

Optimierung der Schaufelruderform der neuartigen Wasserkraftmaschine StECon zur Nutzung der Strömungsenergie

Jens Metzger, Jessica Schmidt, Jörg Wieland, Hans-Ludwig Stiller, Jürgen Jensen

Zusammenfassung

Der von Hans-Ludwig Stiller entwickelte und patentierte StECon (Stiller-Energy-Converter) nutzt die kinetische Energie von Fließgewässern. Im Vergleich zu anderen unterschlächtigen Wasserradtechniken bietet der StECon mit seiner kompakten Bauweise mehrere Vorteile. Durch seinen dem Kirsten-Boeing-Propeller gleichenden Bewegungsablauf und sein spezielles Planetengetriebe mit dreifachem Zahneingriff ist dieser Wasserkraftwandler vollständig eingetaucht funktionsfähig, läuft vorwärts wie rückwärts und ermöglicht den Einsatz mit horizontaler und vertikaler Radachse sowie mit einer ein- oder zweiseitigen Lagerung. Das im Planetengetriebe mittig gelegene Sonnenrad ermöglicht durch Phasenverstellung der Schaufelruder eine optimale Ausrichtung des Rades zur Strömungsrichtung.

An einem Testmodell wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsvorhabens zur wissenschaftlichen Erschließung der Leistungsmerkmale des StEwaKorades zur Gewinnung von regenerativer Energie aus Fließgewässern erste Erfahrungen für den Bau eines Prototyps gesammelt (StEwaKorad – Stiller Energiewandler Kompaktwasserrad heute als StECon bezeichnet). Im Rahmen der Konzeptionierungsphase des optimierten StECon-Prototyps wurde zunächst an einem Testmodell das Leistungsverhalten bei Variation des Durchflusses, der Drehzahl und des Unterwasserstands untersucht und unterschiedliche Schaufelruderformen eingesetzt. Aufgrund des hohen Optimierungspotentials sowie der Vielzahl von möglichen Formen wurden in einer kleineren Messrinne unterschiedliche Schaufelruderformen hinsichtlich ihres Strömungswiderstands untersucht. Die Schaufelruder wurden im Maßstab von 1:2,5 hergestellt und untersucht. Durchgeführt wurden die Messungen an neun unterschiedlichen Schaufelruderformen durch die Verwendung von Wägezellen, welche die auf das Schaufelruder einwirkenden Strömungskräfte in x- und y-Richtung erfassen. Aus den Untersuchungen konnte der Strömungswiderstand der einzelnen Schaufelruder bei unterschiedlichen Anstellwinkeln ermittelt und somit die Anzahl der zu untersuchenden Formen begrenzt werden. Da sich die Bewegungen der einzelnen Blätter im Verbund überlagern, kommt es zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Schaufelruder. Bei einem Einbau des Rades in einem begrenzten Gerinne entstehen zudem Wechselwirkungen mit den Rinnenwandungen. Aus diesen Gründen ist die Untersuchung aller Kräftewirkungen unerlässlich und führt zur optimalen Schaufelruderform, die eine deutliche Leistungssteigerung erwarten lässt.

1 Einführung – Prinzip des StECon

Ein typisches unterschlächtiges Wasserrad mit zehn starren Schaufelrudern kann nur maximal bis zur Hälfte (Radachse) in eine Wasserströmung eingetaucht werden, da ansonsten gegenläufige Kräfte zu einer Abbremsung des Rades führen. Diese gegenläufigen Kräfte werden beim StECon (Abb. 2) durch eine strömungsgünstige Anordnung der fünf in der Strömung liegenden Schaufelruder um eine neue Radachse neutralisiert (vgl. Abb. 1). Dadurch ist es möglich, den StECon vollständig im Wasser eingetaucht zu nutzen.

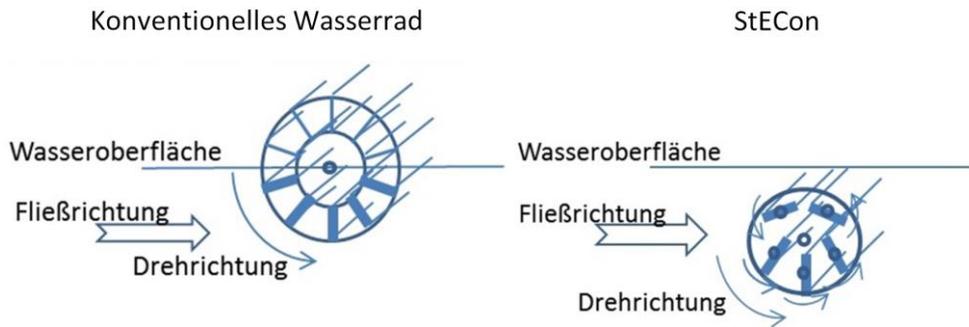


Abb. 1 Schematische Darstellung der Wirkungsweise von einem unterschlächtigen Wasserrad (oben) mit 10 Schaufelrudern im Vergleich zum StECon (unten)

Die Funktionsfähigkeit des StECon wird über sein spezielles Planetengetriebe mit 3-fachem Zahneingriff ermöglicht, welches einen gleichmäßigen Bewegungsablauf garantiert. Das im Planetengetriebe mittig gelegene Sonnenrad lässt durch Verdrehung eine Änderung des Phasenwinkels zu, so dass die Schaufelruder optimal auf die Strömung ausgerichtet werden können. Durch die Getriebeübersetzung von 2:1 dreht sich jedes Schaufelruder während einer Vollumdrehung (360°) des Rades um 180° , so dass bei der ersten Umdrehung die Vorderseite und bei der zweiten die Hinterseite der Schaufelruder angeströmt werden. In der unteren Hälfte bei waagrechter Achsausrichtung liegen die Schaufelruder beinahe senkrecht zur Strömungsrichtung, währenddessen die Schaufelruder der oberen Hälfte hydrodynamisch günstig eine parallele Lage zur Strömung einnehmen. Gegenüber anderen Wasserradtypen lässt sich vorteilhaft mit Hilfe der Phasenverstellung eine indifferente Stellung erreichen, wodurch der StECon in der Strömung zum Stillstand geführt werden kann (Jensen et al. 2015a).

2 Anwendungsmöglichkeiten

Der StECon eignet sich besonders als Wandler der kinetischen Energie in Fließgewässern, wodurch selbst kleinste Fallhöhen und Fließgeschwindigkeiten effizient genutzt werden können. Wegen seiner kompakten Bauweise und der Funktionsfähigkeit komplett unter Wasser eingetaucht, kann der StECon auch aus bisher nicht wirtschaftlich nutzbaren Wasserkraftpotentialen regenerative Energie gewinnen. Durch das außenliegende Getriebe ergibt sich die Möglichkeit des einseitigen sowie zweiseitigen konstruktiven Aufbaus. Da der StECon auch komplett eingetaucht im Wasser funktioniert, ist die Auslegung sowohl in waagrechter als auch in senkrechter Lage möglich (Jensen et al. 2015b). Beispielsweise bietet sich der waagrechte Einsatz eines zweiseitig gelagerten Rades in flachen Fließgewässern an, wohingegen die senkrechte einseitige Variante vor allem für begrenzte Strömungen, wie etwa in Kanälen, bestens geeignet ist. Da das Planetengetriebe des StECon die Drehbewegung in beide Richtungen ermöglicht, ist die Verwendung neben der Generatorfunktion auch als Antrieb möglich (Schmidt et al. 2015c).

3 Forschungsprojekt zur Untersuchung der Leistungsmerkmale des StECon

Innerhalb des 6. Energieforschungsprogramms "Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung" werden die Erforschung und Entwicklung neuer Technologien zur Erzeugung elektrischer Energie durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Über den Zeitraum vom 01.10.2014 bis 31.03.2016 wird als Teil dieses Energieforschungsprogramms das Forschungsprojekt StEwaKorad vom

Forschungsinstitut für Wasser und Umwelt (fwu) sowie vom Institut für Konstruktionstechnik – CAD – Mechatronik (kcm) der Universität Siegen durchgeführt. Zielsetzung dieses Projektes ist die wissenschaftliche Erschließung der Leistungsmerkmale und Kenndaten des vom Erfinder Hans-Ludwig Stiller entwickelten und patentierten StECon als Energiewandler zur Gewinnung regenerativer Energie aus Strömungsenergie im Fallhöhenbereich der tief- bzw. unter-schlächtigen Wasserräder. Da sich das Projekt allein auf die Untersuchung des StECon in der Generatorfunktion zur Gewinnung von regenerativer Energie beschränkt, ist die Erforschung des Rades als Antrieb nicht Bestandteil. Durch physikalische Modellversuche werden die komplexen Bewegungen der Schaufelruder, deren gegenseitige Beeinflussung mit der Strömung sowie hinsichtlich ihres Strömungswiderstandes analysiert. Eine 3D-CFD-Simulation diente zur Validierung der Messungen. Des Weiteren werden an einem optimierten Prototyp weiterführende Untersuchungen durchgeführt, in denen die maximalen Leistungs- und Effizienzwerte bei optimalen Bedingungen im Labor ermittelt werden.

3.1 Untersuchungen am Testmodell

Nach Bestätigung der Funktionsfähigkeit des StECon an mehreren Funktionsmodellen (1.0 – 3.0) wurde ein einseitig gelagertes, vertikal ausgerichtetes Testmodell mit fünf Schaufelrudern hergestellt (vgl. Abb. 2). Die Arbeiten umfassten die Herstellung des Testmodells selbst sowie der geeigneten Messtechnik zur Erfassung der mechanischen und elektrischen Leistung, Wasserstandshöhen, Durchfluss und Drehzahl. Da besonders die Form der Schaufelruder maßgebend für die Höhe der Effizienz und der Leistung ist, wurden am Testmodell unterschiedliche Schaufelruderformen und deren Spaltmaße untersucht. Als hauptsächlicher Nutzer der kinetischen Energie. Zudem wurde am StECon der Einfluss der potentiellen Energie auf dessen Effizienz anhand der relativen Fallhöhe analysiert. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen weitere Optimierungsmöglichkeiten am StECon aufzeigen und damit die Grundlage für die Dimensionierung des Prototyps bilden.



Abb. 2 Testmodell des StECon mit Schaufelruderform 4.1 in der begrenzten Strömung

3.2 Optimierung der Schaufelruderform

An dem im fwu-Wasserbaulabor untersuchten Testmodell wurden vier unterschiedliche Schaufelruderformen getestet. Neben einer rechteckigen Ausgangsform (4.0) kamen eine um 30° angespitzte (4.1), eine auf beiden Seiten um 5 mm verkürzte um 30° angespitzte Schaufelruderform sowie eine Rautenform (4.3) in den Untersuchungen am Modell zum Einsatz. Die verkürzte Schaufelruderform diente zur Untersuchung von größeren Spaltmaßen und brachte allerdings keine Verbesserungen an Leistung und Effizienz des Rades. Die höchste Effizienz am Rad wurde mit einem Wirkungsgrad von $\eta = 41\%$ durch Verwendung der

Schaufelform 4.1 erreicht, da diese im Vergleich zur Schaufelruderform 4.0 (max. $\eta = 31,5\%$) eine hydraulisch günstigere Schaufelruderante auf der zur Strömung senkrecht stehenden Seite des Rades hat. Bei der dünneren Rautenform 4.3 war eine höhere Leistung zu erzielen, da aufgrund des höheren Schluckvermögens eine größere Durchflussmenge im Vergleich zu den anderen Schaufelruderformen durch das Rad fließen konnte. Wegen des höheren Durchflusses trat allerdings eine höhere Reibung am Rad auf, so dass sich ein Maximalwirkungsgrad von lediglich 18 % ergab. Aufgrund der Vielzahl an zu untersuchenden Schaufelruderformen war die weitere Analyse am Testmodell wegen des erhöhten Zeitaufwandes nicht mehr zu realisieren, so dass die Schaufelruderformen einzeln im Maßstab 1:2,5 (im Vergleich zum Testmodell) in einer kleineren Rinne hinsichtlich ihres Strömungswiderstandes untersucht und verglichen wurden.

3.2.1 Untersuchte Schaufelruderformen

Zur Ermittlung einer optimalen Schaufelruderform für den Einsatz am Prototyp wurden weitere Formen in der gleichen Schaufellänge und –breite in AutoCAD konstruiert und mithilfe eines 3D-Druckers im Maßstab 1:2,5 bezogen auf die Größe der Schaufelruder am Testmodell (450 mm x 98 mm x 15 mm) aus PVC-U gedruckt/hergestellt. Es ergeben sich die vier am Testmodell untersuchten sowie fünf weitere Formen, die hauptsächlich eine Optimierungsvariante der bereits analysierten Schaufelruderformen darstellen. Die zu untersuchenden Schaufelruderformen sind in Abb. 3 dargestellt.

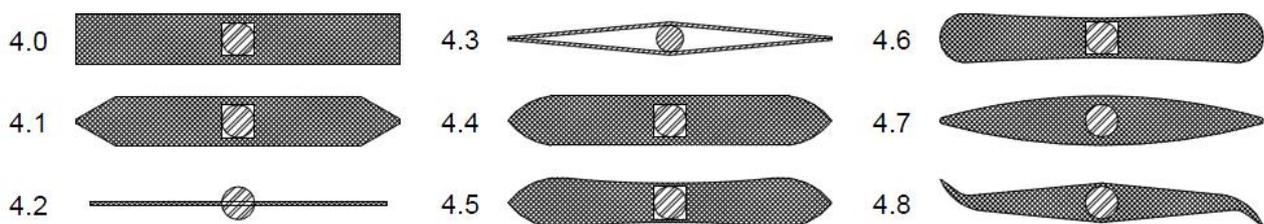


Abb. 3 Untersuchte Schaufelruderformen (Querschnitt)

Bei den Schaufelruderformen 4.5 und 4.6 liegt die Überlegung zugrunde, dass bei einem zur Strömung schräg stehenden Schaufelruder durch Wölbung die Angriffsfläche zur Erfassung der Strömungsenergie größer ist. Durch die Abschrägungen an den Kanten der S-Form 4.8 soll neben der Erhöhung der Angriffsfläche bei Schrägstellung ein Eigendrehmoment auf die Schaufelruderachse ausgelöst werden.

3.2.2 Versuchsaufbau

Die Untersuchungen werden in einer Versuchsrinne mit einer Länge von 7 m und einem Querschnitt mit den Maßen 20 cm (Höhe) x 8,6 cm (Breite) der Firma Gunt durchgeführt. Eine Verstellung der Rinnenneigung ist zwischen -1,4 % und + 1,5 % möglich. Mithilfe eines magnetisch-induktiven Durchflussmessers der Firma Siemens kann eine Wassermenge bis 3,6 l/s mit einer Genauigkeit von $\pm 1\%$ eingestellt werden. Am Ende der Versuchsrinne lässt sich der Wasserstand erhöhen. Der Versuchsaufbau zur Erfassung des wirkenden Widerstands an den Schaufelrudern ist in Abb. 4 dargestellt.

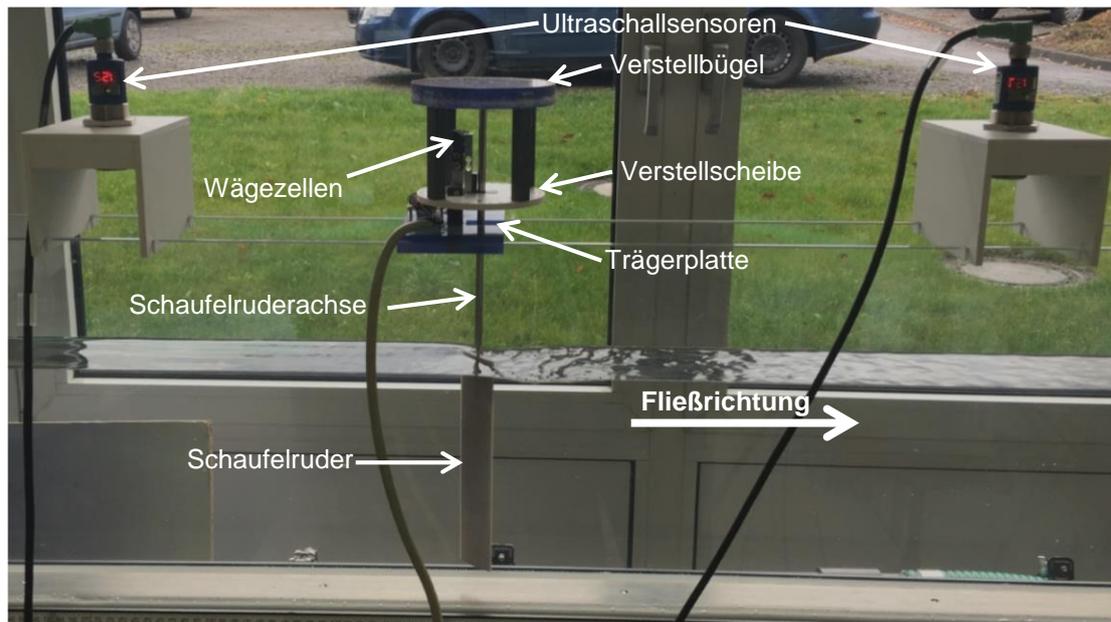


Abb. 4 Versuchsaufbau zur Untersuchung des Strömungswiderstandes an den Schaufelruderformen

Zur Erfassung der relativen Strömungseigenschaften jeder Schaufelruderform werden die Wasserstände vor und hinter dem Schaufelruder durch Ultraschallsensoren gemessen. Zudem werden die Fließgeschwindigkeiten im Ober- und Unterstrom in x-, y- und z-Richtung mithilfe eines Velocimeters der Firma Nortek aufgenommen.

Die Bestimmung der absoluten Kraftwirkung auf das Schaufelruder in x- und z-Richtung wird über zwei Wägezellen mit einer maximalen Belastungsgrenze von 1 kg realisiert. Jede der beiden Wägezellen ist für eine Kraftwirkungsrichtung auf das Schaufelruder zuständig. Zur Untersuchung des Strömungswiderstands wurde ein geeigneter Versuchszustand entwickelt. Mit einer Frequenz von bis zu 100 Hz und mit einer Wertegenauigkeit im Bereich von Mikrogramm liegt die Genauigkeit des Systems bei $\pm 0,2\%$.

3.2.3 Versuchsdurchführung

Die Messungen an allen Schaufelruderformen werden bei einem Durchfluss von $Q = 3,3 \text{ l/s}$ durchgeführt, die Fließgeschwindigkeit vor dem Schaufelruder beträgt dabei konstant $v = 0,19 \text{ m/s}$. Durch diese verhältnismäßig langsame Fließgeschwindigkeit kann ein Überschreiten des Messbereichs der Wägezellen durch die Krafteinwirkung verhindert werden.

Da bis auf die S-Form (4.8) alle Schaufelruderformen spiegelsymmetrisch sind, ist die Untersuchung einer Schaufelumdrehung um 90° ausreichend. Aus diesen Ergebnissen können die fehlenden 90° abgeleitet werden. Die S-Form muss über die Schaufeldrehung um 180° untersucht werden, da die punktsymmetrische Eigenschaft des Blattes eine Übertragung der Werte auf die andere Hälfte des Schaufelruders nicht zulässt. Bei Versuchsbeginn wird die Schaufelruderform parallel zur Strömungsrichtung ausgerichtet. Die Messung der Daten erfolgt, sobald die Wasserstände vor und hinter dem Schaufelruder sich nicht mehr maßgeblich ändern. Hierbei werden aus dem gleitenden Mittelwert über 50 Werte die Daten für die weitere Betrachtung des Schaufelruders gewonnen. Nach erfolgreicher Messung wird das Schaufelruder jeweils um 10° im Uhrzeigersinn gedreht, so dass jeweils nach Einstellen eines kontinuierlichen Strömungszustandes in der Rinne erneut Messungen durchgeführt werden

können. Nach Vollendung der Messungen von 90° (bzw. 180° bei der S-Form) der Schaufelruderdrehung in 10° -Schritten kann das Schaufelruder durch eine andere Form ausgewechselt und diese untersucht werden.

3.2.4 Versuchsauswertung

Zur Interpretation der Messgrößen aus Kraft- und Wasserstandsmessungen werden die Werte in Relation zum Kraft- und Schaufelwinkel betrachtet. Der Kraftwinkel ist die Richtung, in welche die durch die Wägezellen erfasste Gesamtresultierende der Schaufelkraft wirkt. Mithilfe dieses Winkels lässt sich die resultierende Kraft in x- und y-Komponenten zerlegen (Abb. 5). Durch Übertragung der Schaufelruderstellungen auf das Gesamtsystem des StECon lassen sich die jeweiligen Abstände in x- und y-Richtung zur Hauptachse des Rades errechnen. Hierbei werden die Abstände jeweils auf den Radmittelpunkt bezogen und stehen senkrecht zur Krafrichtung. Multipliziert mit den dazugehörigen Kräften jeder Schaufelruderstellung ergeben sich getrennt nach Krafeinwirkungsrichtung die Momente M_x und M_y (Abb. 5). Diese Momentkomponenten sind der Beitrag jeder einzelnen Schaufelruderstellung zum Gesamtdrehmoment des StECon.

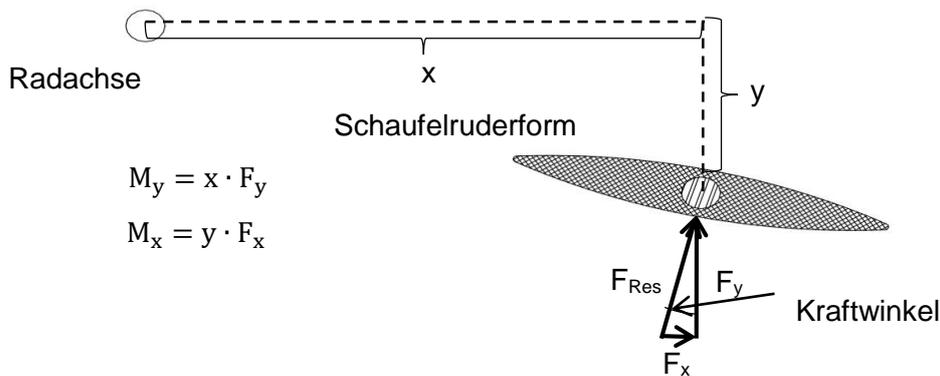


Abb. 5 Ermittlung der Kräfte sowie der Drehmomente M_y und M_x am Schaufelruder

In Abb. 6 sind die Messergebnisse der resultierenden Strömungskraft auf die unterschiedlichen Schaufelruderformen in Relation zum dazugehörigen Kraftwinkel dargestellt. Da sich die Kräfteverteilung der S-Form wegen der punktsymmetrischen Eigenschaft über 180° der Schaufelruderstellung unterschiedlich ausbildet, erstreckt sich die Darstellung dieser Form über eine Hälfte der Vollumdrehung. Die Kräfteverteilung aller übrigen Formen wiederholt sich wegen ihren spiegelsymmetrischen Eigenschaften alle 90° , so dass zur besseren Übersicht lediglich ein Viertel der Vollumdrehung zu sehen ist.

Aus Abb. 6 wird für die S-Form ersichtlich, dass der resultierende Winkel unterschiedliche Größen vom Punkt der maximalen Schaufelkraft annimmt. Denn bei einer Anströmung der Schaufelruder hat die Biegung an der zur Strömung zugewandten Schaufelruderseite einen größeren Verdrehungswinkel und somit eine positive Wirkung auf die Krafterfassung. Auf der zur Strömung abgewandten Seite reduziert sich die Kraft sehr schnell, d.h. dass nur geringere Kraftwinkel entstehen. Zudem ist aufgrund der Biegung die Maximalkraft nicht bei senkrecht zur Strömung stehenden Schaufelrudern zu erreichen, sondern bei leichter Schiefstellung, da hierbei eine größere projizierte Fläche vorhanden ist.

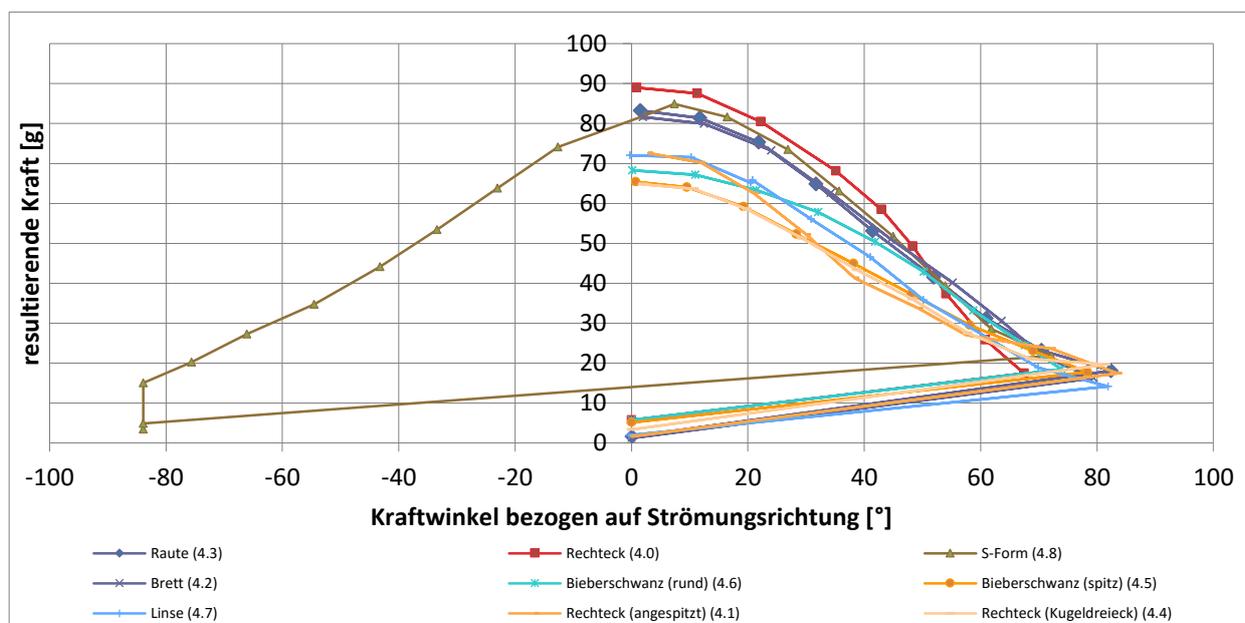


Abb. 6 Resultierende Kraft auf das Schaufelruder in Abhängigkeit zum jeweiligen Kraftwinkel

In Abb. 7 sind die resultierenden Momente M_x in Relation zum jeweiligen Schaufelwinkel dargestellt, die aus Kräften der x-Richtung in Bezug auf die Hauptachse des StECon resultieren.

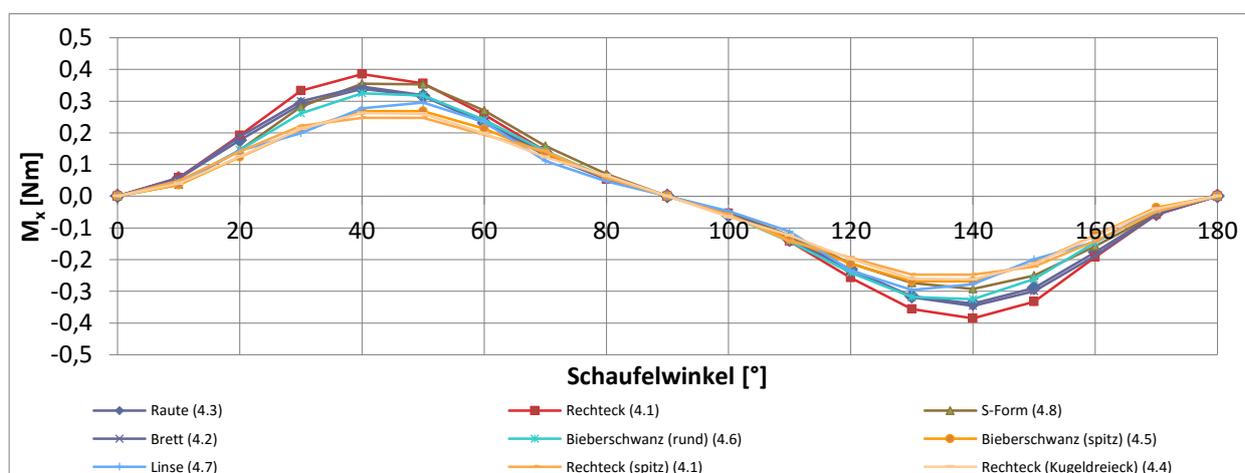


Abb. 7 Resultierendes Moment aus Kräften der x-Richtung (senkrecht zur Strömung) bezogen auf den Schaufelwinkel

Auffällig ist zunächst, dass sich bei allen Schaufelruderformen außer der S-Form die Momente M_x innerhalb einer gesamten Drehung des Rades gegenseitig neutralisieren. Dies hat einen gleichmäßigen Bewegungsablauf des Rades zufolge, der durch entstehende Kräfte in x-Richtung nicht beeinflusst wird. Bei der S-Form als besondere Ausführung eines punktsymmetrischen Schaufelruders heben sich die Momente M_x aufgrund der oben beschriebenen Kraftwirkung jedoch nicht auf, wodurch es zu einer ungleichförmigen Bewegung des gesamten StECon kommen konnte. Zudem liefert die S-Form in der Strömung durch die Rundung am Schaufelruderende ein Eigendrehmoment um die Schaufelruderachse, welches die Momente resultierend aus Kräften der x-Richtung erhöht. Da die Auswirkungen der sich nicht aufhebenden Momente M_x noch nicht hinreichend erläutert werden können, ist die Untersuchung der gegenseitigen Schaufelruderbeeinflussung unerlässlich.

In Abb. 8 sind die resultierenden Momente M_y in Relation zum jeweiligen Schaufelwinkel dargestellt, die aus Kräften der x-Richtung in Bezug auf die Hauptachse des StECon resultieren.

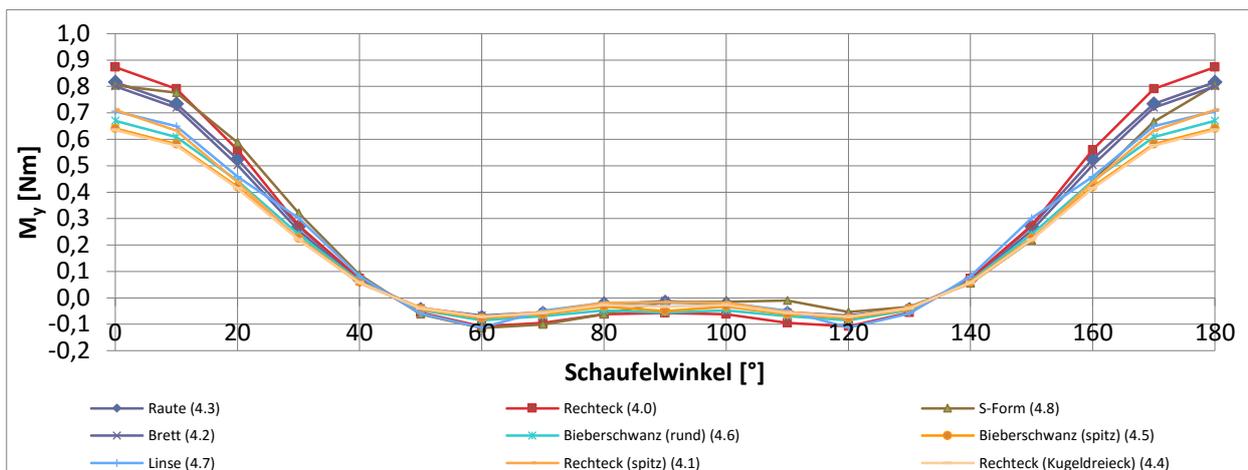


Abb. 8 Resultierendes Moment aus Kräften der y-Richtung (parallel zur Strömung) bezogen auf den Schaufelwinkel

Die resultierenden Momente aus den Kräften der y-Richtung verhalten sich bei allen Schaufelruderformen (außer der punktsymmetrischen S-Form) symmetrisch zur 90°-Stellung (parallel zur Strömungsrichtung). Wie bei den Momenten M_x verhalten sich die Momente M_y der S-Form nicht symmetrisch zur 90°-Stellung. Hierbei erzeugt das Schaufelruder bei Schiefstellung die größte Kraft, wenn die Rundung der Schaufelruderkaute der Strömung zugewandt ist. Weiterhin ist aus Abb. 8 zu sehen, dass S-Form und Rechteck-Form im Bereich der Schaufelstellung von 60° – 120° auch negative Momente M_y auf die Hauptachse zufolge haben. Diese negativen Werte entstehen durch Ablösungswirbel an den beiden Schaufelruderformen, die sich durch die strömungsgünstigen Schaufelruderkaute bilden. Die höchsten Werte des Moments M_y ergeben sich für die Schaufelruderformen „Brett (4.2)“, „Rechteck (4.1)“, „S-Form (4.8)“ und „Raute (4.3)“, da diese Varianten deutliche Abrisskanten bei einer senkrechten Ausrichtung zur Strömung bieten und die entstehenden Ablösungswirbel keine negativen Auswirkungen auf das Schaufelruder haben. Zur Ermittlung der strömungsgünstigsten Schaufelruderform muss jedoch die Summe der auf die Hauptachse einwirkenden Momente betrachtet werden, um die Ergebnisse korrekt deuten zu können.

Durch Aufaddierung ergibt sich eine Momentengröße, welche in Relation zur Kräfteübertragung eines Schaufelruders auf die Hauptachse innerhalb einer gesamten Drehung steht. Die Gesamtmomente jeder untersuchten Schaufelruderform um die Hauptachse sind der Größe nach angeordnet in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1 Gesamtmoment jeder untersuchten Schaufelruderform um die Radhauptachse

Schaufelruderform	Gesamtmoment [Nm]
S-Form (4.8)	4,54
Rechteck (4.1)	4,44
Raute (4.3)	4,42
Brett (4.2)	4,29
Linse (4.7)	3,90
Rechteck (spitz) (4.1)	3,74
Bieberschwanz (rund) (4.6)	3,50
Bieberschwanz (spitz) (4.5)	3,38
Rechteck (Kugeldreieck) (4.4)	3,38

Wie bereits angemerkt, liefern die Schaufelruderformen mit scharfen Abrisskanten die höchsten Momente M_y auf die Hauptachse. Auch bei der Betrachtung des Gesamtmomentes um die Hauptachse weisen diese Formen die höchsten Werte auf, da sich die Momente M_x gegenseitig aufheben. Ablösungswirbel können so besser von der Blattgeometrie abgetragen werden. Lediglich bei der S-Form findet keine Aufhebung der Kräfte in x-Richtung statt, welche mit dem durch die Krümmung der Schaufelruderenden resultierenden Eigendrehmoment zu dem höchsten Gesamtdrehmoment aller Formen führt. Die Bieberschwanz-Formen (4.5 & 4.6) erzielen mit der Rechteckform (Kugeldreieck) (4.4) die schlechtesten Werte, da hierbei die strömungsgünstige Abführung der Ablösungswirbel am wenigsten vorhanden ist.

3.2.5 CFD-Berechnungen

Für die Wahl der optimalen Schaufelruderform wurden zusätzlich zu den Labormessungen numerische Berechnungen mit der 3D-CFD OpenSource Software OpenFoam durchgeführt. Die numerischen Simulationen sollten einerseits zur Verifizierung der Messwerte dienen, aber auch andererseits eine alternative Vorgehensweise bieten, deren Vor- und Nachteile analysiert werden sollten. Aufgrund der langen Rechenzeit von mindestens 20 Stunden pro Berechnungsvariante war der Test- und Kalibrierungsaufwand jedoch groß. Zudem musste der entsprechende Wasserstand vor dem Schaufelruder als Eingangsrandbedingung durch die Laborversuche ermittelt werden. Dennoch konnten verschiedene Randbedingungen getestet werden und die Richtigkeit der Laborergebnisse somit verifiziert werden.

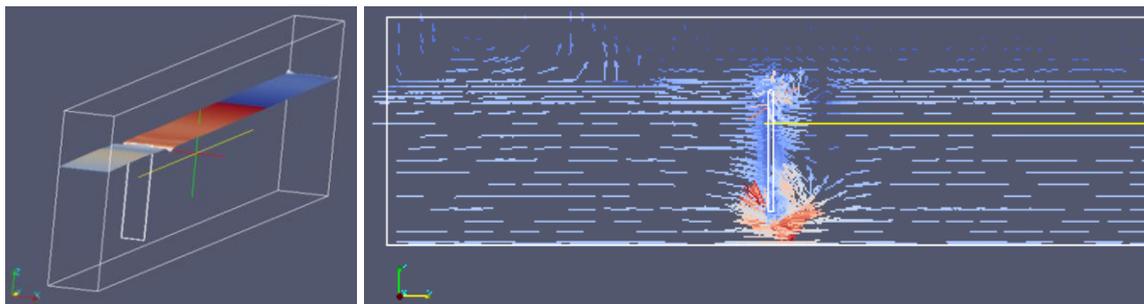


Abb. 9 Wasseroberfläche zum Endzeitpunkt der Berechnung, $t = 0,5$ (links); Darstellung der Geschwindigkeitsvektoren, $t = 0,5$ (rechts)

3.3 Ausblick

Die Versuche in der Messrinne lieferten erste Erkenntnisse zur Findung der optimalen Schaufelruderform für den StECon. Eine abschließende Bewertung kann allerdings erst nach Abschluss der Untersuchungen durchgeführt werden, da die gegenseitige Beeinflussung der Schaufelruder in der Strömung die Effizienz sowie die Leistung des Rades maßgeblich beeinflussen. Zum Erreichen des Maximalwirkungsgrades stellte sich am Testmodell heraus, dass die spitze Rechteckform (4.1) die höchsten Werte lieferte. Daher bleibt zu untersuchen, inwieweit die Schaufelruderform mit dem höchsten Strömungswiderstand noch effizient ist. Abschließend sollen die aus den Versuchen ermittelten optimalen Schaufelruderformen am Prototyp des StECon getestet werden, so dass eine Festlegung auf die optimalste Blattgeometrie ermöglicht werden kann.

Literatur

- Jensen, J.; Stiller, H.-L.; Wieland, J.; Schmidt, J.; Lohe, R.; Lohr, W.; Jung, T. (2015a): Das StEwaKorad - eine neue Wasserkraftmaschine für die Gewinnung von Energie aus Fließgewässern, Korrespondenz Wasserwirtschaft, 8 (5): 272 – 274, 2015
- Jensen, J.; Wieland, J.; Schmidt, J.; Metzger, J.; Stiller, H.-L.; Lohe, R.; Lohr, W.; Jung, T.; Cramer, J. (2015b): Zwischenbericht. BMWi-Projekt StEwaKorad. Unveröffentlichter Projektzwischenbericht. 31.07.2015
- Schmidt, J.; Stiller, H.-L.; Jensen, J.; Wieland, J.; Metzger, J.; Lohr, W.; Lohe, R.; Jung, T.; Cramer, J. (2015c): Das StEwaKorad – Wissenschaftliche Erschließung der Leistungsdaten einer neuen Wasserkraftmaschine für die Gewinnung von Energie aus Fließgewässern, Tagungsbandbeitrag OTTI in Liechtenstein (2015)

Anschrift der Verfasser

Jens Metzger, M.Eng.
Dipl.-Ing. Jessica Schmidt
Dipl.-Ing. Jörg Wieland
Prof.-Dr.-Ing. Jürgen Jensen
Forschungsinstitut Wasser und Umwelt
Universität Siegen
Paul-Bonatz-Str. 9-11, 57076 Siegen
jens.metzger@uni-siegen.de

Dipl.-Math. Hans-Ludwig Stiller
Herwarthstraße 27, 53115 Bonn