

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Lawrenz, Martin; Mildebrath, Thea; Sauer, Stephan; Kühne, Daniel Nutzung der kinetischen Energie in Gewässerströmungen durch eine oszillierende Tragfläche

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/20.500.11970/103603>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Lawrenz, Martin; Mildebrath, Thea; Sauer, Stephan; Kühne, Daniel (2011): Nutzung der kinetischen Energie in Gewässerströmungen durch eine oszillierende Tragfläche. 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. 181-190.

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.



Nutzung der kinetischen Energie in Gewässerströmungen durch eine oszillierende Tragfläche

Martin Lawerenz, Thea Mildebrath, Stephan Sauer, Daniel Kühne

New concepts of hydroelectric power plants use the kinetic energy of river, tidal and ocean currents. The technology presented here operates with an oscillating wing. The motion of the hydrofoil is steered by a newly developed mechanism. This device transforms the oscillation into a continuous rotation, which in turn drives a generator. The contribution describes the development of the prototype including aspects of the kinematic and hydrodynamic simulation, optimization of the design parameters and results of first experimental investigations.

Neue Konzepte von Wasserkraftanlagen nutzen die kinetische Energie der Fluss-, Gezeiten-, und Meeresströmungen. Die hier verfolgte Technologie arbeitet mit einer oszillierenden Tragfläche, deren Bewegung ein neu entwickelter Mechanismus steuert. Damit findet gleichzeitig die Umwandlung in eine kontinuierliche Drehbewegung statt, die ihrerseits zum Antrieb eines Generators dient. Der Beitrag beschreibt die Entwicklung des Prototypen von der Modellbildung, über die Parameteroptimierung bis zur Realisierung und ersten experimentellen Untersuchungen.

1 Nutzung der kinetischen Energie strömender Gewässer

Konventionelle Wasserkraftanlagen erfordern ein Gefälle, um die potentielle Energie mit Turbinen umwandeln zu können. In Europa sind diese Potentiale im Wesentlichen ausgeschöpft. Daher versuchen neue Konzepte, die kinetische Energie von Fluss-, Gezeiten- und Meeresströmungen zu nutzen. Der Einsatz solcher Wasserkraftanlagen erfordert geringe Eingriffe in die Natur, da ein Aufstauen des Wassers nicht erforderlich ist. Dies dürfte für Betreiber hinsichtlich der gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Bewirtschaftung von Gewässern von Interesse sein, und es können so weitere Potentiale regenerativer Energie erschlossen werden.

Im Bereich der Meeres- und Gezeitenströmungen finden derzeit mehrere Entwicklungen horizontal durchströmter Turbinen statt. Zu ihnen gehören u.a. die Projekte Seaflow (Bard et al. (2004)), SeaGen und Openhydro vor der britischen Küste, die aufgrund der dort herrschenden Strömungsverhältnisse

gute Voraussetzung bietet. Eine Alternative zu den kontinuierlich rotierenden Turbomaschinen stellen Konzepte mit oszillierenden Tragflächen dar. Je nach konstruktiver Ausführung lassen sie sich auch in Fließgewässern mit geringer Tiefe einsetzen, die für ummantelte und mantellose Turbinen bauartbedingt nicht geeignet sind.

Neben älteren Untersuchungen (McKinney, DeLaurier (1981)) sind in jüngerer Zeit verschiedene Prototypen entwickelt und getestet worden. Sie basieren u.a. auf umfangreichen Untersuchungen des instationären Strömungsfeldes um die oszillierende Tragfläche. Hierzu zählt das in DTI (2005) dargestellte Stingray-Projekt in Großbritannien, welches als Gezeitenstromkraftwerk entwickelt und als Prototyp vor den Shetland Inseln erprobt wurde. Die Meeresströmung versetzt hier eine horizontal ausgerichtete Tragfläche, die an einem Ausleger geführt wird, in eine Auf- und Abbewegung bei der gleichzeitig der Anstellwinkel der Tragfläche angepasst wird. Die realisierte Anlage hat eine Tragflächenspannweite von 11 m und eine Nennleistung von 150 kW. Geplant wurden Farmen mit Einzelmaschinen von 500 kW.

Andere Konzeptionen werden durch die Forschergruppe von M. F. Platzer in den USA seit mehreren Jahren verfolgt. Umfangreiche Berechnungen und detaillierte Experimente an oszillierenden Tragflächen wurden von ihnen durchgeführt. So sind in dem Beitrag Platzer et al. (2009) zwei verschiedenartige Anlage beschrieben. In einem ersten Konzept wird eine horizontale Tragfläche über ein Gestänge so geführt, dass die angreifenden hydrodynamischen Kräfte die Auf- und Abbewegung bewirken. Bei der zweiten Konfiguration ragt die Tragfläche senkrecht ins Wasser. Die zur Hin- und Herbewegung erforderliche Anstellung wird in diesem Fall nicht mehr durch ein mechanisches Gestänge, sondern durch die Wasserkräfte selber gesteuert. Anschläge führen zur Neuausrichtung und Richtungsumkehr der Tragfläche.

Für Flussströmungen entwickelte die Firma Aniprop einen Hubflügelgenerator Send (2001). Die Tragfläche ist horizontal gelagert und wird über ein Gestänge sowohl angestellt als auch mit einer weitgehend konstanten Geschwindigkeit auf- und abbewegt. Während einer zweijährigen Versuchsphase im Kanal des Mittleren Lech im Stadtgebiet von Augsburg wurde die Anlage ausgiebig erprobt.

Basierend auf dem Konzept einer oszillierenden Tragfläche wurde in Stein et al. (2009) und Lawrenz (2009) ein Mechanismus vorgestellt, der die oszillierende Bewegung über eine Kurbelwelle in eine Drehbewegung umsetzt. Im Folgenden wird eine Weiterentwicklung vorgestellt, die sich durch eine robustere Mechanik und einen kontinuierlicheren Kräfteverlauf auszeichnet.

2 Aufbau der Kinematik

Die Anlage besitzt eine senkrecht ins Wasser ragende Tragfläche, die quer zur Strömung oszilliert. Sie ist über einen Ausleger mit einem Getriebe verbunden. Beide befinden sich oberhalb der Wasseroberfläche. Das Getriebe dient zur Energieübertragung, der Wandlung der oszillierenden Bewegung in eine Drehbewegung und zur Steuerung der Tragflächenposition. Hierzu besteht das Getriebe aus einem Scheibenbaum und einer Kurbelwelle. Die mechanische Kopplung der Bewegung von Tragfläche, Scheibenbaum und Kurbelwelle erfolgt jeweils über Seilpaare. Abbildung 1 zeigt den konstruktiven Aufbau in einer perspektivischen Ansicht, die auf den CAD-Daten basiert.

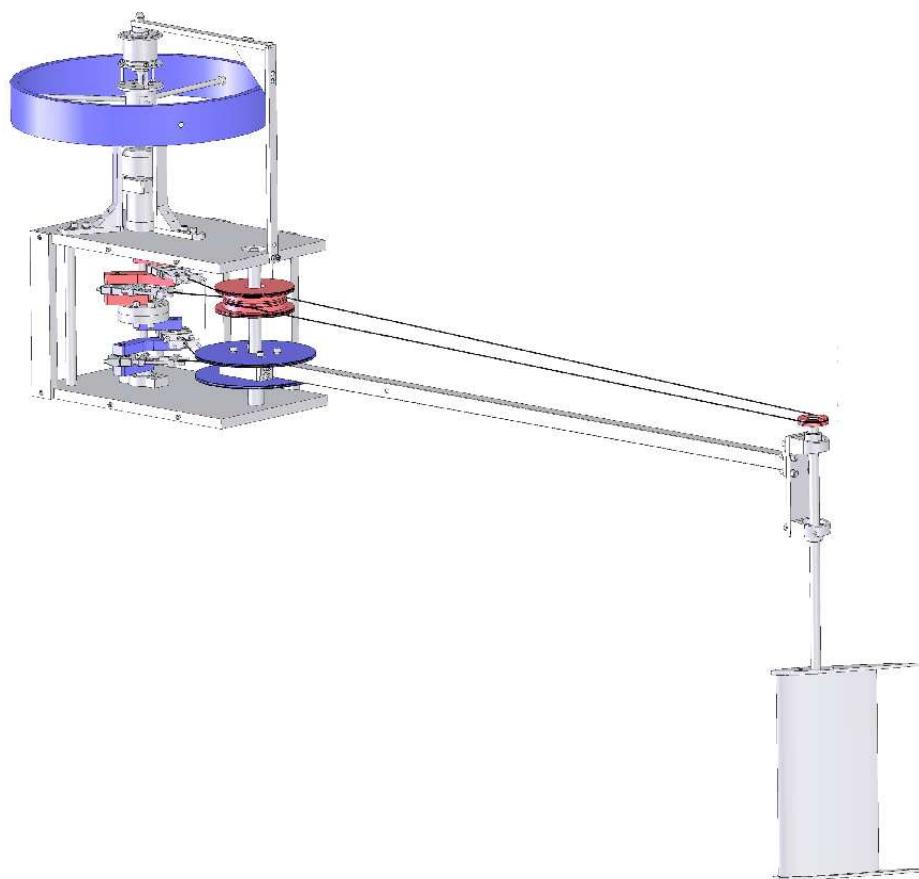


Abbildung 1 Konstruktiver Aufbau der Anlage mit Getriebe und Tragfläche

Mit der Umströmung der Tragfläche entstehen hydrodynamischen Kräfte, die zu einer Drehung des Auslegers um die Achse des Scheibenbaumes führen. Der im Folgenden beschriebene Aufbau des Getriebes bewirkt gleichzeitig eine Drehung der Tragfläche relativ zum Ausleger, wodurch sich der Anstellwinkel zur Strömung ändert und so eine oszillierende Bewegung zustande kommt.

Im unteren Bereich des Getriebes wird über 2 Seilzüge am Scheibenbaum die oszillierende Bewegung des Auslegers durch die Kurbelwelle in eine kontinuierliche Drehbewegung umgewandelt. Gekoppelt an diese Drehung wird im oberen Bereich des Getriebes die Positionierung der Tragfläche vorgenommen. Hierzu wandelt ein weiteres Kurbelpaar die Drehung der Welle durch Seilzüge, die mit einem zweiten Paar Scheiben des Scheibenbaums verbunden sind, ebenfalls in eine oszillierende Bewegung um. Diese oszillierende Drehung kann in Amplitude und Phasenlage von dem unteren Teil unabhängig gewählt werden. Ein Seilzug zwischen dem oberen Teil des Scheibenbaums und der Drehachse der Tragfläche steuert schließlich deren Stellung gegenüber dem Ausleger. Durch eine geeignete Wahl der einzelnen Konstruktionsparameter wird die Tragfläche in Lage und Ausrichtung während einer Umdrehung der Kurbelwelle so positioniert, dass eine optimale Nutzung der Strömungsenergie zustande kommt.

Zur Aufrechterhaltung der Drehbewegung in den Totpunkten des oszillierenden Armes dient eine Schwungscheibe. Am Abtrieb der Kurbelwelle folgt ein Getriebe, um für den Generator eine hinreichend große Drehzahl zur Verfügung zu stellen.

Die Dimensionierung der einzelnen Bauteile muss für eine effektive Bewegungssteuerung sehr genau aufeinander abgestimmt werden. Die wesentlichen Elemente der Kinematik werden durch 10 geometrische Parameter beschrieben. Über eine Optimierungsstrategie basierend auf einem Evolutionsalgorithmus, wie er in Ahmed und Lawrenz (2003) dargestellt ist, werden diese so ermittelt, dass einerseits ein blockadefreier Bewegungsablauf entsteht und andererseits eine maximale Energieübertragung erzielt wird.

3 Modellierung der Energieübertragung

Die Energieübertragung vom strömenden Wasser auf die angestellte Tragfläche wird über die auf sie wirkenden Kräfte und Momente ermittelt. Eine physikalisch genaue Beschreibung der Strömungsvorgänge ist insbesondere im Bereich der Wendepunkte nur mit komplexen numerischen Modellen möglich. Mit Rücksicht auf die zur Verfügung stehenden Ressourcen ist zur Auslegung des Prototypen bei den Berechnungen bewusst auf die Berücksichtigung instationärer Effekte verzichtet worden. Dies lässt sich auch mit der Strouhal-Zahl begründen, die zur Abschätzung der Größenordnung der zeitabhängigen Vorgänge herangezogen wird. Gebildet mit der Profilanströmgeschwindigkeit c_∞ , der Sehnenlänge S und der Zeit für eine Kurbelwellenumdrehung liegt sie typischerweise bei $Sr = 0,04$. Dreidimensionale Effekte an den Flügelenden

bleiben rechnerisch ebenfalls unberücksichtigt, da sie konstruktiv durch Endscheiben reduziert werden.

Die Reduktion auf eine zweidimensionale, reibungsfreie Betrachtung ermöglicht die Ermittlung der auf die Tragfläche wirkenden Kräfte und Momente in Abhängigkeit des Anströmwinkels δ und der Anströmgeschwindigkeit \vec{w}_∞ direkt aus der Profilcharakteristik. Hierzu wird auf Daten zurückgegriffen, die von Critzos et al. (1955) für das NACA0012 Profil experimentell bei einer Reynoldszahl von $1,6 \cdot 10^6$ ermittelt wurden. Sie sind auf die hier vorliegende Situation übertragbar.

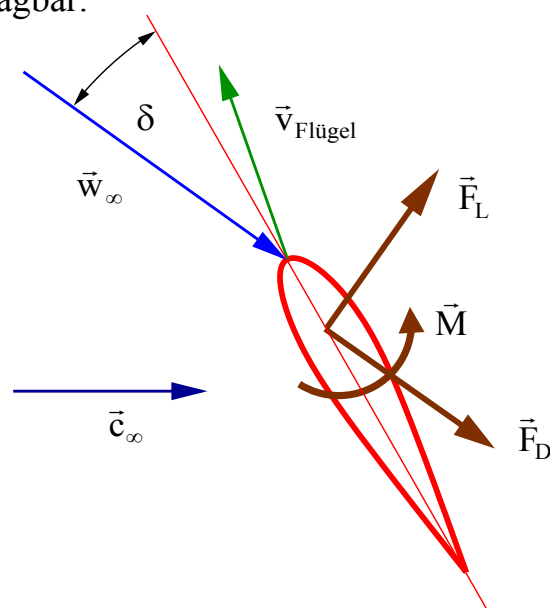


Abbildung 2 Kräfte und Momente am angeströmten Flügel

Die Anströmgeschwindigkeit \vec{w}_∞ und der Anströmwinkel δ lassen sich, wie in Abbildung 2 gezeigt, zu jedem Zeitpunkt aus der Lage der Tragfläche, ihrer Geschwindigkeit $\vec{v}_{\text{Flügel}}$ und der Fließgeschwindigkeit \vec{c}_∞ des Wassers ermitteln.

Da der Flügel dem Wasser kinetische Energie entzieht, ist die Fließgeschwindigkeit des Wassers im Bereich des Flügels bereits geringer als in der ungestörten Zuströmung. In dem von Betz für Windturbinen entwickelten Modell wird die Strömung unter optimalen Bedingungen in der Rotorebene auf $2/3$ der Zuströmgeschwindigkeit reduziert. Aus diesem Grund wird in den hier durchgeführten Berechnungen der Energieübertragung des oszillierenden Flügels ebenfalls nur eine Fließgeschwindigkeit von $2/3c_\infty$ berücksichtigt. Dies führt zu einer Unterbewertung, da die Abmessungen der Tragfläche eine maximale Energieübertragung entsprechend der Betzschen Theorie nicht erlauben. Dieser Ansatz gibt aber die tatsächlichen Verhältnisse gut wieder, wie die Versuche gezeigt haben.

Die Profilcharakteristik liefert die zugehörige Auftriebskraft \vec{F}_L , die Widerstandskraft \vec{F}_D und das vom Fluid auf die Tragfläche ausgeübte Drehmoment \vec{M} . Beschreibt $\vec{\omega}$ die zeitabhängige Winkelgeschwindigkeit, mit der sich der Flügel um seine Achse dreht, ergibt sich für die vom Fluid auf die Tragfläche übertragene Leistung

$$P = \vec{F}_L \cdot \vec{v}_{\text{Flügel}} + \vec{F}_D \cdot \vec{v}_{\text{Flügel}} + \vec{M} \cdot \vec{\omega}.$$

Basierend auf diesem Modell der hydrodynamischen Kräfte und Momente und dem in Kapitel 2 beschriebenen kinematischen Modell lassen sich die geometrischen Verhältnisse der einzelnen Getriebekomponenten zur Steuerung des Bewegungsablaufes nun so optimieren, dass über einen Zyklus gemittelt eine maximale mittlere Leistung \bar{P} erzielt wird.

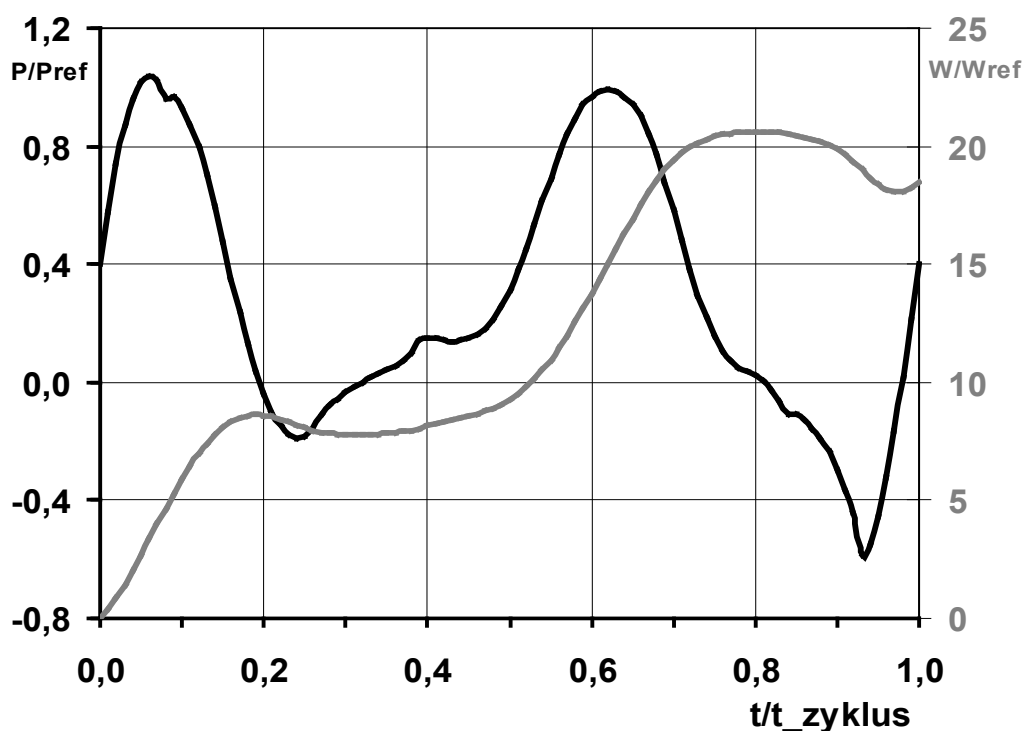


Abbildung 3 Berechnete Leistung und übertragene Arbeit während eines Zyklus

Abbildung 3 zeigt den berechneten Verlauf von Arbeit und Leistung über einen Zyklus normiert auf folgende Referenzwerte

$$W_{\text{ref}} = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} c_{\infty}^2 L S^2 \quad , \quad P_{\text{ref}} = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} c_{\infty}^3 L S.$$

Bei $t = 0$ steht der Ausleger des Flügels parallel zur ungestörten Anströmung. Aufgrund der vom Getriebe gesteuerten Kinematik ist die über einen Zyklus erbrachte Leistung nicht konstant. An den Wendepunkten muss zudem aus dem Schwungrad der Anlage Energie zugeführt werden.

4 Prototyp und Messtechnik

Basierend auf den Berechnungen wurde ein Prototyp so ausgelegt und gefertigt, dass er sowohl in der Kipprinne der Universität Kassel als auch mit größerem Ausleger und Flügel in einer Flussströmung erprobt werden kann. Der Ausleger für die Versuche in der Kipprinne hat eine Länge von 1,5 m und der Flügel mit einer Sehnenlänge von 0,2 m hat eine Spannweite von 0,4 m. Der Ausleger oszilliert in einem Winkelbereich von ca. $+40^\circ$ bis -20° gegenüber der Fließrichtung des Wassers. An der Kurbelwelle angeflanscht ist ein Getriebe, das die Bewegung im Verhältnis 1:15 übersetzt, um dem Generator eine hinreichende Drehzahl zur Verfügung zu stellen. Weiterhin sind eine Rutschkupplung als Sicherheit gegen plötzliches Blockieren und eine Schwungscheibe zur Überwindung der Totpunkte angeflanscht, die so ausgelegt ist, dass sie die Arbeit eines ganzen Zyklus speichert. Um die erforderlichen Längenänderungen der Seile während einer Kurbelwellenumdrehung auszugleichen, wurden Federspanner eingesetzt. Den Gesamtaufbau im Betrieb zeigt Abbildung 4.



Abbildung 4 Prototyp mit Messaufbau in der Kipprinne

Zur experimentellen Analyse des Prototypen werden der Bewegungsablauf und die übertragene Energie bestimmt. Die Eingangsleistung wird hierzu aus dem Biegemoment am Ausleger und dessen Winkelgeschwindigkeit ermittelt. Dehnungsmessstreifen am Ausleger liefern hierzu in Verbindung mit einer entsprechenden Kalibrierung die Daten zur Bestimmung des Biegemomentes. Über je einen Seilzugpositionsgeber erfolgt die Messung der Winkelstellung des Auslegers und des Flügels im zeitlichen Verlauf. Diese Signale werden mit einer

Abtastrate von 75 Hz erfasst. Als zeitliche Mittelwerte werden schließlich die Drehzahl des Generators und die vom ihm erzeugte elektrische Leistung gemessen. Die Versuche in der Kipprinne erfolgten bei konstanter Fließgeschwindigkeit, die mit einer Flügelradsonde bestimmt wurde.

5 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Die Messungen wurden für unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten und elektrische Lasten am Generator durchgeführt. Erste Ergebnisse für eine Anströmgeschwindigkeit $c_\infty = 0,67 \text{ m/s}$ und eine elektrische Last von 100Ω sind in Abbildung 5 dargestellt. Die einzelnen Zyklen einer Messung weisen untereinander eine gewisse Streuung auf, wobei der Verlauf stets ähnlich ist. Qualitativ stimmen Messung und Rechnung recht gut überein und zeigen einen vergleichbaren zeitlichen Verlauf. Allerdings sind auch Abweichungen erkennbar, die zum Teil auf elastische Verformungen zurück zu führen sind. Hier sind insbesondere die Federelemente zu nennen. Demgegenüber berücksichtigt das theoretische Modell bisher weder Elastizitäten noch dynamische Effekte aufgrund der Beschleunigungen und Verzögerungen der Massen.

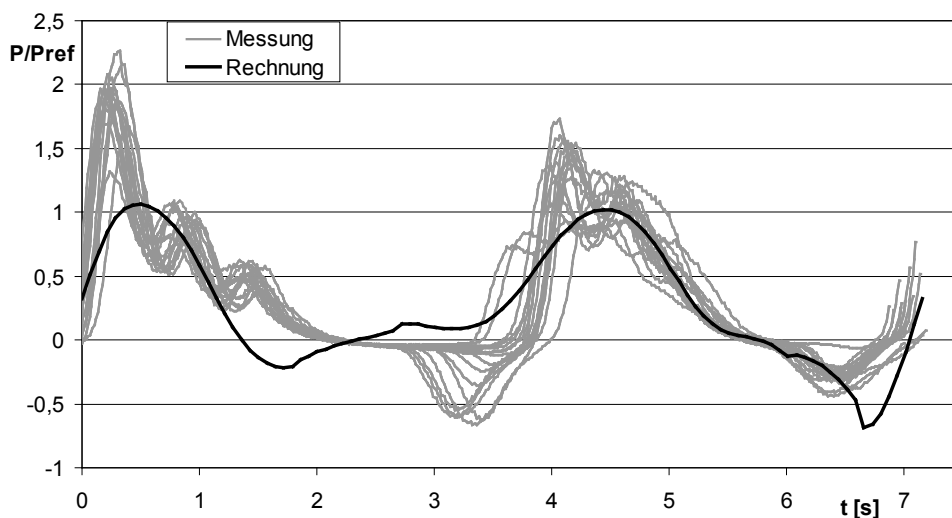


Abbildung 5 Mechanische Leistung im Verlauf eines Zyklus: Vergleich Messung - Rechnung für $c_\infty=0,67\text{m/s}$ und 100Ω Last am Generator

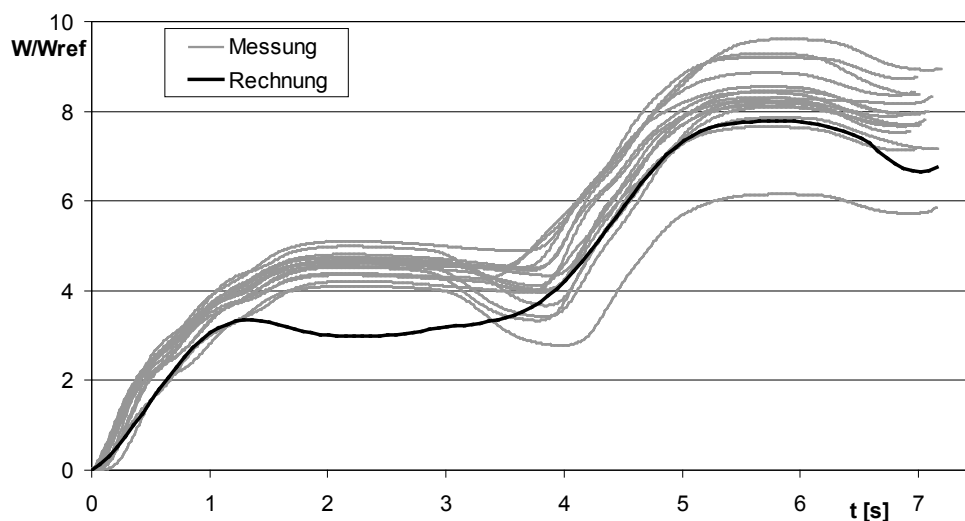


Abbildung 6 Übertragene Arbeit im Verlauf eines Zyklus: Vergleich Messung - Rechnung für $c_\infty=0,67\text{m/s}$ und $100\ \Omega$ Last am Generator

Vergleicht man die messtechnisch ermittelte mechanische Leistung mit der erzeugten elektrischen Energie des Generators, liegt die Differenz in der Größenordnung des Generatorwirkungsgrades von ca. 50%. Das Gesamtniveau der übertragene Arbeit und Leistung liegt bei den Messungen über den Prognosen der Rechnung.

6 Ausblick

Die ersten Messergebnisse konnten das prognostizierte Verhalten des theoretischen Modells bestätigen. Weitere Untersuchungen - auch in einer Flussströmung – sollen Informationen zum Entwicklungspotential liefern und die Weiterentwicklung des Prototypen ermöglichen. Dies wird auch mit einer genaueren Modellierung der Vorgänge in den Simulationsverfahren in Verbindung stehen. Für den praktischen Einsatz derartiger Anlagen werden schließlich belastbare Daten zu den zu erwartenden Kosten und deren Strukturen von entscheidender Bedeutung sein.

Danksagung

Die hier dargestellten Untersuchungen wurden mit Mitteln des *Fonds zur Veredelung und Verwertung von Patenten der staatlichen Hochschulen Hessens* unter dem Förderkennzeichen 70599067 gefördert. Die Autoren danken dem Hessischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst vertreten durch die Wirtschafts- und Infrastrukturbank Hessen für die gewährte Unterstützung.

Literatur

- Ahmed, R. und Lawerenz, M.: On the Aero-Mechanical Design of Multistage Axial Compressors Using Parallel Optimization Algorithms, Proceedings 16th Intern. Symposium on Air Breathing Engines, ISABE-2003-1017
- Bard, J., Caselitz, P., Giebhardt, J., Peter, M.: Erste Meeresströmungsturbine vor der englischen Küste – 1 Jahr Betriebserfahrungen“, Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik, 2004
- Critzos, C., Heyson, H., Boswinkel, R.: Aerodynamic Characteristics of NACA 0012 Airfoil Section at Angles of Attack From 0° to 180°, NACA TN 9981, 1955
- DTI, Department of Trade and Industry (UK): Stingray Tidal Stream Energy Device – Phase 3, report T/06/00230/00/rep URN 05/864, 2005
- Tobias Stein, Jochen Bregar, Lawerenz, M.: Simulation der Energieübertragung durch oszillierende Tragflächen in Gewässerströmungen, Wasserbaukolloquium Dresden, 2009
- Lawerenz, M.: Einrichtung zur Energieübertragung zwischen einem strömenden Medium und einer Kurbelwelle. Patentanmeldung DE 10 2009 039 072.3-15, 2009
- McKinney, W., DeLaurier, J.: The Wingmill: An Oscillating-Wing Windmill. AIAA Journal of Energy, Vol. 5, No2, pp.109-115, 1981
- Platzer M.F., Ashraf M.A., Young J., Lai J.C.S.: Development of a New Oscillating Wing Wind and Hydropower Generator, 47th AIAA , 2009-1211, Januar 2009
- Send, W.: Hubflügel-Strömungskraftmaschine mit partiell linearer Kinematik, DE-Patentanmeldung 2001 DE10109475B4

Autoren:

Prof.-Dr.-Ing. Martin Lawerenz,
Dr.-Ing. Thea Mildebrath,
Stephan Sauer,
Daniel Kühne

Universität Kassel
Institut für Thermische Energietechnik
Fachgebiet Strömungsmaschinen
Kurt-Wolters-Straße 3
D-34109 Kassel
Tel.: +49 – 561 – 804 3940
Fax: +49 – 561 – 804 3993
turbo.office@uni-kassel.de