



## Special Türme

# Mehr Turm, bitte!

Welche Hybridturm-Hersteller bauen Kapazitäten aus? Welche Innovationen und Akteure ermöglichen neue Nabenhöhen?

Foto: Max Bögl Wind AG / A.Mayr

### **Dienstleister wird Produzent**

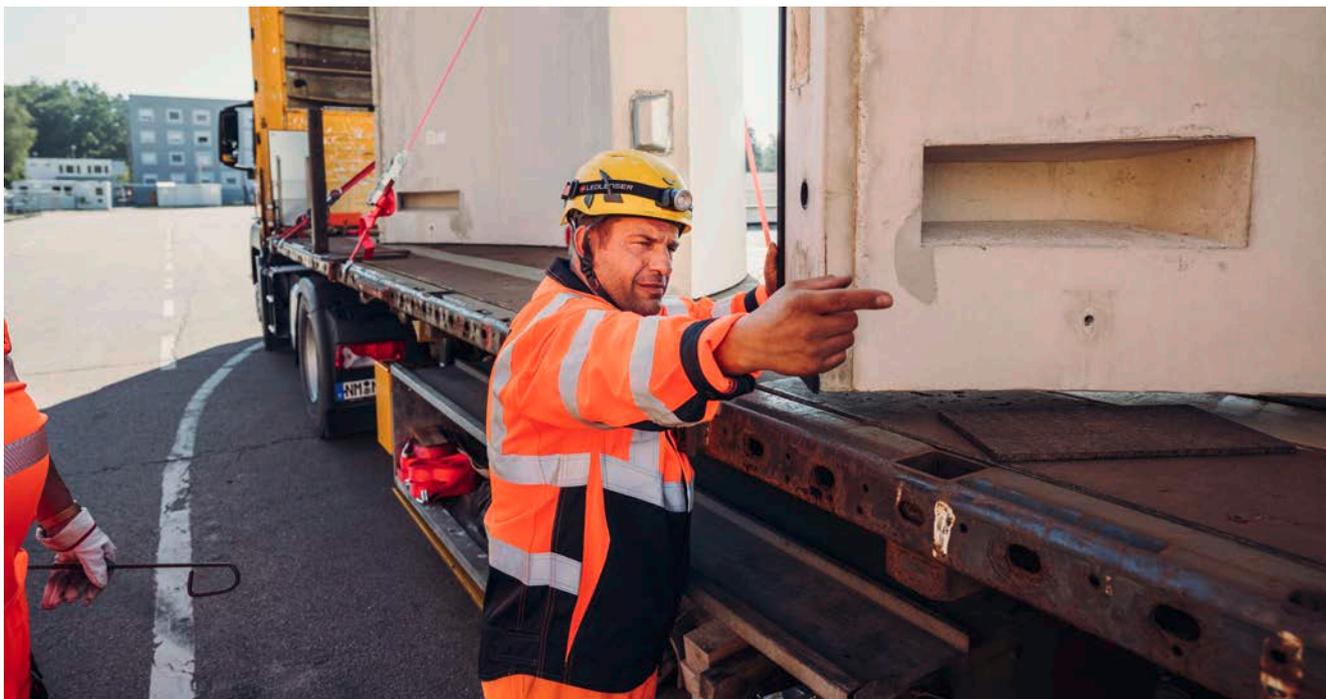
Enercon-Dienstleister bietet alternatives modulares Turmkonzept mit besserer Lastableitung an. | 41

### **Turbinenbauer macht´s selbst**

Im deutschen Onshore-Windmarkt bringt führender Windturbinenbauer Betonturmerfahrung mit ein. | 45

### **Bolzentechnik bewältigt Lasten**

Spezialist für Verschraubungstechnik macht Lasten zwischen Beton- und Stahlturm besser beherrschbar. | 47



Transport von Max-Bögl-Fertigbetonteilen für Hybrid-Windturbinentürme

Foto: Max Bögl Wind AG / A. Mayr

# Hybrid, hoch, sicher, schnell

Beton-Stahl-Türme für immer mehr und immer größere Turbinen erfordern Entwicklung und neue Produktionskapazitäten. Beides kommt.

TILMAN WEBER

**K**napp sind die Fertigungskapazitäten schon jetzt. Ein Gedankenspiel: Hätte Branchen-Primus **Max Bögl** bei voller Auslastung seiner Werke Sengenthal in Bayern und Osterrönnfeld in Schleswig-Holstein alle Fertigbeton-Turmsegmente nur für die 2023 in Deutschland an Land errichteten Windparks gefertigt und nichts exportiert, hätte das Spezialunternehmen noch kaum mehr Türme bauen können als für die Hälfte der 747 Turbinen. Zwar sind Installationen mit Nabenhöhen bis 120 Meter abzuziehen, weil hier reine Stahltürme genügen. Trotzdem hätte die Vollausslastung der Werke nicht gereicht.

Das Unternehmen will der stark wachsenden Nachfrage folgen. Statt bisher maximal für 400 will es 2024 schon Bauteile für 550 Türme liefern, wie der Vorstand der Max Bögl Wind AG Josef Knitl ERNEUERBARE ENERGIEN informiert. Mit Partnerfirma Bettels Betonfertigteile baut Max Bögl in deren ostfriesischem Werk Emden eine langfristige Produktion für jährlich 200 Türme auf (Interview rechte Seite).

Der Bedarf an mehr Fertigungskapazitäten für Türme aus Betonfertigteilen ist riesig, weil er

600

**HYBRIDTÜRME** pro

Jahr will Max Bögl ab 2025 produzieren. Dazu nimmt das Unternehmen in Emden 2024 die dritte Produktionsstätte in Betrieb.

exponentiell wächst. So gibt das Erneuerbare-Energien-Gesetz seit 2022 vor, dass Ende 2030 Windturbinen an Land mit 115 Gigawatt (GW) ins Stromnetz einspeisen. Dafür müssten jährlich 1.800 große Anlagen hinzukommen, bei im Schnitt fünf Megawatt (MW) Nennleistung. Würde das die Zahl der benötigten Türme auf absehbare Zeit verdoppeln, werden zudem Hybridtürme mit unterer Beton- und oberer Stahlzylinderhälfte ihren Anteil daran massiv erhöhen. Zulieferer wie Max Bögl setzen auf diese, um den Turmfuß mit sehr großen Radien standfest auszuliegen, den Turm bis zum Übergang zum Stahlturm zu verjüngen und Turmschwingungen zu begrenzen. Hybridturmfirmen bauen die großen Radien nämlich aus Kreissegmenten. Anders als komplette Stahlzylinderabschnitte dieser Durchmesser passen solche Halb-, Drittel- oder mehr segmentierte Betonschalen bei Transporten auf Straße oder Schiene unter Brücken hindurch. Dazu kommt: Bis 169 Meter waren Türme 2023 hoch. Sie werden künftig noch höher. Damit steigt die Zahl der Betonteile pro Turm.

Doch es gibt weitere Akteure auf dem Markt. Windturbinenhersteller errichteten zuletzt ▶

## Modular & kundenspezifisch – Der Turmbaukasten für Windturbinen

### Sie erhöhen die Fertigung um 200 Türme. Das sind 50 Prozent mehr von heute auf morgen quasi. Wie ist das zu bewältigen?

» **Josef Knitl:** Grundsätzlich ist es wichtig, dass wir überall in jedem der Werke sowie auch in neuen Fertigungen für gleichartige Produktionsabläufe sorgen. So lassen sich bewährte Prozesse 1:1 in eine neue Fertigungsumgebung übertragen, ohne dass man jedes Mal bei null anfängt. Dieses Prinzip erstreckt sich dabei über alle Fertigungskomponenten, von den Bewehrungsarbeiten über die Produktion mit den Schalungsbatterien und das Schleifen der Betonsegmente per CNC-Anlagen bis hin zur Beschichtung.

» **Thorsten Betz:** Kritisch für einen ausreichend schnellen Ausbau der Produktionskapazitäten waren insbesondere die Lieferzeiten der Maschinenkomponenten wie CNC-Anlagen. Wir haben dafür vorausschauend frühzeitig Vorbestellungen getätigt, um die kritischen Komponenten im geplanten Zeitraum geliefert zu bekommen. Auch die Standortwahl für die Fertigungsstätte erforderte eine ausreichende Vorbereitungszeit. Zu klären war, ob wir überhaupt eine eigene neue Fertigungsstätte aufbauen wollen oder lieber auf einen Dienstleister mit einem bestehenden Werk und mit schon eigener Erfahrung in der Fertigung von Betontürmen setzen.

### Je eine Fertigung in Emden, Schleswig-Holstein und Bayern: Die Standortwahl ist natürlich auch eine logistische Entscheidung. Wie viel verkürzt die neue räumliche Nähe zu den Kunden die Lieferzeiten?

» **Josef Knitl:** Durch unsere Standortwahl berücksichtigen wir, dass zwei Drittel unserer Projekte im Norden stattfinden. Über 50 Prozent unserer derzeitigen Errichtungen finden in Schleswig-Holstein, Niedersachsen und NRW statt. Mit der neuen Fertigungsstätte in Emden verkürzen wir die logistischen Wege für diese Auftragsregion. Sonst haben wir bisher Projekte in NRW aus unserem bayerischen Werk in Sengenthal entweder mit dem Zug oder mit dem Lkw beliefert, wobei wir mehr und mehr auf die Bahn umgestiegen sind.

### Wie flexibel können Sie unterschiedliche Betonturmhöhen anbieten?

» **Josef Knitl:** Grundsätzlich können wir mit unserem modularen System mit Höhengsprüngen von 2,80 Meter jegliche Höhen anbieten. Dabei macht nicht jede Höhe für jeden Anlagentyp Sinn, zumal sie jeweils zertifiziert werden muss, Lasten und Eigenfrequenzen zu bemessen sind. In der Regel

„Die Lasten sind im Vergleich zu 2010 um den Faktor drei gestiegen. Aktuell zielt unser bewährtes Turmsystem auf eine beständige Evolution statt auf eine Revolution.“



**Josef Knitl,**  
Vorstand,  
Max Bögl Wind AG



**Thorsten Betz,**  
Leiter Engineering,  
Max Bögl Wind AG



entwickeln wir ein bis drei verschiedene Nebenhöhen für jeden Grundtyp einer Anlage.

### Die Höhe der Türme, die Lasten im Wind und die Turmkopfmassen nehmen stetig zu. Wie halten sie die Stabilität der Vorspannung für das Zusammenhalten der Turmsegmente aufrecht?

» **Thorsten Betz:** Wir haben vor fünf Jahren das Turmsystem weiterentwickelt, um es im Hinblick auf immer höhere Lasten anzupassen. Diese sind im Vergleich zum Zeitpunkt unseres Markteintritts von 2010 um den Faktor drei gestiegen. Wir müssen unser Baukastensystem für diesen Lastenanstieg immer wieder weiterentwickeln und haben uns für diese Anpassungen eine gute Basis geschaffen. Aktuell zielt unser mittlerweile bewährtes Turmsystem auf die beständige Evolution statt auf Revolution ab.

### Der Übergang vom Betonturm zum Stahlturm gilt als anspruchsvoll. Wie sichern sie diese Konstruktion gegen in Auslenkung und Kraftmoment zunehmende Lasten ab?

» **Thorsten Betz:** Im Laufe dieses Jahres werden wir für das Übergangsstück ein neues Konzept zur Verfügung haben, mit dem wir für die nächste Anlagengeneration die bekannten neuralgischen Stellen in den Hybridtürmen deutlich robuster gestalten. Dabei wollen wir nicht unbedingt mehr Masse in die Konstruktion bringen, sondern tendenziell weniger im Verhältnis zu den wachsenden Lasten.

### Welche Rolle spielt Sensorik im Turm, welche Überwachung bieten Sie an, welchen Turmservice?

» **Josef Knitl:** Sensorik lässt sich nutzen, um die Lebenszeit des Turms oder seiner Komponenten entsprechend vorab definierter Anforderungen beibehalten oder erweitern zu können. Wir können sie auch dafür nutzen, um bestimmte Stellen im Turm zu optimieren. Wir nutzen beides in Abstimmung mit den Anforderungen unserer Kunden und den Erkenntnissen, die wir daraus gewinnen wollen.

» **Thorsten Betz:** Auch früher schon haben wir insbesondere bei neuen Prototypen eine gewisse Instrumentierung vorgesehen, um Eingangsparameter klassifizieren und in der Entwicklung neuer Turmtypen nutzen zu können. Einen eigenen Service haben wir nicht, weil die Betontürme an sich in der Regel keinen benötigen. (TW) ■

Fotos: Max Bögl Wind AG



**Web-Wegweiser:**  
[mbrenewables.com](http://mbrenewables.com)

selbst mit eigenen Betonturmkonzepten oder mit Partnern aus der Betonfertigbaubranche die untere Hälfte der Hybridtürme, eröffneten mobile Fertigungsstätten an Standorten für große Windparkprojekte. Und spezialisierte Zulieferer reagieren auf den künftigen Bedarf mit Innovationen und dem Ausbau der Kapazitäten. Bei besonders großen Windparkprojekten insbesondere auch im Ausland nutzen wiederum auch die Spezialisten von Max Bögl schon seit 2016 das Konzept einer eigens entwickelten mobilen Turmsegmente-Fertigung nahe der Baustellen. 2019 gab es dafür einen Innovationspreis.

Dank einer Fortentwicklung des Baukastensystems und des Turmdesigns vor fünf Jahren kann das Unternehmen inzwischen sein Turmmodell immer wieder neu an die wachsenden Lasten aus immer größeren Nennleistungen, Rotordurchmessern und Turmhöhen anpassen. Max Bögl war 2010 in den Windenergiemarkt eingestiegen – und bilanziert eine Erhöhung der Lasten bis heute auf das Dreifache. 2024 werde die Entwicklungsabteilung ▶

0,7

**MILLIMETER** breite Risse treten an der Außenwand des Adapters zwischen Beton- und Stahlabschnitt des Turmes mitunter auf. Das lässt sich reparieren. Neuentwicklungen der Adapterkonstruktion vermeiden unnötige Spannungen im Material.



Foto: KTW Kunststoff-Technik

Klaus Deininger, Geschäftsführer, KTW Kunststoff-Technik, an Hybridturm

**ANZEIGE**

## „Wir schlagen Tragwerksverstärkungen mittels CFK-Sheets vor“

**Sie bieten Reparaturen für Hybridtürme insbesondere am Übergang von unterer Beton- zu oberer Stahlhälfte an. Was genau tun Sie dabei?**

» **Klaus Deininger:** Wir reden hierbei von einer hochelastischen Abdichtung besonders im Bereich der Adapterelemente von Hybridtürmen, einer „Bandage“. Hier, wo Spannglieder an der Turminnen- und ein im Beton eingelassener Ankerkorb aus Stahl die Turmhälften zusammenhalten und hohe dynamische Bewegungen herrschen, kann es zu Rissen im Beton kommen. Dort kann es zu Wasserführungen bis ins Innere kommen. Wir dichten außen so ab, dass an die Bewehrung kein Wasser gelangt, und stoppen die Gefahr von Rostbildung. Wir haben hier Risse bis zu 0,7 Millimeter geschlossen.

**Sind Sie auch bei neuen Betonhybridtürmen im Pflegeeinsatz?**

» **Klaus Deininger:** Auch dort können Risse auftreten. Inzwischen sind bei höheren Türmen vereinzelt in 100 Meter Höhe flächige bis zu fünf Zentimeter tiefe Abplatzungen aufgetreten. Hier sind konstruktive Sanierungsmaßnahmen zur Tragwerksverstärkung notwendig. Im Gegensatz zur Möglichkeit, Stahlmanchetten um den Turm zu legen, schlagen



**Klaus Deininger,**  
Geschäftsführer,  
KTW Kunststoff-  
Technik



wir Tragwerksverstärkungen mittels CFK-Sheets aus Carbon-Faser-Kunststoffen vor. Diese kommen zum Beispiel sonst zur Verstärkung runder Brückenträger zum Einsatz. Unser Unternehmen ist mit diesen Lösungen zertifiziert und fremdüberwacht. Vor der Tragwerksverstärkung mit eben diesen CFK-Sheets werden Betonausbruchsstellen klassisch mit polymermodifizierten Betonersatzsystemen reprofiliert.

**Wie lange brauchen Sie für eine Sanierung?**

» **Klaus Deininger:** Etwa eine Woche für eine Anlage zum Beispiel bei Sanierung mit den CFK-Sheets.

**Wie schnell können Sie im Windpark sein, um die Instandsetzung zu starten?**

» **Klaus Deininger:** Sofern es die Witterung erlaubt, übernehmen wir zeitnah. Dabei passiert im Winter wegen der Nässe und dem Frost wenig – erst ab März sind die Arbeiten erfahrungsgemäß möglich. Unser Ziel ist es, innerhalb eines Monats eine Instandsetzungsmaßnahme auszuführen. (TW) ■

» **Web-Wegweiser:**

[ktweimar.de/de/einsatzbereiche/sanierung-von-hybridtuermen/](https://ktweimar.de/de/einsatzbereiche/sanierung-von-hybridtuermen/)

Foto: Matthias Eckert - KTW Kunststoff-Technik

## „Wir verringern die Bewehrung im Betonteil des Adapters immens“

### Sie wollen mit bis 200 Meter Nabenhöhe starten. Wie können Sie das als Neuling?

» **Peter Herbers:** Als einer der Windkraftpioniere bauen wir bereits seit 1998 erfolgreich Betontürme für Windkraftanlagen. Entsprechend befindet sich in unserem Unternehmen wahnsinnig viel Know-how in diesem Bereich. Vor drei Jahren begannen wir bereits mit der Entwicklung unseres Konzeptes. Nachdem wir uns von verschiedenen Herstellern von Windenergieanlagen erste Lastangaben hatten geben lassen, legten wir unser Übergangsegment – das Transition Piece – so aus, dass das Design einerseits für damals erstmals produzierte Türme mit einer Gesamthöhe von rund 160 Metern Höhe berechnet war. Gleichzeitig veranschlagten wir bei der Lastauslegung einen Puffer für 30 Prozent, um auch Türme für leistungsstärkere Anlagen mit bis zu 200 Meter Nabenhöhe anbieten zu können.

### Sie kommen mit weniger Schalung aus, als Wettbewerber. Das Design bringe Vorteile bei den Eigenfrequenzen, heißt es zudem. Was hat es damit auf sich?

» **Peter Herbers:** Wir kombinieren den Turmaufbau aus konischen Segmenten – mit sich nach oben verjüngender – und aus zylindrischen Segmenten mit senkrechter Außenwand. So können wir mehrere Segmente aus demselben Schalensatz herstellen. Dabei benötigen wir im Fertigteilwerk außerdem weniger Produktionsfläche.

Ein anderer Aspekt ist die Eigenfrequenz des verspannten Betonturms. Ein nicht geradliniger Verlauf, erzeugt durch den Wechsel zwischen konischen und zylindrischen Turmabschnitten, hat positive Einflüsse auf die Eigenfrequenz.

### Wie flexibel ist Ihr Modulbaukasten?

» **Peter Herbers:** Dank der flexiblen Länge der zylindrischen Abschnitte lässt sich die Lage der verjüngenden konischen Bereiche so variieren, dass wir jedem Hersteller für unterschiedliche Anlagen mit verschiedenen Nabenhöhen wirtschaftliche Türme anbieten können. Derzeit besteht unser Modulbaukasten aus vier zylindrischen und konischen Abschnitten. Weitere Flexibilität erhalten wir dadurch, dass wir sowohl die Höhe als auch die Lage vom Übergangsegment anpassen können.

**Tempo und Termintreue werden beim geplanten starken Windparkausbau und dem erforderlich hohen, auch projektbezogen wechselhaften Errichtungstakt wichtiger. Was lässt sich garantieren?**



„Unsere technische Zielsetzung sah von Anfang an ein leistungsstarkes und prozesssicheres Übergangsegment für die kommende Anlagengeneration vor.“

**Peter Herbers,**  
Geschäftsführer,  
OEHM  
Bauunternehmen

» **Peter Herbers:** Alles wichtige Equipment für unsere Betonturmmontage haben wir eigens entwickelt – vom Montagestern über Montagebühnen bis zum Litzenablassgerät. Für die eigene Betonturmserie haben wir Traversen und Vormontagebühnen konzipiert. Diese ermöglichen uns leiterfreie Entlade- und Vormontagetätigkeiten. Die Ausweitung der Vormontage ermöglicht uns schnelleren Fortschritt bei der windabhängigen Arbeit am Turm. Bei der Produktion der Segmente werden wir mit schlagkräftigen, erfahrenen Partnern zusammenarbeiten.

### Welche Rolle spielt Ihr innovatives Übergangsegment?

» **Peter Herbers:** Unsere technische Zielsetzung sah von Anfang an ein leistungsstarkes und prozesssicheres Übergangsegment für die kommende Anlagengeneration mit hohen Nabenhöhen vor. Die Verbindung von Stahlsegment mit Betonteil im Übergangsegment erfolgt wahlweise über T- oder L-Flansch mit einer Stahlplatte am unteren Rand des Segmentes. Dadurch können wir im Betonabschnitt auf eine einbetonierte Ankerplatte verzichten und verringern den Bewehrungsgehalt immens. Die Aufteilung des Adapters in einen Beton- und einen konischen, relativ kurzen Stahlbereich ermöglicht uns zudem, den Turmdurchmesser im kritischen Bereich, wo die Kraffteinleitung von Stahl in Beton stattfindet, zu vergrößern. Die dadurch entstehende größere Fläche und der erwähnte geringere Bewehrungsgehalt sind bei uns die maßgebenden Faktoren. Das sorgt für weniger Betondruckspannung und erlaubt die fachgerechte Herstellung der Fertigteile im Werk.

Ein T-Flansch mit außen- und innenliegender Bolzenreihe überträgt im Betrieb die Hauptlast des Stahlteils relativ mittig auf den Betonkern und verhindert so Spannungsspitzen im randnahen, unbewehrten Bereich des Betonkörpers. Des Weiteren bietet die Kombination von größerem Radius und Aufteilung der Ankerstangen beim T-Flansch auf zwei Radien größte Vorteile bei der Bewehrungsführung und einhergehender Betonierbarkeit der Betonsegmente. Die im Inneren platzierten Spannlitzen profitieren ebenfalls beim einzuhaltenden Achsabstand vom größeren Radius. Die Vorspannung des gesamten Turms kann wahlweise von unten oder oben erfolgen. Zugleich kann unser Adapter durch die Konizität des integrierten Stahlsegmentes flexibel Vorgaben aller Windenergieanlagenhersteller erfüllen, die den oberen Durchmesser meist auf 4,30 Meter begrenzen wollen. (TW) ■

Foto: OEHM Bauunternehmen

**OEHM**  
WINDENERGIE



**Web-Wegweiser:**  
[oehm-windenergie.de](http://oehm-windenergie.de)



**BETEILIGTE** Firmen dieses Specials

**ENERTRAG BETRIEB**

Tel. 039854/6459-0

**HYTORC**

Tel. 089/230999-0

**KTW KUNSTSTOFF-TECHNIK**

Tel. 036453/8750

**MAX BÖGL WIND**

Tel. 09181/909-0

**NORDEX**

Tel. 040/30030-1000

**OEHM WINDENERGIE**

Tel. 05931/400-0

**TÜV SÜD**

Tel. 0941/460212-0

Foto: Schöning Fotodesign - OEHM Bauunternehmen

Bau eines Beton-Fertigteil-Windenergieturmes



Foto: OEHM Bauunternehmen

Errichtung eines Windenergieturmes durch Turmbau-Unternehmen Oehm in Sainte Croix in der Schweiz im Oktober 2023



Foto: KTW Kunststoff-Technik

Sanierung Hybridturm Windpark Bremerhaven - vorher



Foto: KTW Kunststoff-Technik

Sanierung Hybridturm Windpark Bremerhaven - nachher

ein neues Konzept des Verbindungsmoduls für den Übergang vom Beton- in den Stahlturm vorlegen, sagt Chefingenieur Thorsten Betz. Das von der Lastenzunahme besonders betroffene Übergangsstück wollen die Ingenieure robuster gestalten, ohne mehr Masse in der Konstruktion zu verbauen.

Das Übergangsstück ist eine Herausforderung der Turmbauer. Hier setzen die Ingenieure Ankerkörbe ein und Armierungen, die den unteren Betonturm gegen Materialausbrüche oder Spannungen stabilisieren, die zu Rissen führen könnten. Oder sie nutzen Bolzen, um den Stahlturm mit dem

Flansch von oben und einem Metallgegenstück im anschließenden Betonkörper zu verspannen. Doch wie immer, wenn Metall und Beton zusammenkommen, können Spannungen zu Rissen und Abplatzungen führen. Zusätzlich setzen am Adapter bis zum Turmboden führende Stahllitzen an, die die Turmsegmente aufeinanderpressen.

Einer, der diese Herausforderung sehr gut einschätzen kann, ist Klaus Deininger. Der Sanierungsexperte ist Geschäftsführer der **KTW Kunststoff-Technik GmbH** bei Weimar. Die 2000 gegründete Unternehmenstochter KTW Umwelt-

schutztechnik sanierte von Anfang an Turbinenfundamente in Windparks. Seit 2018 repariert diese auch schadhafte Stellen im Übergangsstück zwischen Betonunter- und Stahlberturm, dem Adapter. Deininger stellte bis 0,7 Millimeter breite Risse an den Betonwänden der Adapter in betroffenen Windparks fest. Um Wasserführungen zur Bewehrung zu stoppen, dichten die KTW-Sanierer die Wände von außen ab (Interview Seite 40).

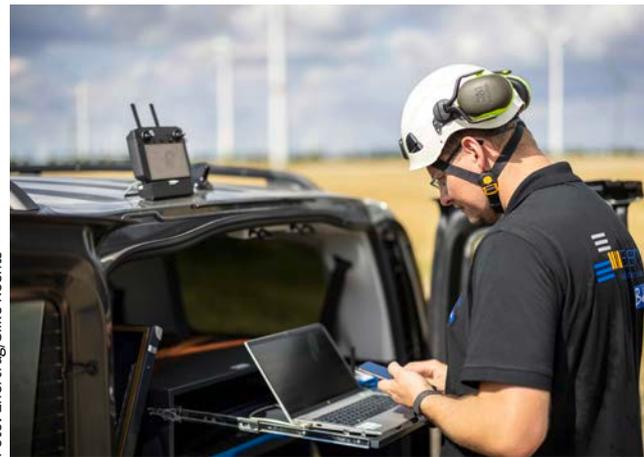
Zudem bieten sie eine Tragwerksverstärkung mit „CFK-Sheets“ in maximal zehn Lagen an. Die Kohlenstofffaser-Kunststoff-Bandagen um die rissbedrohten Betonwände geben dem Material die Festigkeit zurück – ohne wie bei Stahlmanschetten mehr Gewicht an den Turm zu bringen. Ist Beton abgeplatzt, flicken die Thüringer mit polymermodifiziertem Betonersatz – einem Kunststoff-gestärkten Mörtel. „Vier Tage bis eine Woche“ dauert zum Beispiel die Reparatur mit CFK-Sheets.

Das Meppener Betonbauunternehmen **Oehm** antwortet mit einer eigenen Adaptertechnologie

## 5

**METER** Durchmesser hat der Betonabschnitt des Adapters von Oehm Windenergie, um Lasten aus dem Stahlurm gleichmäßiger abzuleiten. Der Adapter enthält aber ein konisches Stahlelement, das den Durchmesser fürs Anflanschen des Stahlturms auf transportgerechte 4,30 Meter verjüngt.

Foto: Enertrag/Silke Reents



Enertrag Betrieb, der Pilot einer Inspektionsdrohne

auf die wachsenden Lasten (Interview Seite 41). Im Unterschied zu klassischen Adaptern besteht diese Innovation aus einem zylindrischen Betonabschnitt mit noch sehr großem Durchmesser von 5 Metern und einem eingelassen sich verjüngenden Stahlstück, an dessen oberem Ende mit 4,30 Meter Durchmesser sich herkömmliche Stahlzylinderturm-Abschnitte anflanschen lassen. Die Innovation hält damit ▶

## ANZEIGE

# „Erhalten von jedem Quadratzentimeter ein hoch aufgelöstes Foto“

### Sie bieten ab 1.4. Drohneninspektionen für Windturbintürme an. Was ist das Ziel?

» **Matthes Schachtner:** Es ist über Seilkletterer sehr aufwändig, eine umfassende Turminspektion durchzuführen. Im Anlagenmarkt haben sich hohe Turmhöhen, Hybridlösungen und alternative Betonurm-Ansätze etabliert. Wir sehen hier seit einigen Jahren Auffälligkeiten an verschiedenen Anlagen, die einen Inspektionsbedarf bedeuten. Durch die Drohneninspektion gibt es heute eine sehr hochwertige, vollumfängliche und kostensparende Möglichkeit.

### Inwiefern reagieren Sie damit auch auf neueste Sicherheitsvorgaben?

» **Matthes Schachtner:** Qualitätsvorgaben und Sicherheitsstandards haben sich hier nicht nennenswert verändert. Ist aber eine Anlage von einer Auffälligkeit betroffen, dann besteht die Sorgfalts- und Überwachungspflicht für den Betreiber. Durch die Drohneninspektion erhalten Betreiber von jedem Quadratzentimeter ihres Turms ein hochauflösendes Foto, das in einem Bericht zusammengefasst und von Experten bewertet wird. Diese Berichte sind so genau und prozessstabil, dass sie hier auch einen Schadensfortschritt darstellen können. Auch die Beweissicherung gegenüber Dritten ist so sichergestellt.



**Matthes Schachtner,** Leiter technischer Dienste, ENERTRAG Betrieb



Foto: Jewgeni Roppel - ENERTRAG

### Wie lange dauert eine Inspektion? Müssen Sie alle Türme eines Windparks abfliegen?

» **Matthes Schachtner:** Die Inspektion vor Ort dauert nur rund eine Stunde je Anlage, anschließend findet die Berichterstellung durch die Experten im Büro statt. Wenn es mehrere Anlagen desselben Typs im Windpark gibt, sollte stets jede der Anlagen befliegen werden, wenn Verdachtsmomente oder sogar festgestellte Schäden vorliegen. Für Weiterbetriebs- oder zustandsorientierte Inspektionen könnte man auch nur eine WEA inspizieren. Bei der Größe der Investitionsentscheidungen in solchen Fällen empfiehlt sich diese Prüfung an allen Anlagen.

### Wie teuer sind Drohneninspektionen?

» **Matthes Schachtner:** Der Kostentreiber sind die Reisekosten der Inspektoren, die deutschlandweit unterwegs sind. Daher macht es Sinn, die Inspektion gekoppelt mit anderen Prüfungen an der Anlage durchzuführen, etwa Maschinen- oder Rotorblattinspektionen. Dann kostet die Drohneninspektion nur 400 Euro pro WEA. Bei größeren Windparks können wir die Kosten noch senken. (TW) ■

» **Web-Wegweiser:**  
[betrieb.enertrag.com](http://betrieb.enertrag.com)



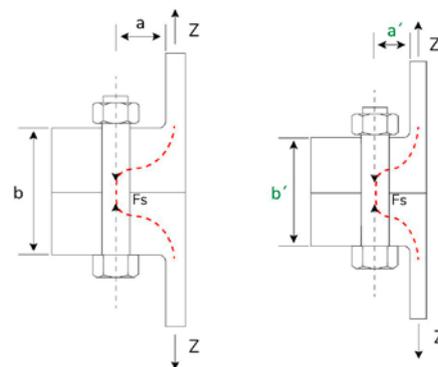
Foto: HYTORC

Hyltorc-Trolley-Set ist ein halbautomatischer Montagewagen für die hydraulische Turmverschraubung.

## 200

**METER** Nabenhöhe ist das Entwicklungsziel einiger Anbieter neuer Hybridtürme. Windturbinenhersteller Vestas kündigte 2022 die 199 Meter Nabenhöhe für sein kommendes Flaggschiff V172 an.

Reguläre Verschraubung    Verdichtete Verschraubung



Grafik: HYTORC

Verdichtet verschraubt: Kraftfluss besser, Bolzen kürzer

die Obergrenze für die Durchmesser der Stahlzylinder ein, die noch die Durchfahrt unter Autobahnbrücken erlaubt. Die Oehm-Ingenieure schafften durch den besonders großen Umfang des Adapters auf der Betonseite großzügige Abstände zwischen Bolzen, Ankerkorb und Litzenverspannung – und brauchen deshalb weniger Bewehrung. Auch kommen sie ohne eingelassene Ankerstahlplatte aus. Die Turmlasten leitet der konische Stahladapter mittig auf den ▶

### ANZEIGE

## „Innovative Konzepte brauchen das Vier-Augen-Prinzip“

### Welche Entwicklungen sehen Sie bei Türmen und Fundamenten?

» **Stephan Mayer:** Die Anlagen werden immer größer und höher. Einige Hersteller gehen bei den Nabenhöhen bereits die 200-Meter-Marke an. Das bedeutet, dass wir bei Beton- und Stahltürmen an die Grenzen der bisherigen Konzepte kommen. Ein „Hochskalieren“ ist wegen der Transport- und Montagerestriktionen nicht möglich, weshalb neue Ideen gefragt sind. Bei den Fundamenten können bewährte Standardlösungen grundsätzlich an größere Anlagen angepasst werden. Hier besteht die Herausforderung darin, die Effizienz zu verbessern. Spannend ist, dass neue Anbieter mit anderen Ideen und Erfahrungen auf den Markt kommen, beispielsweise Hersteller von Holztürmen oder von Fertigbetonteilen für Fundamente.

### Wie lässt sich sicherstellen, dass innovative Konzepte funktionieren?

» **Stephan Mayer:** Schon bei den ersten Überlegungen für ein neues Konzept sollten alle vorhandenen Erfahrungen und Erfahrungswerte abgerufen werden. Während der Planungs- und Entwicklungsphase sind entwicklungsbegleitende Prüfungen durch unabhängige Dritte sinnvoll, um mögliche Fehler



**Stephan Mayer,**  
Leiter Zertifizierung  
Türme, Fundamente  
und Offshore-  
Tragstrukturen von  
Windenergieanlagen,  
TÜV SÜD



zum frühestmöglichen Zeitpunkt zu entdecken und abzustellen. Nach unseren Erfahrungen müssen die Erkenntnisse aus der Planungsphase zudem in Pilotprojekten validiert werden. Man braucht ein wenig Ausdauer bis zum serienreifen Produkt.

### Welche Rolle spielen unabhängige Dritte bei Innovationen?

» **Stephan Mayer:** Gerade Innovationen brauchen das Vier-Augen-Prinzip, um potenzielle Risiken zu minimieren. Wir sehen mit Sorge, dass die Inverkehrbringung von Windenergieanlagen in Zukunft auf Basis der europäischen Maschinenverordnung erfolgen soll. Das bringt zwar deutliche Vorteile, weil die Onshore-Windindustrie nicht mehr an das vergleichsweise starre deutsche Baurecht gebunden ist und sich an internationalen Vorgaben orientieren kann. Aber es entsteht eine Regelungslücke, weil es keine klaren Vorgaben hinsichtlich einer Prüfpflicht für Türme und Fundamente mehr gibt. Wenn wir den Ausbau der Windenergie weiter beschleunigen wollen, brauchen wir klare Regelungen ohne Lücken. Dafür setzen wir uns ein. ■

Foto: TÜV SÜD

» **Web-Wegweiser:**  
[www.tuvsud.com/windenergie](http://www.tuvsud.com/windenergie)

## „Deutschland ist ein klarer Zielmarkt für hohe Türme“

**Sie errichten in Finnland derzeit für einen Anlagenpark mit 25 Windturbinen die ersten Exemplare eines neuen eigens entwickelten Hybridturms. Wie kommen sie voran?**

» **Javier Alvarez Yoldi:** In dem Wettlauf um höhere Türme und größere Rotoren innerhalb unserer Branche hat sich die Nordex Group entschieden, nichts zu überstürzen. Wir haben im November 2023 die ersten zwei N163/5.X-Anlagen auf den eigentwikelten Beton-Stahl-Türmen mit 168 Metern Nabenhöhe in Finnland installiert. Heute können wir sagen, dass es die richtige Entscheidung war, Zeit und Mittel in die Installation dieser Prototypen-Türme zu investieren. Wir konnten hier wertvolle Verbesserungen hinsichtlich unseres Produkts und unserer Prozesse erkennen und umsetzen, die uns bei der anstehenden Serieninstallation 2024 von Nutzen sein werden.

» **Max Jungk:** Wir planen darüber hinaus in diesem Jahr einen weiteren Prototyp mit einer Nabenhöhe von 179 Metern in Deutschland zu errichten. Neben der Erprobung des Designs dienen diese Prototypen dazu, alle Prozesse zu validieren, von der Herstellung, dem Transport und der Vormontage bis hin zur endgültigen Installation vor Ort.

**Haben Sie die nächste Prototyperrichtung für einen Standort in Deutschland geplant, weil es ihr zentraler Markt ist? Wie gehen Sie dabei vor?**

» **Max Jungk:** Deutschland ist ein klarer Zielmarkt für hohe Türme. Die Hybridturm-Technologie ist unsere Antwort auf die Kundenanforderungen an Schwachwindstandorten im Landesinneren, die Energieausbeute von Windenergieanlagen weiter zu steigern. Hohe Stromhandelspreise machen dabei diese Lösung für unsere Kunden im Binnenland noch attraktiver, der Zeitpunkt der Markteinführung ist also ideal.

**Ersetzen Sie mit dem Modell bisher genutzte Turmarchitekturen und Zuliefererstrukturen, um sie zu verbessern, oder ergänzen Sie sie eher?**

» **Max Jungk:** Wir erweitern unser bestehendes Portfolio an Lieferanten für Hybridtürme um eine weitere Variante. Mit Blick auf den deutschen Markt wollen wir bis 2025 ein ausreichendes Volumen erreichen, um die steigende Nachfrage bedienen zu können. Ob wir dann unsere eigene Technologie mit Betonfertigteilen oder die Systeme von etablierten Anbietern einsetzen, hängt vom Projektzeitplan, dem Standort und den Kapazitäten der Lieferanten im Einzelfall ab.

„Die neue Hybridturm-Lösung basiert auf der bewährten Betonturm-Technologie, die Nordex seit mehr als 15 Jahren einsetzt.“



**Javier Alvarez Yoldi,**  
VP Concrete Tower,  
Nordex Group



**Max Jungk,**  
VP Global Product  
Strategy & Sales  
Support,  
Nordex Group

» **Javier Alvarez Yoldi:** Die neue Hybridturm-Lösung basiert auf der bewährten Betonturm-Technologie, die Nordex seit mehr als 15 Jahren einsetzt. Es handelt sich also nicht um eine disruptive technische Änderung, sondern um die logische Weiterentwicklung eines robusten, bewährten Produkts, das angepasst und verbessert wurde, um höhere Nabenhöhen zu erreichen.

**Welche technologischen Anpassungen setzen Sie um?**

» **Javier Alvarez Yoldi:** Der Beton-Stahl-Turm ist ein 100-prozentiges Eigendesign der Nordex Group – wir haben strategisch viel Aufwand in die Entwicklung dieses Designs gesteckt. Für das Übergangsstück waren einige Anpassungen notwendig, statisch gesehen ist das Verhalten dieses Turmsegments bei Vollbetontürmen nicht das gleiche wie bei Hybridausführungen.

**Was ist das logistische Konzept? Die Nordex-Gruppe hat reichlich Vorerfahrung mit der mobilen Fertigung von Betonhybridbauteilen. Spielt das beim neuen Hybridturm eine Rolle?**

» **Javier Alvarez Yoldi:** In den vergangenen zehn Jahren haben wir weltweit insgesamt rund 30 Betonturm-Fabriken errichtet. Heute sind wir an einem Punkt angelangt, an dem wir nicht nur das Produkt und die Produktionsprozesse industrialisiert haben, sondern auch die Art und Weise, wie wir die Fabriken dafür bauen und ausgestalten. Das ist ein klarer Vorteil, mit dem wir die Markteinführung deutlich verkürzen können. Entweder wir beginnen mit dem Bau einer Fabrik von Grund auf, oder wir profitieren von bestehenden Gebäuden und Produktionsstätten, indem wir diese an unsere spezifischen Bedürfnisse anpassen. Abhängig von der Verfügbarkeit vorhandener Produktionsstätten in der Nähe der Windparkprojekte, den Logistikkosten, dem Zugang zu Rohstoffen und so weiter treffen wir die Entscheidung für jedes Projekt. Da es sich bei den meisten Windparkprojekten hierzulande um nicht mehr als fünf Turbinen handelt, ist es in Deutschland sinnvoll, ein Produktionszentrum zu haben, von dem aus wir verschiedene Windparkprojekte bedienen können. Aktuell starten wir die Hybridturm-Produktion in Rostock und analysieren gleichzeitig potenzielle Standorte für eine zweite Produktionsstätte in Süddeutschland. (TW) ■



Fotos: Nordex

» **Web-Wegweiser:**  
[nordex-online.com/de](http://nordex-online.com/de)

Betonkern ab, statt auf die Außenkanten des Betonradius zu drücken und dort Abbrüche zu riskieren. Der größere Radius bringt mehr Auflagefläche des Adapters ein, über die sich die Krafteinleitung in den Betonturm gleichmäßiger und breiter verteilt.

Vor drei Jahren hat Oehm mit der Entwicklung begonnen, bereits mit dem Ziel, ab 2025 die neuen Hybridtürme bis 200 Meter Höhe in Serie zu bauen, wie Geschäftsführer Peter Herbers betont. Oehm ist erfahren, baut seit 1998 in enger Partnerschaft mit Turbinenbauern die Betontürme für Windturbinen. Es setzt auf sich abwechselnde Segmente mit konischer, also schräg verjüngender und zylindrischer Außenwand. So kann Oehm auch Schwingungen verstärkende Eigenfrequenzen in ungefährliche Frequenzbereiche verschieben oder mit weniger Betonschalungen im Werk auskommen.

Die Bausicherheit der Türme gilt derweil als von über Jahre gleichbleibenden Normen reglementiert. Die brancheneigene Fördergesellschaft Windenergie und andere Dezentrale Energien bereitet offenbar erstmals Standards fürs Bewerten der Zustände der Adapter in Hybridtürmen vor. Sie wären allerdings nur Empfehlungen. Wenn es um Betrieb und Instandhaltung geht, greift die Industrie-Richtlinie TR7.

Künftig könnten sich europäische Sicherheitsstandards gemäß IEC 61400-6 durchsetzen. Darauf hat sich TÜV Süd vorbereitet (Interview Seite 44). Insbesondere kann diese Richtlinie wirtschaftlichere Designs erlauben. Denn der für Windkraft genutzte Beton ist besonders fest, um den hochdynamischen Belastungen standzuhalten. Die deutschen Vorgaben geben nur ungenaue Ermüdungswerte für ihn vor. Der IEC-Standard würde eine exaktere Berechnung des Designs erlauben, ohne große Sicherheitszugaben bei Wandstärken oder Bewehrung.

Wenn 2024 ein neuer Eurocode erscheinen wird, der den Rahmen für nichtlineare Berechnungsmethoden absteckt – um auch Wechselwirkungen in komplexen Konstruktionen feiner zu beschreiben –, will Prüf- und Zertifizierungsdienst TÜV Süd die Turmbauer bei der Umsetzung dieses Codes und beim Entwickeln eigener technischer Konzepte unterstützen. Außerdem könnte bald eine Umstellung des Windkraftturmbaus vom starren deutschen Baurecht auf die flexiblere europäische Maschinenrichtlinie folgen. Diese lässt schneller Innovationen zu, es drohen aber Regelungslücken.

Die Turbinenbauer selbst sind auf ein vielfältiges Angebot an Produktionsvarianten mit technologischen Alternativen angewiesen, falls ausfallende Zulieferer auszugleichen sind.

Im Dezember meldete Nordex, die Vielfalt mit einem eigenen Hybridturmkonzept zu erweitern. Jetzt errichtet der Hersteller 25 Hybridtürme dieser

# 2.500

**BETONTÜRME** hat Nordex mit seinem eigenen Betonfertigteile-Baukasten-System in 30 mobilen Betonturm-Fabriken errichtet. Nordex hat nun dieses System für den Bau von Hybridtürmen fortentwickelt. Zwei Türme mit 168 Meter Nabenhöhe stehen schon in Finnland. Nun folgt ein Prototyp mit 179 Meter Nabenhöhe in Deutschland.

Bauweise in einem finnischen Pilotwindpark. Die 168 Meter hohen Türme sollen noch in diesem Jahr entstehen, ebenso ein 179 Meter hoher Prototyp in Deutschland. Nordex nutzt die eigene Betonfertigteile-Architektur, die das Unternehmen für internationale Großprojekte in mobilen Fertigungsanlagen schon 2.500 Mal errichtet hat. Als Innovation entwickelte Nordex den Adapter für den Aufsatz des Stahlturms auf den bisher reinen Betonturm.

Zielrichtung des Windturbinenbauers ist klar der deutsche Markt und dessen Fahrplan: „Wir erweitern unser Portfolio an Lieferanten für Hybridtürme um eine Variante. Mit Blick auf den deutschen Markt wollen wir bis 2025 ein ausreichendes Volumen erreichen“, sagt Max Jungk (Interview Seite 45). Der für die globale Produktstrategie zuständige Nordex-Vize-Präsident erklärt, wie Nordex künftig ja nach Projektzeitplänen, Verfügbarkeit von Zulieferern und Windparkstandort wahlweise mal auf von Nordex beauftragte Zulieferer oder mal auf die eigene Turmbautechnologie setzen will.

Schon bisher nutzt die Branche elektronische Sensorik, um mehr Daten zu sammeln und belastete Orte im Turm besser zu designen. Eine andere Überwachung führt am 1. April das Betriebsführungs- und Inspektionsdienstleister **Enertrag Betrieb** ein. Das Unternehmen bietet schon Drohneninspektionen zur Prüfung von Rotorblättern an. Nun will Enertrag den Dienst auf Türme ausweiten, weil Drohnen anders als Seilkletterer nur eine Stunde fürs Abfliegen jeden Quadratzentimeters der Turmaußenhaut brauchen (Interview Seite 43).

Die Technik lasse auch eine Dokumentation einer Schadensfortentwicklung zu und die genaue fotografische Dokumentation von Schäden, heißt es aus der technischen Abteilung.

Aber auch Grundtechnik wie Verschraubungen erhöhen durch Innovationen die Chancen eines stabilen Größenwachstum der Hybridtürme. Das Unternehmen **Hytorc** hat ein „streckengrenzgesteuertes Anziehen und kombiniertes Vorspannverfahren“ entwickelt, das die Schraubenzahl im Flansch des Adapters erhöhen, aber die Schrauben verkleinern lässt. Der Trick dazu ist, die Schrauben näher an der Turmwand zu platzieren und dem Montierenden jede körperliche Last abzunehmen. Mit zwei entsprechenden Montagewagen lässt sich so ein Flansch pro Stunde verschrauben.

Weil der Schrauber sich zudem mit einer Schiene an den Nachbarmuttern abstützt, kommt dieser weder mit der Flanschoberfläche noch mit der Turmwand in Berührung. Das vermeidet Schäden im Korrosionsschutz (Interview rechte Seite) – und Reparaturen. Es spart also Zeit und Kapital.

Auf beides kommt es ja beim erforderlichen großen Ausbau der Windkraft ab 2025 stark an. ■

## Mit neuen Schraubkonzepten mehr Stabilität und Betriebssicherheit

**Um die Stabilität der Flanschverbindungen der Stahlturmsegmente zu erhöhen, positionieren Sie die Verschraubungen deutlich näher zur Turmwand. Warum können so die Anzahl der Schrauben und die Gesamtvorspannkraft erhöht werden?**

» **Patrick Junkers:** Das HYTORC-Konzept orientiert sich an von APQP4Wind (eine Organisation aus OEMs und Lieferanten der Windindustrie) standardisierten Verbindungselementen: optimierte Kopfschrauben sowie die Standard-ISR-Mutter. Das sind Standard-Bundmutter, die auch als Doppelsechskant hergestellt werden können, die den Anforderungen an Klasse-2-Muttern entsprechen und als voll tragfähig gelten. So kann unserer Auffassung nach die Schlüsselweite um bis zu vier Größen ohne Einbußen reduziert werden. Folglich lassen sich die Muttern deutlich dichter an der Turmwand platzieren, was Raum für zusätzliche Verschraubungen bietet. Diese werden prozesssicher und kontrolliert mit mobilen hydraulischen Drehmomentschraubern in den überelastischen Bereich verschraubt. Dort näher an der Turmwand leiten sie die Kräfte direkter ab.

**HYTORC hat dafür ein spezielles Schraubmontageverfahren entwickelt. Worin besteht die Innovation?**

» **Patrick Junkers:** Dass man mit handelsüblichen, hydraulischen Drehmomentschraubern von HYTORC kombiniert mit einer Dokumentations- und Verfahrenspumpe prozesssicher in den überelastischen Bereich verschrauben kann. Das gilt fürs streckgrenzgesteuerte Anziehen und das kombinierte Vorspannverfahren. Zudem entwickelten wir einen Montagewagen, mit dem sich Schraubverbindungen M72 auch streckgrenzgesteuert, somit überelastisch ohne große körperliche Anstrengung mit bis zu 40.000 Newtonmeter verschrauben lassen.

**Sie setzen optimierte Kopfschrauben und Standard-ISR-Muttern ein. Beeinflusst das die Geschwindigkeit der Montage?**

» **Patrick Junkers:** Nein. Viel Zeit sparen wir dadurch, dass die bisher lose eingelegten Schrauben (um die tonnenschweren Segmente passgenau mittels Krans aufeinanderzusetzen) vor der Montage nicht mehr einzeln umgedreht werden müssen. Nebenbei eliminieren wir eine umständliche und körperlich anstrengende Tätigkeit für den Monteur.

**Sie senken Korrosionsschutz-Kosten. Wie?**

» **Patrick Junkers:** HYTORC setzt auf den drehenden Anzug, für den kein Bolzenüberstand benö-



„Aus dem schnelleren Verschrauben der Turmsegmente ergeben sich kürzere Aufbau- und Kranzeiten.“

**Patrick Junkers,**  
Geschäftsführer,  
HYTORC – Barbarino  
& Kilp GmbH

tigt wird: Der Hydraulikschrauber greift direkt auf die ISR-Mutter zu. Zudem kommt er während des Anziehvorgangs weder mit der Flanschoberfläche noch der Turmwand in Berührung, da er sich über eine Inlineschiene an den benachbarten Muttern abstützt. In anderen Worten: Da der Korrosionsschutz nicht beschädigt wird, muss hier nicht nachgebessert werden, was Zeit und Ressourcen spart.

**Durch Einsatz zweier halbautomatischer Montagewagen schaffen Sie Verschraubungen eines Flansches in einer Stunde. Welche Vorteile hat Ihr Verfahren noch?**

» **Patrick Junkers:** Aus dem schnelleren Verschrauben der Turmsegmente ergeben sich klar kürzere Aufbau- und Kranzeiten plus mehr Arbeitssicherheit dank reduzierter körperlicher Belastungen. Zusätzlich erreichen wir mit unserem Verfahren ein deutlich höheres, gleichmäßiges Vorspannkraftniveau sowie eine höhere, gleichmäßiger verteilte Flächenpressung auf den Turmflanschen bei geringsten Setzverlusten und maximaler Dauerschwingfestigkeit.

**Als entscheidend bezeichnen Sie das streckgrenzgesteuerte Anziehverfahren. Was steckt dahinter?**

» **Patrick Junkers:** Das mobile hydraulische Montageverfahren „Streckgrenzen gesteuert (SGA)“, das für uns seit 2016 eine wichtige Rolle spielt, lastet Normschrauben von vornherein maximal aus. Erreicht wird damit ein deutlich höheres Vorspannkraftniveau bei voller Kontrolle der Schraubenqualität. Darüber hinaus dürfen die Schrauben mit einem Anzugsfaktor  $A = 1,0$  dimensioniert werden. Dadurch können Schraubverbindungen kleiner dimensioniert sowie deren Anzahl und Durchmesser reduziert werden – mit vielen positiven Folgen für Konstruktion und Design. Im Zusammenspiel mit einer fachgerechten Auslegung der Verbindungselemente ist der Weg zur wartungsarmen oder wartungsfreien Schraubverbindung möglich.

**Hierzu gibt es ein Forschungsprojekt ...**

» **Patrick Junkers:** Das IGF-Vorhaben 20838N „Streckgrenzgesteuertes Anziehen von geschraubten Verbindungen M12 bis M72 im Stahlbau“. Im Entwurf des Abschlussberichtes heißt es, dass das streckgrenzgesteuerte Anziehverfahren auch in Verbindung mit HV-Garnituren als prozesssicheres Anziehverfahren im Stahlbau gewertet wird. ■

Foto: Boris Dahm - HYTORC

**HYTORC**



**Web-Wegweiser:**

[hytorc.de/branchen/windenergie](http://hytorc.de/branchen/windenergie)