Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

ENERGYMINER

ENERGYMINER GMBH

SKALIERUNG EINER INNOVATIVEN TECHNOLOGIE ZUR DEZENTRALEN UND NACHHALTIGEN ENERGIEVERSORGUNG FÜR ABGELEGENE FISCHZUCHTBETRIEBE

Autoren:

Dr. Georg Walder

Dr. Richard Eckl

Carolin Gross

Förderkennzeichen: 031B1466

1 Ausgangssituation und Zielsetzung des Vorhabens

Abgelegene Fischzuchtbetriebe weisen einen kontinuierlichen Energiebedarf für Pumpen, Belüftung, Steuerungs- und Überwachungstechnik auf. Gleichzeitig verfügen viele dieser Betriebe über bestehende wasserwirtschaftliche Infrastrukturen wie kontinuierlich durchströmte Kanalsysteme, deren kinetisches Energiepotenzial bislang kaum genutzt wird. Konventionelle Wasserkraftlösungen sind für diese Anwendungsfälle in der Regel ungeeignet, da sie bauliche Eingriffe, Querbauwerke oder signifikante Gefälle erfordern und damit sowohl ökologisch als auch betrieblich problematisch sind. Das Vorhaben knüpfte an die bereits entwickelte hydrokinetische Energyfish-Technologie an, die elektrische Energie direkt aus der kinetischen Energie fließenden Wassers gewinnt und ohne Querbauwerke auskommt. Zum Zeitpunkt der Antragstellung lag ein Funktionsmuster vor, dessen grundsätzliche Eignung für offene Gewässer bereits gezeigt werden konnte. Für den spezifischen Einsatz in Kanalsystemen von Fischzuchtbetrieben fehlten jedoch belastbare Erkenntnisse zur Auslegung, zur Leistungsfähigkeit bei niedrigen Fließgeschwindigkeiten sowie zur Integration in bestehende Anlagen.

Ziel des Vorhabens war es daher, die Energyfish-Technologie systematisch für diesen Anwendungsfall weiterzuentwickeln, wissenschaftlich-technisch abzusichern und unter realen Betriebsbedingungen zu erproben. Ein besonderer Fokus lag auf der Kombination aus Modellierung, numerischer Simulation und praktischer Validierung durch reale Messdaten.

2 Ablauf und Umsetzung des Vorhabens

Die Durchführung des Vorhabens orientierte sich eng an der im Antrag beschriebenen Vorgehensweise und folgte einem mehrstufigen, aufeinander aufbauenden Entwicklungsansatz.

Zunächst wurden realitätsnahe Kanalparameter definiert, die typische Fischzuchtbetriebe abbilden. Auf dieser Basis erfolgte eine systematische Analyse der hydromechanischen Randbedingungen eines konkreten Fischzuchtkanals. Mithilfe klassischer fluidmechanischer Ansätze sowie durch Vor-Ort-Messungen wurden Strömungsgeschwindigkeiten, Durchfluss und hydraulische Gegebenheiten erfasst und bewertet.

Darauf aufbauend wurden numerische Simulationen durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde ein dreidimensionaler CFD-Referenzfall ohne Diffusor untersucht, um das grundlegende Strömungs- und Leistungsverhalten des Energyfish-Systems in einem Fischzuchtkanal zu analysieren. In einem zweiten Schritt erfolgte eine simulationsgestützte Optimierung von Diffusorgeometrien. Unterschiedliche Diffusorkonzepte wurden iterativ entwickelt, simuliert und bewertet, um den Massenstrom durch den Rotor gezielt zu erhöhen und die Energieausbeute zu verbessern.

Parallel zu diesen Modellierungs- und Simulationsarbeiten wurde das System konstruktiv weiterentwickelt. Auf Basis der Simulationsergebnisse wurde ein Prototyp gefertigt, der für den Einsatz in Fischzuchtkanälen geeignet ist und sich reversibel in bestehende Infrastrukturen integrieren lässt. Der Prototyp wurde anschließend in einem realen Fischzuchtbetrieb installiert und unter Praxisbedingungen betrieben. Während des Betriebs wurden Strömungs- und Leistungsdaten kontinuierlich erfasst, um die Ergebnisse der Modellierung und Simulation zu verifizieren.

Ergänzend wurde ein integriertes elektrisches und digitales System aufgebaut, das eine automatisierte Regelung, Überwachung und Datenerfassung des Energyfish-Systems ermöglicht.

3 Wesentliche Ergebnisse des Vorhabens

Im Rahmen des Vorhabens konnte gezeigt werden, dass die Energyfish-Technologie grundsätzlich für den Einsatz in Kanalsystemen von Fischzuchtbetrieben geeignet ist und unter realen Betriebsbedingungen stabil betrieben werden kann.

Die numerischen Simulationen zeigten, dass durch eine gezielte Diffusoroptimierung eine deutliche Steigerung der energetischen Leistungsfähigkeit möglich ist. In den CFD-Simulationen konnte eine Leistungssteigerung von rund 44 % gegenüber einer Referenzgeometrie nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse bildeten die Grundlage für die Auslegung des realen Prototyps.

Der im Projekt aufgebaute und installierte Prototyp bestätigte die grundsätzliche Wirksamkeit dieses Ansatzes auch unter realen Bedingungen. Der Vergleich von Messdaten aus dem Betrieb mit und ohne Diffusor zeigte auf Systemebene eine signifikante Steigerung der Stromerzeugung. Der Abgleich zwischen Modellierung, Simulation und realen Messdaten ergab eine gute qualitative Übereinstimmung der Ergebnisse und bestätigte die Eignung der eingesetzten methodischen Ansätze zur Auslegung des Systems.

Darüber hinaus wurden wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich der Standortabhängigkeit hydrokinetischer Systeme gewonnen. Insbesondere zeigte sich, dass sehr geringe natürliche Fließgeschwindigkeiten die absolute Energieausbeute begrenzen, gleichzeitig aber die Relevanz strömungsbeschleunigender Konzepte unterstreichen.

Insgesamt hat das Vorhaben eine wissenschaftlich fundierte und praktisch überprüfte Grundlage für den Einsatz hydrokinetischer Energiegewinnung in Fischzuchtbetrieben geschaffen. Die erzielten Ergebnisse bilden die Basis für weiterführende Demonstrationsprojekte sowie für die Entwicklung einer marktfähigen Serienanlage und leisten damit einen Beitrag zur nachhaltigen Energieversorgung im Bereich der blauen Bioökonomie.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

ENERGYMINER

ENERGYMINER GMBH

SKALIERUNG EINER INNOVATIVEN TECHNOLOGIE ZUR DEZENTRALEN UND NACHHALTIGEN ENERGIEVERSORGUNG FÜR ABGELEGENE FISCHZUCHTBETRIEBE

Teil II – Eingehende Darstellung

Autoren:

Dr. Georg Walder

Dr. Richard Eckl

Carolin Gross

Förderkennzeichen: 031B1466

Inhalt

1 Ausgangslage und ursprüngliche Vorhabenbeschreibung 3
2 Überblick über die durchgeführten Arbeitsschritte 4
3 Modellierungen und Simulationen 5
3.1 Wahl der Kanalparameter 5
3.2 hydromechanische Randbedingungen 6
3.3 CFD-Simulation Referenzfall 8
3.4 CFD-Simulation mit Diffusoroptimierung 9
4 Entwicklung des Prototyps für Fischzuchtbetriebe 11
5 Aufbau, Installation und Betrieb des realen Prototyps 11
6 Abgleich von Modellierung, Simulation und Messdaten 12
7 Elektrische Entwicklung und Software 13
8 Einordnung der Ergebnisse im Vergleich zur ursprünglichen Planung 15

1 Ausgangslage und ursprüngliche Vorhabenbeschreibung

Das Vorhaben „Energyfish – Skalierung einer innovativen Technologie zur dezentralen und nachhaltigen Energieversorgung für abgelegene Fischzuchtbetriebe“ adressierte die Herausforderung, wie bestehende wasserwirtschaftliche Infrastrukturen in der Fischzucht energetisch nutzbar gemacht werden können, ohne zusätzliche bauliche Eingriffe in Gewässer oder den laufenden Betrieb der Anlagen zu beeinträchtigen. Insbesondere Fischzuchtbetriebe in ländlichen Regionen verfügen häufig über kontinuierlich durchströmte Kanalsysteme, deren kinetisches Energiepotenzial bislang kaum genutzt wird, obwohl gleichzeitig ein kontinuierlicher Energiebedarf für Pumpen, Belüftung, Steuerungs- und Überwachungstechnik besteht.

Zum Projektbeginn standen für diese Anwendungsszenarien keine technisch und wirtschaftlich geeigneten Lösungen zur Verfügung. Konventionelle Wasserkraftanlagen erfordern in der Regel Staubauwerke, Querbauwerke oder signifikante Gefälle und sind daher für bestehende Fischzuchtkanäle ungeeignet. Andere erneuerbare Energiequellen wie Photovoltaik oder Windenergie können zwar einen Beitrag leisten, sind jedoch nicht grundlastfähig und bieten insbesondere in abgelegenen Regionen keine verlässliche Versorgungssicherheit. Vor diesem Hintergrund bestand ein klarer Bedarf an einer dezentralen, grundlastfähigen und ökologisch verträglichen Energiequelle, die sich in bestehende Infrastrukturen integrieren lässt.

Das Vorhaben knüpfte an die bereits entwickelte hydrokinetische Energyfish-Technologie an, die elektrische Energie direkt aus der kinetischen Energie fließenden Wassers gewinnt. Im Unterschied zu konventionellen Wasserkraftlösungen kommt diese Technologie ohne Querbauwerke aus und nutzt ausschließlich die vorhandene Strömung. Zum Zeitpunkt der Antragstellung lag ein Funktionsmuster vor, dessen grundsätzliche Eignung für offene Gewässer bereits gezeigt werden konnte. Für den spezifischen Einsatz in Kanalsystemen von Fischzuchtbetrieben fehlten jedoch belastbare Erkenntnisse zur Auslegung, zur Leistungsfähigkeit bei niedrigen Fließgeschwindigkeiten sowie zur Integration in bestehende Anlagen.

Ziel des Vorhabens war es daher, die Energyfish-Technologie systematisch für diesen Anwendungsfall weiterzuentwickeln und die hierfür notwendigen wissenschaftlich-technischen Grundlagen zu erarbeiten. Im Zentrum stand die Frage, wie das System unter den typischen hydraulischen Randbedingungen von Fischzuchtkanälen – begrenzte Querschnitte, vergleichsweise geringe Fließgeschwindigkeiten und hohe Anforderungen an Betriebssicherheit und Umweltverträglichkeit – effizient betrieben werden kann. Dazu sollten sowohl modellbasierte als auch numerische Ansätze genutzt werden, um zentrale Einflussgrößen auf Leistung und Effizienz zu identifizieren und konstruktive Optimierungspotenziale abzuleiten.

Die ursprüngliche Vorhabenbeschreibung sah vor, diese theoretischen und numerischen Untersuchungen mit einer anwendungsnahen Erprobung zu verbinden. Ziel war es, die entwickelten Modelle und Simulationen nicht isoliert zu betrachten, sondern ihre Aussagekraft durch reale Messdaten zu überprüfen. Hierzu sollte ein Prototyp des Energyfish-Systems aufgebaut und unter realen Betriebsbedingungen in einem Fischzuchtbetrieb installiert werden. Die dabei gewonnenen Messdaten sollten genutzt werden, um die Modellierungs- und Simulationsergebnisse zu verifizieren und die Eignung der Technologie für den vorgesehenen Einsatzbereich belastbar nachzuweisen.

Zusammenfassend zielte das Vorhaben darauf ab, eine wissenschaftlich fundierte und praktisch überprüfte Grundlage für den Einsatz hydrokinetischer Energiegewinnung in Fischzuchtbetrieben zu schaffen. Durch die Kombination aus Modellierung, Simulation und realer Erprobung sollte ein Entwicklungsstand erreicht werden, der eine spätere Demonstration und weiterführende Umsetzung der Technologie ermöglicht und zugleich einen Beitrag zur nachhaltigen Energieversorgung im Bereich der blauen Bioökonomie leistet.

2 Überblick über die durchgeführten Arbeitsschritte

Die Durchführung des Vorhabens orientierte sich in ihrer Struktur und Zielsetzung eng an der im Antrag beschriebenen Vorgehensweise. Ziel war es, die im Antrag formulierten Entwicklungsziele durch eine Kombination aus modellbasierten, numerischen und anwendungsnahen Teilprojekten systematisch zu erreichen und die Energyfish-Technologie schrittweise für den Einsatz in Fischzuchtbetrieben weiterzuentwickeln.

Gemäß der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung wurde das Projekt in mehrere inhaltlich aufeinander aufbauende Arbeitsschritte gegliedert. Ein zentraler Bestandteil war dabei die wissenschaftlich-technische Absicherung der Technologie durch Modellierungs- und Simulationsarbeiten. Diese sollten die Grundlage für eine gezielte konstruktive Weiterentwicklung bilden und sicherstellen, dass die Technologie unter den spezifischen Randbedingungen von Kanalsystemen effizient betrieben werden kann. Entsprechend wurden zunächst grundlegende Modellierungsansätze erarbeitet, um die relevanten strömungsmechanischen Zusammenhänge zu erfassen und zentrale Parameterbereiche einzugrenzen.

Aufbauend auf diesen Arbeiten wurden im nächsten Schritt detaillierte numerische Simulationen durchgeführt. Wie im Antrag vorgesehen, dienten diese Simulationen dazu, unterschiedliche Geometrie- und Diffusorkonzepte systematisch zu untersuchen und deren Einfluss auf Leistung und Effizienz des Energyfish-Systems zu bewerten. Die Ergebnisse dieser Phase flossen unmittelbar in die weitere Auslegung des Systems ein und bildeten die Grundlage für die Auswahl geeigneter Konstruktionsansätze.

Parallel zu den modellbasierten und numerischen Arbeiten wurde – ebenfalls in Übereinstimmung mit der Vorhabenbeschreibung – die Übertragbarkeit der Technologie auf reale Kanalsysteme untersucht. Hierbei lag der Fokus auf typischen Strukturen in Fischzuchtbetrieben, insbesondere auf begrenzten Querschnitten, niedrigen Fließgeschwindigkeiten sowie betrieblichen und ökologischen Randbedingungen. Ziel war es, frühzeitig sicherzustellen, dass die entwickelten Konzepte nicht nur theoretisch leistungsfähig, sondern auch praktisch umsetzbar sind.

Ein weiterer im Antrag ausdrücklich vorgesehener Arbeitsschritt war die anwendungsnahe Erprobung der Technologie. Entsprechend wurde im Verlauf des Projekts ein realer Prototyp des Energyfish-Systems aufgebaut und in einem Fischzuchtbetrieb installiert. Die Installation und der anschließende Messbetrieb dienten dazu, reale Betriebs- und Leistungsdaten zu erfassen und diese mit den Ergebnissen der Modellierungs- und Simulationsarbeiten abzugleichen. Dieser Abgleich stellte einen wesentlichen Bestandteil der Projektlogik dar und trug maßgeblich zur Bewertung der Aussagekraft der eingesetzten Methoden bei.

Insgesamt folgten die durchgeführten Arbeiten damit der im Antrag beschriebenen Vorgehensweise, wobei sich einzelne Arbeitsschritte im Projektverlauf weiter konkretisierten und inhaltlich vertieft wurden. Die enge Verzahnung von Modellierung, Simulation und praktischer Erprobung erwies sich als zielführend, um die geplanten Entwicklungsziele zu erreichen und eine belastbare Grundlage für die weitere Entwicklung und mögliche Demonstration der Technologie zu schaffen.

3 Modellierungen und Simulationen

3.1 Wahl der Kanalparameter

Ein zentraler Fokus lag auf der Berücksichtigung realitätsnaher Kanalabmessungen, wie sie typischerweise in Fischzuchtbetrieben vorzufinden sind. Die zugrunde gelegten Abmessungen wurden aus einer Auswertung technischer Unterlagen zu Fischzuchtanlagen, einschlägiger Literatur sowie aus Erfahrungswerten der praktischen Auslegung abgeleitet. Dabei zeigte sich, dass Durchflusskanäle in Fischzuchtbetrieben überwiegend rechteckige oder leicht trapezförmige Querschnitte aufweisen, mit typischen Kanalbreiten im Bereich von etwa 0,8 m bis 2,0 m und Wassertiefen von etwa 0,4 m bis 1,2 m. Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten liegen dabei häufig im Bereich von ca. 0,3 m/s bis 1,2 m/s, abhängig von Durchflussmenge und Betriebszustand.

Diese Abmessungen wurden in der Modellierung in repräsentative Kanalquerschnitte überführt, um unterschiedliche Anlagenkonfigurationen abzubilden. Dadurch konnte der Einfluss der

Kanalgeometrie auf die Strömungsführung und die energetische Ausbeute systematisch untersucht werden.

3.2 HYDROMECHANISCHE RANDBEDINGUNGEN

Am Beispiel eines konkreten Forellenzucht-Abflusskanals wurde zunächst systematisch die hydromechanischen Randbedingungen des Testkanals untersucht. Ziel war zu untersuchen, wie die vorhandene Strömungssituation charakterisiert und gezielt beeinflusst werden kann, um die Energieausbeute eines hydrokinetischen Systems zu verbessern. Auf Basis klassischer fluidmechanischer Theorie – insbesondere unter Anwendung der Kontinuitätsgleichung ($Q = v \cdot A$), der Bernoulli-Gleichung ($H = y + v^2/2g$) sowie kritischer Fließbedingungen und Wasserspiegellinienbetrachtungen, wurde zunächst das theoretisch verfügbare Energiepotenzial des bestehenden Kanals bestimmt und in Relation zu den gemessenen Strömungsbedingungen gesetzt.

Anschließend wurde eine detaillierte Bestandsaufnahme des realen Kanals mittels mehrerer Ortsbegehungen, geometrischer Vermessungen sowie Strömungsmessungen (ADCP und MID) durchgeführt.

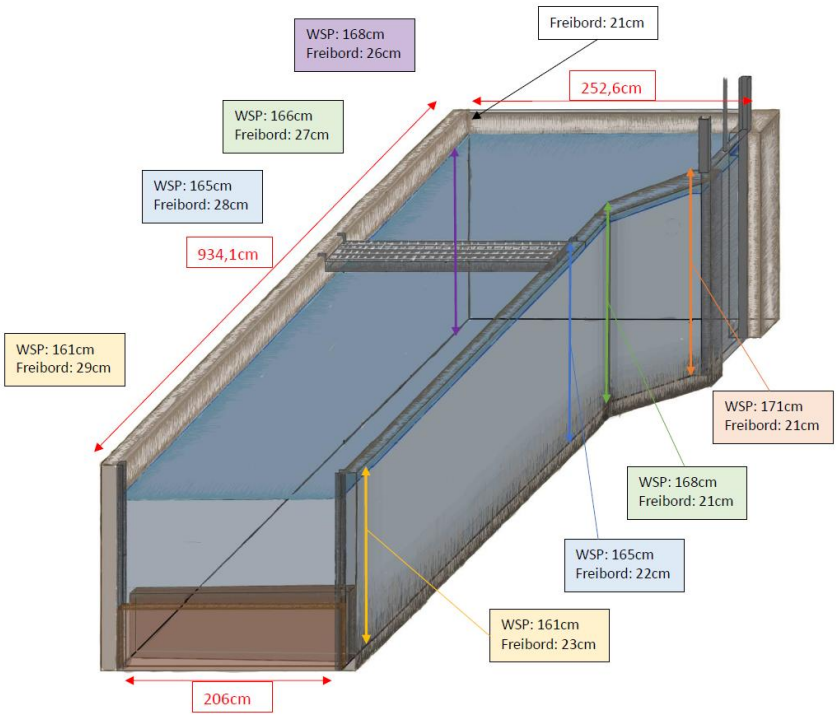


Abbildung 1: Modell mit exakten Dimensionen des Kanals

Darauf aufbauend wurden mittlere Fließgeschwindigkeiten, Durchfluss, Wasserspiegellinien und hydraulische Randbedingungen bestimmt. Es zeigte sich, dass die natürlichen Fließgeschwindigkeiten im untersuchten Kanal (ca. 0,27–0,37 m/s) deutlich unterhalb eines für

Turbinen optimalen Bereichs lagen, was die Notwendigkeit und die Zielsetzung dieses Projektes einer Einengung des Kanals unterstrich.

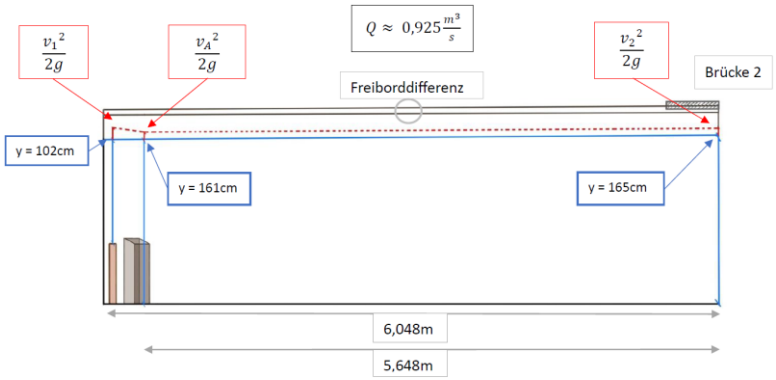


Abbildung 2: Wasserspiegellinien des Kanals

Auf dieser Basis wurde ein Venturi-basiertes Konzept zur Querschnittsmodifizierung entwickelt, das eine kontrollierte Strömungsbeschleunigung durch reversible Einengung des Kanals vorsah. Ergänzend wurden skalierte Laborversuche in einem Wasserlabor durchgeführt, um die Übertragbarkeit der hydraulischen Verhältnisse zu prüfen und geeignete Engstellenbreiten abzuleiten.

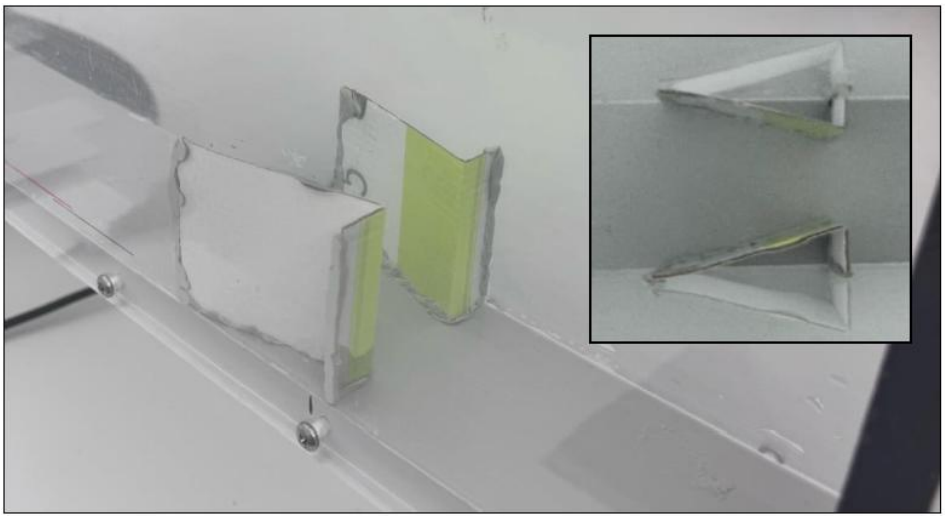


Abbildung 3: Modellaufbau des Venturikanals im Strömungskanal des Wasserlabors

Ziel dieses Arbeitsschrittes war es, den Einfluss von Strömungsgeschwindigkeit, Geometrie und Kanalrandbedingungen auf die energetische Leistungsfähigkeit des Systems systematisch zu erfassen und quantifizierbar zu machen. Diese theoretischen Vorüberlegungen stellten dabei den ersten methodischen Schritt innerhalb der Modellierungskette dar und diente der gezielten Vorbereitung der nachfolgenden dreidimensionalen CFD-Simulationen.

Zusammenfassend stellte diese theoretischen Voruntersuchungen einen zentralen methodischen Baustein des Vorhabens dar. Sie verband grundlegende strömungsmechanische Theorie mit realitätsnahen Randbedingungen aus Fischzuchtbetrieben und schuf damit eine belastbare Grundlage für die weiterführenden numerischen Simulationen und die konstruktive Weiterentwicklung des Energyfish-Systems.

3.3 CFD-Simulation Referenzfall

Im Vorfeld der Diffusor- und Geometrieoptimierung wurde zunächst ein dreidimensionaler CFD-Referenzfall ohne gezielte Diffusorgestaltung untersucht. Ziel dieses Schrittes war es, das grundlegende Strömungs- und Leistungsverhalten des ursprünglichen Energyfish-Systems in einer typischen Fischzuchtkanalumgebung zu verstehen und eine Vergleichsbasis für spätere Optimierungsmaßnahmen zu schaffen.

Als Ausgangspunkt diente ein repräsentativer Fischzuchtkanal mit einer Breite von etwa 2 m, einer Wassertiefe von 1,6 m und einer mittleren Fließgeschwindigkeit von rund 0,3 m/s. Der Energyfish-Rotor wurde in zentraler Position im Kanal platziert, jedoch ohne speziell angepassten Diffusor oder Venturikanal für die Querschnittsverengung.

Die Simulationsergebnisse zeigten, dass sich die Strömung ohne zusätzliche Maßnahmen im Bereich des Rotors zwar beschleunigt wird, sich jedoch Turbulenzen hinter der Querschnittsverengung bildeten. Gleichzeitig bestätigten die Berechnungen jedoch, dass der Rotor strömungsmechanisch stabil betrieben werden kann und keine kritischen Strömungsablösungen oder instabilen Effekte auftreten.

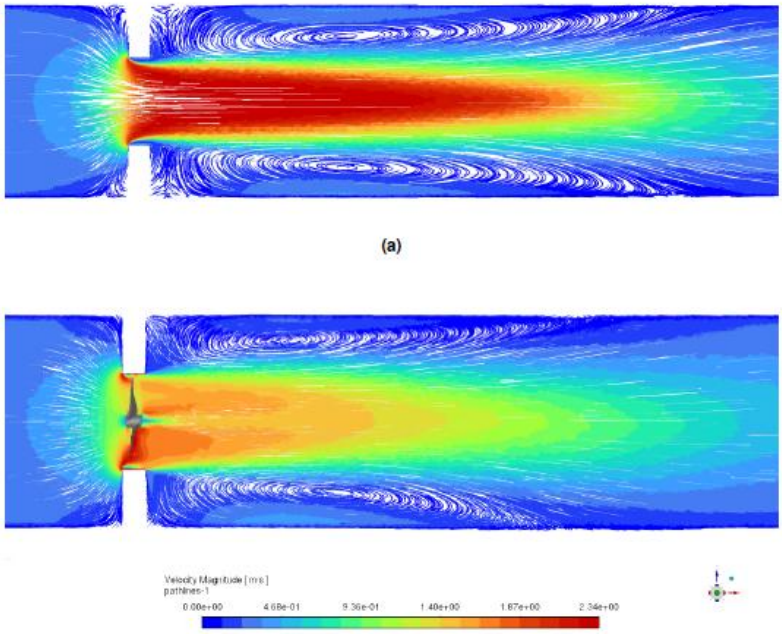


Abbildung 4: Geschwindigkeitsfeld des Referenzfalls mit und ohne Rotor

3.4 CFD-Simulation mit Diffusoroptimierung

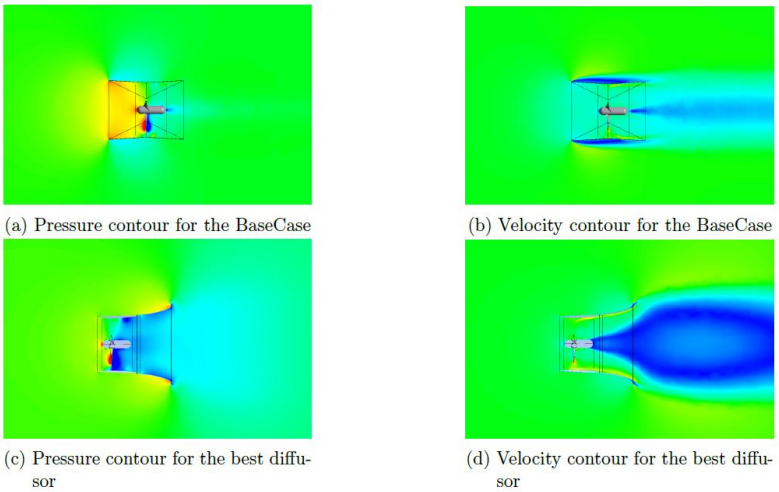
In einer zweiten CFD-Simulation lag ein besonderer Fokus auf der Optimierung von Diffusorgeometrien zur Steigerung von Leistung und Effizienz, um das Verhalten des Energyfish-Systems unter realistischeren Randbedingungen detailliert zu untersuchen.

Hierzu wurden unterschiedliche Diffusortypen systematisch miteinander verglichen und mittels CFD simuliert. Ausgangspunkt bildete ein Referenzdiffusor, welcher später auch den Prototypen darstellte, auf dessen Basis verschiedene Gestaltungsmerkmale schrittweise kombiniert, angepasst und erneut berechnet wurden. Untersucht wurden unter anderem:

- Diffusoren mit abgerundeten Kanten,
- Varianten mit vergrößerten Ein- und Auslasswinkeln,
- Diffusoren mit engerem Halsbereich (throat) zur Strömungsbeschleunigung,
- zweiteilige Diffusoren mit Spalt (Gap) zwischen Vorder- und Hinterteil,
- sowie Ausführungen mit umlaufendem Brim am hinteren Diffusorteil.

Die Simulationen erfolgten iterativ: Nach jeder Rechenrunde wurden vielversprechende Geometrien weiterentwickelt, weniger geeignete Varianten verworfen und neue Kombinationen getestet. Dabei zeigte sich, dass nicht ein einzelnes Merkmal entscheidend war, sondern das Zusammenspiel mehrerer Diffusoreigenschaften.

Die numerischen Ergebnisse wurden anhand von Druck- und Geschwindigkeitsfeldern sowie normierten Leistungskennwerten bewertet. Insbesondere ließ sich zeigen, dass bestimmte Diffusorkombinationen den Massenstrom durch den Rotor deutlich erhöhen und gleichzeitig ein günstigeres Druckgefälle erzeugen.



(a) Pressure contour for the BaseCase

(b) Velocity contour for the BaseCase

(c) Pressure contour for the best diffusor

(d) Velocity contour for the best diffusor

Abbildung 5: ergleichende Druck- und Geschwindigkeitsverteilungen ausgewählter Diffusorvarianten

Am Ende dieses Optimierungsprozesses konnten wir eine Konfiguration identifizieren, die in den Simulationen eine deutliche Leistungssteigerung von rund 44 % gegenüber dem ursprünglichen Referenzdiffusor zeigte und über den gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich eine höhere Effizienz aufwies.

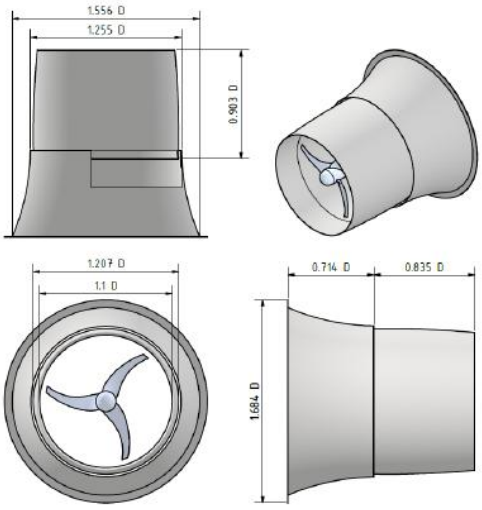


Abbildung 6: Finale Diffusorgeometrie für die weitere Entwicklung

Damit wurde durch ein systematisches, simulationsgestütztes und iteratives Vorgehen eine theoretisch optimale Diffusorlösung abgeleitet, die als Grundlage für die weitere Entwicklung des Energyfish-Systems dient.

4 Entwicklung des Prototyps für Fischzuchtbetriebe

Parallel zu den Simulationsarbeiten wurde untersucht, wie das Energyfish-System in bestehende Kanalsysteme integriert werden kann. Die Entwicklung des Prototyps erfolgte in mehreren Schritten, wobei besonderer Wert auf eine praxisnahe Fertigbarkeit und eine gute Integration in die vorhandene Kanalinfrastruktur gelegt wurde. Neben hydraulischen Gesichtspunkten spielten dabei auch Montagefähigkeit, Robustheit und Materialverfügbarkeit eine zentrale Rolle.

Der final ausgewählte Diffusor wurde anschließend aus Edelstahlblech gefertigt. Dabei kamen industrielle Blechbearbeitungsverfahren wie Schneiden, Biegen und Schweißen zum Einsatz, um eine stabile und gleichzeitig kosteneffiziente Konstruktion zu realisieren. Das Design wurde so gewählt, dass der Diffusor um einen horizontalachsigen Rotor montiert werden konnte, ohne den bestehenden Kanalbetrieb wesentlich zu beeinträchtigen.

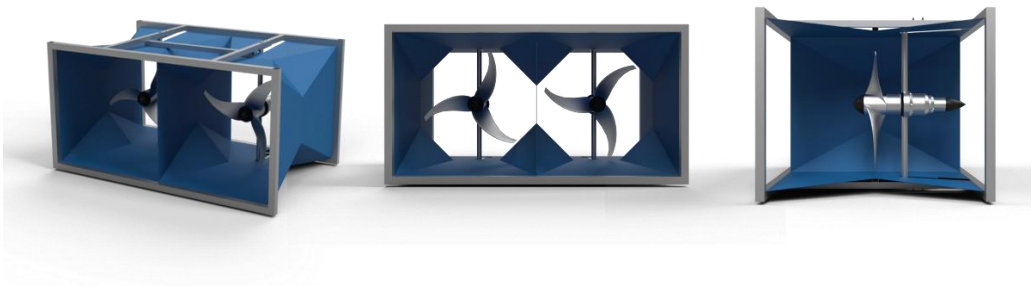


Abbildung 7: Darstellung des Prototyps

5 Aufbau, Installation und Betrieb des realen Prototyps

Nach Fertigstellung wurde der Prototyp in einem realen Fischzuchtkanal installiert und in Betrieb genommen. Die Installation erfolgte so, dass sie reversibel war und den laufenden Betrieb der Anlage nicht störte. Während der Testphase wurden systematisch Strömungs- und Leistungsdaten erfasst, um das Verhalten des Systems unter realen Bedingungen zu evaluieren.

Abbildung 8: Installation des Prototyps

Für den experimentellen Vergleich wurden zwei unterschiedliche Aufbauten realisiert: eine Konfiguration mit Diffusor und eine Referenzkonfiguration ohne Diffusor. Beide Aufbauten verwendeten identische Rotoren, um sicherzustellen, dass Leistungsunterschiede ausschließlich auf die Strömungsführung und nicht auf unterschiedliche Turbinengeometrien zurückzuführen waren. Die Rotoren wurden jeweils an eine standardisierte Leistungselektronik angeschlossen, über die sowohl die Rotationsgeschwindigkeit als auch die elektrische Leistungsabgabe kontinuierlich erfasst und aufgezeichnet werden konnten. Dadurch war eine direkte, messtechnisch vergleichbare Gegenüberstellung beider Konfigurationen möglich.

6 Abgleich von Modellierung, Simulation und Messdaten

Die im realen Betrieb gewonnenen Messdaten wurden mit den Ergebnissen der Modellierungs- und Simulationsarbeiten verglichen. Ziel war es, die Aussagekraft der angewandten Methoden zu überprüfen.

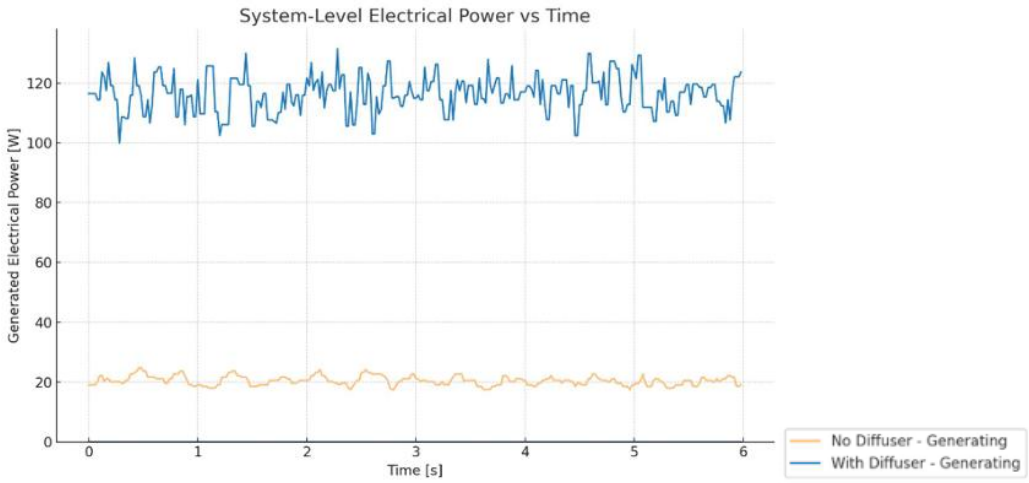


Abbildung 9: Vergleich des Energieertrags der beiden Testkonfigurationen mit und ohne Diffusorprototyp

Der Abgleich zeigte im Durchschnitt eine 470 % Steigerung der Stromerzeugung auf Systemebeneeine und bestätigt die Eignung der gewählten Modellierungs- und Simulationsansätze für die Auslegung des Systems.

7 Elektrische Entwicklung und Software

Im Rahmen des Vorhabens wurde neben der mechanisch-hydraulischen Entwicklung auch ein integriertes elektrisches und digitales System zur Steuerung, Regelung und Überwachung des Energyfish-Systems aufgebaut. Ziel war es, den Betrieb der Anlage zu automatisieren, Betriebsdaten systematisch zu erfassen und eine Grundlage für datenbasierte Optimierung und Wartung zu schaffen.

Zentrales Element der elektrischen Architektur ist der sogenannte Fish-Controller, der direkt mit dem Rotor gekoppelt ist. Dieser regelt die Stromproduktion des Generators, passt den elektrischen Lastpunkt an die jeweiligen Strömungsbedingungen an und stellt einen stabilen Anlagenbetrieb sicher. Gleichzeitig erfasst der Fish-Controller relevante Betriebsdaten wie Rotationsgeschwindigkeit, Spannung, Strom und Leistungsabgabe und übermittelt diese kontinuierlich an den übergeordneten Fish-Server.

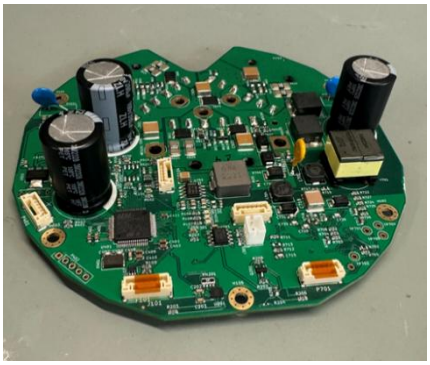


Abbildung 10: Fish-controller

Der Fish-Server fungiert als zentrale Steuereinheit der Anlage. Er empfängt die Sensordaten des Fish-Controllers, verarbeitet und analysiert diese in Echtzeit und koordiniert den Betrieb mehrerer Systemkomponenten. Darüber hinaus übernimmt der Fish-Server die Kommunikation mit dem cloudbasierten Backend, in das alle relevanten Betriebs- und Leistungsdaten übertragen werden.

Die gesamte Anlage ist in ein IoT-basiertes System eingebettet, das eine Fernüberwachung und -steuerung ermöglicht. Über dieses System können Betriebszustände visualisiert, Alarme ausgelöst und Parameter angepasst werden, ohne dass ein physischer Eingriff vor Ort erforderlich ist.

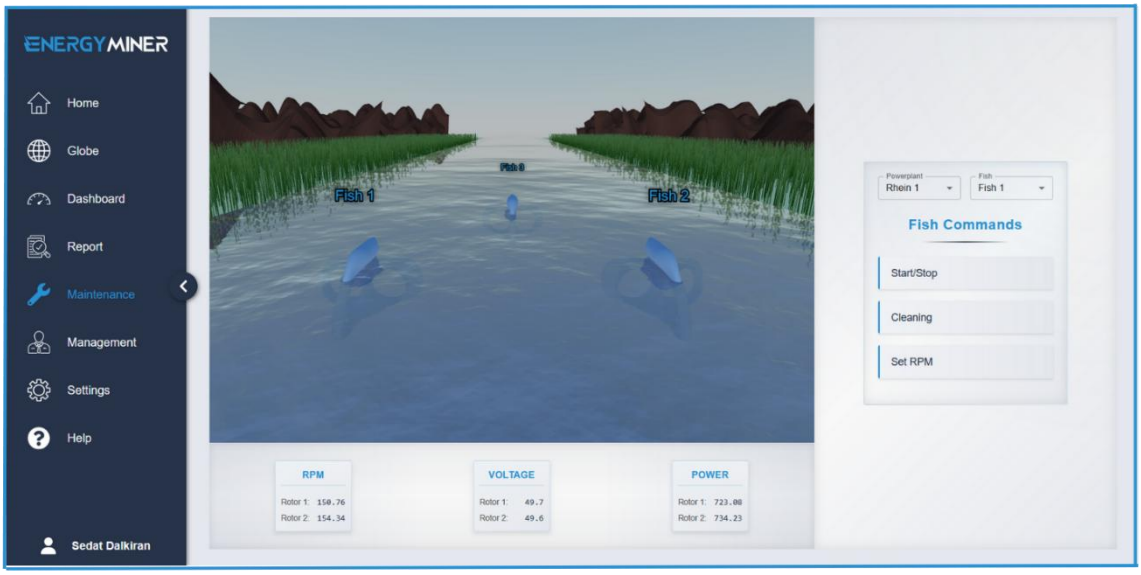


Abbildung 11: IoT-basierte Cloud zur Fernüberwachung und -steuerung

Ergänzend wurden integrierte KI-Funktionen entwickelt, die auf den gesammelten Daten basieren. Diese erlauben eine vorausschauende Wartung, indem Abweichungen vom Normalbetrieb frühzeitig erkannt und potenzielle Ausfälle prognostiziert werden können. Damit trägt das digitale System wesentlich zur Betriebssicherheit, Effizienz und Skalierbarkeit der Energyfish-Technologie bei.

8 Einordnung der Ergebnisse im Vergleich zur ursprünglichen Planung

Die im Vorhaben durchgeführten Arbeiten entsprachen in ihrer Zielsetzung der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung. Der Umfang der Modellierungs- und Simulationsarbeiten sowie die praktische Erprobung des Prototyps trugen wesentlich dazu bei, die geplanten Projektziele zu erreichen und die technische Machbarkeit des Ansatzes belastbar nachzuweisen.

Im Verlauf des Vorhabens hat sich gezeigt, dass der bisherige Pilotstandort aufgrund zu geringer natürlicher Fließgeschwindigkeiten nur eingeschränkt geeignet war, um das volle Leistungs- und Skalierungspotenzial des Energyfish-Systems auszuschöpfen. Die gemessenen Strömungsverhältnisse lagen unterhalb des für einen optimalen Betrieb angestrebten Bereichs, was die Energieausbeute begrenzte und zusätzliche Anpassungsmaßnahmen erforderlich machte.

Trotz dieser ungünstigen Ausgangsbedingungen konnten die im Projekt entwickelten Modelle, Annahmen und Simulationsansätze erfolgreich verifiziert werden. Der Abgleich von theoretischen Berechnungen, numerischen Simulationen und realen Messdaten zeigte eine gute qualitative Übereinstimmung und bestätigte die grundsätzliche Eignung der gewählten methodischen Ansätze zur Auslegung und Bewertung des Systems. Dies unterstreicht die Belastbarkeit der entwickelten Modellierungswerkzeuge und ihre Eignung für zukünftige Anwendungen.

Darüber hinaus hat das Vorhaben gezeigt, dass ein hohes Interesse an der Technologie besteht. Neben nationalen Akteuren haben auch internationale Fischzuchtbetriebe deutliches Interesse an einer dezentralen, grundlastfähigen und ökologisch verträglichen Energieversorgung geäußert. Dies bestätigt den Bedarf und das Marktpotenzial für das entwickelte Konzept.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse soll in einem nächsten Schritt ein konkretes, marktfähiges Produkt abgeleitet werden, das die technischen, betrieblichen und wirtschaftlichen Anforderungen von Fischzuchtbetrieben erfüllt.

Parallel dazu sollen die bestehenden Modelle weiterentwickelt und mit zusätzlichen Betriebsdaten trainiert werden, um vorausschauende Wartungsstrategien zu ermöglichen. Ziel ist es, den Anlagenbetrieb durch datenbasierte Zustandsüberwachung robuster, effizienter und planbarer zu gestalten.

Auf dieser Grundlage ist geplant, ab Frühjahr 2026 eine Serienanlage zu entwickeln und weitere Pilotstandorte mit besseren Ausgangsbedingungen zu installieren. Diese sollen sowohl der technischen Optimierung als auch der Markteinführung dienen und den Weg für eine breitere Anwendung der Energyfish-Technologie in der Fischzucht ebnen.