Rotorblattversagen – Gefährdungsanalyse für die Umgebung einer Windenergieanlage

Thomas Hahm, Jürgen Kröning
TÜV Nord e.V., Hamburg, Germany

Zusammenfassung

Die Flugbahnen von Blattbruchstücken einer pitch-geregelten Windenergieanlage mit 77m Rotordurchmesser wurden auf der Basis detaillierter Daten berechnet. Einzelne Bruchstücke erreichen Flugweiten von etwa 600m. In verschiedenen Fallstudien wurden die Haupteinflussparameter variiert und jeweils 153 000 Flugbahnen ausgewertet. Darauf aufbauend wurde die Auftreffwahrscheinlichkeit auf ein 50×20m großes Gebiet und damit die Schadenshäufigkeit ermittelt. Das resultierende Risiko ergibt sich aus dem Produkt von Schadenshäufigkeit und Schadenshöhe. Letzteres erfordert eine detaillierte Analyse möglicher Schadensszenarien. Zur Bewertung des Risikos wird das Prinzip der minimalen endogenen Sterblichkeit herangezogen. Anhand eines einfachen Beispieles wird das grundsätzliche Vorgehen erläutert. Während im Falle angrenzender Wohnbebauung die üblichen Einschränkungen durch Schattenwurf, Lärmpegel etc. in der Regel Abstände vorgeben, bei denen das Risiko durch Rotorblattversagen vernachlässigbar ist, kann das Risiko bei angrenzenden Industrieanlagen und stark frequentierten Verkehrswegen durchaus von Bedeutung sein.

1. Einleitung

Windenergieanlagen erreichen Blattspitzengeschwindigkeiten von ca. 80m/s. Das einzelne Blatt einer Multi-Megawatt-Anlage wiegt mehrere Tonnen. Die in der Anlage gespeicherte kinetische Energie stellt eine potentielle Gefährdung für die Umgebung dar, wenn infolge eines Rotorblattversagens das Blatt oder ein Teil davon abreißt.

Abb.1: Rotorblattbruch. Abbruch eines ca. 30m langen Blattfragmentes in Dörenhagen bei Paderborn. Quelle: Neue Westfälische, Ausgabe OWL, März 2002.

Der TÜV Nord e.V. wurde in den vergangenen Jahren wiederholt beauftragt, das auftretende Gefährdungspotential durch Rotorblattversagen zu bewerten. Im Folgenden wird das Verfahren, das im Zuge dieser Fragestellung entwickelt wurde, sowie Berechnungsergebnisse vorgestellt.

2. Modellbeschreibung

Das Modell basiert auf den Berechnungsmethoden, wie sie zur Lastermittlung von Windenergieanlagen im TÜV-eigenen Programmsystem aber auch in vergleichbaren Programmen (Flex, Bladed) eingesetzt werden.

Grundlage bildet die Darstellung der Geometrie und Aerodynamik des Rotorblattes auf einer endlichen Anzahl von Profilschnitten. Profiltiefe und –dicke, spezifisches Gewicht sowie die aerodynamischen Kennwerte für alle Anströmwinkel werden auf jedem Profilschnitt vorgegeben. Als Referenzanlage dient eine pitch-geregelte Windenergieanlage (WEA) mit 77m Rotordurchmesser, 80m Nabenhöhe und einer maximalen Blattspitzengeschwindigkeit von 74m/s. Die Geometrie der Anlage ist auf 20 Profilschnitte definiert. Zur Beschreibung der Aerodynamik existieren 12 Profile, zwischen denen linear interpoliert wird.
Zu Beginn der Berechnung wird die Winkelposition des Blattes auf seinem Weg um die Rotordrehachse vorgegeben, wobei 0° die senkrechte Stellung nach oben bezeichnet. Aus der Anströmgeschwindigkeit des Windes werden mittels einer Kennlinie die Anlagenparameter Drehzahl und Pitchwinkel bestimmt. Anschließend wird die Bruchstelle festgelegt. Der Bruch wird als glatt angenommen und es wird unterstellt, dass keine Rückwirkungen auf die Flugbahn des Blattbruchstückes bestehen.
Die Bewegungsgleichung wird anschließend auf Basis der angreifenden Schwerkraft, der Wind- und Trägheitskräfte in Zeitschritten von 20msec gelöst, bis der Schwerpunkt des Blattbruchstücks den Boden erreicht.

3. Berechnungsergebnisse

3.1 Einzelereignis
Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Flugbahn eines größeren Blattbruchstückes.

Abb.2: Flugbahn eines Blattbruchstückes.

Die Einzelberechnung liefert neben der Flugweite auch Aussagen über die Schwerpunkts-geschwindigkeit, die Rotationsgeschwindigkeit sowie die Translations- und Rotationsenergie zum Zeitpunkt des Aufschlags.
Die Situation in Abbildung 2 zeigt die Flugbahn für eine Abwurfposition bei etwa 330°. Die rein ballistische Flugbahn ergäbe für die beiden möglichen 45°-Würfe bei 225° und 315° maximale Flugbahnen, wobei der größere Wert aufgrund der höheren Abwurfposition im zweiten Fall zu erwarten ist. Stellt man für sonst gleiche Ausgangsdaten die Abhängigkeit der Flugweite von der Winkelposition des Blattes dar, lassen sich die zwei Maxima erkennen (Abbildung 3.). Aufgrund der spezifischen Geometrie des Bruchstückes und der angreifenden Windkräfte liegen die optimalen Abwurfwinkel nicht bei den theoretischen rein ballistischen Werten.

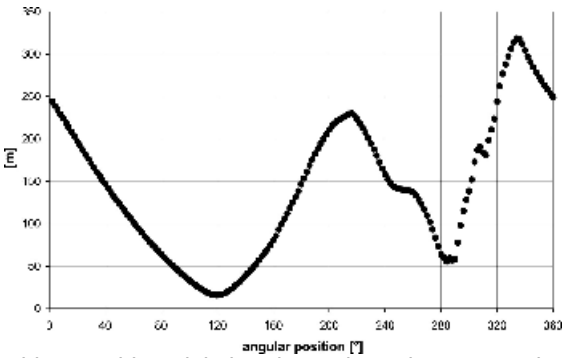

Abb.3: Abhängigkeit der Flugweite von der Winkelposition des Blattes zu Beginn des Bruchs.

3.2 Fallstudien
In mehreren Fallstudien wurden die drei Haupteinflussparameter Winkelposition des Blattes, Bruchposition und Windgeschwindigkeit variiert. Über die Windgeschwindigkeit werden gleichzeitig die Parameter Pitchwinkel und Drehzahl festgelegt. Die Variationsbreite beträgt:

- Winkelposition 0-360°, Δ=2°,
- Bruchstücklänge 2-34m, Δ=2m und
- Windgeschwindigkeit 2-25m/s, insgesamt 50 Windgeschwindigkeiten entsprechend der Häufigkeit einer Rayleigh-Verteilung mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von 7 m/s.

Damit ergeben sich in der Summe 153 000 Einzelereignisse, die als repräsentativ für eine Häufigkeitsverteilung der Auftreffpunkte gelten können. Abbildung 4 zeigt die Verteilung der Auftreffpunkte für die Referenzanlage. Die größten Flugweiten liegen bei etwa 600 m.

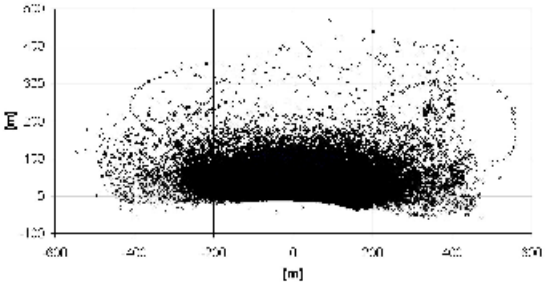

Abb.4: Auftreffpunkte für 153 000 Einzelereignisse. Standort der WEA im Koordinatenursprung. Windrichtung in positiver y-Achse.

In weiteren Fallstudien wurden die Anlagenparameter Turmhöhe, Blattspitzen-geschwindigkeit und Blattgewicht verändert. Im Einzelnen waren dies (mittlerer Wert entspricht jeweils dem Wert der Referenzanlage):

- Turmhöhe: 60, 80 und 100m,
- Blattspitzengeschwindigkeit: 65, 74 und 80m und
- Blattgewicht: 80%, 100% und 120% des Referenzblattes.

Zur Auswertung dieser Daten siehe Kapitel 4.

4. Risikostudie
In einer Studie des Instituts für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) in Kassel wurden 1144 WEA aus den Datenbeständen des Wissenschaftlichen Mess- und Evaluierungs-programms (WMEP) hinsichtlich Rotorblattversagen ausgewertet [1]. Die in die Bewertung aufgenommenen Schadensfälle wurden im Zweifelsfall immer hinsichtlich eines Blattabrisses gedeutet, so dass sich insgesamt eine konservative Einschätzung für die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Blattbruchs ergibt. Ermittelt wurde ein Wert von 10^{-2} pro Anlage und Jahr.
Unterstellt man für die in Kapitel 3 durchgeführten Fallstudien eine gleichverteilte Windrichtungs-häufigkeit, kann eine richtungsunabhängige Häufigkeit für die Flugweite abgeleitet werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Objekt von einem Bruchstück getroffen wird, ist dabei direkt abhängig von dessen räumlicher Ausdehnung.
Im Rahmen dieser Studie wird ein 50×20m großes Areal betrachtet. Die Wahrscheinlichkeit für einen Aufschlag ist in Abbildung 5 über den dimensionslosen Parameter D (Flugweite/ Rotordurchmesser) dargestellt. Man erkennt einen sehr steilen Abfall der Wahrscheinlichkeit im Bereich 0 bis 0,5D. Anschließend nähert sich die Kurve asymptotisch Null.

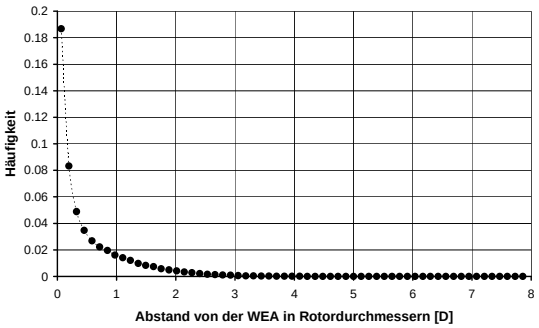

Abb.5: Wahrscheinlichkeit für den Aufschlag auf ein 50×20m großes Areal abhängig von der Entfernung zur WEA.

Zusammen mit der eingangs dargestellten Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Blattabriss, lässt sich damit die Auftreffhäufigkeit quantifizieren. Unterstellt man, dass im betrachteten Areal das Auftreffen eines Blattbruchstückes auch automatisch zu einem Schaden führt, dann kann die Auftreffhäufigkeit mit der Schadenshäufigkeit gleichgesetzt werden.
Das resultierende Risiko ergibt sich aus dem Produkt dieser Schadenshäufigkeit mit der Schadenshöhe. Letzteres erfordert eine detaillierte Analyse möglicher Szenarien, um die möglichen Auswirkungen (Sach- und Personenschäden) und deren Wahrscheinlichkeiten erfassen zu können.
Für eine Bewertung muss anschließend das tolerierbare Risiko festgelegt werden. In der Literatur findet sich das Konzept der minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM) [2]. Die endogene Sterblichkeit beschreibt das Risiko des Todes durch technologische Tatsachen. Dazu zählen die Risiken durch Sport, Heimwerker-Tätigkeiten, Arbeitsmaschinen oder Verkehr. Ausdrücklich ausgeschlossen sind Krankheit und angeborene Missbildungen. Die minimale endogene Sterblichkeitsrate beträgt in entwickelten Ländern 2×10^{-4} Todesfälle/Person/Jahr. Dies betrifft die Gruppe der 5 bis 15jährigen. Aus dem Postulat, dass die minimale endogene Sterblichkeit durch die Einführung einer neuen Technologie nicht nennenswert erhöht werden darf, wird gefordert, dass die Sterblichkeit aufgrund dieser Technologie nicht mehr als 10^{-5} Todesfälle/Person/Jahr betragen darf.
Betrachten wir als Beispiel wieder das Areal der Ausdehnung 50×20m und interpretieren dies als ein 50 m langes Autobahnstück. Mit der konservativen Abschätzung für den Eintritt eines Blattabrisses aus [1] und der Verteilung der Häufigkeiten aus Abb.5 ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für einen Schaden. Nehmen wir weiter an, dass es in der Folge zu einem Toten kommt, haben wir die Schadenshöhe festgelegt. In diesem Fall also 1 Todesfall. Das Produkt aus Schadenshöhe und Schadenshäufigkeit, also 1×Schadenshäufigkeit, muss die geforderte Wahrscheinlichkeit von 10^{-5} Todesfällen pro Anlage und Jahr unterschreiten. Dazu sind in den einzelnen Fallstudien aus Kapitel 3 folgende Abstände erforderlich:

	Abstand [D]
Referenzanlage	2,84
60 m Turm	2,73
100 m Turm	2,94
Leichtes Blatt	2,75
Schweres Blatt	2,95
Blattspitzengeschw. 65 m/s	2,64
Blattspitzengeschw. 80 m/s	2,96

Wie erwartet steigt der Mindestabstand mit größerer Turmhöhe. Aufgrund des höheren Impulses steigt der Mindestabstand ebenfalls mit größerer Blattspitzengeschwindigkeit bzw. Blattmasse.

Der ermittelte Mindestabstand ist stark von der Fläche abhängig für die der Einschlag eines Blattbruchstückes postuliert wird. Im Falle benachbarter Wohnbebauung resultieren aus den üblichen Einschränkungen durch Schattenwurf, Lärmpegel etc. in den meisten Fällen so große Abstände, dass das Risiko durch Rotorblattversagen vernachlässigt werden kann.
Zum Tragen kommt das Risiko in den Fällen, bei denen Richtlinien zum Lärmschutz oder Lärmpegel nicht in der genannten Form greifen oder bei denen die Schadenshöhe sehr hoch liegt. Dies kann zum Beispiel Industrieanlagen oder benachbarte stark frequentierte Verkehrswegen, wie z.B. Autobahnen, betreffen.

6. Nomenklatur

D Abstand in Rotordurchmessern der WEA
Δ Inkrement

7. Literatur

[1] Institut für Solare Energieversorgungstechnik; Datenbankrecherche über Schadensfälle mit abgerissenen Rotorblättern aus Datenbeständen des Wissenschaftlichen Mess- und Evaluierungsprogramms (WMEP); Kassel 1996.
[2] DIN EN 50126; Bahnanwendungen - Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS); Deutsches Institut für Normung e.V., März 2000.