



Einsatz zukunftsweisender  
Polyurethanharze und -beschichtungen  
zur Entwicklung von leistungsstarken  
Rotorblättern für Windkraftanlagen



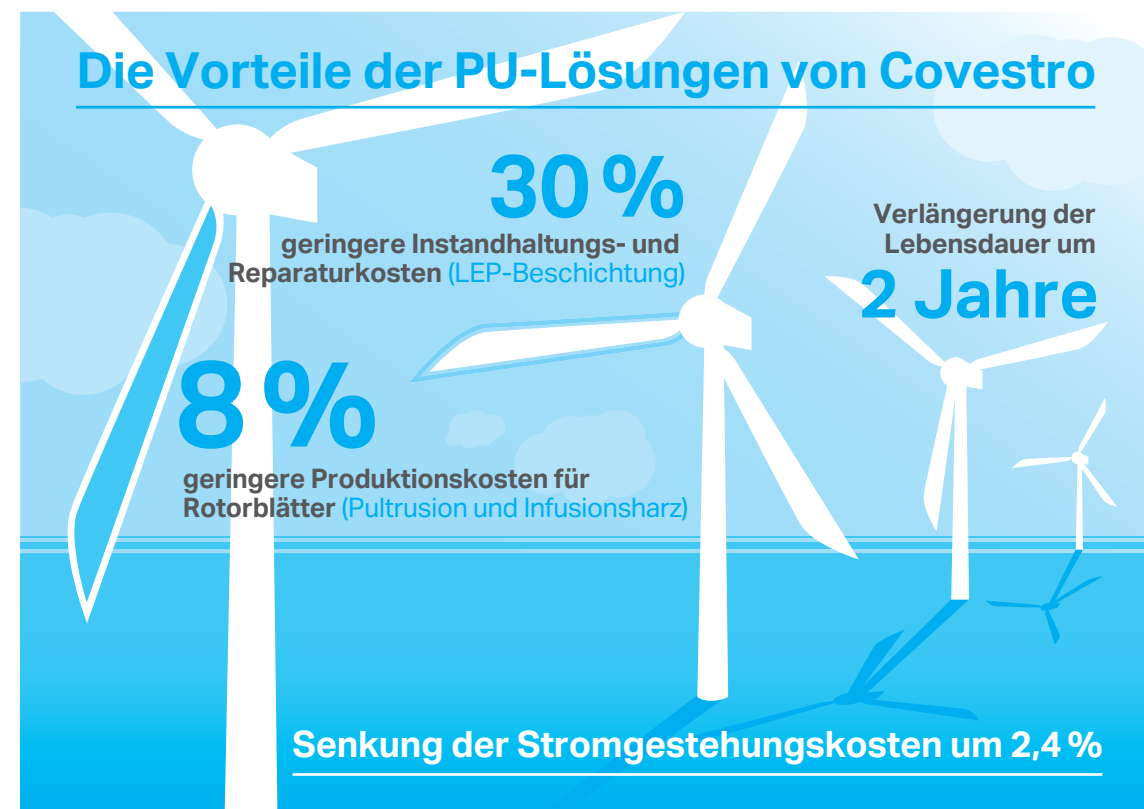
**Dr. Johann Maass**  
Bewind GmbH

**Ernesto Silva M.**  
Covestro Deutschland AG  
Tailored Urethanes

**Dirk Soontjens**  
Covestro NV

**Thomas Baeker**  
Covestro Deutschland AG  
Coatings & Adhesives





#### Covestro und bewind nutzen einzigartige Materialeigenschaften von Werkstoffen für Rotorblätter zur Kosteneinsparung in der Windenergie.

Covestro und bewind nutzen einzigartige Materialeigenschaften von Werkstoffen für Rotorblätter zur Kosteneinsparung in der Windenergie.

Covestro hat industrielles Fachwissen im Bereich der Hightech-Polymerwerkstoffe eingesetzt, um innovative Polyurethan(PU)-Lösungen für Anwendungen in Windkraftanlagen zu entwickeln, die Leistungsvorteile und Kostensenkungen bei den Rotorblättern mit sich bringen.

Um die Auswirkungen der PU-Lösungen für Rotorblattanwendungen zu bewerten, beauftragte Covestro die bewind GmbH, ein auf Windkraftanlagen spezialisiertes Beratungsunternehmen, mit der Simulation der Kosten und Vorteile dieser Lösungen in Bezug auf Produktion, Betriebsleistung und Lebensdauer der Windkraftanlagen. Bewind bewertete drei PU-Produkte: ein Pultrusionsharz, ein Infusionsharz und Beschichtungsrohstoffe für den Kantenschutz (LEP), um die Auswirkungen von Polyurethanlösungen von Covestro im Vergleich zu alternativen Standardprodukten für einen typischen Offshore-Windpark zu quantifizieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass die PU-Lösungen von Covestro die Herstellung von Rotorblattteilen beschleunigen, die Effizienz steigern und die Produktionskosten senken. PU-Rotorblätter erfordern weniger Rohstoffe, was ihr Gewicht reduziert und erhebliche Vorteile in der Praxis bringt. Die zukunftsweisenden physikalischen Eigenschaften der PU-Harze ermöglichen eine hohe Leistung der Rotorblätter und eine potenziell längere Lebensdauer, wodurch sich die erzeugte Energie während ihrer gesamten Lebensdauer erhöht. Die außergewöhnliche Haltbarkeit der LEP-Beschichtung auf der Grundlage von PU-Rohstoffen bietet einen hervorragenden Erosionsschutz, der die Reparaturhäufigkeit und die Wartungskosten des Rotorblatts über die gesamte Lebensdauer reduziert.

Die Verbindung von leistungsstarken PU-Harzen und Beschichtungsrohstoffen von Covestro stellt eine bahnbrechende Innovation dar, die sich äußerst positiv auf die Wirtschaftlichkeit von Windkraftprojekten auswirkt.

#### Covestro ist einer der weltweit führenden Polymerhersteller

Mit einem Umsatz von 15,9 Milliarden Euro im Jahr 2021, 33 Produktionsstandorten und rund 17.900 Mitarbeitern gehört Covestro zu den größten Polymerherstellern der Welt. Geschäftsschwerpunkte sind die Herstellung von Hightech-Polymerwerkstoffen und die Entwicklung innovativer, nachhaltiger Lösungen für die größten Herausforderungen unserer Zeit. Covestro fokussiert seine Bemühungen auf die Kreislaufwirtschaft, wobei erneuerbare Energien eine wichtige Triebkraft für das Unternehmen darstellen.

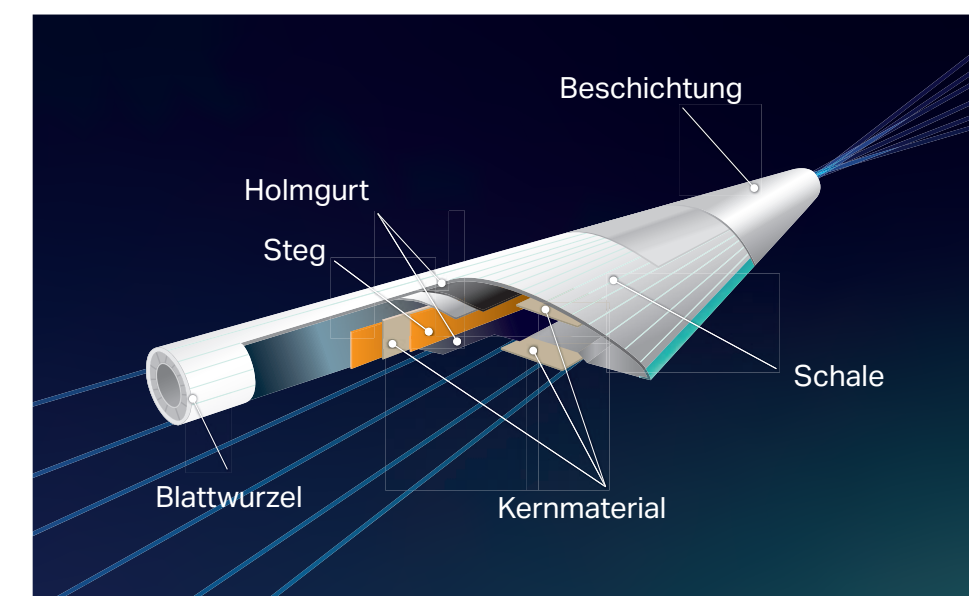
Insbesondere für die Windkraftindustrie strebt Covestro nach kostengünstigeren und nachhaltigeren Stofflösungen, um den weiteren Ausbau der Erzeugung von Windenergie zu unterstützen, und setzt dafür globales Stoff- und Verarbeitungsfachwissen ein.

#### Bewind ist ein auf Windkraftanlagen spezialisiertes Beratungsunternehmen mit herausragendem Fachwissen

Bewind hat es sich zur Aufgabe gemacht, den Produktentwicklungsprozess von Windkraftanlagen durch die Integration agiler und datengesteuerter Methoden zu verbessern und zu optimieren. Ziel ist es, die Zeit bis zur Markteinführung deutlich zu verkürzen und die Marktanpassung in den sich schnell entwickelnden Windkraftmärkten zu verbessern. Bewind hat für mehrere Kunden auf der ganzen Welt Lösungen zur Erzeugung von Windenergie geliefert, die Maßstäbe setzen. Dabei werden hochmoderne Designwerkzeuge und -prozesse eingesetzt, um technische Lösungen zu optimieren und innovative Produkte zu liefern.

#### Leichtere, stabilere und günstigere Rotorblätter effizienter herstellen

Aufgrund der niedrigen Viskosität und der kurzen Aushärtungszeit von PU-Harzen können die Hersteller von Rotorblättern die Produktionszyklen verkürzen und mehr Rotorblätter in kürzerer Zeit liefern. Dies wiederum optimiert die Formbelegung und senkt die Stoff- und Arbeitskosten pro Rotorblatt, was sich direkt in LCOE-Einsparungen niederschlägt. In der Fallstudie reduzieren die PU-Lösungen von Covestro die Gesamtkosten für die Herstellung von Rotorblättern um bis zu 8 % im Vergleich zu einem Referenzszenario.



Typisches Design eines Rotorblatts für Windkraftanlagen mit infundierten und pultrudierten Teilen. Die Beschichtungen werden durch Sprühen oder Rollen auf das äußere Gehäuse aufgebracht.

### Vorteile des PU-Infusionsharzes

Die unten in der Fallstudie vorgestellte Simulation zeigt, dass die überlegenen Eigenschaften des PU-Infusionsharzes zu Produktionskostensenkungen von bis zu 13 % für infundierte Teile führen können. Beim Vakuuminfusionsverfahren wird das Harzgemisch unter niedrigem Druck in eine mit trockenen Faserschichten gefüllte Form überführt und bei hohen Temperaturen ausgehärtet.

Die PU-Infusion bietet im Vergleich zu Epoxidharz zwei entscheidende Vorteile. Obwohl vor der PU-Infusion eine Trocknung erforderlich ist, die einem ausgedehnten Druckabfalltest ähnelt, ermöglicht das niedrigviskose Harz (50 mPas für PU im Vergleich zu 150 mPas für Epoxidharz bei 35 °C), dass der Stoff leicht fließt und die Form bis zu zwei Mal schneller füllt. Die Aushärtungszeit von PU-Harz ist aufgrund seiner hohen Reaktivität bei hohen Temperaturen kürzer als die von Epoxidharz: 3 Stunden bei 80 °C und weniger als 1 Stunde bei 90 °C. Zum Vergleich: Die Aushärtungszeit eines typischen Epoxidharzes beträgt je nach System und Aushärtungstemperatur 6 bis 9 Stunden. Selbst unter Berücksichtigung eines zusätzlichen Trocknungsschritts, der für die PU-Infusion erforderlich ist, verkürzt sich die Gesamtprozesszeit um schätzungsweise 20 % im Vergleich zum Epoxidharzverfahren.

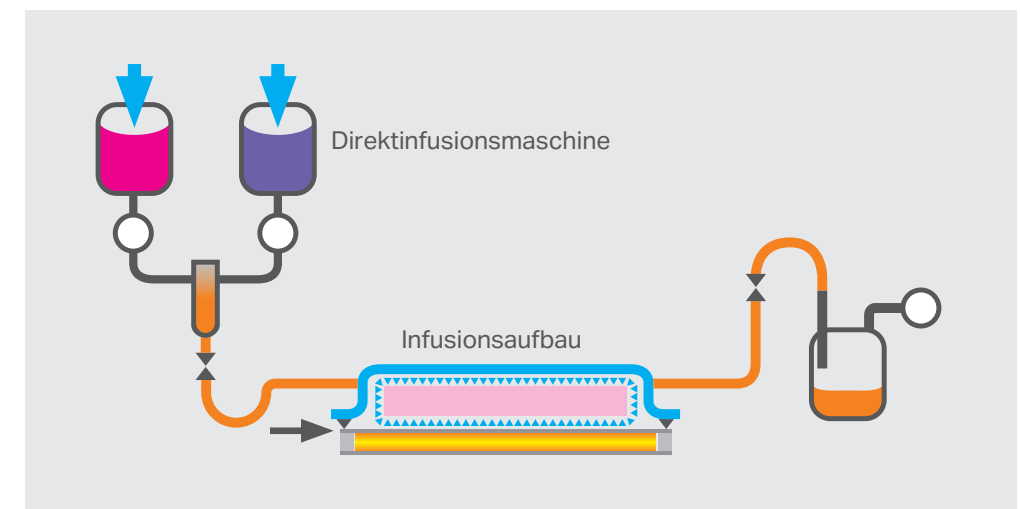
Darüber hinaus ermöglicht das Direktinfusionsverfahren, das für PU erforderlich ist, eine direkte und geschlossene Infusion in die Form. Dadurch wird Abfall minimiert und die Freisetzung von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) vermieden, was zu wichtigen Verbesserungen in den Bereichen Gesundheit, Sicherheit und Umwelt führt. Die PU-Komponenten werden erst unmittelbar vor der Injektion in die Form in genauen Mengen gemischt, sodass das Harz immer frisch gemischt ist und es während der Infusion zu keinen nennenswerten Viskositätsschwankungen kommt. Der Prozess kann in hohem Maße automatisiert und rückverfolgbar sein, da Entgasung, Mischen und Infusion von einer einzigen Maschine durchgeführt werden. Covestro hat mit Maschinenherstellern zusammengearbeitet, um den Prozess zu optimieren und die Maschinenentwicklungen zu beschleunigen, damit diese dem Markt zur Verfügung stehen.

### Vorteile des PU-Pultrusionsharzes

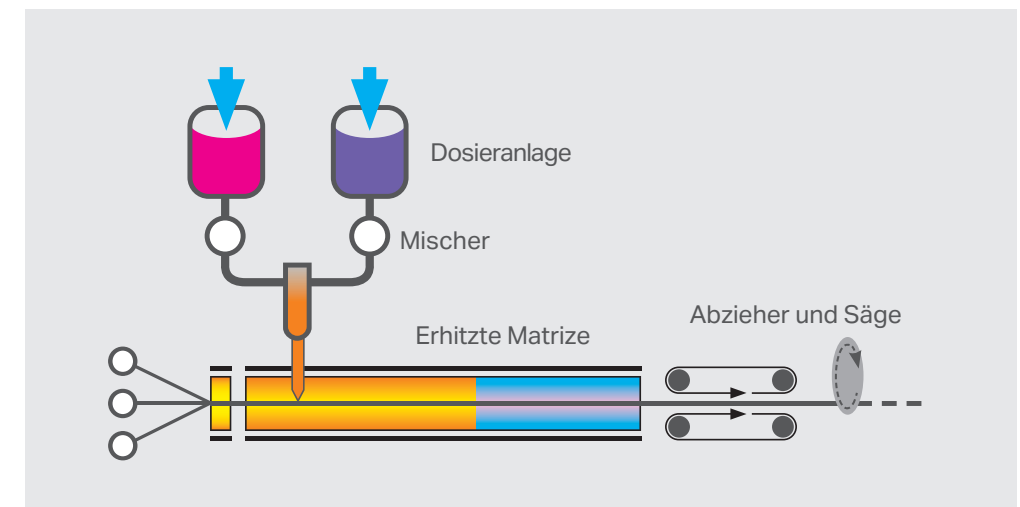
Die bewind-Simulationen zeigen, dass die PU-Pultrusionstechnologie die Kosten für die Herstellung von Holmgurten um bis zu 14 % senken kann. Pultrusion ist ein automatisiertes, kontinuierliches Fertigungsverfahren zur Herstellung von Profilen aus faserverstärktem Kunststoff (FVK) mit konstantem Querschnitt, bei dem die Faserverstärkungen mit Harz getränkt und in ein beheiztes Werkzeug geleitet werden. Das Profil verlässt das Werkzeug in einem festen Zustand.

Aufgrund der niedrigen Viskosität und der schnellen Aushärtung von PU-Pultrusionsharzen erreicht die Produktionslinie im Vergleich zu alternativen Harzen – Vinylester oder Epoxid – eine bis zu doppelt so hohe Geschwindigkeit. Um die Herstellung von Bauteilen mit höchsten Anforderungen, insbesondere an die Steifigkeit, zu ermöglichen, hat Covestro sowohl für die Glasfaser- als auch für die Carbonfaser-Pultrusion PU-Harze entwickelt, die eine hervorragende Benetzung der Fasern und eine schnelle Aushärtung bieten und es den Pultrudeuren ermöglichen, die Produktivität zu steigern und die Produktionskosten deutlich zu senken, um die Anforderungen der Großserienproduktion zu erfüllen.

Darüber hinaus wird Polyurethan in geschlossenen Systemen verarbeitet, die höchste Sicherheit in der Produktion bieten, und die gute Handhabbarkeit der PU-Harze von Covestro ermöglicht eine reibungslose Produktion, selbst wenn die Pultrusionsanlage vorübergehend angehalten werden muss.



a. Das Direktinfusionsverfahren minimiert Abfall, vermeidet VOC-Emissionen und verbessert die Sicherheit des Bedieners.



b. Das PU-Pultrusionsverfahren ermöglicht eine höhere Anlagengeschwindigkeit und eine hohe Produktivität.

Die kürzeren Produktionszyklen sowohl für Infusions- als auch für Pultrusionsteile führen zu direkten Einsparungen bei der Verarbeitung von etwa 7 %. Die geringeren Materialkosten führen zu zusätzlichen Einsparungen, sodass die Gesamtkosten der Rotorblattproduktion um bis zu 8 % gesenkt werden können.

Die niedrigviskosen PU-Harze ermöglichen im Vergleich zu Epoxidharzen eine hervorragende Imprägnierung und eine dichtere Faserpackung, wodurch weniger Harz und einfachere Faserverstärkungsschichten erforderlich sind, um die angestrebten mechanischen Eigenschaften zu erreichen. Dies ermöglicht ein leichtes Design mit Gewichtseinsparungen von bis zu 5 % im Vergleich zu Standard-Epoxidblättern.

Die Umstellung von den bestehenden Verfahren zur Fertigung von Rotorblättern aus Epoxid- oder Polyesterharzen auf PU-Harze erfordert zwar Investitionen in neues Equipment oder Equipmentanpassungen, aber der schnellere Durchsatz und die effiziente Nutzung der Kapazitäten (z. B. die Belegung der Formen und die Geschwindigkeit der Pultrusionsanlagen) bieten erhebliche Vorteile sowohl für bestehende Infrastrukturen als auch für Investitionen in neue Kapazitäten zur Deckung der weltweit wachsenden Nachfrage nach Windenergie.



**Steigerung der Energieerzeugung in der Praxis**

Im Hinblick auf die Betriebsleistung bieten die PU-Lösungen von Covestro zwei wesentliche Vorteile für das Design von Rotorblättern für Windkraftanlagen: (i) Die mechanischen Eigenschaften von PU-Harzen erhöhen die Zuverlässigkeit der Rotorblätter, und das Potenzial für leichtere Teile reduziert die statischen und dynamischen Belastungen; (ii) Hochleistungsbeschichtungen bieten einen unübertroffenen Schutz vor Erosion (Kantenschutz, LEP), wodurch der Wartungsaufwand sinkt und die Ausfallzeiten reduziert werden. In ihrer Gesamtheit könnten durch diese Lösungen eine hohe jährliche Energieproduktionsrate (AEP-Rate) aufrechterhalten und die Lebensdauer der Rotorblätter um zwei Jahre verlängert werden, sodass über die gesamte Lebensdauer einer Windkraftanlage ein erheblicher Gewinn bei der Gesamtenergieproduktion erzielt wird.

**Weniger Wartung, weniger Ausfallzeiten, mehr Energie**

Die niedrigviskosen PU-Harze von Covestro ermöglichen eine dichtere Faserpackung bzw. einen höheren Faservolumengehalt (FVG), was zu einer besseren mechanischen Leistung in Bezug auf Festigkeit und Steifigkeit führt. Die von der Matrix dominierten Eigenschaften von PU-Harzen verbessern die Ermüdungsfestigkeit.

Stiefere und dünnere Holmgurte führen zu einer geringeren Durchbiegung der Blätter aufgrund eines verbesserten geometrischen Trägheitsmoments und ermöglichen es den Konstrukteuren, die Lastfälle für den Turmabstand zu erfüllen.

Dies ist besonders wichtig für längere Rotorblätter, die sich stärker durchbiegen können und daher weiter vom Turm entfernt positioniert werden müssen, um Schäden oder Kollisionen zu vermeiden. Das Gewicht spielt beim Design von Rotorblättern eine entscheidende Rolle. PU-Systeme ermöglichen die Produktion von Teilen mit hohem FVG und ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften, sodass die Designer die Wandstärken reduzieren und weniger Harz und einfachere Faserverstärkungsschichten verwenden können, was zu einem leichteren Rotorblatt führt. Die überlegenen mechanischen Eigenschaften verringern auch den Bedarf an kleineren Reparaturen und Wartungsarbeiten um etwa 30 %, was zusätzliche Einsparungen ermöglicht.

Leichtere Rotorblätter verringern die Belastung der Klebverbindungen und der Blattwurzel. Dauerbrüche an den Rotorblättern werden hauptsächlich durch die Beanspruchung durch seitliche Lasten verursacht, die eher mit dem Gewicht des Blattes selbst als mit der Windstärke zusammenhängen. Je leichter das Rotorblatt ist, desto geringer sind die Kantenbelastungen und damit auch die Beanspruchung der Klebverbindungen. Simulationen zeigen, dass eine Gewichtsreduzierung der Rotorblätter um 5 % die Lebensdauer der Klebverbindungen um bis zu 50 % erhöhen kann, wodurch sich die Gesamtlebensdauer der Rotorblätter um mindestens zwei weitere Jahre verlängert (basierend auf konservativen Schätzungen).

Schließlich tragen zukunftsweisende Beschichtungen für die Rotorblätter von Windkraftanlagen auf der Basis von PU-Rohstoffen von Covestro dazu bei, die Oberflächeneigenschaften zu erhalten und den Kantenschutz (LEP) im Vergleich zu alternativen Lösungen deutlich zu verbessern. Intakte Anströmkanten führen zu einem optimalen (d. h. nahezu designgerechten) aerodynamischen Profil, weniger Wartung, geringeren Ausfallzeiten und einer verbesserten Haltbarkeit, was dazu beiträgt, Produktivitätsverluste (AEP-Reduzierung) aufgrund von Oberflächenerosion im Laufe der Jahre zu vermeiden.

In Kombination eingesetzt, haben die PU-Lösungen von Covestro einen starken positiven Einfluss auf die Fertigung und die Betriebsleistung von Rotorblättern, was den Wert von Windkraftprojekten erheblich steigert und die Stromkosten senkt. Dies wird in der nachfolgend dargestellten bewind-Fallstudie eines repräsentativen Offshore-Windparks deutlich.

**Simulation des Einsatzes von PU-Lösungen von Covestro bei 100-m-Rotorblättern für Offshore-Windkraftanlagen**

Bewind hat die Vorteile der PU-Lösungen von Covestro sowohl für die Fertigung von Rotorblättern als auch für die Leistung von Windkraftanlagen anhand ihrer einzigartigen physikalischen Eigenschaften bewertet. Bei einer 12-MW-Offshore-Windkraftanlage mit 100 m langen Rotorblättern wurden positive Auswirkungen auf die Rotorblattproduktion, das strukturelle Design und die Haltbarkeit prognostiziert.

Annahmen: Im Referenzszenario werden für die Kostenschätzungen historische EMEA-Harzpreise, -Produktionskosten und -Arbeitszeitmodelle verwendet. Es wurden keine zusätzlichen Investitionskosten für eine Direktinfusionsmaschine berücksichtigt, da die Direktinfusion bei neuen Anlagen Standard ist. Die Rotorblätter werden als der begrenzende Faktor für die Lebensdauer einer Windkraftanlage angesehen, die bei konventionellen Lösungen auf 25 Betriebsjahre begrenzt ist, mit LEP-Reparaturzyklen von fünf Jahren.

<b>Der Referenzfall</b> besteht aus einem 100 m langen Rotorblatt mit den folgenden Designstoffen	<b>Bei der PU-Fallstudie</b> wurde dasselbe 100-m-Rotorblattdesign mit den folgenden Änderungen verwendet
<b>Herkömmliches Epoxidharz für die Infusion</b>	<b>PU-Infusionsharz von Covestro</b>
<b>Pultrudierte Holmgurte auf Basis von Vinylester + Carbonfaser</b>	<b>Pultrudierte Holmgurte auf Basis von PU-Pultrusionsharz von Covestro + Carbonfaser</b>
<b>Balsa-Kernstoff</b>	<b>PET-Schaumkern (preislich identisch mit Balsa)</b>
<b>Konventionelle LEP-Beschichtungen</b>	<b>LEP-Beschichtungen auf der Grundlage von PU-Rohstoffen von Covestro</b>

**Die Evaluierung ergab vier eindeutige Vorteile der PU-Lösungen von Covestro** – bei einem bedeutenden Potenzial zur Senkung der Stromgestehungskosten (LCOE), zur Vermeidung von Verlusten bei der jährlichen Energieproduktion (AEP) und zur Steigerung der Gesamtenergieerzeugung eines Offshore-Windparks über die Lebensdauer der Windkraftanlagen:

Bis zu 8 % geringere Fertigungskosten für die Rotorblätter durch kürzere Produktionszyklen und Stoffeinsparungen.	Einsparungen von bis zu 30 % bei den Kosten für kleinere Reparaturen und Wartung aufgrund der hervorragenden mechanischen Eigenschaften der PU-Verbundwerkstoffe und der verbesserten Haltbarkeit der LEP-Beschichtung.
Zusätzliche Energieerzeugung von bis zu 8 % über die gesamte Lebensdauer der Windkraftanlage dank der potenziellen Gewichtsreduzierung der Rotorblätter, die die Ermüdung der Klebverbindung verringert und die Lebensdauer der Rotorblätter um mindestens 2 Jahre verlängert.	Zusammengenommen könnten diese Lösungen den LCOE-Wert über die Lebensdauer einer Windkraftanlage um schätzungsweise 2,4 % senken und den Verlust an Effizienz verhindern, wodurch sich die durchschnittliche AEP um etwa 1 % erhöhen würde.

## Größere, leichtere und langlebigere Rotorblätter

Die Vorteile von PU-Verbundwerkstoffen schaffen einen Mehrwert entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Hochwertige PU-Stoffe von Covestro mit verbesserten Verarbeitungseigenschaften (niedrige Viskosität und schnelle Aushärtung) ermöglichen Herstellern von Rotorblättern einen effizienteren und kostengünstigeren Produktionsprozess. Dies wiederum bringt Vorteile für die Betreiber von Windparks, da die Gesamtbetriebskosten gesenkt und die Energieproduktivität erhöht werden. Verbesserte Stoffeigenschaften in Bezug auf Fasergehalt, mechanische Festigkeit und Ermüdungsfestigkeit bieten Herstellern von Rotorblättern die Möglichkeit, neue, verbesserte Rotorblätter mit besseren mechanischen Eigenschaften und leichteren Teilen zu entwerfen und so die Grenzen für Rotorblattdesigns zu verschieben, um die Produktion von sauberer und günstiger Energie zu erhöhen. Diese Eigenschaften spielen eine wichtige Rolle bei der Senkung der Energiekosten und ermöglichen den schnellen Aufbau neuer Windkapazitäten.

Die in diesem Beitrag vorgestellten Lösungen von Covestro sind weltweit unter den folgenden Handelsnamen erhältlich: Baydur®, Desmodur®, Desmophen NH® und Bayhydrol®. Besuchen Sie [www.solutions.covestro.com](http://www.solutions.covestro.com) für weitere Informationen über Lösungen für die Windenergieerzeugung und andere Anwendungen dieser Produkte.

Hier finden Sie weitere Informationen:

**#EfficientWindPower - Efficient wind power systems | Covestro | Covestro AG**

Es liegt außerhalb unserer Kontroll- und Einflussmöglichkeiten, in welcher Art und Weise und zu welchem Zweck Sie unsere Produkte, technischen Unterstützungen sowie Informationen (unabhängig ob mündlich, schriftlich oder anhand von Produktionsbewertungen erhalten) einschließlich vorgeschlagener Formulierungen und Empfehlungen, anwenden und/oder einsetzen. Daher ist es unerlässlich, dass Sie unsere Produkte, technischen Unterstützungen und Informationen sowie Formulierungen und Empfehlungen eigenverantwortlich daraufhin überprüfen, ob sie für die von Ihnen beabsichtigte Verarbeitung und Anwendung auch tatsächlich geeignet sind. Eine anwendungsspezifische Untersuchung muss mindestens eine Überprüfung auf Eignung in technischer Hinsicht sowie hinsichtlich Gesundheit, Sicherheit und Umwelt umfassen. Derartige Untersuchungen wurden nicht notwendigerweise von Covestro durchgeführt und Covestro hat keine Zulassungen oder Genehmigungen für eine bestimmte Anwendung oder Nutzung der Produkte eingeholt, sofern dies nicht ausdrücklich erklärt wurde. Wenn die vom Käufer beabsichtigte Verwendung in dem Einsatz für Arzneimittel oder Medizinprodukte oder in Vorstufen für Medizinprodukte<sup>1</sup> oder einer anderen spezifisch regulierten Anwendung liegt, die zu einer Covestro selbst treffenden regulatorischen Anforderung führt oder führen kann, muss Covestro dieser Verwendung vor dem Verkauf ausdrücklich zustimmen.

<sup>1</sup>Siehe Leitfaden für den Einsatz von Covestro-Produkten in einer medizinischen Anwendung. Der Verkauf aller Produkte erfolgt – sofern nicht schriftlich anders mit uns vereinbart – ausschließlich nach Maßgabe unserer Allgemeinen Verkaufsbedingungen, die wir Ihnen auf Wunsch gerne zusenden. Alle Informationen und sämtliche technische Unterstützungen erfolgen ohne Gewähr (jederzeitige Änderungen vorbehalten). Es wird ausdrücklich vereinbart, dass Sie jegliche Haftung (Verschuldenshaftung, Vertragshaftung und anderweitig) für Folgen aus der Anwendung unserer Produkte, unserer technischen Unterstützung und unserer Informationen selber übernehmen und uns von aller diesbezüglichen Haftung freistellen. Hierin nicht enthaltene Aussagen oder Empfehlungen sind nicht autorisiert und verpflichten uns nicht. Keine hierin gemachte Aussage darf als Empfehlung verstanden werden, bei der Nutzung eines Produkts etwaige Patentansprüche in Bezug auf Werkstoffe oder deren Verwendung zu verletzen. Es wird keine konkludente oder tatsächliche Lizenz aufgrund irgendwelcher Patentansprüche gewährt.  
Edition: 2022 · Gedruckt in Deutschland.



Covestro Deutschland AG  
Kaiser-Wilhelm-Allee 60  
51373 Leverkusen  
Germany

[solutions.covestro.com](http://solutions.covestro.com)  
[info@covestro.com](mailto:info@covestro.com)