

# Beulanalysen von Suction-Bucket-Fundamenten für Offshore-Windenergieanlagen mit nicht-homogenen Zufallsfeldern

Marc Fina<sup>1</sup>, Manuela Böhm<sup>2</sup>, Steffen Freitag<sup>1</sup>, Peter Schaumann<sup>2</sup>, Elyas Ghafoori<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Baustatik, Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe

<sup>2</sup>Leibniz Universität Hannover, Institut für Stahlbau, ForWind, Appelstr. 9A, 30167 Hannover

**Zusammenfassung:** Suction-Buckets finden zunehmend Anwendung als Fundamente für Offshore-Windenergieanlagen. Fertigungsbedingte geometrische Imperfektionen haben einen starken Einfluss auf das Beulverhalten dieser dünnwandigen Kreiszyinderschalen. Auf Basis experimenteller Daten werden Unschärfen mittels eines nicht-homogenen Zufallsfeldansatzes quantifiziert. Die Ergebnisse stochastischer Beulanalysen zeigen das Potenzial für wirtschaftlichere Konstruktionen.

## 1 Einleitung

Suction-Bucket-Fundamente sind dünnwandige Kreiszyinderschalen und werden zunehmend für Offshore-Windenergieanlagen mit Jacket-Tragkonstruktionen eingesetzt. Für die Installation wird die Schale mit einem Deckel abgedichtet und auf den Meeresgrund gesenkt. Anschließend wird Wasser aus dem Inneren der Schale abgepumpt, wodurch ein Unterdruck entsteht, der die Schale in den Meeresboden einpresst. Während der Betriebsphase ist der größte Teil der Schale im Meeresboden eingebettet. Die Erzeugung eines Unterdrucks mittels Pumpen ermöglicht eine Installation mit geringen Lärmemissionen und damit minimalen Umweltauswirkungen. Zudem haben Suction-Bucket-Fundamente auf Grund geringerer Einbindetiefen Vorteile gegenüber Pfahlgründungen und können auch bei schwierigen Baugrundverhältnissen eingesetzt werden. Dadurch können auch Standorte erschlossen werden, an denen eine Pfahlgründung aufgrund der Bodenverhältnisse nicht möglich ist.

Der Entwurf von Suction-Bucket-Fundamenten wird insbesondere durch den Installationslastfall bestimmt, da der dabei wirkende Unterdruck einen kritischen Lastfall für Schalenbeulen darstellt. Die Beultragfähigkeit ist stark von geometrischen Imperfektionen abhängig, die die Tragfähigkeit erheblich reduzieren können. In der Baupraxis fordern Normen die

Berücksichtigung von äquivalenten ungünstigsten Imperfektionsformen. Diese Imperfektionen repräsentieren jedoch nicht die tatsächlich gemessenen Herstellungsabweichungen wie Schweißnahtvertiefungen oder Ovalisierungen. Aufgrund der Serienfertigung im Offshore-Bereich besteht die Möglichkeit, geometrische Imperfektionen systematisch zu erfassen und für realistischere Imperfektionsmodelle zu nutzen. Allerdings können die Imperfektionsmuster selbst innerhalb einer Fertigungscharge stark variieren, d. h. sie sind mit großen Unschärfen behaftet. Daher werden in der Praxis häufig große Abminderungs- bzw. Knockdown-Faktoren (KDFs) verwendet, die zu konservativen und materialintensiven Auslegungen führen [16]. Die Entwicklung zuverlässigerer und wirtschaftlicherer KDFs ist daher Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten, siehe z. B. [19, 25]. Eine alternative zu deterministisch geprägten Ansätzen mit Sicherheitsfaktoren sind probabilistische Ansätze bei denen die natürliche Variabilität (aleatorische Unschärfe) quantifiziert wird. Speziell für Suction-Buckets wird in [4] ein Fourier-Ansatz vorgestellt. Alternativ können räumlich variierende Imperfektionen mithilfe von Zufallsfeldern modelliert werden, die auf Autokorrelationsfunktionen basieren. Eine weit verbreitete Methode zur Generierung von Zufallsfeldern ist die Karhunen–Loève-Expansion (KLE), die beispielsweise in [5] für stochastische Beulanalysen von Suction Buckets verwendet wird. Die Korrelationsparameter eines Zufallsfeldes haben einen signifikanten Einfluss auf das stochastische Beulverhalten, wie in [17] quantitativ nachgewiesen wird. Die Ermittlung der Eingangsparameter auf Grundlage begrenzter experimenteller Daten (epistemische Unschärfe) stellt jedoch eine erhebliche Herausforderung dar. Das Konzept der polymorphen Unschärfemodellierung [15] ermöglicht die Berücksichtigung epistemischer und aleatorischer Unschärfe. In [7, 13] wird dieses Konzept auf die Beulanalyse von Schalen angewendet. In diesem Ansatz werden die Korrelationsparameter des Zufallsfeldes durch Intervall- und Fuzzy-Variablen beschrieben. Weiterführende Untersuchungen befassen sich mit Aspekten wie der Sensitivitätsanalyse der Korrelationsparameter [10], einem neuartigen Entwurfskonzept auf Basis eines fuzzy-wertigen Sicherheitsniveaus [12], Beulentwurfsoptimierungen [11, 21] sowie der Entwicklung effizienter Strategien der Ersatzmodellierung zur Vorhersage des Beulverhaltens imperfekter Tragwerke [8, 9, 22].

Bei der Simulation von Schalenimperfektionen mithilfe von Zufallsfeldern wird häufig angenommen, dass das stochastische Imperfektionsfeld homogen und Gauß-verteilt ist. In [18] zeigen Messungen an einem großmaßstäblichen Suction-Bucket, dass die Welligkeit und die Amplitude der Imperfektion entlang der Schalenlänge variieren. Im oberen Bereich der Schale, in dem der Deckel angeschweißt ist, treten deutlich geringere Amplituden und eine geringere Welligkeit des Feldes auf als im unteren Bereich, der im Meeresboden eingebettet ist. Diese herstellungsbedingte Nicht-Homogenität kann nicht durch homogenen Zufallsfelder modelliert werden. Ein nicht-homogenes Zufallsfeld liegt vor, wenn sein Erwartungswert, seine Varianz oder seine Autokorrelationsstruktur räumlich variieren [14]. In diesem Beitrag wird ein Ansatz zur Modellierung nicht-homogener Zufallsfelder für geometrische Imperfektionen von Suction-Buckets vorgestellt. Die Nicht-Homogenität wird dabei über ortsabhängige Varianzfunktionen abgebildet, während weiterhin die Annahme einer Gauß-Verteilung gilt. Die Varianz- und Korrelationsfunktionen werden auf Grundlage von Imperfektionsmessungen berechnet, die im Open-Access-Datensatz [3] verfügbar sind. Die Berechnungen basieren auf dem nichtlinearen FE-Modell aus [5], das in ABAQUS [6] realisiert ist. Auf das FE-Modell werden die stochastischen geometrischen Imperfektionen aufgebracht. Die Ergebnisse probabilistischer Beulanalysen werden mit einem homogenen Zufallsfeldansatz sowie den nach Eurocode 3 (EC3) [2] berechneten Bemessungslasten verglichen.

## 2 Nicht-homogener Ansatz für stochastische geometrische Imperfektionen

Die geometrischen Imperfektionen des untersuchten Suction-Bucket-Fundaments wurden mittels eines hochauflösenden Laserscans gemessen und in [18] veröffentlicht. In Abb. 1 sind die gemessenen Imperfektionen  $\bar{w}$  als Abweichungen in radialer Richtung von der nominalen Schalenoberfläche in aufgerollter Konfiguration dargestellt.

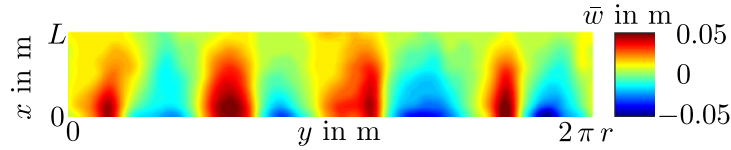


Abbildung 1: Gemessene geometrische Imperfektionen aus [18]

Die Schalenlänge beträgt  $L = 6$  m, der Radius  $r = 6$  m, die Dicke  $t = 20$  mm und die maximal gemessene Imperfektionsamplitude (Peak-to-Peak)  $\Delta\bar{w} = 112$  mm [18]. Die größten Imperfektionen treten in der Nähe der vier Schweißnähte in axialer Richtung auf. Die Welligkeit ist in Umfangsrichtung am unteren Rand am größten und am oberen Rand, an dem der Deckel geschweißt ist, nahezu null. Die gemessene Imperfektion wird durch den Fourier-Reihen Ansatz nach [1] approximiert

$$\hat{w}(x,y) = 2t \sum_{k=0}^{n_x} \sum_{l=0}^{n_y} \cos\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \left( A_{kl} \cos\left(\frac{ly}{r}\right) + B_{kl} \sin\left(\frac{ly}{r}\right) \right), \quad (1)$$

wobei die Güte der Approximation von der Anzahl der Halbwellen  $k \dots n_x$  in Axialrichtung und der Vollwellen  $l \dots n_y$  in Umfangsrichtung ( $y$ ) abhängig ist. Mit den in [3] veröffentlichten Fourier-Koeffizienten  $A_{kl}$  und  $B_{kl}$  kann die Approximation der Imperfektion in Abb. 1 berechnet werden.

Die stochastischen Imperfektionen können mit der Karhunen–Loève-Expansion (KLE) durch

$$\hat{w}(x,y,\theta) = \sigma(\mathbf{x}) \sum_{i=1}^M \sqrt{\lambda_i} \xi_i(\theta) \varphi_i(x,y) \quad (2)$$

generiert werden, wobei  $\xi_i(\theta) \sim \mathcal{N}(0,1)$  eine standardnormalverteilte Zufallsvariable ist,  $\sigma(x,y)$  die Standardabweichung des Felds bezeichnet und  $\theta$  die möglichen Realisierungen innerhalb der Ereignismenge  $\Theta$  definiert [24]. Die  $i$ -te Eigenfunktion  $\varphi_i(x,y)$  und der dazugehörige Eigenwert  $\lambda_i$  werden durch die Lösung des Eigenwertproblems der Kovarianzmatrix  $C \varphi_i = \lambda_i \varphi_i$  erhalten. Die Anzahl  $M$  der Reihenglieder der KLE-Reihenentwicklung in Gl. (2) wird anhand des Kriteriums festgelegt, dass durch die KLE-Approximation 99 % der Summe aller Eigenwerte enthalten sind, siehe z.B. [17]. Die Kovarianzmatrix  $C$  wird durch das Korrelationsmodell aus [20]

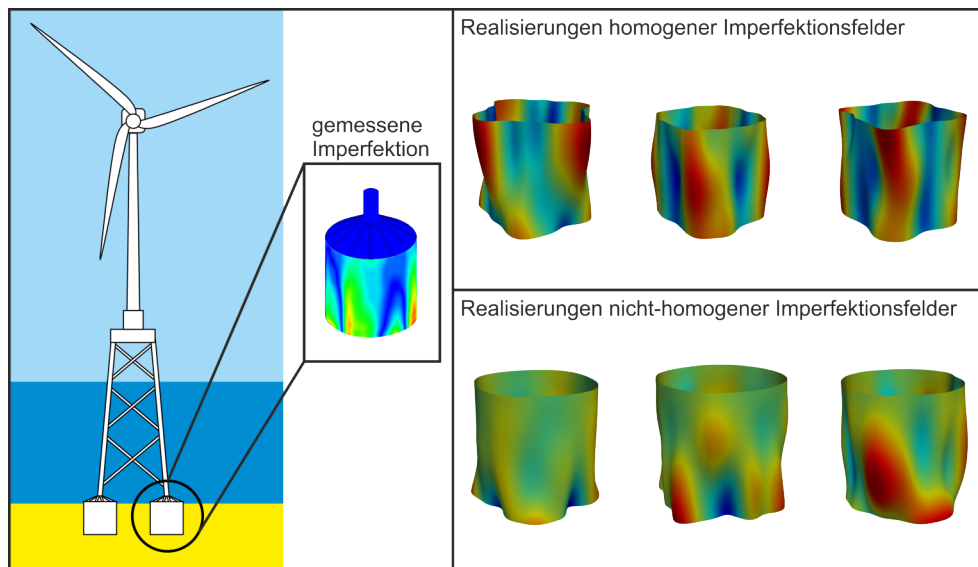
$$C(\Delta x, \Delta y) = \bar{\rho}(\Delta x) \bar{\rho}(\Delta y) \quad (3)$$

ermittelt, wobei die Autokorrelationsfunktionen (AKFs)  $\bar{\rho}_n(\Delta x)$  und  $\bar{\rho}_n(\Delta y)$  ausschließlich von den Abständen in Axial- und Umfangsrichtung,  $\Delta x$  bzw.  $\Delta y$  abhängen. Die AKFs werden auf Basis der Approximation der gemessenen Imperfektion nach Gl. (1) berechnet. Um glatte Realisierungen zu gewährleisten, wird die AKF in Axialrichtung durch die quadratische exponentielle AKF:  $\bar{\rho}(\Delta x) = \exp(-\Delta x^2/\ell_c^2)$  mit der Korrelationslänge  $\ell_c = 5$  m gefittet. Die Vorgehensweise hierzu ist u. a. in [13] beschrieben.

Die Standardabweichung  $\sigma(x,y) = \sqrt{\text{Var}(x,y)}$  mit  $\text{Var}(x,y) = \sigma^2(x,y)$  in Gl. (2) ist ortsabhängig. Analog zum Korrelationsmodell in Gl. (3) wird ein separierbarer Ansatz eingeführt

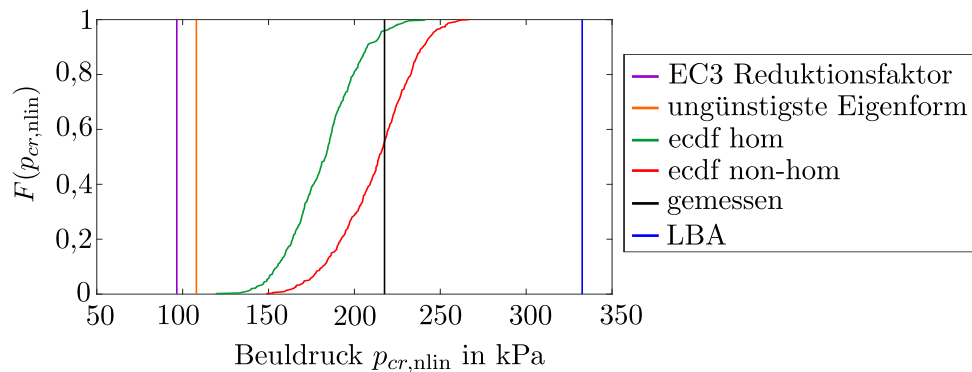
$$\sigma^2(x,y) = \hat{\sigma}^2 \hat{\sigma}_x^2(x) \hat{\sigma}_y^2(y), \quad (4)$$

mit der konstanten Stichprobenvarianz  $\hat{\sigma}^2$  und zwei unabhängigen normierten Varianzfunktionen  $\hat{\sigma}_x^2(x)$  und  $\hat{\sigma}_y^2(y)$  in Axial- ( $x$ ) und Umfangsrichtung ( $y$ ). Dadurch wird das nicht-homogene Zufallsfeld beschrieben. Die Varianzfunktionen werden auf Basis der approxiierten gemessenen Imperfektion nach Gl. (1) berechnet, wobei die Varianz mit den Werten der Imperfektion  $\hat{w}(x,y)$  ermittelt wird. Auswertungen haben gezeigt, dass die Varianz des Feldes hauptsächlich in Axialrichtung variiert. Im oberen Bereich der Schale, in dem der Deckel angeschweißt ist, treten deutlich geringere Amplituden und eine geringere Welligkeit auf als im unteren, im Meeresboden eingebetteten Bereich. Daher werden in diesem Beitrag für den nicht-homogenen Fall  $\sigma^2(x,y) = \hat{\sigma}^2 \hat{\sigma}_x^2(x)$  ausschließlich die Varianzfunktion in Axialrichtung betrachtet und der homogene Fall  $\sigma^2(x,y) = \hat{\sigma}^2$  ohne variierende Varianz gegenübergestellt. In Abb. 2 werden Realisierungen beider Ansätze gezeigt. Im Gegensatz zum homogenen Ansatz zeigen die Realisierungen des nicht-homogenen Ansatzes eine stärkere Welligkeit im unteren Bereich und bilden damit die Struktur der gemessenen Imperfektion ab.



**Abbildung 2:** Realisierungen stochastischer Imperfektionen mit einem homogenen Ansatz (oben) und einem nicht-homogenen Ansatz (unten) für Zufallsfelder





**Abbildung 4:** Ergebnisse der probabilistischen Beulanalysen mit verschiedenen Imperfektionsansätzen: homogener Ansatz (ecdf non-hom) und nicht-homogener Ansatz (ecdf non-hom), im Vergleich zu den Beuldrücken aus einer Beulanalyse mit aufgebrachtster ungünstigster Eigenform, mit aufgebrachtster gemessener Imperfektion (gemessen) sowie zur linearen Beulanalyse (LBA) und zum Reduktionsfaktor nach EC3

Basis von Imperfektionsmessungen an einem großmaßstäblichen Suction-Bucket wurde ein nicht-homogener Varianzansatz entwickelt und mithilfe der KLE zur Generierung stochastischer Imperfektionen eingesetzt. Mit diesem Ansatz können herstellungsbedingte Imperfektionen, wie Schweißnähte, sowie axiale Variationen der Imperfektionsamplitude berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu einem homogenen Ansatz bilden die Realisierungen des nicht-homogenen Ansatzes das gemessene Imperfektionsmusters ab. Die Ergebnisse zeigen geringe Beuldrücke im Vergleich zu den Bemessungsvorschriften nach EC3. Damit bietet der vorgestellte Ansatz ein hohes Potenzial für erhebliche Materialeinsparungen, insbesondere da mit der zunehmenden Anzahl geplanter Windparks mit Suction-Bucket-Fundamenten die Fertigung in die Serienproduktion übergeht und Streuungen der Imperfektionen innerhalb einer Charge realistisch abgebildet werden können.

In zukünftigen Forschungsarbeiten kann der nicht-homogene Ansatz beispielsweise durch ortsabhängige Korrelationsfunktionen weiterentwickelt werden. Der entwickelte Ansatz basiert derzeit nur auf einer einzelnen Messung. Daher wird empfohlen, den Mangel an Daten (epistemische Unschärfe) mit geeigneten polymorphen Unschärfemodellen zu berücksichtigen. Darüber hinaus kann eine Entwurfsoptimierung unter Berücksichtigung von Unschärfen und Nicht-Homogenitäten durchgeführt werden. Dabei können neben geometrischen Parametern wie Wanddicke, Länge oder Radius der Schale auch Versteifungselemente in den Entwurfsraum einbezogen werden.

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Projekts (Projektnummer 511267658) sowie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung des ProBucket-Projekts (FKZ 03EE3033B).

## Literatur

- [1] ARBOCZ, J. ; WILLIAMS, J. G.: Imperfection surveys on a 10-ft-diameter shell structure. In: *AIAA Journal* 15 (1977), Nr. 7, S. 949–956
- [2] BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI): *EN 1993-1-6-Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-6: Strength and stability of shell structures*. London, 2017
- [3] BÖHM, M. : *Geometric imperfection data for welded cylindrical shells [Data set]*. LUIS. <https://doi.org/10.25835/jn1a6pxa>, 2025
- [4] BÖHM, M. ; SCHAUMANN, P. : Stochastic modeling of geometric imperfections for buckling analysis of suction buckets. In: *Journal of Physics: Conference Series* 2362 (2022), Nr. 1, S. 012007
- [5] BÖHM, M. : *Buckling analysis of suction buckets: Influence of uncertainty in imperfections and soil parameters*, Leibniz University Hannover, Doctoral thesis, 2024
- [6] DASSAULT SYSTEMES: *ABAQUS*. <http://www.3ds.com>. 2019
- [7] FINA, M. : *Polymorphe Unschärfemodellierung in der nichtlinearen Strukturmechanik – Stabilität von Schalentragwerken, räumliche Variabilität und Metamodellierung*, Institut für Baustatik, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2020
- [8] FINA, M. ; BISAGNI, C. : Buckling design optimization of tow-steered composite panels and cylindrical shells considering aleatory and epistemic uncertainties. In: *Computational Mechanics* 76 (2025), S. 59–92
- [9] FINA, M. ; LAUFF, C. ; WAGNER, W. : Optimal shell design with polymorphic uncertain parameters. In: BEER, M. (Hrsg.) ; ZIO, E. (Hrsg.) ; PHOON, K.-K. (Hrsg.) ; AYYUB, B. (Hrsg.): *Proceedings of the 8th International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (ISRERM)*. September 4-7, 2022, Hannover, Germany, 2022. – Research Publishing
- [10] FINA, M. ; PANTHER, L. ; WEBER, P. ; WAGNER, W. : Shell buckling with polymorphic uncertain surface imperfections and sensitivity analysis. In: *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems Part B: Mechanical Engineering* 7 (2021), Nr. 2
- [11] FINA, M. ; VALDEBENITO, M. A. ; WAGNER, W. ; BROGGI, M. ; FREITAG, S. ; FAES, M. G. R. ; BEER, M. : Control Variates method to estimate stochastic buckling loads. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 126 (2025), Nr. 13, S. e70070
- [12] FINA, M. ; WAGNER, W. ; GRAF, W. : On polymorphic uncertainty modeling in shell buckling. In: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 38 (2023), Nr. 18, S. 2632–2647
- [13] FINA, M. ; WEBER, P. ; WAGNER, W. : Polymorphic uncertainty modeling for the simulation of geometric imperfections in probabilistic design of cylindrical shells. In: *Structural Safety* 82 (2020). – 101894

- [14] GEYER, S. ; PAPAIOANNOU, I. ; GRAHAM-BRADY, L. ; STRAUB, D. : The spatial averaging method for non-homogeneous random fields with application to reliability analysis. In: *Engineering Structures* 253 (2022), S. 113761. – ISSN 0141–0296
- [15] GRAF, W. ; GÖTZ, M. ; KALISKE, M. : Analysis of dynamical processes under consideration of polymorphic uncertainty. In: *Structural Safety* 52 (2015), S. 194–201
- [16] HILBURGER, M. : Developing the Next Generation Shell Buckling Design Factors and Technologies. In: *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. Honolulu, Hawaii, 2012
- [17] LAUTERBACH, S. ; FINA, M. ; WAGNER, W. : Influence of stochastic geometric imperfections on the load-carrying behaviour of thin-walled structures using constrained random fields. In: *Computational Mechanics* 62 (2018), Nr. 5, S. 1107–1125
- [18] LEBLANC BAKMAR, C. : *Design of Offshore Wind Turbine Support Structures: Selected topics in the field of geotechnical engineering*. Denmark, Diss., 2009
- [19] SADOWSKI, A. J. ; MORATA, M. T. ; KATHIRKAMANATHAN, L. ; SEIDEL, M. ; ROTTER, J. M.: On the existing test dataset of isotropic cylindrical metal shells under axial compression and the design of modern metal civil engineering shells. In: *Structural Safety* 102 (2023), S. 102285
- [20] SCHENK, C. ; SCHUËLLER, G. : Buckling analysis of cylindrical shells with random geometric imperfections. In: *International Journal of Non-Linear Mechanics* 38 (2003), Nr. 7, S. 1119–1132
- [21] SCHWEIZER, M. ; FINA, M. ; WAGNER, W. ; FREITAG, S. : Artificial neural networks for random fields to predict the buckling load of geometrically imperfect structures. In: *Computational Mechanics* 76 (2025), S. 181–204
- [22] SCHWEIZER, M. ; FINA, M. ; WAGNER, W. ; FREITAG, S. : Optimization of shell structures with fuzzy probability-based random fields using artificial neural networks. In: *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics (PAMM)* 25 (2025), Nr. 4, S. e70038
- [23] SEAGREEN WIND ENERGY LTD: Offshore Wind Farm Construction Method Statement. 2023 (LF000009-CST-OF-MST-0001). – Forschungsbericht
- [24] SUDRET, B. ; KIUREGHIAN, A. D.: *Stochastic Finite Element Methods and Reliability – A State-of-the-Art Report*. 2000
- [25] WAGNER, H. N. R. ; HÜHNE, C. ; JANSSEN, M. : Buckling of cylindrical shells under axial compression with loading imperfections: An experimental and numerical campaign on low knockdown factors. In: *Thin-Walled Structures* 151 (2020), S. 106764. – ISSN 0263–8231
- [26] YUN, X. ; GARDNER, L. : Stress-strain curves for hot-rolled steels. In: *Journal of Constructional Steel Research* 133 (2017), S. 36–46