kosten in erheblichem Maße reduzieren. Für den Netzbetreiber funktioniert der Windpark nach Außen hin wie ein kleines Kraftwerk. Die einzelnen Anlagen sind über ein, in der Erde verlegtes, Mittelspannungsnetz miteinander verbunden und über ein zentrales Umspannwerk wird die erzeugte elektrische Energie ins Hochspannungsnetz eingespeist.

## 2.2 Schäden an Windenergieanlagen

Wie Anfangs bereits erwähnt liegt die Besonderheit bei Windenergieanlagen in den hohen dynamischen Beanspruchungen, denen nahezu alle Komponenten ausgesetzt sind. Im Unterschied zu Gas- oder Dampfturbinen, die im wesentlichen einem sehr gleichmäßigen vorhersagbaren Belastungsprofil ausgesetzt sind, erzeugt der Wind kein gleichmäßiges Antriebsmoment. Dies verursacht hohe Anforderungen an die Bauteilfestigkeit und hat in den Anfangsjahren der Windenergienutzung, den 1970er Jahren, zu vielen Schäden und Problemen mit den Anlagen geführt.

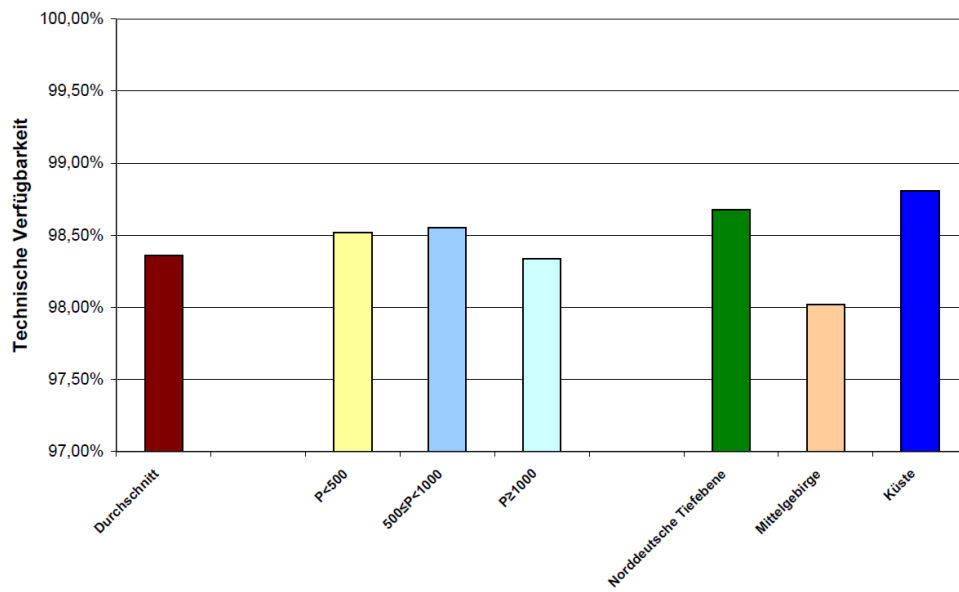


Abb. 2.3: Durchschnittliche Verfügbarkeit für verschiedene Leistungs- und Standortklassen [15]

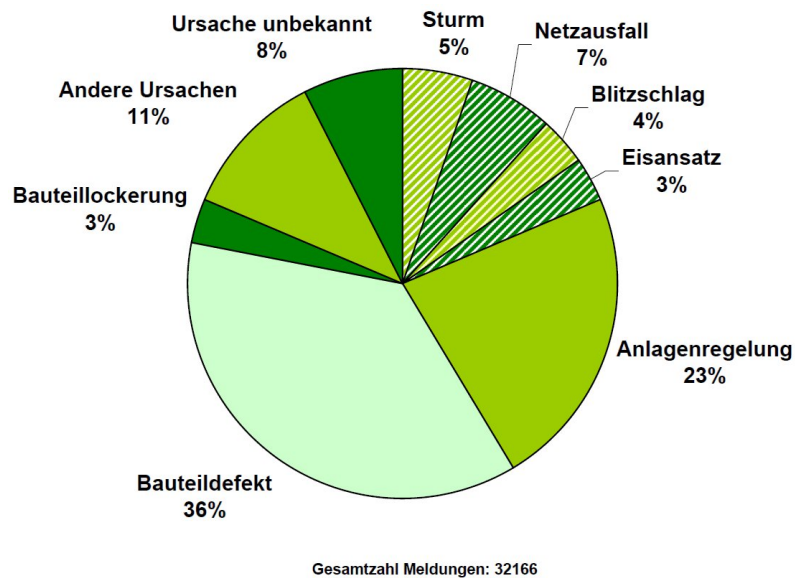


Abb. 2.4: Häufigkeit verschiedener Ursachen für Schäden und Reparaturen [15]

Heutzutage liegt die technische Verfügbarkeit<sup>4</sup> von Windenergieanlagen, wie Abbildung 2.3 zeigt, zwischen 98 und 99 Prozent. Trotzdem treten immer wieder Schäden auf, die einen Ausfall der Anlage zur Folge haben. Die Auswirkungen sind hohe Reparaturaufwände, Ertragsausfälle und damit verbunden zusätzliche Kosten für den Betreiber.

In Abbildung 2.4 ist die Häufigkeit verschiedener Ursachen für Schäden und Reparaturen an Windenergieanlagen dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass ein Großteil der Störungen auf Bauteildefekte und fehlerhafte Anlagenregelung zurückzuführen ist. Externe Einflüsse, wie Sturm, Netzausfall, Blitzschlag oder Eisansatz sind dagegen nur für knapp ein Fünftel der Ausfälle verantwortlich. Dies verdeutlicht, dass durch eine sorgfältige Qualitätssicherung, bei Entwicklung und Herstellung der Komponenten einer Anlage, ein wesentlicher Teil der Ursachen für Ausfälle ausgeschlossen werden kann.

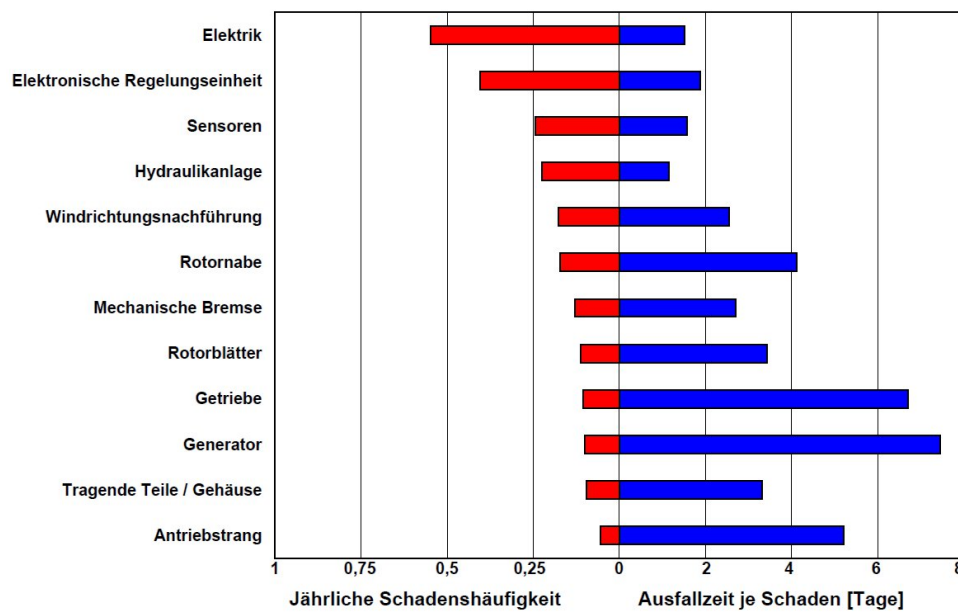


Abb. 2.5: Häufigkeit der Schäden und typische Ausfallzeiten nach Schadenseintritt [15]

Mit welcher jährlichen Häufigkeit einzelne Komponenten einen Ausfall verursachen zeigt Abbildung 2.5. Zudem ist die damit verbundene typische Ausfalldauer dargestellt. Es zeigt sich, dass Schäden an der Elektrik zwar sehr häufig auftreten, jedoch relativ kurzfristig innerhalb von 1 bis 2 Tagen behoben werden können. Probleme innerhalb des Triebstrangs, zum Beispiel am Getriebe oder Generator, treten dagegen deutlich seltener auf, verursachen jedoch wesentlich längere Ausfallzeiten zwischen 5 und 7 Tagen. Betrachtet man das Produkt von Schadenshäufigkeit und Ausfallzeit, so kommt man jedoch in beiden Fällen auf einen ähnlichen Wert. Dies verdeutlicht, dass bei allen Komponenten auf die Erfüllung der spezifizierten Qualitätsanforderungen geachtet werden muss, um die Ausfallraten auf ein Minimum zu reduzieren.

<sup>4</sup>Die technische Verfügbarkeit ist das prozentuale Verhältnis von Verfügbarkeitszeit zu Nennzeit. Die Nennzeit ist die gesamte zusammenhängende Berichtszeitspanne. Die Nichtverfügbarkeitszeit ist die Zeitspanne, in der eine Anlage nicht funktionsfähig war. Sie setzt sich aus einem planmäßigen Anteil (Wartungsarbeiten) und einem außerplanmäßigen Anteil (Störungen, Schäden) zusammen.



## 2.3 Systemanalyse

Im folgenden Kapitel wird das System Windenergieanlage untersucht. Dazu werden die einzelnen Komponenten detailliert beschrieben und ihre Funktion vorgestellt. Anschließend werden Fehlermöglichkeiten und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem aufgezeigt, um die Folgen von Qualitätsmängeln zu verdeutlichen. Die Elemente der Systemanalyse dienen anschließend als Ausgangspunkt für die in Kapitel 3 beschriebenen Qualitätsprüfungen.

### 2.3.1 Rotorblatt

#### 2.3.1.1 Beschreibung und Funktion

Das Rotorblatt ist das Bauteil der Windenergieanlage, dessen Hauptaufgabe darin besteht Auftrieb, und damit eine Rotationsbewegung um die Drehachse, zu erzeugen. Die Wirkungsweise ist analog zu der Funktion des Tragflügels an einem Flugzeug. Durch die Form des Profils und den Anstellwinkel strömt die Luft auf Ober- und Unterseite mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Durch die Unterschiede in der Geschwindigkeit entsteht eine Druckdifferenz zwischen beiden Seiten der Tragfläche, aus der die Auftriebskraft resultiert. Die Auftriebskraft erzeugt dann ein Moment um die Drehachse und damit die Drehbewegung. Durch Änderung des Anstellwinkels mit der in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Rotorblattverstellung kann die resultierende Auftriebskraft beeinflusst werden. Dies ermöglicht eine Leistungsregelung der Anlage.



Abb. 2.6: Rotorblatt für eine 5 MW Anlage von REpower [20]

Bei heutigen Anlagen im Multi-Megawatt-Bereich sind die Rotorblätter ausschließlich Leichtbauteile aus Faserverbundwerkstoffen. In der Regel kommen glasfaserverstärkte Kunststoffe<sup>5</sup> zum Einsatz. Bei sehr großen Rotorblättern werden inzwischen auch kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe<sup>6</sup> eingesetzt. Kohlefasern sind leichter und besitzen eine sehr hohe Festigkeit, jedoch ist ihr Einsatz auch mit deutlich höheren Kosten verbunden. Die meisten Hersteller von Windenergieanlagen besitzen eigene Produktionsstätten für die Fertigung von Rotorblättern. Teilweise werden die Rotorblätter auch von externen Firmen gefertigt.

#### 2.3.1.2 Fehlermöglichkeiten

Die Herstellung von Rotorblättern aus Faserverbundwerkstoffen stellt hohe Anforderungen an die Produktion. Es können verschiedene Fehler auftreten, möglich sind Risse, Lufteinschlüsse, Fehlverklebungen, mangelhafte Tränkung mit Harz oder Delaminationen. Darüber hinaus sind

<sup>5</sup>häufig abgekürzt durch GFK, oder engl. GRP für *Glass-reinforced plastic*

<sup>6</sup>häufig abgekürzt durch CFK, für *Carbon Fiber Komposit*, oder engl. CFRP für *Carbon fiber-reinforced polymer*

die Rotorblätter im Betrieb häufig wechselnden Lasten, wie Wind- und Gewichtskräften ausgesetzt. Hinzu kommen Umwelteinflüsse durch Temperaturschwankungen, UV-Strahlung, Regen und Blitzeinschläge. Diese Faktoren erhöhen die Auftrittswahrscheinlichkeit für Schäden, insbesondere wenn bereits kleine Fehler bei der Herstellung aufgetreten sind.

Die Folgen von Schäden am Rotorblatt reichen von Ertragseinbußen, durch eine verschlechterte Aerodynamik, bis hin zu einem Totalausfall der Anlage. Im schwerwiegendsten Fall, bei einem Bruch des Rotorblatts, kann ein Personenschaden auftreten und besonders hohe Kosten entstehen. Aus diesem Grund ist eine sorgfältige Kontrolle auf eine fehlerfreie Herstellung besonders wichtig.

## 2.3.2 Rotornabe

### 2.3.2.1 Beschreibung und Funktion

Die Rotornabe ist das zentrale Bauteil des Rotors. Hier werden die Rotorblätter befestigt, zudem ist bei den meisten Anlagen das Blattverstellungssystem in die Rotornabe integriert. Auf der Rückseite ist die Rotornabe mit der Rotorwelle verbunden, um die durch den Auftrieb an den Rotorblättern erzeugte mechanische Leistung in den Antriebsstrang zu leiten.



Abb. 2.7: Rotornabe hergestellt von der Meuselwitz Guss Eisengießerei GmbH [17]

Da sich die Kräfte und Momente aus dem Rotor hier nahezu punktförmig treffen, ist die Rotornabe eines der höchst belasteten Bauteile der Windenergieanlage. Bei modernen Anlagen ist die Rotornabe im Regelfall ein Gussteil aus Gusseisen mit Kugelgraphit<sup>7</sup>.

### 2.3.2.2 Fehlermöglichkeiten

Die Rotornabe ist ein Bauteil an dem es nur in seltenen Fällen zu einem Schaden kommt. Bei ausreichender Dimensionierung sind Schäden in den meisten Fällen auf Fertigungsfehler zurückzuführen. Es können Ungängen wie Einschlüsse, Poren oder Lunker, oder Risse in der Oberfläche entstehen, die ab einer ausreichend hohen Belastung zum Bruch führen können. Tritt an der Rotornabe ein Bruch auf, sind die Auswirkungen allerdings entsprechend hoch und immer mit

<sup>7</sup>häufig auch als Sphäroguss bezeichnet, standardisierte Bezeichnung GJS, früher GGG

einem Ausfall der Anlage verbunden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass durch herabstürzende Bauteile der Turm oder Personen zu Schaden kommen. Der hohe Reparaturaufwand und damit verbundene lange Ausfall der Anlage hat dementsprechend hohe Kosten zur Folge.

### 2.3.3 Rotorblattverstellung

#### 2.3.3.1 Beschreibung und Funktion

Wie schon in Kapitel 2.3.1 beschrieben lässt sich durch eine Änderung des Anstellwinkels des Rotorblatts die resultierende Auftriebskraft beeinflussen. Pitch-geregelte Anlagen besitzen daher ein System zur Blattverstellung und regeln so die Leistung an der Rotorwelle. Gleichzeitig kann die Blattverstellung, durch drehen der Blätter in Fahnenstellung<sup>8</sup>, als aerodynamische Bremse eingesetzt werden. Bei großen Anlagen ist dies oft der einzige Mechanismus mit dem ein Durchdrehen des Rotors bei zu hohen Windgeschwindigkeiten verhindert werden kann. Mechanisches Bremsen ist hier, aufgrund des großen Drehmoments, so gut wie ausgeschlossen, da eine entsprechende Bremse zu große Dimensionen annehmen würde. Von daher ist neben der Strukturfestigkeit die Blattverstellung eine der wichtigsten Komponenten dessen Funktionssicherheit gewährleistet sein muss.



Abb. 2.8: System zur Rotorblattverstellung (links) und Windrichtungsnachführung (rechts) der Firma Bosch-Rexroth [8]

Grundsätzlich lässt sich die Blattverstellung elektrisch oder hydraulisch realisieren. Bei modernen großen Anlagen kommen heute meist nur noch elektrische Systeme zum Einsatz, bei denen alle Komponenten in der Rotornabe untergebracht sind. Diese elektrischen Systeme zur Rotorblattverstellung werden angetrieben durch einen Getriebemotor, also einem Elektromotor der direkt mit einem Getriebe verbunden ist. Das Getriebe sorgt dafür, dass sich die Abtriebswelle mit geringerer Geschwindigkeit, aber wesentlich höherem Drehmoment als der Motor, dreht. Auf der Abtriebswelle sitzt ein Ritzel, das mit dem Drehkranz des Rotorblattlagers verbunden ist und somit eine Drehung um die Längsachse ermöglicht. Abbildung 2.8 links zeigt ein derartiges System der Firma Bosch Rexroth. Die Stromversorgung läuft über einen Schleifringübertrager von der Gondel zur Nabe. Für den Fall eines Stromausfalls sind in der Nabe Akkumulatoren untergebracht, die die Antriebe mit Strom versorgen können und so auch im Notfall einen sicheren Betrieb ermöglichen.

Wird ein hydraulisches System eingesetzt so kommen andere Bauteile zum Einsatz. Die Drehbewegung der Rotorblätter wird über hydraulische Stellzylinder erzeugt, die über Schläuche mit

<sup>8</sup>drehen der Rotorblätter so, dass sie parallel mit dem Wind stehen und somit keinen ausreichenden Auftrieb erzeugen

der hydraulischen Energieversorgung verbunden sind. Ist die hydraulische Energieversorgung in der Gondel positioniert so muss über eine Drehdurchführung eine Verbindung zwischen rotierenden und nicht rotierenden Bauteilen geschaffen werden.

Um eine Drehbewegung der Rotorblätter um deren Längsachse zu ermöglichen werden diese über ein Wälzlager gelagert. Aufgrund der vergleichsweise geringen Drehbewegung muss dieses Rotorblattlager jedoch nicht über die übliche Lebensdauerauslegung, hinsichtlich der Anzahl der Überrollungen, ausgelegt werden, sondern über die Kriterien Riffelbildung und Reibkorrosion. Als Bauart werden heutzutage Vierpunktlager oder Kugeldrehverbindungen eingesetzt, teilweise kommen auch Gleitlager mit Kunststoffgleitbahnen zum Einsatz [14, S. 296-297].

### 2.3.3.2 Fehlermöglichkeiten

Da die Blattverstellung einer Windenergieanlage ein System aus unterschiedlichen Einzelteilen ist, gibt es viele Komponenten durch die ein Ausfall des Systems verursacht werden kann. Undichtigkeiten bei hydraulischen Systemen können zum Austritt des Hydrauliköls führen, dass im ungünstigsten Fall einen Brand verursachen kann. Bei elektrischen Systemen können Schäden im verwendeten Getriebe auftreten. In beiden Systemen ist es zusätzlich möglich, dass am Rotorblattlager ein Schaden auftritt und aus diesem Grund die Blattverstellung versagt.

Folgen eines Defektes in der Rotorblattverstellung können entweder Ertragseinbußen durch nicht optimale Ausrichtung sein, oder wenn sich die Blätter in Fahnenstellung befinden und nicht mehr verstellbar sind, einen kompletten Ausfall der Anlage verursachen. Da wie oben bereits erwähnt die Blattverstellung bei großen Anlagen die einzige Möglichkeit zum Fahren der Anlage in einen sicheren Betrieb ist, werden die Komponenten der Blattverstellung oft redundant ausgeführt. Oft reicht es aus, zwei von drei Rotorblättern in Fahnenstellung zu bringen, um die Anlage zu bremsen.

## 2.3.4 Rotorlager

### 2.3.4.1 Beschreibung und Funktion

Das Rotorlager lagert die Rotorwelle, die das Drehmoment vom Rotor in den Antriebsstrang überträgt. In den meisten Fällen werden doppelreihige Pendel- oder Kegelrollenlager eingesetzt, da diese Bauart die Biegeverformung der Welle am besten aufnehmen kann. Rotorlager für Windenergieanlagen sind normalerweise keine Produkte aus dem Katalog, sondern auf Ihren Einsatzzweck speziell angepasste Entwicklungen.



Abb. 2.9: Pendelrollenlager zur Lagerung der Rotorwelle der Firma NKE [9]

Neben der Bauform ist die Art der Schmierung ein weiterer Punkt der bei den Rotorlagern beachtet werden muss. Eine einfache Lösung ist die Schmierung mit Lagerfett, dass beim Zusammenbau aufgebracht wird. Dies hat den Nachteil, dass die Lagertemperatur nicht über die Schmierung beeinflusst werden kann. Wird eine Druckölschmierung eingesetzt, so lässt sich die Lagertemperatur regeln und Verschmutzungen können aus dem Lager geschwemmt und gefiltert werden. Dies bringt jedoch auch die Nachteile eines komplexen Systems, höhere Kosten und viele Fehlerquellen, mit sich. Aufgrund der großen Beanspruchungen, denen das Rotorlager ausgesetzt ist, und der teuren Reparaturen ist eine Zustandsüberwachung von auftretenden Schwingungen, Temperaturen und der Ölqualität mittlerweile üblich geworden. Viele Hersteller von Wälzlagern haben passende Systeme für diesen Zweck in ihrem Produktportfolio.

Wichtig ist auch die Art der Lagerung, ob separate Lager eingesetzt werden oder beispielsweise ein Lager in das Getriebe integriert ist. Da viele verschiedenen Lösungen für die Art Rotorwellenlagerung möglich sind, soll hier auf weiterführende Literatur verwiesen werden [14, S. 307-316].

#### 2.3.4.2 Fehlermöglichkeiten

Im Rotorlager können die verschiedensten Defekte auftreten. Verschmutzungen des Schmieröls, Verschleiß an Walzkörpern und Lagerringen können zunächst die Leichtläufigkeit des Lagers beeinflussen. Dies führt zu Ertragseinbußen da höhere Reibungsverluste auftreten und der Wirkungsgrad der Anlage auf diese Weise verschlechtert wird. Werden derartige Fehler nicht rechtzeitig behoben kann es zu dauerhaften Schäden am Lager kommen, so dass keine Übertragung der Rotationsbewegung mehr möglich ist. Dies hat aufwendige und teure Reparaturarbeiten zur Folge und verursacht dementsprechend auch hohe Kosten.

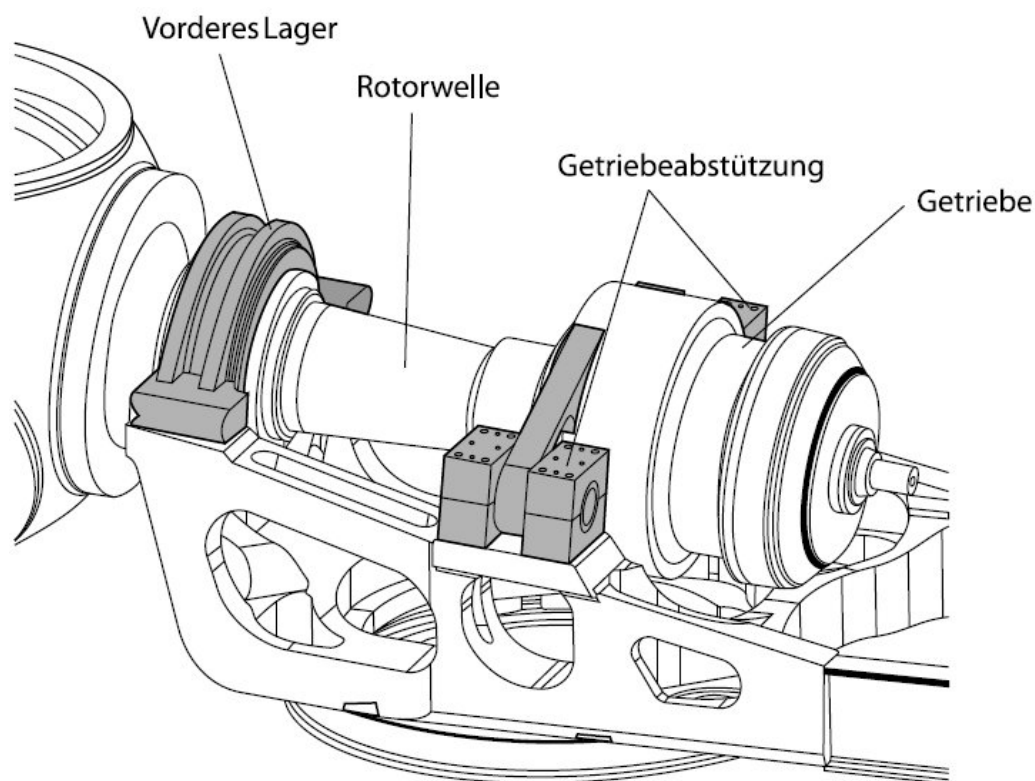


Abb. 2.10: Rotorwelle mit Lagerung bei der Nordex N80 [14]



## 2.3.5 Rotorwelle

### 2.3.5.1 Beschreibung und Funktion

Als mechanisches Verbindungsstück zwischen der Rotornabe und dem Getriebe überträgt die Rotorwelle das Drehmoment. Die Welle wird hauptsächlich durch Torsions- und Biegebeanspruchungen belastet. Bei großen Anlagen ist sie ein schweres und teures Bauteil. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Festigkeit werden meist geschmiedete oder gegossene Wellen eingesetzt. Die Rotorwelle wird oft als Hohlwelle ausgeführt. Dies dient der Gewichtseinsparung und wird beim Einsatz von hydraulischen Systemen zur Rotorblattverstellung mit hydraulischer Energieversorgung in der Gondel, benötigt, um die Versorgungsschläuche in die Nabe zu führen.

### 2.3.5.2 Fehlermöglichkeiten

Ähnlich wie bei der Rotornabe treten Fehler an der Rotorwelle nur in seltenen Fällen auf und sind bei ausreichender Dimensionierung zumeist auf Herstellungsfehler zurückzuführen. Hier kommen wie oben bereits erwähnt Ungängen oder Oberflächendefekte in Frage, durch die ab einer bestimmten Belastung keine ausreichende Festigkeit mehr gegeben ist.

## 2.3.6 Getriebe

### 2.3.6.1 Beschreibung und Funktion

Bei Windkraftanlagen klassischer Bauweise, in denen vier- oder sechspolige Generatoren eingesetzt werden besteht das Problem, dass der Rotor mit einer Drehzahl von 10 bis 50  $\frac{U}{min}$  dreht, der Generator aber eine Drehzahl von 1000 bis 1500  $\frac{U}{min}$  benötigt. Aus diesem Grund wird innerhalb des Antriebsstrangs ein Übersetzungsgetriebe eingesetzt, um die Drehzahl entsprechend anzupassen. Das Getriebe unterteilt den Antriebsstrang in die langsame Rotorwelle und die schnelle Generatorwelle, das Drehmoment verringert sich entsprechend. Besitzt die Windenergieanlage eine mechanische Bremse so wird diese in der Regel auf der schnellen Generatorwelle positioniert. Hier ist das benötigte Bremsmoment entsprechend geringer, was eine geometrisch kleinere Dimensionierung der mechanischen Bremse erlaubt.



Abb. 2.11: Getriebe Redulus GPV von Bosch-Rexroth [7]

Als Getriebearten kommen mehrstufige Stirnrad- oder Planetengetriebe zum Einsatz, da diese hohe Übersetzungen ( $i > 100$ ) auf kompaktem Bauraum ermöglichen [23]. Auch Kombinationen aus beiden Getriebearten werden eingesetzt. Durch die unvermeidbare Reibung zwischen den Zähnen treten Verluste auf, die sich in Schallemissionen und Wärmeabgabe äußern. Zur Dämmung der Schallemissionen wird das Getriebe mit Gummielementen auf dem Maschinenträger montiert. Bei Anlagen mit großer Leistung ist zur Wärmeabfuhr zudem eine Ölkühlung notwendig. Der mechanische Wirkungsgrad der in Windenergieanlagen eingesetzten Getriebe liegt zwischen 93 bis 95 Prozent. Das Getriebe ist ein klassisches Zuliefererbauteil, nur wenige Hersteller von Windenergieanlagen fertigen die Getriebe selbst.

### 2.3.6.2 Fehlermöglichkeiten

In den ersten Jahren der kommerziellen Windenergienutzung war das Getriebe eines der Bauteile, in denen am häufigsten Probleme auftraten. Zurückzuführen waren die Ausfälle zumeist auf falsche Lastannahmen durch Unterschätzung der, in der Windenergieanlage auftretenden, dynamischen Belastungen [10]. Durch entsprechend bessere Dimensionierung haben sich in dieser Hinsicht die Getriebe verbessert. Dennoch zeigt Abbildung 2.4, dass Getriebeschäden auch weiterhin einen Ausfall der Anlage verursachen können.

Dennoch gibt es die verschiedensten Fehlermöglichkeiten die Probleme oder Schäden am Getriebe verursachen können. Zu hohe Temperaturen im Getriebe können den Verschleiß an den Zahnflanken beschleunigen, daraus resultierende Verschmutzungen im Öl können die Lager beschädigen. Nicht entdeckte Fertigungsfehler in der Verzahnung können zu Zahnbrüchen führen. Muss das Getriebe einer Windenergieanlage ausgetauscht werden, so ist mit einem Ausfall der Anlage von mehreren Tagen und hohen Kosten zu rechnen. Um Probleme mit dem Getriebe frühzeitig zu erkennen und somit größere Schäden zu verhindern besitzen die meisten Getriebe Systeme zur Zustandsüberwachung<sup>9</sup>. Damit werden Öl- und Lagertemperaturen aufgezeichnet, der Öldruck gemessen und die Ölfilter zur Entdeckung von Verschmutzungen überwacht.

## 2.3.7 Generator

### 2.3.7.1 Beschreibung und Funktion

Mit dem Generator wird die mechanische Energie der Drehbewegung in elektrische Energie umgewandelt. In konventionellen Anlagen werden zumeist handelsübliche Generatoren eingesetzt. In getriebelosen Windenergieanlagen dagegen werden speziell angefertigte vielpolige Ringgeneratoren eingebaut. Generell muss beachtet werden, dass es nicht nur unterschiedliche Generatorbauarten, sondern auch Unterschiede in der Ausführung des Generatorsystems gibt.

Bei den Bauarten unterscheidet man Asynchron-, Synchrongenerator und Generatoren mit Permanentmagneterregung. In der Ausführung des Generatorsystems gibt es folgende Möglichkeiten:

- Drehzahlfeste Generatoren mit direkter Netzkopplung
- Drehzahlvariable Generatorsysteme mit Frequenzumrichter
- Direkt vom Rotor angetriebene getriebelose drehzahlvariable Generatorsysteme<sup>10</sup>

<sup>9</sup>engl. Condition Monitoring System (CMS)

<sup>10</sup>Anlagen mit einem derartigen Antriebsstrang werden häufig auch als *Direct Drive* bezeichnet



Abb. 2.12: Generator von ABB [3]

Ist der Generator direkt ans Netz gekoppelt, so muss dieser mit einer konstanten Drehzahl, mit geringem Schlupf bei einem Asynchrongenerator, betrieben werden, diese wird bestimmt durch die Netzfrequenz und die Anzahl der Pole am Generator. Umso mehr Pole der Generator besitzt, desto niedriger ist die benötigte Drehzahl. Wird ein drehzahlvariables Generatorsystem eingesetzt so ändert sich die Frequenz der erzeugten Spannung ständig mit der Drehzahl. Um die elektrische Energie dennoch in ein Netz mit konstanter Frequenz einspeisen zu können, muss diese über einen Frequenzumrichter angepasst werden. Das gleiche gilt für Generatorsysteme mit einem großen Ringgenerator und ohne vorgeschaltetes Getriebe.

### 2.3.7.2 Fehlermöglichkeiten

Innerhalb des Generators gibt es verschiedene Möglichkeiten, die einen Defekt auslösen können. Möglich sind Probleme mit den eingesetzten Wälzlagern. Weitere Ursachen können fehlerhafte Isolationsschichten in den Wicklungen oder Probleme mit der Wärmeabfuhr, ausgelöst durch Fehler im Kühlsystem, sein. Ein Ausfall des Generators ist gleichbedeutend mit einem Ausfall der Anlage, da in diesem Fall keine Stromproduktion mehr möglich ist. Je nach dem ob der Generator repariert werden kann oder ausgetauscht werden muss verhält sich die Dauer des Ausfalls und die entstehenden Kosten für die Reparatur.

## 2.3.8 Maschinenträger

### 2.3.8.1 Beschreibung und Funktion

Der Maschinenträger ist das Grundgerüst des Antriebsstrangs (siehe dazu Abbildung 2.10). Hier sind alle Komponenten des Antriebsstrangs montiert. Die Bauweise und Auslegung steht dabei in engem Zusammenhang mit der Anordnung des Antriebsstrangs.

Im vorderen Bereich, wo Rotorlager und Getriebe montiert werden, muss der Kraftfluss vom Rotor in den Turm geleitet werden. Hier wird der Maschinenträger häufig als Gusskonstruktion ausgelegt. Aufgrund der hohen Steifigkeitsanforderungen sind hier dicke Bauteilabmessungen erforderlich. Im hinteren Teil muss im Wesentlichen nur das Gewicht des elektrischen Generators und sonstiger Aggregate getragen werden, hier sind entsprechend leichtere Ausführungen des Maschinenträgers möglich. Häufig wird dieser Teil als Schweißkonstruktion ausgeführt. Die Verbindung zwischen dem Guss- und Schweißbauteil wird als Schraubverbindung ausgeführt.



### 2.3.8.2 Fehlermöglichkeiten

Bei der Betrachtung von Fehlermöglichkeiten am Maschinenträger muss zunächst zwischen Fehlern im Gussteil, an den Schweißnähten und an den Schraubverbindungen unterschieden werden. Bei den Schweißnähten können beispielsweise Risse, die durch die starke Gefügeveränderung in der Wärmeinflusszone entstanden sind, zu Brüchen und damit einer Destabilisation des Maschinenträgers führen. Für Gussteile kommen dagegen wieder die bereits in Kapitel 2.3.2 und 2.3.5 erwähnten Herstellungsfehler bei Gussbauteilen als Fehlerursache in Frage. Werden Schraubverbindungen eingesetzt, so besteht auch in den Schraubverbindungen ein Fehlerrisiko, falls diese falsch ausgelegt sind oder die Anzugsmomente bzw. Reibungsverhältnisse nicht ausreichend sind. Die Auswirkungen von einem Schaden am Maschinenträger können dabei auch sehr unterschiedlich sein. Ein Riss in einer Schweißnaht kann zunächst nicht weiter auffallen, aber bei entsprechenden Windlasten und der daraus resultierenden Ermüdungsbeanspruchung durchaus zum Bauteilversagen führen. Ähnlich verhält es sich mit Schrauben, die nicht sachgerecht montiert worden sind, oder bei Ungängen in den Gussteilen.

## 2.3.9 Windrichtungsnachführung

### 2.3.9.1 Beschreibung und Funktion

Für eine optimale Ausbeute der Windangebots muss der Rotor einer Windenergieanlage immer der aktuellen Windrichtung nach ausgerichtet werden. Während bei alten Anlagen, insbesondere den nicht zur Stromerzeugung genutzten Windmühlen, die Verstellung der Rotors passiv durch den Wind erfolgte, besitzen alle modernen Anlagen aktive Systeme zur Windrichtungsnachführung, die auch als Azimutverstellsystem<sup>11</sup> bezeichnet werden. Über einen Sensor wird die aktuelle Windrichtung ermittelt und eine Regelungseinheit steuert elektrische Stellmotoren oder eine Hydraulik, so dass die Gondel entsprechend ausgerichtet wird.

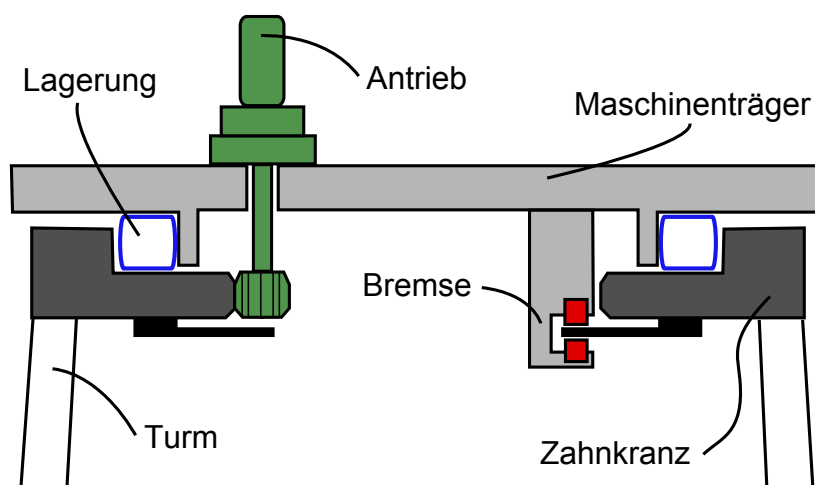


Abb. 2.13: Schematischer Aufbau der Windrichtungsnachführung [27]

Ähnlich wie die Rotorblattverstellung, man vergleiche hierzu die elektrischen Ausführungen der Firma Bosch-Rexroth in Abbildung 2.8, ist die Windrichtungsnachführung ein System aus mehreren Teilkomponenten:

<sup>11</sup>Azimut: Begriff aus der Astronomie, der einen nach der Himmelsrichtung orientierten Horizontalwinkel bezeichnet

- **Stellantrieb:** Entweder hydraulisch oder mit elektrisch über einen Elektromotor mit direkt angeflanschem Getriebe
- **Getriebe:** Besteht meistens aus mehreren Planetenradstufen um eine möglichst geringe Drehzahl bei hohem Drehmoment zu ermöglichen.
- **Azimutlager:** Ausgeführt meist als großes Drehkranzlager z.B. Vierpunktkugellager, teilweise auch spezielle Lager mit eingebauter Drehhemmung. Alternativ ist die Lagerung über eine Gleitbahn möglich.
- **Azimutbremse:** Hält den Azimutwinkel nach erfolgter Nachführung um zu vermeiden, dass das Giermoment von den Stellantrieben aufgenommen wird. Oft haben die Antriebe eine integrierte Bremse und zusätzlich gibt es Bremszangen direkt am Drehkranz.
- **Verriegelungseinrichtung:** Verhinderung der Drehbewegung mit Hilfe von Bolzen bei längeren Stand- oder Wartungsperioden.

Bei Drehbewegungen um die Vertikalachse wirken starke Widerstandsmomente auf den Rotor und die restliche Struktur der Anlage. Die Windrichtungsnachführung erfolgt daher sehr langsam. Eine komplette Umdrehung kann je nach Anlagenbauform etwa 10 bis 20 Minuten dauern. Ist die richtige Ausrichtung des Rotors erreicht wird die Position mit einer Bremse, teilweise auch mehreren Bremsen, festgesetzt, um Schwingungen zu vermeiden.

### 2.3.9.2 Fehlermöglichkeiten

Auch beim Thema Fehlermöglichkeiten und deren Auswirkungen verhält sich das System der Windrichtungsnachführung ähnlich zur Rotorblattverstellung. Durch das komplexe System gibt es viele Teilkomponenten, die als Ursache für einen Fehler dienen können. Von einem defektem Antrieb, Schäden am Getriebe, Verschleiß im Azimutlager oder Problemen mit der Bremse, gibt es die unterschiedlichsten Fehlerursachen, die eine Störung oder einen Ausfall der Windrichtungsnachführung auslösen können. Die Auswirkungen einer Störung reichen von Ertragsminderung, aufgrund nicht optimaler Ausrichtung der Anlage, bis hin zur Abschaltung falls keine Windrichtungsnachführung mehr möglich ist. Probleme mit den Antriebskomponenten können meistens innerhalb kurzer Zeit durch Austauschen behoben werden. Gibt es dagegen Probleme mit der Lagerung so kann die Reparatur schnell einen längeren Zeitraum in Anspruch nehmen, falls die gesamte Gondel demontiert werden muss.

## 2.3.10 Turm

### 2.3.10.1 Beschreibung und Funktion

Der Turm ist eine wesentliche Komponente der Windenergieanlage. Er sorgt dafür, dass der Rotor in ausreichender Höhe positioniert ist und somit die Windverhältnisse am Standort optimal ausgenutzt werden können. Gleichzeitig muss der Turm in der Lage sein die Gewichtslasten und alle am Rotor auftretenden Windlasten zu tragen. Es gibt verschiedene Bauarten für Türme von Windenergieanlagen. Als Materialien stehen Stahl oder Beton zur Auswahl. In ganz seltenen Fällen werden auch Türme aus Holz gefertigt. Die meisten Türme lassen sich einer der folgenden Bauweisen zuordnen:

**Gitterturm** Oft auch Fachwerkturm genannt, die bevorzugte Bauart für die ersten Versuchsanlagen und in den ersten Jahren der kommerziellen Windenergienutzung zur Stromerzeugung. Ermöglicht eine hohe und steife Konstruktionen bei vergleichsweise geringem Materialeinsatz.

**Betonturm** Im Zuge von starken Preiserhöhungen für Stahl hat sich die Bauweise mit Betontürmen mehr durchgesetzt. Auch ermöglicht die Betonbauweise sehr hohe Turmhöhen ohne Transportprobleme zu verursachen. Betontürme werden normalerweise als Spannbetontürme ausgeführt. Dies bedeutet, dass spezielle Spannelemente in die Betonstruktur eingebracht und vorgespannt werden. Dies erzeugt im Beton eine Druckspannung die durch die Biegebeanspruchung auftretenden Zugspannungen aufheben kann. Spannbetontürme sind deshalb belastbarer als ungespannte Stahlbetontürme. Ein weiteres Unterscheidungskriterium bei der Betonbauweise ist der Einsatz von Ortbeton oder die Verwendung von Fertigteilsegmenten. Beim Einsatz von Ortbeton ist es besonders wichtig alle gelieferten Betonchargen auf die richtigen Eigenschaften zu prüfen. Bei der Verwendung von Fertigsegmenten kann dies im Werk erledigt werden.

**Stahlrohrturm** Die am häufigsten genutzt Bauart bei kommerziellen Windkraftanlagen. Vorteil ist die schnelle Montierbarkeit und bis Ende des 20. Jahrhunderts die vergleichsweise geringen Stahlpreise. Der Turm wird im Werk in mehreren Sektionen gefertigt, die am Aufstellort miteinander verschraubt werden.

### 2.3.10.2 Fehlermöglichkeiten

Die möglichen Fehler sind bei Türmen sehr abhängig von der Art der Konstruktion. Bei Betontürmen können durch Verwendung der falschen Betonmischung Probleme entstehen. In diesem Fall besitzt der Beton nicht die ausreichende Festigkeit und es kann verfrüht zu Bildung von Rissen führen. Ist die Tragfähigkeit der Turmkonstruktion nicht mehr gewährleistet so besteht die Gefahr, dass die gesamte Windenergieanlage zusammenbricht und ein damit irreparabler Schaden entsteht.

Ähnlich verhält es sich mit Fehlern, die bei Stahlrohr- oder Gittertürmen auftreten. Bei Einsatz von Schweißnähten oder Schraubverbindungen können die bereits in Kapitel 2.3.8 aufgeführten Probleme auftreten. Ein anderes Problem tritt häufig bei Stahlrohrtürmen, die aus mehreren Segmenten bestehen, auf: Die Flansche über die zwei Segmente verschraubt werden sind in der Regel angeschweißt. Bei nicht fachgerechter Schweißfolge kann dabei ein Wärmeverzug auftreten und zu Imperfektionen an den Flanschflächen, z.B. Winkelverzug oder Welligkeit, führen. Werden diese schiefen Flächen nun über eine Schraubverbindung miteinander befestigt, so treten durch die zwangsläufige Verbiegung Spannungen auf, die bei kritischen Belastungen zu Rissen und Brüchen führen können. Zudem kann ein Versagen der Schraubverbindung auftreten.

### 2.3.11 Frequenzumrichter

#### 2.3.11.1 Beschreibung und Funktion

Im europäischen Stromnetz wird die elektrische Energie als Dreiphasenwechselstrom mit einer Netzfrequenz von 50 Hz übertragen. Soll von einer Windenergieanlage elektrische Energie in das Stromnetz eingespeist werden so muss auch hier eine Netzfrequenz von 50 Hz eingehalten werden. Drehzahlvariable Generatoren mit direkter Netzkopplung liefern einen Wechselstrom mit dieser Frequenz. Bei diesen Generatoren wird kein Frequenzumrichter benötigt. Es treten jedoch erhöhte dynamische Belastungen im Triebstrang auf. Heutzutage werden die meisten Anlagen mit drehzahlvariablen Generatoren betrieben. Diese erzeugen einen Wechselstrom mit variabler Frequenz. Es wird also ein Frequenzumrichter benötigt, der die Frequenz der erzeugten Wechselspannung an die Netzfrequenz anpasst.

Genauer betrachtet besteht der Frequenzumrichter einer Windenergieanlage aus zwei Umrichtern. Zunächst wird der vom Generator erzeugte Wechselstrom mit variabler Frequenz über einen Gleichrichter in einen Gleichstrom umgewandelt. Anschließend wird mit Hilfe eines Wechselrichters daraus wieder Wechselstrom, nun jedoch mit der konstanten Netzfrequenz, erzeugt. Derartige Umrichtersysteme werden auch als Frequenzumrichter mit Gleichstromzwischenkreis bezeichnet.

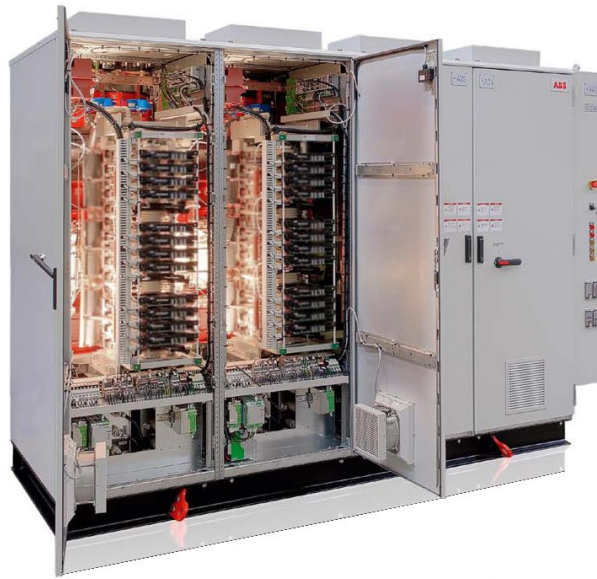


Abb. 2.14: Mittelspannungs-Frequenzumrichter PCS 6000 von ABB [4]

Früher verursachten Frequenzumrichter einen großen Wirkungsgradverlust, weshalb ihr Einsatz nach Möglichkeit durch drehzahlfeste Generatoren umgangen wurde. Fortschritte bei der Entwicklung der innerhalb der Umrichter eingesetzten Leistungselektronik ermöglichen heutzutage Frequenzumrichter mit nur geringen Verlusten. Deshalb werden immer mehr Anlagen mit drehzahlvariablen Generatoren gebaut und die dynamischen Belastungen auf den Triebstrang reduziert.

### 2.3.11.2 Fehlermöglichkeiten

Die kritischste Eigenschaft der Frequenzumrichter sind die Wärmeverluste. Besonders bei Anlagen mit hohen Leistungen von mehreren Megawatt fällt trotz der relativ hohen Wirkungsgrade eine beachtliche Menge Wärme in den Transistoren und Leiterbahnen des Umrichters ab. Diese muss durch ein passendes Kühlsystem abgeführt werden. Werden die leistungselektronischen Bauteile zu lange zu hohen Temperaturen ausgesetzt, so erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für einen frühzeitigen Defekt. Bei einem Ausfall des Umrichters ist keine Stromproduktion mehr möglich, jedoch ist die Dauer für eine Reparatur in der Regel deutlich kürzer als beim Austausch von Komponenten des Antriebsstrangs.

## 2.3.12 Transformator

### 2.3.12.1 Beschreibung und Funktion

Bei den meisten Windenergieanlagen arbeitet der Generator auf Niederspannungsebene mit einer Spannung von 690 V. Das Netz des Windparks, an das die Windenergieanlagen angeschlossen sind, arbeitet jedoch auf Mittelspannungsebene mit einer Spannung zwischen 10 und 36 kV. Um die erzeugte elektrische Energie in das Mittelspannungsnetz einspeisen zu können, ist eine Transformation der Spannung erforderlich. Diese Funktion übernimmt der Transformator, der entweder direkt in der Gondel, im Turmfuß der Anlage, oder außerhalb auf dem Gelände des Windparks untergebracht ist. Auf Grund der hohen übertragenen Leistungen werden die in der Stromversorgung verwendeten Transformatoren auch als Leistungstransformatoren bezeichnet. Je nach Ausführung der Isolation der Wicklungen wird zwischen flüssigkeitsgefüllten Transformatoren und Gießharztransformatoren unterschieden. In Windenergieanlagen kommen beide Typen zum Einsatz.

Flüssigkeitsgefüllte Transformatoren sind mit Transformatoröl gefüllt. Öl bietet den Vorteil, dass es neben den Isolationseigenschaften auch eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt. Es dient damit auch als Kühlflüssigkeit und transportiert die in den Wicklungen abfallenden Wärmeverluste nach außen ab. Nachteil der ölgekühlten Transformatoren ist die Entflammbarkeit des Öls bei hohen Temperaturen. Die erhebliche Ölmenge liefert damit eine hohe Brandlast. In Deutschland dürfen ölgekühlte Transformatoren deshalb nicht mehr in der Gondel untergebracht werden.



Abb. 2.15: Gießharztransformator der Firma SGB [19]

Gießharztransformatoren kommen ohne Öl oder andere Flüssigkeiten aus. Sie werden deshalb auch als Trockentransformatoren bezeichnet. Hier sind die Wicklungen mit Epoxidharz eingegossen. Diese Bauart ist kompakter und weniger brandgefährdet. Durch die Isolation aus Gießharz lassen sich jedoch die Wärmeverluste nicht so gut abführen wie bei ölgekühlten Transformatoren. In Aufstellgebieten mit hohen Umgebungstemperaturen sind sie daher kaum einsetzbar.

### 2.3.12.2 Fehlermöglichkeiten

Insbesondere bei hohen Leistungen unterliegen Transformatoren starken physikalischen Belastungen, etwa durch zu hohe Lastströme oder innere bzw. äußere Kurzschlüsse. Mögliche Schäden an Transformatoren können durch Isolationsfehler zwischen einzelnen Wicklungen oder innerhalb einer Wicklung hervorgerufen werden. Ursache dafür kann zum Beispiel Alterung der Isolierung oder eine Überlastung sein. Derartige Schäden haben insbesondere bei ölgefüllten Transformatoren schwerwiegende Folgen auf die Betriebssicherheit. Im schwerwiegendsten Fall kann es zu einem Brand kommen, wenn bei entsprechend hohen Temperaturen durch einen Kurzschluss ein Funke entsteht. Ein Ausfall des Transformators ist immer gleichbedeutend mit dem Ausfall der kompletten Windenergieanlage.

## 2.3.13 Mittelspannungsschaltanlage

### 2.3.13.1 Beschreibung und Funktion

Die Mittelspannungsschaltanlage ist das Verbindungsstück zwischen Windenergieanlage und dem Mittelspannungsnetz des Windparks. Die Schaltanlage kontrolliert die Einspeisung von Strom ins Mittelspannungsnetz und kann im Fall einer Störung die Verbindung trennen.

Man unterscheidet luft- und gasisolierte Schaltanlagen. Bei hohen Leistungen kann es, trotz der räumlichen Trennung, bei geöffnetem Schalter, zu einem Spannungsdurchschlag kommen,

wenn die angelegte Spannung die Durchschlagsfestigkeit des umgebenden Mediums überschreitet. In diesem Fall kommt es zu einer Ionisierung des Isolatormediums und damit verbunden zu einer Plasmabildung. Durch den Isolator fließt nun ein Strom. Um das Auftreten derartiger Spannungsdurchschläge zu verhindern verwendet man bei gasisolierten Schaltanlagen Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) als Schutzgas.  $\text{SF}_6$  besitzt bei Normaldruck eine drei- bis vierfach höhere Durchschlagsfestigkeit als Luft. Zudem unterstützt  $\text{SF}_6$  das Verlöschen von Funken effektiver als Luft.

### 2.3.13.2 Fehlermöglichkeiten

Das größte Schadensrisiko bei Schaltanlagen liegt in der Bildung von Störlichtbögen. Insbesondere bei luftisolierten Schaltanlagen kann sich durch Überspannungen, bei verschmutzten oder betauten Kontakten, ein Lichtbogen bilden. Durch die extrem hohen Temperaturen im Lichtbogen können Teile der Schaltanlage beschädigt werden und es kommt zu einem Ausfall der Windenergieanlage. Ist ein Austausch der Schaltanlage notwendig ist ein Ausfall von ein bis zwei Tagen durchaus denkbar.

### 2.3.14 Sonstige Komponenten

Neben den oben aufgeführten Komponenten gibt es noch weitere Bauteile der Windenergieanlage die in diesem Rahmen nicht aufgeführt worden sind. Dazu gehören unter anderem die Regelung, Sensoren, das Sicherheitssystem, der Blitzschutz und kleine elektrische Bauteile. Auch an diesen Bauteilen können Fehler auftreten die einen Ausfall der Anlage zur Folge haben. Die Regelung, Sensoren, das Sicherheitssystem und sonstige elektrische Bauteile müssen daher im Rahmen der in Kapitel 3.5.4 aufgeführten Funktionsprüfungen auf ihre Qualität geprüft werden.

Ein weiteres wichtiges Bauteil ist das Fundament der Windenergieanlage. Auf Grund der oben definierten Systemgrenzen und auf Grund der Beschränkung auf den Entwicklungs- und Herstellungsprozess der Windenergieanlage, nicht aber die Installation und Inbetriebnahme am Standort, wird das Fundament im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

## 3 Qualitätssicherung an Windenergieanlagen

Im Rahmen dieses Kapitels werden die möglichen Maßnahmen, die während der Produktion und Entwicklung von Windenergieanlagen zur Qualitätssicherung durchgeführt werden können, vorgestellt. Zunächst werden dafür grundlegende Begriffe zum Thema Qualität erläutert. Anschließend werden die möglichen Prüfungen aufgeführt. Dabei werden zunächst wiederkehrende Grundelemente, dann mechanische und elektrische Komponenten und schließlich Teilsysteme der Windenergieanlage betrachtet.

### 3.1 Grundlagen und Begriffe

Der Begriff Qualität ist nach DIN EN ISO 9000 definiert als der Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt. Ein Merkmal ist dabei eine kennzeichnende Eigenschaft und inhärent bedeutet *einer Einheit innewohnen*. Inhärent ist nicht mit *zugeordnet* zu verwechseln. Ein zugeordnetes Merkmal, wie der Preis oder der Besitzer einer Einheit, stellt kein Qualitätsmerkmal dar. Anforderungen sind Erfordernisse oder Erwartungen, die an eine Einheit gestellt werden und oftmals verpflichtend sind.

#### 3.1.1 Qualitätsmanagement

Das Qualitätsmanagement ist ein Teil des Managements und definiert aufeinander abgestimmte Tätigkeiten, welche die Organisation bezüglich der Qualität leiten und lenken sollen. Viele große Organisationen besitzen heute ein Qualitätsmanagementsystem, über das ein systematisches Qualitätsmanagement vorgeschrieben wird. Üblicherweise beinhaltet ein Qualitätsmanagementsystem die Festlegung der folgenden Unterbereiche:

- **Qualitätspolitik:** Die übergeordneten Absichten und Ausrichtung einer Organisation zur Qualität, formell ausgedrückt durch die oberste Leitung der Organisation.
- **Qualitätsziele:** Ziele bezüglich der Qualität die angestrebt werden oder zu erreichen sind. Beruhen im Allgemeinen auf der Qualitätspolitik einer Organisation.
- **Qualitätsplanung:** Plant die Qualitätsziele und die zugehörigen Prozesse und Ressourcen die zum Erreichen dieser Ziele erforderlich sind.
- **Qualitätslenkung:** Ausgerichtet auf die Erfüllung der Qualitätsanforderungen.
- **Qualitätssicherung:** Methoden die der Organisation Vertrauen geben, dass Qualitätsanforderungen erfüllt werden.
- **Qualitätsverbesserung:** Soll die Eignung der Organisation zur Erfüllung der Qualitätsanforderungen erhöhen bzw. verbessern.

Das Qualitätsmanagement bzw. Qualitätsmanagementsystem ist branchenunabhängig und nicht produktspezifisch. Dies ermöglicht einen ähnlichen Aufbau, unabhängig davon, ob das Qualitätsmanagement in einem Dienstleistungsbetrieb oder in einem Betrieb mit industrieller Produktion eingesetzt wird. Produktspezifische Maßnahmen bezüglich der Qualität werden als Qualitätssicherung bezeichnet (siehe Kapitel 3.1.2) und sind damit ein Teil des Qualitätsmanagements.

Für viele Branchen, z.B. der Luft- und Raumfahrt, Medizintechnik, Gesundheitsversorgung, Pharmaindustrie und Lebensmittelherstellung ist die Einführung eines Qualitätsmanagementsystems vorgeschrieben. Im Rahmen der Normenreihe DIN EN ISO 9000 ff. werden Grundsätze für Maßnahmen zum Qualitätsmanagement allgemeingültig beschrieben und dokumentiert. Die Normenreihe hat sich als internationaler Standard etabliert und eine Zertifizierung, die bestätigt, dass eine Organisation ein Qualitätsmanagementsystem nach DIN EN ISO 9001 einsetzt, ist in vielen Bereichen erforderlich.

### 3.1.2 Qualitätssicherung

Wie in Kapitel 3.1.1 bereits aufgeführt ist die Qualitätssicherung nach DIN EN ISO 9000 definiert als der Teil des Qualitätsmanagements, der auf das Erzeugen von Vertrauen darauf gerichtet ist, dass Qualitätsanforderungen erfüllt werden. Die Qualitätssicherung beschreibt Ansätze und Maßnahmen, die Sicherstellen sollen, dass ein Produkt oder eine Dienstleistung festgelegte Qualitätsanforderungen erfüllt. Die Maßnahmen und Prozesse der Qualitätssicherung sind dabei produktspezifisch. Je nach Branche oder dem zu erzeugendem Produkt können unterschiedliche Vorgehensweisen üblich sein. Bei einer Dienstleistung kann die Qualitätssicherung beispielsweise durch eine Befragung des Kunden durchgeführt werden, während in produzierenden Organisationen häufig Qualitätsprüfungen durchgeführt werden, um die Erfüllung der Qualitätsanforderungen sicherzustellen.

### 3.1.3 Qualitätsprüfung

Qualitätsprüfungen werden im Rahmen der Qualitätssicherung durchgeführt, um Konformität oder Fehler, also die Erfüllung oder Nichterfüllung von Anforderungen, an einer Einheit festzustellen. Eine Qualitätsprüfung erfolgt durch Beobachten und Beurteilen, begleitet von Testen, Messen und Vergleichen. Man unterscheidet objektive und subjektive Prüfungen. Objektive Prüfungen beziehen sich auf messbare Merkmale einer Einheit, z.B. physikalische Eigenschaften wie Länge, Gewicht oder Festigkeit, und werden vor allem in der Produktion zur Qualitätsprüfung eingesetzt. Subjektive Prüfungen sind dagegen eher bei Dienstleistungen üblich. So kann beispielsweise durch einen Fragebogen die subjektive Bewertung der Dienstleistung durch den Kunden durchgeführt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit in Kapitel vorgestellten Prüfungen sind weitestgehend objektive Prüfungen, die dem Hersteller oder Betreiber einer Windenergieanlage Vertrauen geben sollen, dass spezifizierte Anforderungen erfüllt werden. Dabei wird im Rahmen dieser Arbeit zwischen Typprüfungen und Herstellungs- bzw. Funktionsprüfungen unterschieden. Den zeitliche Abfolge dieser Prüfungen ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

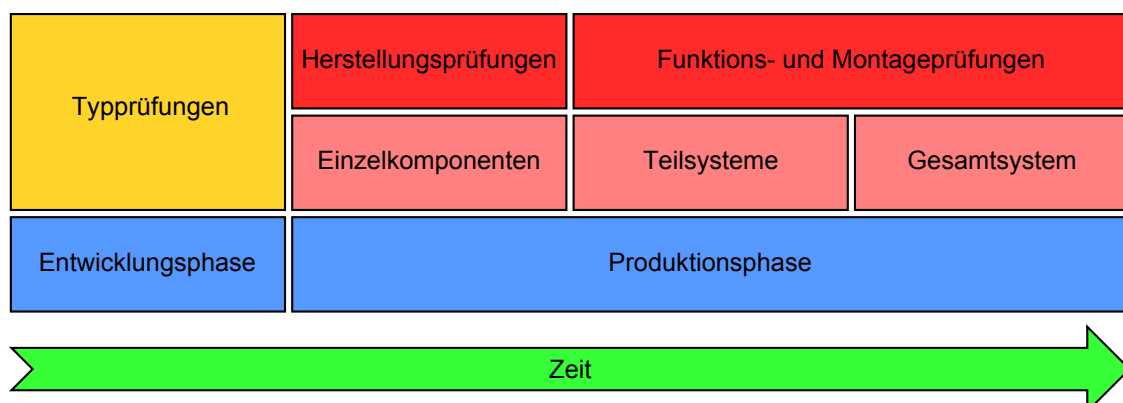


Abb. 3.1: Zeitliche Positionierung der Prüfungen im Entwicklungs- und Produktionsprozess



### 3.1.3.1 Typprüfungen

Typprüfungen sind entwicklungsbegleitende Prüfungen die an einer Einheit, stellvertretend für alle anderen Einheiten einer Serie, durchgeführt werden. Ziel ist es Systemfehler auszuschließen und sicherzustellen, dass die Einheit den festgelegten Anforderungen entspricht. Die Typprüfung kann von daher als Validierung der vorher rechnerisch durchgeführten Auslegung betrachtet werden. Gilt die Typprüfung als bestanden so ist sichergestellt, dass ohne auftreten zusätzlicher Herstellungsfehler, alle produzierten Einheiten die Anforderungen erfüllen. Sind die Ergebnisse der Typprüfung unzureichend muss die Konstruktion entsprechend angepasst werden.

Typprüfungen belasten die zu prüfenden Einheiten oft bis an die Grenzen der Beanspruchbarkeit, wodurch eventuelle konstruktive Schwachstellen offengelegt werden. Dabei wird die Einheit aber gleichzeitig auch beschädigt. Aus diesem Grund sind Typprüfungen nicht serienbegleitend als Stückprüfungen durchführbar. Die im Rahmen der Typprüfung ermittelten Merkmale werden mit Beginn der Serienfertigung nicht mehr oder nur noch stichprobenartig durchgeführt. Nach konstruktiven Änderungen am Produkt ist eine erneute Typprüfung erforderlich. Wird die prüfende Einheit unter Serienbedingungen hergestellt, so ermöglicht die Typprüfung zusätzlich eine detaillierte Bewertung des Herstellungsprozesses.

### 3.1.3.2 Herstellungs- und Funktionsprüfungen

Herstellungsprüfungen sollen sicherstellen, dass eine produzierte Einheit den spezifizierten Anforderungen entspricht. Insbesondere sollen hier Herstellungsfehler aufgedeckt werden. Die Prüfungen können als Stückprüfung, also als 100%-Prüfung für jede produzierte Einheit oder als Stichprobenprüfung für einen Teil der Einheiten durchgeführt werden. Viele Prüfungen werden dabei im Stichprobenumfang durchgeführt, um die Kosten für die Qualitätssicherung in einem angemessenen Rahmen zu halten. In den meisten Fällen wird bei stichprobenweise durchgeführten Prüfungen folgendermaßen vorgegangen: Mit Anlauf einer neuen Serie wird zunächst jedes produzierte Bauteil geprüft. Verlaufen die Ergebnisse positiv, so wird die Prüfschärfe reduziert. Treten doch wieder fehlerhafte Bauteile auf, so wird die Prüfschärfe entsprechend angehoben. Während der normalen Serienproduktion werden häufig nur die ersten Produkte einer neuen Charge geprüft, sofern keine Qualitätsmängel auftreten. Herstellungsprüfungen müssen in der Regel zerstörungsfrei erfolgen und dürfen die Beschaffenheit der zu prüfenden Einheit nicht beeinflussen.

Funktionsprüfungen werden an fertig hergestellten Produkten durchgeführt und sollen sicherstellen, dass alle geforderten Funktionen erfüllt werden. Funktionsprüfungen sollten immer als Stückprüfung an jedem produziertem Produkt durchgeführt werden. Insbesondere an Systemen wie der montierten Gondel einer Windenergieanlage, sind derartige Prüfungen notwendig. Zu prüfen ist nicht nur die Funktion von mechanischen oder elektrischen Komponenten, sondern auch Softwarefunktionen der Steuerung, wie das Sicherheitssystem oder die Regelung.

### 3.1.4 Zertifizierung von Windenergieanlagen

Im Zuge der immer weiter fortschreitenden Verbreitung von Windenergieanlagen ist deren Zertifizierung zum Standard geworden. Ziel der Zertifizierung ist den verschiedenen an Windenergieprojekten beteiligten Akteuren, wie Betreiber, Banken, Versicherer und Genehmigungsbehörden, Sicherheit zu geben. Grundsätzlich werden bei der Zertifizierung von Windenergieanlagen die folgenden Arten von Zertifizierungen unterschieden:

- Typzertifizierung
- Projektzertifizierung

- Komponentenzertifizierung

Ein Typzertifikat gilt für eine Windenergieanlage einschließlich Turm und der Verbindung ins Fundament. Ein Projektzertifikat gilt für eine oder mehrere Windenergieanlagen und der weiteren projektspezifischen Installationen am Standort und setzt ein Typzertifikat voraus. Ein Komponentenzertifikat gilt nur für eine Hauptkomponente der Windenergieanlage wie ein Rotorblatt oder ein Getriebe. Da im Rahmen dieser Arbeit der Entwicklungs- und Herstellungsprozess der Windenergieanlage betrachtet werden soll, wird im folgenden nur auf die Durchführung einer Typzertifizierung eingegangen.

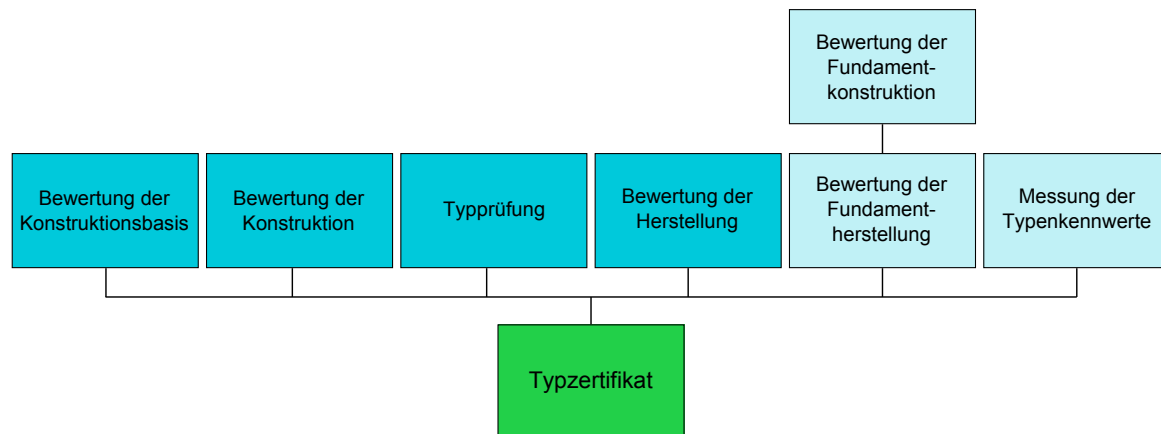


Abb. 3.2: Zertifizierung von Windenergieanlagen gemäß IEC 61400-22 [2]

Als internationaler Standard für die Zertifizierung von Windenergieanlagen hat sich die IEC WT01 bzw. ihr Nachfolger IEC 61400-22 etabliert [1] [2]. Erhält ein Hersteller ein Typenzertifikat, so bedeutet dies, dass ein bestimmtes Modell danach untersucht wurde, dass alle Anforderungen der Zertifizierungsrichtlinie erfüllt sind. Bei einer Zertifizierung nach der IEC 61400-22 werden die in Abbildung 3.2 aufgeführten Konformitätsprüfungen durchgeführt. Die hellblau dargestellten Prüfungen sind dabei optional. Neben der IEC WT01 existieren noch verschiedene andere Richtlinien, nach denen Windenergieanlagen zertifiziert werden können. Viele Zertifizierungsstellen bieten eigene Richtlinien an, die mit geringen Abweichungen jedoch alle im Wesentlichen die in Abbildung 3.2 aufgeführten Punkte untersuchen.

Mit Bezug auf das Thema dieser Arbeit ist hier der Punkt *Bewertung der Herstellung* besonders hervorzuheben. Im Rahmen dieses Abschnittes werden im Wesentlichen zwei Aspekte beurteilt. Zunächst wird das Qualitätsmanagementsystem des Herstellers überprüft. Dabei sind die Anforderungen erfüllt, wenn dieses nach ISO 9001 zertifiziert ist. Zum anderen wird eine Inspektion der Herstellung durchgeführt. Hier gilt es herauszufinden, ob Anforderungen aus den Konstruktionsunterlagen bei der Herstellung und Montage entsprechend berücksichtigt und umgesetzt werden. Dies beinhaltet unter anderem auch eine Bewertung der vom Hersteller durchgeführten Qualitätssicherung. Der Umfang der im Rahmen der *Bewertung der Herstellung* durchgeführten Kontrolle der Qualitätssicherung ist durch die entsprechende Richtlinie jedoch nicht genau definiert. Die Durchführung aller Qualitätsprüfungen, die im weiteren Verlauf dieses Kapitels vorgestellt werden, wird durch die *Bewertung der Herstellung* nicht sichergestellt. Um herauszufinden welche Prüfungen von den Zertifizierungsstellen gefordert werden, finden sich in Kapitel 4.4 die Ergebnisse der Befragung der Zertifizierungsstellen zu diesem Thema.

## 3.2 Qualitätsprüfungen an Grundelementen

Zunächst werden in diesem Kapitel Prüfungen für Grundelemente vorgestellt, die mehrfach in verschiedenen Komponenten und Teilsystemen der Windenergieanlage eingesetzt werden. Dazu zählen Wälz- und Gleitlager, Zahnräder, Schweißnähte, Schraubverbindungen und Gussteile.

### 3.2.1 Wälzlager

Wälzlager finden in mehreren Komponenten und Teilsystemen der Windenergieanlage ihren Einsatz. Im Getriebe und im Generator werden sie für die Lagerung der einzelnen Stufen, sowie für die Antriebs- und Abtriebswelle verwendet. Hier werden oft Katalogprodukte eingesetzt. Für die Lagerung der Rotorwelle und der Rotorblätter kommen dagegen speziell für diesen Zweck entwickelte Lager zum Einsatz. Das Gleiche gilt für die in der Windrichtungsnachführung eingesetzten Großwälzlager. Manche Hersteller setzen im Getriebe und in der Windrichtungsnachführung auch Gleitlager ein, für die andere Prüfungen erforderlich sind. Aus diesem Grund ist im folgenden vermerkt, wenn eine Prüfung nicht oder ausschließlich für Gleitlager in Frage kommt.

Die folgenden Prüfmerkmale sind bei Wälzlagern als Herstellungsprüfungen durchzuführen. Zugehörige Typprüfungen werden im folgenden Kapitel, im Rahmen der Prüfungen an Komponenten und Teilsystemen die Wälzlager enthalten, aufgeführt.

**Materialgüte** Die erforderliche Materialgüte, im Hinblick auf die chemische Zusammensetzung, der verwendeten Werkstoffe, muss durch ein Abnahmeprüfzeugnis nach DIN EN 10204 nachgewiesen werden. Der Zulieferer ist dafür verantwortlich, dass ein derartiges Zeugnis zur Verfügung gestellt wird.

**Geometrie / Maß- und Lauftoleranzen** Die geometrischen Abmessungen der Wälzlagerbauteile, sowie der Rund- bzw. Planlauf des zusammengebauten Lagers muss geprüft werden. Die Toleranzen sind in DIN ISO 1132 definiert. Die Messungen sind nach DIN 620-1 durchzuführen.

**Lagerluft** Die Lagerluft ist das Maß, um das sich ein Lagerring gegenüber dem anderen von einer Grenzlage in die andere ohne Messbelastung verschieben lässt. Man unterscheidet radiale Lagerluft und axiale Lagerluft. Weiter muss zwischen der Lagerluft des nicht eingebauten Lagers und der Lagerluft des eingebauten Lagers (Betriebsspiel) unterschieden werden. Das Messverfahren ist nach ISO 1132-2 durchzuführen.

**Körperschall** Das Laufgeräusch des Lagers wird durch mechanische Schwingungen (Körperschall) der Wälzlagererelemente verursacht. Der Körperschall wird durch viele Einflussgrößen, wie Formgenauigkeit, Oberflächengüte, Schmierstoff oder Sauberkeit, beeinflusst. Die Stärke des Körperschalls lässt von daher Rückschlüsse auf die Qualität des Lagers zu. Je niedriger das Geräusch, desto besser ist die Qualität des Lagers und somit auch die Lebensdauer. Eine hohe Geräuschlautstärke kann ein Anzeichen für fehlerhafte Laufbahnen, Verunreinigungen oder defekte Kugeln sein. Ein Verfahren zur Messung des Körperschalls ist in DIN 5426-1 beschrieben. Weitere Details zur Auswertung finden sich in der VDI Richtlinie 3832. Diese Prüfung wird nur bei Wälzlagern durchgeführt.

**Härte** Die Härte der Oberflächen von Wälzkörpern und Lagerringen ist eine wichtige Einflussgröße auf den Verschleiß und damit auch auf die Lebensdauer des Wälzlagers. Eine Prüfung ob die Härte den Anforderungen entspricht ist von daher durchzuführen. Zerstörungsfrei lässt sich die Härte über eine Wirbelstromprüfung messen. Diese Prüfung wird nur bei Wälzlagern durchgeführt.

**Oberflächenrisse** Bei der Herstellung oder der Wärmebehandlung der Wälzlagerbauteile können Risse auf der Oberfläche entstehen. Diese Risse können den Verschleiß beschleunigen und haben damit einen erheblichen Einfluss auf die Lebensdauer des Wälzlagers. Eine Prüfung, die nachweist, dass die Anzahl und die Größe der Oberflächenrisse in einem zulässigen Bereich liegen, ist daher durchzuführen. Risse lassen sich durch eine Wirbelstromprüfung nach DIN EN 12084 detektieren. Diese Prüfung wird nur bei Wälzlagern durchgeführt.

**Ultraschallprüfung** Um Bindefehler zwischen dem Grundkörper und der Lagerbuchse aus Weißmetall festzustellen wird eine Ultraschallprüfung (siehe DIN EN 583-1) durchgeführt. Diese Prüfung wird nur bei Gleitlagern durchgeführt.

### 3.2.2 Zahnräder und Zahnradgetriebe

Genauso wie die Wälzlager sind Zahnräder und Zahnradgetriebe Elemente, die in verschiedenen Komponenten und Systemen der Windenergieanlage eingesetzt werden. Neben dem Hauptgetriebe werden Zahnräder vor allem in den Systemen zur Rotorblattverstellung und Windrichtungsnachführung eingesetzt. Dort sind in den Getriebemotoren mehrere Getriebestufen integriert. Zusätzlich ist der Lagerkranz mit einer Verzahnung versehen, über die der Antrieb die Drehbewegung ausübt. Die im folgenden aufgeführten Herstellungsprüfungen sollten für alle Bauteile mit Verzahnungen durchgeführt werden.

**Materialgüte** Die erforderliche Materialgüte, im Hinblick auf die chemische Zusammensetzung, der verwendeten Werkstoffe muss durch ein Abnahmeprüfzeugnis nach DIN EN 10204 nachgewiesen werden. Der Zulieferer ist dafür verantwortlich, dass ein derartiges Zeugnis zur Verfügung gestellt wird.

**Geometrie / Maß- und Lauftoleranzen** Nach der Herstellung des Zahnrads muss die Einhaltung der vereinbarten Toleranzen geprüft werden. Hierzu wird das Zahnrad durch eine Wälzprüfung an einem fehlerfreien Lehrzahnrad kontrolliert. Die Ein- und Zweiflankenwälzprüfung für Stirnradverzahnungen ist nach DIN 3961 festgelegt. Die geometrischen Abmessungen sollten zusätzlich auch über eine Koordinatenmessmaschinen bzw. spezielle Verzahnungsmessmaschinen, oder diverse Handmessgeräte aufgenommen werden.

**Härte** Um die Verschleißfestigkeit zu erhöhen sind die Zahnflanken gehärtet. Um sicherzustellen, dass die geforderte Härte gegeben ist, muss eine Härtemessung durchgeführt werden. Dies kann durch eine Wirbelstromprüfung (nach DIN EN 12084) erfolgen.

**Oberflächenrisse** Bei der Herstellung oder der Wärmebehandlung der Verzahnung können Risse auf der Oberfläche entstehen. Diese Risse beschleunigen den Verschleiß der Zähne, weshalb zu Prüfen ist, dass die Anzahl und die Größe möglicher Oberflächenrisse in einem zulässigen Bereich liegt. Risse in der Oberfläche lassen sich durch Magnetpulverprüfung (nach DIN EN ISO 9934-1) oder durch Wirbelstromprüfung (nach DIN EN 12084) feststellen.


**Körperschall** Eine akustische Funktionsprüfung, die die Schallemissionen bei Betrieb aufzeichnet, kann Abweichungen, Risse und andere Unregelmäßigkeiten in der Verzahnungsgeometrie nach Herstellung erkennbar machen, wenn man das Ergebnis mit dem bekannten Verhalten einer fehlerfreien Verzahnung vergleicht.

**Schleifbrand** Beim Schleifen der Oberflächen kann Schleifbrand entstehen (siehe Abbildung 3.3). Prüfung während des Schleifprozesses mit der Barkhausen-Methode oder danach durch Nital-Ätzprüfung. Grundsätzlich wird bei den meisten Firmen in enger Anlehnung an die AGMA-Verfahrensanleitung AGMA 2007-C00 (früher 2007-B92) bzw. die ISO Norm 14104 geätzt.

**Schmierung** Nach der Herstellung und der Montage von Zahnrädern muss die richtige Schmierung sichergestellt werden. Hier ist darauf zu achten, dass der passende Schmierstoff in ausreichender Menge aufgebracht wird. Zusätzlich ist eine Dichtigkeitsprüfung durchzuführen, dass kein Schmierstoff austreten kann. Dabei sind auch die Funktion der Dichtungen zu prüfen.

### Schleifbrand

- Entsteht beim Schleifen gehärteter Oberflächen durch zu hohe Wärmeentwicklung
- Es kommt zu einem Abfall der Härte (wie beim Anlassen) und es können Mikrorisse
- Schleifbrand hat einen schwer kalkulierbaren Einfluss auf die Festigkeit
- Die Barkhausen-Methode ermöglicht eine Überwachung des Schleifprozesses hinsichtlich möglichen Schleifbrandes
- Nital-Ätzprüfung macht Stellen mit Schleifbrand sichtbar (siehe Bild rechts)



Quelle: WZL Getriebekreis

<b>Barkhausen-Methode</b>	<b>Nital-Ätzprüfung</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barkhausenrauschen ist ein akustisch oder induktiv messbares Signal, das beim Magnetisieren eines ferromagnetischen Materials entsteht</li> <li>• Barkhausensignal reagiert auf Änderung von Eigenspannungen, Härte und Mikrostruktur</li> <li>• Messen des Barkhausensignals während des Schleifprozesses ermöglicht eine Überwachung ob Schleifbrand auftritt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wird nach der Herstellung angewendet</li> <li>• Nital, eine Mischung auf Salpetersäure und Ethanol, wird auf die Oberfläche aufgebracht</li> <li>• Es entsteht eine selektive Phasenätzung der Oberfläche und Stellen mit Schleifbrand werden sichtbar (siehe Bild oben)</li> <li>• Nachteile: Teuer, langsam und schwer in den Fertigungsprozess integrierbar.</li> </ul>

Abb. 3.3: Informationen über Schleifbrand

### 3.2.3 Schweißnähte

Schweißverbindungen kommen bei Windenergieanlagen im Turm, am Maschinenträger und in der Gondel vor. Ältere Anlagen besitzen teilweise als Schweißkonstruktion ausgeführte Rotornaben, heutzutage ist dies allerdings nicht mehr üblich. Kritisch sind vor allem jedoch die Nähte am Maschinenträger und im Turm an den Stellen, wo besonders hohe dynamische Belastungen auftreten. Hier sind die folgenden Prüfungen durchzuführen:

**Materialgüte** Die erforderliche Materialgüte der zu verschweißenden Grundwerkstoffe, im Hinblick auf die chemische Zusammensetzung, muss durch ein Abnahmeprüfzeugnis nach DIN EN 10204 nachgewiesen werden. Der Zulieferer ist dafür verantwortlich, dass ein derartiges Zeugnis zur Verfügung gestellt wird.

**Schweißfolge und -verfahren** Es ist nachzuweisen, dass die Schweißnaht nach der konstruktiv festgelegten Schweißfolge, mit dem richtigen Schweißverfahren und bei auf die Naht Einfluss besitzenden Parametern hergestellt wurde. Dies ist durch entsprechende Zeugnisse und Nachweise zu dokumentieren, siehe auch DIN 18800-7.

**Personalqualifikation** Es ist nachzuweisen, dass die Schweißnaht von entsprechend ausgebildetem Personal durchgeführt wurde. Diese Personalqualifikation ist durch ein Zertifikat nach DIN EN 287-1 nachzuweisen.

**Maße und Form der Schweißnaht** Nach Abschluss der Schweißarbeiten muss geprüft werden, dass die Maße und die Form der Schweißnaht den Anforderungen des Schweißauftrages entsprechen. Dies wird in der Regel durch eine Sichtprüfung des Schweißers direkt nach Abschluss der Schweißarbeiten durchgeführt. Details zur Sichtprüfung von Schweißnähten finden sich in DIN EN 970.

**Oberflächenfehler** Risse auf der Oberfläche der Schweißnaht oder andere Unregelmäßigkeiten innerhalb der Wärmeeinflusszone können durch visuelle Prüfung (nach DIN EN 970) oder durch eine Farbeindringprüfung (nach DIN EN ISO 3452-1) erkannt werden.

**Risse / Poren nah der Oberfläche** Existieren Risse oder Poren unter der Oberfläche so lassen sich diese nicht mit der Sicht- oder Farbeindringprüfung finden. Für diesen Fall wird die Magnetpulverprüfung nach DIN EN 17638 angewendet.

**Risse / Poren in Schweißnaht** Für Fehler die tiefer im Inneren der Schweißnaht auftreten muss eine Ultraschallprüfung nach DIN EN 17640 oder Durchstrahlungsprüfung nach DIN EN 1435 durchgeführt werden.

Weitere Details und Bewertungen zu Unregelmäßigkeiten in Schweißnähten finden sich in der DIN EN ISO 5817.

### 3.2.4 Schraubverbindungen

Schraubverbindungen kommen in einer Windenergieanlage in verschiedenen Komponenten und Teilsystemen vor. Für die Qualitätssicherung von wichtiger Bedeutung ist die Verschraubung der Rotorblätter an der Nabe, sämtliche Schraubverbindungen am Maschinenträger, und zwischen den einzelnen Turmsegmenten. Für die Schraubverbindungen sind die folgenden Prüfungen durchzuführen:

**Materialgüte** Die erforderliche Materialgüte des Schraubenwerkstoffes, im Hinblick auf die chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften, muss durch ein Abnahmeprüfzeugnis nach DIN EN 10204 nachgewiesen werden. Der Zulieferer ist dafür verantwortlich, dass ein derartiges Zeugnis zur Verfügung gestellt wird.

**Korrosionsschutz** Generell ist sicherzustellen, dass die Schraubverbindung gegen Korrosion geschützt ist. Hierzu ist sicherzustellen, dass das Herstellungsverfahren der Schrauben einen entsprechenden Korrosionsschutz (z.B. Verzinkung) gewährleistet. Dies ist besonders wichtig wenn unterschiedliche Grundwerkstoffen zwischen Schraube und Grundkörper zum Einsatz kommen. In diesem Fall kann es zu Kontaktkorrosion kommen.

**Anziehdrehmoment** Die Vorspannkraft ist das entscheidende Kriterium für die Leistungsfähigkeit einer Schraubverbindung. Zur Bestimmung der Vorspannkraft der Schraubverbindung wird das Anziehdrehmoment benötigt, das bei der Montage gemessen werden muss.

**Reibzahl** Neben dem Anziehdrehmoment sind die Reibungsverhältnisse an der Schraube maßgebend für die Vorspannkraft die sich in der Schraubverbindung einstellt. DIN 16047 definiert ein vereinfachtes Prüfverfahren zur Ermittlung der Reibzahl.

### 3.2.5 Gussteile

Innerhalb einer Windenergieanlage gibt es mehrere Komponenten die als Gussteil ausgeführt werden können. Hierzu zählen die Rotornabe, die Rotorwelle, der Maschinenträger und teilweise kleinere Bauteile wie das Gehäuse des Rotorlagers oder des Getriebes. Im folgenden Kapitel werden Prüfungen beschrieben die generell an Gussteilen durchgeführt werden sollten. Prüfungen die speziell auf eine der Komponenten zugeschnitten sind werden anschließend in den jeweiligen Kapiteln 3.3.2, 3.3.4 und 3.3.6 aufgeführt. Im weiteren Verlauf werden Merkmale von Gussteilen und die passenden Prüfungen vorgestellt.

**Oberflächenfehler** Durch ungünstige Abkühlung oder andere Fehler im Gießverfahren können Fehler in der Oberfläche des Gussteils entstehen. Hierzu zählen vor allem Risse und Luft einschlüsse. Um derartige Fehler zu entdecken, kann im einfachsten Fall eine Sichtprüfung

durchgeführt werden. Gründlicher und im Allgemeinen üblich ist die die Durchführung einer Farbeindring- oder einer Magnetpulverprüfung (nach DIN EN 1371-1 bzw. DIN EN 1369).

**Innere Defekte** Auch im Inneren des Gussteils können Ungängen, wie Lunker, auftreten. Durch Verfahren wie Ultraschallprüfung (nach DIN EN 12680) oder Durchstrahlungsprüfung (nach DIN EN 12681) können derartige Herstellungsfehler entdeckt werden.

**Geometrische Abmessungen** Nach Herstellung des Gussteils müssen die Maße kontrolliert werden und mit den geforderten Maßen verglichen werden. Je nach Komplexität des Bauteils bieten sich verschiedene verfahren zur Aufnahme der geometrischen Abmessungen an. Diese reichen von klassischen Vermessungsinstrumenten wie Schieblehren bis hin zu Koordinatenmessmaschinen, die ein CAD-Modell liefern, welches über eine Software mit dem Original verglichen werden kann. Wird ein Gießverfahren mit hoher Reproduzierbarkeit angewendet, so muss die Maßkontrolle nicht für jedes gefertigte Bauteil durchgeführt werden.

**Masse** Das Gewicht des Gussteils ist gerade für die Auslegung der tragenden Struktur von wichtiger Bedeutung. Zusätzlich dient die Gewichtsmessung als weitere Kontrolle der Herstellung, wenn das Gewicht im Rahmen der Toleranz liegt. Nach dem Gießen bzw. eventueller Nachbearbeitung muss daher die Masse bestimmt werden. Wird ein Gießverfahren mit hoher Reproduzierbarkeit angewendet, so muss die Masse nicht für jedes gefertigte Bauteil bestimmt werden.

**Korrosionsschutz** Der Korrosionsschutz wird meistens durch Beschichten mit einer Korrosionsschutzfarbe realisiert. Hier muss eine Schichtdickenmessung durchgeführt werden um zu prüfen, dass die Schichtdicke den Anforderungen genügt (siehe DIN EN ISO 12944).

**Gefüge / Mikrostruktur** Mit Hilfe der Metallographie wird unter einem Lichtmikroskop eine Probe analysiert. Durch Beurteilung des Schlifffildes lassen sich umfangreiche Aussagen über den Wärmebehandlungszustand und die zu erwartenden mechanischen Eigenschaften treffen.

**Materialkennwerte** Die Werkstoffkennwerte wie chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften wie Festigkeit, Härte oder Rauigkeit müssen mit unterschiedlichen Verfahren an Probekörpern bestimmt werden. Die Stelle an der die Probe entnommen wird muss genau dokumentiert werden. Je nach Reproduzierbarkeit des Gießverfahrens können die Prüfungen im stichprobenumfang durchgeführt werden.

Weiterführende Details zur Durchführung der Prüfungen finden sich in der Norm für technische Lieferbedingungen im Gießereiwesen DIN EN 1559.

### 3.2.6 Schmiedestücke

Manche Bauteile einer Windenergieanlage werden als Schmiedestücke hergestellt. Während bei alten Anlagen häufig auch die Rotornabe geschmiedet wurde ist in modernen Anlagen häufig nur noch die Rotorwelle ein Schmiedestück. Im folgenden Kapitel werden Prüfungen beschrieben die allgemein für geschmiedete Bauteile durchgeführt werden sollten. Prüfungen die speziell auf die Rotorwelle zugeschnitten sind werden in Kapitel 3.3.4 aufgeführt.

**Oberflächenfehler** Durch das Schmieden können Fehler in der Oberfläche des Bauteils, z.B. Risse, entstehen. Um derartige Fehler zu entdecken, kann im einfachsten Fall eine Sichtprüfung durchgeführt werden. Gründlicher und im Allgemeinen üblich ist die die Durchführung einer Magnetpulverprüfung (nach DIN EN 10228-1) oder einer Eindringprüfung (nach DIN EN 10228-2).

**Geometrische Abmessungen** Nach Herstellung des Gussteils müssen die Maße kontrolliert werden und mit den geforderten Maßen verglichen werden. Je nach Komplexität des Bauteils bieten sich verschiedene verfahren zur Aufnahme der geometrischen Abmessungen an. Diese reichen von klassischen Vermessungsinstrumenten wie Schieblehren bis hin zu Koordinatenmessmaschinen, die ein CAD-Modell liefern, welches über eine Software mit dem Original verglichen werden kann.

**Masse** Das Gewicht des Schmiedestücks ist gerade für die Auslegung der tragenden Struktur von wichtiger Bedeutung. Zusätzlich dient die Gewichtsmessung als weitere Kontrolle der Herstellung, wenn das Gewicht im Rahmen der Toleranz liegt. Nach dem Schmieden und eventueller Nachbearbeitung muss daher die Masse bestimmt werden.

**Materialkennwerte** Die Werkstoffkennwerte wie chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften wie Festigkeit, Härte oder Rauigkeit müssen mit unterschiedlichen Verfahren, nach der Herstellung, an einem Probekörper bestimmt werden. Die Stelle an der die Probe entnommen wird muss genau dokumentiert werden.

**Korrosionsschutz** Der Korrosionsschutz wird meistens durch Beschichten mit einer Korrosionsschutzfarbe realisiert. Hier muss eine Schichtdickenmessung durchgeführt werden um zu prüfen, dass die Schichtdicke den Anforderungen genügt (siehe DIN EN ISO 12944).



## 3.3 Qualitätsprüfungen an mechanischen Komponenten der Windenergieanlage

### 3.3.1 Rotorblatt

Wie bereits in Kapitel 2.3.1 beschrieben ist das Rotorblatt besonderen Belastungen ausgesetzt und muss daher besonders sorgfältig geprüft werden.

#### 3.3.1.1 Typprüfungen

Durch Typprüfungen an einem Rotorblatt wird sichergestellt, dass die gewählte Konstruktion den auftretenden Beanspruchungen standhält und es zu keinem Versagen der Struktur kommt. Zusätzlich wird das Betriebsverhalten untersucht. Grundsätzlich muss bei den Typprüfungen unterschieden werden zwischen Prüfungen, die auf einem speziellen Rotorblattprüfstand, und Prüfungen, die auf einer Prototypenanlage durchgeführt werden. Auf einem Rotorblattprüfstand (siehe Abbildung 3.4) sollten die folgenden Prüfungen durchgeführt werden:



Abb. 3.4: Rotorblattprüfstand beim Fraunhofer IWES in Bremerhaven [12]

**Dauerfestigkeits- / Ermüdungstest** Das Rotorblatt wird fest eingespannt und dynamisch wechselnd belastet. Dabei gibt die Möglichkeit, das Rotorblatt mit konstanter Amplitude und Frequenz, oder variabel zu belasten. Zusätzlich kann über eine Achse oder mehrere Achsen ein Biegemoment aufgebracht werden. Während der dynamischen Prüfung wird über Dehnungsmessstreifen die Dehnung an verschiedenen Messpunkten aufgenommen und mit einer Software überwacht. Gleichzeitig muss in regelmäßigen Abständen eine Sichtprüfung auf Oberflächenbeschädigungen wie Risse oder Delaminationen durchgeführt werden. Der Ermüdungstest dauert, je nach Wahl von Prüffrequenz und Anzahl der Lastwechsel, in der Regel mehrere Monate und wird jeweils in Schlag- und in Schwenkrichtung durchgeführt. Weitere Details zur dynamischen Prüfung finden sich in der IEC TS 61400-23.

**Statische Prüfung** Eine statische Prüfung soll nachweisen, dass das Rotorblatt den geforderten Lasten ohne Versagen standhalten kann. Dazu wird es fest eingespannt und entweder mit

einer Flächenlast oder punktuellen Lasten beaufschlagt. Einen Überblick über die Einflussgrößen auf die Prüflast findet sich in Abbildung 3.5. Details zur Prüfung der statischen Festigkeit sind in der IEC TS 61400-23 beschrieben.

**Eigenfrequenzen** Damit in der Anlage keine Schwingungen auftreten, die im Bereich der Eigenfrequenzen der Rotorblätter liegen, müssen deren Eigenfrequenzen gemessen werden. Dazu wird eine Eigenschwingungsprüfung durchgeführt, bei der, mit Hilfe spezieller Messgeräte, die Resonanzfrequenzen aufgenommen werden. In der Regel wird die erste und zweite Eigenfrequenz in Schlag- und Schwenkrichtung, sowie die erste Eigenfrequenz in Torsionsrichtung aufgenommen (siehe IEC TS 61400-23 Abschnitt 13.6).

**Prüflast bei der statischen und dynamischen Rotorblattprüfung**

- Grundlage für die Bestimmung der Prüflast ist die jeweilige dynamische oder statische Auslegungslast
- Auslegungslast wird zusätzlich mit Teilsicherheitsbeiwerten und Prüflastfaktoren multipliziert

statische Prüflast	$F_{ps} = F_{ds} \cdot \gamma_{ns} \cdot \gamma_{ss}$
dynamische Prüflast	$F_{pd} = F_{dd} \cdot \gamma_{nd} \cdot \gamma_{sd} \cdot \gamma_{ed}$

<p><math>F_d</math> Auslegungslast einschließlich des Teilsicherheitsbeiwerts für die Folgen eines Versagens. Dieser wird benötigt, da für nicht ausfallsichere Bauteile (wie ein Rotorblatt) eine höhere Sicherheit gegen Ausfall zu fordern ist.</p>	<p><math>\gamma_s</math> Prüflastfaktor für Unterschiede in der Blattserie. Soll die Streuung der Festigkeit innerhalb einer Rotorblattserie berücksichtigen.</p>
<p><math>\gamma_n</math> Teilsicherheitsbeiwert für Lasten. Wird benötigt um Unsicherheiten in den angenommen Lasten zu berücksichtigen.</p>	<p><math>\gamma_e</math> Prüflastfaktor für Unsicherheiten in der Schädigungsrechnung. Wird nur für die Berechnung der dynamischen Prüflast benötigt.</p>

Abb. 3.5: Belastung bei der Rotorblattprüfung

Zusätzlich werden die Rotorblätter auf einer Prototypenanlage getestet. Dabei sollten die folgenden Eigenschaften überprüft werden:

**Aerodynamische Eigenschaften** Im Rahmen des Betriebs wird gemessen ob die Blattkonstruktion die erwarteten aerodynamischen Eigenschaften erfüllt und den entsprechenden Auftrieb erzeugt.

**Schalleigenschaften** Durch die hohen Geschwindigkeiten an der Blattspitze entstehen Schallemissionen, die, sobald Grenzwerte überschritten werden, eine Abschaltung oder Leistungsbegrenzung der Anlage erfordern. Auf einer Prototypenanlage wird der Schalleistungspegel der Windenergieanlage, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, ermittelt. Für diese Messung wird die Leistungskennlinie der Anlage aufgenommen und die dazugehörigen Schalleistungspegel gemessen. Aus der abgegebenen Leistung der Windenergieanlage kann die entsprechende Windgeschwindigkeit bestimmt werden. Details zur Durchführung der Schallvermessung finden sich in der IEC 61400-11.

### 3.3.1.2 Herstellungsprüfungen

Zusätzlich zu den oben angeführten Typprüfungen müssen Herstellungsprüfungen durchgeführt werden. Diese sollen nachweisen, dass das Rotorblatt entsprechend den Anforderungen fehlerfrei gefertigt wurde. Die im folgenden aufgeführten zerstörungsfreien Prüfungen sollten daher für jedes hergestellte Rotorblatt durchgeführt werden.

**Fertigungsfehler** Fertigungsfehler wie Risse, Luftblasen, Delaminationen oder andere Fehler in der Struktur des Faserverbundwerkstoffes lassen sich mit Hilfe verschiedener Verfahren aufdecken. Eine erste Begutachtung lässt sich durch visuelle Prüfung und Abtasten durchführen. Nicht direkt sichtbare Bereiche können mit Hilfe der Endoskopie begutachtet werden. Auch eine Ultraschallprüfung ist möglich. Schnell, kostengünstig und automatisierbar ist das vom Fraunhofer Wilhelm-Klauditz-Instituts (WKI) entwickelte Verfahren der Wärmefluss-Thermographie. Details dazu finden sich in Abbildung 3.6 [13].

**Geometrische Abmessungen** Die geometrischen Abmessungen des Rotorblatts werden aufgenommen und mit den Konstruktionsvorgaben verglichen. Dabei müssen die dort vorgegebenen Toleranzen eingehalten werden. Insbesondere die Flanschflächen zum Anschluss an die Rotornabe müssen auf Ebenheit geprüft werden.

**Masse und Massenschwerpunkt** Die Massenverteilung innerhalb des Rotorblatts ist von konstruktiver Seite so ausgelegt, dass es zu keinen Unwuchten kommt. Aus diesem Grund müssen Abweichungen bei der Masse oder Massenverteilung nach der Herstellung erkannt und beseitigt werden, da es sonst zu einer erhöhten Materialermüdung an den Rotorblättern oder im Triebstrang kommen kann.

**Glasübergangstemperatur** Die Glasübergangstemperatur, auch als Erweichungstemperatur oder *TG-Wert* bekannt, gibt Aufschluss über das Temperaturverhalten der Harze im Faserverbundwerkstoff. Eine Überprüfung dient daher als Qualitätskontrolle für das eingesetzte Material. Die Bestimmung erfolgt mit Hilfe der dynamischen Differenzkalorimetrie nach DIN EN ISO 11357-2. Weitere Informationen zum allgemeinen Ablauf einer dynamischen Differenzkalorimetrie finden sich in der DIN 53765.

**Blitzschutzsystem** Schlägt ein Blitz in die Rotorblätter ein, so müssen die auftretenden Ströme abgeführt werden. Eine Kontrolle des Blitzschutzsystems ist von daher durchzuführen. In der Regel erfolgt dies durch eine Niederohmmessung bzw. Durchgangsprüfung. Zusätzlich ist nach Aufstellung der Windenergieanlage am Standort die Erdung des Blitzschutzsystem zu prüfen.

### 3.3.2 Rotornabe

Für gegossene Rotornaben, die heutzutage in den meisten modernen Anlagen verbaut sind, sollten zunächst die in Abschnitt 3.2.5 aufgeführten Prüfungen für Gussteile durchgeführt werden. Zusätzlich ist es notwendig die Konstruktion im Rahmen einer Typprüfung auf Festigkeit zu testen. Theoretisch wäre dies auf einem Prüfstand möglich, jedoch ist dies, insbesondere bei den großen Rotornaben von Multi-Megawatt-Anlagen schwer realisierbar und damit so gut wie ausgeschlossen. Aus diesem Grund erfolgt die Typprüfung der Rotornabe durch den Einsatz in einer Prototypenanlage. Dabei werden die auftretenden Verformungen mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen aufgenommen und mit den Ergebnissen einer FEM<sup>1</sup>-Strukturanalyse verglichen.

### 3.3.3 Rotorlager

Für das Rotorlager sollten zunächst die in Abschnitt 3.2.1 aufgeführten Prüfungen für Wälzlager durchgeführt werden. Die speziell in der Funktion als Hauptlager auftretenden Beanspruchungen sollten dann zusätzlich im Rahmen einer Typprüfung untersucht werden. Dabei bietet sich die Prüfung auf einem Prüfstand an, auf dem verschiedene dynamische Lastfälle abgefahren werden können, die auch im realen Betrieb auftreten. Auf diese Weise kann die Fähigkeit des Rotorlagers Extremlasten zu widerstehen und dessen Lebensdauer nachgewiesen werden. Zusätzlich ist ein

---

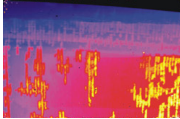

<sup>1</sup>Finite-Elemente-Methode - Werkzeug im Ingenieurwesen zur Festkörpersimulation

### Wärmefluss-Thermographie

- Zerstörungsfreies und bildgebendes Prüfverfahren für die Qualitätssicherung in der Produktion
- Basiert auf der Analyse des Wärmeflusses bzw. der Wärmeleitfähigkeit von Werkstücken
- Einsatzgebiet ist die Erkennung von äußerlich nicht sichtbaren Materialdefekten in Werkstücken, wie Haftungs- und Klebefehler, Delaminationen, Blasen, Lunker, Risse oder Korrosionen
- Eignet sich besonders gut, als schnelles und automatisierbares Verfahren, zur Fertigungskontrolle von Rotorblättern. Ebenfalls ist es für Inspektion und Wartung von Rotorblättern nutzbar.

**Funktionsweise**

- Nutzt die Tatsache, dass alle Objekte Strahlung im infraroten Bereich abgeben
- Spezielle Kamera erfasst diese Strahlung und gibt ein Bild mit der Oberflächentemperatur
- Messobjekt wird einem Wärmeimpuls ausgesetzt, anschließend kühlt die Oberfläche wieder ab
- Fehlstellen mit geringerer Wärmeleitfähigkeit behindern die Ableitung der Wärme ins Objektinnere, die Oberfläche bleibt dort länger warm
- Dies wird im Thermographiebild sichtbar und führt somit zur Erkennung von Fehlstellen

Quelle: Fraunhofer WKI

Abb. 3.6: Informationen über Wärmefluss-Thermographie

Betriebstest in einer Prototypenanlage sinnvoll, um die Beständigkeit gegen im regulären Betrieb auftretende Belastungen sicherzustellen.

Daneben ist nach Herstellung des Rotorlagers eine Kontrolle auf eine ordnungsgemäße Schmierung der Wälzkörper durchzuführen. Zusätzlich sollte eine Dichtigkeitsprüfung ausgeführt werden, um zu kontrollieren, dass weder Schmierstoffe austreten, noch Korrosionsschäden verursachende Medien eintreten können.

### 3.3.4 Rotorwelle

Ähnlich wie die Rotornabe sind die in Windenergieanlagen eingesetzten Rotorwellen entweder Gussteile oder geschmiedete Bauteile. Hier sind zur Sicherung der Herstellungsqualität zunächst die in Abschnitt 3.2.5 oder 3.2.6 aufgeführten Prüfungen anzuwenden.

Zusätzlich ist wiederum eine Typprüfung erforderlich, um sicherzustellen, dass die gewählte Konstruktion allen auftretenden Beanspruchungen standhält. Dies kann auf einem separaten Wellenprüfstand oder auf einen Antriebsstrangprüfstand (siehe Abschnitt 3.5.1) geschehen. Dort müssen neben Extremlasten und der Dauerfestigkeit, auch reale Belastungsprofile getestet werden. Für letzteres wird ein Prüfstand benötigt, der zusätzlich auch Biegemomente und Schubkräfte aufbringen kann.

### 3.3.5 Getriebe

Das Getriebe ist, sofern die Anlage nicht getriebelos ausgeführt ist, eine der wichtigsten Komponenten im Antriebsstrang. Tritt im Getriebe ein Schaden auf und ist ein Austausch notwendig, so kommt es in der Regel zum Ausfall der gesamten Anlage für einen Zeitraum von mehreren Tagen. Aus diesem Grund ist gerade beim Getriebe die Durchführung von Prüfungen zur Sicherstellung der Fehlerfreiheit und Funktionalität notwendig. Für die innerhalb des Getriebe verbauten Grundelemente sind zunächst weiter oben angeführten Prüfungen erforderlich. Dazu gehören für Wälzlager bzw. Gleitlager die Prüfungen aus Abschnitt 3.2.1 und für Zahnräder die Prüfungen aus Abschnitt 3.2.2. Da das Gehäuse des Getriebes meistens als Gussteil ausgeführt ist, sollten die in Abschnitt 3.2.5 aufgeführten Prüfungen angewendet werden.

### 3.3.5.1 Typprüfungen

Neben den Prüfungen an den Grundelementen des Getriebes muss eine Typprüfung durchgeführt werden. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Getriebekonstruktion den am Einsatzort auftretenden Beanspruchungen standhält.

**Getriebeprüfstand** Auf einem Getriebeprüfstand, wie in Abbildung 3.7 dargestellt, werden unterschiedliche Eigenschaften geprüft. Zunächst sind die Festigkeitseigenschaften in Hinblick auf Extremlasten, Dauerfestigkeit und reale Belastungen zu prüfen. Für die Erprobung von realen Belastungen ist ein Prüfstand notwendig, der es ermöglicht, zusätzlich zur Torsionsbelastung eine Biege- und Schubbelastung auf die Antriebswelle des Getriebes aufzubringen. Zusätzlich sollten Punkte wie mechanischer Wirkungsgrad, Temperaturverhalten, sowie Körper- und Luftschall geprüft werden. Im Hinblick auf das Erkennen von möglichen Schwachstellen ist auch die Durchführung einer HALT-Prüfung empfehlenswert. Details dazu finden sich in Abbildung 3.14. Während der Testläufe sollte eine Überwachung der Lagertemperaturen, des Öldrucks und der Ölfilter durchgeführt werden, um einen möglichen Schadensfall schnell zu erkennen.

**Klimakammer** Ist ein Betrieb der Anlage an Standorten geplant, an dem mit besonders kalten bzw. extremen Temperaturen gerechnet werden muss, so müssen diese Temperaturverhältnisse in einer Klimakammer entsprechend simuliert werden. Wichtig ist auch der Test des Kaltstartverhaltens bei den angegebenen Temperaturen.

**Korrosionsbeständigkeit** Die Erprobung der Korrosionsbeständigkeit des Getriebes muss, insbesondere, wenn ein Einsatz an Küstenstandorten oder Offshore geplant ist, durchgeführt werden. Hier ist die Durchführung einer Salzsprühnebelprüfung nach DIN EN ISO 9227 angebracht. Dazu wird das Getriebe in einer abgeschlossenen Kammer betrieben, in die eine Salzlösung eingesprüht wird. Ein derartiger Test wird über einen längeren Zeitraum von bis zu 6 Wochen durchgeführt und kann dabei das Korrosionsverhalten von mehreren Jahren nachempfinden.

**Prototypenanlage** Da, besonders bei komplexen Systemen wie dem Getriebe, die Simulation sämtlicher realer Belastungsmöglichkeiten praktisch unmöglich ist, ist bei Neuentwicklungen auch immer der Betrieb innerhalb einer Prototypenanlage erforderlich. Dieser sollte mindestens über ein Jahr laufen, damit der Betrieb bei allen möglichen Wetterlagen und Windverhältnissen erprobt wird. Nach Abschluss des Prototypentests ist eine komplette Demontage und Begutachtung der Bauteile sinnvoll, um Schwachstellen aufzudecken.

### 3.3.5.2 Funktionsprüfungen

Nach Fertigung der Getriebekomponenten und Montage müssen die folgenden Prüfungen durchgeführt werden, um die Funktionalität des Getriebes sicherzustellen. Die Prüfungen sollten nach Möglichkeit als Stückprüfung für jedes hergestellte Getriebe durchgeführt werden.

**Getriebeprüfstand** Auch Seriengetriebe müssen auf einem Prüfstand getestet werden. Hier werden jedoch andere Eigenschaften getestet als auf dem Prüfstand für Prototypen. Zu den Prüfungen gehören eine Funktionsprüfung auf definierten Laststufen (Drehzahl und Drehmoment), ein Einlauf des Getriebes unter Last und akustische Geräuschprüfungen (siehe unten). Während der Tests sollten Öl- und Lagertemperaturen überwacht werden und nach Abschluss die Ölqualität, zum Beispiel über eine Kontrolle der Filter, untersucht werden.

**Akustische Prüfung / Körperschall** Die akustischen Schallemissionen, sowie beim Betrieb auftretende Vibrationen, sollten gemessen werden. Dies ist notwendig, um einerseits sicherzustellen, dass entsprechende Grenzwerte eingehalten werden und weil abweichende Schallemissionen oder Vibrationen auf Fehler innerhalb des Getriebes hinweisen können.





Abb. 3.7: Prüfstand für Getriebe von Windenergieanlagen der Firma ZF [28]

**Kühlsystem / Ölkreislauf** Das Kühlsystem des Getriebes, das in der Regel auch als Schmier-system dient, muss auf seine Funktion hin geprüft werden. Besonders wichtig ist die Kontrolle des Ölkreislaufs auf Dichtigkeit. Eine Kontrolle dass alle Bauteile ordnungsgemäß geschmiert worden sind ist ebenfalls durchzuführen.

### 3.3.6 Maschinenträger

Im Maschinenträger werden häufig Gussteile verbaut und Schweiß- bzw. Schraubverbindungen eingesetzt. Je nach Bauform müssen deswegen die in den Kapiteln 3.2.3, 3.2.4 und 3.2.5 aufgeführten Prüfungen durchgeführt werden. Zusätzlich ist ein Nachweis erforderlich, dass der Maschinenträger den auftretenden Beanspruchungen standhält. Theoretisch wäre auch hier ein spezieller Prüfstand denkbar, in der Regel findet diese Prüfung jedoch, wie schon bei der Rotor-nabe, auf einer Prototypenanlage statt. Dabei werden die auftretenden Verformungen mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen aufgenommen. Anschließend werden diese mit den Ergebnissen einer vorher durchgeführten FEM-Strukturanalyse verglichen.

### 3.3.7 Turm

Für im Turm verwendete Schweiß- und Schraubverbindungen sind zunächst die in den Kapiteln 3.2.3 und 3.2.4 beschriebenen Prüfungen durchzuführen.

#### 3.3.7.1 Typprüfungen

Wenn eine Turmkonstruktion zum ersten Mal für eine bestimmte Anlage eingesetzt wird, so ist eine Typprüfung erforderlich. Dazu wird eine Prototypenanlage mit der zu prüfenden Turmkonstruktion aufgebaut. Nun sind die folgenden Prüfungen und Messungen durchzuführen:

**Dehnungsmessung** Die Prototypenkonstruktion des Turms wird mit Dehnungsmessstreifen überwacht. Die auftretenden Verformungen werden mit den Ergebnissen einer FEM-Strukturanalyse verglichen und die Festigkeit der Turmkonstruktion bewertet.

**Eigenfrequenz** Die Kenntnis der Eigenfrequenz der Turmkonstruktion wird benötigt, um zu vermeiden, dass diese Frequenz von anderen Komponenten angeregt wird und somit die Turmkonstruktion zerstört. Bei Spannbetontürmen kann die Eigenfrequenz über die Spannung der Spannelemente eingestellt werden, hier ist die Prüfung der Eigenfrequenz auch als Stückprüfung durchzuführen. Bei Türmen, in denen ein Dämpfungssystem eingebaut ist, muss ebenfalls bei jedem Turm die Eigenfrequenz gemessen werden.

**Schraubverbindungen** Bei Türmen mit verschraubten Segmenten sollten die Schraubverbindungen mit einem Verspannungsmessgerät überwacht werden. Die innerhalb der Schraube auftretenden Spannungen können somit ermittelt werden und ermöglichen eine Einschätzung ob die Auslegung der Schraubverbindung ausreichend ist.

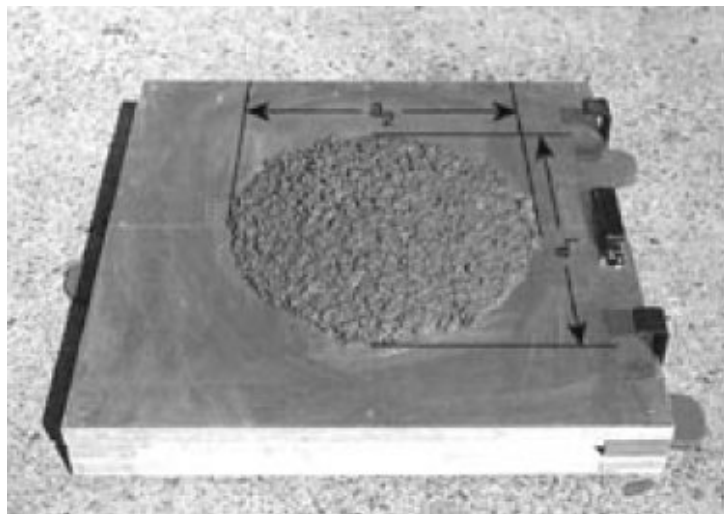


Abb. 3.8: Messung des Ausbreitmaß von Frischbeton

### 3.3.7.2 Herstellungsprüfungen

Die folgenden Herstellungsprüfungen bringen den Nachweis für eine fehlerfreie Produktion des Turms und sollten als Stückprüfung an jedem hergestellten Turm angewendet werden.

**Materialgüte** Bei Einsatz eines Stahlrohturms ist die erforderliche Materialgüte, im Hinblick auf die chemische Zusammensetzung, Z-Güte, Ergebnisse aus Zugversuch, Aufschweißbiegeversuch und Kerbschlagbiegeversuch durch ein Abnahmeprüfzeugnis nach DIN EN 10204 nachzuweisen. Der Zulieferer ist dafür verantwortlich, dass ein derartiges Zeugnis zur Verfügung gestellt wird.

**Prüfung des Betons** Bei Einsatz von Beton für die Turmkonstruktion muss grundsätzlich zunächst sichergestellt sein, dass der Beton gemäß DIN EN 206-1 hergestellt wird. Zusätzlich sind Prüfungen durchzuführen. Hier muss zwischen der Ortbetonbauweise und der Fertigteilmbauweise unterschieden werden. Während bei Ortbeton jede einzelne Betonlieferung geprüft werden muss, ist bei, in einer Fabrik hergestellten, Segmenten eine hohe Reproduzierbarkeit gegeben. Dort muss die Qualität des verwendeten Betons nur stichprobenartig geprüft werden. Bei Frischbeton werden Eigenschaften wie Konsistenz, Dichte, Luftgehalt und Temperatur geprüft. Die Prüfungen sind entsprechend nach DIN EN 12350 durchzuführen. Zusätzlich müssen Probekörper hergestellt werden an denen anschließend Festigkeitsprüfungen nach DIN EN 12390 durchgeführt werden.

**Geometrische Abmessungen** Vor der Montage einzelner Turmsegmente sollten diese vermessen werden um sicherzustellen, dass die geometrischen Toleranzen eingehalten werden und keine Transportschäden vorhanden sind. Durch die hohen Belastungen können bereits kleine Abweichungen zum Knicken des Turms und damit einer völligen Zerstörung der Anlage führen (siehe DIN 18800-4). Wichtig ist auch die geometrische Kontrolle der Flanschkontaktflächen bei Stahltürmen auf Planarität. Durch nicht fachgerecht ausgeführte Schweißarbeiten können dort Abweichungen auftreten.

**Korrosionsschutz** Stahltürme bekommen als Korrosionsschutz einen speziellen Anstrich. Wichtig ist, dass während der Beschichtung auf die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte) geachtet wird und dies dokumentiert wird. Durch eine Schichtdickenmessung muss sichergestellt werden, dass die Dicke des Anstrichs ausreichend ist. Zusätzlich wird die Zähigkeit der Beschichtung geprüft. Die Flanschflächen zum Verschrauben der einzelnen Turmsegmente bleiben oft unbehandelt.

**Steigeinrichtung / Fallschutz** Nach dem Aufstellen des Turms müssen alle Befestigungselemente der Steigeinrichtung auf eine ordnungsgemäße Montage überprüft werden.

**Verkabelung** Sämtliche Kabel die vom Turmfuß in die Gondel führen müssen geprüft werden. Dies kann beispielsweise durch eine Durchgangsprüfung geschehen.



## 3.4 Qualitätsprüfungen an elektrischen Komponenten der Windenergieanlage

### 3.4.1 Generator

#### 3.4.1.1 Typprüfungen

Als letztes drehendes Teil des Antriebsstrangs ist der Generator vielen verschiedenen Beanspruchungen ausgesetzt. Dies macht eine umfassende Typprüfung erforderlich, die nachweist, dass alle Generatorbauteile den Beanspruchungen standhalten. Im Hinblick auf Extremlasten und die Dauerfestigkeit, den Betrieb bei besonders kalten oder extremen Temperaturen, sowie die Erprobung der Korrosionsbeständigkeit sind zunächst, auf einem Prüfstand, die gleichen Prüfungen wie für das Getriebe erforderlich. Siehe dazu Kapitel 3.3.5. Zusätzlich sind die folgenden Prüfungen anzuwenden, um eine erfolgreiche Typprüfung abzuschließen.

**Elektrische Prüfungen** Der Generator muss im Hinblick auf seine elektrischen Eigenschaften und Kenngrößen umfassend vermessen werden. Teile dieser Prüfungen werden als Typprüfung durchgeführt, alle anderen als Stückprüfung an jedem hergestellten Generator bevor dieser das Werk verlässt. Abbildung 3.9 gibt einen Überblick über diese Prüfungen.

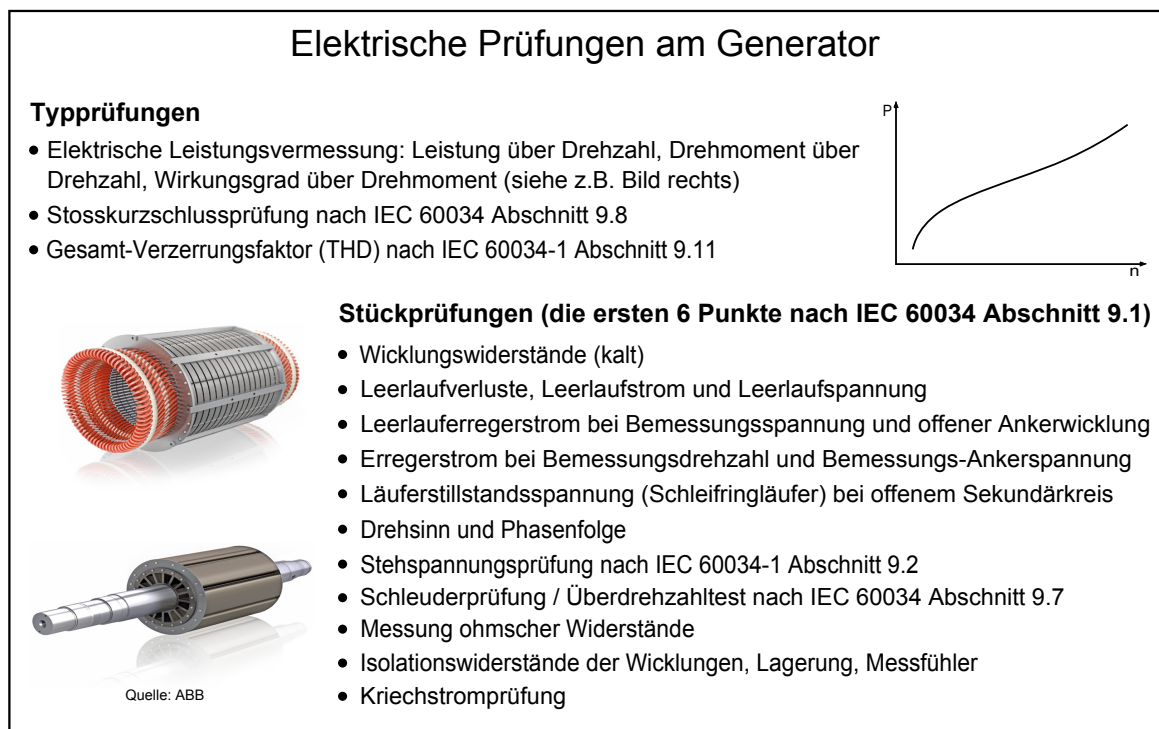


Abb. 3.9: Elektrischen Typen- und Stückprüfungen am Generator

**Elektromagnetische Verträglichkeit** Es muss sichergestellt werden, dass die beim Betrieb entstehenden elektromagnetischen Felder keine Störungen auf andere Geräte verursachen. Details und Anweisungen zu dieser Prüfung finden sich in der IEC 60034-1 Abschnitt 13.

**Thermisches Verhalten** Das thermische Verhalten des Generators bei Betrieb muss geprüft werden. Dazu wird eine Erwärmungsprüfung durchgeführt. Dabei werden die Wicklungstemperaturen, Kühlmitteltemperaturen und Lagertemperaturen überwacht. Auch an ausgewählten Bauteilen wie Kommutatoren, Schleifringe oder Bürsten müssen die Temperaturen

gemessen werden. Wichtig ist insbesondere, dass die Temperaturen keine Werte erreichen, die die Isolierung dieser Teile oder benachbarter Teile gefährden. Die Prüfung ist durchzuführen nach den Vorgaben der IEC 60034-1 Abschnitt 8.

**Schwingungsmessung** Die mechanischen Schwingungen, die beim Betrieb des Generators auftreten, müssen gemessen werden. Diese Kenntnisse sind notwendig um zu vermeiden, dass durch die Schwingungen und Vibrationen Störungen und Fehler in anderen Bauteilen der Anlage auftreten.

**Akustische Prüfung** Während eines Testlaufs müssen die Schallemissionen des Generators in Abhängigkeit der Generatorleistung gemessen werden.

**Schutzfunktion gegen Stromdurchgang** Ein Stromdurchgang, ausgelöst durch einen Blitzschlag oder einen Isolationsfehler, kann im Generatorlager gravierende Schäden an den Laufbahnen der Lagerringe - in Form von Schmelzkratern und Riffelbildung - verursachen. Aus diesem Grund werden in den meisten Generatoren stromisolierte Lager eingesetzt. Die Schutzfunktion dieser Lager muss dabei durch eine Prüfung sichergestellt werden. Dazu wird eine Spannung am Lager angelegt und geprüft, dass kein Strom fließt.

#### 3.4.1.2 Stückprüfungen

Zunächst sollten für jeden Generator die in Abbildung 3.9 aufgeführten elektrischen Stückprüfungen angewendet werden. Details zu diesen Prüfungen finden sich innerhalb der IEC 60034-1 Abschnitt 9.1. Zusätzlich sind die folgenden Herstellungs- und Funktionsprüfungen durchzuführen.

**Geometrische Abmessungen** Abweichungen bei den Abmessungen der Bauteile können zu einer ungleichförmigen Drehbewegung und erhöhtem Verschleiß führen. Eine Prüfung in Form einer Vermessung der Generatorbauteile, die die Einhaltung der Maßtoleranzen bestätigt, ist notwendig.

**Rissprüfung** Die Oberfläche der Antriebswelle des Generators muss auf Herstellungsfehler untersucht werden. Dies kann mit Hilfe der Wirbelstromprüfung (nach DIN EN 12084), der Magnetpulverprüfung (nach DIN EN ISO 9934-1) oder der Farbeindringprüfung (nach DIN EN ISO 3452-1) durchgeführt werden.

**Korrosionsschutz** Durch eine Schichtdickenmessung der Korrosionsschutzfarbe wird sichergestellt, dass der Korrosionsschutz gegeben ist. Zur Durchführung der Schichtdickenmessung ist die Wirbelstromprüfung (nach DIN EN 12084) oder die Ultraschallprüfung (nach DIN EN 583-1) üblich.

**Erdung** Es ist eine Prüfung durchzuführen, mit der nachgewiesen wird, dass der Generator mit einer Erdungsklemme oder einer anderen Vorrichtung zum Anschluss an einen Schutz- oder Erdungsleiter ausgestattet ist.

**Betriebstest** Der Generator wird angetrieben und die abgegebene Spannung geprüft. Je nach Bauform des Generators wird bei konstanter Drehzahl oder dynamisch auf mehreren Stufen geprüft. In diesem Rahmen ist auch eine Schwingungsmessung, ein Kurzschlussstest, sowie ein Erwärmungstest bei Nenndrehzahl und Nennstrom durchzuführen.

**Kühlsystem** Die Funktionalität des Kühlsystems muss sichergestellt werden. Es ist eine separate Prüfung und ein Test bei Betrieb des Generators notwendig, um sicherzustellen, dass die Kühlleistung ausreicht. Bei flüssigkeitsgekühlten Generatoren ist eine zusätzliche Druck- und Dichtigkeitsprüfung durchzuführen.

**Schleuderdrehzahl** Es ist der Nachweis zu erbringen, dass der Generator für eine gewisse Zeit mit einer die Bemessungsdrehzahl überschreitenden Drehzahl betrieben werden kann, ohne Schaden zu nehmen. Details sind in der IEC 60034-1 Abschnitt 9.7 aufgeführt.

### 3.4.2 Frequenzumrichter

#### 3.4.2.1 Typprüfungen

Auch der Frequenzumrichter einer Windenergieanlage muss zunächst einer Typprüfung unterzogen werden, um sicherzustellen, dass er allen auftretenden Beanspruchungen standhalten kann. Dies kann entweder auf einem Antriebsstrangprüfstand (siehe Abschnitt 3.5.1) geschehen, oder es wird eine spezielle Testeinrichtung aufgebaut, in der der Frequenzumrichter separat geprüft wird.

**Betriebstest** Auf einem Prüfstand muss ein Betriebstest zur Leistungsvermessung, sowie ein Über- und Dauerbelastungstest durchgeführt werden. Auf diese Weise soll die Belastbarkeit und Lebensdauer der eingesetzten elektronischen Bauteile bewertet werden.

**Erwärmungsprüfungen** Zusätzlich sollten auf dem Prüfstand die auftretenden Temperaturen bei unterschiedlichen Betriebszuständen überwacht werden, um sicherzustellen, dass das Kühlsystem ausreichend dimensioniert ist und keine zu hohen Temperaturen auftreten. Zusätzlich hilft die Prüfung aller stromführenden Bauteile und Leiterbahnen mit einer Infrarotkamera zum Erkennen von Stellen mit überhöhten Temperaturen.

**Klimatests** Je nach vorgesehenem Einsatzstandort der Anlage muss der Frequenzumrichter in einer Klimakammer geprüft werden. Hier ist ein Betrieb bei extremen Temperaturen, sehr kalten Temperaturen oder eine Salznebensprühprüfung möglich. Weiterhin sinnvoll ist hier auch die Durchführung eines Temperatur-Wechselbelastungstests, bei dem der Frequenzumrichter großen Temperatursprüngen ausgesetzt wird und das Betriebsverhalten überwacht wird.

**Elektromagnetische Verträglichkeit** Es muss sichergestellt werden, dass die beim Betrieb entstehenden elektromagnetischen Felder keine Störungen auf andere Geräte verursachen.

**Oberschwingungen** Eine Frequenzanalyse der erzeugten Ausgangsspannung ist durchzuführen mit Angabe der relativen Verteilung der Oberwellen.

#### 3.4.2.2 Stückprüfungen

Zusätzlich zu den oben angeführten Typprüfungen sollten bei jeden hergestellten Frequenzumrichter die folgenden Herstellungs- und Funktionsprüfungen durchgeführt werden.

**Schraubverbindungen** Bei den leistungsführenden Schraubverbindungen, also die Anschlusspunkte der einzelnen Phasen, muss eine fachgerechte Montage (z.B. durch Prüfung des Anziehdrehmoment) sichergestellt sein.

**Betriebsfunktionen** Im Werk ist ein Funktionstest des Umrichters mit verminderter und maximaler Leistung durchzuführen. Zusätzlich ist die Steuerung des Frequenzumrichters in Hinsicht auf Leistungsbegrenzung und Abschaltung zu prüfen.

**Blind- und Scheinleistung** Die vom Frequenzumrichter abgegebene Blind- und Scheinleistung im Teillastbetrieb muss geprüft werden.

**Wellenform / Phasenwinkel** Die vom Ausrichter erzeugte Form der Ausgangsspannung ist hinsichtlich der Wellenform und dem Phasenwinkel zu überprüfen.

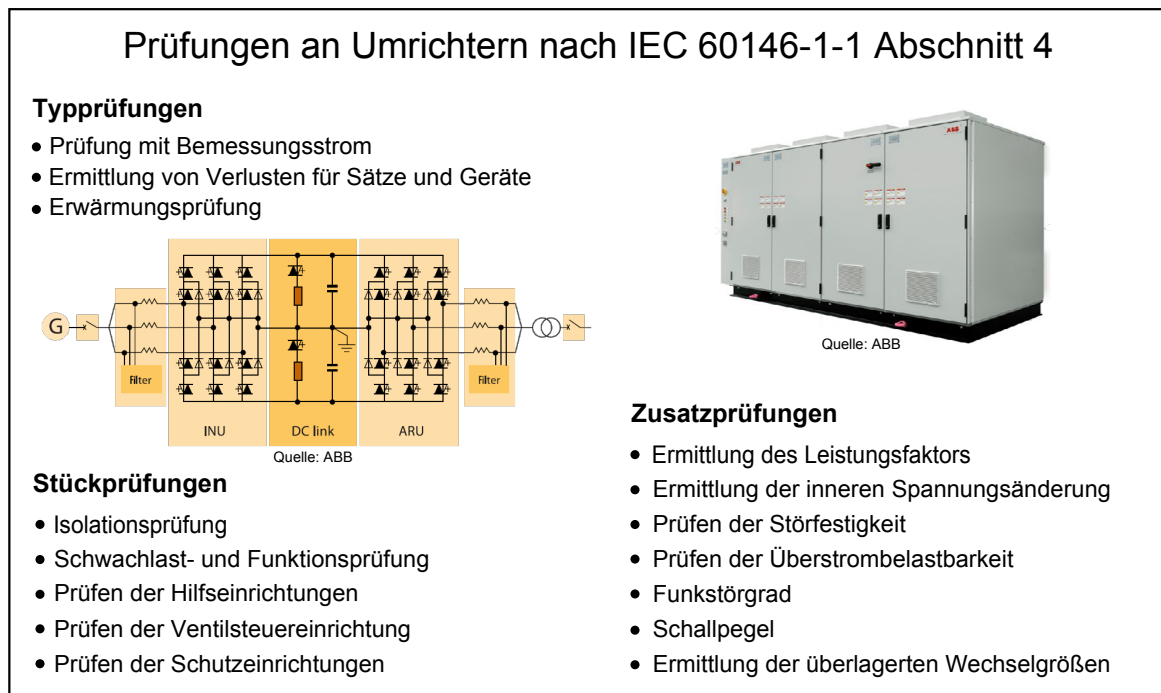


Abb. 3.10: Prüfungen an Frequenzumrichtern nach IEC 60146-1-1

**Kondensatoren** Die eingesetzten Kondensatoren müssen im Rahmen einer Prüfung geladen und wieder entladen werden, um ihre Funktion sicherzustellen.

**Kühlsystem** Das Kühlsystem muss getestet werden. Es ist eine separate Prüfung durchzuführen und ein Test bei Betrieb des Umrichters, um sicherzustellen, dass die Kühlleistung ausreicht. Bei einer Flüssigkeitskühlung ist eine Dichtigkeitsprüfung durchzuführen, sowie eine Messung von Druck und Durchflussmenge.

**Erdung** Durch eine Prüfung ist sicherzustellen, dass der Generator mit einer Erdungsklemme oder einer anderen Vorrichtung zum Anschluss an einen Schutz- oder Erdungsleiter ausgestattet ist.

### 3.4.3 Transformator

#### 3.4.3.1 Typprüfungen

Auf Grund der hohen Gefahren, die bei Schäden an Transformatoren auftreten können, müssen diese einer ausführlichen Typprüfung unterzogen werden. Geregelt wird die Durchführung dieser Prüfung innerhalb der IEC 60076-1 zunächst für flüssigkeitsgefüllte Transformatoren. Abweichende Anweisungen für Prüfungen an Trockentransformatoren finden sich in der IEC 60076-11. Zusätzlich existiert die IEC 60076-16 (zur Zeit noch ein Norm-Entwurf) mit Anweisungen speziell für Transformatoren in Windenergieanlagen. Im Rahmen der Typprüfung sollten die folgenden Untersuchungen durchgeführt werden.

**Dauerprüfung** Betrieb des Transformators in einer Prototypenanlage oder auf einem Prüfstand über einen längeren Zeitraum. Vollständige Demontage des Transformators nach Abschluss und Begutachtung der Bauteile zum Erkennen von Schwachstellen.


**Erwärmungsmessung** Bei der Erwärmungsmessung wird der Transformator mit Bemessungsleistung betrieben. Dabei werden die Temperaturen der Flüssigkeit im Kessel und die Wicklungstemperaturen gemessen. Zusätzlich kann vor und nach der Prüfung eine Gas-in-Öl-Analyse durchgeführt werden. Dies ermöglicht die Feststellung von lokaler Überhitzung.

Die Erwärmungsmessung ist durchzuführen nach den Vorgaben innerhalb der IEC 60076-2 Abschnitt 7.

**Spannungsprüfungen** Nach der IEC 60076-3 müssen die in Abbildung 3.11 dargestellten Spannungsprüfungen durchgeführt werden. Die Prüfungen dienen als Nachweis, dass die Isolation des Transformators allen Anforderungen gerecht wird. In Abhängigkeit von der Art der Anwendung oder von den Schwierigkeiten bei der Installation kann die Durchführung der Stoßspannungsprüfung und der Teilentladungsprüfung nach IEC 60076-1 als Stückprüfung gerechtfertigt werden.

### Spannungsprüfungen für Transformatoren

- Schaltstoßspannungsprüfung (SI) der Leiteranschlüsse
- Blitzstoßspannungsprüfung (LI) der Leiteranschlüsse
- Stoßspannungsprüfung (LI) des Sternpunktanschlusses
- Angelegte Steh-Wechselspannungsprüfung
- Kurzzeit-Stehspannungsprüfung mit induzierter Wechselspannung (ACSD)
- Langzeitprüfung mit induzierter Wechselspannung (ACLD)



Quelle: SGB Trafo

Abb. 3.11: Spannungsprüfungen an Transformatoren nach IEC 60076-3

**Bestimmung des Geräuschpegels** Die vom Transformator abgegebenen Geräusche haben mehrere Ursachen. Dazu zählen Magnetostriktion, elektromagnetische Kräfte in den Wicklungen, sowie Geräusche die von Lüftern oder Pumpen erzeugt werden. Die Kenntnis des Geräuschpegels eines Transformators wird benötigt, um mögliche Geräuschbelastungen, die auch bei abgeschalteter Windenergieanlage auftreten, abschätzen zu können. Durch eine Messung des Schalldrucks oder der Schallintensität bei bekanntem Abstand muss daher der Schalleistungspegel des Transformators aufgenommen werden. Das Verfahren ist in der IEC 60076-10-1 beschrieben.

#### 3.4.3.2 Stückprüfungen

Nachdem die Typprüfung den Nachweis erbracht hat, dass der Transformator allen auftretenden Betriebsbeanspruchungen stand hält, muss mit den folgenden Prüfungen die richtige Herstellung und Funktion sichergestellt werden. Die Prüfungen sind an jedem einzelnen Transformator anzuwenden bevor dieser das Werk verlässt.

**Elektrische Prüfungen** Nach IEC 60076-1 Abschnitt 10.1.1 sind Stückprüfungen aufgeführt die für jeden Transformator durchgeführt werden sollten. Einen Überblick über die elektrischen Stückprüfungen nach IEC 60076-1 bietet Abbildung 3.12.

**Kühlsystem** Eine Prüfung des Kühlsystems ist vorzunehmen. Wichtig ist auch, dass die Sensorik zur Temperaturüberwachung im Kessel getestet wird. Hier ist eine separate Prüfung durchzuführen, also ein Funktionstest des Lüfters bzw. der Flüssigkeitspumpe, und eine Prüfung bei Betrieb des Transformators, um sicherzustellen, dass die Kühlleistung entsprechend ausreichend ist, wenn dies nicht bereits im Rahmen der Typprüfung sichergestellt wurde.

**Dichtigkeitsprüfung** Bei flüssigkeitsgefüllten und gasgefüllten Transformatoren ist eine Dichtigkeitsprüfung, sowie die Messung des Drucks im Kessel durchzuführen.


**Gas-in-Öl-Analyse** Nach der Herstellung sollte eine Gas-in-Öl-Analyse durchgeführt werden. Wenn nach Wartungs- und Inspektionsarbeiten eine erneute Gas-in-Öl-Analyse durchgeführt wird, so lässt der Vergleich der Ergebnisse Rückschlüsse auf eventuelle lokale Überhitzungen im Transformator zu. Die Gas-in-Öl-Analyse ist nur bei ölgefüllten Transformatoren notwendig.

**Kurzschlussfestigkeit** Die Prüfung der Kurzschlussfestigkeit soll den Nachweis erbringen, dass der Transformator, zusammen mit allen Einrichtungen und Zubehörteilen, so ausgelegt und gebaut ist, dass sie ohne Beschädigung den thermischen und dynamischen Wirkungen äußerer Kurzschlüsse widerstehen. Die thermische Kurzschlussfestigkeit wird durch eine Berechnung sichergestellt, der Nachweis der dynamischen Kurzschlussfestigkeit erfolgt in der Regel durch eine Prüfung. Das Verfahren der Prüfung ist in der IEC 60076-5 Abschnitt 4.2 beschrieben.

**Erdung** Es ist eine Prüfung durchzuführen, die sicherstellt, dass der Transformator mit einer Erdungsklemme oder einer anderen Vorrichtung zum Anschluss an einen Schutz- oder Erdungsleiter ausgestattet ist.

### Elektrische Prüfungen an Transformatoren

- Messung des Wicklungswiderstands
- Messung der Übersetzung und Überprüfung der Phasenverschiebung
- Messung der Kurzschlussimpedanz und der Kurzschlussverluste
- Messung der Leerlaufverluste und des Leerlaufstroms
- Teile der Spannungsprüfungen (nach IEC 60076-3)
- Prüfung der Stufenschalter
- Überprüfung des Übersetzungsverhältnisses und der Polarität von Einbaustromwandlern
- Bestimmung der Kapazitäten der Wicklungen gegen Erde und zwischen den Wicklungen
- Messung des Isolationswiderstands der Wicklungen gegen Erde
- Messung des Verlustfaktors der Kapazitäten des Isolationssystems
- Überprüfung der Kern- und Rahmenisolation
- Messen des Frequenzgangs / Frequenzganganalyse



Quelle: SGB Trafo

Abb. 3.12: Stückprüfungen an Transformatoren nach IEC 60076-1

### 3.4.4 Mittelspannungsschaltanlage

#### 3.4.4.1 Typprüfungen

Auch für die Mittelspannungsschaltanlage muss durch eine Typprüfung nachgewiesen werden, dass diese samt ihrer Hilfseinrichtungen ausreichend dimensioniert worden ist. Für die in Windenergieanlagen eingesetzten Schaltanlagen müssen folgende Prüfungen durchgeführt werden:

**Dielektrische Prüfungen** Durch die dielektrische Prüfung wird nachgewiesen, dass die Durchschlagsfestigkeit des Dielektrikums zwischen den Kontakten der Schaltanlage ausreichend hoch ist. Dazu wird bei geöffneten Kontakten eine Wechsellspannungsprüfung und eine Blitzstoßspannungsprüfung durchgeführt. Details zum Verfahren und die anzuwendenden Prüfspannungen finden sich in der IEC 62271-1 Abschnitt 6.2.6.

**Erwärmungsprüfung** Durch die Erwärmungsprüfung wird nachgewiesen, dass die Temperaturgrenzwerte nicht überschritten werden. Die Prüfung ist gemäß IEC 62271-1 Abschnitt 6.5 durchzuführen. Die Grenzwerte für die Temperaturen finden sich ebenfalls in der IEC 62271-1 Tabelle 3.

**Kurzzeitstrom- und Stoßstromprüfungen** Die Hauptstrombahnen der Schaltanlage muss zum Nachweis, dass sie ihren Bemessungs-Kurzzeitstrom und ihren Bemessungs-Stoßstrom führen kann, geprüft werden. Dabei darf es zu keinen mechanischen Beschädigungen irgendwelcher Teile oder zur Trennung der Kontakte kommen. Details und Anweisungen zu dieser Prüfungen finden sich in der IEC 62271-1 Abschnitt 6.6.

**Störlichtbogenprüfung** Für die Störlichtbogenprüfung wird innerhalb einer gasisolierten Schaltanlage ein Störlichtbogen erzeugt. Dazu müssen alle Schutzeinrichtungen, die den Strom abschalten können, inaktiv sein. Durch den Lichtbogen erhöht sich in der gekapselten Schaltanlage schlagartig der Druck. Dieser muss durch ein passendes Ventil oder eine Sollbruchstelle abgeführt werden. Hier ist besonders wichtig, dass das Ventil im Hinblick auf maximalen Personenschutz positioniert ist. Details und Anweisungen zu dieser Prüfung finden sich in der IEC 62271-200 Abschnitt 6.106

**Dichtheitsprüfungen** Bei gas- oder flüssigkeitsisolierten Schaltanlagen ist eine Dichtheitsprüfung durchzuführen. Dabei soll der Nachweis erbracht werden, dass die absolute Leckrate den für die zulässige Leckrate festgelegten Wert nicht überschreitet. Details zur Durchführung der Dichtheitsprüfung finden sich in der IEC 62271-1 Abschnitt 6.8.

**Prüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit** Falls die Hilfs- und Steuerstromkreise der Schaltanlage elektronische Einrichtungen oder Baugruppen enthalten, sind sie auf elektromagnetische Störaussendung und auf elektromagnetische Störfestigkeit zu prüfen. Anderenfalls sind keine Prüfungen erforderlich. Details zu der Prüfungen finden sich in der IEC 62271-1 Abschnitt 6.9.

#### 3.4.4.2 Stückprüfungen

Während die oben angeführten Typprüfungen nicht für jede hergestellte Schaltanlage ausgeführt werden, müssen die folgenden Stückprüfungen, für jede produzierte Schaltanlage erfolgen, um sicherzustellen, dass das Produkt die gleichen Eigenschaften aufweist wie die bereits erfolgreich der Typprüfung unterzogenen Schaltanlage.

**Dielektrische Prüfung** Nach IEC 62271-1 Abschnitt 7.1 ist eine Kurzzeitwechselfspannungsprüfung durchzuführen. Die anzulegende Prüfspannung ist dabei nach Tabelle 1 und 2 der IEC 62271-1 zu wählen.

**Prüfungen an Hilfs- und Steuerstromkreisen** Es ist eine Inspektion der Hilfs- und Steuerstromkreise durchzuführen. Dabei muss unter anderen die Beschaffenheit der Materialien, die Qualität des Zusammenbaus, die Oberflächenbehandlung und Schutzbeschichtungen gegen Korrosion überprüft werden. Weitere Einzelheiten finden sich in der IEC 62271-1 Abschnitt 7.2.

**Messung des Widerstands des Hauptstromkreis** Der Widerstand des Hauptstromkreises ist zu messen, um eine Schaltanlage, die einer Erwärmungsprüfung unterzogen wurde, mit anderen Schaltanlagen des gleichen Typs vergleichen zu können. Liegt der Wert des Widerstands innerhalb der zulässigen Toleranz so sind die Ergebnisse der Erwärmungsprüfung auch für diese Schaltanlage gültig. Details finden sich in der IEC 62271-1 Abschnitt 7.3.

**Dichtheitsprüfung** Alle gas- oder flüssigkeitsisolierten Schaltanlagen müssen auf Dichtheit und richtigen Druck geprüft werden. Bei gasgefüllten Systemen kann dafür das Verfahren des Abschnüffeln mit einem entsprechendem Schnüffelgerät angewendet werden. Details finden sich in der IEC 62271-1 Abschnitt 7.4.

**Schutzprüfung** Die Schutzfunktion der Schaltanlage muss auf Ihre richtige Funktion hin geprüft werden. Das wird ein bestimmter Stromwert eingestellt, bei dem die Schaltanlage abschalten muss und geprüft ob sich der Leistungsschalter entsprechend öffnet.

**Erdung** Es ist eine Prüfung durchzuführen, die nachweist, dass die Schaltanlage mit einer Erdungsklemme oder einer anderen Vorrichtung zum Anschluss an einen Schutz- oder Erdungsleiter ausgestattet ist.



## 3.5 Qualitätsprüfungen an Teilsystemen der Windenergieanlage

### 3.5.1 Antriebsstrang

In diesem Kapitel wird die Möglichkeit vorgestellt, den Antriebsstrang einer Windenergieanlage auf einem Prüfstand zu testen. Dafür werden alle dem Antriebsstrang zugeordneten Komponenten, also Rotorwelle mit Lagerung, Getriebe, Generator und Umrichter, auf einem Prüfstand montiert. Über einen externen Antrieb kann nun die Rotorwelle angetrieben werden und mit Hilfe von Messtechnik wird das Verhalten der Komponenten untersucht. Eine schematische Darstellung findet sich in Abbildung 3.13.

Ein derartiger Prüfstand dient nicht dazu, Werkstoff- oder Fertigungsfehler aufzudecken, sondern wird bereits in der Entwicklungsphase eingesetzt, um die Festigkeit nachzuweisen und konstruktive Schwachstellen aufzudecken. Ein Antriebsstrangprüfstand kann daher als Werkzeug für die Typprüfung betrachtet werden. Eine im Umfang geringfügigere Prüfung des Antriebsstrangs auf Werkstoff- und Fertigungsfehler findet im Rahmen der Stückprüfungen an den jeweiligen Komponenten, oder im Rahmen der Qualitätsprüfungen an der montierten Gondel statt, auf die in Kapitel 3.5.4 eingegangen wird.

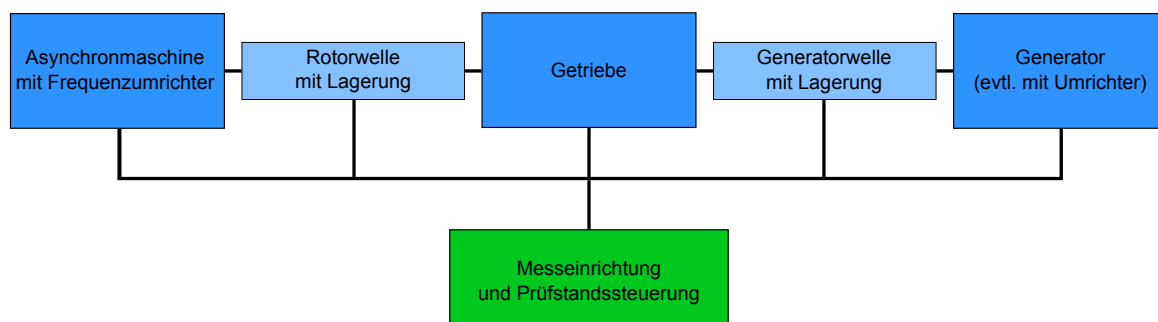


Abb. 3.13: Schematische Darstellung eines Antriebsstrangprüfstands

Als Antrieb, um das im realen Betrieb vom Wind erzeugte Drehmoment nachzubilden, wird auf einem Prüfstand meistens eine Asynchronmaschine eingesetzt. Diese lässt sich über einen Frequenzumrichter flexibel steuern, und ermöglicht damit den Antriebsstrang mit dynamisch wechselnden Beanspruchungen zu belasten. Auf diese Weise lassen sich festgelegte Belastungsprofile abfahren und, sofern der Prüfstand auch Biegemomente und Schubkräfte aufbringen kann, die real auftretenden Lasten sehr genau nachempfinden. Die Antriebsmaschine muss dabei so ausgelegt sein, dass sie mindestens, in der Regel sogar deutlich mehr als die Bemessungsleistung des Antriebsstrangs aufbringen kann. Auch eine Erprobung des Zusammenspiels der für den Antriebsstrang geplanten Komponenten lässt sich auf einem derartigen Prüfstand, ohne den aufwändigen Aufbau von Prototypenanlagen, durchführen.

Besonders für die Untersuchung der langfristigen Zuverlässigkeit bieten Antriebsstrangprüfstände neue Möglichkeiten. Traditionell erfolgt die Erprobung von neuen Anlagentypen in der Windindustrie über Feldtests. Nach Untersuchung von einzelnen Komponenten werden mehrere Prototypen aufgestellt und nachdem diese über einen Zeitraum von mehreren Monaten oder Jahren ordnungsgemäß laufen beginnt die Serienproduktion. Durch diese Prototypen kann eine operative Funktionalität der Anlage sichergestellt werden. Eine Nachweis, dass alle Komponenten der Anlage über einen Dauer von 20 Jahren, ist damit jedoch nicht gegeben. Hierfür wäre es erforderlich, mehrere Anlagen über einen Zeitraum von mindestens 20 Jahren einem Testbetrieb zu unterziehen.

Eine Möglichkeit Schwachstellen herauszufinden, die nach mehreren Jahren Betrieb zu einem Versagen führen könnten, ist die Durchführung von sogenannten HALT-Tests auf dem Prüfstand. HALT steht hierbei für *Highly accelerated life testing* und bedeutet, dass der Triebstrang

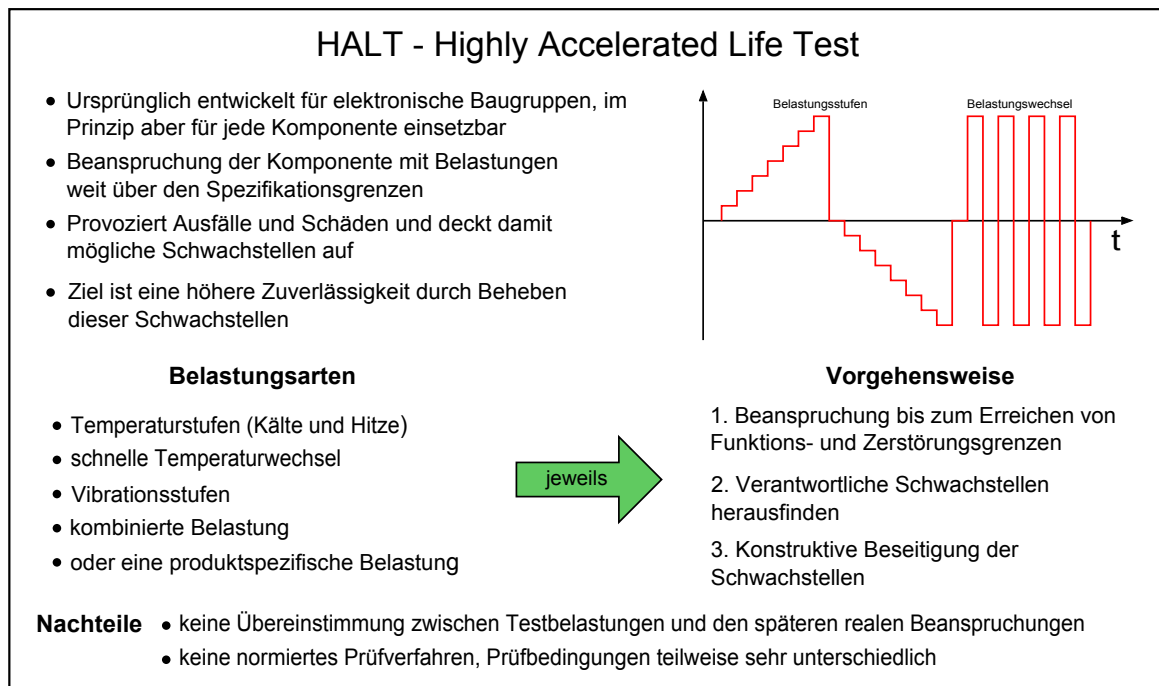


Abb. 3.14: Informationen zum Highly Accelerated Life Test

Belastungen, Temperaturen und Schwingungen ausgesetzt wird, die deutlich über den normalerweise auftretenden Belastungen liegen. Die Ergebnisse werden anschließend auf übliche Beanspruchungsgrößen umgerechnet und ermöglichen somit eine Aussage über die Lebensdauer der Windenergieanlagen ohne mehrjährige Prototypentests durchzuführen. Weitere Informationen über HALT finden sich in Abbildung 3.14.

Eine Ebene weiter als der Betrieb eines Antriebsstrangprüfstands gehen Planungen des Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik in Bremerhaven. Der in Abbildung 3.15 dargestellte Gondelprüfstand soll die Durchführung von Feldtests nahezu überflüssig machen. Auf einem derartigen Prüfstand soll die gesamte Gondel mit allen dazugehörigen Komponenten montiert werden. Über eine aufwändige Antriebsmaschine wird dann das Drehmoment erzeugt. Zusätzlich kann über hydraulische Zylinder eine Biegebeanspruchung aufgebracht werden und auf diese Weise nahezu alle real auftretenden Belastungen nachgebildet werden. Ein Prüfstand für diesen Zweck befindet sich bisher jedoch nur im Planungsstand und ist, insbesondere auch durch die großen Abmessungen und die aufwändige Belastungseinheit, mit deutlichen Kosten verbunden. Alternativ zu einem derartigen großen Gondelprüfstand, steht der Einsatz von kleinen Prüfständen zum Test der einzelnen Teilkomponenten, auf die bereits in den vorherigen Kapiteln eingegangen wurde.

Der Betrieb eines Antriebsstrangprüfstands ist mit einem hohen Aufwand und hohen Kosten verbunden. Dies gilt insbesondere für Prüfstände mit Antriebseinheiten, die es ermöglichen den Antriebsstrang mit Biegemomenten zu belasten. Gleiches gilt für Prüfstände im Multi-Megawatt-Bereich. Aus diesem Grund verzichten viele Hersteller noch auf derartige Prüfungen (siehe dazu Kapitel 4.3.15) und führen diese Untersuchungen stattdessen im Rahmen einer Prototypenanlage durch. Der Trend zu immer kürzeren Erprobungs- und Entwicklungszeiträumen wird aber dazu führen, dass immer mehr Hersteller in Zukunft Tests auf Antriebsstrangprüfständen durchführen werden.

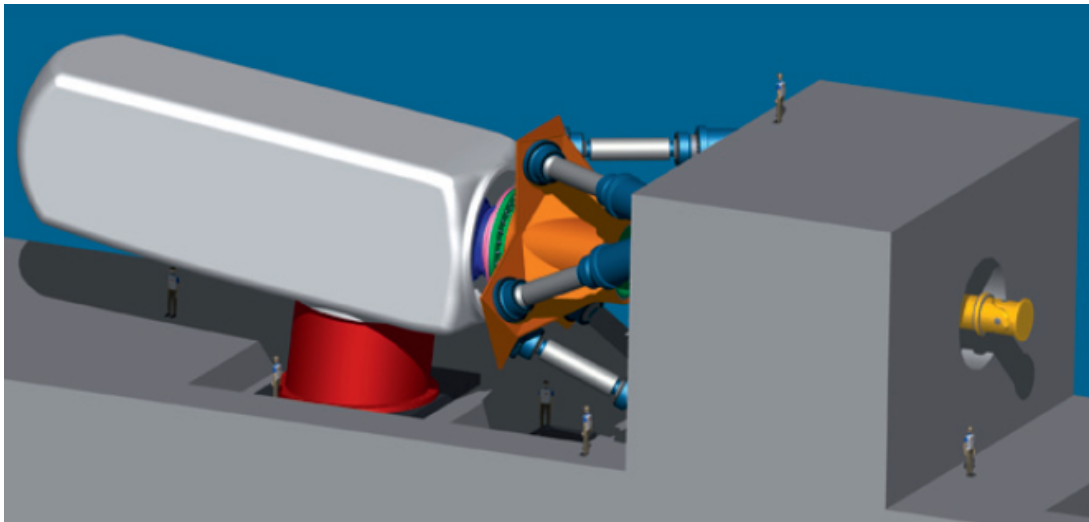


Abb. 3.15: Geplanter Gondelprüfstand beim Fraunhofer IWES in Bremerhaven [11]

## 3.5.2 Rotorblattverstellung

### 3.5.2.1 Typprüfungen

Die Rotorblattverstellung muss, um sicherzustellen, dass der Antrieb und die Übertragungsglieder für die Drehbewegung ausreichend dimensioniert sind, einer Typprüfung unterzogen werden. Dies geschieht in der Regel über den Betrieb in einer Prototypenanlage bei Feldtests. Möglich ist aber auch die Montage aller Komponenten der Rotorblattverstellung auf einem Prüfstand und ein Ersatz des Rotorblatts durch eine Belastungsmaschine die dem Antrieb der Rotorblattverstellung entgegenwirkt. Auf einem derartigen Prüfstand kann dann eine ausführliche Typprüfung des Systems Rotorblattverstellung im Hinblick auf Extremlasten und Dauerfestigkeit durchgeführt werden. Dabei wird die Rotorblattverstellung von Anschlagpunkt zu Anschlagpunkt gefahren und die Belastungsmaschine erzeugt dabei eine besonders große Last, oder ein dynamisches Lastprofil, die dem Antrieb entgegen wirkt.

### 3.5.2.2 Herstellungs- und Funktionsprüfungen

Besonders bei elektrischen Systemen zur Rotorblattverstellung befinden sich im Getriebemotor Wälzlager und Zahnräder (siehe Abbildung 3.16). Zur Sicherstellung der Herstellungsqualität dieser Bauteile sind zunächst die in den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 aufgeführten Prüfungen anzuwenden. Nach Montage der Komponenten für die Rotorblattverstellung in der Rotornabe bzw. Gondel sind verschiedenen Funktionsprüfungen durchzuführen.

**Vorspannung des Rotorblattlagers** Die unbelasteten Lagerreibmomente müssen aufgenommen werden. Das Rotorblattlager ist vorgespannt und besitzt keine Lagerluft bzw. Betriebsspiel.

**Hydraulik** Bei hydraulischen Systemen ist eine Dichtigkeits- und Druckprüfung durchzuführen um sicherzustellen, dass beim Betrieb kein Hydrauliköl entweichen kann. Zudem ist sicherzustellen, dass eine visuelle Prüfung erfolgt, ob die Hydraulikschläuche ordnungsgemäß verlegt wurden. Obligatorisch ist ein Funktionstest sämtlicher Hydraulikaggregate.

**Akkumulatoren** Für den Fall, dass die Stromversorgung bei elektrischen Systemen ausfällt, sind in derartigen Anlagen Akkumulatoren verbaut, die in diesem Fall die Antriebseinheiten mit Energie versorgen können. Die Kapazität und Aufladbarkeit dieser Akkumulatoren muss geprüft werden.

**Schmierung** Es muss sichergestellt sein, dass das Rotorblattlager ordnungsgemäß geschmiert ist. Zusätzlich muss eine Dichtigkeitsprüfung durchgeführt werden, dass keine Fremdstoffe in das Lager eindringen und keine Schmierstoffe aus dem Lager austreten können.

**Sensorik** Alle verwendeten Sensoren müssen auf ihre Funktion und richtige Verkabelung geprüft werden. Zusätzlich müssen die Sensoren im Zusammenhang mit der Steuerung kalibriert werden.

**Steuerung** Die Programmierung der Steuerung für die Rotorblattverstellung muss auf ihre richtige Funktion getestet werden. Dazu gehört, dass das Verhalten in sämtlichen Betriebsmodi getestet wird. Außerdem muss geprüft werden, dass je nach Windgeschwindigkeit die richtigen Anstellwinkel, mit der richtigen Verfahrgeschwindigkeit, angefahren werden.

**Fehlersteuerung** Zusätzlich muss die Reaktion der Steuerung auf sämtliche möglichen Fehlerzustände, wie Ausfall von benötigten Sensoren oder Ausfall der Stromversorgung getestet werden. Die Rotorblattverstellung muss hier immer für einen sicheren Betriebszustand sorgen und ein entsprechendes Signal an die übergeordnete Anlagensteuerung geben.



Abb. 3.16: Zahnräder und Wälzlager im Getriebemotor einer Rotorblattverstellung [18]

### 3.5.3 Windrichtungsnachführung

#### 3.5.3.1 Typprüfungen

Analog zum System der Rotorblattverstellung muss auch die Windrichtungsnachführung einer ausführlichen Typprüfung unterzogen werden. Auch hier gilt es herauszufinden, ob der Antrieb ausreichend dimensioniert und die Festigkeit gegeben ist. Die folgenden Teilaspekte müssen dabei untersucht werden:

- Ausreichende Leistungsfähigkeit der Antriebseinheiten
- Tragfähigkeit der Zahnräder bzw. des Getriebes
- Belastbarkeit des Azimutlagers
- Ausreichende Bremskraft der Azimutbremse

Üblich ist die Prüfung dieser Punkte im Rahmen von Feldtests auf einer Prototypenanlage. Möglich ist jedoch auch das System auf einem speziellen Prüfstand zu montieren und auf diese Weise diese Prüfung im Werk durchzuführen.

### 3.5.3.2 Herstellungs- und Funktionsprüfungen

Zur Sicherstellung der Herstellungsqualität sind die eingesetzten Komponenten wie Zahnräder und Wälzlager mit den in den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 aufgeführten Prüfungen zu untersuchen. Nach Montage der Komponenten am Maschinenträger bzw. in der Gondel muss die Funktion sichergestellt werden. Dazu sind folgende Prüfungen anzuwenden.

**Rotationsfunktion** Nach Montage des Azimutantriebs am Maschinenträger muss dessen Funktion geprüft werden. Dazu erfolgt die Ansteuerung über das Steuerungssystem und eine visuelle Prüfung ob das Ritzel sich entsprechend dreht. Nach Möglichkeit sollte das System zusätzlich auf einem Turmstumpf montiert werden und auf diese Weise die Drehfunktion über mindestens drei Umdrehungen getestet werden.

**Bremsfunktion** Die Funktion der Azimutbremse muss geprüft werden. Dazu muss von der Steuerung das Signal zum Feststellen der Bremse gesendet werden und visuell überprüft werden ob sich die Bremsbacken schließen, bzw. bei einer pneumatischen Bremse das Bremskissen ausfährt.

**Schmierung** Es muss sichergestellt sein, dass das Azimutlager und alle verbauten Getriebe richtig geschmiert sind. Zusätzlich muss eine Dichtigkeitsprüfung durchgeführt werden, dass keine Fremdstoffe in das Lager eindringen und keine Schmierstoffe aus dem Lager austreten können.

**Vorspannung des Azimutlagers** Die unbelasteten Lagerreibmomente müssen aufgenommen werden. Das Azimutlager ist vorgespannt und besitzt keine Lagerluft bzw. Betriebsspiel.

**Hydraulik** Bei hydraulischen Systemen ist eine Dichtigkeits- und Druckprüfung anzuwenden um sicherzustellen, dass beim Betrieb kein Hydrauliköl entweichen kann. Auch wichtig ist, dass eine Sichtprüfung erfolgt ob die Hydraulikschläuche ordnungsgemäß verlegt wurden. Obligatorisch ist ein Funktionstest sämtlicher Hydraulikaggregate.

**Sensorik** Alle verwendeten Sensoren müssen auf Funktion, und richtige Verkabelung geprüft werden. Zusätzlich müssen diese im Zusammenhang mit der Steuerung kalibriert werden. Bei der Windrichtungsnachführung ist dies insbesondere der Windrichtungssensor, sowie die Sensorik zum Messen der Anzahl durchgeführter Umdrehungen.

**Steuerung** Die Programmierung der Steuerung für die Windrichtungsnachführung muss auf ihre richtige Funktion getestet werden. Dazu gehört insbesondere, dass je nach Windrichtung der richtige Azimutwinkel, mit der richtigen Verfahrensgeschwindigkeit, angefahren wird.

**Fehlersteuerung** Zusätzlich muss die Reaktion der Steuerung auf sämtliche möglichen Fehlerzustände, wie Ausfall von benötigten Sensoren oder Ausfall der Stromversorgung getestet werden. Die Windrichtungsnachführung muss hier immer für einen sicheren Betriebszustand sorgen und eine entsprechendes Signal an die Anlagensteuerung geben.

### 3.5.4 Gondel

Am Ende des Fertigungsprozesses im Werk steht die montierte Gondel mit allen dazugehörigen Komponenten. Die Gondel wird anschließend zum Standort transportiert, auf dem vorher aufgebauten Turm befestigt und Rotornabe und Rotorblätter angebracht. Bevor die Gondel jedoch

ausgeliefert wird, müssen im Werk verschiedene Prüfungen durchgeführt werden. Damit soll sichergestellt werden, dass die Gondel alle qualitativen Anforderungen erfüllt und ordnungsgemäß funktioniert. Diese Prüfungen sollten als Stückprüfung, für jede Gondel, die das Werk verlässt, ausgeführt werden. Im Wesentlichen handelt es sich um Funktionsprüfungen, da die fehlerfreie Herstellung bereits vorher an den einzelnen Komponenten und Teilsystemen, durch die in den vorherigen Kapiteln angeführten Prüfungen, nachgewiesen wurde.

#### 3.5.4.1 Simulation von Wartungsarbeiten

An einer neu entwickelten Anlage sollte als Typprüfung, an der fertig montierten Gondel, die Durchführung von Wartungsarbeiten simuliert werden. Ziel einer derartigen Prüfung ist nachzuweisen, dass im Falle eines Defekts, alle Arbeitsschritte durchführbar sind und ohne komplizierten Ausbaur Aufwand ausgeführt werden können. Für diese Prüfung sollte ein Austausch aller wesentlichen Komponenten der Gondel durchgeführt werden. Alternativ ist die Erprobung von Wartungsarbeiten virtuell mit Hilfe eines 3D-Simulationsraums.

#### 3.5.4.2 Herstellungs- und Funktionsprüfungen

Zunächst muss die richtige Montage aller Komponenten und Teilsysteme in der Gondel sichergestellt werden. Für Verbindungselemente wie Schweißnähte und Schraubverbindungen sind die in den Kapiteln 3.2.3 und 3.2.4 aufgeführten Prüfungen anzuwenden. Zusätzlich sind die folgenden Prüfungen durchzuführen:

**Ausrichtung des Antriebsstrangs** Eine der wichtigsten Kontrollen ist die Prüfung ob alle Komponenten des Antriebsstrangs nach der Montage fluchtend ausgerichtet sind. Ist dies nicht gegeben, kann es zu Unwuchten und damit zu Schwingungen kommen, für die die Anlage nicht ausgelegt ist.

**Elektrik** Weiter ist sicherzustellen, dass verlegte Kabel funktionieren und eine elektrische Verbindung besteht. Dies kann zum Beispiel mit Hilfe eines Durchgangsprüfers bewerkstelligt werden.

**Hydraulik** Durch eine Sichtprüfung ist sicherzustellen, dass hydraulische Schläuche korrekt verlegt sind und nicht Verknicken können. Zusätzlich muss ein hydraulisches System auf Dichtigkeit geprüft werden.

**Korrosionsschutz** Über eine Schichtdickenmessung muss geprüft werden, dass ausreichend Korrosionsschutz aufgetragen wurde.

**Sensoren** In einer Windenergieanlage sind unter anderem Sensoren für die Windrichtung, die Windgeschwindigkeit, den Anstellwinkel der Rotorblätter, die Anzahl der Azimutumdrehungen, sowie verschiedene Temperatursensoren und ein Beschleunigungssensor verbaut. Alle verwendeten Sensoren müssen auf Funktion, und richtige Verkabelung geprüft werden. Zusätzlich müssen diese im Zusammenhang mit der Steuerung kalibriert werden.

**Funktion der Teilsysteme** Es muss die Funktion und Steuerbarkeit von Windrichtungsführung und der Rotorblattverstellung getestet werden. Zudem ist ein Test aller weiteren Systeme wie Bremsen, Schmiersysteme, Kühlsysteme und Hydraulikaggregate notwendig. Hier geht es vor allem um deren Betriebsfunktion sowie der Verbindung zur Steuerung der Windenergieanlage.

### 3.5.4.3 Funktionsprüfung des Anlagensteuerung

Die Steuerung einer einzelnen Windenergieanlage wird in der Regel über eine SPS<sup>2</sup> realisiert. An der SPS sind sämtliche Stellglieder und Sensoren angeschlossen und über die Software bzw. Programmierung der Steuerung wird die Anlage in allen Betriebszuständen gesteuert. Da es hier zu Softwarefehlern oder Defekten der Verkabelung und Sensorik kommen kann, muss die Steuerung der Gondel geprüft werden. Dazu sind die folgenden Prüfungen durchzuführen.

**Notabschaltung** Die Steuerung der Anlage sollte in den Betriebszustand gefahren werden und anschließend eine Notabschaltung ausgelöst werden. Dabei ist zu Prüfen, dass sich die Steuerung der Anlage wie festgelegt verhält. Diese Prüfung wird normalerweise im Rahmen der Abnahmeprüfungen während und nach der Inbetriebnahme erneut durchgeführt. Durch die Prüfung bereits im Werk können mögliche Fehler bereits vorab beseitigt werden.

**Netzausfall** Kommt es im Netz, an das die Windenergieanlage angeschlossen ist, zu einer Störung und einem Netzausfall, so kann die Anlage ihren Strom nicht ins Netz einspeisen. In diesem Fall muss die vom Generator erzeugte Energie entweder zwischengespeichert oder woanders abgegeben werden. Dieser Fall ist zu simulieren und das Verhalten der Anlagensteuerung entsprechend zu prüfen.

**Sturm** Ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit, bei den meisten Anlagen ab  $25 \frac{m}{s}$ , muss Windenergieanlage abgeschaltet werden, da es durch die hohen Geschwindigkeiten ansonsten zu Schäden an den Rotorblättern kommen kann. Die Abschaltung geschieht durch Fahren der Rotorblätter in Fahnenstellung. Zum Test dieser Funktion muss der Steuerung eine entsprechende Windgeschwindigkeit vorgegeben und das richtige Verhalten der Rotorblattverstellung geprüft werden.

**Schwingungsschutz** Dreht sich der Rotor für längere Zeit im Bereich der Eigenfrequenz des Turms, so kann sich der Turm aufschwingen und einen Schaden verursachen. Um dies zu verhindern, ist in der Anlage ein Beschleunigungssensor verbaut, der derartige Schwingungen erkennt und die Anlage auf einen sicheren Betriebspunkt fährt. Die Funktion dieses Schwingungsschutzes ist zu ebenfalls nachzuweisen. Zusätzlich können Schwingungen bei Windverhältnissen mit erhöhten Turbulenzen auftreten. Manche Anlagentypen besitzen auch einen aktiven Schwingungsschutz, der den auftretenden Schwingungen entgegenwirkt.

**Sensorausfall** Es ist zu Prüfen, dass die Anlagensteuerung wie festgelegt reagiert, wenn ein oder mehrere Sensoren ausfallen. Für diese Prüfung ist der Ausfall jedes Sensors zu simulieren und das Anlagenverhalten zu überprüfen.

---

<sup>2</sup>Speicherprogrammierbare Steuerung

## 4 Studie zur Qualitätssicherung bei Herstellern von Windenergieanlagen

Um herauszufinden, in welchem Umfang in der Windindustrie Qualitätssicherung betrieben wird, wird im Rahmen dieser Arbeit eine Erhebung durchgeführt. Damit sind zwei Ziele verbunden: Zum einen soll ermittelt werden, auf welchem Niveau eine Qualitätssicherung aktuell in der Windbranche bei Herstellern und deren Zulieferern ausgeführt wird und an welchen Stellen Verbesserungspotential besteht. Zum anderen soll die Befragung dazu genutzt werden, die Sammlung über mögliche Qualitätsprüfungen an Komponenten von Windenergieanlagen (siehe Kapitel 3) möglichst vollständig zu ergänzen. In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise bei dieser Erhebung und die Ergebnisse vorgestellt.

### 4.1 Vorgehensweise

Die Befragung der Hersteller wurde mit Hilfe eines Fragebogens durchgeführt. Gegliedert nach den einzelnen Komponenten und nach verschiedenen Prüfungsarten beinhaltet der Fragebogen mögliche Prüfungen zur Qualitätssicherung. Die Teilnehmer der Studie waren dazu aufgefordert alle Prüfungen anzukreuzen, die im Rahmen der Qualitätssicherung durchgeführt werden. Zusätzlich wurde darum gebeten, den Fragebogen entsprechend zu ergänzen, wenn Prüfungen durchgeführt werden, die nicht im Fragebogen enthalten sind.

### 4.2 Teilnehmer der Studie

An der Erhebung haben unter anderem marktführende Hersteller für Windenergieanlagen und viele Zulieferer der wichtigsten Komponenten, wie Getriebe, Generatoren, Wälzlager, Gussteile, Transformatoren und Umrichter, teilgenommen.

Jeder Hersteller von Windenergieanlagen hat einen Fragebogen bekommen, in dem Prüfungen zu allen verbauten Komponenten aufgelistet sind. An die Zulieferer wurde ein angepasster Fragebogen verschickt, der nur einen Teil der Fragen enthält, entsprechend der Komponenten, für die der jeweilige Zulieferer verantwortlich ist. Zusätzlich wurden auch Zertifizierungsstellen für Windenergieanlagen befragt, mit dem Ziel herauszufinden, welche Prüfungen bei der Herstellungsbewertung, die im Rahmen der Typenzertifizierung durchgeführt wird, gefordert werden.

An der Studie haben insgesamt 46 verschiedene Firmen teilgenommen, darunter:

- 12 Hersteller von Windenergieanlagen, davon zwei mit Direktantrieb
- 2 Zulieferer für Rotorblätter
- 4 Zulieferer für Wälzlager
- 8 Zulieferer für Getriebe
- 5 Zulieferer für Generatoren



- 4 Zulieferer für Umrichter
- 4 Zulieferer für Transformatoren
- 1 Zulieferer für Schaltanlagen
- 6 Gießereien
- 2 Zertifizierungsstellen für Windenergieanlagen

Insgesamt wurden noch weitere Firmen befragt, die jedoch nach Erhalt des Fragebogens, aus verschiedenen Gründen nicht bereit waren an der Befragung teilzunehmen. Unter diesen Firmen befinden sich Hersteller, Zulieferer und Zertifizierungsstellen.

### 4.3 Ergebnisse der Hersteller- und Zuliefererbefragung

Im folgenden werden die Ergebnisse der Erhebung bei Herstellern und Zulieferern in der Windindustrie vorgestellt. Die Ergebnisse sind nach den Hauptkomponenten gegliedert und unterscheiden, wenn angebracht, zwischen Typen-, Herstellungs- und Funktionsprüfungen. Die Balkendiagramme zeigen jeweils relativ wie viele der befragten Unternehmen die Prüfung durchführen. Eine Legende, welche Farbe welcher Prüfung zugeordnet wird, befindet sich auf der rechten Seite. Informationen über die Anzahl der befragten Firmen finden sich jeweils in der unteren rechten Ecke.

#### 4.3.1 Rotorblatt

Abbildung 4.1 zeigt in welchem Umfang Typprüfungen an Rotorblättern durchgeführt werden. Auffällig ist, dass nicht alle Hersteller neben der statischen Prüfung eine dynamische Prüfung durchführen. Dies ist vermutlich auf den intensiveren Zeit- und Kostenaufwand, der dafür benötigt wird, zurückzuführen. Auch die statische Prüfung wird nicht bei jedem Hersteller durchgeführt. Für eine erfolgreiche Typenzertifizierung, beispielsweise nach IEC WT01, ist jedoch eine statische und eine dynamische Prüfung der Rotorblätter erforderlich.

Die Bestimmung der Eigenfrequenzen einer Blattkonstruktion ist bei einer experimentellen Prüfung nach IEC TS 61400-23 vorgeschrieben. Ein Grund, warum nicht alle befragten Hersteller diese Prüfung durchführen, könnte sein, dass diese Hersteller die Rotorblätter extern fertigen und auch die Prüfung extern durchgeführt wird. Die Prüfung der aerodynamischen Eigenschaften wird von 69 % der befragten Firmen angegeben. Für gewöhnlich erfolgt dies durch die Aufnahme der Leistungskennlinie während eines Feldtests.

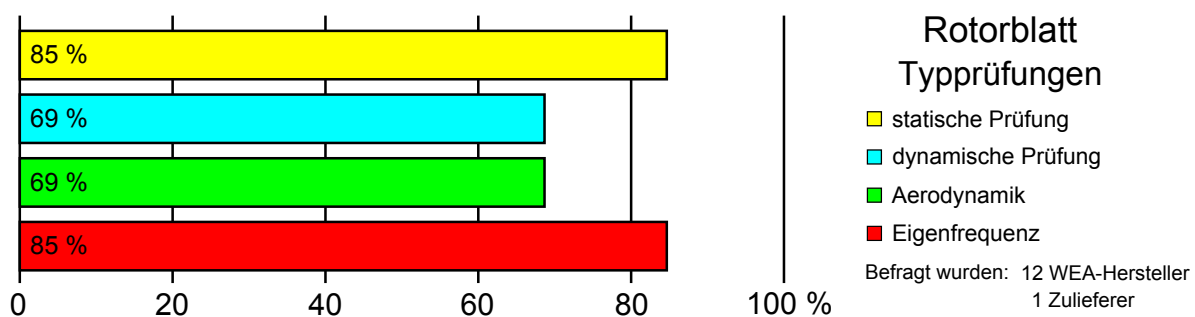


Abb. 4.1: Typprüfungen am Rotorblatt

Abbildung 4.2 zeigt die Ergebnisse der Befragung zu Herstellungsprüfungen am Rotorblatt. Hier ist erkennbar, dass der Umfang der Prüfungen zwischen den einzelnen Herstellern deutliche

Unterschiede aufweist. Vor allem die Prüfung auf Herstellungsfehler mit Hilfe der Wärmefluss-Thermographie, die detailliert Auskunft über Herstellungsfehler gibt, wird nur bei 36 % der befragten Firmen durchgeführt. Ein möglicher Grund hierfür könnte sein, dass das Verfahren eine Neuentwicklung und deswegen noch mit hohen Kosten verbunden ist. Viele Hersteller führen alternativ eine Ultraschallprüfung durch.

Die Sichtprüfung auf Herstellungsfehler, die Geometrieprüfung und eine Massen- und Massenschwerpunktbestimmung ist bei den meisten der befragten Firmen Standard. Die geringe Zahl der Firmen, die eine Prüfung der Glasübergangstemperatur der Kunststoffe durchführen, könnte damit zusammenhängen, dass die Prüfung bei den Lieferanten der Polyester oder Epoxidharze ausgeführt wird und diese durch entsprechende Prüfzeugnisse dokumentiert werde.

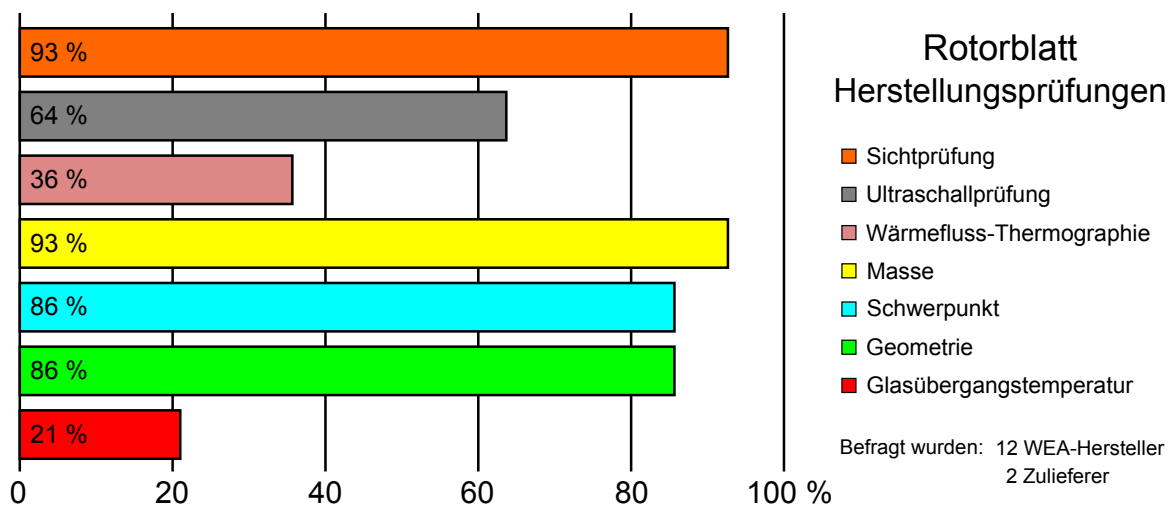


Abb. 4.2: Herstellungsprüfungen am Rotorblatt

#### 4.3.2 Rotornabe

Abbildung 4.3 zeigt Informationen über Typprüfungen an der Rotornabe. Erkennbar ist, dass nicht alle Hersteller eine Dehnungsmessung vornehmen, obwohl dies auf einem Prototyp einfach durchzuführen wäre.

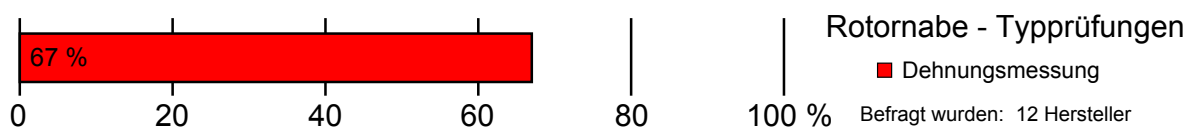


Abb. 4.3: Typprüfung an der Rotornabe

Die Ergebnisse bezüglich der Herstellungsprüfungen bei den befragten Firmen finden sich in Abbildung 4.4. Zunächst ist anzumerken, dass bezüglich der Prüfung auf Herstellungsfehler, bei den meisten Herstellern die folgende Reihenfolge eingehalten wird: Zuerst wird, nach Herstellung des Gussteils, eine Sichtprüfung durchgeführt. Zusätzlich wird mit Hilfe von Ultraschall nach inneren Defekten gesucht. Werden bei einer der beiden Prüfungen Unregelmäßigkeiten entdeckt, so wird bei Oberflächenfehlern eine Magnetpulver- bzw. Farbeindringprüfung und bei inneren Defekten eine Durchstrahlungsprüfung durchgeführt.

Entsprechend dieser Tatsache erklärt sich auch die Häufigkeit der durchgeführten Prüfungen: Eine Sichtprüfung und Ultraschallprüfung wird bei allen befragten Firmen durchgeführt, die anderen drei Prüfungen nach Herstellungsfehlern dagegen deutlich seltener. Bei der Prüfung nach Oberflächenfehlern bevorzugen die meisten befragten Firmen die Magnetpulverprüfung.

Eine Prüfung der geometrischen Abmessungen der Nabe wird bei allen befragten Firmen durchgeführt. Die Prüfung des Korrosionsschutzes erfolgt bei 89 % der Firmen. Weiter auffällig ist, dass nicht alle Hersteller die Masse bestimmen, obwohl dies, beispielsweise beim Verladen mit einer Kranwaage, einfach durchzuführen wäre.

Bei den unteren vier Prüfungen in Abbildung 4.4 ist anzumerken, dass Hersteller von Windenergieanlagen und Gießereien befragt wurden. Hier zeigt sich, dass diese Prüfungen in der Regel nur von Gießereien und Herstellern mit eigener Gussteilfertigung durchgeführt werden. Hersteller, die die Fertigung von Gussteilen extern vergeben, verlassen sich bei diesen Eigenschaften auf die Angaben der Zulieferer und führen keine eigenen Prüfungen durch. In diesem Fall ist es besonders wichtig, dass die Zulieferer mit geeigneten Präqualifizierungsprozessen ausgewählt werden (siehe Kapitel 5.2).

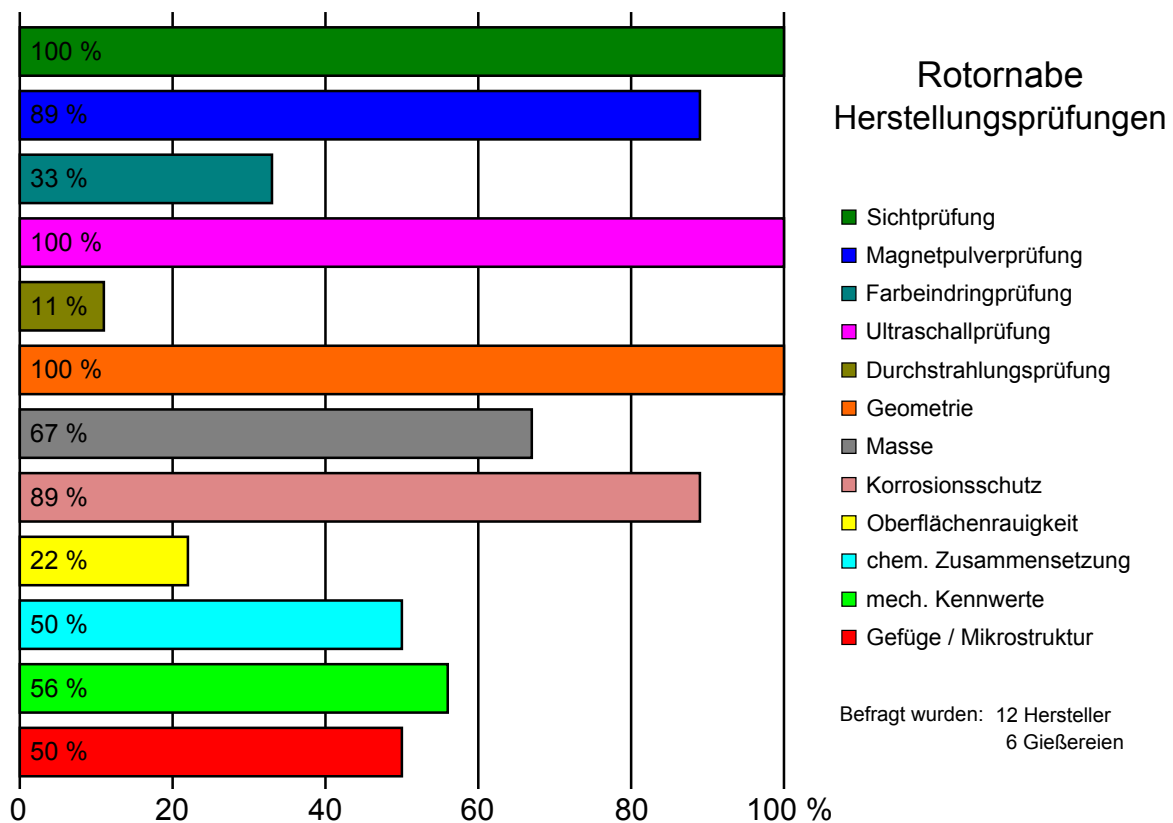


Abb. 4.4: Herstellungsprüfungen an der Rotornabe

### 4.3.3 Rotorblattverstellung

Abbildung 4.5 zeigt die Typprüfungen an dem System Rotorblattverstellung. Erkennbar ist, dass der größte Teil der Hersteller das System in Rahmen einer Prototypanlage testen. Deutlich weniger verbreitet ist es dagegen, eine Prüfung auf einem Prüfstand durchzuführen. Obwohl man auf diese Weise das System Rotorblattverstellung testen kann, bevor eine teure Prototypanlage aufgestellt wurde, betreiben nur 15 % der befragten Firmen einen derartigen Prüfstand.

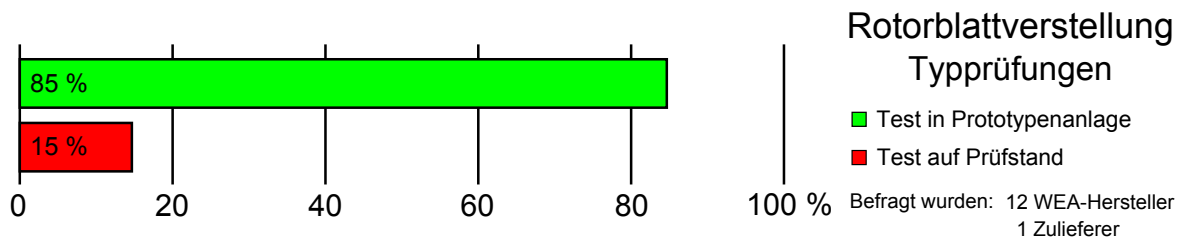


Abb. 4.5: Typprüfungen an der Rotorblattverstellung

In Abbildung 4.6 sind die Prüfungen aufgeführt, die bei elektrischen Systemen zur Rotorblattverstellung am eingesetzten Getriebe und am Antrieb durchgeführt werden können. Die geringere Anzahl der befragten Firmen ist darauf zurückzuführen, dass manche Hersteller ein hydraulisches System zur Rotorblattverstellung einsetzen. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Großteil der Prüfungen bei über 80 % der befragten Firmen durchgeführt werden. Lediglich eine akustische Prüfung auf Herstellungsfehler wird nur bei 25 % der befragten Unternehmen durchgeführt. Auch die Prüfung des Korrosionsschutzes wird nur bei der Hälfte der befragten Firmen sichergestellt.

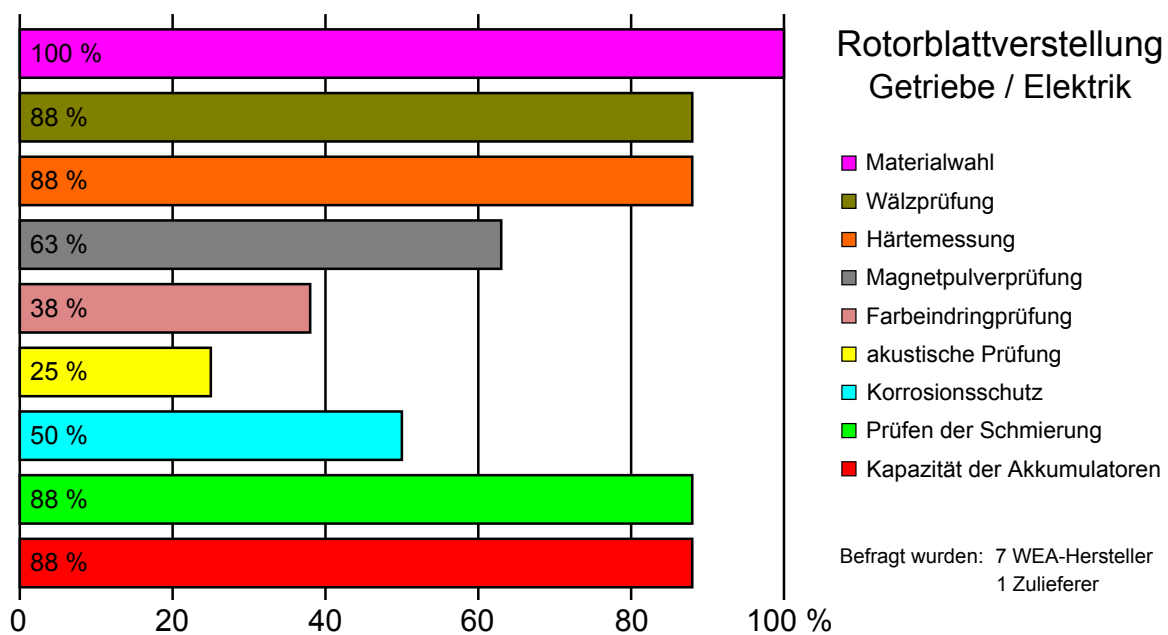


Abb. 4.6: Prüfungen an elektrischen Systemen zur Rotorblattverstellung

Prüfungen die an hydraulischen Systemen zur Rotorblattverstellung ausgeführt werden sind in Abbildung 4.7 dargestellt. Auffällig ist hier, dass eine Ermüdungsprüfung der hydraulischen Zylinder zur Beurteilung der Betriebsfestigkeit und Lebensdauer nur bei 60 % der befragten Firmen durchgeführt wird. Auch eine Druckprüfung des hydraulischen Systems und ein Funktionstest wird nur bei 40 % durchgeführt. Eine Dichtigkeitsprüfung und eine visuelle Prüfung die sicherstellt, dass alle hydraulischen Schläuche ordnungsgemäß verlegt sind, wird dagegen bei jeder der befragten Firmen durchgeführt.

Die in Abbildung 4.8 aufgeführten Prüfungen am Rotorblattlager werden nicht von allen Herstellern durchgeführt. Ähnlich wie bei den Gussteilen, sind die Lager häufig Zulieferteile, bei denen die Prüfung der Herstellungsqualität von den entsprechenden Wälzlagerherstellern durchgeführt wird. Nur 46 % der befragten Firmen geben an eine Dichtigkeitsprüfung durchzuführen,

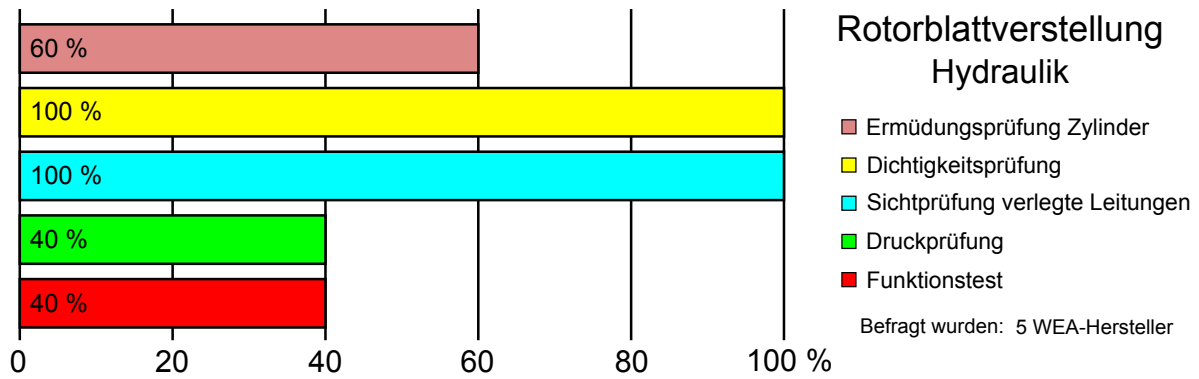


Abb. 4.7: Prüfungen an hydraulischen Systemen zur Rotorblattverstellung

obwohl diese den Korrosionsschutz sicherstellt. Eine Laufgeräuschmessung zur Entdeckung von Herstellungsabweichungen wird nur bei 31 % der befragten Unternehmen durchgeführt. Da das Rotorblattlager vorgespannt ist, ist diese Prüfung auch nicht unbedingt einfach auszuführen.

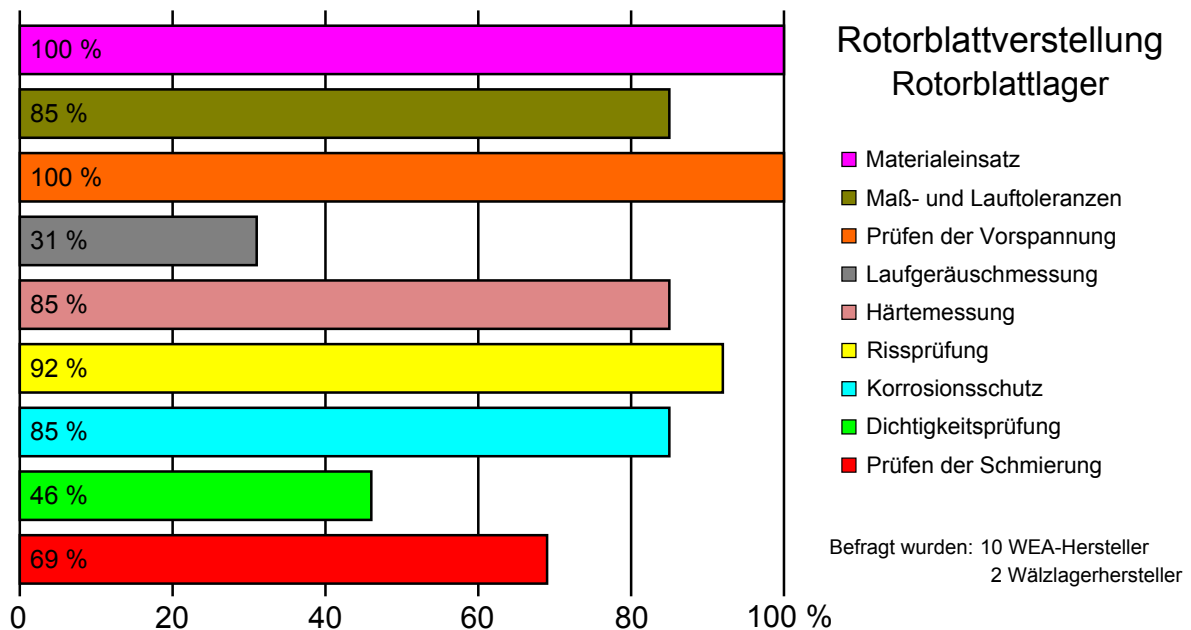


Abb. 4.8: Prüfungen am Rotorblattlager

#### 4.3.4 Rotorlager

Abbildung 4.9 gibt einen Überblick über Typprüfungen am Rotorlager. Auffällig ist, dass nur 20 % der Hersteller Typprüfungen durchführen. Dies könnte daran liegen, dass die Typprüfung von präqualifizierten Lagerherstellern durchgeführt wird und die Hersteller diese Prüfung nicht noch einmal wiederholen. Von drei befragten Zulieferern, gibt jedoch keiner an Typprüfungen durchzuführen. Gerade bei hoch belasteten Momentenlagern, wie sie häufig in getriebelosen Anlagen ohne Rotorwelle eingesetzt werden, ist jedoch eine ausführliche Typenprüfung angebracht. Auf diese Weise kann, besonders durch Tests auf Lagerprüfständen, wie bereits in Kapitel 3.3.3 erwähnt, die Betriebsfestigkeit und Lebensdauer erprobt werden.

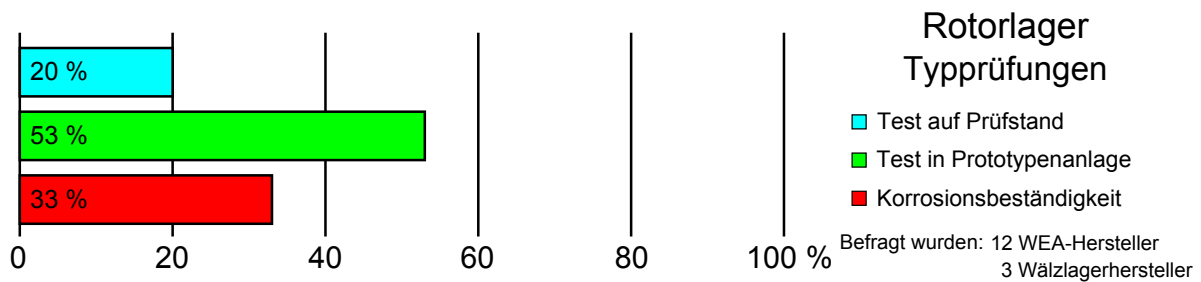


Abb. 4.9: Typprüfungen am Rotorlager

In Abbildung 4.10 wird gezeigt mit welcher Häufigkeit Hersteller Prüfungen zur Herstellungsqualität an Rotorlagern durchführen. Besonders auffällig ist dabei, dass nur weniger Hersteller eine Laufgeräuschmessung auf Herstellungsfehler durchführen. Wie oben bereits erwähnt, kann dies ebenfalls daran liegen, dass diese Prüfung von präqualifizierten Lagerherstellern durchgeführt wird.

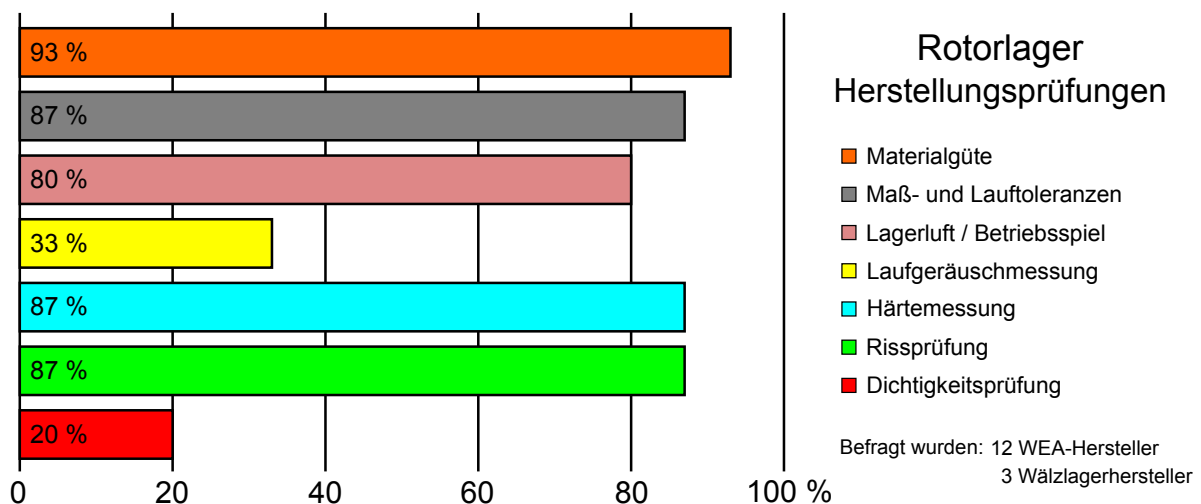


Abb. 4.10: Herstellungsprüfungen am Rotorlager

Die in Abbildung 4.11 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass ein Großteil der Hersteller die Leichtläufigkeit des Rotorlagers, sowie eine ordnungsgemäße Schmierung sicherstellen.

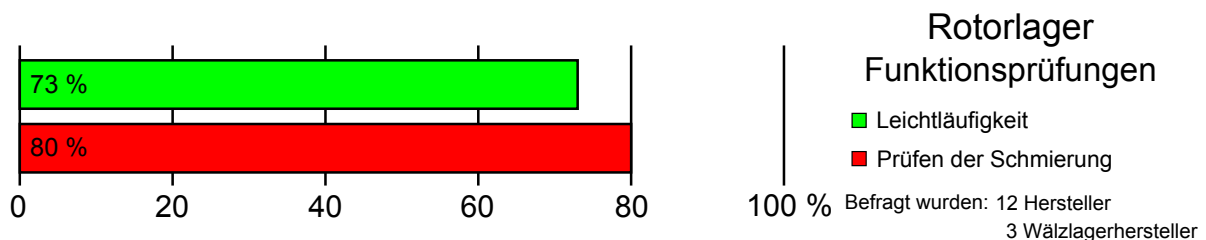


Abb. 4.11: Funktionsprüfungen am Rotorlager

### 4.3.5 Rotorwelle

Ähnlich wie beim Rotorlager zeigt Abbildung 4.12 bezüglich der Rotorwelle, dass nur wenige Hersteller Typprüfungen mit Dehnungsmessungen durchführen. Ein Test auf einem Prüfstand, der eine statische und dynamische Prüfung der Welle auf Betriebsfestigkeit ermöglicht, wird nur bei 30% der befragten Firmen durchgeführt.

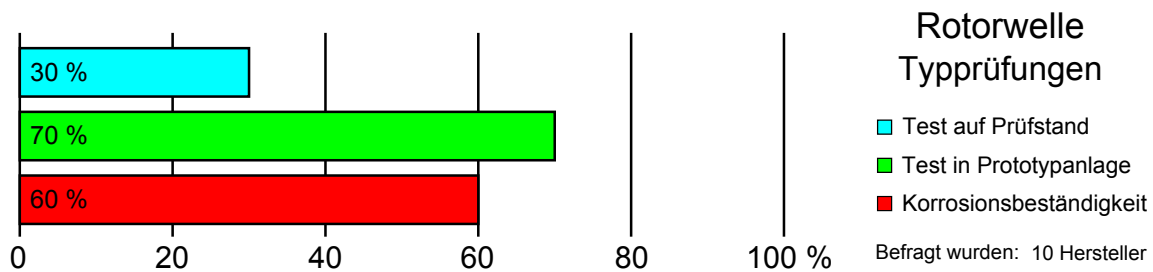


Abb. 4.12: Typprüfungen an der Rotorwelle

Bei den Herstellungsprüfungen, an der in vielen Fällen als Guss- oder Schmiedeteil hergestellten Rotorwelle sind die Ergebnisse ähnlich zu den Ergebnissen für Herstellungsprüfungen an Rotornaben (siehe 4.3.2). Das Balkendiagramm findet sich daher im Anhang dieser Arbeit in Abbildung A.1.

### 4.3.6 Getriebe

Einen Überblick über die an Getrieben durchgeführte Typprüfungen gibt Abbildung 4.13. Während statische und dynamische Tests auf Prüfständen, sowie der Betrieb in einer Prototypanlage und in kalter Umgebung durchaus üblich sind, kommt ein Prüfstandstest, bei dem zusätzlich Biegemomente aufgebracht werden, nur selten vor. Gerade mal 22% der befragten Firmen geben an, eine derartige Prüfung durchzuführen, obwohl bei dieser Prüfung die realen Beanspruchungen besser abgebildet werden können.

Ähnlich verhält es sich mit einem Test in einer Salznebelprühkammer, um die langfristige Korrosionsbeständigkeit zu erproben. Besonders bei den Getrieben, für die ein Einsatz in Offshore-Anlagen geplant ist, wäre die Durchführung einer derartigen Prüfung durchaus zu empfehlen. Auch HALT-Prüfungen werden nur bei zwei der befragten Firmen durchgeführt, was sicherlich darauf zurückzuführen ist, dass die Entwicklung derartiger Prüftechniken für die Windindustrie noch nicht sehr ausgereift ist.

Abbildung 4.13 zeigt welche Prüfungen an den Zahnrädern im Getriebe durchgeführt werden. Die Prüfungen bezüglich der Materialwahl, Wälzprüfung und Oberflächenfehler werden von einem Großteil der befragten Unternehmen durchgeführt. Prüfungen, die die Verzahnungsgeometrie, Schleifbrand und die Oberflächenrauigkeit untersuchen, werden dagegen nur bei vergleichsweise wenigen Firmen durchgeführt. Hier zeigt die Auswertung der Fragebögen, dass diese Prüfungen vor allem bei den Getriebeherstellern durchgeführt werden.

Die Ergebnisse zu Prüfungen am Getriebelager sind vergleichbar mit den Ergebnissen vom Rotorlager (siehe Kapitel 4.3.4). Das zugehörige Balkendiagramm findet sich im Anhang in Abbildung A.2.

In Abbildung 4.15 ist dargestellt in welchem Umfang Funktionsprüfungen durchgeführt werden. Mit Ausnahme einer Körperschall bzw. Vibrationsprüfung werden alle Prüfungen bei über 80% der befragten Unternehmen durchgeführt.

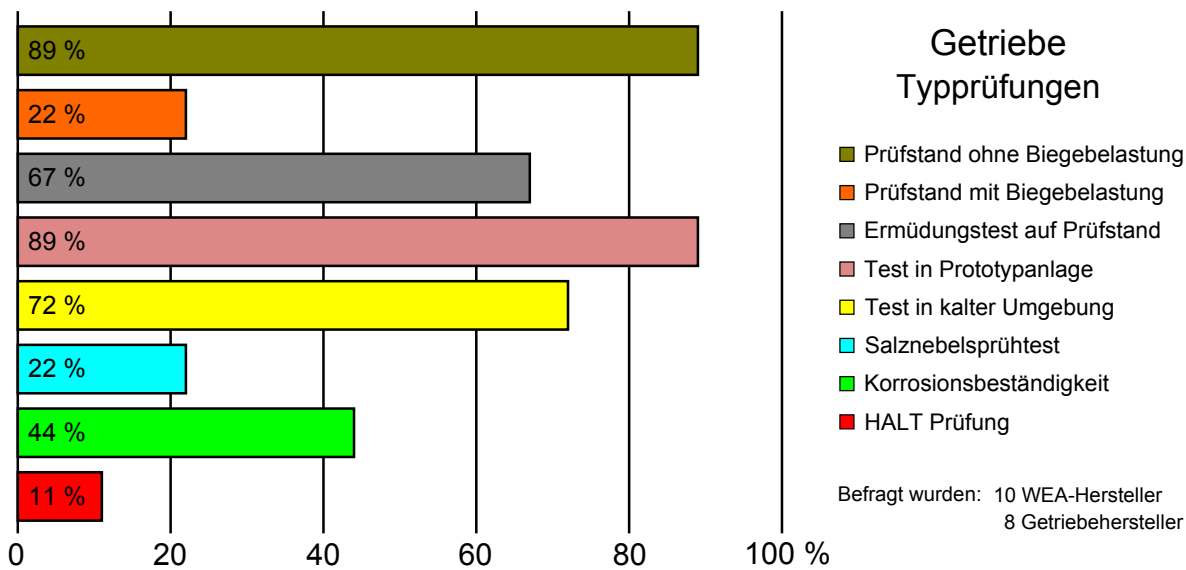


Abb. 4.13: Typprüfungen am Getriebe

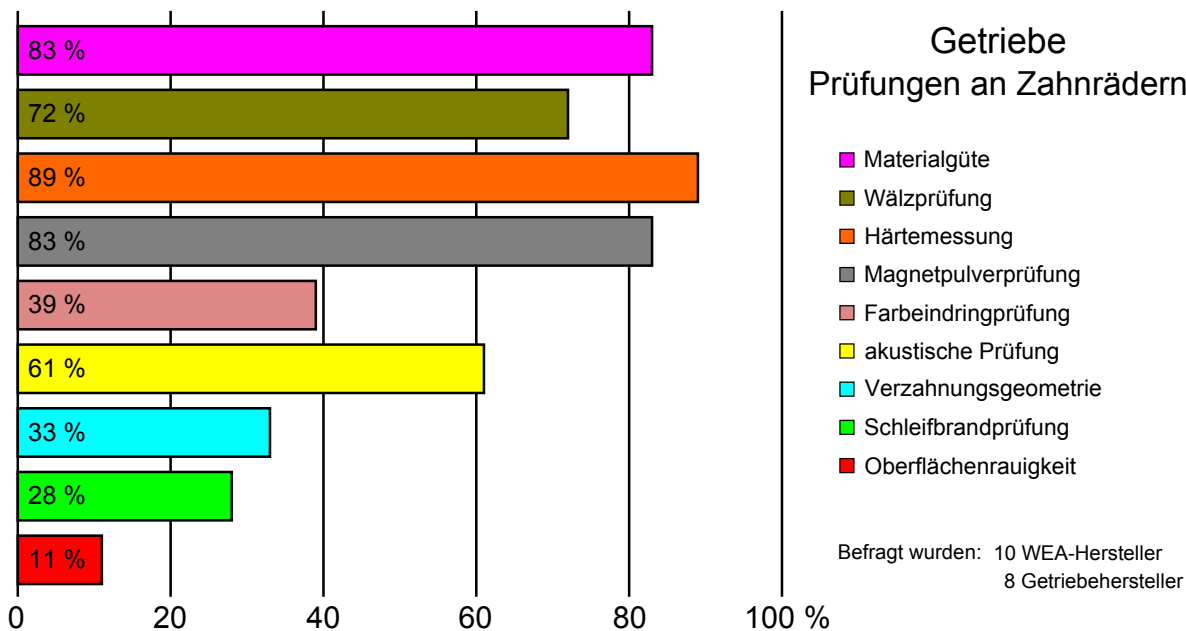


Abb. 4.14: Prüfungen an den Zahnrädern im Getriebe



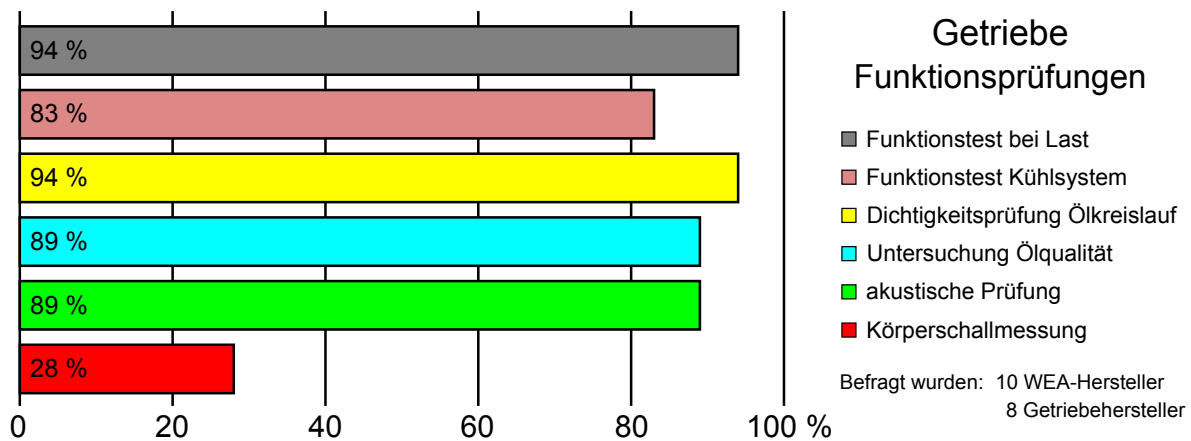


Abb. 4.15: Funktionsprüfungen am Getriebe

#### 4.3.7 Generator

In Abbildung 4.15 ist dargestellt in welchem Umfang Typprüfungen am Generator durchgeführt werden. Zunächst fällt auf, dass nur bei 12% der befragten Firmen eine Ermüdungsprüfung, auf einem Prüfstand, erfolgt. Besonders im Hinblick auf die Erprobung der Betriebsfestigkeit des kompletten Generatorsystems ist diese Prüfung allerdings sinnvoll und zu empfehlen.

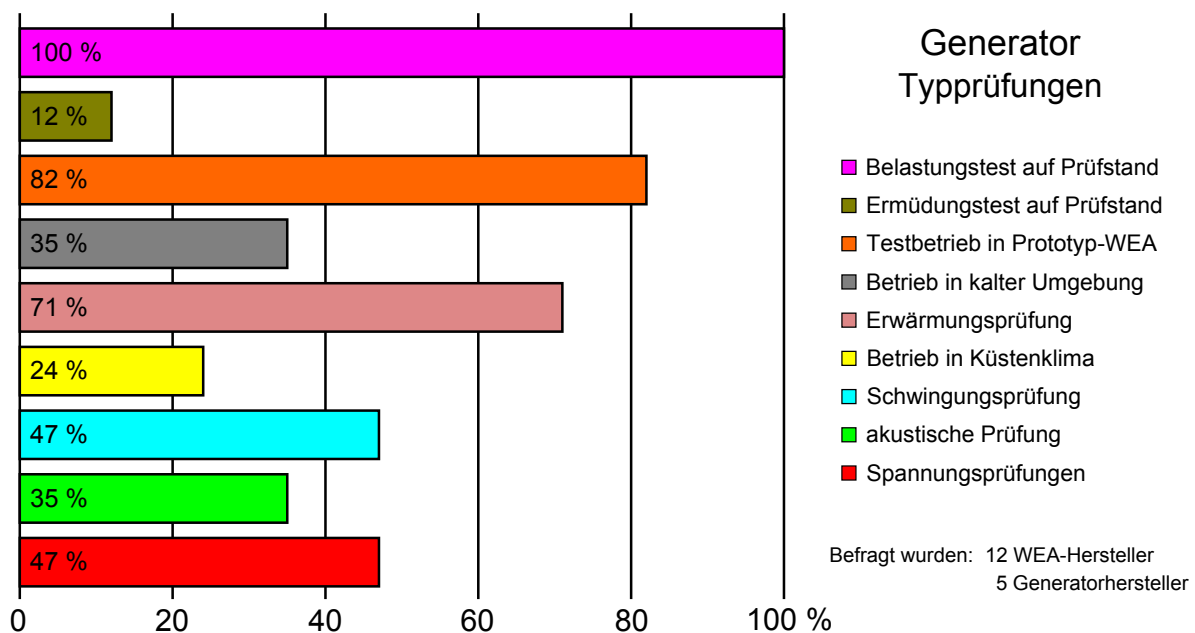


Abb. 4.16: Typprüfungen am Generator

Ähnlich selten wird der Betrieb in kalter Umgebung geprüft. Aufgrund der Selbsterwärmung des Generators bei Betrieb ist diese Erprobung für die meisten Einsatzstandorte, mit *normalen* Umgebungsbedingungen, jedoch auch nicht notwendig.

Die Erwärmungsprüfung, Schwingungsprüfung, akustische Prüfung und verschiedene Spannungsprüfungen sind normierte Prüfungen, die fast von allen befragten Generatorenherstellern durchgeführt werden. Die Werte unter 50% für diese Prüfungen sind darauf zurückzuführen, dass die ebenfalls befragten Hersteller von Windenergieanlagen sich in den meisten Fällen auf die Prüfergebnisse der Lieferanten verlassen und die Prüfung nicht noch einmal verifizieren.

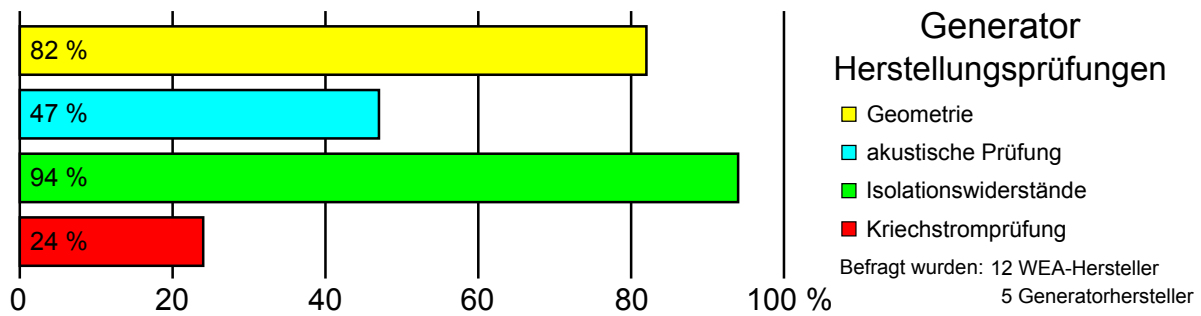


Abb. 4.17: Herstellungsprüfungen am Generator

Genauso wie beim Getriebelager, sind die Ergebnisse der Befragung zu Prüfungen am Generatorlager vergleichbar mit den Ergebnissen vom Rotorlager (siehe Kapitel 4.3.4). Das zugehörige Balkendiagramm findet sich im Anhang in Abbildung A.3.

Bei den Herstellungsprüfungen, die in Abbildung 4.17 dargestellt sind, führen fast alle Firmen eine geometrische Vermessung der Bauteile durch. Ebenso werden bei 94% die Isolationswiderstände zwischen den Wicklungen und zur Erde geprüft. Eine akustische Prüfung, die beispielsweise Hinweise auf Fehler bei der Montage geben kann, wird nur in knapp der Hälfte der befragten Firmen ausgeführt. Die Prüfung auf Kriechströme erfolgt bei 24% der Unternehmen.

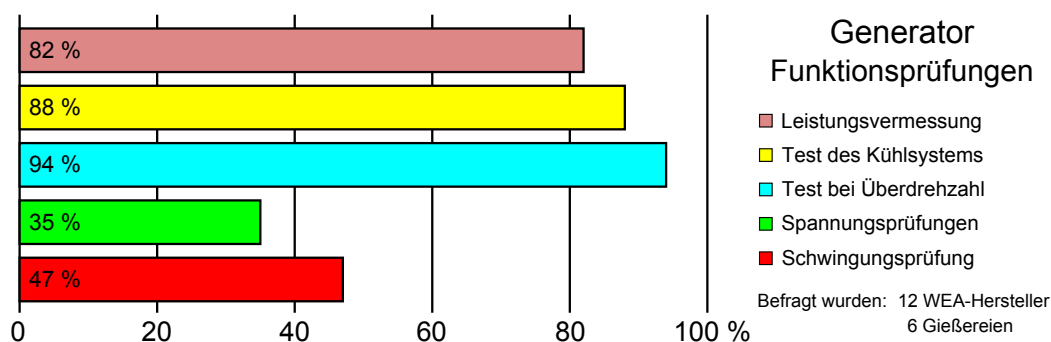


Abb. 4.18: Funktionsprüfungen am Generator

Funktionsprüfungen, die an den fertig hergestellten Generatoren durchgeführt werden, sind in Abbildung 4.18 dargestellt. Eine Leistungsvermessung des Generators, genauso wie ein Funktionstest des Kühlsystems und ein Test bei Überdrehzahl, wird bei über 80% der befragten Hersteller durchgeführt. Deutlich weniger Hersteller dagegen, führen die bereits im Rahmen der Typprüfung ausgeführten Spannungs- und Schwingungsprüfungen erneut an jedem Generator als Stückprüfung durch.

#### 4.3.8 Frequenzumrichter

In Abbildung 4.19 ist dargestellt in welchem Umfang Typprüfungen am Frequenzumrichter durchgeführt werden. Während alle befragten Firmen den Umrichter auf einem Prüfstand testen, führen nur etwas mehr als die Hälfte einen Dauertest durch, bei dem das Betriebsverhalten des Umrichters über einen längeren Zeitraum erprobt wird. Ein Test in warmer Umgebung, besonders wichtig aufgrund der hohen Verlustleistung in den leistungselektronischen Bauteilen des Umrichters, wird ebenfalls bei fast allen befragten Firmen durchgeführt. Ähnlich wie beim Generator ist ein Test der Betriebsverhaltens in kalter Umgebung für die meisten Einsatzorte überflüssig und wird daher auch nur bei 6% der Firmen durchgeführt.

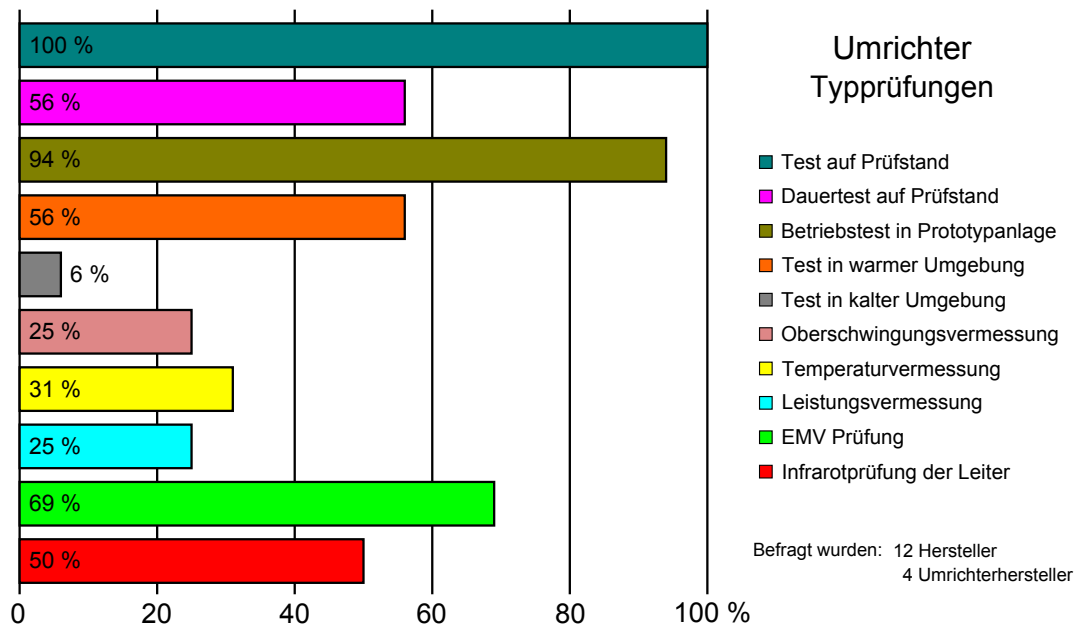


Abb. 4.19: Typprüfungen am Umrichter

Temperatur- und Leistungsvermessung, sowie eine EMV-Prüfung sind Prüfungen nach Norm und werden weitestgehend nur von den Umrichter-Herstellern durchgeführt. Hier verlassen sich die Hersteller von Windenergieanlagen auf die Prüfung der Lieferanten und führen in den meisten Fällen keine eigenen Prüfungen durch. Oberschwingungsvermessungen sind für das Netz, an dem die Windenergieanlage angeschlossen wichtig. Warum trotzdem nur 25% der Hersteller das Frequenzspektrum aufnehmen ist nicht weiter ersichtlich.

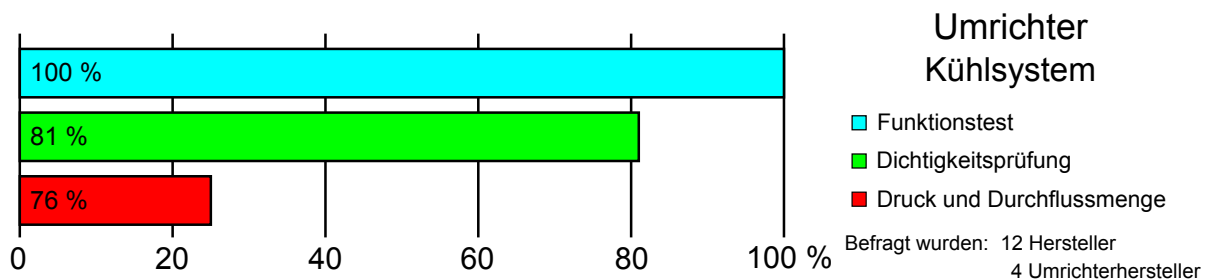


Abb. 4.20: Prüfungen am Kühlsystem vom Umrichter

Welche Prüfungen bezüglich des Umrichter-Kühlsystems durchgeführt werden zeigt Abbildung 4.20. Die Funktion des Kühlsystems ist entscheidend für die Funktion des Umrichters. Vermutlich aus diesem Grund wird bei allen befragten Herstellern eine Funktionstest durchgeführt. Zusätzlich führen die meisten Hersteller eine Dichtigkeitsprüfung durch. Deutlich weniger, nur 25% der Firmen, geben an, eine Messung von Druck und Durchflussmenge durchzuführen, obwohl diese beiden Parameter einen entscheidenden Einfluss auf die Kühlleistung des Systems besitzen.

Abbildung 4.21 gibt einen Überblick über durchgeführte Funktionsprüfungen am Umrichter. Die elektrische Form der Ausgangsspannung, die Funktion der Kondensatoren, ein Test der Netz-synchronisierung und der richtige Anschluss der Erdungsvorrichtung werden von einem Großteil der befragten Firmen durchgeführt. Lediglich ein Funktionstest unter Last wird bei 25% der Hersteller ausgeführt.

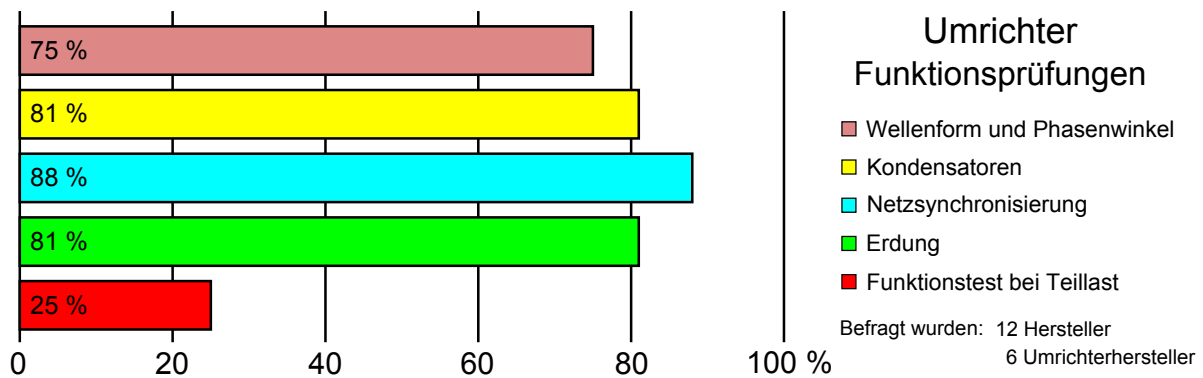


Abb. 4.21: Funktionsprüfungen am Umrichter

#### 4.3.9 Transformator

In welchem Umfang am Transformator Typprüfungen durchgeführt werden ist in Abbildung 4.22 dargestellt. Besonders auffällig ist hier, dass mit Ausnahme des Betriebstest in einer Prototypanlage, nur wenige Hersteller angeben, Typprüfungen durchzuführen. Weder eine Dauererprobung auf Prüfständen, noch der Betrieb in warmen oder kaltem Klimazonen wird bei mehr als einem Drittel der befragten Firmen durchgeführt. Spannungsprüfungen, Schallvermessung und Erwärmungsprüfung sind Normprüfungen die größtenteils nur von den befragten Generator-Herstellern durchgeführt werden. Wie schon bei anderen Komponenten verlassen sich die Hersteller von Windenergieanlagen in diesen Fällen auf die Prüfergebnisse der präqualifizierten Lieferanten.

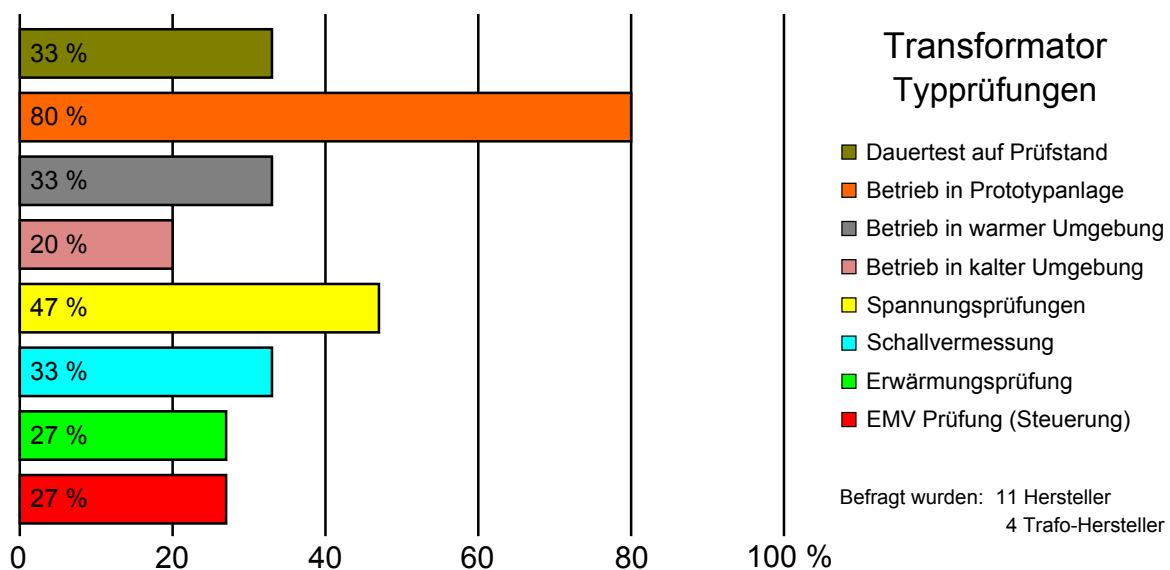


Abb. 4.22: Typprüfungen am Transformator

Prüfungen am Kühlsystem des Transformators zeigt Abbildung 4.23. Wichtig ist beim Transformator die Temperaturüberwachung, da es bei zu hohen Temperaturen zu schwerwiegenden Schäden kommen kann. Bei über 92% der Hersteller wird von daher eine Prüfung der Temperaturüberwachung durchgeführt. Ebenfalls geben knapp zwei Drittel der befragten Firmen an einen Betriebstest durchführen. Eine Dichtigkeitsprüfung wird nur bei 42% der befragten Firmen durchgeführt, was unter anderen daran liegt, dass bei vielen Anlagen Trockentransformatoren eingesetzt werden, wo keine Dichtigkeitsprüfung erforderlich ist.

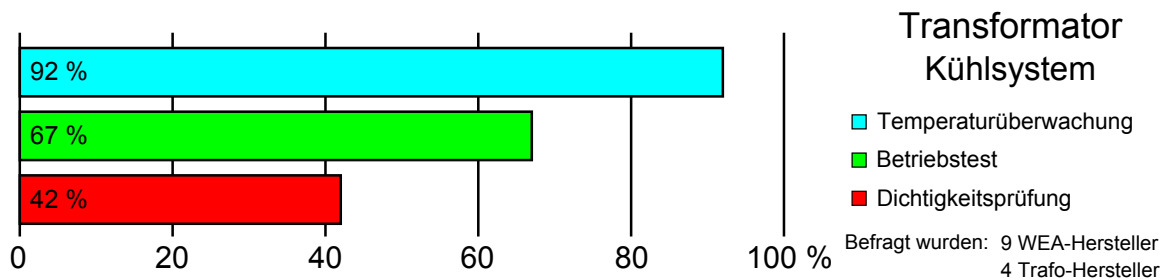


Abb. 4.23: Prüfungen am Kühlsystem vom Transformator

Für Transformatoren kommen auch eine Vielzahl von Funktionsprüfungen in Frage. Eine Übersicht über die Häufigkeit mit der diese durchgeführt werden gibt Abbildung 4.24 wieder. Während die Isolationswiderstände, die Erdungsvorrichtung, die Übersetzung und die Kurzschlussfestigkeit bei der Hälfte und mehr der befragten Firmen durchgeführt werden, werden andere Prüfungen deutlich seltener durchgeführt. Hierzu gehört ein Betriebstest bei Überlast, sowie die Normprüfungen bezüglich der Wicklungskapazitäten und Leerlauf- und Kurzschlussverluste.

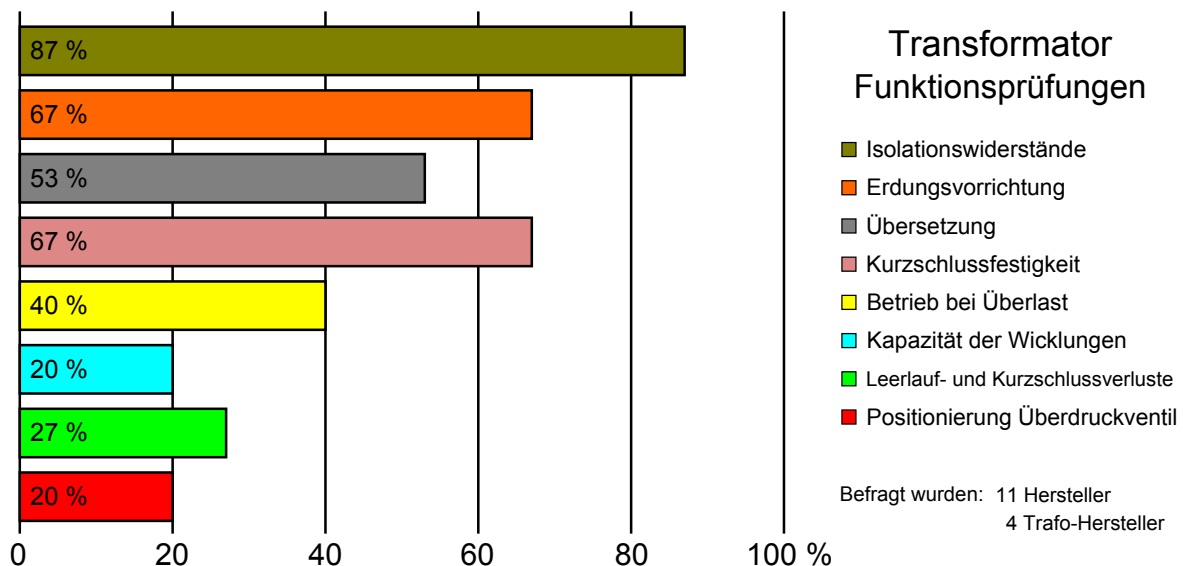


Abb. 4.24: Funktionsprüfungen am Transformator

#### 4.3.10 Schaltanlage

Abbildung 4.25 zeigt die Häufigkeit von Prüfungen an der Schaltanlage. Eine Prüfung der Isolationswiderstände und der Erdungsvorrichtung wird von fast allen befragten Firmen durchgeführt. Eine Schutzprüfung, eine Hochspannungsprüfung, sowie eine Prüfung der Verdrahtung und des Unterdrucks wird dagegen nur von sehr wenigen Firmen angegeben. Dies kann unter anderem daran liegen, dass diese Prüfungen nicht im ursprünglich an die Hersteller verschickten Fragebogen enthalten waren und von mehreren befragten Unternehmen ergänzt wurden.

#### 4.3.11 Maschinenträger

Welche Herstellungsprüfungen am Maschinenträger durchgeführt werden ist in Abbildung 4.26 dargestellt. Hier zeigt sich ein positives Bild: Eine Vermessung der geometrischen Maße des

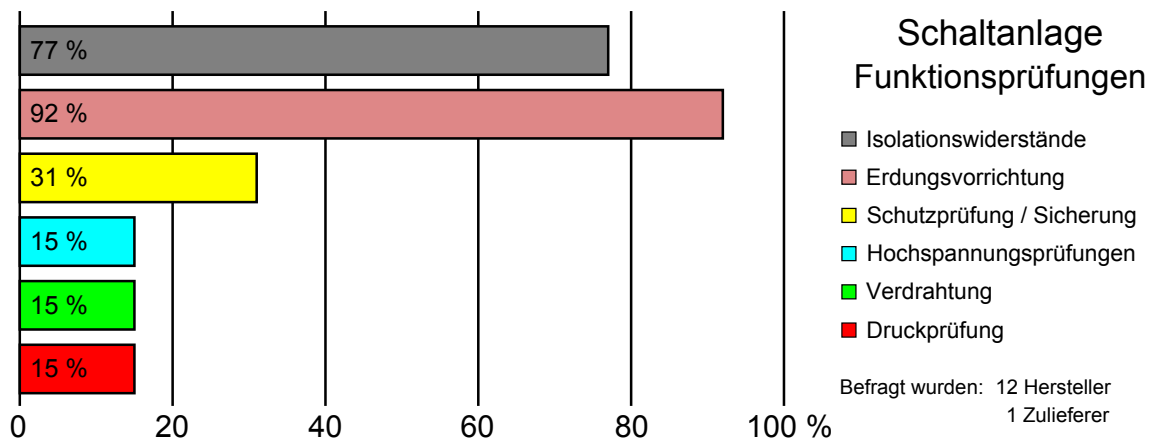


Abb. 4.25: Funktionsprüfungen an der Schaltanlage

Maschinenträgers wird bei allen Firmen ausgeführt, der Korrosionsschutz bei 94% geprüft und 71% der befragten Firmen bestimmen die Masse des Trägers nach der Herstellung.

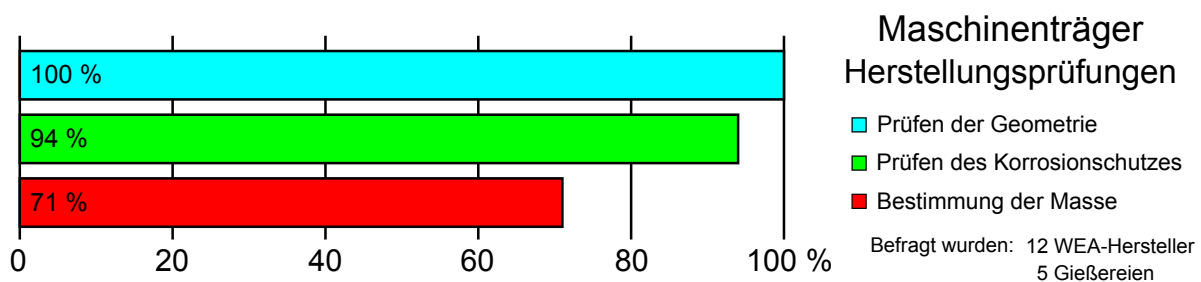


Abb. 4.26: Allgemeine Herstellungsprüfungen am Maschinenträger

Der Maschinenträger ist in den meisten Fällen als Gussteil ausgeführt. Bei den dafür notwendigen Herstellungsprüfungen sind die Ergebnisse ähnlich zu den Ergebnissen für Herstellungsprüfungen an der ebenfalls als Gussteil ausgeführten Rotornabe (siehe Kapitel 4.3.2). Das Balkendiagramm für Prüfungen an Gussteilen im Maschinenträger findet sich daher im Anhang in Abbildung A.4.

Werden im Maschinenträger Schweißverbindungen eingesetzt, so müssen auch hier Prüfungen durchgeführt werden. Diese sind in Abbildung 4.27 dargestellt. Auch hier zeigt sich ein hohes Niveau in der Häufigkeit der Ausführung der Prüfungen bei den befragten Firmen. Die Abweichung der Farbeindringprüfung mit nur 43% lässt sich damit erklären, dass diese ergänzend bzw. alternativ zur Magnetspulverprüfung durchgeführt wird.

Auch bei der Prüfung von Schraubverbindungen zeigt sich ein hohes Niveau der Qualitätssicherung. Das Anzugmoment wird bei über 73% der befragten Firmen gemessen. Zusätzlich nehmen 43% der Firmen die Reibungsverhältnisse der Schraubverbindung mit auf.

#### 4.3.12 Windrichtungsnachführung

Auch am System der Windrichtungsnachführung werden Typprüfungen durchgeführt. Wie Abbildung 4.29 zeigt wird bei den meisten befragten Firmen eine ausführliche Typprüfung der Einzelkomponenten, also Antrieb, Verzahnung, Lagerung und Bremse durchgeführt. Ein Test des montierten Systems der Windrichtungsnachführung auf einem Prüfstand wird dagegen nur bei

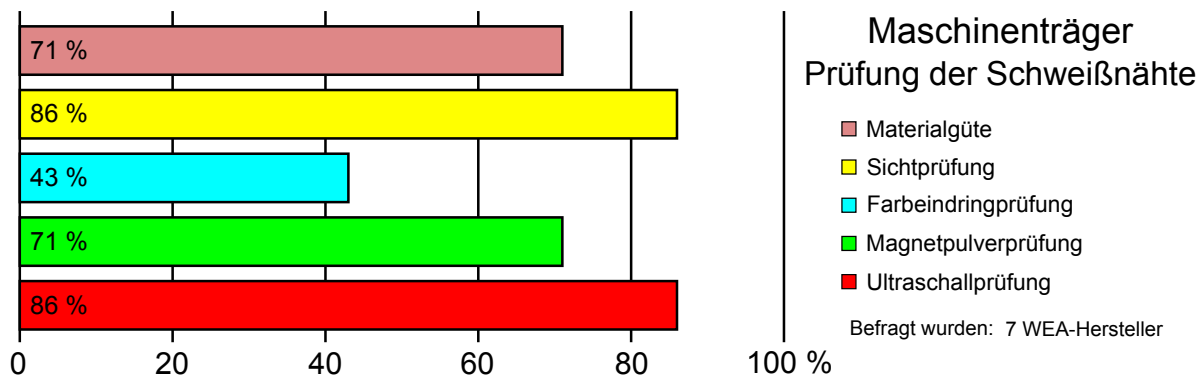


Abb. 4.27: Prüfungen an Schweißnähten am Maschinenträger

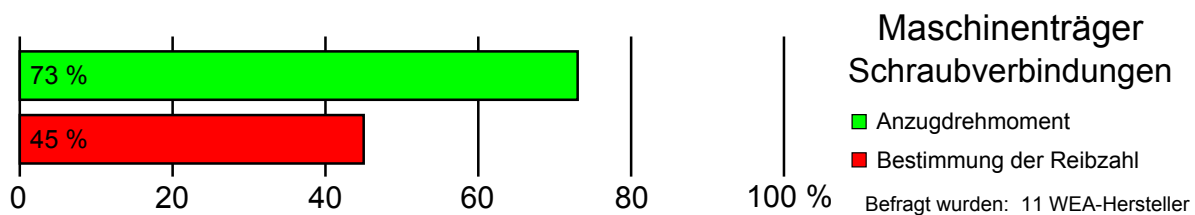


Abb. 4.28: Prüfungen an Schraubverbindungen am Maschinenträger

einem Unternehmen durchgeführt, obwohl besonders im Hinblick auf die langfristige Erprobung des Systems eine derartige Prüfung durchaus sinnvoll wäre.

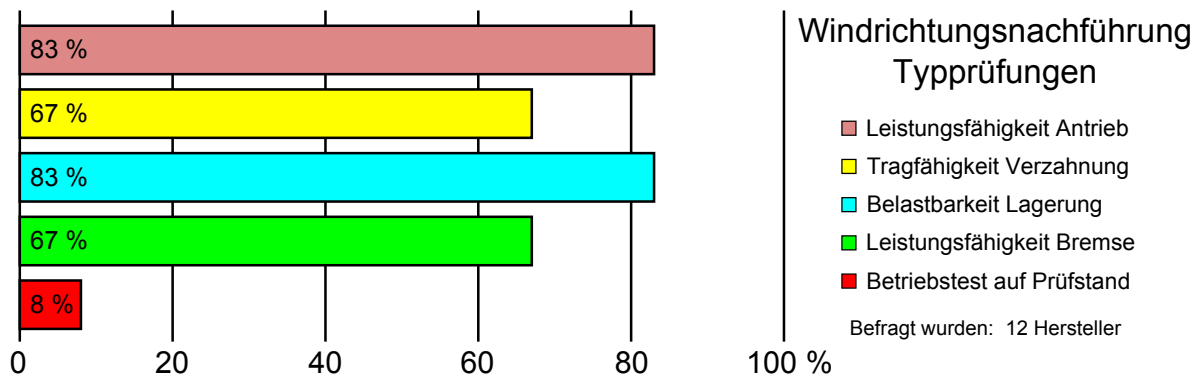


Abb. 4.29: Typprüfungen an der Windrichtungsnachführung

Die Ergebnisse der Befragung nach Prüfungen zum Getriebe und der Lagerung in der Windrichtungsnachführung sind nahezu identisch mit den Prüfungen an der Rotorblattverstellung (siehe dazu Kapitel 4.3.3). Die zugehörigen Balkendiagramme finden sich daher im Anhang in den Abbildungen A.5 und A.6.

Wie in Abbildung 4.30 dargestellt wird ein Funktionstest der Windrichtungsnachführung bei dem größten Teil der befragten Firmen durchgeführt. Der Test der Rotationsfunktion ist bei 100% und der Test der Bremsfunktion bei 92% der befragten Firmen ein Bestandteil der Qualitätssicherung.

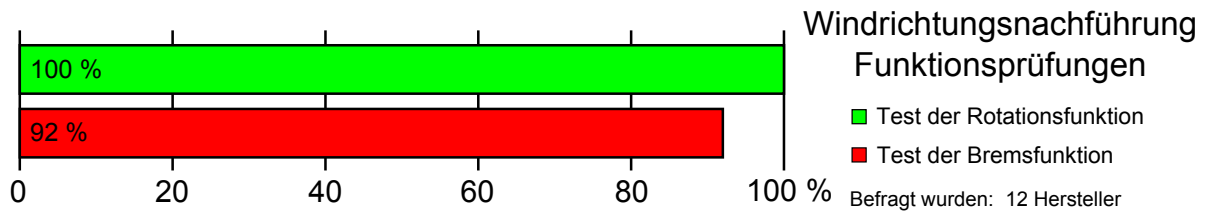


Abb. 4.30: Funktionsprüfungen an der Windrichtungsnachführung

#### 4.3.13 Turm

Abbildung 4.31 zeigt die Häufigkeit von Typprüfungen am Turm der Windenergieanlage. Insgesamt zeigen die Ergebnisse ein gutes Bild. Nahezu alle befragten Firmen geben an die aufgezählten Prüfungen durchzuführen. Lediglich die Messung der Eigenfrequenz weicht aus diesem Muster etwas ab, sie wird nur bei 55% der Unternehmen durchgeführt.

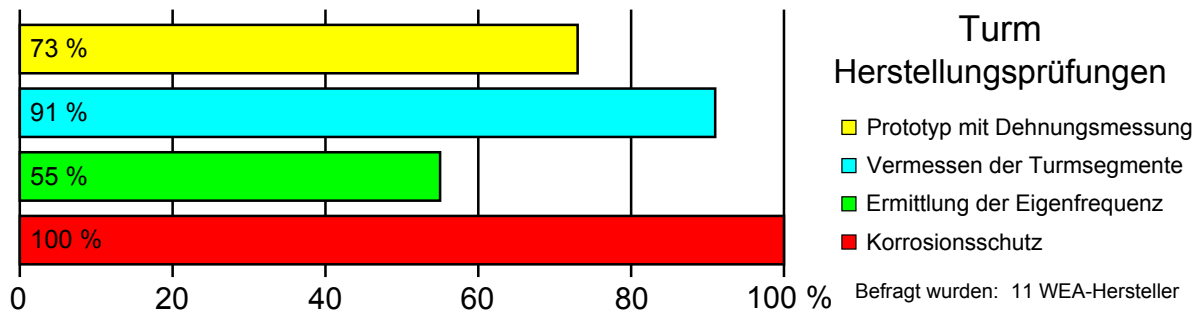


Abb. 4.31: Herstellungsprüfungen am Turm

Die Ergebnisse der Befragung zu Prüfungen an Schweißnähten am Turm gleichen sich mit den Ergebnisse zu Schweißnähten am Maschinenträger (siehe Kapitel 4.3.11). Das Balkendiagramm zu Prüfungen an Schweißnähten in der Turmkonstruktion findet sich daher im Anhang in Abbildung A.7. Ähnlich verhält es sich mit Prüfungen zu Schraubverbindungen am Turm. Auch hier sei auf den entsprechenden Abschnitt in Kapitel 4.3.11 verwiesen. Das Balkendiagramm findet sich ebenfalls im Anhang in Abbildung A.8.

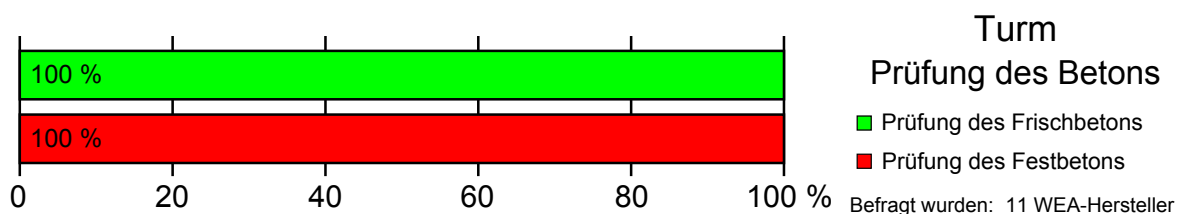


Abb. 4.32: Prüfungen bei Betoneinsatz am Turm

Prüfungen die am Beton durchgeführt werden sind in Abbildung 4.32 dargestellt. Auch hier zeigt sich ein einheitliches Bild: Alle befragten Firmen geben an eine Prüfung des Frisch- und Festbetons durchzuführen.



#### 4.3.14 Gondel

In Abbildung 4.33 ist dargestellt in welchem Umfang Prüfungen hinsichtlich der Betriebsfunktion an der montierten Gondel durchgeführt werden. Funktionstests hinsichtlich der Rotorblattverstellung und der Windrichtungsnachführung werden bei allen befragten Herstellern durchgeführt. Ein Test der Leistungsregelung erfolgt bei 75 % der Firmen. Auffällig ist, dass nur 33 % der Firmen angeben, die fluchtende Ausrichtung des montierten Antriebsstrangs zu prüfen. Diese Prüfung ist eigentlich sehr wichtig um, frühzeitigen Verschleiß der beteiligten Bauteile zu verhindern.

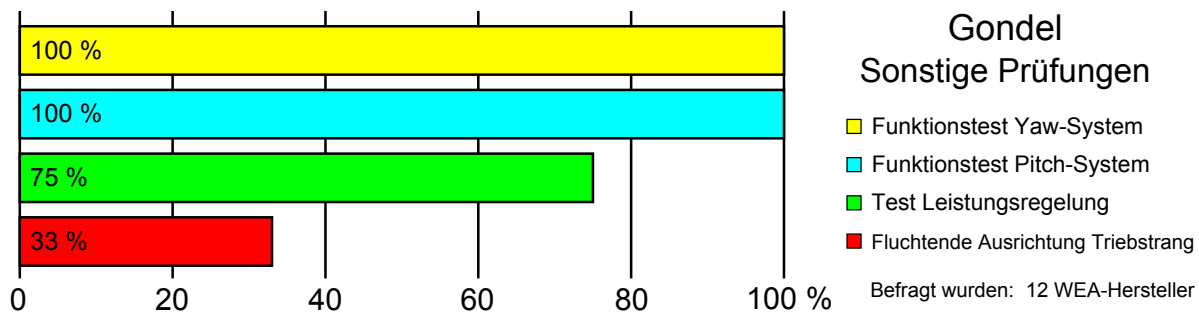


Abb. 4.33: Funktions- und Montageprüfungen an der montierten Gondel

Welche Prüfung hinsichtlich der Sicherheitssysteme der Windenergieanlage durchgeführt werden, wird in Abbildung 4.34 sichtbar. Während fast jede befragte Firma einen Notabschaltung simuliert und die Funktion des Schwingungsschutzes sicherstellt, findet eine Netzausfall-Simulation und eine Prüfung der Sturmabschaltung nur bei ungefähr der Hälfte der befragten Firmen statt.

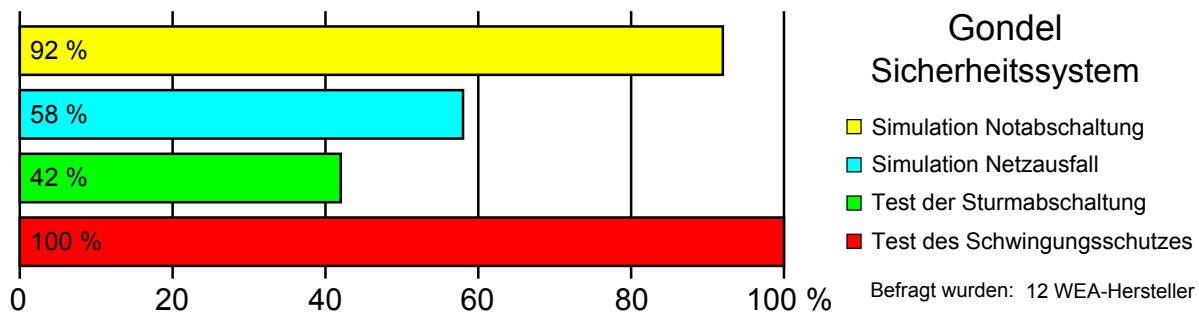


Abb. 4.34: Prüfung der Sicherheitsfunktionen an der montierten Gondel

Die Ergebnisse der Befragung zu Prüfungen an Schweißnähten und Schraubverbindungen an der montierten Gondel gleichen sich mit den Ergebnisse zu Schweißnähten am Maschinenträger (siehe Kapitel 4.3.11). Das entsprechenden Balkendiagramm finden sich daher im Anhang in Abbildung A.9 und A.10.

#### 4.3.15 Antriebsstrang

Als letzte Fragestellung wurden die Hersteller von Windenergieanlagen hinsichtlich Prüfungen, die sie am gesamten Antriebsstrang auf einem Prüfstand durchführen, befragt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.35 zu sehen. Deutlich erkennbar ist, dass nur knapp ein Drittel der befragten Hersteller, entwicklungsbegleitende Versuche und Prüfungen auf einem Prüfstand durchführen. Wie schon beim System der Rotorblattverstellung und der Windrichtungsnachführung werden derartige Versuche erst nach erfolgreichem Bau eines Vorserien-Prototyps im Rahmen von Feldtests durchgeführt.

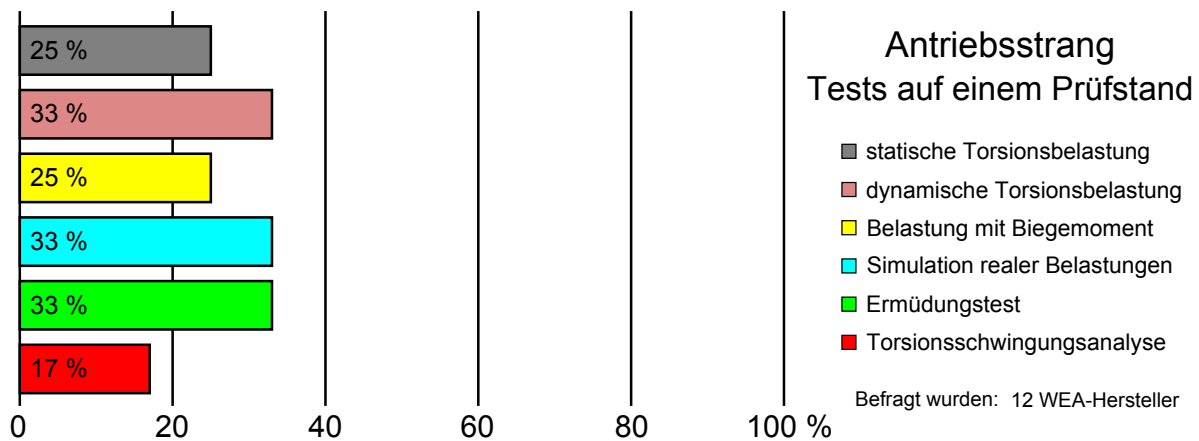


Abb. 4.35: Prüfungen auf einem Antriebsstrangprüfstand

#### 4.4 Ergebnisse der Befragung von Zertifizierungsstellen

Im Rahmen der Erhebung wurden, wie oben bereits angesprochen, auch Zertifizierungsstellen für Windenergieanlagen befragt. Ziel dieser Befragung war herauszufinden, welche Prüfungen innerhalb der in Kapitel 3.1 beschriebenen *Bewertung der Herstellung* durch die Zertifizierungsstellen gefordert werden. Anschließend lässt sich sagen, welche der in den Kapiteln 3.2 bis 3.5 aufgeführten Prüfungen nicht durch ein Typenzertifikat abgedeckt sind und auf deren Durchführung ein Betreiber von Windenergieanlagen besonderen Wert legen muss. Leider waren von den befragten fünf Zertifizierungsstellen nur zwei bereit den Fragebogen entsprechend auszufüllen. Von daher soll im folgenden auf eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse, gegliedert nach den einzelnen Komponenten der Windenergieanlage, verzichtet werden. Es werden nur die Prüfungen aufgeführt, bei denen es auffällig ist, dass diese nicht durch die *Bewertung der Herstellung* abgedeckt sind.

Die erste Auffälligkeit ist bezüglich Prüfungen am Rotorblatt festzustellen. Hier ist wichtig, dass nicht alle Zertifizierungsstellen eine dynamische Prüfung fordern. Dies ist nur bei einer Zertifizierung nach IEC WT01 bzw. IEC 61400-22 sichergestellt. Weiter wichtig ist, dass von keiner Zertifizierungsstelle Prüfungen auf Herstellungsfehler am Rotorblatt gefordert werden. Auch erwähnt werden muss, dass von den Zertifizierungsstellen für fast gar keine Komponenten, insbesondere bei Komponenten aus dem Antriebsstrang, Typprüfungen auf Prüfständen gefordert sind. Auch für die Windrichtungsnachführung und die Rotorblattverstellung sind keine Typprüfungen auf Prüfständen vorgeschrieben. Lediglich Typprüfungen, die im Rahmen einer Prototypanlage, deren Betrieb Bestandteil einer Zertifizierung ist, durchgeführt werden können, werden von den Zertifizierungsstellen gefordert.

Bei Herstellungsprüfungen an Verzahnungsbauanteilen im Getriebe oder in der Rotorblattverstellung oder der Windrichtungsnachführung fällt auf, dass die Zertifizierungsstellen zwar allgemeine Herstellungsprüfungen auf Oberflächenfehler und bezüglich der Verzahnungsgeometrie fordern, aber die wichtige Schleifbrandprüfung nicht bewertet wird. Weiter ist zu erwähnen, dass beim Getriebe und Generator keine Vibrations- bzw. Schwingungsprüfungen überprüft werden.

Bei Typprüfungen am Frequenzumrichter wird von den Zertifizierungsstellen auch nur wenig bewertet. Weder eine Erwärmungsprüfung, eine Leistungsvermessung oder ein EMV Test ist durch ein Typenzertifikat sichergestellt. Auch wird bei den Umrichtern keine Funktionstest nach der Montage als Stück- oder Stichprobenprüfung kontrolliert. Ähnlich verhält es sich mit Typprüfungen am Transformator. Nur eine der befragten zwei Zertifizierungsstellen gibt an ausführliche Typprüfungen auf einem Prüfstand, bezüglich besonderer Umgebungsbedingungen, zu fordern. Auch an der Schaltanlage sind, mit Ausnahme einer Zertifizierungsstelle, die angibt eine

Prüfung von Erdungseinrichtung und Isolation zu fordern, keine weiteren Prüfungen gefordert. Prüfungen, die im Rahmen einer Werksabnahme an der montierten Gondel im Herstellerwerk durchgeführt werden, werden auch nicht von beiden befragten Zertifizierungsstellen gefordert. Teilweise werden diese Prüfungen erst nach Inbetriebnahme der Anlage am Standort durchgeführt.

Abschließend muss noch erwähnt werden, dass die Zertifizierungsstellen, besonders bei den zerstörungsfreien Prüfungen und bei der Prüfung von Schweißnähten, großen Wert auf die Personalqualifikation legen und diese im Rahmen der Qualitätssicherung kontrollieren.

## 4.5 Zusammenfassung

Mit der Erhebung zum Thema Qualitätssicherung bei Herstellern und Zulieferern in der Windindustrie waren zwei Zielsetzungen verbunden. Zum einen sollte der bereits im Rahmen dieser Arbeit recherchierte Stand an Qualitätsprüfungen möglichst vollständig ergänzt werden. Zu diesem Zweck wurden alle befragten Firmen dazu aufgefordert, den Fragebogen zu ergänzen, wenn Prüfungen durchgeführt werden, die nicht im Fragebogen enthalten sind. Das zweite Ziel war herauszufinden, welche Arten von Qualitätsprüfungen Stand der Technik sind und an welchen Stellen Verbesserungspotential besteht.

Bezüglich des ersten Ziels ist die durchgeführte Befragung als Erfolg zu bezeichnen. Fünf der befragten zwölf Hersteller von Windenergieanlagen haben ausführliche Angaben gemacht und Ergänzungen vorgenommen, was in ihren Häusern im Rahmen der Qualitätssicherung durchgeführt wird. Zusätzlich hilfreich für eine Ergänzung der Sammlung von möglichen Qualitätsprüfungen war die Befragung von Lieferanten der wichtigsten Hauptkomponenten einer Windenergieanlage. Vermutlich dadurch bedingt, dass diesen Firmen nur ein kurzer Fragebogen zugeschickt wurde, wurde dieser in fast allen Fällen sehr ausführlich ausgefüllt und um eine Vielzahl möglicher Prüfungen ergänzt. Zusammengefasst bedeutet dies, dass durch die Herstellerbefragung eine umfangreiche Sammlung von möglichen Qualitätsprüfungen generiert wurde, die im Gesamtbild als dem Stand der Technik entsprechend, nahezu vollständig zu bezeichnen ist.

Auch im Hinblick auf das zweite Ziel, also welche Arten von Qualitätsprüfungen bei den Herstellern durchgeführt werden, hat die Befragung die Erwartungen erfüllt. Wie in Kapitel 4.3 deutlich wird, ist bei den meisten Komponenten erkennbar, welche Prüftechniken derzeit üblich und welche Prüftechniken eher wenig verbreitet sind. Prüfungen auf Herstellungsfehler an klassischen Maschinenelementen, wie Wälzlager, Zahnräder oder Schweißnähte werden bei fast allen befragten Firmen durchgeführt. Ähnlich verhält es sich mit Gussbauteilen. Auch Prüfungen an elektrischen Komponenten wie dem Generator, dem Umrichter und dem Transformator sind ausführlich in den entsprechenden Normen dokumentiert und werden dementsprechend auch von den meisten Zulieferern durchgeführt. Zurückzuführen ist dies vermutlich darauf, dass diese Bauteile auch in anderen Branchen bereits seit langer Zeit eingesetzt werden und die Prüfmethoden bezüglich der Qualitätssicherung entsprechend ausgereift sind.

Anders sieht es bei Prüfungen aus, die im Hinblick auf Erprobung der Betriebsfestigkeit und Lebensdauer, die spezifischen Beanspruchungen in Windenergieanlagen nachempfinden. Diese Prüfungen werden nur bei wenigen der befragten Firmen durchgeführt. Zu diesen Prüfungen gehören beispielsweise dynamische Belastungstests mit realen Lastprofilen, an den Komponenten des Antriebsstrangs wie Wellen, Lagerungen, Getriebe und Generatoren. Auch Prüfstände für Teilsysteme wie Rotorblattverstellung oder Windrichtungsnachführung werden bei kaum einem der befragten Hersteller eingesetzt. Warum derartige Prüfungen noch bei nur wenigen Herstellern durchgeführt werden, und viele Hersteller sich ausschließlich auf Feldtests mit Prototypen verlassen, lässt sich schwer sagen. Naheliegender wäre, dass die Hersteller die entsprechend höheren Kosten vermeiden möchten und den Ergebnissen derartiger Prüfstände vielleicht skeptisch

gegenüber stehen. Zudem können viele der Prüfungen auch auf den sowieso notwendigen Prototypanlagen durchgeführt werden. Die Ergebnisse von Prüfungen auf Prüfständen können allerdings deutlich früher in den Produktentwicklungsprozess einfließen, was wiederum die Kosten reduziert. Zusätzlich ist es wahrscheinlich nur eine Frage der Zeit, bis der Markt Prüfstände, die real auftretende Lasten nachempfinden können, von den Herstellern fordert.

Ein ähnliches Bild ergab auch die Befragung der zwei Zertifizierungsstellen. Auch hier zeigt sich, dass für eine erfolgreiche Zertifizierung vor allem bekannte, auch in anderen Industriezweigen übliche, Prüfungen gefordert sind. Betrachtet man jedoch das Gebiet Typprüfungen, die über den Betrieb einer Prototypanlage hinaus gehen, also dynamische Prüfstände für Einzelkomponenten und Teilsysteme der Windenergieanlage, so stellt sich heraus, dass in diesem Bereich nur wenig von den Zertifizierungsstellen gefordert wird.

Abschließend muss bezüglich der ausgewerteten Ergebnisse noch die Anmerkung gemacht werden, dass der Umfang, mit dem die Hersteller den Fragebogen ausgefüllt haben, sehr unterschiedlich ausgefallen ist. Einige der befragten Unternehmen haben den Fragebogen sehr ausführlich ausgefüllt und bei vielen Komponenten um nicht aufgeführte Prüfungen ergänzt. Andere Hersteller dagegen haben überhaupt keine Ergänzungen vorgenommen und bei manchen Komponenten nicht eine einzige Prüfung angekreuzt. Bei diesen Firmen kommt die Vermutung auf, dass sie den Fragebogen nur oberflächlich ausgefüllt haben und die angekreuzten Punkte nicht die wirklich durchgeführte Qualitätssicherung widerspiegelt. Diese Tatsache führt dazu, dass in den Ergebnissen teilweise Prüfungen nicht von 100 % der befragten Firmen durchgeführt werden, obwohl diese normativ, baurechtlich oder durch eine Zertifizierung vorgeschrieben sind.

# 5 Qualitätssicherung bei Betreibern von Windenergieanlagen

## 5.1 Allgemeines

Im diesem Kapitel wird dargestellt wie die Qualitätssicherung bei Windenergieanlagen aus Sicht eines Betreibers durchzuführen ist. Wie bereits in der Einleitung beschrieben ist es Ziel eines Käufers und Betreibers Windenergieanlagen von möglichst hoher Qualität geliefert zu bekommen. Auf diese Weise soll das Risiko von Schäden an den Anlagen und damit verbundenen Ertragsausfällen möglichst gering gehalten werden.

Auf Seiten des Betreibers werden daher Prozesse benötigt, die sicherstellen, dass nur Anlagentypen von Herstellern gekauft werden, die den Anforderungen des Betreibers entsprechen. Zu diesen Anforderungen gehören neben Aspekten wie Investitionskosten, Wartungskosten und der vom Hersteller geleistete Service auch Anforderungen an die Qualität. Die Prüfung ob ein Anlagentyp eines Herstellers diesen Anforderungen entspricht wird im folgenden als Präqualifizierung bezeichnet. Welche Anforderungen an die Qualität, im Rahmen der Präqualifizierung gefordert werden, ist in Kapitel 5.2 dargestellt. Nach einer erfolgreichen Prüfung aller Bedingungen für die Präqualifizierung erfolgt eine Freigabe, dass dieser Anlagentyp grundsätzlich in Projekten des Betreibers eingesetzt werden darf.

Auch wenn durch den Präqualifizierungsprozess ein hohes Maß an Qualität sichergestellt ist, sind während der Planung und Umsetzung von Windenergie-Projekten weitere Prüfungen und Kontrollen hinsichtlich der Qualität notwendig. Diese projektspezifische Prüfung der Qualitätsanforderungen kann teilweise durch Sichtung von Prüfdokumenten erledigt werden. An anderen Stellen sind jedoch auch Abnahmeprüfungen durch den Betreiber erforderlich. Eine Übersicht über Tätigkeiten zur Qualitätssicherung, die vom Betreiber auch bei präqualifizierten Anlagen durchzuführen sind, findet sich in Kapitel 5.3.

## 5.2 Präqualifizierung von Windenergieanlagen-Typen

### 5.2.1 Ziele der Präqualifizierung

Wie die Auswertung der Befragung in Kapitel 4 zeigt, existieren bei den Herstellern von Windenergieanlagen deutliche Unterschiede hinsichtlich der angewendeten Methoden zur Qualitätssicherung. Ein Betreiber von Windenergieanlagen muss also vor dem Kauf von Anlagen darauf achten, dass diese, während und nach der Herstellung, möglichst umfangreiche Qualitätssicherungsmaßnahmen durchlaufen. Es gilt aus der Vielzahl von Anlagentypen von verschiedenen Herstellern diejenigen herauszufiltern, die im Hinblick auf die Qualität die Anforderungen des Betreibers erfüllen.

Um diese Prüfung nicht für jedes Projekt erneut durchzuführen, wird der Präqualifizierungsprozess eingesetzt. Im Rahmen dieses Präqualifizierungsprozesses wird geprüft, ob ein Anlagentyp eines Herstellers alle Anforderungen des Betreibers erfüllt. Wichtig ist es zu beachten, dass sich die Präqualifizierung auf Anlagentypen bezieht und nicht allgemein auf einen Hersteller. Es besteht also die Möglichkeit, dass bei einem Hersteller, eine Anlage präqualifiziert und eine andere Anlage nicht präqualifiziert ist. Erfüllt ein Anlagentyp alle Anforderungen der Präqualifizierung so erfolgt eine Freigabe und dieser Typ kann in Projekten eingesetzt werden. Wie oben bereits

beschrieben müssen für die Präqualifizierung verschiedene Aspekte betrachtet werden. Die im folgenden beschriebenen Bedingungen beziehen sich daher nur auf den Aspekt Qualität. Alle anderen Aspekte der Präqualifizierung, also Investitions- und Wartungskosten, sowie der vom Hersteller angebotene Service werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter ausgeführt.

## **5.2.2 Bedingungen für eine Präqualifizierung**

### **5.2.2.1 Qualitätsmanagementsystem**

Grundsätzlich dürfen nur Anlagentypen präqualifiziert werden, deren Hersteller ein Qualitätsmanagementsystem nach den Grundsätzen der ISO 9001 einsetzt. Das Qualitätsmanagementsystem muss alle relevanten Bereiche, also Entwicklung, Produktion, Montage, Auslieferung und Transport mit einbeziehen. Dies ist durch ein entsprechendes Zertifikat, dass von einer unabhängigen Zertifizierungsstelle ausgestellt wurde, dem Betreiber gegenüber nachzuweisen. Da eine Zertifizierung nach ISO 9001 zeitlich befristet ist, müssen die Zertifikate nach Ablauf erneuert und dem Betreiber vorgelegt werden. Mit Ablauf des Zertifikats und einer nicht erfolgten Verlängerung verfällt auch die Präqualifizierung aller Anlagentypen dieses Herstellers.

### **5.2.2.2 Typenzertifizierung der Windenergieanlage**

Für eine erfolgreiche Präqualifizierung muss für einen Anlagentyp ein Typenzertifikat nach IEC WT01 oder IEC 61400-22 vorliegen. Das Zertifikat muss von einer akkreditierten unabhängigen Zertifizierungsstelle für Windenergieanlagen ausgestellt werden. Durch die Zertifizierung nach IEC WT01 bzw. IEC 61400-22 ist eine dynamische Prüfung der Rotorblätter sichergestellt. Dies ist bei Zertifikaten nach anderen Richtlinien nicht unbedingt zwingend vorgeschrieben.

### **5.2.2.3 Präqualifizierung von Zulieferbetrieben**

Der Hersteller der Windenergieanlage muss Lieferanten von Zulieferbauteilen durch einen geeigneten Präqualifizierungsprozess auswählen. Dies gilt für alle Komponenten, die von externen Firmen hergestellt und geliefert werden. Dabei muss zunächst nachgewiesen werden, dass alle Lieferanten ein Qualitätsmanagement nach ISO 9001 anwenden. Zusätzlich ist es notwendig, dass der Hersteller bei seinen Zulieferern entsprechende Audits, im Hinblick auf die dort betriebene Qualitätssicherung, durchführt. Die Durchführung muss dokumentiert werden und die Dokumente sind dem Betreiber gegenüber vorzulegen. Wird eine Komponente (z.B. Getriebe oder Wälzlager) von verschiedenen Lieferanten hergestellt, so muss für jeden dieser Lieferanten der Präqualifizierungsprozess durchlaufen werden.

### **5.2.2.4 Bewertung der durchgeführten Typprüfungen**

Ein weiterer wichtiger Punkt für eine erfolgreiche Präqualifizierung einer Windenergieanlage ist die Durchführung von Typprüfungen, in ausreichendem Umfang, durch den Hersteller. Die bedeutet nicht allein der erfolgreiche Betrieb von Anlagen in Feldtests, sondern auch der Betrieb von Prüfständen zur separaten Typprüfung einzelner Komponenten und Teilsystemen. Insbesondere Prüfungen, die über den Umfang der bereits im Rahmen der Zertifizierung geforderten Typprüfungen hinaus gehen, sind für eine zufriedenstellende Bewertung notwendig.

Mögliche Typprüfungen an den einzelnen Komponenten sind bereits in Kapitel 3 umfassend aufgeführt. Die Bewertung der Typprüfungen durch den Betreiber erfolgt durch eine Besichtigung der Fertigungsstätten mit Vorführung der im folgenden aufgeführten Einrichtungen (z.B. Prüfstände) für die Typprüfung durch den Hersteller. Anschließend muss der Betreiber entscheiden, ob der Umfang der vorgeführten Typprüfungen für eine erfolgreiche Präqualifizierung hinreichend ist.

**Prüfstände mit realen Belastungen für Komponenten des Antriebsstrangs** Ein wichtiger Punkt bei der Bewertung der Typprüfungen ist der Einsatz von dynamischen Prüfständen zur Erprobung der Komponenten des Antriebsstrangs. Dies bezieht sich insbesondere auf die Komponenten Rotorlager, Welle, Getriebe und Generator. Wichtig ist, dass die Antriebseinheit des Prüfstands in der Lage ist, Belastungsprofile aufzubringen, die die realen Belastungen möglichst genau nachempfinden können. Dies bedeutet auf den Prüfling nicht nur Torsionsmomente, sondern auch Zug- und Druckkräfte aufzubringen.

**Prüfstände zur dynamischen Erprobung von Teilsystemen** Eine weiter wichtige Form der Typprüfung, die nicht durch die Zertifizierung abgedeckt ist, sind Systemprüfstände für die Rotorblattverstellung und die Windrichtungsnachführung (siehe Kapitel 3.5.2 und 3.5.3). Auch hier sollten möglichst Nahe an der Realität angelehnte Belastungsprofile auf das System aufgebracht werden.

**Prüfstände zur Simulation besonderer Umgebungsbedingungen** Soll eine Windenergieanlage an einem Standort aufgestellt werden, an dem besondere Umgebungsbedingungen herrschen, so sollten Typprüfungen sicherstellen, dass der gewählte Anlagentyp den besonderen Anforderungen vor Ort standhält. Zu besonderen Umgebungsbedingungen zählen beispielsweise Standorte mit besonders niedrigen Temperaturen, besonders hohen Temperaturen, Offshore-Standorte mit besonders aggressiver Umgebungsluft oder Wüstenstandorte. Die Eignung der Windenergieanlagen für derartige Standortbedingungen sollte vom Hersteller durch Prüfstände in entsprechenden Klimakammern sichergestellt werden.

**Prüfstände für elektrische Komponenten** Die in der Windenergieanlage eingesetzten elektrischen Komponenten sollten ähnlich wie die Komponenten des Antriebsstrangs auf Prüfständen erprobt werden, die möglichst reale Belastungen nachempfinden. Dies sollte insbesondere mit dem Umrichter, dem Transformator und der Schaltanlage durchgeführt werden. Besonders für den Umrichter sind auch Prüfstände sinnvoll die HALT-Prüfungen durchführen und auf diese Weise die Belastbarkeit und Lebensdauer der Komponenten erproben.

Die Ergebnisse aller durchgeführten Typprüfungen an den Komponenten oder Teilsystemen der Windenergieanlage sind in Typprüfberichten zu dokumentieren und dem Betreiber für die Präqualifizierung zur Verfügung zu stellen. Aus diesen Typprüfberichten muss der Nachweis hervorgehen, dass die im Rahmen der Typprüfung angenommenen Belastungen an der richtigen Komponente erprobt wurden und diese den auftretenden Beanspruchungen standgehalten hat. Ein Typprüfbericht für eine Komponente sollte dabei mindestens die folgenden Angaben enthalten:

- Komponente
- Hersteller
- Typenbezeichnung
- Bemessungsgrößen des Prüflings
- Einzelheiten der Prüfanordnung
- Durchgeführte Prüfungen mit Prüffolge und Messergebnissen
- Fotografien, die den Zustand des Prüflings vor und nach der Prüfung veranschaulichen

### 5.2.2.5 Bewertung der durchgeführten Qualitätssicherung

Die vom Hersteller durchgeführten Maßnahmen zur Qualitätssicherung sind ein weiterer Bestandteil der Präqualifizierung. Über die *Checkliste für die Präqualifizierung* (siehe Anhang A.2) die unter anderem die Herstellungs- und Funktionsprüfungen aus Kapitel 3 beinhaltet, sollte zunächst aufgenommen werden in welchem Umfang Qualitätssicherung bei dem zu präqualifizierenden Hersteller betrieben wird. Für eine erfolgreiche Präqualifizierung ist es notwendig, dass alle in der Checkliste hellblau markierten Prüfungen durchgeführt werden. Bei den grün markierten Unterprüfungen muss der, für die Präqualifizierung zuständige, Mitarbeiter des Betreibers beurteilen, ob der Umfang dieser Prüfungen ausreichend für eine erfolgreiche Präqualifizierung ist.

Ein weiterer Aspekt, der im Rahmen der Bewertung der Qualitätssicherung, betrachtet werden muss, ist der Einsatz von qualifiziertem Fachpersonal. Der Hersteller der Windenergieanlage muss nachweisen, dass für alle im Hinblick auf die Qualitätssicherung sensiblen Tätigkeiten, qualifizierte Fachkräfte eingesetzt werden. Jede Arbeitskraft muss eine entsprechende fachliche Ausbildung, ausgerichtet auf Tätigkeiten im Rahmen des Produktionsprozesses einer Windenergieanlage, durchlaufen, bevor diese im Herstellungsprozess eingesetzt wird. Die Qualifikation des Personals und der Einsatz derartiger Personalqualifikationsprozesse muss durch entsprechende Dokumente, Zeugnisse oder Zertifikate nachgewiesen werden. Insbesondere gilt dies für die Durchführung von Schweißarbeiten, die Prüfungen an elektrischen Bauteilen, die Montage von Schraubverbindungen und generell für die Durchführung von zerstörungsfreien Prüfungen.

### 5.2.3 Zusammenfassung des Präqualifizierungsprozesses und zeitlicher Ablauf

Der im Rahmen dieses Kapitels vorgestellte Präqualifizierungsprozess für Typen von Windenergieanlagen erfordert, besonders bei den in Kapitel 5.2.2 aufgeführten Bedingungen, eine Auditierung des Herstellers durch den Betreiber. Auch wenn durch eine Dokumentenprüfung einige der dort aufgeführten Punkte geprüft werden können, ergibt erst eine umfangreiche Begutachtung des Herstellerwerks einen ausführlichen Überblick über die wirkliche Umsetzung des Qualitätsmanagements in den Produktionsprozess. Diese Auditierung sollte von einem Team von Mitarbeitern des Betreibers, bestehend aus technischen Sachverständigen, Qualitätsingenieur und Projektmanager durchgeführt werden. Für die Auditierung sollten mehrere Tage, eventuell bis zu einer Woche, in Anspruch genommen werden, damit sichergestellt ist, dass für die Prüfung aller Bedingungen der Präqualifizierung ausreichend Zeit vorhanden ist.

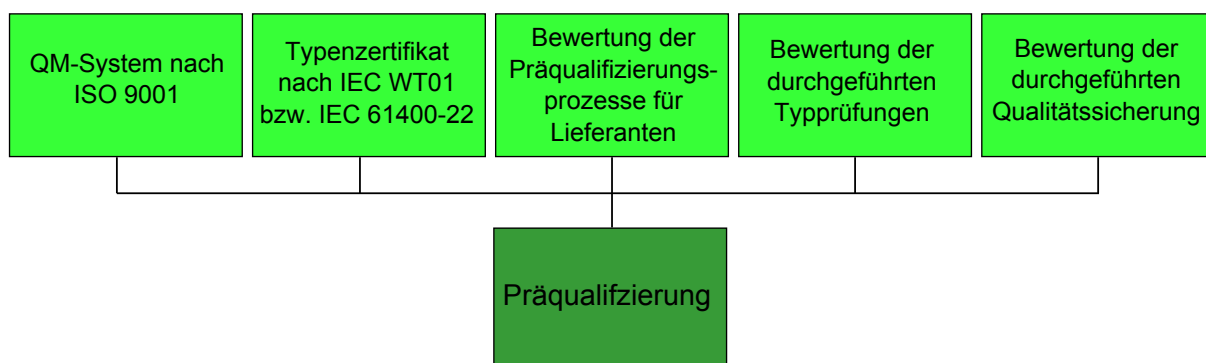


Abb. 5.1: Bedingungen für eine Präqualifizierung von Windenergieanlagen

Zudem muss ein zeitlicher Rahmen definiert werden, nachdem alle Punkte des Präqualifizierungsprozesses wiederholt werden müssen. Die Dauer, bis zu einer Wiederholung des Präqualifizierungsprozesses, sollte dabei in Abhängigkeit zur Qualität der gelieferten Anlagen gestellt



werden. Treten keine Auffälligkeiten oder Schäden an den in Betrieb genommenen Windenergieanlagen auf, so sollte der Präqualifizierungsprozess für einen Anlagentyp nach einem festgelegten Zeitraum wiederholt werden. Kommt es dagegen zu Mängeln und Ausfällen bei einem präqualifizierten Anlagentyp, oder wurden Änderungen durch den Hersteller vorgenommen, so müssen die Schritte der Präqualifizierung eher wiederholt werden. Je nach Art und Ursache der Ausfälle kann dabei nur ein Teil oder alle für die Präqualifizierung notwendigen Bedingungen erneut geprüft werden. Erfolgt eine Verlagerung der Produktionsstätte an einen neuen Standort, so ist ebenfalls eine erneute Durchführung des Präqualifizierungsprozesses vorzunehmen.

In Abbildung 5.1 ist der Ablauf des Präqualifizierungsprozesses dargestellt. Für die Durchführung der Präqualifizierung durch den Betreiber bietet sich die im Rahmen dieser Arbeit erstellte *Checkliste für die Präqualifizierung* als methodisches Hilfsmittel an. Die Checkliste befindet sich im Anhang A.2 zu dieser Arbeit.

## 5.3 Projektbezogene Qualitätssicherung bei Windenergieanlagen

### 5.3.1 Ziele der projektbezogenen Qualitätssicherung

Durch den Präqualifizierungsprozess kann der Betreiber sicherstellen, dass wenn in einem Projekt präqualifizierte Windenergieanlagen eingesetzt werden, diese den oben angeführten Anforderungen an die Qualität entsprechen. Dennoch sind während der Planung und Umsetzung von Windenergie-Projekten weitere Prüfungen und Kontrollen durch den Betreiber notwendig, um sicherzustellen, dass diese Qualitätsanforderungen auch wirklich erfüllt werden.

Hauptsächlich sollen diese Prüfungen absichern, dass keine Herstellungsmängel vorliegen und die richtige Funktion gegeben ist. Die Prüfungen werden entweder vom Hersteller der Windenergieanlage durchgeführt und mit Hilfe von Prüfzeugnissen dokumentiert, oder es erfolgt eine Abnahmeprüfung durch Mitarbeiter des Betreibers. In welchem Umfang und auf welche Art die Erfüllung der einzelnen Qualitätsmerkmale durch den Betreiber kontrolliert werden soll, wird in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

### 5.3.2 Nachweis von Qualitätsmerkmalen durch Prüfzeugnisse

Für den Betreiber ist es nicht notwendig bei jeder Prüfung, die vom Hersteller bezüglich der Herstellungsqualität durchgeführt wird, überwachend teilzunehmen. Zudem sind viele der in Kapitel 3 aufgeführten Prüfungen sehr ausgereift und werden teilweise seit Jahrzehnten auch in anderen Branchen eingesetzt. Um dennoch eine Nachverfolgbarkeit sicherzustellen, dass entsprechende Prüfungen vom Hersteller durchgeführt werden, muss dieser der Anlagendokumentation passende Prüfzeugnisse beifügen. Mit diesen Zeugnissen muss der Hersteller nachweisen, dass die spezifizierten Qualitätsmerkmale durch eine Prüfung bestätigt worden sind. Gleichzeitig muss der Hersteller nachweisen, dass die Prüfung von entsprechend qualifiziertem Personal durchgeführt wurde. Derartige Prüfzeugnisse sollten vom Betreiber für alle spezifizierten Qualitätsmerkmale kontrolliert werden.

Da viele der Prüfungen, besonders bei angelaufener Serienproduktion, nicht als 100 %-Prüfung durchgeführt werden, sind die Zeugnisse immer bezogen auf die Charge aus der die, vom Betreiber gekaufte Anlage bzw. Komponente stammt, anzugeben. Zusätzlich sollte vermerkt sein, mit welcher Prüfschärfe die angegebene Prüfung durchgeführt wird. Diese Zugehörigkeit muss durch eine entsprechende Chargen- und Seriennummer sichergestellt werden. Ziel ist es, dass alle Prüfungen die an der Windenergieanlage und den Komponenten durchgeführt worden sind, in einer Akte dokumentiert werden. Dies kann beispielsweise eine Lebenslaufakte sein, in der zusätzlich auch während des späteren Betriebs der Anlage durchgeführte Prüfungen, Wartungsarbeiten und Reparaturen vermerkt werden.

### 5.3.3 Werksabnahmen von Komponenten und der Gondel vor Auslieferung

Für manche Komponenten und Teilsysteme ist vom Betreiber eine Werksabnahme durchzuführen. Dies ist mindestens für die folgenden Komponenten durchzuführen:

- Rotorblatt
- Turm
- Gondel

Bei einer derartigen Werksabnahme findet im Werk ein ausführlicher Test der Komponente durch Mitarbeiter oder Beauftragte des Betreibers statt. Unter anderem wird dabei eine Prüfung der gelieferten Qualität und, bei der Gondel, eine Prüfung der grundlegenden Funktionen durchgeführt. Welche genauen Merkmale an den jeweiligen Komponenten im Rahmen der Werksabnahme zu prüfen sind, steht in den entsprechenden Abschnitten in Kapitel 3.3.1, 3.3.7 und 3.5.4.

Der Betreiber sollte zunächst für jedes Rotorblatt, jeden Turm und jede Gondel eine Werksabnahme durchführen. Stellt sich langfristig heraus, dass an den Anlagen bei der anschließenden Inbetriebnahme und im Betrieb keine Probleme auftreten, so kann überlegt werden, die Durchführung von Werksabnahmen zu reduzieren. Sollten nach einer Reduzierung von Abnahmeprüfungen erhöht Fehler und Schäden auftreten, so ist die Reduzierung wieder zurückzunehmen.

### 5.3.4 Überprüfung von spezifizierten und gelieferten Komponenten

Nach Auslieferung der Anlage, und nach Möglichkeit auch schon während der Werksabnahmen, muss geprüft werden, dass auch die Komponententypen in der Anlage verbaut sind, die vorher vertraglich festgelegt wurden. Dies schließt zwei Prüfungen mit ein: Zum einen muss geprüft werden, dass die in der Anlagendokumentation angegebenen Komponenten auch den im Rahmen der Zertifizierung geprüften Komponenten entsprechen. Zum anderen muss geprüft werden, dass auch genau diese Komponenten in der Anlage verbaut wurden.

## 6 Fazit und Ausblick

### 6.1 Fazit

Die in Kapitel 2.3 durchgeführte Systemanalyse zeigt, dass die Windenergieanlage ein sehr komplexes System mit vielfältigen Fehlermöglichkeiten ist. Die Schäden, die auf Fehler während Entwicklung und Produktion der Anlagen zurückzuführen sind, lassen sich dabei in die folgenden zwei Typen unterteilen:

- Schäden verursacht durch mangelhafte Dimensionierung und auf falschen Annahmen beruhende Auslegung eines Bauteils
- Schäden verursacht durch eine von den Konstruktionsvorgaben abweichende Herstellung des Bauteils

Prüfungen die sicherstellen sollen, dass an einer Komponente der Windenergieanlage keine derartigen Schäden auftreten sind in Kapitel 3 aufgeführt. Die dort beschriebenen Typprüfungen sollen dabei Sicherheit geben, dass keine Schäden vom ersten Typ, durch mangelhafte Dimensionierung, auftreten. Wichtig dabei ist, dass diese Prüfungen auch die wirklich auftretenden realen Belastungen nachempfinden und die aufgebrachten Lasten nicht auf falschen Annahmen basieren. Zusätzlich sind in Kapitel 3 Herstellungs- und Funktionsprüfungen aufgeführt. Mit diesen Prüfungen sollen dagegen Schäden vom zweiten Typ, verursacht durch eine mangelhafte Herstellung, vermieden werden.

Die Befragung der Hersteller und Zulieferer, deren Ergebnisse in Kapitel 5 vorgestellt wurden, zeigt, dass insbesondere Prüfungen, bezüglich des oben angeführten ersten Typs von Schäden, bei den meisten Firmen vernachlässigt werden. Eine Möglichkeit auf die dies zurückzuführen ist, ist dass derartige Prüfungen, innerhalb der bisherigen Nutzungsphase der Windenergie, nicht von den Käufern und Betreibern gefordert wurden. Zu diesen klassischen Betreiber von Windenergieanlagen gehören private Investoren, Zusammenschlüsse von Landwirten oder kommunale Betreiber. Erst in den letzten Jahren dringen vermehrt auch große Betreiberfirmen, unter anderem auch große Energiekonzerne, auf den Markt. Diese sind, vor allem aus dem Bereich Kraftwerksbau für fossile und nukleare Energieträger, besonders hohe Anforderungen an die Qualität und Dokumentationen der Anlagen gewöhnt und fordern dies auch vermehrt von den Herstellern der Windenergieanlagen.

Vereinzelt werden daher schon Prüfstände, für Getriebe, Generatoren und andere Komponenten, eingesetzt, die die besonderen Belastungen einer Windenergieanlage aufbringen können. Als Standard ist dies allerdings noch nicht zu bezeichnen. Auch an Prüfständen für Typprüfungen am Gesamtsystem, wie in Abbildung 3.13 vorgestellt, wird bereits geforscht. Aufgabe der Käufer und Betreiber wird es daher sein, in Zukunft vermehrt auf die Durchführung derartiger Prüfungen zu bestehen. Erst wenn der Markt entsprechende Prüfungen zwingend von den Herstellern der Windenergieanlagen einfordert, wird sich diese Form der Prüfung weiter durchsetzen. Ob sich hierbei Prüfstände für Einzelkomponenten und Teilsysteme, oder große Prüfstände für die gesamte Gondel etablieren werden, ist momentan noch schwer abzusehen. Prüfstände für die gesamte Gondel der Windenergieanlage erscheinen aber, angesichts der immer größer werdender Leistungsklassen und Dimensionen, schwer umsetzbar und werden daher vermutlich nur im Rahmen von Forschungsvorhaben zum Einsatz kommen.

Angesichts von Zeiträumen von mindestens 20 Jahren, über die eine Windenergieanlage zuverlässig arbeiten soll, um einen wirtschaftlich erfolgreichen Betrieb zu ermöglichen, ist eine Verbesserung der qualitativen Maßstäbe dringend erforderlich. Dies kann jedoch nur gelingen, wenn die Forderungen nach erhöhten Maßstäben, an die Qualität der Anlagen und die Dokumentation der Qualitätssicherungen, von Käufern und Betreibern konsequent eingefordert und durchgesetzt werden. Erst dann ist langfristig mit einer Verbesserung von Lebensdauer und Verfügbarkeit zu rechnen. Möglichkeiten für eine derartige Umsetzung, in die Prozesse zur Projektentwicklung und -durchführung einer Betreiberfirma von Windenergieanlagen, zeigen der in Kapitel 5.2 beschriebene Präqualifizierungsprozess, sowie die in Kapitel 5.3 aufgeführten projektbezogenen Prüfungen.

Zu bedenken ist jedoch, dass ein derartiger Umbruch im Qualitätsdenken, bei den Herstellern von Windenergieanlagen, sowie den Firmen in der zugehörigen Lieferantenkette, sicherlich nicht von heute auf morgen vollzogen werden kann. Vielmehr ist dies ein Prozess, der innerhalb der nächsten Jahre, verstärkt durch das oben bereits angesprochene strikte einfordern, der im Rahmen dieser Arbeit definierten Qualitätsmaßstäbe, durch Käufer und Betreiber von Windenergieanlagen, vollzogen werden kann. Auch die besonderen Anforderungen an die Transparenz hinsichtlich der Qualitätsprüfungen erfordert zunächst ein Umdenken bei den Herstellern, bis zu dessen vollständiger Umsetzung noch einige Zeit vergehen wird.

## 6.2 Ausblick

Thema dieser Arbeit sind Prüfungen, die während des Entwicklungs- und Produktionsprozesses einer Windenergieanlage durchgeführt werden. Bezogen auf die Lebenszeit einer Windenergieanlage sind dies Prüfungen, die bis zur Lieferung der Anlage abgeschlossen sind. Zusätzlich soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass nach dem Aufbau der Windenergieanlage und während der Betriebsphase noch weitere Prüfungen notwendig sind. Während und nach Inbetriebnahme der Windenergieanlage müssen Funktionsprüfungen durchgeführt werden, die zur Abnahmeprozedur des Käufers und Betreibers gehören. In der anschließenden Betriebsphase kommen dann noch umfangreiche Inspektionen und Wartungsmaßnahmen in regelmäßigen Abständen hinzu. Diese haben zum Ziel, die Qualität der Anlage auch nach mehreren Betriebsjahren zu kontrollieren. Ähnlich wie die in dieser Arbeit betrachteten Prüfungen während der Entwicklungs- und Produktionsphase könnten die Prüfungen während der Betriebsphase Gegenstand einer separaten Untersuchung werden.

Ein weiterer Aspekt, der im Zusammenhang mit einer erhöhten Kontrolle der Qualitätssicherung betrachtet werden muss, ist der Zusammenhang zwischen Kosten und Einsparungen. Für die Kosten sind dabei zwei verschiedene Stellen zu betrachten: Auf der einen Seite fallen beim Hersteller der Windenergieanlage und dessen Zulieferern Kosten für die erhöhte Qualitätssicherung an. Auf der anderen Seite muss der Käufer und Betreiber mit erhöhten Kosten, für die zwingend benötigte Kontrolle der Qualitätssicherung und die Werksabnahmen, rechnen. Gleichzeitig können jedoch auch beide Seiten Kosten sparen, wenn durch eine höhere Qualität für den Hersteller die Gewährleistung weniger in Anspruch genommen wird, beim Betreiber die Anlagen mit einer höheren Verfügbarkeit laufen und weniger Ertragsausfälle zu beklagen sind.

Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Für Betreiber und Hersteller gilt es, zwischen den Polen, das Optimum zu finden. Dafür ist jedoch eine umfangreiche Betrachtung der wesentlichen wirtschaftlichen Einflussgrößen auf die Qualitätssicherung und die daraus resultierenden Kosten und Einsparungen notwendig. Die Betrachtung dieses Zusammenhangs war jedoch nicht Teil der Aufgabenstellung, könnte jedoch Gegenstand von zukünftigen Untersuchungen in diesem Themengebiet werden.

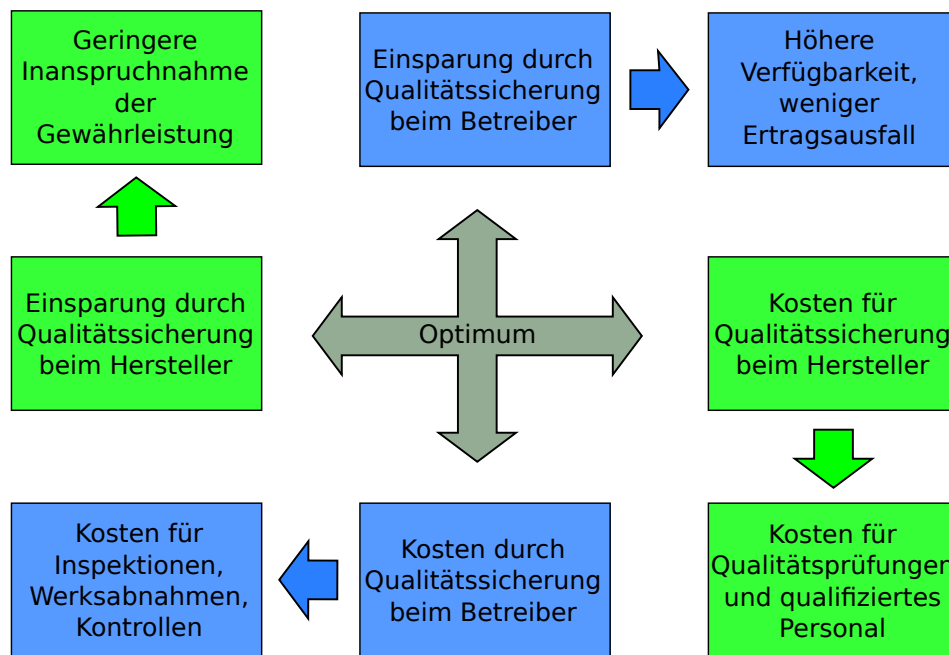


Abb. 6.1: Zusammenhang zwischen Kosten und Einsparungen durch Qualitätssicherung

Wie bereits in der Zusammenfassung der Herstellerbefragung in Kapitel 4.5 angeführt, lassen einige der dort aufgeführten Ergebnisse Zweifel aufkommen, ob diese Ergebnisse wirklich die Realität widerspiegeln. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die befragten Firmen dazu aufgefordert waren, den Fragebogen zu ergänzen, wenn zusätzliche, nicht im Fragebogen enthaltene, Prüfungen durchgeführt werden. Dies haben jedoch nicht alle befragten Firmen in Anspruch genommen und es besteht die Möglichkeit, dass einige der Unternehmen Prüfungen durchführen, die sie nicht im Rahmen der Erhebung angegeben haben. Um also ein noch besseres Bild über die durchgeführte Qualitätssicherung in der Windindustrie zu erhalten, müsste streng genommen die Erhebung ein weiteres Mal durchgeführt werden. Dabei sollte der in Kapitel 3 vorstellte und durch die erste Erhebung ergänzte Prüfungskatalog Grundlage für einen Fragebogen sein. Bei dieser zweiten Befragung dürfte den befragten Firmen auch nicht mehr die Möglichkeit gegeben werden, den Fragebogen zu ergänzen.

Wie schon für die oben angeführte Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Kosten und Nutzen der Qualitätssicherung, würde eine derartige zweite Befragung den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit überschreiten. Prinzipiell weicht eine zweite Befragung jedoch von dem in Kapitel 5 vorgestellten Präqualifizierungsprozess nicht sonderlich ab. Weshalb für alle zukünftigen Betrachtungen und Bewertungen eines Anlagenherstellers durch einen Käufer und Betreiber die Anwendung der im Anhang angeführten *Checkliste für die Präqualifizierung* empfohlen werden soll.

# A Anhang

## A.1 Übersicht über verwendete Normen

Norm	Bezeichnung
DIN EN ISO 9000	Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe
DIN EN ISO 9001	Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen
DIN EN 61400-1	Windenergieanlagen - Teil 1: Auslegungsanforderungen
DIN EN 61400-4	Windturbinen - Teil 4: Auslegungsanforderungen für Getriebe für Windturbinen
DIN EN 61400-11	Windenergieanlagen - Teil 11: Schallmessverfahren
DIN EN 61400-22	Windenergieanlagen - Teil 22: Konformitätsprüfung und Zertifizierung von Windenergieanlagen
IEC TS 61400-23	Windenergieanlagen - Experimentelle Strukturprüfung von Rotorblättern
DIN EN 10204	Metallische Erzeugnisse - Arten von Prüfbescheinigungen
DIN ISO 1132-1	Wälzlager - Toleranzen - Teil 1: Begriffe
DIN ISO 1132-2	Wälzlager - Toleranzen - Teil 2: Mess- und Prüfverfahren
DIN 620-1	Wälzlager; Meßverfahren für Maß- und Lauf toleranzen
DIN 5426-1	Wälzlager - Laufgeräusche von Wälzlagern - Verfahren zur Messung des Körperschalls
VDI 3832	VDI Richtlinie 3832 - Name noch nachschlagen
DIN EN 12084	Zerstörungsfreie Prüfung - Wirbelstromprüfung - Allgemeine Grundlagen und Richtlinien
DIN EN 583-1	Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundsätze
DIN 3961	Toleranzen für Stirnradverzahnungen; Grundlagen
DIN EN ISO 9934-1	Zerstörungsfreie Prüfung - Magnetpulverprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlage
ISO 14104	Zahnräder - Schleifbrandprüfung
AGMA 2007-C00	AGMA-Verfahrensweisung AGMA 2007-C00 (früher 2007-B92)
DIN 18800-7	Stahlbauten - Teil 7: Ausführung und Herstellerqualifikation
DIN EN 970	Zerstörungsfreie Prüfung von Schmelzschweißnähten - Sichtprüfung
DIN EN ISO 3452-1	Zerstörungsfreie Prüfung - Eindringprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen
DIN EN ISO 17638	Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Magnetpulverprüfung
DIN EN ISO 17640	Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen
DIN EN ISO 5817	Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten
DIN EN ISO 16047	Verbindungselemente - Drehmoment/Vorspannkraft-Versuch
DIN EN 1371-1	Gießereiwesen - Eindringprüfung - Teil 1: Sand-, Schwerkraftkokillen- und Niederdruckkokillengussstücke

<b>Norm</b>	<b>Bezeichnung</b>
DIN EN 1369	Gießereiwesen - Magnetpulverprüfung
DIN EN 12680-1	Gießereiwesen - Ultraschallprüfung - Teil 1: Stahlgussstücke für allgemeine Verwendung
DIN EN 12681	Gießereiwesen - Durchstrahlungsprüfung
DIN EN ISO 12944-1	Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme - Teil 1: Allgemeine Einleitung
DIN EN ISO 12944-6	Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme - Teil 6: Laborprüfungen zur Bewertung von Beschichtungssystemen
DIN EN ISO 12944-7	Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme - Teil 7: Ausführung und Überwachung der Beschichtungsarbeiten
DIN EN 1559-1	Gießereiwesen - Technische Lieferbedingungen - Teil 1: Allgemeines
DIN EN 10228-1	Zerstörungsfreie Prüfung von Schmiedestücken aus Stahl - Teil 1: Magnetpulverprüfung
DIN EN 10228-2	Zerstörungsfreie Prüfung von Schmiedestücken aus Stahl - Teil 2: Eindringprüfung
DIN EN 10228-3	Zerstörungsfreie Prüfung von Schmiedestücken aus Stahl - Teil 3: Ultraschallprüfung von Schmiedestücken aus ferritischem oder martensitischem Stahl
DIN EN 10228-4	Zerstörungsfreie Prüfung von Schmiedestücken aus Stahl - Teil 4: Ultraschallprüfung von Schmiedestücken aus austenitischem und austenitisch-ferritischem nichtrostendem Stahl
ISO 11357-2	Kunststoffe - Dynamische Differenzkalorimetrie (DDK) - Teil 2: Bestimmung der Glasübergangstemperatur
DIN 53765	Prüfung von Kunststoffen und Elastomeren; Thermische Analyse; Dynamische Differenzkalorimetrie (DDK)
DIN EN ISO 9227	Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären - Salzsprühnebelprüfungen
DIN EN 206-1	Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
DIN EN 12350	Prüfung von Frischbeton - Teile 1 bis 12
DIN EN 12390	Prüfung von Festbeton - Teile 1 bis 11
DIN EN 60034-1	Drehende elektrische Maschinen - Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten
DIN EN 60146-1-1	Halbleiter-Stromrichter; Allgemeine Anforderungen und netzgeführte Stromrichter; Teil 1-1: Festlegung der Grundanforderungen
DIN EN 60076-1	Leistungstransformatoren - Teil 1: Allgemeines
DIN EN 60076-2	Leistungstransformatoren - Teil 2: Übertemperaturen
DIN EN 60076-3	Leistungstransformatoren - Teil 3: Isolationspegel, Spannungsprüfungen und äußere Abstände in Luft
DIN EN 60076-5	Leistungstransformatoren - Teil 5: Kurzschlussfestigkeit
DIN EN 60076-10	Leistungstransformatoren - Teil 10: Bestimmung der Geräuschpegel
DIN EN 60076-11	Leistungstransformatoren - Teil 11: Trockentransformatoren
DIN EN 60076-16	Leistungstransformatoren - Teil 16: Transformatoren für Windenergieanlagen-Anwendungen
DIN EN 62271-1	Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen - Teil 1: Gemeinsame Bestimmungen

## A.2 Checkliste für die Präqualifizierung von Anlagentypen

Die im folgenden angefügte Checkliste für die Präqualifizierung beinhaltet alle in Kapitel 5.2 aufgeführten Anforderungen für eine Präqualifizierung eines Anlagentyps hinsichtlich der Qualität. Für eine erfolgreiche Präqualifizierung müssen alle hellblau eingefärbten Prüfungen durchgeführt werden. Existieren zu einer dieser Prüfungen Unterprüfungen, so müssen diese ebenfalls durchgeführt werden. Bezüglich der Unterprüfungen müssen die folgenden Fälle unterschieden werden:

- Prüfungen die mit einem + markiert sind, sind zwingend erforderlich
- Prüfungen die mit einem o markiert sind, sind optional und damit nicht zwingend notwendig
- sind Prüfungen mit einem +o markiert, so muss mindestens eine dieser mit +o markierten Prüfungen durchgeführt werden



Präqualifizierung - Checkliste für Qualitätprüfungen		Hersteller	Lieferant	PräQ Lieferant	Dokument	Besichtigung	Erfüllt
<b>1 Allgemeine Anforderungen</b>							
Allgemeine Anforderungen	Qualitätsmanagementsystem nach ISO 9001						
	Präqualifizierungsprozess für Lieferanten						
	+ Qualitätsmanagementsystem nach ISO 9001 bei Lieferanten						
	+ Durchführung von Audits bei den Lieferanten						
	Typenzertifikat für den zu präqualifizierenden Anlagentyp, nach						
	+ IEC WT01						
	o IEC 61400-22						
	o Germanischer Lloyd (optional)						
	o andere Richtlinie:						
	Nachweis über Qualifikation des Personals für						
	+ Grundlegende Sicherstellung der Personalqualifikation						
	+ Zerstörungsfreie Prüfungen						
+ Schweißverbindungen							
<b>2 Mechanische Komponenten</b>							
<b>2.1 Rotorblatt</b>							
Typprüfung	Dynamische Prüfung (nach IEC TS 61400-23)						
	+ in Schlagrichtung						
	+ in Schwenkrichtung						
	Statische Prüfung (nach IEC TS 61400-23)						
	+ in Schlagrichtung						
	+ in Schwenkrichtung						
	Eigenfrequenzen						
	Schalleigenschaften (durch Testbetrieb in Prototypanlagen)						
Aerodynamische Eigenschaften (Leistungskennlinie)							
Stückprüfung	Kontrolle hinsichtlich Fertigungsfehlern durch						
	+ Sichtprüfung						
	+o Ultraschallprüfung						
	+o Wärmefluss-Thermographie						
	Geometrie / Abmessungen (Ebenheit Flanschflächen, Kanten, usw.)						
	Masse						
	Massenschwerpunkt						
	Materialgüte Polyester / Epoxidharze (Glasübergangstemperatur)						
Blitzschutzsystem, durch z.B. Durchgangsprüfung							
<b>2.2 Rotornabe</b>							
üfung	Materialgüte						
	+ chem. Zusammensetzung						
	+ mech. Eigenschaften						
	+ Härte						
	+ Rauigkeit						
	Gefüge / Mikrostruktur						
	Oberflächenprüfung auf Risse und andere Fehler, durch						
	+ Sichtprüfung (grobe Oberflächenfehler)						

Typpr	+o	Magnetpulverprüfung							
	+o	Farbeindringprüfung							
		Prüfung auf innere Defekte / Ungänzen, durch							
	o	Ultraschallprüfung							
	o	Durchstrahlungsprüfung							
		Geometrie / Abmessungen							
		Masse							
		Korrosionsschutz							
<b>2.3 Rotorlager</b>									
Typprüfung		Erprobung des Rotorlagers auf einem Prüfstand							
	+	Prüfung auf Extremlasten (Torsionsmoment)							
	+	Prüfung hinsichtlich der Lebensdauer (Torsionsmoment)							
	o	reale Belastungsprofile (Torsions- und Biegemoment)							
	o	bei kalten Temperaturen in Klimakammer							
	Erprobung der Korrosionsbeständigkeit								
Herstellung		Materialgüte							
	+	chem. Zusammensetzung							
	+	mech. Eigenschaften							
		Geometrische Abmessungen der Lagerbauteile							
		Oberflächenprüfung (auf Risse und andere Fehler) durch							
	o	Magnetpulverprüfung (Lagerringe, bei größeren Lagern)							
	o	Farbeindringprüfung (Lagerringe, bei größeren Lagern)							
	o	Wirbelstromprüfung (bei kleinen Lagern aus automatisierter Serienfertigung)							
		Oberflächenhärte der Lagerbauteile							
		Ultraschallprüfung (bei großen Wälzlagern, sowie bei Gleitlagern)							
		Körperschallmessung							
	Schmierung								
	Leichtläufigkeit								
<b>2.4 Rotorwelle</b>									
Typprüfung		Erprobung des Rotorlagers auf einem Prüfstand							
	+	Prüfung auf Extremlasten (Torsionsmoment)							
	+	Prüfung hinsichtlich der Lebensdauer (Torsionsmoment)							
	o	reale Belastungsprofile (Torsions- und Biegemoment)							
	o	bei kalten Temperaturen in Klimakammer							
	Erprobung der Korrosionsbeständigkeit								
Herstellung		Materialgüte							
	+	chem. Zusammensetzung							
	+	mech. Eigenschaften							
	+	Härte							
	+	Rauigkeit Materialgüte							
		Gefüge / Mikrostruktur (an Probestück)							
		Oberflächenprüfung (auf Risse und andere Fehler) durch							
	+	Sichtprüfung (grobe Oberflächenfehler)							
	+o	Magnetpulverprüfung							
	+o	Farbeindringprüfung							
		Innere Defekte / Ungänzen							
	o	Ultraschallprüfung							
	o	Durchstrahlungsprüfung (sehr selten)							
	Geometrie / Abmessungen								
	Masse								



	o	Durchstrahlungsprüfung (sehr selten)							
		Geometrie / Abmessungen							
		Masse							
		Korrosionsschutz							
Schweißnähte		Materialgüte der zu verschweißenden Grundwerkstoffe							
		Schweißfolge und -verfahren							
		Personalqualifikation der Schweißer							
		Maße und Form der Schweißnaht							
		Prüfung auf Fehler an der Schweißnaht							
	+	Sichtprüfung							
	+o	Farbeindringprüfung							
+o	Magnetpulverprüfung								
+	Ultraschallprüfung								
Schraube		Materialprüfung (vom Schraubenwerkstoff)							
		Korrosionsschutz							
		Anziehdrehmoment							
		Reibverhältnisse (wird durch Einsatz von normierten Schrauben)							
2.7	<b>Turm</b>								
Typ		Aufbau einer Prototypanlage, dabei folgende Prüfungen am Turm							
	+	Dehnungsmessung							
	+	Bestimmung der Eigenfrequenz							
	+	Überwachung der Spannungen in den Schraubverbindungen							
Schweißnähte		Materialgüte der zu verschweißenden Grundwerkstoffe							
		Schweißfolge und -verfahren							
		Personalqualifikation der Schweißer							
		Maße und Form der Schweißnaht							
		Prüfung auf Fehler an der Schweißnaht							
	+	Sichtprüfung							
	+o	Farbeindringprüfung							
+o	Magnetpulverprüfung								
+	Ultraschallprüfung								
Schraube		Materialgüte des Schraubenwerkstoffs							
		Korrosionsschutz							
		Anziehdrehmoment							
		Reibverhältnisse (wird durch Einsatz von normierten Schrauben)							
Beton		Prüfung des Frischbetons							
	+	Konsistenz							
	+	Dichte							
	+	Luftgehalt							
	+	Temperatur							
		Prüfung des Festbetons							
	+	Festigkeit							
+	Dehnung								
Allgemein		Materialgüte bei Stahlrohtürmen							
	+	chem. Zusammensetzung							
	+	Z-Güte							
	+	Aufschweißbiegeversuch							
	+	Kerbschlagbiegearbeit							
		Maßkontrolle / Geometrische Abmessungen							
		Korrosionsschutz							
	Verkabelung, z.B. Durchgangsprüfung								



	o	Wirbelstromprüfung							
		Geometrische Abmessungen der Generatorbauteile							
		Prüfung des Kühlsystems, dabei							
	+	Funktionstest der Aggregate							
	+	Dichtigkeitsprüfung (bei Flüssigkeitskühlung)							
		Korrosionsschutz							
		Erdung							
<b>3.2</b>	<b>Umrichter</b>								
Typprüfungen		Erprobung des Frequenzumrichter auf einem Prüfstand, dabei							
	+	Leistungsvermessung							
	+	Wirkungsgrad							
	o	Dauerbetrieb							
	+	Elektromagnetische Verträglichkeit							
	+	Oberschwingungen / Frequenzanalyse							
		Erwärmungsprüfung, dabei							
	+	Überwachung durch Temperatursensoren							
	o	Überwachung durch Infrarotkamera							
		Erprobung in einer Klimakammer							
	o	bei kalten Temperaturen							
	o	bei warmen Temperaturen							
	o	Temperatur-Wechselbelastung							
o	bei Salznebelsprühprüfung								
Herstellung		Betriebstest auf Prüfstand, dabei							
	+	Funktionstest mit verminderter Leistung							
	o	Funktionstest mit maximaler Leistung							
	+	Messung der abgegebenen Blind- und Scheinleistung							
	+	Wellenform und Phasenwinkel							
	+	Prüfung der Leistungsbegrenzung							
	+	Prüfung der Abschaltung							
		Elektrische Prüfungen nach DIN EN 60146							
	+	Isolationsprüfung							
	+	Prüfung der Hilfeinrichtungen							
	+	Prüfen der Ventilsteuereinrichtung							
	+	Prüfen der Schutzeinrichtungen							
	+	Ermittlung des Leistungsfaktors							
	+	Ermittlung der inneren Spannungsänderung							
	+	Prüfen der Störfestigkeit							
	+	Prüfen der Überstrombelastbarkeit							
	+	Funkstörgrad							
	+	Schallpegel							
	+	Ermittlung der überlagerten Wechselgrößen							
		Prüfung des Kühlsystems, dabei							
+	Funktionstest der Aggregate								
+	Dichtigkeitsprüfung (bei Flüssigkeitskühlung)								
	Prüfen der Erdungsvorrichtung								
<b>3.3</b>	<b>Transformator</b>								
gen		Dauerprüfung des Transformators							
	+	auf Prüfstand							
	+	in Prototypanlage							
	o	nach Abschluss Demontage und Begutachtung der Bauteile							
		Spannungsprüfungen nach IEC 60076-3							

Typprüfungen	+	Schaltstoßspannungsprüfung (SI) er Leiteranschlüsse								
	+	Blitzstoßspannungsprüfung (LI) der Leiteranschlüsse								
	+	Stoßspannungsprüfung (LI) des Sternpunktanschlusses								
	+	Steh-Wechselspannungsprüfung								
	+	Kurzzeit-Stehspannungsprüfung mit induzierter Wechselspannung (ACSD)								
	+	Langzeitprüfung mit induzierter Wechselspannung (ACLD)								
		Bestimmung des Geräuschpegels (nach IEC 60076-10-1)								
Stückprüfungen	Elektrische Prüfungen									
	+	Messung des Wicklungswiderstands								
	+	Messung der Übersetzung und prüfen der Phasenverschiebung								
	+	Messung der Kurzschlussimpedanz und der Kurzschlussverluste								
	+	Messung der Leerlaufverluste und des Leerlaufstroms								
	+	Prüfen der Stufenschalter								
	+	Prüfen der Polarität von Einbaustromwandlern								
	+	Kapazitäten der Wicklungen gegen Erde und zwischen den Wicklungen								
	+	Isolationswiderstand der Wicklungen gegen Erde								
	+	Verlustfaktor der Kapazitäten des Isolationssystems								
	+	Überprüfung der Kern- und Rahmenisolation								
	+	Frequenzgang / Frequenzganganalyse								
		Spannungsprüfungen nach IEC 60076-3								
	+	Schaltstoßspannungsprüfung (SI) er Leiteranschlüsse								
	+	Blitzstoßspannungsprüfung (LI) der Leiteranschlüsse								
	+	Stoßspannungsprüfung (LI) des Sternpunktanschlusses								
	+	Steh-Wechselspannungsprüfung								
	+	Kurzzeit-Stehspannungsprüfung mit induzierter Wechselspannung (ACSD)								
	+	Langzeitprüfung mit induzierter Wechselspannung (ACLD)								
		Prüfung des Kühlsystems, dabei								
+	Funktionstest der Aggregate (Lüfter, Pumpe, usw.)									
+	Dichtigkeitsprüfung (bei Flüssigkeitskühlung)									
	Dichtigkeitsprüfung									
	Gas-In-Öl-Analyse									
	Kurzschlussfestigkeit (nach IEC 60076-5)									
	Prüfen der Erdungsvorrichtung									
<b>3.4 Schaltanlage</b>										
Typprüfungen	Dielektrische Prüfungen (nach IEC62271-1, Abschnitt 6.2.6)									
	+	Wechselspannungsprüfung								
	+	Blitzstoßspannungsprüfung								
	Erwärmungsprüfung (nach IEC 62271-1 Abschnitt 6.5)									
	Kurzzeitstrom- und Stoßstromprüfung (nach IEC 62271-1 Kap. 6.6)									
	Störlinienbogenprüfung (nach IEC 62271-200 Abschnitt 6.106)									
	Dichtheitsprüfung (nach IEC 62271-1 Abschnitt 6.5)									
Prüfen der elektromagnetischen Verträglichkeit (nach IEC 62271-1)										
üfungen	Dielektrische Prüfung (nach IEC 62271 Abschnitt 7.1)									
	Prüfung der Hilfs- und Steuerstromkreise (nach IEC 62271 Abschnitt)									
	+	Beschaffenheit der Materialien								
+	Qualität des Zusammenbaus									



<b>Stückpr</b>	+ Kontrolle von Schutzbeschichtungen								
	Messung des Widerstands des Hauptstromkreis (nach IEC 62271								
	Dichtigkeitsprüfung (nach IEC 62271 Abschnitt 7.4)								
	Prüfen der Erdungsvorrichtung								
<b>4 Teilsysteme</b>									
<b>4.1 Antriebsstrang</b>									
<b>Typprüfung</b>	Betrieb eines Antriebsstrangprüfstand, dabei Möglichkeit für								
	+ Prüfung auf Extremlasten (Torsionsmoment)								
	+ Prüfung hinsichtlich der Lebensdauer (Torsionsmoment)								
	o reale Belastungsprofile (Torsions- und Biegemomente, Schubkräfte)								
	+ Ermüdungstest / Dauerbelastungstest								
	+ Torsionsschwingungsanalyse								
	o HALT Prüfung								
<b>4.2 Rotorblattverstellung</b>									
<b>Typ</b>	Erprobung der Rotorblattverstellung								
	o auf Prüfstand								
	+ in einer Prototypanlage								
<b>Verzahnung / Getriebe</b>	Materialgüte des Werkstoffs für die Zahnräder								
	+ chem. Zusammensetzung								
	+ mech. Eigenschaften								
	Geometrische Abmessungen der Zahnräder / Prüfen der								
	o Koordinatenmessmaschine								
	o mit Handmessgeräten								
	Oberflächenprüfung auf Risse und andere Fehler durch								
	o Magnetpulverprüfung								
	o Farbeindringprüfung								
	Ultraschallprüfung auf innere Defekte / Ungängen								
<b>Rotorblattlager</b>	Härtemessung (zerstörungsfrei am Produkt und zerstörend an Schleifbrandprüfung (z.B. Nital-Ätzprüfung)								
	Materialgüte der verwendeten Werkstoffe								
	Geometrische Abmessungen der Lagerbauteile								
	Oberflächenprüfung auf Risse und andere Fehler durch								
	o Magnetpulverprüfung (Lagerringe, bei größeren Lagern)								
	o Farbeindringprüfung (Lagerringe, bei größeren Lagern)								
	o Wirbelstromprüfung (bei kleinen Lagern in Serienfertigung)								
	Härtemessung								
	Ultraschallprüfung (bei großen Wälzlagern und Gleitlagern)								
	Prüfen der Vorspannung / Losbrechmoment								
<b>Funktionsprüfungen</b>	Prüfungen bei hydraulischen Systemem								
	+ Dichtigkeitsprüfung								
	+ Druckprüfung								
	+ Visuelle Prüfung der verlegten Schläuche								
	+ Funktionstest der Aggregate								
	Prüfungen der Akkumulatoren (nur bei elektrischem System)								
	Prüfen der Schmierung								
	+ von Rotorblattlager								
	+ von Zahnrädern								
	Prüfen der eingesetzten Sensoren								
Prüfen der Steuerung									



4.3 Windrichtungsnachführung							
Typprüfung	Erprobung der Windrichtungsnachführung						
	o auf Prüfstand						
	+ in einer Prototypanlage						
	dabei Prüfung der folgenden Aspekte						
	+ Leistungsfähigkeit des Antriebs						
	+ Tragfähigkeit der Zahnräder						
	+ Belastbarkeit des Azimutlagers						
Verzahnung	+ Bremskraft der Azimutbremse						
	Materialgüte des Werkstoffs für die Zahnräder						
	+ chem. Zusammensetzung						
	+ mech. Eigenschaften						
	Geometrische Abmessungen der Zahnräder / Prüfen der						
	o Koordinatenmessmaschine						
	o mit Handmessgeräten						
	Oberflächenprüfung auf Risse und andere Fehler durch						
	o Magnetpulverprüfung						
	o Farbeindringprüfung						
Azimutlager	Ultraschallprüfung auf innere Defekte / Ungängen						
	Härtemessung (zerstörungsfrei am Produkt und zerstörend an						
	Schleifbrandprüfung (z.B. Nital-Ätzprüfung)						
	Materialgüte der verwendeten Werkstoffe						
	Geometrische Abmessungen der Lagerbauteile						
	Oberflächenprüfung auf Risse und andere Fehler durch						
	o Magnetpulverprüfung (Lagerringe, bei größeren Lagern)						
	o Farbeindringprüfung (Lagerringe, bei größeren Lagern)						
	o Wirbelstromprüfung (bei kleinen Lagern in Serienfertigung)						
	Härtemessung						
Funktionsprüfungen	Ultraschallprüfung (bei großen Wälzlagern und Gleitlagern)						
	Prüfen der Vorspannung / Losbrechmoment						
	Test der Rotationsfunktion						
	Test der Bremsfunktion						
	Prüfungen bei hydraulischen Systemem						
	+ Dichtigkeitsprüfung						
	+ Dichtigkeitsprüfung						
	+ Druckprüfung						
	+ Visuelle Prüfung der verlegten Schläuche						
	+ Funktionstest der Aggregate						
	Prüfungen der Akkumulatoren (nur bei elektrischem System)						
	Prüfen der Schmierung						
	+ von Rotorblattlager						
+ von Zahnrädern							
Prüfen der eingesetzten Sensoren							
Prüfen der Steuerung							
4.4 Gondel							
Funktionsprüfungen	Ausrichtung des Antriebsstrangs						
	Funktion der verlegten Kabel / Durchgangsprüfung						
	Prüfungen bei hydraulischen Systemen						
	+ Dichtigkeitsprüfung						
	+ Druckprüfung						
+ Visuelle Prüfung der verlegten Schläuche							



### **A.3 Ergänzende Diagramme der Herstellerbefragung**

Im folgenden werden zur Vollständigkeit Diagramme aufgeführt die nicht bereits Bestandteil von Kapitel 4 sind.

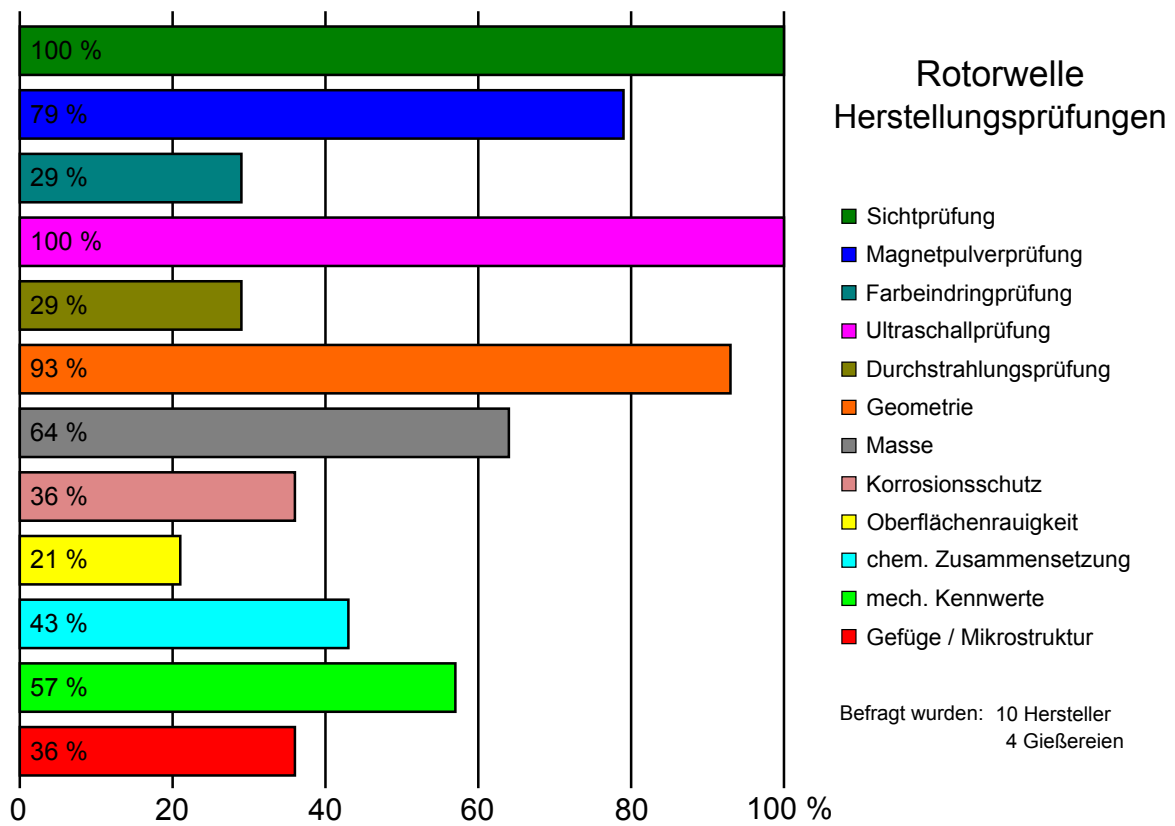


Abb. A.1: Herstellungsprüfungen an der Rotorwelle

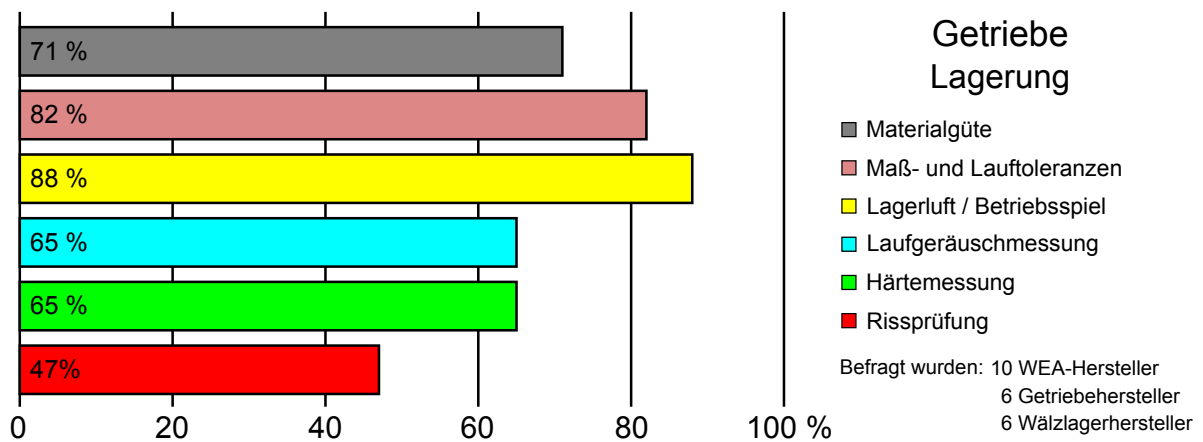


Abb. A.2: Prüfungen an der Lagerung im Getriebe

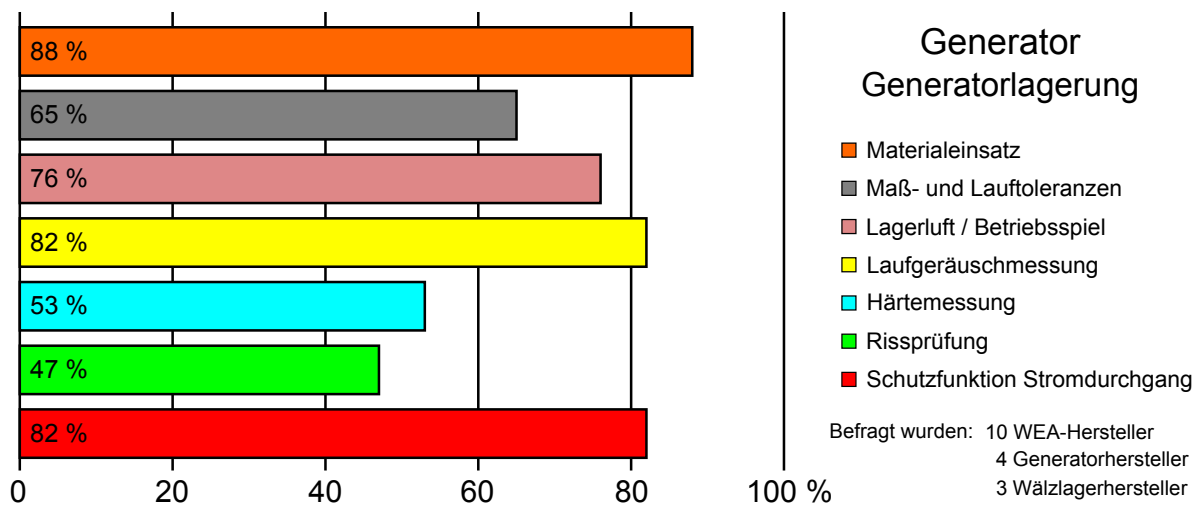


Abb. A.3: Prüfungen am Generatorlager

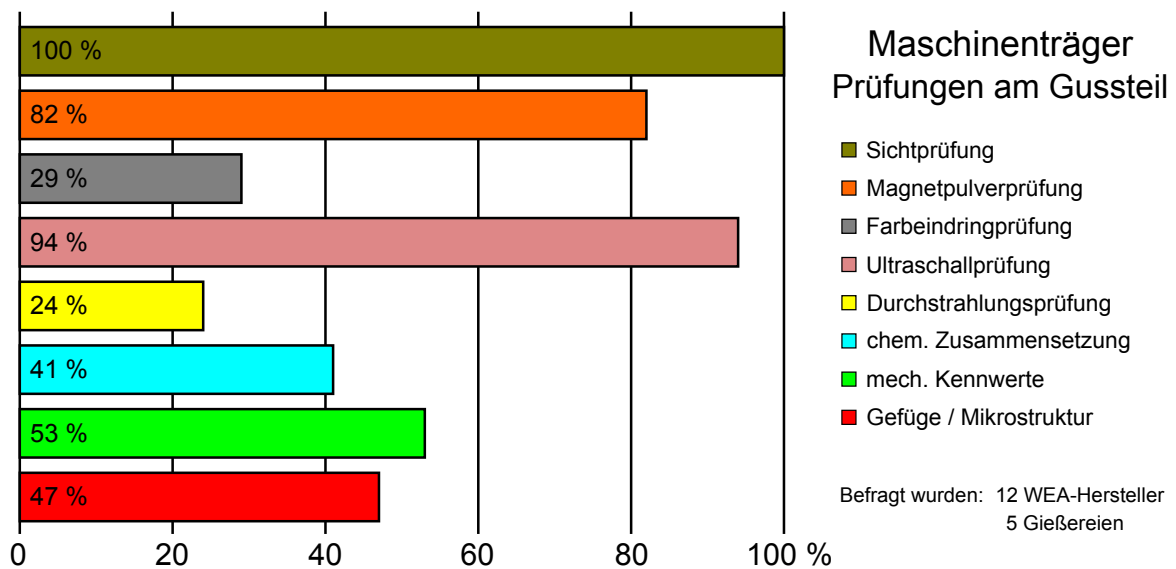


Abb. A.4: Herstellungsprüfungen an Gussteilen im Maschinenträger

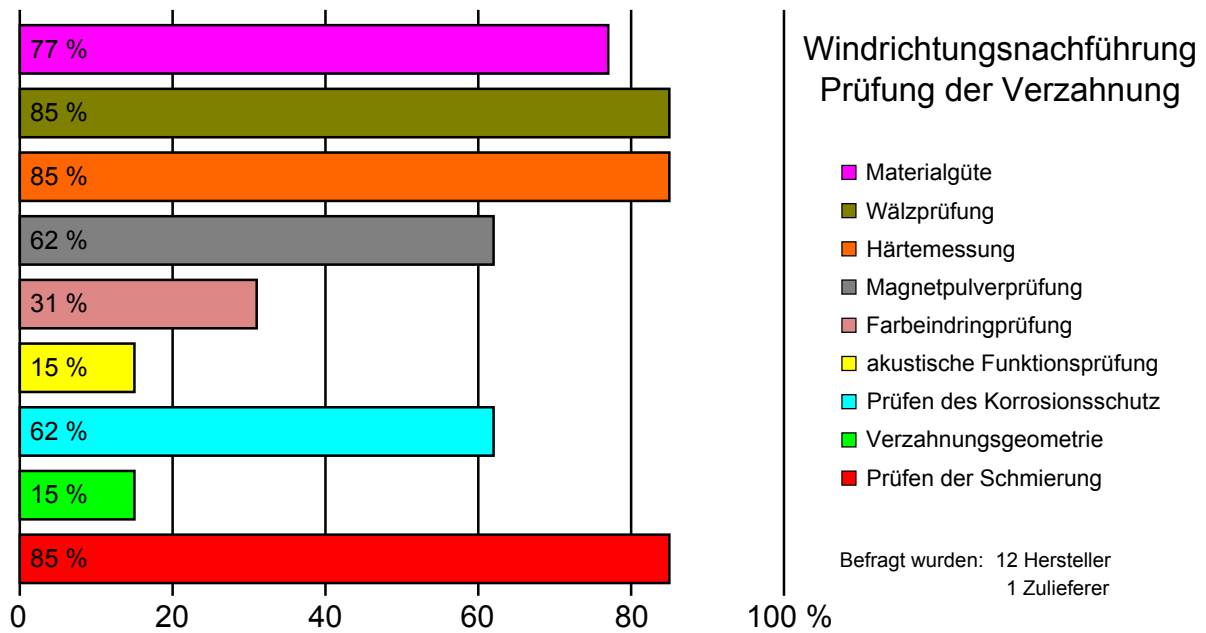


Abb. A.5: Prüfungen an verzahnten Bauteilen für die Windrichtungsnachführung

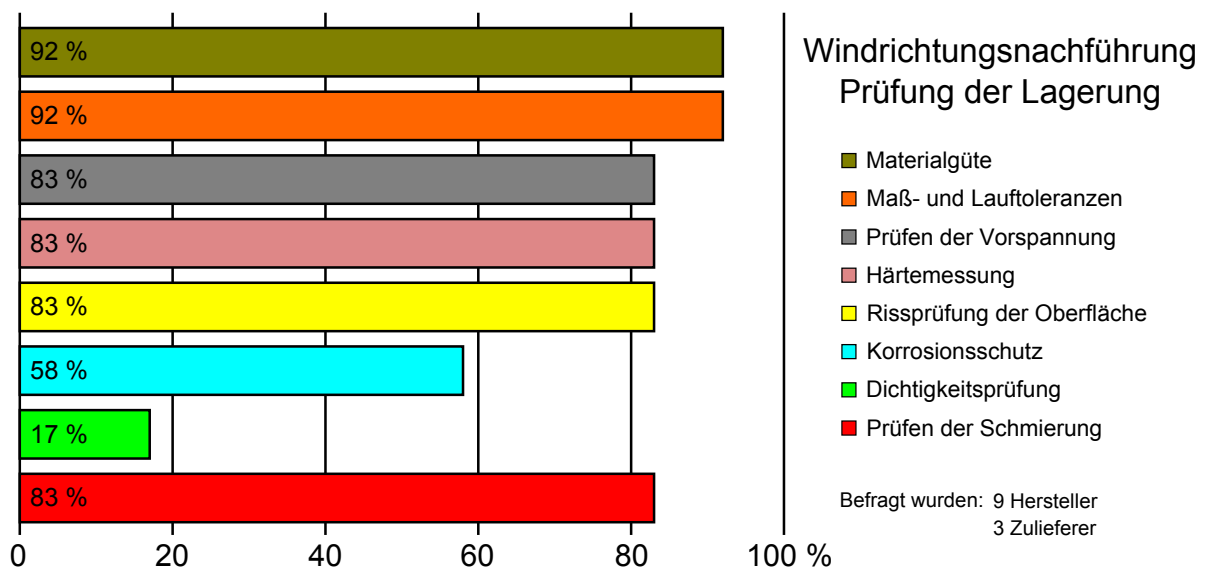


Abb. A.6: Prüfungen am Lager der Windrichtungsnachführung

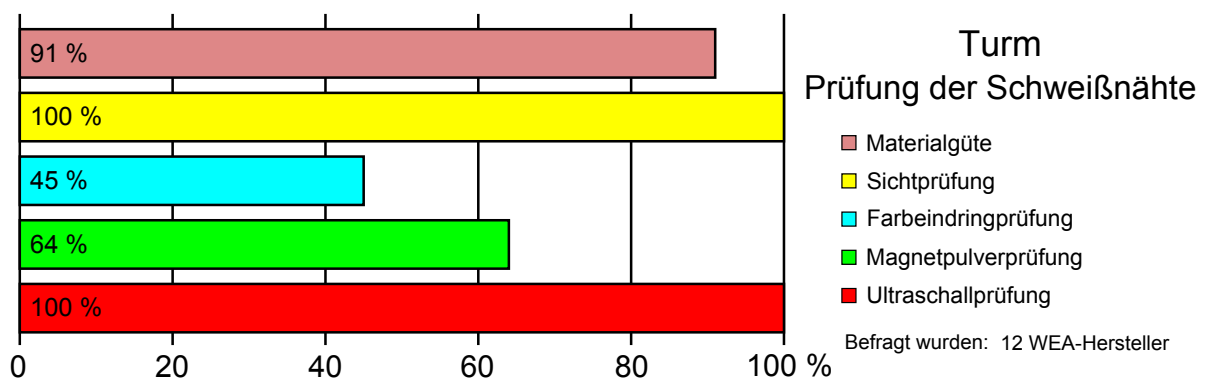


Abb. A.7: Prüfungen an Schweißnähten am Turm

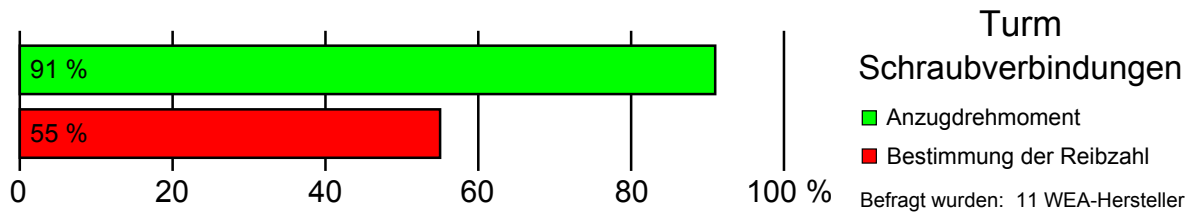


Abb. A.8: Prüfungen an Schraubverbindungen am Turm

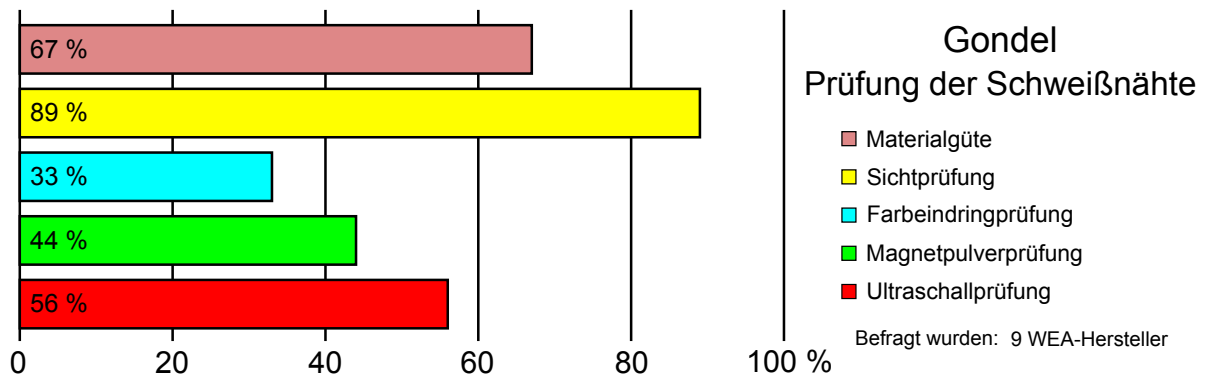


Abb. A.9: Prüfungen an den Schweißnähten der montierten1 Gondel

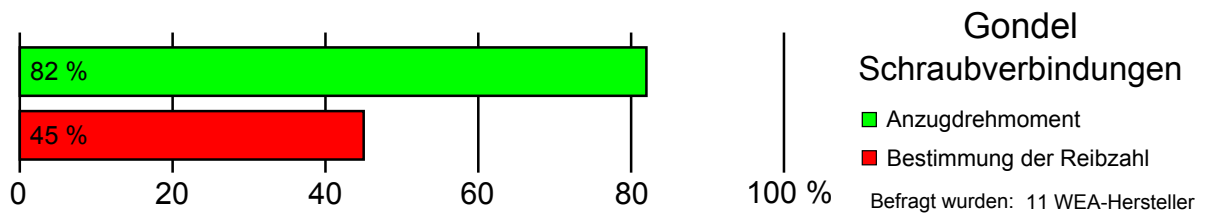


Abb. A.10: Prüfungen an Schraubverbindungen an der montierten2 Gondel

## Literaturverzeichnis

- [1] Norm IEC WT 01 04 2001. *IEC System for Conformity Testing and Certification of Wind Turbines - Rules and procedures*
- [2] Norm IEC 61400-22 05 2010. *Wind turbines – Part 22: Conformity testing and certification*
- [3] ABB AG: *Medium voltage for wind power - PCS 6000 full-scale converters up to 9 MVA*
- [4] ABB AG: *Wind turbine generators - New standard slip ring generator series for the doubly-fed 1.5-2MW turbines.* – <http://www.abb.de/product/ge/9AAC100348.aspx?country=DE>, 25.08.2010
- [5] ALISTER DOYLE: *Offshore wind turbines may be 10 MW giants: Veritas.* – <http://www.reuters.com/article/idUSTRE62S2ZP20100329>, 29.03.2010
- [6] BETZ, Albert: *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen.* Göttingen : Vandenhoeck und Ruprecht, 1926
- [7] BOSCH-REXROTH AG: *Hauptgetriebe für Windenergieanlagen REDULUS GPV.* – <http://www.boschrexroth.de/mobile-hydraulics-catalog/Vornavigation/VorNavi.cfm?Language=DE&PageID=m3844>, 25.08.2010
- [8] BOSCH-REXROTH AG: *Pitch- und Azimutantriebe MOBILEX GFB.* – <http://www.boschrexroth.com/mobile-hydraulics-catalog/Vornavigation/Vornavi.cfm?Language=DE&PageID=m3848>, 25.08.2010
- [9] BOSCH-REXROTH AG: *Pitch- und Azimutantriebe MOBILEX GFB.* – <http://www.boschrexroth.com/mobile-hydraulics-catalog/Vornavigation/Vornavi.cfm?Language=DE&PageID=m3848>, 25.08.2010
- [10] FRANZ GRAF: *Wie zuverlässig sind Windkraft-Getriebe?* In: *Antriebs-Praxis* (2008), 01
- [11] FRAUNHOFER INSTITUT FÜR WINDENERGIE UND ENERGIESYSTEMTECHNIK - IWES: *Kompetenzzentrum Gondel.* – <http://www.iwes.fraunhofer.de/abteilungen/antriebsstrang/>, 14.10.2010
- [12] FRAUNHOFER INSTITUT FÜR WINDENERGIE UND ENERGIESYSTEMTECHNIK - IWES: *Kompetenzzentrum Rotorblatt.* – <http://www.iwes.fraunhofer.de/labore/rotorblatt/>, 27.09.2010
- [13] FRAUNHOFER WKI: *Inspektion von Rotorblättern mit Wärmefluss-Thermographie.* – [http://www.wki.fraunhofer.de/projekte/wki\\_pmt\\_rotorblatt-inspektion.html](http://www.wki.fraunhofer.de/projekte/wki_pmt_rotorblatt-inspektion.html), 25.08.2010
- [14] HAU, Erich: *Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit.* 5. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. – ISBN 978-3-540-72150-5
- [15] INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIEVERSORGUNGSTECHNIK (ISET): *Windenergie Report Deutschland 2008.* – Stefan Faulstich, Michael Durstewitz, Berthold Hahn, Kaspar Knorr, Kurt Rohrig



- 
- [16] KALTSCHMITT, Martin ; STREICHER, Wolfgang ; WIESE, Andreas (.: *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2006. – ISBN 978-3-540-28204-4
- [17] MEUSELWITZ GUSS EISENGIESSEREI GMBH: *Produkte mit Einsatz in der Energietechnik*. – <http://www.meuselwitz-guss.de>, 25.08.2010
- [18] NSK MOTION AND CONTROL: *Produkte für die Windindustrie - Pitch und Yaw-Getriebe*. – [http://www.nskeurope.de/cps/rde/xchg/eu\\_de/hs.xsl/windindustrie.html](http://www.nskeurope.de/cps/rde/xchg/eu_de/hs.xsl/windindustrie.html), 29.10.2010
- [19] STARKSTROM-GERÄTEBAU GMBH: *Gießharztransformatoren*. – <http://www.sgb-trafo.de/de/ghtinfo.aspx>, 25.08.2010
- [20] TONY ZECH - FOTOGRAFIE: *Technik extrem - das längste Rotorblatt der Welt*. – <http://www.fotocommunity.de/pc/pc/display/18632950>, 09.01.2010
- [21] WIKIPEDIA: *Enercon*. – <http://de.wikipedia.org/wiki/Enercon>, 10.08.2010
- [22] WIKIPEDIA: *Geschichte der Windenergienutzung*. – [http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte\\_der\\_Windenergienutzung](http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Windenergienutzung), 10.08.2010
- [23] WIKIPEDIA: *Planetengertriebe*. – <http://de.wikipedia.org/wiki/Planetengertriebe>, 10.08.2010
- [24] WIKIPEDIA: *Poul la Cour*. – [http://http://de.wikipedia.org/wiki/Poul\\_la\\_Cour](http://http://de.wikipedia.org/wiki/Poul_la_Cour), 10.08.2010
- [25] WIKIPEDIA: *Windkraftanlage*. – <http://de.wikipedia.org/wiki/Windkraftanlage>, 10.08.2010
- [26] WIKIPEDIA: *Windpark*. – <http://de.wikipedia.org/wiki/Windpark>, 10.08.2010
- [27] WIKIPEDIA: *Yaw system*. – [http://en.wikipedia.org/wiki/Yaw\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Yaw_system), 10.08.2010
- [28] ZF SERVICES DEUTSCHLAND GMBH - WIND ENERGY SERVICE: *Kompetenzzentrum Gondel*. – <http://www.zf.com/corporate/de/products/services/windenergy/windenergy.html>, 13.10.2010