

ZUVERLÄSSIGKEIT, WARTUNG UND BETRIEBSKOSTEN VON WINDKRAFTANLAGEN
AUSWERTUNGEN DES WISSENSCHAFTLICHEN MESS- UND EVALUIERUNGSPROGRAMMS (WMEP)

Berthold Hahn
 Institut für Solare Energieversorgungstechnik
 Verein an der Universität Kassel e. V.
 Königstor 59, 34119 Kassel, Germany
 Tel.: ++49 561 7294-329, Fax: ++49 561 7294260
 bhahn@iset.uni-kassel.de

Belastbare Aussagen über die Zuverlässigkeit von Windkraftanlagen und die während des Betriebs entstehenden Kosten können erst nach vielen Betriebsjahren einigermaßen sicher getroffen werden. Die „250 MW Wind“ Fördermaßnahme der deutschen Bundesregierung wird von einem „Wissenschaftlichen Mess- und Evaluierungsprogramm“ begleitet, das die technischen und finanziellen Betriebserfahrungen der geförderten Anlagen untersucht. Die ersten Windkraftanlagen wurden 1989 in dieses Programm aufgenommen, so dass inzwischen für rund 1.500 Anlagen Erfahrungen über mehrere Betriebsjahre vorliegen. Der folgende Beitrag zeigt, wie zuverlässig die Windkraftanlagen prinzipiell sind und wie sich ihre technische Verfügbarkeit im Laufe des Betriebs entwickelt. Die Aufmerksamkeit gilt darüber hinaus den Maßnahmen, die für Wartung und Instandsetzung der Anlagen ergriffen werden, und den im Betrieb entstehenden Kosten für Instandhaltung und Versicherung. Eine umfangreich, jährlich aktualisierte Auswertung der Betriebserfahrungen mit den geförderten Windkraftanlagen erscheint in der ISET-Schriftenreihe /1/.

1 EINLEITUNG

Mit dem zügigen Ausbau der Windenergienutzung in Deutschland in den letzten 15 Jahren fand auch eine umfangreiche technische Weiterentwicklung der Windkraftanlagen (WKA) statt. Die eingesetzte Technik hat ein solches Qualitätsniveau erreicht, dass die Windkraftanlagen eine technische Verfügbarkeit von etwa 98 % erreichen (Abb. 1).

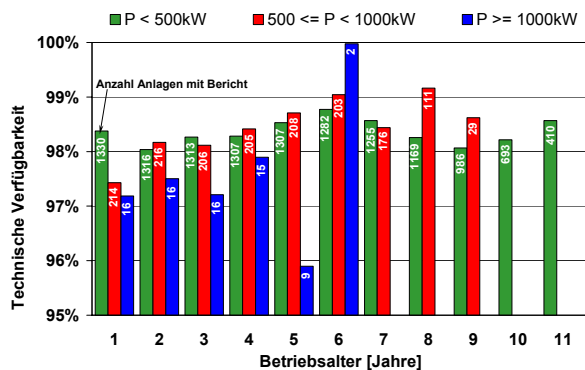


Abb. 1: Die Technische Verfügbarkeit der WKA im WMEP

Das bedeutet, dass eine WKA durchschnittlich rund eine Woche pro Jahr für Wartungen oder Reparaturen stillgesetzt wird. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Anlagen über Jahre hinweg praktisch ununterbrochen und ohne Betriebspersonal im Einsatz sind, ist dies eine geringe Ausfallzeit. Der Frage, ob diese Zuverlässigkeit auch nach längerer Betriebszeit zu erwarten ist und welche Betriebskosten anfallen, wird im Folgenden nachgegangen.

2 DATENGRUNDLAGE DER AUSWERTUNGEN

Mit der „250 MW Wind“-Fördermaßnahme der Bundesregierung werden bzw. wurden über 1.500 WKA mit vielfältigen technischen Konzepten und in vielen verschiedenen Regionen Deutschlands finanziell gefördert (vgl. /1/). Die Betreiber dieser geförderten WKA berichten im Rahmen des vom Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) durchgeführten wissenschaftlichen Begleitprogramms (WMEP) regelmäßig über Energieerträge, Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen sowie Betriebskosten.

Auf vorbereiteten Formularen für Wartungen und Instandsetzungen geben die Betreiber u. a. den Ausfallzeitraum, die ggf. beschädigte Komponente und - soweit möglich - Ursache und offensichtliche Auswirkungen auf Anlage und Betrieb an. Bis heute gingen dem ISET über 50.000 Wartungs- und Instandsetzungsberichte zu.

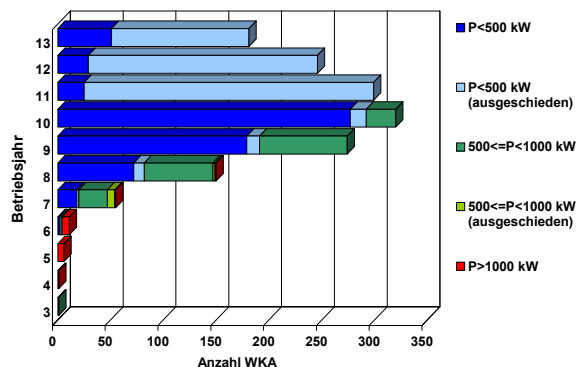


Abb. 2: Altersverteilung der im WMEP beobachteten WKA

Nach zehn Betriebsjahren erlischt die Verpflichtung der geförderten Betreiber zur Berichterstattung gegenüber dem WMEP, so dass die meisten der Anlagen zu diesem Zeitpunkt aus dem wissenschaftlichen Programm ausscheiden. Eine kleinere Anzahl engagierter Betreiber berichtet aber freiwillig über diesen Zeitpunkt hinaus weiter, so dass für einige Anlagen bereits Erfahrungen aus mehr als zwölf Betriebsjahren vorliegen. Aus technischen Gründen konnten diese Erfahrungen in die vorliegende Auswertung aber teilweise noch nicht einfließen.

Im Durchschnitt haben die bis Ende 2002 im Programm verbliebenen Anlagen knapp 9 Betriebsjahre absolviert. Die Altersstruktur der WKA im WMEP ist Abb. 2 zu entnehmen.

3 WARTUNG UND WIEDERKEHRENDE PRÜFUNG

Um Schäden und Folgeschäden von vornherein möglichst weitgehend zu vermeiden, werden von den Herstellern Wartungspflichtenhefte erstellt, die die Überprüfung und gegebenenfalls den Austausch von Verschleißteilen und besonders gefährdeten Bauteilen in regelmäßigen Intervallen vorschreiben. Zu den Kontrollmaßnahmen gehören in der Regel folgende Überprüfungen:

- Bremsfunktion und Verschleiß der Bremsbeläge
- Vorspannung von Verschraubungen
- Schmierung von offenen Verzahnungen
- Getriebeölstand und -verschleiß
- Wechsel von Filtern
- Kontrolle des Korrosionsschutzes
- Visuelle Kontrolle der Maschine

Diese Wartungsmaßnahmen werden meistens von Service-Teams des Anlagen-Herstellers übernommen, es werden aber auch vom Hersteller unabhängige Wartungsfirmen beauftragt. Da konstruktionsbedingt einige Kontrollen häufiger durchgeführt werden müssen als andere sind typischerweise für die verschiedenen Maßnahmen auch unterschiedliche Intervalle vorgesehen, z. B.:

- Wartung A: nach x Betriebsstunden
- Wartung B: halbjährlich
- Wartung C: jährlich
- Wartung D: alle zwei Jahre
- Wartung E: alle fünf Jahre

So ist es gewährleistet, dass alle regelmäßig gewarteten Anlagen in beispielsweise halbjährlichen Rhythmus in Augenschein genommen werden und kleinere oder sich anbahnende Schäden erkannt und frühzeitig behoben werden können.

Des Weiteren ist durch entsprechende Formulierungen in den Typenprüfungen für praktisch alle WKA eine regelmäßige wiederkehrende Prüfung durch einen Sachverständigen vorgeschrieben. Diese Überprüfungen stellen eine Art unabhängige Kontrolle der Wartungs-

und Instandsetzungsmaßnahmen dar und sollen insbesondere sicherheitsrelevante Schäden aufdecken.

Trotz aller Aufwendungen treten von Zeit zu Zeit Betriebsstörungen und Schäden an den WKA auf. Zur Minimierung von Schäden und Stillstandzeiten sind kurze Reaktionszeiten der Service-Teams und eine gute Ersatzteilbevorratung von großer Wichtigkeit. Auch aus diesem Grund sind die meisten WKA mit einer Überwachungsfunktion ausgestattet, die entdeckte Störungen direkt, z. B. per Fax, an den technischen Betriebsführer meldet. In letzter Zeit durchgeführte Umfragen bei den Betreibern von WKA lassen allerdings darauf schließen, dass auch größere Hersteller trotzdem zunehmende Schwierigkeiten, einen zuverlässigen und schnellen Service aufzubauen (vgl. /2/).

4 BETRIEBSUNTERBRECHUNGEN AUFGRUND VON STÖRUNGEN

Die protokollierten Stillstandzeiten der WKA werden teils durch die beschriebenen planmäßigen Wartungsarbeiten, teils durch nicht vorhersehbare Störfälle verursacht. Die folgenden Auswertungen beziehen sich nur auf diese unplanmäßigen Störfälle, die zu etwas mehr als der Hälfte durch Schäden an elektrischen und elektronischen Komponenten hervorgerufen werden (Abb. 3). Die großen Hauptkomponenten Rotorblätter, Getriebe und Generator fallen aufgrund ihrer Schadenshäufigkeit nicht besonders auf, dagegen sind die elektrische Anlage in der WKA (ohne Generator) und die elektronische Betriebsführung besonders anfällig. Auch die Hydraulikanlage und die Sensorik fallen auf.

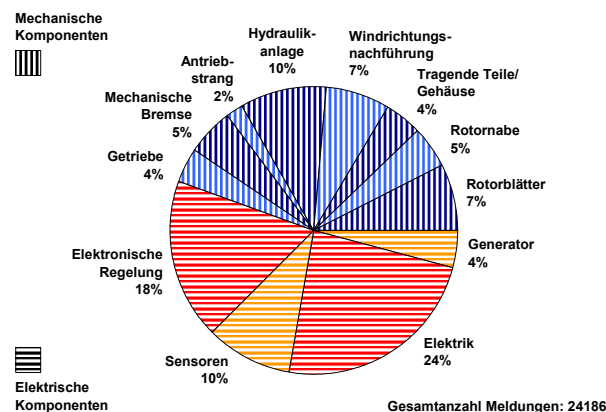


Abb. 3: Anteile der betroffenen Hauptkomponenten an der Gesamtzahl der Schäden

Die Schwere der Schäden ist aber durch die reine Häufigkeit nicht vollständig beschrieben. Vielmehr müssen die Häufigkeit der Schadensfälle, die verursachten Ausfallzeiten und die Instandsetzungskosten verknüpft werden, um die Zuverlässigkeit der Komponenten zu bewerten. Da oftmals Schäden an mehreren Komponenten gleichzeitig eintreten bzw. nur die jährlichen Instandsetzungskosten bekannt sind, lassen sich im Rahmen des WMEP vor allem die Kosten nicht sauber auf die betroffenen Komponenten aufteilen. Deshalb

werden hier zur Einschätzung nur Schadenshäufigkeit und Ausfallzeiten betrachtet.

Die durch Schäden verursachten Ausfallzeiten sind jeweils abhängig vom notwendigen Reparaturaufwand, von der Verfügbarkeit der Ersatzteile und von den Personalkapazitäten der Serviceteams. Vor allem die Instandsetzungen an den Komponenten in der Gondel, Generator (vgl. /3/), Triebstrang, Nabe, Getriebe und Blätter, verursachten in der Vergangenheit oft Ausfallzeiten von bis zu mehreren Wochen. Abb. 4 zeigt für jede Hauptkomponente die durchschnittlich verursachte Ausfallzeit pro Schadensfall.

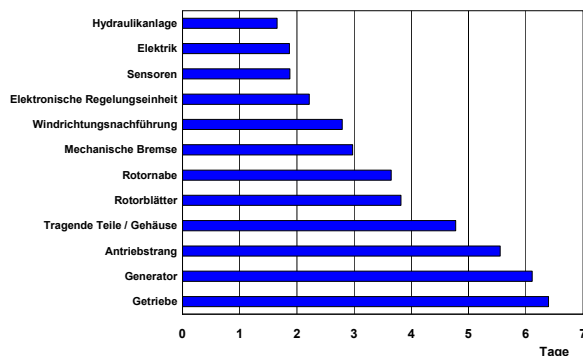


Abb. 4: Durchschnittliche Ausfallzeiten je Schadensfall

Wie bereits erwähnt, fallen Komponenten wie Elektronische Regelungseinheit, Elektrik oder auch Hydraulikanlage durch relativ hohe Ausfallraten auf. Andererseits werden diese Störungen relativ schnell innerhalb von ein bis zwei Tagen wieder behoben.

Aus der Verknüpfung von Häufigkeiten und Stillstandzeiten ergibt sich nun eine Möglichkeit, die Zuverlässigkeit der WKA etwas differenzierter zu betrachten.

Aus Abb. 5 ergibt sich, dass Schäden an der Elektrik für eine insgesamt nur etwa dreimal so lange Stillstandzeit sorgen wie Schäden am Triebstrang, während ihre reine Häufigkeit mehr als zehnmal so groß ist. Dennoch sorgen Schäden an der Elektrik und an der Anlagenregelung für den mit Abstand größten Anteil an der durchschnittlichen jährlichen Stillstandzeit.

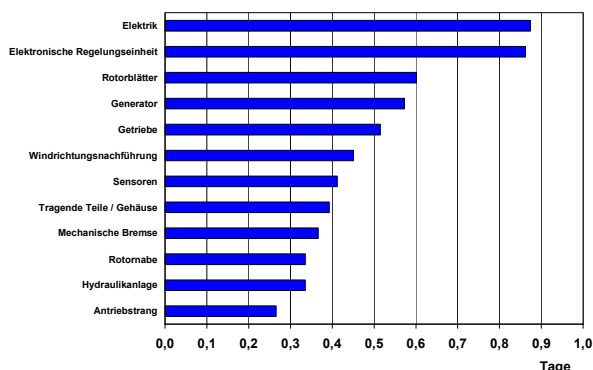


Abb. 5: Durchschnittliche jährliche Stillstandzeit einer WKA aufgrund der mittleren Häufigkeit von Schäden und der verursachten Ausfallzeiten

Natürlich können die Instandsetzungskosten bei der Bewertung eigentlich nicht vernachlässigt werden. Hinsichtlich der reinen Zuverlässigkeit und technischen Verfügbarkeit wird aber schon deutlich, dass Verbesserungen an Elektrik und Elektronik vordringlich sind. Insbesondere an schlecht zugänglichen Einsatzorten, wie z.B. bei der geplanten Offshore-Anwendung, können Stillstandzeiten große finanzielle Einbußen bedingen.

5 SCHADENSHÄUFIGKEIT UND ANLAGENALTER

Die meisten in Deutschland errichteten WKA wurden von ihren Konstrukteuren für Betriebsdauern von 20 Jahren ausgelegt. Da bis heute praktisch keine so langjährigen Betriebserfahrungen vorliegen, kann über die tatsächlich zu erwartende Lebensdauer noch keine Aussage getroffen werden.

Eine nachlassende Zuverlässigkeit mit zunehmendem Betriebsalter könnte aber schon heute Hinweise auf gravierende Abweichungen von der konstruktiv angestrebten Lebensdauer und den möglicherweise steigenden Aufwand zur Instandhaltung geben.

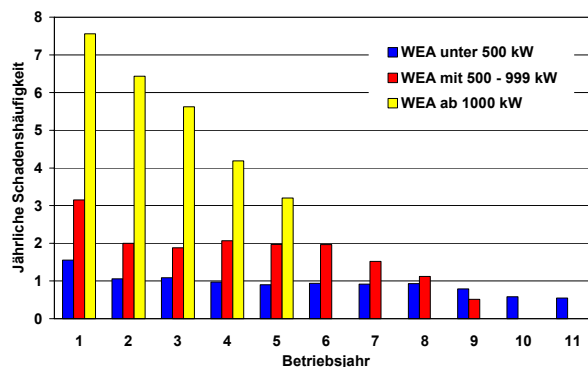


Abb. 6: Schadenshäufigkeit mit zunehmendem Anlagenalter

In Abb. 6 sind deshalb die Schadenshäufigkeiten (Anzahl von Schäden je Zeiteinheit) der WKA in Abhängigkeit von ihrem Betriebsalter dargestellt.

Es wird deutlich, dass die Schadenshäufigkeit der WKA mit zunehmendem Betriebsalter abnimmt. Dies gilt für alle drei Leistungsklassen, wobei die größeren Anlagen erheblich häufiger repariert werden mussten als die älteren kleineren WKA. Ab dem zweiten Betriebsjahr erreichen die Anlagen der beiden Leistungsklassen unter 1.000 kW für mehrere Jahre eine nahezu konstante Schadenshäufigkeit von einem bzw. zwei Schäden im Jahr. Die großen Anlagen der Megawatt-Klasse sind dagegen deutlich störungsanfälliger. Hier werden – allerdings mit deutlich sinkender Tendenz – in den ersten fünf Betriebsjahren mehr als drei Schäden im Jahr registriert.

Es ist zu beachten, dass sich in Abb. 6 die Zusammensetzung der betrachteten Anlagen von Säule zu Säule ändert. Alle Anlagen haben das erste Betriebsjahr bereits absolviert, während über viel weniger der Anlagen bereits Betriebserfahrungen aus späteren Betriebsjahren vorliegen. Das bedeutet, dass die sich

jahren vorliegen. Das bedeutet, dass die sich heute ergebenden Schadenshäufigkeiten für WKA z. B. im achten Betriebsjahr zukünftig mit den noch zu ermittelnden Daten weiterer Anlagen ändern werden.

6 BETRIEBSKOSTEN

Der größte Anteil der Stromgestehungskosten aus Windenergie wird durch die vergleichsweise hohen Investitionskosten verursacht. Aber auch die laufenden Kosten während des Betriebs, die sich bei 20 Jahren Lebensdauer größenordnungsmäßig auf ein Drittel der Gesamtkosten addieren können, spielen eine wichtige Rolle. In den folgenden Auswertungen zu Betriebskosten wurden sehr individuell entstehende „Betriebsführungskosten“, „Kosten für den Mühlenwart“ u. ä. sowie Steuern und Strombezugskosten nicht berücksichtigt.

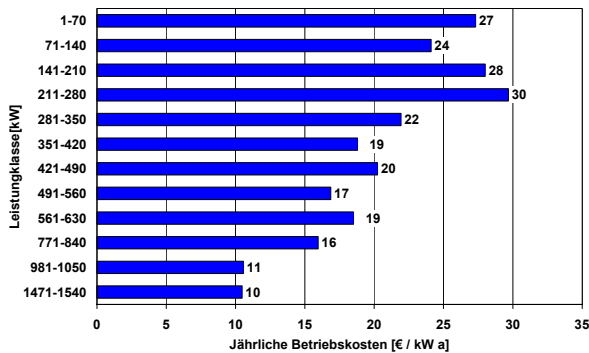


Abb. 7: Spezifische jährliche Betriebskosten je Kilowatt Nennleistung aller über zwei Jahre alten Anlagen im WMEP seit 1993 in Abhängigkeit von der Anlagengröße

Erwartungsgemäß liegen die leistungsspezifischen Betriebskosten für die Anlagen ab 1.000 kW deutlich niedriger (s. Abb. 7) als bei den kleinen Anlagen. Vor allem die spezifischen Kosten für Wartung und Instandsetzung variieren stark mit der Größe der Anlagen. Dies hängt u. a. damit zusammen, dass die in Kapitel 3 beschriebenen Maßnahmen sehr arbeitsintensiv und aufgrund dieser Arbeitskosten nicht proportional mit der Anlagengröße wachsen.

In einer etwas groberen Klasseneinteilung als in Abb. 8 die Betriebskosten nach „Instandhaltung“ (Kosten für Wartungsverträge und Instandsetzungen), „Versicherung“ (Kosten für Haftpflicht-, Maschinenschaden- sowie Betriebsausfallversicherung) und „Andere“ (Kosten für Pacht, Gebäude- und Rechtsschutzversicherung, IHK-Beiträge und anderes) untergliedert. Während bei den älteren kleineren WKA die Instandhaltungskosten zwei Drittel der Betriebskosten ausmachen, sind es bei den Anlagen zwischen 500 und 1.000 kW weniger als die Hälfte und bei der Megawatt-Klasse nur noch etwa ein Viertel der Betriebskosten.

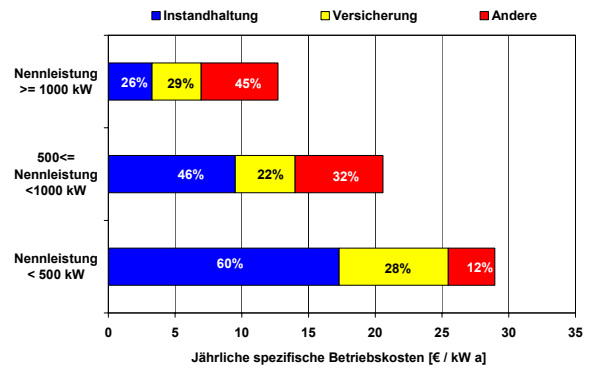


Abb. 8: Aufteilung der spezifischen jährlichen Betriebskosten je Kilowatt Nennleistung aller über zwei Jahre alten Anlagen im WMEP seit 1993 nach Kostenarten

Ähnlich wie die Zuverlässigkeit der WKA in Abhängigkeit ihres Betriebsalters ist natürlich die Entwicklung der jährlichen Betriebskosten mit zunehmendem Anlagenalter von Interesse. Abb. 9 gibt die Verhältnisse für die Anlagen im WMEP wieder.

Für die beobachteten Anlagen kann festgehalten werden, dass nach Ablauf der Garantiezeit vor allem die Kosten für Reparaturen ansteigen. Der über den Zeitraum mehrerer Jahre wachsende Reparaturkostenanteil kann durch die unterschiedlich langen von den verschiedenen Herstellern gewährten Garantiezeiten erklärt werden.

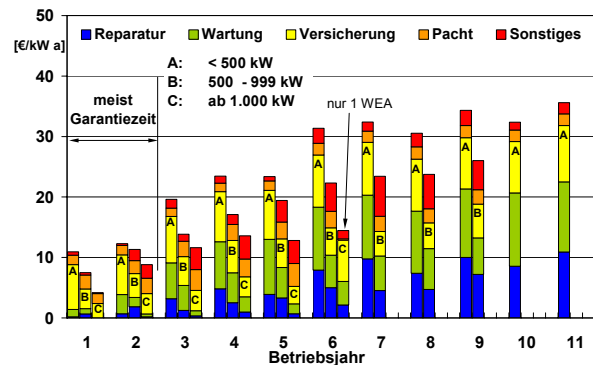


Abb. 9: Auf die Nennleistung der Anlagen bezogene jährliche Betriebskosten. Steuern, Geschäftsführungskosten und Strombezugskosten sind in der Darstellung nicht enthalten.

Nach dem Ablauf der unterschiedlich langen Garantiezeiten bleiben die Reparaturkosten für Anlagen unter 500 kW für mehrere Jahre nahezu konstant. Die Betriebskosten (wiederum ohne Geschäftsführungskosten, Strombezugskosten und Steuern) betragen - bezogen auf die Nennleistung der jeweiligen Anlage - ab dem sechsten Betriebsjahr rund 35 €/kW. In der Leistungsklasse 500 bis 999 kW stiegen die Kosten auf rund 25 €/kW ab dem sechsten Betriebsjahr und liegen damit deutlich niedriger als bei den kleineren Anlagen. Auch fällt der Anstieg der Kosten nach Ablauf der Garantiezeit moderater aus. Bei den Anlagen der Megawatt-Klasse liegen die leistungsspezifischen Betriebskosten

wiederum deutlich niedriger, nämlich bei knapp 15 €/kW im Jahr.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Nachdem die ältesten Windkraftanlagen im WMEP, deren Betriebserfahrungen zum jetzigen Zeitpunkt ausgewertet werden können, seit nunmehr über 12 Jahren in Betrieb sind, können über Zuverlässigkeit und Betriebskosten der Windkraftanlagen in der ersten Hälfte der erwarteten Lebensdauer von 20 Jahren relativ zuverlässige Aussagen getroffen werden.

Aufgrund der Ausfallzeiten durch Schäden und Wartungsmaßnahmen erreichen die Windkraftanlagen im Durchschnitt eine technische Verfügbarkeit von etwa 98 %.

Die Schadenshäufigkeit liegt bei den älteren Anlagen unter 500 kW bei einem Schaden, bei den WKA unter 1.000 kW bei zwei Schäden und bei den Megawatt-Anlagen bei mehr als drei Schäden pro Jahr – mit weiterhin sinkender Tendenz.

Etwas mehr als die Hälfte der Schäden betreffen elektrische und elektronische Komponenten. Diese Schäden sind offenbar weniger gravierend, da die Anlagen nach kurzer Ausfallzeit wieder in Betrieb gehen können. Dennoch wirkt sich die Häufigkeit dieser Störfälle stark negativ auf die technische Verfügbarkeit aus, was im Falle der geplanten Offshore-Anwendung eine besondere Bedeutung erlangen würde.

Die Entwicklung der Betriebskosten wird insbesondere durch die Kosten für Instandhaltungsmaßnahmen geprägt. Sie steigen naturgemäß nach Ablauf der Garantiezeit deutlich an und erreichen je nach Anlagengröße unterschiedliche spezifische Werte. Bei den kleineren Anlagen liegen sie etwa bei jährlichen 35 €/kW, bei den Megawatt-Anlagen eher bei 15 €/kW.

Ein signifikanter Anstieg der Schadenshäufigkeiten und Betriebskosten ist bis zum Beginn der zweiten Hälfte der vorgesehenen Lebensdauer von 20 Jahren noch nicht zu erkennen.

Aufgrund mangelnder Erfahrungen und aufgrund der relativ kleinen Stichprobe der ältesten im WMEP erfassten Anlagen ist eine Prognose der weiteren Entwicklung schwierig. Allerdings sind die Entwicklungen von Zuverlässigkeit und Betriebskosten der unterschiedlichen WKA-Leistungsklassen - trotz unterschiedlicher absoluter Zahlenwerte - ähnlich und vom Prinzip her auch aus anderen Technikbereichen bekannt. Daher ist mit einiger Wahrscheinlichkeit für alle Windkraftanlagen nach der Behebung anfänglicher Schwierigkeiten mit einer längeren Periode gleichmäßig niedriger Ausfallraten und relativ konstanter Betriebskosten zu rechnen, die nach heutiger Sicht noch deutlich in die zweite Lebensdauershälfte hinein andauern.

LITERATUR

- /1/ M. Durstewitz, C. Enßlin, B. Hahn, M. Hoppe-Kilpper, K. Rohrig
Windenergie Report Deutschland 2002
ISET, Kassel, 2002
- /2/ C. Hinsch
Schattenseite eines rasanten Wachstums –
BWE-Umfrage zu Serviceleistungen
Neue Energie Nr.1, Januar 2003,
- /3/ M. Durstewitz, R. Wengler
Analyses of Generator Failure of Wind Turbines in Germany's „250 MW Wind“ Programme
ISET, Kassel, 1998, Study