

Torsionstragverhalten segmentierter Turmkonstruktionen für Windenergieanlagen

Fabian Klein¹, Steffen Hartwig¹, Steffen Marx¹

¹*Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover, Deutschland*

KURZFASSUNG:

Bei der weiteren Kostensenkung der Windstromerzeugung haben sich in den letzten Jahren sogenannte Hybridtürme erfolgreich etabliert. Der untere Teil dieser Turmstrukturen besteht aus aufeinander gestapelten Betonfertigteiltringen, die mit dem aufgesetzten Stahlurm verbunden sind. Mit der neuen Turmgeneration zerlegen vertikale Fugen die Betonsegmente in kleinere Komponenten, sodass Halbschalen einen erheblichen Beitrag zur Reduzierung der Transportkosten und des Montageaufwands leisten. Dieser Artikel beschäftigt sich mit numerischen Voruntersuchungen zum Vergleich der Torsionstragfähigkeiten von konventionellen Kreisring- und geteilten Halbschalenkonstruktionen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Torsionstragverhalten zusammengesetzter Halbschalen deutlich komplexer ist. Die Auswertung der Verdrehsteifigkeiten zeigt, dass die geteilten Segmente lediglich geringfügig kleinere Tragfähigkeiten aufweisen. Das Verhältnis von Reibbeiwert zu Vorspannung wird dabei als signifikante Einflussgröße für die Ermittlung der Fugentragfähigkeit identifiziert.

Keywords: Torsion, trockene Fugen, Hybridturm, Windenergieanlage, Wölbkrafttorsion.

ABSTRACT:

In recent years, so-called hybrid towers have been successfully established themselves in the further cost reduction of wind power generation, especially for large hub heights. The lower part of these tower structures consists of stacked concrete ring segments whereas the upper part is composed of steel sections. With the new generation of towers, vertical joints divide the concrete segments into even smaller components, so that half shells increase transportability and reduce installation effort. This paper deals with numerical investigations to compare the torsional load capacities of conventional circular rings with half shell constructions. The results indicate that the torsional load bearing behaviour of composite half shells is much more complex. The evaluation of the torsional stiffness shows that the divided segments have only a slightly reduced load carrying capacity. The ratio of friction coefficient to prestressing level is identified as a significant factor for determination of joint load bearing capacity.

Keywords: Torsion, dry joints, hybrid tower, wind energy turbine, warping torsion.

1 EINLEITUNG

Um die Ausbauziele im Bereich der erneuerbaren Energien zu erreichen, ist die weitere Kostensenkung der Windstromerzeugung bei der Herstellung und im Betrieb unumgänglich. Leistungsfähigere Anlageklassen und die Erschließung neuer Standorte in windschwachen Regionen oder in Waldgebieten erfordern die Errichtung höherer Turmkonstruktionen für Windenergieanlagen. Insbesondere bei großen Nabenhöhen wurden in den letzten Jahren sogenannte Hybridtürme erfolgreich etabliert. Der Einsatz von modularen Ausführungskonzepten ermöglicht den Turmentwicklern die Größe der Windenergieanlagen sukzessive zu steigern. Dadurch werden mittlerweile Nabenhöhen von über 165 m mit einem Rotordurchmesser von bis zu 130 m errichtet. Der untere Teil dieser zusammengesetzten Turmstruktur besteht aus trocken aufeinander gestapelten Betonfertigteilingen und ist über einen Verbindungsadapter mit dem aufgesetzten Stahlurm verbunden (vgl. Bild 1). Die Verbindung der einzelnen Segmentringe erfolgt über externe Spannglieder, die im Turminnern geführt und im Fundament sowie im Zwischenadapter verankert werden (Bögl et al. 2013). Die Übertragung von Schubkräften zwischen den einzelnen Segmenten wird durch den Reibwiderstand in den Horizontalfugen gewährleistet, der aus der Vorspannung resultiert. Bisher wurde der Spannbetonfertigteilschaft mit konisch zulaufenden Kreisringsegmenten ausgeführt. Die oberen Segmente werden bereits im Fertigteilwerk als Kreisringe hergestellt, wohingegen die unteren Komponenten aus Transportgründen in Form von Halbschalen gefertigt und erst auf der Baustelle formschlüssig miteinander verbunden werden (von der Haar et al. 2015). Die Bemessung der horizontalen Fugentragfähigkeit, insbesondere unter kombinierter Biege- und Torsionsbelastung, birgt enormes Forschungspotential (Hartwig et al. 2017).

Mit der neuen Turmgeneration zerlegen vertikale Fugen die Betonsegmente in kleinere Komponenten, sodass Halb-, Drittel- oder Viertelschalen einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der Transportkosten und des Montageaufwands leisten. Bei dieser neuartigen Konstruktion werden die einzelnen Segmentkomponenten lediglich konstruktiv für Montagezwecke an den vertikalen Fugen miteinander verbunden.

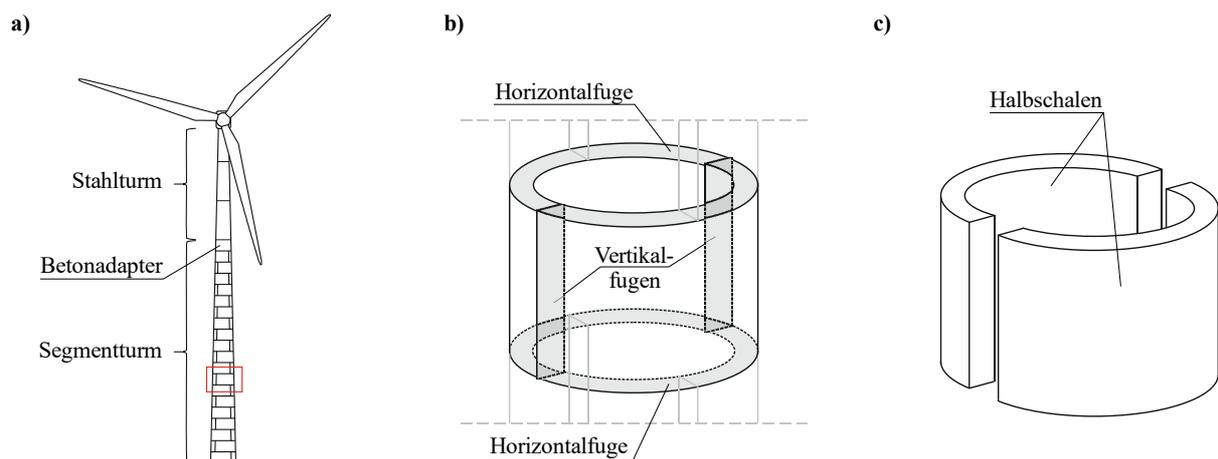


Bild 1: a) Hybridturm für Windenergieanlagen; b) geteilte Stahlbetonsegmente; c) Halbschalensegmente

Das grundsätzliche Tragverhalten von Halb-, Drittel- oder Viertelschalen ist im Vergleich zum konventionellen Kreisring deutlich komplexer und beeinflusst somit auch die Kraftübertragung zwischen den Segmenten (Klein et al. 2019). Insbesondere für kombinierte Biege- und Torsionsbelastungen lassen erste numerische Untersuchungen Tragfähigkeitseinbußen hinsichtlich der

horizontalen Kraftübertragung in den Fugen zwischen den Fertigteilesegmenten mit alternativer Fugenausbildung erkennen (Hartwig et al. 2018).

Im Zuge der stetig wachsenden Nennleistungsanforderungen werden aktuell Konzepte mit Nabhöhen von bis zu 190 m entwickelt. Bei der Herstellung von wirtschaftlichen Turmstrukturen gehen steigende Nabhöhen häufig mit der Vergrößerung des Rotordurchmessers einher. Diese Entwicklung führt zu noch höheren Biege- und Torsionsbelastungen. Der Nachweis der Fugentragfähigkeit wird mit den aktuellen Bemessungsansätzen bei der Auslegung von Kreisringsegmenttürmen für Windenergieanlagen häufig maßgebend. Für die kommenden Turmgenerationen ist es daher unabdingbar, das Torsionstragverhalten von Stahlbetonsegmenten mit vertikaler Fugenausbildung zu untersuchen.

Im Rahmen des Beitrags für das 60. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton werden numerische Voruntersuchungen zur Torsionstragfähigkeit von vorgespannten Kreisring- und Halbschalensegmenten für Turmstrukturen von Windenergieanlagen vorgestellt. Dabei werden die verschiedenen Einflussparameter hinsichtlich der Fugentragfähigkeit untersucht und das unterschiedliche Torsionstragverhalten von Segmenttürmen mit Kreisring- und zusammengesetzten Halbschalenquerschnitten diskutiert. Der Schwerpunkt der numerischen Voruntersuchungen für Kreisring- und Halbschalenquerschnitte liegt auf der Belastungsteilkomponente der Torsion, sodass die Vorstellung der experimentellen Versuche sowie die Interaktion von Biegung und Querkraft in zukünftigen Veröffentlichungen erfolgt.

2 STAND DER TECHNIK

2.1 Aktuelle Bemessungsansätze

Bei der Errichtung von Spannbetonfertigteiltürmen in Segmentbauweise werden die Kreisringkomponenten ohne Verbindungsmittel trocken übereinandergestapelt und extern vorgespannt. Die dadurch entstehenden horizontalen Fugen erlangen ihre Torsionstragfähigkeit über die Reibung zwischen den Segmenten, die über die Vorspannung aktiviert wird.

Infolge einer Torsionsbeanspruchung beschreibt der *Bredtsche* Schubfluss die resultierende Schubkraftübertragung in der horizontalen Fuge für dünnwandig geschlossene Querschnitte (vgl. Bild 2c). Die tatsächliche Verteilung der Schubspannungen nach *Saint-Venant* in Bild 2b nimmt beim Kreisringquerschnitt nach außen hin zu. Mit der Näherung nach *Bredt* stellen sich ausschließlich randparallele Schubspannungen ein, sodass ein Radialanteil vernachlässigt wird (Francke et al. 2005).

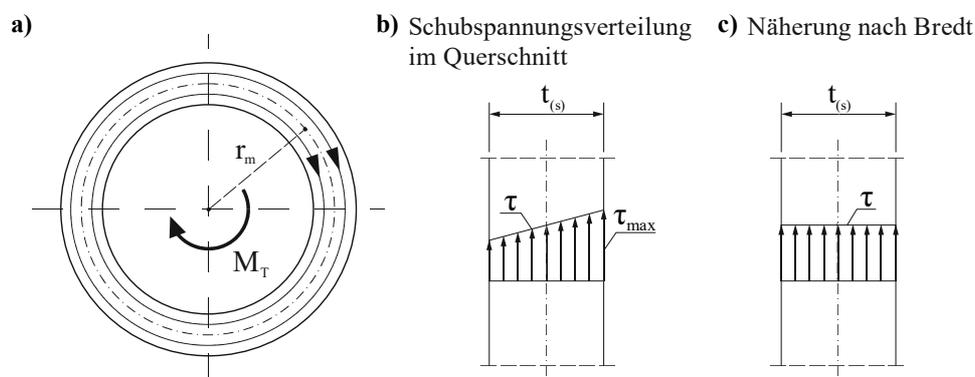


Bild 2: Schubspannungsverteilung im Kreisringquerschnitt unter Torsionsbeanspruchung

Der über die Wandstärke und entlang des Querschnitts gleichmäßig verteilte Schubspannungsverlauf nach *Bredt* bestimmt sich aus der Projektion des Torsionsmoments $M_T(x)$ auf die doppelte Querschnittsmittelfläche A_m bezogen auf die Wandstärke $t(s)$.

$$\tau_{xs,Ed}(x, s) = \frac{M_T(x)}{2 \cdot A_m \cdot t(s)} \quad (1)$$

Aus der Annahme einer gleichmäßigen Normalspannungsverteilung aus Vorspannung resultiert sowohl über die Wandstärke als auch entlang des Kreisringquerschnitts ein konstanter Schubspannungswiderstand. Die Fugentragfähigkeit in der Horizontalfuge ergibt sich für eine Torsionsbeanspruchung aus dem Produkt der Normalspannungen infolge Vorspannung und dem Reibbeiwert μ .

$$\tau_{xs,Rd} = \frac{P_{m0}}{A_c} \cdot \mu \quad (2)$$

Der aktuelle Bemessungsansatz für die horizontalen Fugen von vorgespannten Kreisringsegmenten unter der üblichen Kombination aus Biege-, Torsions- und Querkraftbeanspruchungen beruht auf den Ansätzen von Grünberg & Göhlmann (2011). Unter der Verwendung der klassischen Torsionstheorien nach *Bredt* und *Saint-Venant* für dünnwandig geschlossene und dünnwandig offene Fugen erfolgt der Nachweis in der Fuge für die ertragbaren Schubspannungen nach DIN EN 1992. Numerische Berechnungen sowie experimentelle Untersuchungen zeigen deutlich, dass dieser Bemessungsansatz nicht auf die vorhandene Konstruktionsart und Belastungssituation anwendbar ist (Hartwig et al. 2017, Hartwig et al. 2019). Die infolge Biegung veränderliche Normalspannungsverteilung in den horizontalen Kontaktflächen hat einen signifikanten Einfluss auf die Fugentragfähigkeit.

Die Weiterentwicklung der Konstruktion und die damit verbundene Zerlegung der Kreisringe im Tragsystem zu Halb-, Drittel- oder Viertelschalen beeinflusst erheblich das Tragverhalten hinsichtlich der Torsionstragfähigkeit des Segmentturms (Hartwig et al. 2018). Bei Kreisringsegmenten oder kraft- und formschlüssig miteinander verbundenen Halbschalenkomponenten liegt der Schubmittelpunkt im Schwerpunkt des (zusammengesetzten) Kreisrings, sodass diese Querschnitte wölbfrei sind. Mit der neuartigen Turmgeneration führen trocken ausgeführte vertikale Fugen in den Stahlbetonsegmenten zu offenen zusammengesetzten Querschnitten. Für offene dünnwandige Querschnitte wird die Schubspannungsverteilung im Querschnitt infolge einer Torsionsbeanspruchung nach *Saint-Venant* bestimmt (Mahnken 2015). Im Gegensatz zu geschlossenen dünnwandigen Querschnitten stellt sich bei offenen Profilen ein über die Wandstärke linearer Schubspannungsverlauf ein (vgl. Bild 3).

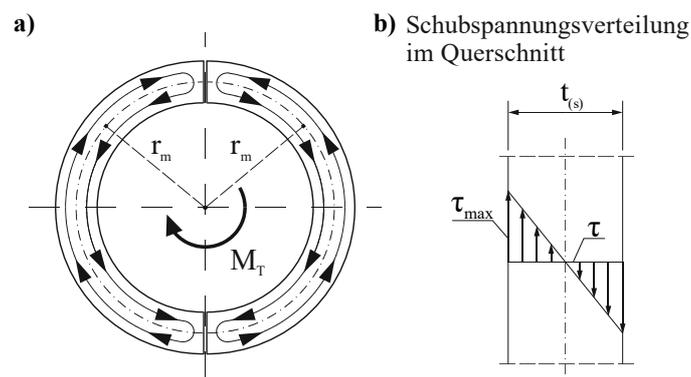


Bild 3: Schubspannungsverteilung in zwei Halbkreisquerschnitten unter Torsionsbeanspruchung

Mit der Projektion der einwirkenden Torsion auf das Trägheitsmoment des Querschnitts I_T multipliziert mit der Wandstärke ergibt sich die Verteilung der Schubspannung offener dünnwandiger Profile.

$$\tau_{I,Ed}(x, s) = \frac{M_T(x)}{I_T} \cdot t(s) \quad (3)$$

2.2 Theorie der Wölbkrafttorsion

Die Verwendung von Halb-, Drittel oder Viertelschalen geht mit dem Verlust der Wölbfreiheit der zusammengesetzten offenen dünnwandigen Querschnitte einher, da die Lage des Schubmittelpunkts M nicht mehr identisch zum Schwerpunkt S ist (vgl. Bild 4c). Somit fallen im Gegensatz zum Kreisringquerschnitt die Drehachse und die Systemachse nicht mehr zusammen. Das Bild 4a zeigt, dass sich die Ausgangsquerschnitte bei Torsionsbeanspruchungen aus ihrer Ebene herauswölben. Dabei liegen die Endpunkte der Verwölbungen der Profilmittellinie stets auf einer räumlich gekrümmten Kurve (Bornscheuer 1952). Die Torsionstheorie nach *Saint-Venant* beinhaltet die Randbedingung der Gabelagerung, sodass die Querschnittsverwölbungen infolge Torsion in Form von Axialverschiebungen ungehindert auftreten können. Bei der neuartigen Konstruktion mit segmentierten Halbschalen sind die vertikalen Fugen zu den benachbarten Segmenten um 90° versetzt angeordnet, sodass die Randbedingung der freien Verformbarkeit nicht mehr erfüllt ist. Aus dieser Wölbbehinderung resultieren zusätzliche Normal- und Schubspannungskomponenten für die Halbschalen, die das Torsionstragverhalten und somit die Fugentragfähigkeit derartiger zusammengesetzter Querschnitte maßgeblich beeinflussen (vgl. Bild 4b).

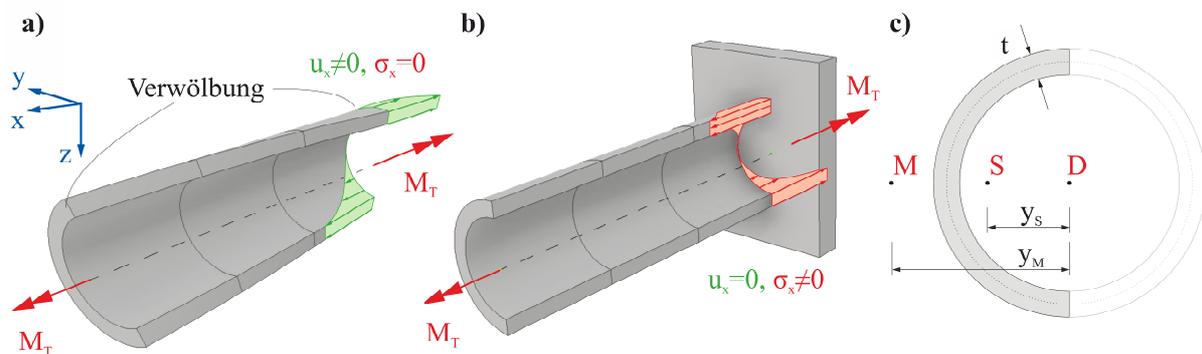


Bild 4: Torsionstheorie a) ohne Wölbbehinderung b) mit Wölbbehinderung c) Querschnittsparameter

Die Analogie zum biegebeanspruchten Zugstab nach Theorie II. Ordnung bietet die Möglichkeit, einen Stab mit einer Beanspruchung durch Wölbkrafttorsion wesentlich anschaulicher zu beschreiben. Die formale Kongruenz der Differentialgleichungen und der mathematischen Lösungsverfahren ist offensichtlich, sodass mit dem Lösen der Differentialgleichung der Wölbkrafttorsion unter der Berücksichtigung der vorhandenen Rand- und Übergangsbedingungen analog zur Biegebeanspruchung das Trag- und Verformungsverhalten bestimmt werden kann (Lindenberger 1953).

$$EI_w \cdot \vartheta^{IV}(x) - G \cdot I_T \cdot \vartheta^{II}(x) = m_T(x) \quad EI_y \cdot w^{IV}(x) - N \cdot w^{II}(x) = q_z(x) \quad (4), (5)$$

Die Differentialgleichung des Wölbmoments M_w ergibt sich in Analogie zum Biegemoment M_y aus dem Produkt des E-Moduls E mit dem Wölbwiderstand I_w und der zweifachen Ableitung der Verdrehung ϑ^{II} , die die Wölbbehinderung definiert.

$$M_w(x) = -E \cdot I_w \cdot \vartheta^{II}(x) \quad M_y(x) = -E \cdot I_y \cdot w^{II}(x) \quad (6), (7)$$

Die Wölbnormalspannungen σ_w ergeben sich aus dem Quotient von Wölbmoment und Wölbwiderstand multipliziert mit der Einheitsverwölbung $\bar{\omega}^M$, die die Wölbaffinität des Querschnitts beschreibt.

$$\sigma_w = -\frac{M_w}{I_w} \cdot \bar{\omega}^M \quad \sigma_w = -\frac{M_y}{I_y} \cdot z \quad (8), (9)$$

Zur Beschreibung des Wölbverhaltens von geteilten Kreisringsegmenten unter Torsionsbeanspruchung wird in Klein et al. (2019) ein analytischer Ansatz für zwei zusammengesetzte Halbschalen vorgestellt. Die Modellreduktion der Segmentkonstruktion auf das entwickelte Rahmentragwerk ermöglicht die Trennung der Belastungskomponenten und Betrachtung des Tragverhaltens der einzelnen Halbschale, sodass die Ermittlung der Wölbnormalspannungen am Ersatzstabsystem erfolgt. Die Gabellagerung mit Wölbbehinderung vernachlässigt dabei die Steifigkeitsverhältnisse der Nachbarsegmente.

3 NUMERISCHE VORUNTERSUCHUNGEN

3.1 Modellbeschreibung

Wie in Kapitel 2 bereits angedeutet, lassen sich derzeit lediglich die Fugentragfähigkeiten von Kreisringsegmenten unter Torsionsbeanspruchungen mit analytischen Ansätzen bestimmen. Für die Ermittlung der Fugentragfähigkeit von Halb-, Drittel- oder Viertelschalenkonstruktionen für Segmenttürme von Windenergieanlagen besteht zurzeit kein geltender Bemessungsansatz. Die numerischen Voruntersuchungen werden als Orientierungshilfe verwendet, um das komplexe Torsionstragverhalten von Segmenttürmen mit versetzten Vertikalfugen zu prognostizieren. Im Vorfeld werden daher entsprechende numerische Simulationen durchgeführt, um für die geplanten Versuche einen Erwartungshorizont bestimmen zu können. Mit dem Vergleich der beiden Konstruktionsarten in der Numerik und im Versuch besteht die Möglichkeit, Rückschlüsse auf das Torsionstragverhalten und auf analytische Bemessungsansätze ziehen zu können.

Der Aufbau des numerischen Volumenmodells orientiert sich an den Randbedingungen der geplanten experimentellen Versuche. Es erfolgt die Simulation des gesamten Versuchskörpers, der aus einem Aluminiumrohrturm mit einem Außendurchmesser von 200 mm, einer Wandstärke von 12,5 mm und einer Gesamtlänge von 1200 mm besteht. Des Weiteren wird neben den Probekörpern, bestehend aus vier Kreisringen bzw. acht Halbschalen, auch die Lasteinleitungsstruktur (siehe Bild 5a) simuliert. Stellvertretend für die konventionelle Konstruktionsart der Segmenttürme für Windenergieanlagen wird das Torsionstragverhalten an vier Kreisringsegmenten untersucht.

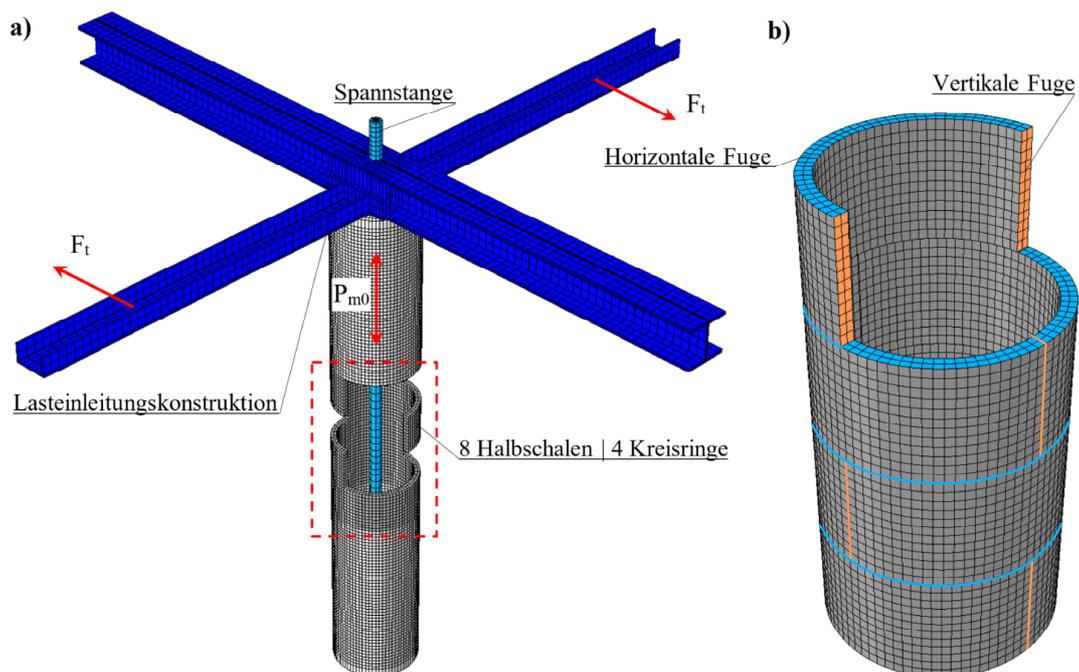


Bild 5: a) Numerisches Gesamtmodell; b) Probekörper: Kreisring-/Halbschalensegmente

Das eingespannte untere Lasteinleitungsrohr dient neben der Definition der Lagerungsbedingungen des untersten Kreisrings auch als Verankerung der im Turminnern verlaufenden Spannstange. Das obere Lasteinleitungsrohr verbindet die Prüfkörper mit der Lasteinleitungsstruktur, die über ein horizontales Kräftepaar die Torsionsbeanspruchung auf die Segmente projiziert. Für die numerischen Voruntersuchungen der Konstruktionsart mit alternativer Fugenausbildung werden die acht Halbschalen analog zu den vier Kreisringen im Gesamtmodell integriert. Dabei werden die Segmente der benachbarten Halbschalen um 90° versetzt angeordnet (vgl. Bild 5b).

Für die Probekörper wurde die Segmentwandung über zwei lineare 8-Knoten Quaderelemente in Dickenrichtung modelliert, deren mechanisches Verhalten im Rahmen der Finiten Elemente Berechnung ohne reduzierte Integration bestimmt wird. Über den (Halb-)Kreisring verteilt ergeben sich 80 bzw. 160 Elemente. Die in den untersuchten Konstruktionsarten entstehenden trockenen Horizontal- und Vertikalfugen zwischen den Segmenten werden über Kontaktelemente als Master-Slave-Beziehung simuliert. Die Elemente bilden den Kontakt senkrecht zur Fuge als Druckkontakt und in der Fugenebene als Reibkontakt mit einem Reibbeiwert für Aluminium von $\mu_{\text{Alu}} = 0,18$ ab. Für die Lastaufbringung der zentrischen Vorspannung erfolgt eine vollständige Modellierung der Spannstange (vgl. Bild 5), die an dem unteren und oberen Lasteinleitungsrohr über eine Schlupfbeziehung verankert und mit der jeweiligen Vorspannkraft versehen wird. Diese Art der Modellierung garantiert die Erfassung möglicher Änderungen der Vorspannung in der Spannstange während der sukzessiven Steigerung der Torsionsbeanspruchung. Zur Erzeugung des Torsionsmoments wird ein horizontales Kräftepaar an den Lasteinleitungsarmen der Konstruktion aufgebracht und stetig gesteigert. Neben der Entwicklung der Torsionsbeanspruchung und der Vorspannkraft werden auch die Verdrehung der Turmkonstruktion sowie der jeweilige Kontaktstatus der horizontalen und vertikalen Fugen ausgewertet.

3.2 Diskussion der numerischen Ergebnisse

Der Vergleich des Torsionstragverhaltens vorgespannter Fertigteiltürme mit Kreisringsegmenten und alternativer Fugenausbildung durch Halbschalen erfolgt am numerischen Simulationsmodell. Dafür wird neben der Entwicklung des Torsionsmoments in Abhängigkeit der Verdrehung auch der Status der horizontalen Fugen als Indikator zur Bewertung der Fugentragfähigkeit der beiden Konstruktionsarten herangezogen. Die Kontaktelemente definieren mit dem Haft- (rot) und Gleitzustand (grün) zwei geschlossene Fugenstadien und mit dem Klaffungszustand (blau) den geöffneten Status der Fuge. In dem nachfolgenden Bild 6 ist der Kontaktstatus der trocken ausgeführten Fugen für die Kreisringsegmente im Übergang vom Haft- in den Gleitzustand und für die Halbschalenkonstruktion von verschiedenen Torsionslastniveaus dargestellt. Aus den vorhandenen Randbedingungen resultiert für die Horizontalfuge des Kreisringquerschnitts nach Gl. (1), (2) ein maximal aufnehmbares Torsionsmoment von $M_{T,\text{Bredt}} = 0,3375 \text{ kNm}$.

Die Laststufe A in Bild 6 stellt den Übergang von der Haft- in die Gleitreibung beim Erreichen der Torsionsgrenzlast dar. Im Vergleich zur Vorspannung sind die im numerischen Modell vernachlässigten Eigengewichtsanteile sehr gering, sodass in den fünf horizontalen Fugen beim Überschreiten der Haftreibung die Kreisringsegmente beginnen abzugleiten. Das beschriebene Tragverhalten der Horizontalfuge ist auch bei der Last-Verformungskurve in Bild 7 zu erkennen. Bis zum Erreichen der Grenzlast nach Grünberg & Göhlmann (2011) ($M_{T,\text{Bredt}}$) verhält sich das ansteigende Torsionsmoment proportional zur Verdrehung der Konstruktion, was sich in dem linearen Anstieg des rot strich-gepunkteten Graphen widerspiegelt (vgl. Bild 7, Laststufe A). Anschließend treten

überproportional große Verformungen bei sehr geringfügigem Lastanstieg auf und die Kurve geht in einen nichtlinearen irreversiblen Ast über.

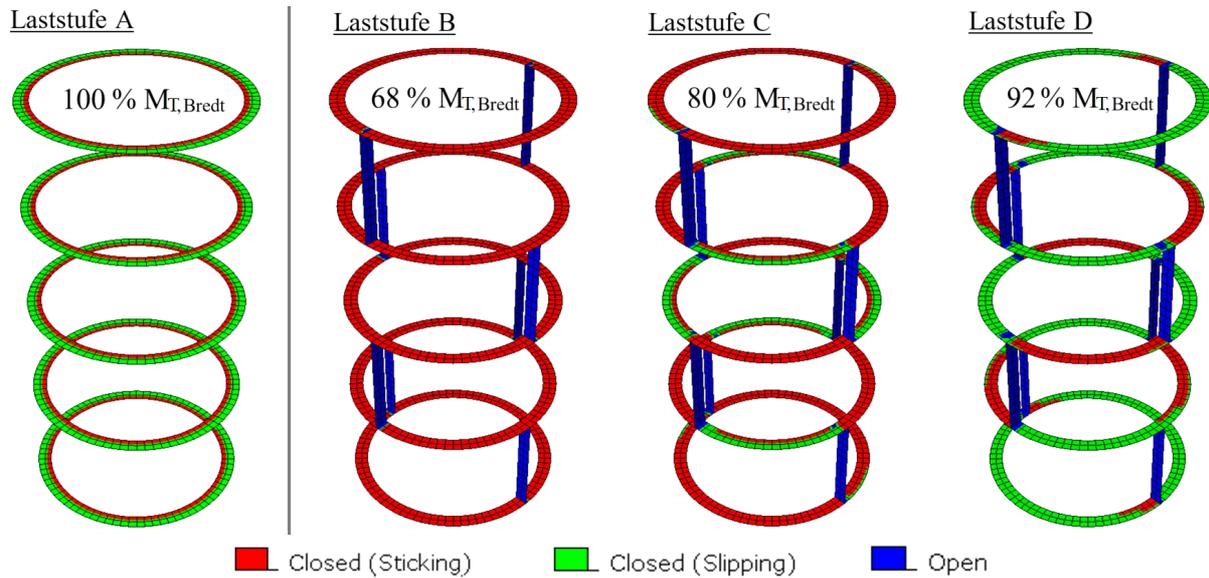


Bild 6: Fugenstatus eines Kreisrings und einer Halbschalenkonstruktion bei unterschiedlichen Laststufen ($P_{m0} = 20 \text{ kN}$; $\mu_{\text{Alu}} = 0,18$)

Die Bilder 6 und 7 unterstreichen das deutlich komplexere Torsionstragverhalten der versetzten Halbschalen im Vergleich zu den Kreisringsegmenten. Die Halbschalenkonstruktion verhält sich bis zur Laststufe B von ungefähr zwei Drittel des *Bredtschen* Torsionsmoments identisch zu den Kreisringen. Bei einer weiteren Laststeigerung bis zur Laststufe C indiziert die ein wenig flachere Last-Verformungskurve eine geringfügige Abnahme der Torsionssteifigkeit. Die Steifigkeitsabnahme deutet auf das kaskadenartige Öffnen der Horizontalfugen an den Querschnittsrändern der Halbschalen hin.

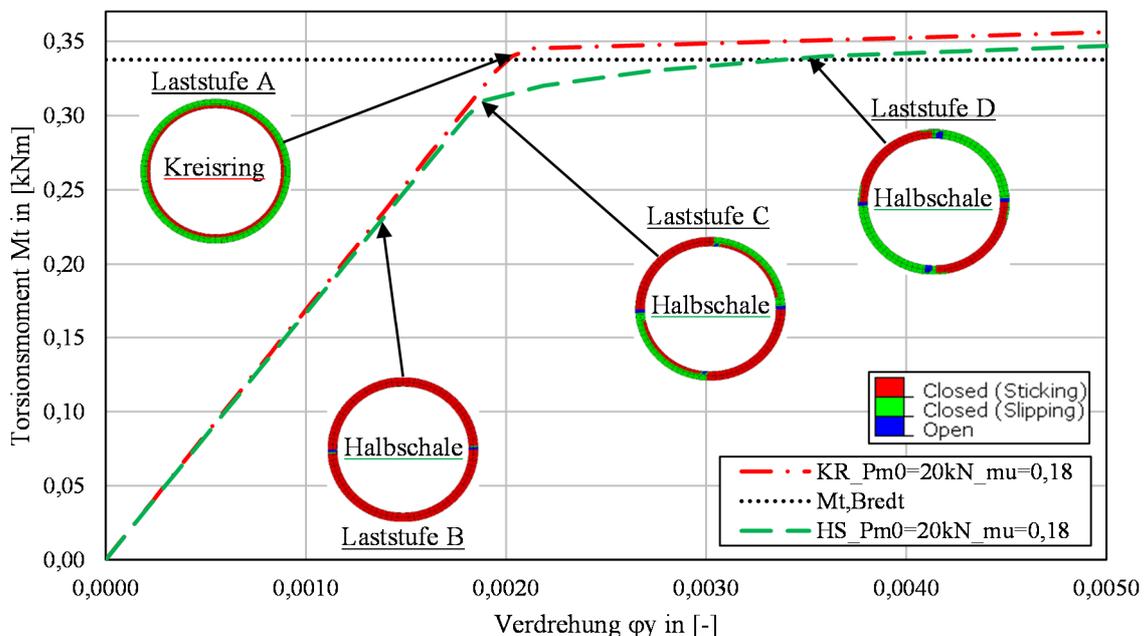


Bild 7: Verdrehsteifigkeiten von Kreisring (KR) und Halbschale (HS) | $P_{m0} = 20 \text{ kN}$; $\mu_{\text{Alu}} = 0,18$

In Laststufe B des Bildes 6 verursachen zusätzliche Normalspannungen infolge Querschnittsverwölbungen die lokale Aufhebung der anfänglich überdrückten Horizontalfugen aus Vorspannung,

welche aus dem Phänomen der Wölbkrafttorsion (vgl. Kap. 2.2) resultiert und in Klein et al. (2019) ausführlich erläutert wird. Die Last-Verformungskurve verlässt ab der Laststufe C den linearen Ast und flacht anschließend deutlich ab, sodass bei den nun auftretenden überproportional großen Verformungen nur noch eine geringfügige Laststeigerung möglich ist. Der Fugenstatus der Laststufe C in Bild 6 indiziert zu diesem Zeitpunkt ein beginnendes Abgleiten von Teilbereichen der jeweiligen Halbschale. Die weitere Laststeigerung führt zum partiellen Rausdrehen der Halbschalen (vgl. Bild 6, Laststufe D) und somit zur Aktivierung von Tragfähigkeitsreserven, sodass sich das Plateau der Last-Verformungskurve im Vergleich zu den Kreisringsegmenten geringfügig steiler einstellt. Grundsätzlich lassen sich die Torsionsbelastungen bei beiden Konstruktionsarten nach Abknicken des linearen Asts weiterhin steigern, was jedoch mit großen irreversiblen Verformungen einhergeht.

3.3 Weiterführende numerische Untersuchungen

Die Grenzlast der horizontalen Fugentragfähigkeit vorgespannter Fertigteilsegmenttürme für Windenergieanlagen lässt sich für Kreisringkonstruktionen grundsätzlich mit dem Abgleiten der Fugen und den resultierenden überproportional großen Verformungen definieren. Die Voruntersuchungen zeigen, dass diese Definition für Halbschalenkonstruktionen nicht so eindeutig ausfällt, sodass auch die Anforderungskriterien für trocken ausgeführte und zusammengesetzte Querschnitte hinsichtlich der Tragfähigkeit im Gebrauchs- und im Grenzzustand zu diskutieren sind.

Erfolgt der direkte Vergleich der beiden Konstruktionen hinsichtlich des Abknickpunkts der Last-Verformungskurven (vgl. Bild 7, Laststufe A, C) ist erkennbar, dass die Halbschalenkonstruktion eine vergleichsweise hohe Torsionstragfähigkeit aufweist. Vorangegangene Untersuchungen deuten an, dass das unterschiedliche Tragverhalten der Halbschalenkonstruktion im Vergleich zu den Kreisringsegmenten zu signifikanten Tragfähigkeitseinbußen hinsichtlich des horizontalen Fugenwiderstands führt (Hartwig et al. 2018). Durch eine Parameterstudie konnte das Verhältnis von Reibbeiwert und Vorspannniveau als signifikante Einflussgröße für die Differenz der Tragfähigkeiten der vorangegangenen Untersuchungen und den hier vorgestellten numerischen Ergebnissen der Halbschalenkonstruktion identifiziert werden (vgl. Bild 8).

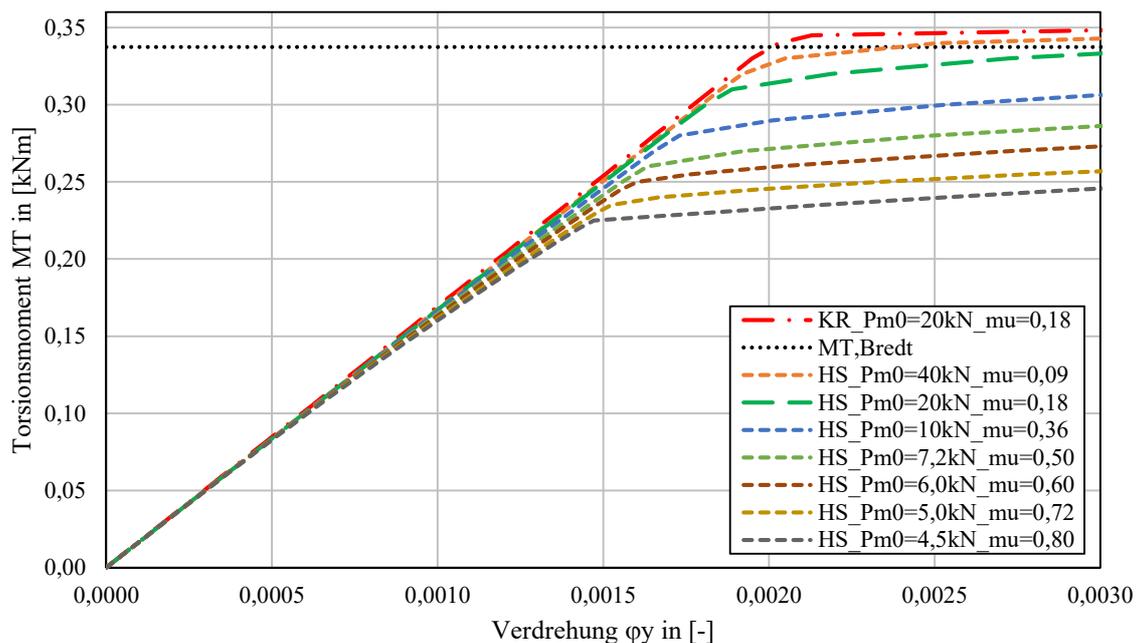


Bild 8: Halbschalensegmente: Verdrehsteifigkeit verschiedener Reibbeiwert-Vorspann-Kombinationen

In Bild 8 ist die sukzessive Steigerung der Torsionsbelastung in Abhängigkeit der Verdrehung verschiedener Reibbeiwert- und Vorspannniveau-Kombinationen einer Halbschalenkonstruktion dargestellt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit werden nach Gl. (1), (2) der Reibbeiwert und die Vorspannkraft so variiert, dass weiterhin der durch diese beiden Einflussparameter definierte Reibwiderstand in den horizontalen Fugen unverändert bleibt. Demzufolge erreicht jede der numerischen Berechnungen unter der Berücksichtigung einer Kreisringkonstruktion die identische Torsionstragfähigkeit. Dieses konstante Grenzlastniveau ist in den Bildern 8 und 9 mit dem schwarz gepunkteten Graphen gekennzeichnet. Grundsätzlich zeigt sich, dass eine höhere Vorspannkraft bei geringerem Reibbeiwert zu vergleichbar größeren Fugentragfähigkeiten der Halbschalenkonstruktion führt. Das Verformungsniveau bis zum Abgleiten der Horizontalfuge ist bei großen Vorspannkraften deutlich höher als bei großen Reibbeiwerten.

Das Bild 9 wertet die Parameterstudie am Abknickpunkt der jeweiligen Last-Verformungskurve aus, sodass bei dieser Betrachtung die Last-Verformungsbeziehung auf ein lineares Bezugsverhältnis beschränkt wird und keine großen Verdrehungen entstehen. Die bereits festgestellte Tendenz der Tragfähigkeitsabnahme bei steigendem Reibbeiwert und gleichzeitiger Verringerung des Vorspannniveaus wird dadurch verdeutlicht. Diese Erkenntnis erläutert die größere Differenz der Tragfähigkeiten der bisherigen Untersuchungen mit einem Reibbeiwert für geschliffenen Beton von $\mu_{\text{Beton}} = 0,50$ (Hartwig et al. 2018) zu den hier vorgenommenen Berechnungen. Diese Entwicklung deutet darauf hin, dass die Größe und Verteilung der Normalspannungen in der Fuge aus Vorspannung und infolge Querschnittsverwölbungen maßgebend für die Ermittlung der Fugentragfähigkeit sind.

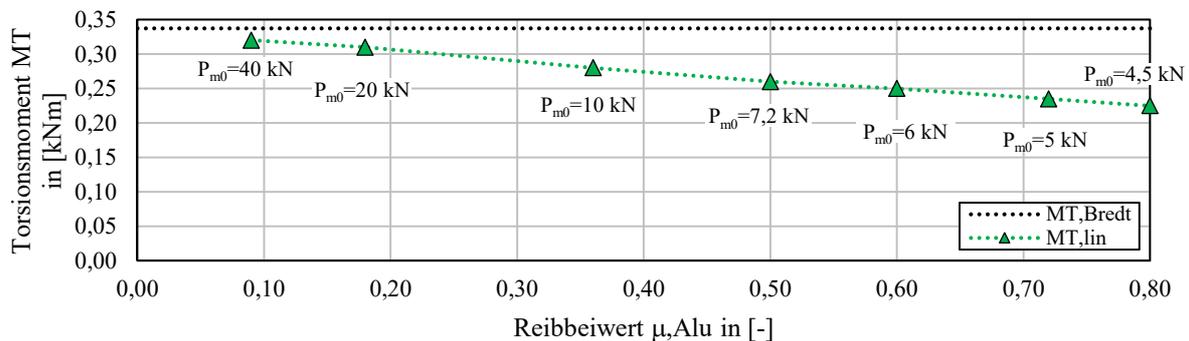


Bild 9: Torsionsgrenzlasten in Abhängigkeit von Reibbeiwert und Vorspannung

Das Bild 10 zeigt die konstante Normalspannungsverteilung in der horizontalen Fuge infolge Vorspannung bei verschiedenen Reibbeiwert- und Vorspannungskombinationen. Des Weiteren wird der resultierende Maximalwert der zusätzlichen Wölbnormalspannungen infolge der Torsionsgrenzlast bei linearem Last-Verformungskriterium an den Querschnittsrändern der Halbschalen dargestellt. Die Verwölbung der Halbschalen infolge Torsion führt bei der numerischen Simulation zu den bereits beschriebenen zusätzlichen Druck- und Zugspannungen an den Querschnittsrändern. Überschreiten die Zugspannungen in einem Randbereich der Halbschale das anfängliche Vorspannniveau, kommt es zum Aufklaffen der horizontalen Fuge (vgl. Bild 7, Laststufe B). Bei weiterer Laststeigerung übersteigen die resultierenden Schubspannungen das Produkt aus den reduzierten Normalspannungen und dem Reibbeiwert nach Gl. (2), sodass dieser Teilbereich des Halbschalenquerschnitts in der Fuge von dem Haft- in den Gleitreibungszustand übergeht. Da sich die Normalspannungen am gegenüberliegenden Querschnittsrand erhöhen, drehen sich die Halbschalen kaskadenartig heraus. Bei einem geringen Reibbeiwert von $\mu = 0,09$ bleiben aufgrund des gleichzeitig hohen Vorspannniveaus ($P_{m0} = 40$ kN) die

Horizontalfugen geschlossen und die Halbschalen werden herausrotiert, sobald die einwirkenden Schubspannungen infolge Torsion den Reibwiderstand übersteigen.

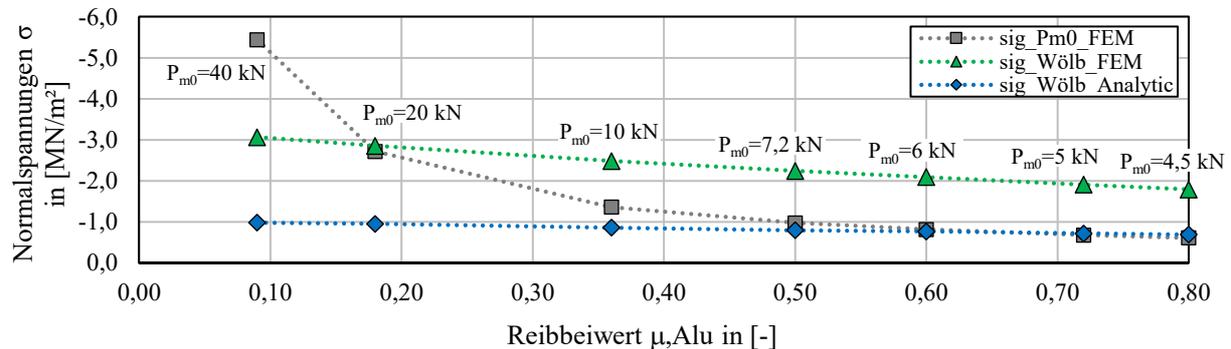


Bild 10: Normalspannungsanteile unter Variation des Reibbeiwertes und der Vorspannung

Qualitativ ähnelt der Kurvenverlauf der Drucknormalspannungen in Bild 10 der linearen Torsionstragfähigkeitskurve (vgl. Bild 9), sodass sowohl quantitativ als auch qualitativ ein unmittelbarer Zusammenhang festgestellt werden kann. Neben den Normalspannungen aus der numerischen Simulation infolge Vorspannung und Querschnittsverwölbungen werden in Bild 10 auch die analytischen Wölbnormalspannungen dargestellt. Dafür erfolgt die Auswertung des analytischen Ansatzes nach Klein et al. (2019) unter Berücksichtigung der vorhandenen Randbedingungen und der Grenztorsionslasten aus Bild 9. Bei der Bewertung der numerisch simulierten und analytisch ermittelten Normalspannungen wird in Betracht gezogen, dass das Rahmenmodell bei der Komponentenerlegung der einwirkenden Belastung und die Anwendung der Wölbtheorie den Einfluss der benachbarten Segmente vernachlässigen.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit numerischen Voruntersuchungen zur Torsionstragfähigkeit von vorgespannten Kreisring- und Halbschalensegmenten für Turmstrukturen von Windenergieanlagen. Der Schwerpunkt der numerischen Simulationen für die segmentierten Turmkonstruktionen liegt auf der Belastungsteilkomponente der Torsion. Für die Ermittlung der Fugentragfähigkeit von Halb-, Drittel-, oder Viertelschalenskonstruktionen besteht zurzeit kein geltender Bemessungsansatz, sodass die numerischen Voruntersuchungen als Orientierungshilfe verwendet werden, um das komplexe Torsionstragverhalten von Segmenttürmen mit versetzten Vertikalfugen zu untersuchen.

Die Auswertung der numerischen Ergebnisse der Kreisringkonstruktion zeigt, dass sich unter der Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der Normalspannungen infolge Vorspannung ein konstanter Reibwiderstand einstellt und die Fugentragfähigkeit mit Ansatz des *Bredtschen* Schubflusses bestimmt werden kann. Des Weiteren lässt sich feststellen, dass beide Konstruktionsarten bis ungefähr zwei Drittel der Torsionsgrenzlast die annähernd gleiche Torsionssteifigkeit aufweisen. Aus der Auswertung der Kurvenverläufe für die Verdrehsteifigkeiten geht hervor, dass die Halbschalenskonstruktion unter den verwendeten Parametern im Vergleich zu den Kreisringsegmenten lediglich eine geringfügig kleinere Tragfähigkeit aufweist.

Weiterführende numerische Untersuchungen mit gleichbleibenden Reibwiderstandsniveau ergeben, dass das Verhältnis von Reibbeiwert zu Vorspannung der Halbschalenskonstruktion die signifikante Einflussgröße für die Ermittlung der Fugentragfähigkeit beschreibt. Eine höhere Vorspannkraft bei gleichzeitig geringerem Reibbeiwert führt zu vergleichbar größeren Fugentragfähigkeiten. Diese

Erkenntnis erläutert die Differenz zu den numerischen Ergebnissen der bisherigen Untersuchungen. Die Betrachtung der Normalspannungen aus Vorspannung und infolge Querschnittsverwölbungen deutet darauf hin, dass Größe und Verteilung maßgebend für die Ermittlung der Fugentragfähigkeit ist. Mit dem Maximalwert der zusätzlichen Druck- und Zugnormalspannungen infolge Wölbkrafttorsion ist ein unmittelbarer Zusammenhang zu der Grenztragfähigkeit der Horizontalfugen festgestellt worden.

Um das komplexe Torsionstragverhalten von segmentierten Halbschalenkonstruktionen für Türme von Windenergieanlagen detaillierter beschreiben zu können, sind weitere Untersuchungen und Forschungsarbeiten erforderlich. Für das Verständnis des Tragverhaltens geteilter Kreisringsegmente sind der Vergleich mit den Ergebnissen der experimentellen Versuche und die Erweiterung der Belastungskomponenten hinsichtlich der Biege- und Querkraftbelastung wesentliche Bestandteile.

LITERATUR

- Bögl, S., Gläser, C., Hierl, M. & Traute, M. (2013): Vorgespannte Hybridtürme für Windenergieanlagen, *Bauingenieur*, Band 88, Heft 8, S. 301-306.
- Bornscheuer, F. W. (1952): Systematische Darstellung des Biege- und Verdrehvorganges unter besonderer Berücksichtigung der Wölbkrafttorsion, *Der Stahlbau*, Band 21, Heft 1, S. 1-9.
- Francke, W. & Friemann, H. (2005): Schub und Torsion in geraden Stäben. Grundlagen – Berechnungsbeispiele, Vieweg, Wiesbaden.
- Grünberg, J. & Göhlmann, J. (2013): Windenergieanlagen in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise, Ernst&Sohn, Berlin.
- Hartwig, S. & Marx, S. (2019): Experimental investigation of the torsional bearing behavior of segment towers, Tagungsband fib Symposium 2019, Kraków, Polen, S. 2254-2261.
- Hartwig, S., Bock, H., Göhlmann, J. & Marx, S. (2018): Torsionstragverhalten eines Segmentturms mit alternativer Fugenausbildung, *Beton- und Stahlbetonbau*, Band 113, Heft 11, S. 765-848.
- Hartwig, S. & Marx, S. (2017): Torsionstragverhalten extern vorgespannter Kreissegmente mit trockenen Fugen, *Beton- und Stahlbetonbau*, Band 112, Heft 11, S. 740-746.
- Klein, F., Hartwig, S., Göhlmann, J. & Marx, S. (2019): On the torsional rigidity of prestressed concrete segment towers with vertical joints, Tagungsband fib Symposium 2019, Kraków, Polen, S. 544-551.
- Lindenberger, H (1953): Vergleich und Analogiebetrachtung der Lösungen für biegebeanspruchte und verdrehungsbeanspruchte Stabwerke, *Der Stahlbau*, Band 22, Heft 1, S. 14-19.
- Mahnken, R. (2015): Lehrbuch der Technischen Mechanik – Elastostatik. Mit einer Einführung in Hybridstrukturen, Springer Vieweg, Berlin/Heidelberg.
- von der Haar, C. & Marx, S. (2015): Design aspects of concrete towers for wind turbines, *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, Band 57, Heft 4, S. 30-37.