

Strukturanalyse und Optimierung eines kranlosen Montagesystems für Offshore-Windenergieanlagen

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Kachel

Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik (M+V)
Prodekan und Studiendekan
Maschinenbau (Bachelor)

Badstraße 24
77652 Offenburg
Tel.: 0781 205-167
E-Mail: gerhard.kachel@fh-offenburg.de

1962: Geboren in Heilbronn/Neckar, Studium Allgemeiner Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), Schwerpunkte:

Technische Mechanik/Dynamik, Strömungslehre/Gasdynamik

1988: Diplom Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), Mitarbeiter der Daimler-Benz-AG, Stuttgart, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

1997: Promotion zum Thema „Rechnerische Auslegung, Analyse und Optimierung einer mechanischen variablen Ventilsteuerung“, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), Robert Bosch GmbH, Bereich „Fahr-dynamische Regelsysteme“, Aufgaben: Sicherheitsarchitektur, Funktions- und Software-Entwicklung, zuletzt funktionale Verantwortung für fahrdynamische Regelsysteme als System-Projektleiter für einen Großkunden.

Seit 2005: Professor an der Hochschule Offenburg in der Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik.

Seit 2009: Prodekan der Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik und Studiendekan des Bachelor-Studiengangs Maschinenbau

Lehrgebiete: Technische Mechanik, Finite Elemente Methode, Maschinenelemente

Forschungsgebiete: Numerische Strukturanalyse und -optimierung, Numerische Strömungsoptimierung



3.2 Strukturanalyse und Optimierung eines kranlosen Montagesystems für Offshore Windenergieanlagen

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Kachel
Dipl.-Ing. Claire Yalamas

Abstract

In order to lift the nacelle of an offshore wind energy converter with around 500 tons of weight up on the tower – which can be up to 120 m above the water level – at the time special ships and cranes are designed and built. But those firstly will be very expensive and secondly will be available only on a limited scale.

Against this background a joint research project supported by the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) was started comprising the project partners Ed. Züblin AG, Berg-idl GmbH, the IPEK at the university of Karlsruhe and the Hochschule Offenburg – University of Applied Sciences. Project target was the conceptual design of a heavy-duty elevator, which can be used to install the tower segments and the nacelle offshore without a crane. The most relevant challenges in this context result of holding up extreme loads by means of comparatively filigree carrying structures.

Einleitung

Die vorgestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen des vom Bundesministerium

für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Forschungsprojekts „Entwicklung einer Hubbühne für den vertikalen Transport der Maschinengondel einer Offshore-Windenergieanlage“ innerhalb einer Laufzeit von rund einem Jahr. Die Grundidee des Projekts war, ein kranloses Montagesystem zu konzipieren, das die Tragfähigkeit des bereits vorhandenen Mastrohrs nutzt, um das jeweils nächste Bauteil in die Montageposition zu heben. Dadurch werden teure Krananlagen bzw. Spezialschiffe eingespart. Zudem kann die Witterungsabhängigkeit der Montage deutlich verringert werden. Im Projektteam übernahm die Hochschule Offenburg in enger Zusammenarbeit mit der Konstruktion (Berg-idl) und der MKS-Simulation (IPEK) die notwendigen strukturmechanischen Berechnungen und Optimierungen der hochbelasteten Komponenten.

Aufbau und Funktionsprinzip

Abbildung 3.2-1 zeigt das System beim Heben eines Mastrohrsegments. Die Hubbewegung erfolgt durch einen Seilwindenantrieb zwischen Satellit und Hubgondel. Zunächst wird das Mastrohrsegment bzw. die Maschinengondel mitsamt der Fahrplattform auf die Hubgondel geschoben. Die Hubgondel fährt dann hoch, bis die Fahrplattform mit dem zu montierenden Bauteil in die Montageposition geschoben werden kann, um das Entladen zu ermöglichen. Die Hubgondel steigt dann wieder ab in

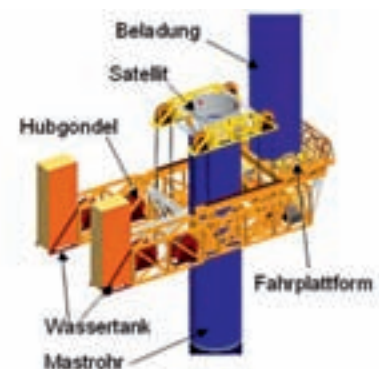


Abb. 3.2-1: Prinzip

die Startposition, und der Satellit wird durch einen Portalkran (nicht auf Abbildung 3.2-1 dargestellt) bis zur nächsten Montagestelle hochgezogen.

Die verschiedenen Bauteile (Satellit, Hubgondel, Mastrohr, Fahrplattform) wurden mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) untersucht, und – wenn es erforderlich war – mit modernen automatischen Verfahren optimiert.

Satellit

Der Satellit als oberstes Element dieses „Lastaufzugs“ muss einerseits das Gewicht der Hubgondel mit Beladung aufnehmen, soll aber gleichzeitig von einem leichten Portalkran gehoben werden. Außerdem muss die Lasteinleitung ins Mastrohr so gleichmäßig wie möglich erfolgen, um das Mastrohr nicht zu beschädigen, darf aber die Montageflansche nicht verdecken. Daraus ergeben sich die wesentlichen Randbedingungen

für die Kraftleitung von den Aufhängepunkten der Seilwinden zu den vier Abstützflächen am Mastrohr.

Um eine optimale Geometrie für den Satelliten zu finden, wurde zunächst eine Topologieoptimierung durchgeführt. Die Topologieoptimierung mit TOSCA ist eine parameterfreie Optimierung, bei der innerhalb eines vorgegebenen Bau-raums automatisch eine für die gegebenen Belastungen optimale Struktur entsteht. Der zur Verfügung stehende Bauraum ist in Abbildung 3.2-2 rot eingefärbt.



Abb. 3.2-2: Bauraum

Das Ergebnis der Topologie-optimierung (Abbildung 3.2-3) zeigt deutlich den Kraftfluss zwischen den Auflagen auf dem Mastrohr und den Befestigungen der Seilwinden.

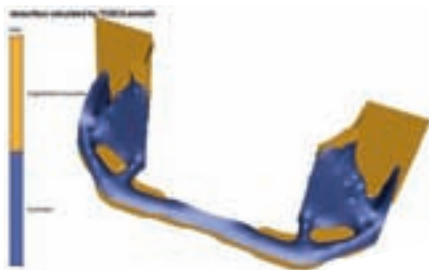


Abb. 3.2-3: Ergebnis der Topologie-optimierung

Dieses Ergebnis wurde nun konstruktiv umgesetzt (Abbildung 3.2-4), um eine neue, leichtere Struktur zu entwickeln. Dabei wurde eine Gewichtsreduzierung von 23% gegenüber dem Ausgangskonzept erreicht.

Im Laufe des Projekts kamen eine Reihe neuer Anforderungen hinzu. Beispielsweise ergab sich aus dem Regelungskonzept bzgl. der Ausbalancierung und Stabilisierung der Hubgondel in den unterschiedlichen Betriebs- und Belastungszuständen, dass eine größere Spreizung, d.h. ein größerer räumlicher Abstand zwischen den Seilwinden, erfor-

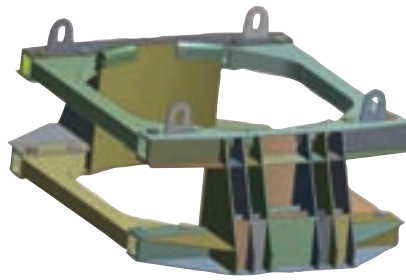


Abb. 3.2-4: Neues Design

derlich ist. Hierzu wurde eine Stabwerkskonstruktion (Abbildung 3.2-5) entwickelt, bei der die einzelnen Profile im Wesentlichen auf Zug bzw. Druck beansprucht werden. Außerdem konnte bei ausreichender Festigkeit und Steifigkeit der Struktur eine weitere wesentliche Gewichtsreduzierung erreicht werden.

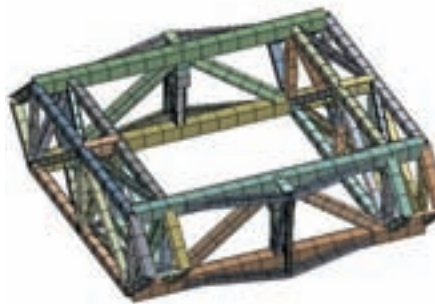


Abb. 3.2-5: Stabwerk

Lasteinleitung in das Mastrohr

Die Lasteinleitung vom Satelliten in das Mastrohr muss so gleichmäßig wie möglich gestaltet werden, um das Mastrohr nicht zu beschädigen. Der Satellit kann sich aber nicht am oberen Rohrrand abstützen, da dort das nächste Rohrsegment bzw. die Maschinengondel montiert wird.

Die erste Lösung ist eine Bajonettauflage (Abbildung 3.2-6). Der Satellit wird nach dem Heben durch den Portalkran so gedreht, dass seine Auflageflächen auf die am Mastrohr angebrachten Bajonettauflagen zum Liegen kommen. Zusätzlich zu den Bajonetten werden zwei Ringsteifen im Inneren des Mastrohrs eingebaut, um die gesamte Steifigkeit zu verbessern. Diese Lösung ist grundsätzlich machbar, hat aber einen wesentlichen Nachteil: Durch die außermittige Belastung entsteht ein Krepelmoment, das für das Beulverhalten des Mastrohrs ungünstig ist.

Die zweite Lösung arbeitet mit vier Aussparungen (Abbildung 3.2-7) im Mastrohr. Die Lasten werden direkt in der

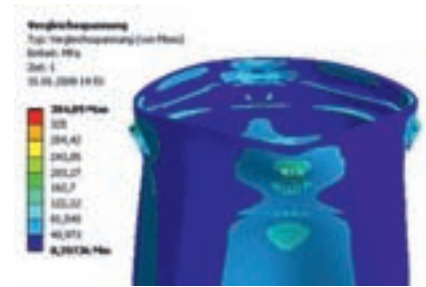


Abb.3.2-6: Bajonettauflage

Ebene der Rohrwand eingeleitet, und es entsteht kein Krepelmoment. Für das Mastrohr ist diese Variante deutlich günstiger, der Satellit wird aber mit etwas größeren Biegemomenten beaufschlagt. Außerdem müssen die Aussparungen im Mastrohr nach erfolgter Montage verschlossen werden.

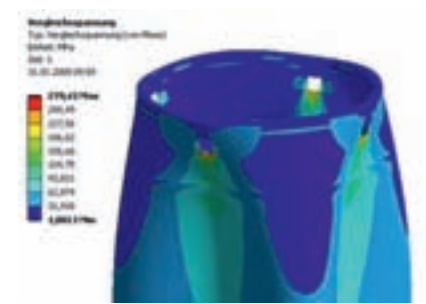


Abb. 3.2-7: Aussparungen

Hubgondel

Als nächstes Bauteil wurde die Hubgondel untersucht, die ebenfalls als Stabwerksstruktur konzipiert wurde. Sie wird über die vier Seilwinden am Satelliten aufgehängt und trägt einerseits die Belastung und andererseits zusätzlichen Wasserballast, der zum näherungsweise Ausbalancieren in den verschiedenen Belastungszuständen gebraucht wird. Nach einer ersten Analyse wurde entschieden, eine Balkenquerschnittsoptimierung durchzuführen. Dafür wurde die Software OPTIMUS, ein Parameteroptimierer der Firma Noesis, in Verbindung mit ANSYS Workbench (FEM) eingesetzt. Das Ziel dieser Querschnittsoptimierung war ein möglichst einheitliches Spannungsniveau in den verschiedenen Profilen.

Hierzu wurden die Profile in Gruppen eingeteilt, welche in Abbildung 3.2-8 farblich unterschiedlich dargestellt sind. Innerhalb dieser Gruppen wurden in der Optimierung die Querschnitte gleichzeitig variiert. Wichtig ist hierbei, dass bei der Optimierung nur normgerechte Profile verwendet werden.

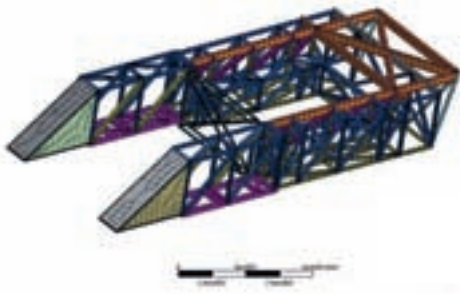


Abb. 3.2-8: Hubgondel

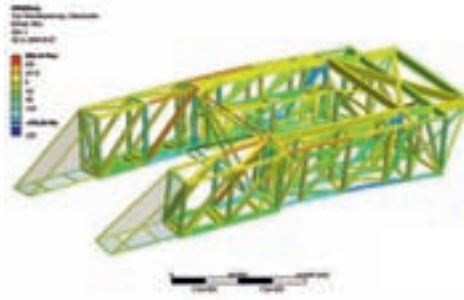


Abb. 3.2-9: Verbesserte Hubgondel

Die Optimierung mit OPTIMUS für mehrere relevante Lastfälle wurde mit einer Gewichtreduzierung von 32 % gegenüber dem Ausgangsdesign erfolgreich abgeschlossen.

Abbildung 3.2-9 zeigt die optimierte Hubgondel am Beispiel des kritischsten Lastfalls. Die gleichmäßige Färbung lässt erkennen, dass die Materialausnutzung über alle Profile sehr gleichmäßig ist. Die neuen Dimensionen der Profile konnten konstruktiv sofort umgesetzt werden.

Zusammenfassung

Im Rahmen des beschriebenen Verbund-Forschungsprojekts konnte innerhalb rund eines Jahres gezeigt werden, dass es technisch und wirtschaftlich sinnvoll ist, eine Windenergieanlage offshore ohne Einsatz eines Krans zu installieren. Mit Blick auf die zukünftige Entwicklung der Branche ist das ein sehr wichtiges Ergebnis, da die bislang zur Verfügung stehenden Montagetechniken teure und nur begrenzt verfügbare Hubschiffe und Krane erfordern, und deshalb eine Senkung der Installationskosten die Rentabilität eines Windparks signifikant verbessert. Die Hauptaufgabe der Hochschule Offenburg bestand darin, die notwendigen strukturmechanischen Analysen, Überlegungen und Optimierungsschritte durchzuführen, damit die teilweise sehr filigranen Tragstrukturen der Hubeinrichtung mit den immensen Lasten zurechtkommen.

Referenzen/References

- [1] M.P. Bendsøe and O.Sigmund: "Topology optimization – Theory, Methods and Applications", Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2004
- [2] R. Meske, J. Sauter, and E. Schnack: "Nonparametric gradientless shape optimization for real-world applications", Structural Multidisciplinary optimization,30, p. 201-218, 2005
- [3] Yalamas, Kachel, Ressel, Berg: "Innovativer Schwerlastaufzug für Offshore-Windenergieanlagen-Kozeptentwicklung und Optimierung", FED-Konferenz, Karlsruhe, 03.-04.06.2008
- [4] Yalamas, Kachel: "Innovative Montagetechnik für Offshore-Windenergieanlagen – Strukturanalyse und Optimierung eines kranlosen Montagesystems", ANSYS Conference & 26th CADFEM Users' Meeting, 22-24.10.2008
- [5] TOSCA 6.2 Manual (c) FE-DESIGN GmbH, 2008