

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Markus, Daniel; Wüchner, Roland; Röhm, Jochen; Bletzinger, Kai-Uwe Gründungen von Meeresströmungskraftwerken – Herausforderungen und Maßnahmen zur numerischen Simulation und Optimierung von umströmten Schwergewichtsfundamenten

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische
Hydromechanik**

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103624>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Markus, Daniel; Wüchner, Roland; Röhm, Jochen; Bletzinger, Kai-Uwe (2011): Gründungen von Meeresströmungskraftwerken – Herausforderungen und Maßnahmen zur numerischen Simulation und Optimierung von umströmten Schwergewichtsfundamenten. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Wasserkraft mehr Wirkungsgrad + mehr Ökologie = mehr Zukunft. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 45. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 369-378.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Gründungen von Meeresströmungskraftwerken – Herausforderungen und Maßnahmen zur numerischen Simulation und Optimierung von umströmten Schwergewichtsfundamenten

D. Markus, R. Wüchner, J. Röhm, K.-U. Bletzinger

Meeresströmungskraftwerke sind eine vielversprechende Technologie die in naher Zukunft auch in Form von Großprojekten umgesetzt werden soll. Um dies zu ermöglichen, widmet sich der Lehrstuhl für Statik (Technische Universität München) in Zusammenarbeit mit der Ed. Züblin AG der Entwicklung und Optimierung der Gründungsstrukturen dieser Anlagen. Die Forschungsarbeit beinhaltet sowohl standortspezifische Modellierungsaspekte als auch die Umsetzung und Erweiterung numerischer Methoden, wodurch detaillierte Untersuchungen der Fluideinwirkung und des Strukturverhaltens ermöglicht werden. Hierdurch sollen die nötigen Rahmenbedingungen für den Entwurf einer effizienten Gesamtkonstruktion geschaffen werden.

Tidal stream generators are a promising technology with great potential to be used for large scale energy production in the near future. In order to further push forward the realization of the structures, the Chair of Structural Analysis (Technische Universität München) and Ed. Züblin AG are developing and optimizing modern turbine foundation concepts. As part of this project, site specific modeling aspects are analyzed. In addition, modern numerical methods that allow for a detailed analysis of both the fluid flow and the structural behavior are used and further developed. The aim is to provide the necessary means to design an efficient structure.

1 Einleitung

Die langfristige Zielsetzung einer auf erneuerbaren Energieträgern aufbauenden Weltwirtschaft hat in den vergangenen Jahren zu einer Fülle von Innovationen und neuen Technologien im Bereich erneuerbarer Energien geführt. Im Rahmen dieser Entwicklung wurden die enormen Energiepotentiale der Meere als mögliche Ergänzung zu den bisher hauptsächlich landzentrierten Ansätzen erkannt. Meeresströmungskraftwerke sind hierbei eine sehr vielversprechende Technologie, die in naher Zukunft die Umwandlung kinetischer Energie aus dem Meer in Elektrizität in großem Maße ermöglichen soll (siehe Abbildung 1). Vor allem die Witterungsunabhängigkeit der Stromgewinnung sowie die präzise

Kalkulierbarkeit der Gezeitenströmungen verleihen dieser Technologie einen besonderen Stellenwert unter den erneuerbaren Energieträgern.

Die Umsetzung der Anlagen beschränkt sich derzeit auf nur wenige Prototypen, an Hand derer jedoch gezeigt werden konnte, dass Meeresströmungskraftwerke einen erheblichen Beitrag zur Stromversorgung leisten können. Aufbauend auf diesen Erfahrungen sind die Bestrebungen groß, das Gesamtkonzept der Anlagen weiter zu optimieren, um eine kommerzielle Umsetzung der Technologie in Form von ökologisch und ökonomisch leistungsfähigen Großprojekten zu ermöglichen. Besonders im Bereich der Strömungsturbinen konnten hier bereits erhebliche Fortschritte gemacht werden. Darüber hinaus erfordern die speziellen Umgebungsbedingungen und rauen Umwelteinflüsse, die sowohl bei der Montage als auch während des Betriebs von Meeresströmungskraftwerken auftreten können, innovative und neuartige Lösungen für das Gründungskonzept der Anlagen. Mit Hilfe von modernen computerunterstützten Methoden ist es möglich, das volle Optimierungspotential im Bereich der Gründung auszuschöpfen, wodurch ein maßgeblicher Beitrag zur Effizienzsteigerung der Gesamtstruktur geleistet wird. Die damit verbundene Herausforderung besteht darin, neuartige und kreative Lösungsvorschläge für die komplexen Fragestellungen in den Bereichen Offshore-Technologie, Strömungssimulation und Strukturoptimierung zu finden.

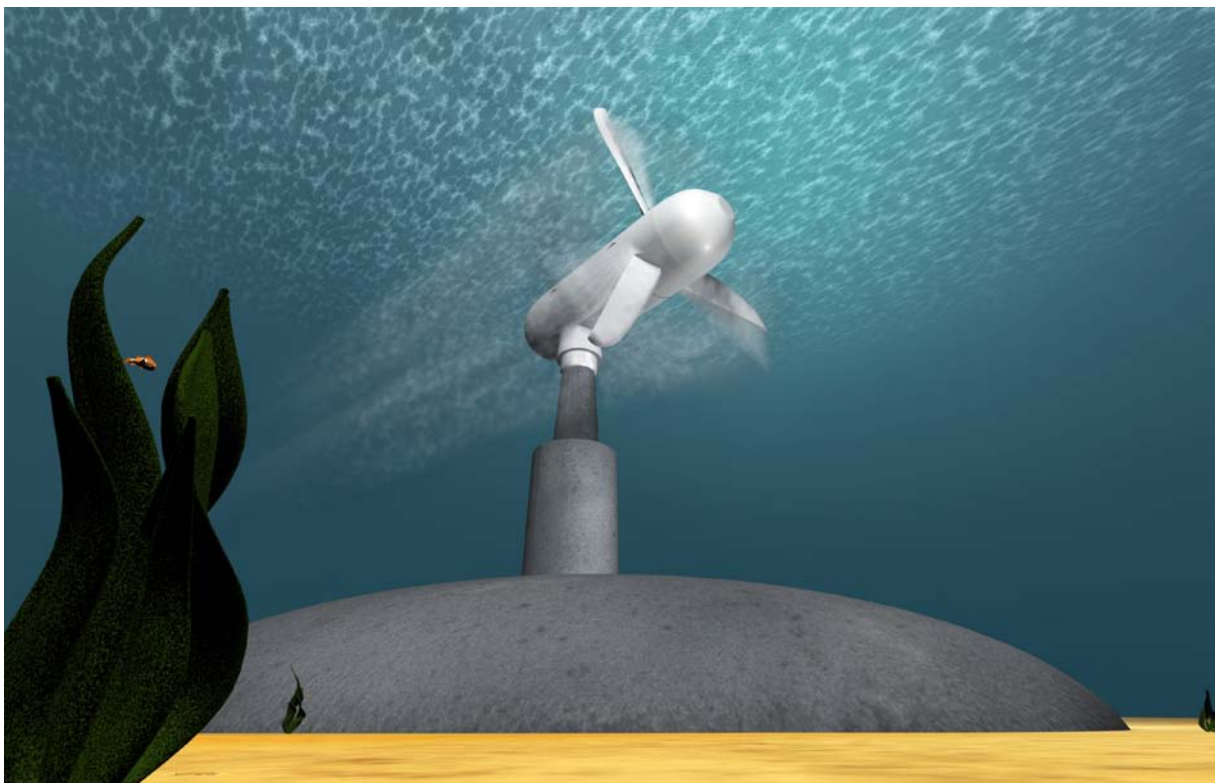


Abbildung 1 Entwurf eines Meeresströmungskraftwerks mit Schweregewichtsfundament

2 Gründungskonzepte

Gründungsstrukturen von Offshore-Bauten in mittleren und tiefen Gewässern werden seit Jahrzehnten in der Ölindustrie umgesetzt. Auch beim Bau von modernen Offshore-Windkraftanlagen wurde bereits eine Vielzahl verschiedener Gründungskonzepte entwickelt und erprobt. Dabei haben sich abhängig von der jeweiligen Wassertiefe, den standortspezifischen Bodenbeschaffenheiten und den vorherrschenden Umgebungsbedingungen, unterschiedliche Gründungsvarianten etabliert. Eine Übersicht verschiedener Gründungskonzepte ist in Abbildung 2 dargestellt. Zum einen ist es möglich, die Konstruktion auf einem hohlen Einzelpfahl aus Stahl, dem sogenannten Monopile, zu gründen. Alternativ werden bei Tripod- und Jacket-Gründungen die Lasten auf mehrere Pfähle verteilt, die an einem Übergangsstück miteinander verbunden sind und üblicherweise im Vergleich zum Monopile einen deutlich geringeren Einzelquerschnitt aufweisen (Lang und Bachmann, 2009).

Um die genannten Gründungskonzepte umzusetzen, werden Pfahlgründungen benötigt, die mit aufwändigen Ramm- bzw. Bohrverfahren realisiert werden und spezielle Baumaschinen erfordern. Dies ist besonders im Zusammenhang mit Meeresströmungskraftwerken häufig mit einer Vielzahl von Problemen verbunden. Standorte an denen der Bau von Anlagen wegen der starken Strömungen theoretisch wirtschaftlich ist, weisen auf Grund des durch die Strömung verursachten hohen Sedimenttransports oft einen felsigen Untergrund auf. Rammverfahren sind unter diesen Bedingungen in der Regel ausgeschlossen, aber auch die deutlich aufwändigeren Bohrverfahren stoßen bei extremen Umgebungsbedingungen an ihre Grenzen und gefährden die wirtschaftliche Umsetzbarkeit. Dies hängt vor allem mit der Problematik der Schiffsstabilisierung bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten zusammen, sowie den extrem kurzen Zeitfenster zwischen den Tidenwechseln, in denen günstigere Baubedingungen herrschen. Kritisch zu betrachten sind auch die entstehenden Schallbelastungen beim Einbringen von Ramppfählen, die einen negativen Einfluss auf die umgebende Meeresfauna haben (Elmer und Gerasch, 2007).

Alternativ zu pfahlgegründeten Anlagen ist es möglich, Offshore-Strukturen mit Hilfe von Schwergewichtsfundamenten auszubilden (siehe Abbildung 2.1). Die auftretenden Horizontalkräfte werden bei dieser Variante einzig über die Reibung zwischen der Fundamentsohle und dem Meeresboden in den Untergrund geleitet. Dies hat den großen Vorteil, dass auf aufwändige Bohrverfahren verzichtet werden kann. Die Fundamente können vollständig und wetterunabhängig in Großserienproduktion an Land gefertigt werden. Dabei ist es möglich, die Turbine bereits an Land auf dem Fundament zu montieren und anschließend die Gesamtstruktur als eine Einheit mit einem Schwimmkran zum

gewählten Standort zu transportieren. Das Ablassen auf den Meeresgrund geschieht zügig und ohne die Entwicklung nennenswerter Geräuschemissionen. Auch der Rückbau der Anlagen erweist sich als äußerst unkompliziert. Während bei pfahlgegründeten Strukturen die Einzelpfähle im Normalfall am Meeresgrund abgesägt werden und entsprechend auch Rückstände hinterlassen, können Schwergewichtsfundamente vollständig entfernt und die Materialien wiederaufbereitet werden.

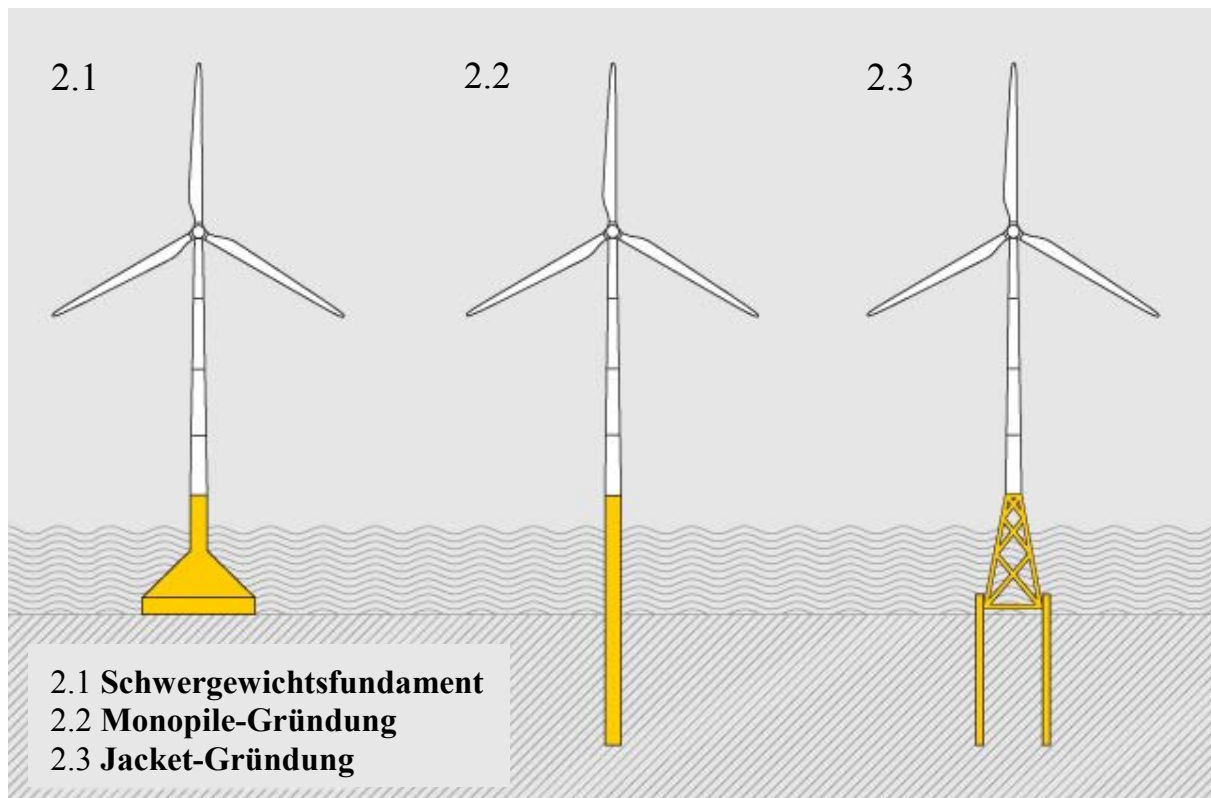


Abbildung 2 Gründungskonzepte von Offshore-Windkraftanlagen

Bei der Konstruktion der Schwergewichtsfundamente sind unterschiedliche Varianten denkbar. Eine Möglichkeit ist die Konzeption einer Stahlkonstruktion. Auf Grund der hohen Materialkosten wird die Konstruktion bei dieser Variante jedoch unwirtschaftlich und ist daher für eine breite Nutzung ungeeignet. Alternativ ist es möglich, die Schwergewichtsfundamente in Stahlbeton auszuführen. Bei sachgemäßer Ausführung zeichnet sich Stahlbeton vor allem durch eine hohe Leistungsfähigkeit, lange Dauerhaftigkeit sowie geringe Materialkosten aus. Ein großer Vorteil, speziell bezogen auf Meeresströmungskraftwerke, ist auch die nahezu grenzenlose Gestaltungsfreiheit, die der Werkstoff ermöglicht. Dies schafft einen idealen Ansatzpunkt für eine Formoptimierung der Fundamente.

3 Problemstellung

Das Prinzip der Energieerzeugung beruht bei Meeresströmungskraftwerken auf der Umwandlung kinetischer Strömungsenergie in elektrische Energie mit Hilfe einer Wasserturbine. Dabei wirken hohe Kräfte auf die Konstruktion, die zwangsweise in den Untergrund geleitet werden müssen. Damit Schwergewichtsfundamente diese Funktion ohne eine zusätzliche Verankerung erfüllen können, müssen sie eine entsprechend hohe Masse aufweisen. Daraus folgt eine Gründungsstruktur, deren Dimension zu signifikanten zusätzlichen Strömungskräften führt. Während im Bereich der Turbine die aus der Strömung resultierenden hohen Kraftresultierenden durchaus erwünscht sind, sollten im Bereich der Fundamente die zusätzlichen Schubkräfte auf ein Minimum reduziert werden, da diese keinerlei Beitrag zur Elektrizitätserzeugung leisten. Vielmehr führen ungünstig konzipierte Gründungen zu erhöhten Material-, Konstruktions- und Transportkosten.

Fallstudien mit vereinfachten Rechenmodellen von nicht-optimierten Schwergewichtsfundamenten belegen das ungünstige Verhältnis der Kraftresultierenden aus Fundament und Turbine. Die Studien ergeben, dass der Anteil der horizontalen Kraftresultierenden auf die Gründungsstruktur teilweise bei über 40% der Gesamt-Anlagenlasten liegt. Diese Ergebnisse zeigen die hohe Bedeutung einer günstig konzipierten Fundamentstruktur. Das Ziel einer formoptimierten Struktur, bei der die Schubkräfte im Bereich der Fundamente auf ein Minimum reduziert werden, ist mit vereinfachten Rechenmodellen, die in diesem Fall nachweislich die Horizontalkräfte überschätzen, nicht umsetzbar. Vielmehr bedarf es erweiterter Methoden, mit denen die komplexen Strömungsvorgänge detailliert erfasst werden können. Numerische Methoden im Bereich Computational Fluid Dynamics (CFD) und Kompetenzen in der Modellierung komplexer Strukturen ermöglichen hierbei innovative Optimierungsmöglichkeiten die zu einer wirtschaftlichen Gesamtstruktur führen.

4 Numerische Simulation

Die Modellierung Fluid-umströmter Strukturen ist vor allem in der Automobilindustrie sowie der Luft und Raumfahrtbranche ein gängiges und vielfach erforschtes Thema. Die daraus resultierenden strömungsoptimierten Geometrien werden jedoch unter der Annahme erzeugt, dass die Struktur einer Strömung ausgesetzt ist, die eine klare Hauptrichtung aufweist. An üblichen Standorten von Meeresströmungskraftwerken führt das periodische Verhalten von Gezeitenströmungen hingegen zweimal täglich zu einer vollständigen

Richtungsumkehrung des Strömungsfeldes. Dadurch entsteht ein neues Optimierungsproblem welches Geometrien erfordert, deren Formparameter in Normen und Tabellenwerken nicht erfasst sind.

Bei diesem Projekt werden daher moderne CFD Simulationsmethoden verwendet, um das komplexe und hochturbulente Strömungsverhalten im Bereich der Gründungsstrukturen realitätsnah abzubilden und dessen Auswirkungen auf die Struktur detailliert zu analysieren. Dabei werden die inkompressiblen Navier-Stokes Gleichungen auf Basis einer Finiten-Volumen-Diskretisierung gelöst. Auf Grund der Notwendigkeit, Oberflächenwellen am Meeresspiegel zu berücksichtigen, sowie der numerisch bedingten großen Einlass- und Ausflussabstände, entsteht für das numerische Modell ein relativ großer Definitionsbereich. Des Weiteren erfordern die turbulenten Fluideigenschaften der Strömung, mit Reynoldszahlen in der Größenordnung von ca. 10 Mio., eine hohe Netzauflösung. Dies ist insbesondere in den wandnahen Bereichen der Fundamentstruktur von hoher Bedeutung. Die daraus resultierenden extrem hohen Rechenzeiten werden durch die Verwendung eines instationären Reynolds Averaged Navier Stokes Ansatzes (URANS) auf einen praktikablen Umfang reduziert.

Die aus den zeitlich gemittelten Impulsgleichungen resultierenden zusätzlichen Unbekannten (Reynoldsspannungen) werden mit Hilfe eines Turbulenzmodells unter Verwendung zweier zusätzlicher Transportgleichungen gelöst. Dabei wird für die Modellierung der Turbulenzen das $k-\omega$ SST Modell zugrunde gelegt, welches es ermöglicht, die positiven Eigenschaften des $k-\varepsilon$ Modells in der freien Strömung und die Vorzüge des $k-\omega$ Modells in wandnahen Bereichen zu nutzen (Menter, 1993). Dies erfordert jedoch die Bestimmung von Randbedingungen für die in dem Modell verwendeten Turbulenzparameter. In den wandnahen Bereichen können diese abhängig von der Fluid-Viskosität und der wandnahen Zellengeometrie ermittelt werden. Die turbulenten Einlassbedingungen müssen hingegen an die lokalen Gegebenheiten des Kraftwerkstandorts angepasst werden. Hierfür werden standortspezifische Messdaten der turbulenten Intensität verwendet, auf deren Basis die Einlassbedingungen für die turbulente kinetische Energie k , die isotrope Dissipationsrate ε und die charakteristische Frequenz ω definiert werden.

Neben den Turbulenzeigenschaften der Strömung ist es notwendig, die Randbedingungen für das Geschwindigkeitsfeld an die lokalen Gegebenheiten anzupassen. Hierfür werden die am Standort ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten an der freien Oberfläche genutzt, um ein exponentielles Grenzschichtprofil zu erzeugen (Germanischer Lloyd, 2005). Basierend auf lokalen Messdaten wird diesem ein standortspezifischer Grenzschichtexponent zugrunde gelegt.

Um die physikalischen Gegebenheiten an Offshore-Standorten realitätsnah im numerischen Modell zu erfassen ist es notwendig, neben den lokalen Strömungsverhältnissen auch die Welleneinwirkung auf die Struktur zu berücksichtigen. Selbst wenn bedacht wird, dass die Kraftwerksstruktur sich auch während der Nipptide mehrere Meter unter der Wasseroberfläche befindet, ist der Einfluss der Wellen auf die Fundamentstruktur erfahrungsgemäß nicht vernachlässigbar. Dies resultiert unter anderem aus den ellipsenförmigen Fluidteilchenbahnen, die durch die Welle in der darunter befindlichen Wassersäule erzeugt werden. Die auftretenden Orbitale sind mit hohen Geschwindigkeits-Gradienten verbunden, die große Kräfte auf die Struktur verursachen.

In dem numerischen Modell wird die Wellenkinematik durch einen Wellengenerator am Einlass erzeugt. Der zugrunde liegende Algorithmus baut auf dem Fentonmodell auf, mit dem basierend auf einem Stromlinienansatz ein nichtlineares Wellenprofil erzeugt wird (Fenton, 1988). Im numerischen Strömungskanal kann jedoch nur dann ein realistisches Geschwindigkeitsfeld abgebildet werden, wenn die Fluidpartikel in den oberflächennahen Bereichen die Möglichkeit haben, Orbitale in vertikaler Richtung ohne eine Einschränkung durch nicht-physikalische Randbedingungen zu durchlaufen. Dies wird mit Hilfe eines Mehrphasenmodells realisiert, basierend auf der Volume of Fluid Methode (Hirt und Nichols, 1981). Hier wird eine Zustands-Transportgleichung zugrunde gelegt, deren Lösung die relativen Volumenanteile der Phasen Luft und Wasser in jeder Zelle für die einzelnen Zeitschritte bestimmt. Dies ermöglicht die Modellierung einer variierenden freien Oberfläche, wodurch eine elliptische Wellenkinematik in der Wassersäule entstehen kann. Als Eingangsparameter werden die standortspezifische Wellenhöhen, Wellenperioden und die lokale Wassertiefe angesetzt.

5 Ergebnisse

Die beschriebenen numerischen Methoden ermöglichen umfangreiche Untersuchungen der Gründungsstrukturen von Meeresströmungskraftwerken. In diesem Abschnitt wird konkret das Strömungsverhalten eines Schwergewicht-Testfundaments analysiert, wie es in Abbildung 3 dargestellt ist. Als Eingangsparameter werden standortspezifische Messdaten genutzt, mit denen eine auf dem 10-Minuten-Mittelwert basierende 50-Jahres-Strömung angesetzt wird. Der Wellensimulation liegen eine Wellenhöhe von ca. 3m und eine Wellenperiode von 8s zu Grunde. Dies entspricht einer Meereswelle die im obersten Drittel der am Standort zu erwartenden Wellenhöhen liegt.

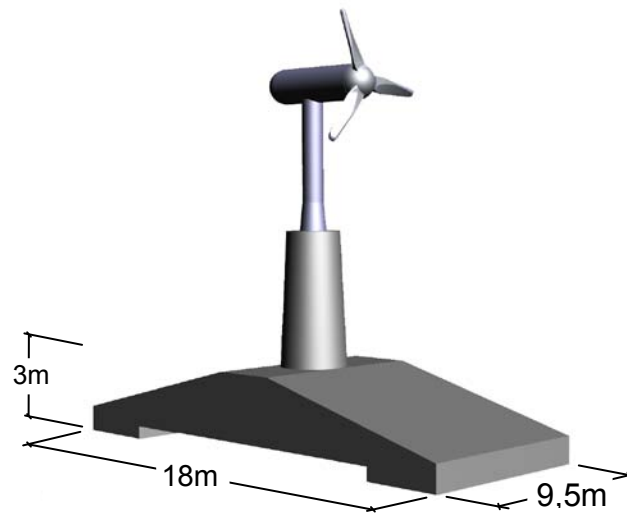


Abbildung 3 Testfundament für den Prototypen eines Meeresströmungskraftwerks

In einem ersten Schritt wird das grundsätzliche Strömungsverhalten der Geometrie bei reiner Strömungseinwirkung analysiert. Abbildung 4 zeigt den aus der Simulation resultierenden Stromlinienverlauf. Die rampenförmige Struktur verursacht eine graduelle Umlenkung der einwirkenden Strömung, wodurch die Schubkräfte im Vergleich zu blockartigen Strukturen deutlich reduziert werden. Die Umlenkung der Strömung verursacht jedoch auch eine deutliche Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten unmittelbar oberhalb der Struktur. Dies ist mit einem Druckabfall verbunden, der erhebliche Auftriebskräfte verursacht. Wie in Abbildung 5 dargestellt, sind diese mehr als doppelt so groß wie die berechneten Schubkräfte, wobei die Ergebnisse nach eintreten vollständiger Konvergenz verglichen werden sollten (nach ca. 60s). Dies motiviert Optimierungsansätze, die einen guten Kompromiss der teilweise im Widerspruch stehenden Schub- und Auftriebsminimierung anstreben.

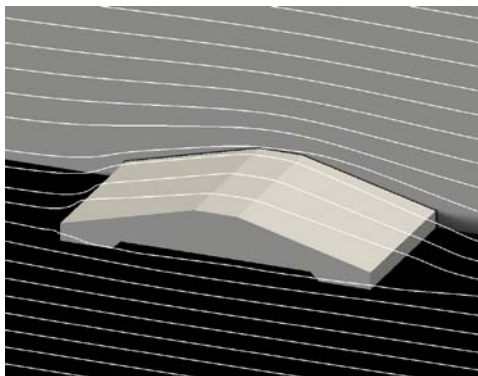


Abbildung 4 Stromlinien bei reiner Strömungseinwirkung

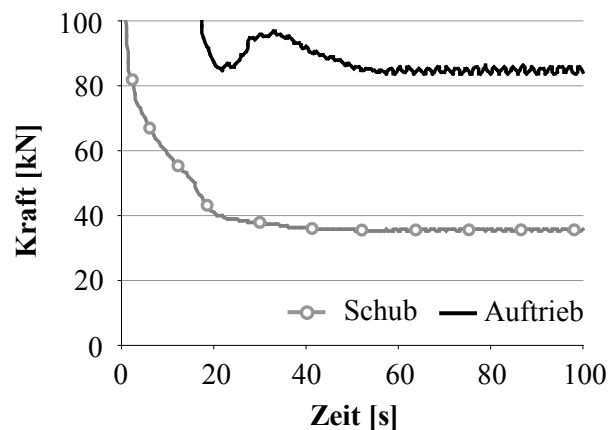


Abbildung 5 Kraftresultierende auf das Fundament

Neben der reinen Strömungseinwirkung wird auch der Einfluss von Welleneinwirkungen analysiert. Das in Abbildung 6 dargestellte Geschwindigkeitsfeld zeigt die deutlich veränderte Fluidkinematik. Es folgt der in Abbildung 7 dargestellte periodische Verlauf der Kraftresultierenden. Auch hier sollten lediglich die auskonvergierten Ergebnisse verglichen werden (nach ca. 20s). Die simulierte Wellenhöhe entspricht einem im Regelbetrieb häufig auftretenden Szenario und liegt damit deutlich unterhalb von Extremsituationen. Dennoch wird ersichtlich, dass die Welleneinwirkung auch bei üblichen Wetterbedingungen zu Kraftamplituden führt, die oberhalb der resultierenden Kräfte aus der Strömung liegen. Dies verdeutlicht die hohe Bedeutung des Welleneinflusses beim Entwurf der Gründungsstrukturen.

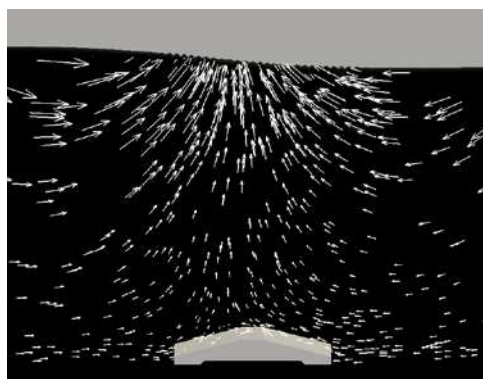


Abbildung 6 Geschwindigkeiten bei Welleneinwirkung

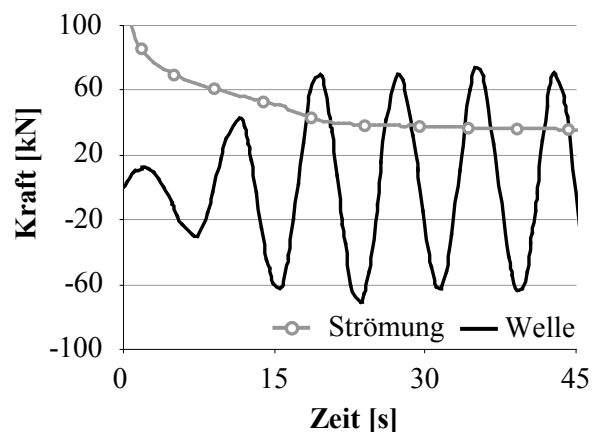


Abbildung 7 Vergleich Wellen- und Strömungseinwirkung

6 Fazit und Ausblick

Meeresströmungskraftwerke haben sich in den vergangenen Jahren als eine zukunftsweisende Technologie im Bereich erneuerbarer Energien erwiesen. Derzeit sind die Bemühungen groß, diese junge Technologie weiter zu optimieren, um eine maximale Wirtschaftlichkeit für die kommerzielle Nutzung der Anlage zu erzielen. Dies betrifft auch die Gründungsstrukturen, die an die besonderen Umgebungsbedingungen potentieller Standorte angepasst werden müssen. Hinsichtlich eines Gesamtkonzepts, das sowohl die Konstruktion, die Montage, den Betrieb, und den Rückbau der Anlagen berücksichtigt, werden Schwergewichtsfundamente den hohen Anforderungen besonders gut gerecht. Mit Hilfe modernster numerischer Berechnungsmethoden ist es möglich, das volle Potential der Strukturen zu entfalten. Hierbei ist eine Optimierung jedoch

nur dann zielführend, wenn die zugrunde gelegten Einwirkungen aus Strömung und Welle physikalisch realitätsnah erfasst werden. Dies wird durch die vorgestellten Methoden erreicht, wodurch eine umfangreiche Formoptimierung ermöglicht wird. Dabei sind Validierungsaspekte weiterhin von zentraler Bedeutung. Dies betrifft sowohl den Vergleich mit experimentell ermittelten Vergleichsparametern, als auch numerische Kontrollmechanismen wie zum Beispiel Konvergenz- und Stabilitätskriterien. Insgesamt sollen hierdurch die idealen Randbedingungen für eine wirtschaftliche Umsetzung von Meeresströmungskraftwerken geschaffen werden.

Literatur

- Elmer, K.-H., Gerasch, W.-J., Measurement and Reduction of Offshore Wind Turbine Construction Noise, DEWI Magazin vol. 30, S. 33-38, 2007.
- Fenton, J.D., The Numerical Solution of Steady Wave Problems, Computers & Geoscience vol. 14, no. 3, S. 357-368, 1988.
- Guideline for the Certification of Ocean Energy Converters, Part 1: Ocean Current Turbines, Germanischer Lloyd, 2005.
- Hirt, C.W., Nichols, B.D., Volume Of Fluid Method (VOF) for the Dynamics of Free Boundaries, J. Comp. Phys. vol. 39, S. 201-225, 1981.
- Lang, M., Bachmann, H., Gründung von Offshore-Windenergieanlagen aus filigranen Betonstrukturen unter besonderer Beachtung des Ermüdungsverhaltens von hochfestem Beton, F|E|I, Ed. Züblin AG, S. 48-49, 2009.
- Menter, F.R., Zonal Two-Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows, AIAA Paper 93-2906, 1993.

Autoren:

Dipl.-Ing. Daniel Markus,
Dr.-Ing. Roland Wüchner,
Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger
TU-München, Lehrstuhl für Statik
Arcisstr. 21
80333 München
Tel.: +49 – 89 – 28922152
Fax: +49 – 89 – 28922421
d.markus@bv.tum.de

Dr.-Ing. Jochen Röhm
Ed. Züblin AG
Albstadtweg 3,
70567 Stuttgart
Tel.: +49 – 711 – 78839830
Fax: +49 – 711 – 7883779
jochen.roehm@zueblin.de