

# EPOXIDHARZE BEI WINDENERGIEANWENDUNGEN

## BEWERTUNG POTENZIELLER BPA-EMISSIONEN



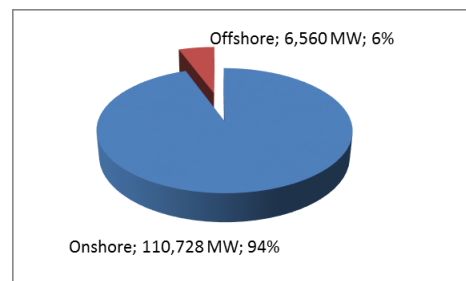
Die Untersuchung der möglichen Bisphenol A (BPA)-Emissionen durch die Herstellung, die Verwendung und die Entsorgung von Epoxidharzen in Windenergieanwendungen wurde von der Beratungsgesellschaft für integrierte Problemlösungen (BIPRO) im Auftrag des Epoxy Resin Committee (ERC) durchgeführt. Diese Untersuchung ist Teil einer Reihe, bei der fünf Hauptanwendungsbereiche von Epoxidharzen in Europa analysiert werden. Um weitere Informationen zu erhalten, senden Sie eine E-Mail an [info@epoxy-europe.eu](mailto:info@epoxy-europe.eu) oder besuchen Sie die Website [www.epoxy-europe.eu](http://www.epoxy-europe.eu).

## ANWENDUNGSBEREICHE UND TRENDS

Der größte Teil der im Energiesektor verbrauchten Epoxidharze wird für Windkraftanlagen verwendet. Das seit den 1980er Jahren bei der Herstellung von Windkraftanlagen verwendete Epoxidharz ist größtenteils in Verbundwerk- und Klebstoffen enthalten, die bei der Fertigung von Rotorblättern und anderen Bauelementen eingesetzt werden.

Schätzungen von ERC und BIPRO ergaben, dass Rotorblätter in derzeit betriebenen Windturbinen insgesamt 249 365 Tonnen BPA-basiertes Epoxidharz enthalten und pro Jahr eine Gesamtmenge von 24 162 Tonnen Epoxidharz verbraucht wird.<sup>1</sup> Zwei Drittel aller beim Bau von Windkraftanlagen verbrauchten Epoxidharze entfallen auf Rotorblätter, die daher Gegenstand dieser Analyse sind. Dank Epoxidharz konnte der Durchmesser der [Rotorblätter](#) in den letzten 20 Jahren (von etwa 15 Metern in den 1980er Jahren auf etwa 160 Meter heute) stetig vergrößert werden.

### KAPAZITÄT EUROPÄISCHER WINDKRAFTANLAGEN BIS 2013



Die geschätzte Menge an BPA-basiertem Epoxidharz in Rotorblättern stimmt zudem mit den Ergebnissen einer aktuellen Studie zu den [sozialen und wirtschaftlichen Vorteilen](#) von Epoxidharzen überein. Dem im Auftrag des ERC erstellten Bericht zufolge werden in Europa pro Jahr 24 000 Tonnen BPA-basiertes Epoxidharz für die Herstellung von Rotorblättern verbraucht (von der Gesamtmenge von 52 000 Tonnen Epoxidharz, die bei der Herstellung von Windkraftanlagen Verwendung finden). Bei beiden Zahlen sind Einfuhren in und aus der Europäischen Union nicht berücksichtigt; der tatsächliche Epoxidharzverbrauch in diesem Bereich könnte also höher sein.

[Bis zu 50 %](#) der europäischen Rotorblatthersteller verwenden inzwischen Epoxidharze wegen ihres geringen Gewichts, ihrer Ermüdungsbeständigkeit, ihres guten Haftvermögens und geringen Materialschwunds bei der Härtung. Zur Herstellung der Rotorblätter werden sie häufig mit Faserstoffen wie Glas- und Kohlefaser kombiniert. Darüber hinaus werden sie zur Beschichtung und zum Schutz von anderen Teilen, wie Turbinendämmungen, Statorwickelköpfen oder Feldspulen für Rotorhalterungen, eingesetzt. Sie können als Deckschicht für die Beton- und Stahltürme der Windkraftanlagen dienen und ihre Lebensdauer erhöhen. Die Umhüllung des Motorgehäuses (Gondel) besteht aus einem Glasfaserverbundwerkstoff, der mit Epoxidharz imprägniert ist.

<sup>1</sup> Die Berechnung des Gesamtverbrauchs erfolgte unter Berücksichtigung potenzieller Mengen an ausgehärtetem Epoxidharz in durchschnittlich langen Rotorblättern in bestehenden 50 331 Onshore- und 1822 Offshore-Windkraftanlagen in ganz Europa – mit einer Stromerzeugungskapazität von insgesamt 110 728 Megawatt.

## HERSTELLUNG (FLÜSSIGE UND FESTE EPOXIDHARZE)

Für die Herstellung von Rotorblättern für Windkraftanlagen können zwei unterschiedliche Technologien verwendet werden: die Vakuuminfusion und das sogenannte „Prepreg“-Verfahren. Das Verfahren der Vakuuminfusion wird häufiger genutzt und kommt bei etwa 65 % aller Windkraftanlagen in Europa (162 087 Tonnen) zum Einsatz, während die „Prepreg“-Herstellung bei den restlichen 35 % (87 278 Tonnen) Anwendung findet.



Bei der Vakuuminfusion wird das flüssige Epoxidharz mit dem Härter gemischt und über eine Vakuumpumpe in die Rotorblattbauform gesaugt, wo es die Verbundfaserstoffe imprägniert. Nach der Erhitzung und der [Aushärtung](#) wird die Form geöffnet, um ein halbes Rotorblatt zu erhalten. Zwei getrennt gefertigte Blattschalen werden dann unter Verwendung von Epoxidklebstoffen miteinander verklebt.

Beim Prepreg-Prozess werden die Fasern vor der Weiterverarbeitung mit BPA-basiertem Epoxidharz vorimprägniert. Epoxidharze sind bei Raumtemperatur normalerweise halbfest, um der Beschichtung größere Festigkeit zu verleihen. Der Herstellungsprozess beginnt mit der manuellen Beschichtung der Außenschicht der Rotorblattbauform. Prepreg-Matten werden nacheinander in die Form gelegt, erhitzt und mit einer anderen Blattschale und dem Balken verklebt, um die Festigkeit zu erhöhen. Halbfestes Epoxidharz wird bevorzugt, wenn eine hohe Viskosität der Harze benötigt wird.

Der erste Schritt der Herstellung beider oben beschriebenen Epoxidharze erfordert die chemische Reaktion von Bisphenol A (BPA) und Epichlorohydrin (ECH). Die jeweiligen prozentualen Anteile sind jedoch unterschiedlich: sie betragen 45 % BPA und 55 % ECH bei der Vakuuminfusion sowie 61 % BPA und 39 % ECH bei der Prepreg-Herstellung. Untersuchungen zeigen, dass flüssige Epoxidharze eine Höchstmenge von 10 ppm unreaktiertes BPA und halbfeste Epoxidharze eine Höchstmenge von 65 ppm unreaktiertes BPA enthalten können. Wenngleich die ERC-Epoxidharzhersteller in beiden Fällen geringere Durchschnittsmengen angeben, wurde bei dieser Studie von einem Worst Case Szenario ausgegangen und die Höchstmenge an potenzielle unreaktiertes BPA angenommen. Dazu wurde bei der Analyse das Vorhandensein einer Höchstmenge von 7294 Kilogramm Rest-BPA in derzeit in Europa betriebenen Rotorblättern berechnet (1621 Kilogramm in flüssigen Epoxidharzen und 5673 Kilogramm in halbfesten Epoxidharzen).

**BPA-Bewertung:** Nachdem die Reaktion zur Herstellung des Epoxidharzes erfolgt ist, werden überschüssiges ECH und andere Stoffe mit Wasser ausgewaschen. Branchenschätzungen zufolge werden zwischen 5 und 19 Gramm BPA pro produzierter Tonne Epoxidharz auf diese Weise freigesetzt. Unter Annahme eines Worst Case Szenarios von 19 Gramm und einer effektiven BPA-Mindestabbaurate über die vor Ort erfolgende Abwasserbehandlung wurde berechnet, dass von den bis heute bei der Herstellung von Rotorblättern verwendeten 249 365 Tonnen Epoxidharz durch die Harzproduktion etwa 524 Gramm BPA ins Abwasser gelangen könnten. Unter Berücksichtigung einer Weiterbehandlung über kommunale Kläranlagen würden weitere 3790 Kilogramm BPA auf diese Weise entfernt; somit könnte eine Gesamtmenge von 948 Kilogramm unreaktiertes BPA in Oberflächengewässer gelangen. Dies entspricht einer jährlichen Menge von 92 Kilogramm. Das freigesetzte BPA könnte im Wasser durch biotischen und abiotischen Abbau aus der Umwelt entfernt werden; somit kann davon ausgegangen werden, dass die Gesamtmenge an BPA, die durch die Herstellung von in Rotorblättern verarbeitetem Epoxidharz freigesetzt wird, vernachlässigbar ist.

## HERSTELLUNG (ROTORBLÄTTER VON WINDKRAFTANLAGEN)

Die Herstellung von Rotorblättern für Windkraftanlagen kann während bestimmter Fertigungsschritte zu weiteren BPA-Emissionen führen:

- Mischen des Epoxidharzes mit dem Härter: Das Epoxidharz und der Härter werden in der Regel in Kunststoffbehältern geliefert, die aus Gründen der Stabilität von einem Metallgitter eingefasst sind. Nach dem Mischen werden die Behälter vom Anbieter zurückgenommen, der sie durch Verbrennung entsorgt oder sie für eine Wiederverwendung reinigt. In diesen Behältern verbleibende Epoxidharzrückstände – und die zum Mischen verwendeten Werkzeuge – werden wahrscheinlich der Verbrennung zugeführt, wodurch etwaige BPA-Rückstände zerstört werden.

- Vakuuminfusion und Prepreg-Herstellung: Das Schneiden der zur Herstellung des jeweiligen Rotorblatts verwendeten Prepreg-Matten kann zu Verschnitt führen. Bei der Vakuumtechnik enden die Folie, Gewebe und Harzkanäle, mit denen flüssiges Epoxidharz in die Formen transportiert wird, als feste Kunststoffabfälle, die der Verbrennung zugeführt werden. Epoxidharz kann mitunter aus der Form oder beim Verkleben der verschiedenen Blätter mit Epoxidharz herausgedrückt werden und Feststoffabfall erzeugen. Während des Schleifvorgangs sind Schadstoffemissionen zu erwarten; allerdings liegen für solche verteilten Partikel keine Daten vor.

**BPA-Bewertung:** Die Analyse dieser Herstellungsphasen wurde durch mehrere Informationslücken beeinträchtigt. Untersuchungen ergaben, dass bei einem durch Vakuuminfusion gefertigtem 7 Tonnen schwerem Rotorblatt insgesamt 4 Tonnen Abfall generiert werden, von denen 0,4 Tonnen Epoxidharze sind. Die Gesamtmenge von 249 365 Tonnen BPA-haltigem Epoxidharz in derzeit in Europa betriebenen Windkraftanlagen hat möglicherweise eine Höchstmenge von 10 473 Tonnen BPA-haltigem Epoxidharzabfall generiert. Der größte Teil dieses Abfalls dürfte ausgehärtetes Epoxidharz mit geringeren Anteilen an BPA sein, die potenziell in die Umwelt freigesetzt werden (rund 306 Kilogramm). Genutzte Entsorgungsmethoden sind Verbrennung – die zur Zerstörung des BPA führt – aber auch die Lagerung in Deponien, wo das Abbauverhalten von BPA sich nicht genau bestimmen lässt. Ferner ist darauf hinzuweisen, dass diese Annahme auf verfügbaren Forschungsdaten zur Vakuuminfusion basiert und nicht auf Daten zur Prepreg-Technik, für die dieselben Annahmen getroffen wurden.

## LEBENSDAUER

Die durchschnittliche Lebensdauer einer Windkraftanlage beträgt rund 20 Jahre. Gute Wartungsverfahren können die Nutzungsdauer allerdings verlängern. Wie bereits erwähnt, sind Rotorblattkörper mit Schichten anderer Stoffe als Epoxidharz versehen, welche einen besseren Schutz gegen nachteilige Witterungsbedingungen (Regen, Eis, Sand, Sonnenlicht, Geschwindigkeit usw.) bieten können.

**BPA-Bewertung:** Die während der Lebensdauer möglicherweise freigesetzte Menge an BPA wird als vernachlässigbar eingeschätzt. Von sich in Bewegung befindlichen Rotorblättern könnten Epoxidharzpartikel lediglich durch mechanische Belastungen und Kratzer auf der Schutzschicht, durch die das darunter liegende Epoxidharz freigelegt werden kann, freigesetzt werden.

## ENDE DES LEBENSZYKLUS

Wie bei anderen Epoxidharzanwendungen wurden bei der Analyse des Abfallstadiums zahlreiche Unsicherheiten hinsichtlich der Behandlung und Klassifikation von zu entsorgendem Abfall festgestellt:

- Gesetzgebung: Es existieren bislang keine Rechtsvorschriften, in denen Entsorgungsverfahren für Windkraftanlagen, einschließlich Turbinen, festgelegt sind (das Endstadium des Lebenszyklus ist hier noch nicht von Belang). In einigen EU-Ländern wurde beschlossen, dass brennbare Bestandteile nicht in Deponien entsorgt werden dürfen; aufgrund der Brennbarkeit von Epoxidharzen sind in Zukunft andere Entsorgungsmethoden erforderlich.
- Bisherige Erfahrungen mit der Entsorgung: Laut einer Untersuchung des deutschen Fraunhofer Instituts für chemische Technologie ist die Zahl der demontierten Windkraftanlagen bislang sehr gering. Es gibt noch nicht viele Erfahrungen mit der Behandlung von mit Epoxidharz beschichteten Rotorblättern am Ende ihres Lebenszyklus. Eine weitere Schwierigkeit ist das Vorhandensein eines Marktes für gebrauchte Turbinen in der EU und – was für diese Analyse von besonderer Bedeutung ist – in Nicht-EU-Ländern, was dem Ganzen eine weitere Ebene der Komplexität hinzufügt.
- Entsorgungsmöglichkeiten: Recycling ist für die meisten Bestandteile von Windkraftanlagen eine Option, aber nicht für Rotorblätter. Derzeit angewandte Entsorgungspraktiken umfassen die Lagerung in Deponien und die Verbrennung, die mitunter zur Stromerzeugung dient. Für entsorgte oder der Verbrennung zugeführte Rotorblätter liegen keine statistischen Daten vor.

**BPA-Bewertung:** Für dieses Stadium lagen keine zuverlässigen Daten vor. Es ließ sich jedoch schätzen, dass zwischen 2020 und 2034 in Europa etwa eine Million Tonnen Altrorblätter als Abfall entsorgt werden. In einem Worst-Case Szenario würden 162 778 Tonnen ausgehärtetes BPA-haltiges Epoxidharz – sowohl flüssiges

als auch halbfestes – 4761 Kilogramm BPA generieren. Allerdings ist nicht klar, welcher Anteil von diesen Mengen durch Verbrennung zerstört wird oder über die Lagerung in Deponien in Gewässer gelangt. Darüber hinaus könnte herausgelöstes und ausgewaschenes BPA in Deponien nur geringe Emissionen erzeugen, da Epoxidharzabfall mit großer Wahrscheinlichkeit durch direkte Exposition gegenüber Sonneneinstrahlung oder Regen abgebaut werden oder photooxidieren würde. Materialrückgewinnungsmethoden und Pyrolyse-Experimente werden derzeit erforscht, bergen aber eine Reihe von Hindernissen sowohl wirtschaftlicher als auch praktischer Natur (z. B. Kettenlänge der Festharze).

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Durch den derzeitigen Verbrauch von Epoxidharzen in Rotorblättern von Windkraftanlagen könnte eine Höchstmenge von insgesamt 948 Kilogramm (max. 92 Kilogramm pro Jahr) BPA in die Umwelt freigesetzt werden. Die meisten BPA-Emissionen werden bei der Herstellung des während des Produktionsprozesses verwendeten Epoxidharzes erzeugt. Während der Lebensdauer sind keine relevanten BPA-Verluste zu erwarten. Das Ende des Lebenszyklus bzw. das Abfallstadium weist zu viele Unsicherheiten auf, sodass etwaige BPA-Verluste nicht zuverlässig quantifiziert werden können.

### Rotorblätter von Windkraftanlagen

Gesamt- verbrauch an Epoxidharzen	Gesamtmenge an in die Umwelt freigesetztem BPA				
	Herstellung	Anwendung	Lebenszyklus	Abfall	Gesamt
249 365 t	948 kg	nicht bestimmbar	vernachlässigbar	nicht bestimmbar	> 948 kg

Jahres- verbrauch an Epoxidharzen (2013)	Menge an in die Umwelt freigesetztem BPA pro Jahr				
	Herstellung	Anwendung	Lebenszyklus	Abfall	Gesamt
24 162 t	92 kg	nicht bestimmbar	vernachlässig- bar	nicht bestimmbar	> 92 kg

# ANHANG: Lebenszyklusstadien und die jeweilige Menge an freigesetztem BPA für mit Epoxidharz beschichtete Rotorblätter von Windkraftanlagen

