

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

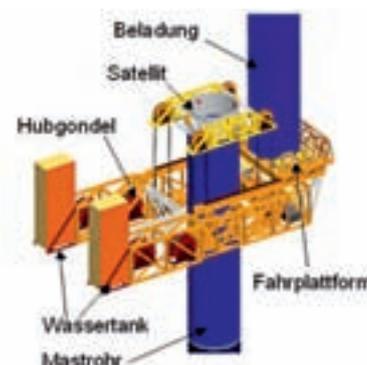


Abb. 3.2-1: Prinzip

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 Aufhängen-
punkten 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 gege-
benen Belastungen optimale Struktur
entsteht. Der zur Verfügung stehende
Bauraum ist in Abbildung 3.2-2 rot ein-
gefärbt.



Abb. 3.2-2: Bauraum

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

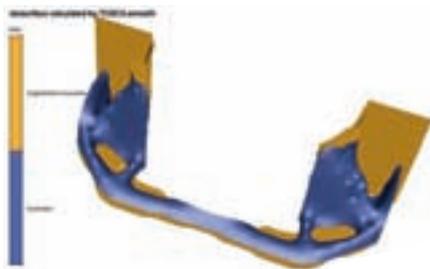


Abb. 3.2-3: Ergebnis der Topologie-
optimierung

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 Ausgangskon-
zept erreicht.

Im Laufe des Projekts kamen eine Reihe
neuer Anforderungen hinzu. Beispiels-
weise ergab sich aus dem Regelungs-
konzept bzgl. der Ausbalancierung und
Stabilisierung der Hubgondel in den un-
terschiedlichen Betriebs- und Bela-
dungszuständen, dass eine größere
Spreizung, d.h. ein größerer räumlicher
Abstand zwischen den Seilwinden, erfor-

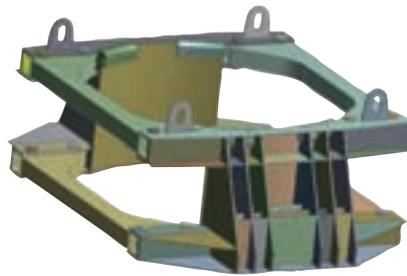


Abb. 3.2-4: Neues Design

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

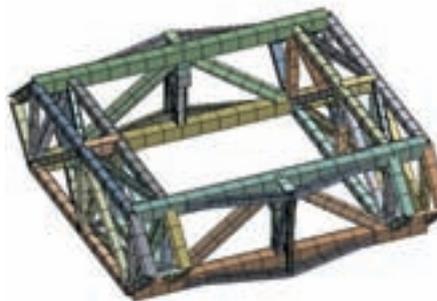


Abb. 3.2-5: Stabwerk

Lasteinleitung in das Mastrohr

Die Lasteinleitung vom Satelliten in das
Mastrohr muss so gleichmäßig wie mög-
lich gestaltet werden, um das Mastrohr
nicht zu beschädigen. Der Satellit kann
sich aber nicht am oberen Rohrrand ab-
stützen, da dort das nächste Rohrseg-
ment bzw. die Maschinengondel mon-
tiert wird.

Die erste Lösung ist eine Bajonettauf-
lage (Abbildung 3.2-6). Der Satellit wird
nach dem Heben durch den Portalkran
so gedreht, dass seine Auflageflächen
auf die am Mastrohr angebrachten Ba-
jonettauflagen zum Liegen kommen.
Zusätzlich zu den Bajonetten werden
zwei Ringsteifen im Inneren des Mast-
rohrs eingebaut, um die gesamte Steifig-
keit zu verbessern. Diese Lösung ist
grundsätzlich machbar, hat aber einen
wesentlichen Nachteil: Durch die au-
ßermittige Belastung entsteht ein Krem-
pelmoment, das für das Beulverhalten
des Mastrohrs ungünstig ist.

Die zweite Lösung arbeitet mit vier Aus-
sparungen (Abbildung 3.2-7) im Mast-
rohr. 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 güns-
tiger, der Satellit wird aber mit etwas gö-
ßeren Biegemomenten beaufschlagt.
Außerdem müssen die Aussparungen im
Mastrohr nach erfolgter Montage ver-
schlossen werden.

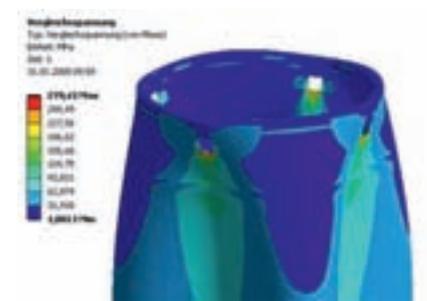


Abb. 3.2-7: Aussparungen

Hubgondel

Als nächstes Bauteil wurde die Hubgon-
del untersucht, die ebenfalls als Stab-
werksstruktur konzipiert wurde. Sie wird
über die vier Seilwinden am Satelliten
aufgehängt und trägt einerseits die Bela-
dung und andererseits zusätzlichen
Wasserballast, der zum näherungswei-
sen Ausbalancieren in den verschie-
denen Beladungszuständen gebraucht
wird. Nach einer ersten Analyse wurde
entschieden, eine Balkenquerschnittsopti-
mierung durchzuführen. Dafür wurde
die Software OPTIMUS, ein Parameter-
optimierer der Firma Noesis, in Verbin-
dung mit ANSYS Workbench (FEM) ein-
gesetzt. Das Ziel dieser Querschnitts-
optimierung 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 gleich-
zeitig variiert. Wichtig ist hierbei, dass
bei der Optimierung nur normgerechte
Profile verwendet werden.

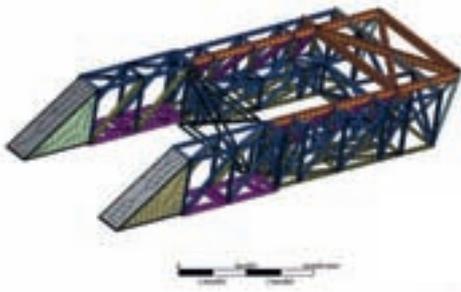


Abb. 3.2-8: Hubgondel

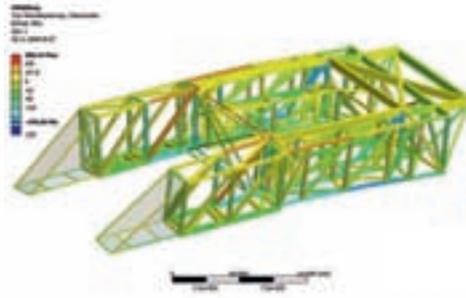


Abb. 3.2-9: Verbesserte Hubgondel

Die Optimierung mit OPTIMUS für mehrere relevante Lastfälle wurde mit einer Gewichtsreduzierung 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