



Faktencheck: Erosion an Rotorblättern

August 2024

1. Aus welchen Materialien bestehen Rotorblätter von Windenergieanlagen und wie werden sie hergestellt?

Rotorblätter bestehen überwiegend aus Faserverbundstoffen, die auch im Boots-, Segel- und Kleinflugzeugbau Anwendung finden. Sie bieten sehr gute mechanische Eigenschaften bei relativ geringem spezifischem Gewicht.

Die Blattschalen sind in Sandwichbauweise hergestellt. Die Außenwände bestehen dabei aus Glasfasern, welche mit einer Kunststoffmatrix (meist Epoxidharz) getränkt sind (GFK – glasfaserverstärkter Kunststoff). Kohlenstofffasern kommen aktuell lediglich in wenigen Rotorblättern zum Einsatz. Sie werden ggf. nur in schmalen Bereichen zur Verbesserung der Tragfähigkeit, welche nicht von Erosion betroffen sind, verbaut. Zwischen den Wänden des Sandwichverbundes befindet sich ein leichtes, aber druckfestes Kernmaterial. Verwendete Kernmaterialien sind u.a. Balsaholz und verschiedene Kunststoffe, bspw. PET und PVC-Schaum. Das Kernmaterial ermöglicht eine größere Wandstärke und damit höhere Stabilität der Blattschale, so genannte Sandwich-Bauweise. Dennoch bleibt das Gewicht, durch die geringe Dichte des Kernmaterials, relativ gering.

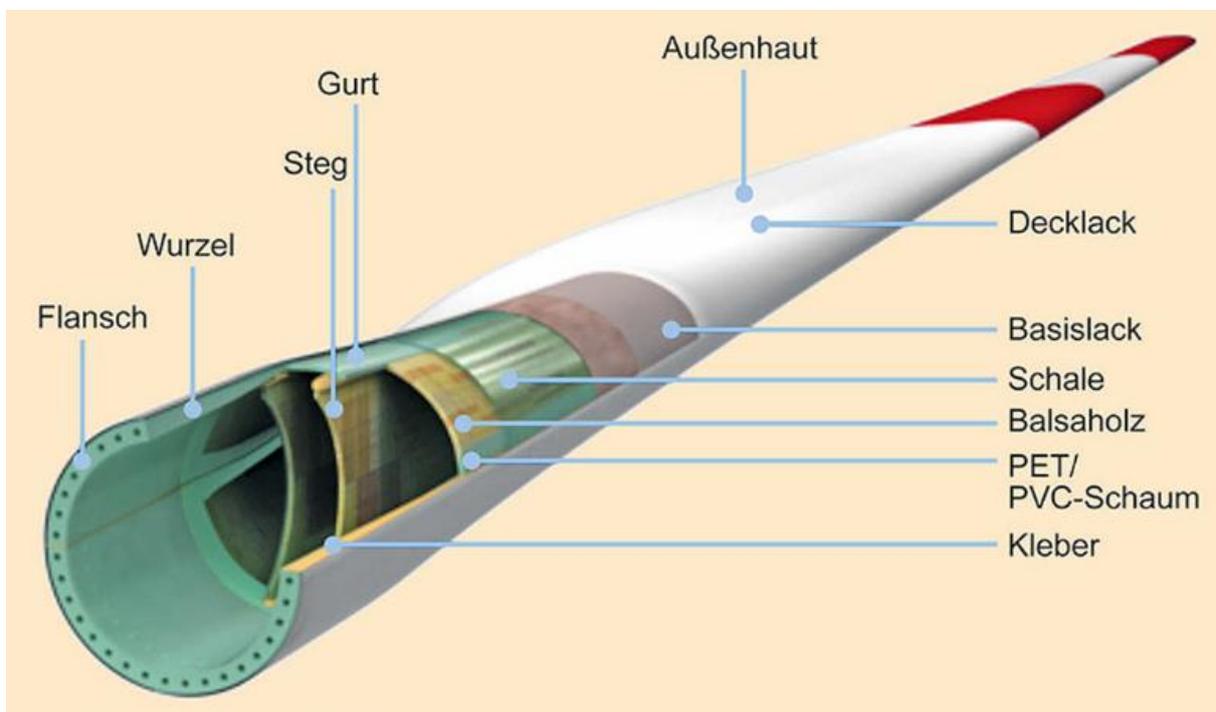


Abbildung 1: Aufbau eines Rotorblatts¹

¹ Chemie in unserer Zeit (2021), Volume: 55, Issue: 6, Pages: 406-421 - [LINK](#).



Hergestellt werden Rotorblätter überwiegend in zwei Halbschalen einer Negativform. Die Glasfaserlagen der Außenschale des Rotorblattes werden als erstes in die Form eingelegt. Anschließend folgen das Kernmaterial und darauf die inneren Glasfaserlagen der Blattschale. Dieser trockene Schalenaufbau wird mit der Kunststoffmatrix getränkt. Nach dem Härten des Kunststoffes werden die Blatthälften miteinander verklebt. Nach der Entformung wird die gesamte Oberfläche des Blattes mit einem Lack, z. B. auf Basis von Polyurethan oder Epoxidharz, beschichtet.

Eine weitere Variante der Oberflächenbeschichtung sind sogenannte Gelcoats auf Basis von ungesättigtem Polyesterharz oder Epoxidharz. Diese Beschichtung dient als Schutz vor Umwelteinflüssen.

2. Wodurch entsteht Erosion an Rotorblättern?

Als Erosion bezeichnet man den Verschleiß durch Abrieb (abrasiver Verschleiß) der Blattoberfläche an der Vorderkante des Rotorblatts. Diese tritt typischerweise im Bereich der Blattspitze auf, also auf dem letzten Drittel des Blattes. Im Betrieb erreicht die Blattspitze Spitzengeschwindigkeiten zwischen 70 bis 100 Metern pro Sekunde (252 – 360 km/h).

Wassertropfen und kleine Staubpartikel, ebenso wie Salze, Säuren, Bio-Aerosole und Umweltchemikalien führen in Kombination mit den hohen Geschwindigkeiten an den Blattenden im Laufe der Jahre zu Erosion.

Generell gibt es zwei Arten von Erosion: Die Partikelerosion und die Regenerosion.

- 1) Bei der **Partikelerosion** treffen kleine Partikel auf das Rotorblatt. Wenn dies in einem flachen Winkel geschieht, können die Partikel das Material furchen. Treffen sie in einem höheren Winkel auf, können sie zu einer Materialermüdung führen.
- 2) Bei der **Regenerosion** treffen Niederschläge (Regentropfen, Hagelkörner, Graupel) auf das Blatt. Durch die hohe Geschwindigkeit zerplatzt der Tropfen; es entsteht dabei lokal ein extremer Druck.² Diese Druckwellen führen zu Spannung, die sich auch in tiefer gelegene Schichten des Blattes fortsetzen. Beim auftreffenden Tropfen entsteht durch das Zerplatzen ein seitlicher Wasserabfluss, das so genannte Microjetting. Vorbeschädigungen durch Partikel können zusätzliche Angriffsflächen für diese Microjets bilden. Die beiden Effekte können sich so gegenseitig verstärken.

3. Welche Stoffe/ Materialien erodieren?

Von der Erosion betroffen ist die äußerste Schicht des Rotorblattes. Diese besteht aus dem in der Fertigung aufgetragenen Decklack, z. B. auf Basis von Polyurethan oder Epoxidharz oder sogenannter Gelcoats auf Basis von ungesättigtem Polyester- oder Epoxidharz. Polyurethan, Epoxid- und Polyesterharze sind Kunstharze. Wenn sie vollständig ausgehärtet sind, besitzen sie keine

² Vgl. hierzu Liersch, Jan (2021): Erosion am Rotorblatt – Vortrag auf den Windenergietagen Potsdam - [LINK](#).



gesundheitsschädlichen Eigenschaften.³ Das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) stuft Polyurethane als gesundheitlich unbedenklich und ebenfalls lebensmittelsicher ein⁴.

Bei geringer Erosion ist nur die Oberflächenbeschichtung betroffen. Bei stärkerer Erosion werden auch weitere Materialschichten der Vorderkante angegriffen. Da hier die Aerodynamik so stark betroffen ist, wird jedoch häufig repariert, bevor sich der Erosionsprozess fortsetzt.

Darüber hinaus wird zum weiteren Erosionsschutz an der besonders häufig beanspruchten Vorderkante des Blattes zusätzlich zum Decklack eine ca. 20 cm breite Schutzfolie oder spezieller Schutzanstrich aufgebracht, der auch in der Konstruktion von Flugzeugen und vor allem Hubschraubern zum Schutz der Tragflächen bzw. Rotorblättern zum Einsatz kommt. Die Folien bestehen aus Polyurethan-Elastomeren.

4. Welche Folgen hat die Vorderkanten-Erosion?

Durch den Erosionsprozess lösen sich kleine Partikel aus den oberen Lagen der Blattbeschichtung ab. Laut dem Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) existieren keine systemischen Untersuchungen zu den genauen Mengen.⁵

Schätzungen des Unternehmens Key Wind Energy GmbH kommen zu dem Ergebnis, dass der erosionsbedingte Materialverlust pro Rotorblatt über dessen gesamte zwanzigjährige Lebensdauer hinweg im Worst-Case-Szenario - also an stark belastenden Standorten und ohne regelmäßige Ausbesserung der kleinen Schäden - ca. 72 kg beträgt. Dies entspräche einem jährlichen Materialverlust von ca. 3,38 kg je WEA.⁶

Schätzungen des Unternehmens Deutsche Windtechnik kommen zu ähnlichen Ergebnissen. Ein Rotorblatt verschleißt in der Regel in einem Bereich von sechs bis zehn Metern entlang der Vorderkante. Dies entspräche ca. 500 Gramm PU-Beschichtung je Blatt. Dazu kämen weitere 200 Gramm je Blatt an weiteren Schichten. Somit ergäbe sich bei drei Rotorblättern pro Jahr ein Materialverlust von 2,1 kg.

Um den jährlichen Abrieb an allen deutschen WEA zu berechnen, wird im Folgenden als Mittelwert zwischen den beiden Schätzungen 2.750 Gramm Materialverlust pro Blatt angenommen. Berechnet man ausgehend von dieser Zahl den jährlichen Abrieb aller WEA in Deutschland, ergibt sich folgende Rechnung:

$$[2.750 \text{ g} \times 3 \text{ (Anzahl der Rotorblätter je WEA)}] \times 28.667 \text{ [Anzahl installierter WEA an Land zum 31.12.2023]} = 236.502.750 \text{ g} = 236.502,7 \text{ kg / p.a.}$$

³ BGI 655 / DGUV Information 201-007 - Epoxidharze in der Bauwirtschaft – Handlungsanleitung - [LINK](#).

⁴ Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) (2010): XXVIII. Vernetzte Polyurethane als Klebeschichten für Lebensmittelverpackungsmaterialien - [LINK](#).

⁵ Deutscher Bundestag (2020): WD 8 - 3000 - 077/20 - [LINK](#).

⁶ Quelle: Key Wind Energy



Zum Vergleich: Die jährlichen Abriebwerte von Reifen belaufen sich auf 102.090.000 kg/p.a., die von Schuhsohlen auf 9.047.000 kg/p.a.⁷

Systematische und langfristige Untersuchungen zum Materialverlust in Folge von Erosion an der Blattvorderkante liegen nicht vor. Je nach Standort der WEA können bestimmte Umweltfaktoren (größere Niederschlagsmengen, besonders dicke Regentropfen, etc.) zu einer stärkeren Erosion führen.

Durch die Erosion der Vorderkante verschlechtert sich die Aerodynamik des Rotorblattes. Daraus ergibt sich ein Ertragsverlust an den WEA. Wenn nicht eingegriffen und nachgebessert wird, summiert sich dieser Ertragsverlust im Laufe der Jahre stetig. Darüber hinaus kann durch eindringende Feuchtigkeit und wachsende Haarrisse die Lebensdauer der Blätter verkürzen. Unvorhergesehene Schäden können häufiger auftreten und höhere Reparaturkosten verursachen.⁸

5. Was kann dagegen getan werden?

Rotorblätter befinden sich fast ständig in Bewegung. Diese Bewegung führt zu starken Spannungen im Material. Darüber hinaus wird die Oberfläche der Blätter von Erosion und wechselnden Umweltbedingungen angegriffen.

Um ihre uneingeschränkte Funktion zu gewährleisten, sind daher regelmäßige fachgerechte Inspektionen und Instandhaltungsarbeiten notwendig. Dabei können verschiedene Maßnahmen zum Einsatz kommen. Die Schutzlacke (so genannte Topcoats) können auch nachträglich noch auf die Blätter aufgetragen werden und so eventuell bereits entstandene Oberflächenschäden erneut versiegeln. Ebenso können von Erosion betroffene Vorderkanten neu abgeschliffen und mit Schutzfolien versiegelt werden (Leading Edge Protection Tape). Besonders schwer beschädigte Blätter können schließlich auch vollständig ausgetauscht werden.

Windenergieanlagen werden regelmäßig sorgfältigen Prüfungen unterzogen. Da die Schäden durch Erosion einen hohen jährlichen Ertragsverlust zur Folge hätten, liegt es im ureigenen Interesse der betreibenden Unternehmen, diese Schäden an den Blättern möglichst frühzeitig und sorgfältig auszubessern.

Bei sachgemäßer und sorgfältiger Wartung können die Anlagen, ähnlich wie ein gut gepflegter Oldtimer, auch über die reguläre Entwurfslebensdauer hinaus noch gut weiterbetrieben werden und saubere Energie produzieren.

⁷ Deutscher Bundestag (2020): WD 8 - 3000 - 077/20 (8. Dezember 2020) – [LINK](#).

⁸ Vgl. hierzu Liersch, Jan (2021): Erosion am Rotorblatt – Vortrag auf den Windenergietagen Potsdam – [LINK](#).