

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Zuwendungsempfänger:

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Titel der Förderung:

**Alternativmethoden: Reduktion von Tierversuchen zum
Schädigungsrisiko an Wasserkraftanlagen (RETERO-II) -
numerische Verhaltensmodellierung und robotische
Ersatzmodelle**

Projektkoordinator: Assoc. Prof. Stefan Hoerner (bis Okt. 2023)

Projektleiterin: Dr.-Ing. Shokoofeh Abbaszadeh

Beteiligte Institute:

Institut für Elektrische Energiesysteme (IESY)

Lehrstuhlleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Roberto Leidhold

Verantwortliche wissenschaftliche Mitarbeiterin: Dr.-Ing Shokoofeh Abbaszadeh

Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik (ISUT)

Lehrstuhlleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dominique Thévenin

Verantwortlicher wissenschaftlicher Mitarbeiter: M.Sc. Dennis Powalla

Weitere Mitarbeiter: M.Sc. Iring Kösters

Förderkennzeichen: 03LW0169K

**„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des
Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem
Förderkennzeichen 03LW0169K gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser
Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.“**

Teil I- Kurzbericht

Sachbericht – RETERO Projekt – OVGU

Einleitung und Zielsetzung

Weniger als jedes zehnte, natürliche Fließgewässer in Deutschland ist in einem guten ökologischen Zustand (UBA 2016)¹. Neben stofflichen Einträgen ist die Veränderung der Gestalt der Gewässer durch den Menschen und die unterbrochene Durchgängigkeit ein Hauptgrund für diese erschreckende Zahl (UBA 2017)². Eine große Anzahl von Querbauwerken erschwert oder verhindert die Wanderung von Fischen und anderen Tieren. Ein zentraler Aspekt bei der Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie ist deshalb die Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit.

In Abwägung zwischen Umwelt- und Naturschutzbelangen und der geforderten Energietransition ist die Wiederherstellung der Durchgängigkeit dennoch obligatorisch. Die Investitionen, die sich für die Betreiber ergeben, um die Wasserkraftanlagen ökologisch nachhaltig zu betreiben, sind in der Regel mit hohen finanziellen Belastungen verbunden. Installationen geeigneter Fischschutz, sowie Auf- und Abstiegsanlagen sind notwendig, um den Fischen die Überwindung der Standorte zu ermöglichen und sie vor Schäden bei der Passage, insbesondere durch die Turbinen zu schützen. Der Funktionsnachweis derartiger Schutz- und Abstiegssysteme wird teilweise behördlich gefordert und ist inzwischen oft Voraussetzung für die Neukonzessionierung der Wasserkraftnutzung. Durch den hohen Aufwand kosten solche Untersuchungen abhängig vom Standort auch für kleine Wasserkraftanlagen durchaus fünf- bis sechsstellige Beträge.

Eine inakzeptable Konsequenz der bisherigen Praxis ist der Einsatz von Lebendfischen in Tierversuchen für die geforderten Gutachten. Es scheint widersinnig, dass mitunter stark gefährdete Wanderfische in Tierversuchen sterben müssen, um ihr Aussterben zu verhindern.

Laut der Datenbank des Bundesamts für Risikoabschätzung beträgt die Zahl der Versuchstiere bis zu hunderttausend Fische pro Jahr (Spitzenwert 2015: 460.000 (BFR 2021)³).

Das RETERO-Projekt (Reduction of live fish testing through science and technology) stellte sich den Herausforderungen der bisherigen Praxis und entwickelte eine neue Generation von Methoden zur Bewertung von Wasserkraftanlagen und technischen Einrichtungen in Flüssen im Hinblick auf das Verhalten der Fische. Um die Projektziele zu erreichen, orientierte sich das Konsortium in seinem Vorgehen vollständig nach dem 3R-Prinzip um durch numerische und experimentelle Ansätze alternative, wissenschaftlich fundierte Methoden zur Evaluierung des Schädigungsrisikos von Fischen bei einer Turbinenpassage zu entwickeln.

Ablauf und Ergebnisse

Für die Umsetzung der zweiten Projektphase war ein Zeitraum von 24 Monaten (01.04.2022 bis 31.03.2024) vorgesehen, die nach der Zustimmung der BMBF kostenneutral bis 30.09.24 verlängert wurde. Innerhalb der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg (OvGU) beschäftigten sich die wissenschaftlichen Mitarbeiter*innen mit der Weiterentwicklung, des in der ersten Projektphase erstellten numerischen Werkzeugs zur Modellierung und Schädigungsanalyse von Turbinenpassagen (am Institut für Strömungsmechanik und Thermodynamik (ISUT)) sowie die Weiterentwicklung der aktiven Sonden (Fischroboter) und der Korrelation realer Schädigungen an den Fischen mit den aus Simulationen und Experimenten gewonnenen Sensordaten (am Institut für Elektrische Energiesysteme (IESY)).

Bei den experimentellen Methoden wurde die in der ersten Phase entwickelte teilautonome

¹Umweltbundesamt 2016

²Umweltbundesamt 2017

³Bundesamt für Risikobewertung (BfR), AnimalTestInfo - Datenbank zu Tierversuchsvorhaben in Deutschland, animaltestinfo.de

Messsonde mit integrierten Datenloggern im Hinblick auf die Herstellungsprozesse, die verwendeten Materialien und die Flexibilität des Körpers sowie der elektronischen Komponenten überarbeitet und verbessert. Dadurch wurde die Schwimmfähigkeit des Roboters erhöht. Die Navigationstests wurden im Wasser durchgeführt. Der Messsonde wurde erfolgreich im ISUT und am Institut für Wasserbau (IWD) der Technischen Universität Dresden getestet.

Zusätzlich wurde der Versuchsstand zur Durchführung der Schlagversuche wie geplant erweitert und verbessert, um jegliches Verletzungsrisiko für die Nutzenden auszuschließen. Im Rahmen einer Masterarbeit wurden zusätzlich umfassende, experimentelle Protokolle entwickelt, um die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Experimente zu gewährleisten. Die Protokolle wurden nun als zukünftiges Standardverfahren vorgeschlagen. Eine Veröffentlichung der Protokolle mit ersten Daten ist in Begutachtung. Darüber hinaus wurden neue Sensoren, sowie sogenannte Seitenlinienorgane auf flexiblen PCBs von der Taltech, der Tallinn University of Technology in Estland, entwickelt. Im Absprache mit dem Projektpartner IGF wurden Fischsurrogate aus verschiedenen Materialien mit unterschiedlicher Dichte und Elastizitätsmodulen getestet um eine vergleichbare Festigkeit zu echten Fische zu erzielen.

Es wurden Schlagversuche mit existierenden Sensoren (BDS/RAPIDS) sowie flexiblen Fischsurrogaten durchgeführt. Zur Verfolgung des Bewegungsverlaufs und der Deformation der Fischsurrogate nach dem Schlag wurde ein optisches Trackingsystem entwickelt. Ein elektromagnetischer Pulsgeber wurde im Blattkollisionssimulator installiert, um synchronisierte Datenaufnahmen der Sensoren mit der HS-Kamera zu ermöglichen. Die Auswertung der Ergebnisse zeigten, dass harte Sensoren schon bei niedrigen Geschwindigkeiten in Sättigung gehen, was die Aussagekraft der Messwerte beeinträchtigt. Bei integrierten Sensoren in einem flexiblen Körper reduzierte sich dagegen Spitzenwerte der Beschleunigungsamplituden und die Messzeit verlängerte sich.

Bei den numerischen Werkzeugen wurden bestehende Simulationsmodelle um weitere Verhaltensreaktionen erweitert, die dem zu Grunde liegendem Werkzeugkasten der ethohydraulischen Verhaltensmodellierung hinzu geführt werden. Es ist nun möglich, den virtuellen Fischen ein Erschöpfungsverhalten - basierend auf biologischen Modellrechnungen nach Ebel 2013 - aufzuerlegen. Das Erschöpfungsverhalten, welches als Schwimmkapazität aufgefasst werden kann, liefert die Schwimgeschwindigkeit die ein Individuum über einen festgelegten Zeitraum leisten kann. Sie ist abhängig von der Körperlänge, der Wassertemperatur und der Zeitspanne, in der das Individuum die Schwimmleistung aufbringt. Überschreitet die erforderliche Schwimgeschwindigkeit (um z.B stromaufwärts zu schwimmen) die Geschwindigkeit der Wandergeschwindigkeit der Spezies, verliert der virtuelle Fisch abhängig von der aufgebrachten Leistung ein Teil seines Energiebudgets. Ist das komplette Budget aufgebraucht, führt die Erschöpfung zu passivem verdriften in der Strömung.

Untersuchungen von passiven und aktiv schwimmenden virtuellen Fischen stützen die Hypothese, dass aktives Verhalten das Schädigungsrisiko in kritischen Regionen von hydraulischen Anlagen signifikant ansteigen lässt. Das aktive Verhalten bedeutet, dass die virtuellen Fische im Einsaugbereich einer hydraulischen Maschienen mit einer artspezifischen maximalen Schwimgeschwindigkeit gegen die Strömung schwimmen.

Um die Kollisionsdaten der virtuellen Fische besser interpretieren zu können, wurde in einer studentischen Arbeit die Kollisionsbeschleunigungen von virtuellen Fischen mit den im Projekt verwendeten Sensordaten verglichen.

Die entwickelten Modelle ermöglichen eine realistischere Simulation des Fischverhaltens in hydraulischen Anlagen und helfen, das Schädigungsrisiko für Fische zu bewerten. Erste Anwendungen in der Praxis, wie die Entwicklung einer fischverträglichen Pumpe in Zusammenarbeit mit dem Pumpenhersteller KSB, zeigen bereits Erfolge. Dennoch besteht weiterer Forschungsbedarf, insbesondere in der Modellierung von Kollisionsintensitäten.

Teil II- Eingehende Darstellung

1 Einleitung und Kontext

Weniger als jedes zehnte, natürliche Fließgewässer in Deutschland ist in einem guten ökologischen Zustand (UBA 2016)⁴. Neben stofflichen Einträgen ist die Veränderung der Gestalt der Gewässer durch den Menschen und die unterbrochene Durchgängigkeit ein Hauptgrund für diese erschreckende Zahl (UBA 2017)⁵. Eine große Anzahl von Querbauwerken erschwert oder verhindert die Wanderung von Fischen und anderen Tieren. Ein zentraler Aspekt bei der Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie ist deshalb die Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit.

In Abwägung zwischen Umwelt- und Naturschutzbelangen und der geforderten Energietransition ist die Wiederherstellung der Durchgängigkeit dennoch obligatorisch. Die Investitionen, die sich für die Betreiber ergeben, um die Wasserkraftanlagen ökologisch nachhaltig zu betreiben, sind in der Regel mit hohen finanziellen Belastungen verbunden. Installationen geeigneter Fischschutz, sowie Auf- und Abstiegsanlagen sind notwendig, um den Fischen die Überwindung der Standorte zu ermöglichen und sie vor Schäden bei der Passage, insbesondere durch die Turbinen zu schützen. Der Funktionsnachweis derartiger Schutz- und Abstiegsysteme wird teilweise behördlich gefordert und ist inzwischen oft Voraussetzung für die Neukonzessionierung der Wasserkraftnutzung. Durch den hohen Aufwand kosten solche Untersuchungen abhängig vom Standort auch für kleine Wasserkraftanlagen durchaus fünfstelligen Beträge oder mehr.

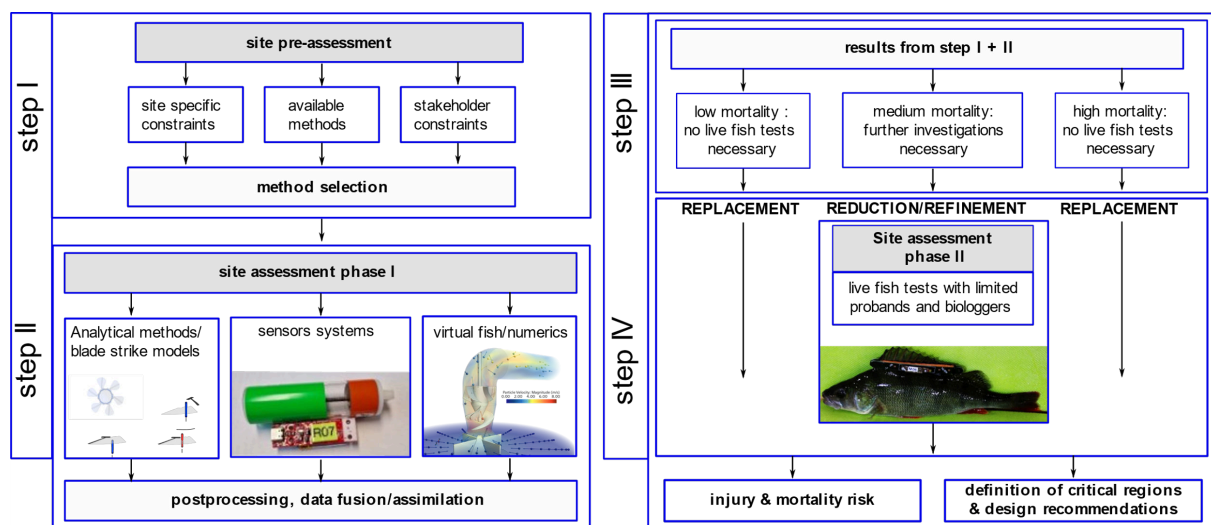


Abbildung 1: Umsetzung des 3R Prinzips in der Praxis durch einen mehrstufigen Analyseprozess [[1]]

Eine inakzeptable Konsequenz der bisherigen Praxis ist der Einsatz von Lebendfischen in Tierversuchen für die geforderten Gutachten. Es scheint widersinnig, dass mitunter stark gefährdete Wanderfische in Tierversuchen sterben müssen, um ihr Aussterben zu verhindern.

Laut Bundesamt für Risikoabschätzung beträgt die Zahl der Versuchstiere bis zu hunderttausend Fische pro Jahr (Spitzenwert 2015: 460.000 (BFR 2021)⁶).

Das RETERO-Projekt (Reduction of live fish testing through science and technology) stellte sich den Herausforderungen der bisherigen Praxis und entwickelte eine neue Generation von

⁴Umweltbundesamt 2016

⁵Umweltbundesamt 2017

⁶Bundesamt für Risikobewertung (BfR), AnimalTestInfo - Datenbank zu Tierversuchsvorhaben in Deutschland, animaltestinfo.de, eigene Recherche

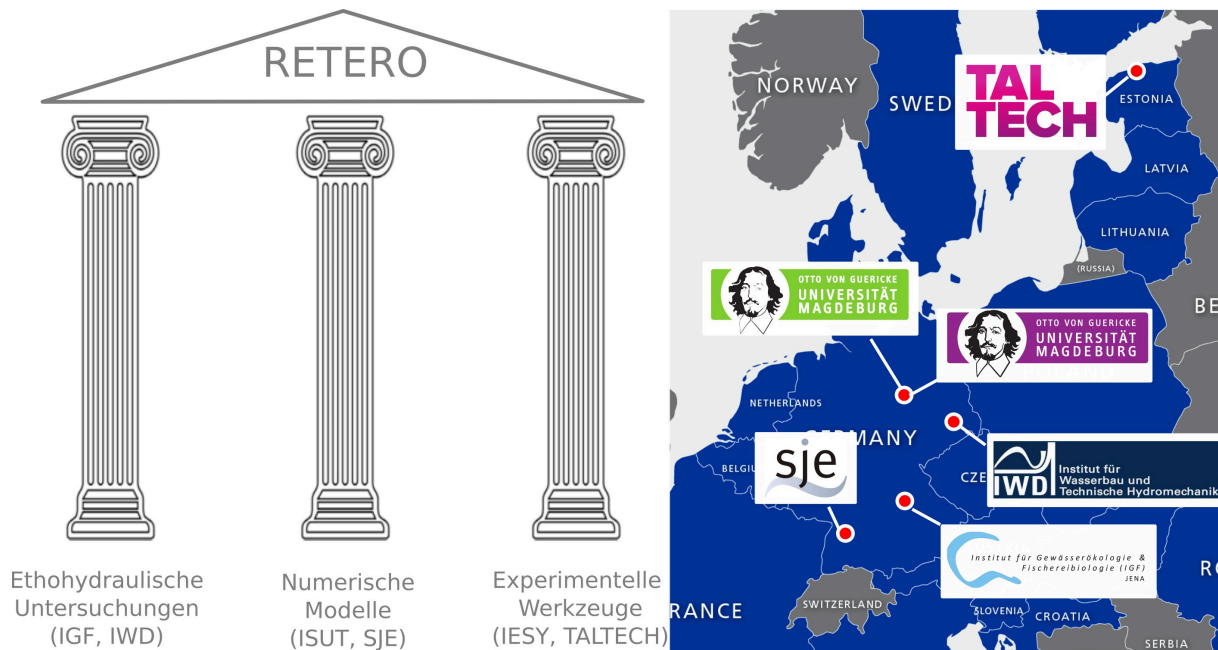


Abbildung 2: Die drei Säulen des RETERO Projekts mit Zuordnung der Projektpartner

Methoden zur Bewertung von Wasserkraftanlagen und technischen Einrichtungen in Flüssen im Hinblick auf das Verhalten der Fische (s. Abb. 1). Das RETERO-Projekt setzte sich aus einem interdisziplinären Konsortium aus fünf Partnerinstituten und -unternehmen aus Deutschland und Estland zusammen, denen Forschende aus den Bereichen Bauwesen (IWD der TU Dresden), Umwelttechnik (SJE Ecohydraulics), Maschinenbau (ISUT der OVGU) und Elektrotechnik (IESY der OVGU) sowie Biologie (IGF Jena) und Informatik (TalTech) angehören. Um die Projektziele zu erreichen, stützte sich das Konsortium schon seit der ersten Projektphase vollständig auf das 3R-Prinzip, das 1958 von Russel & Burch eingeführt wurde [2]. In dem Konzept stehen die drei R für:

1. **Replace:** einen Ersatz der Tiere, z.B. durch Ersatzmodelle oder neue Methoden
2. **Reduce:** eine Verringerung der Anzahl der in den Studien eingesetzten Tiere, z.B. durch die Entwicklung fortschrittlicherer Methoden zur Gewinnung verbesserter Daten und Datenqualität aus jedem eingesetzten Tier
3. **Refine:** die Verfeinerung der Methoden, die das Leiden der Tiere auf ein absolut notwendiges Maß reduzieren soll

Das Projekt adressierte alle drei Prinzipien mit einer Vielzahl von Methoden und Sensorsystemen. Bei der Entwicklung stützte sich die Arbeit auf drei Säulen (siehe Abb. 2):

1. ethohydraulische Forschung, um Einblicke in das Verhalten von Fischen in künstlichen, hydraulischen Umgebungen zu gewinnen
2. experimentelle Werkzeuge, wie nicht-invasive Biologger, die an den Rückenflossen angebracht sind und aktive Sonden
3. numerische Werkzeuge, wie probabilistische Methoden, die das Fischverhalten durch Analyse des Strömungsfeldes vorhersagen

Das OVGU-Team, bestand aus Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Elektrische Energiesysteme (IESY) und des Instituts für Strömungstechnik und Thermodynamik (ISUT). Es befasste sich seit der ersten Projektphase hauptsächlich mit der 2. und 3. Säule des Projekts.

2 Durchgeführte Arbeiten

Durchgeführte Arbeiten – Numerische Werkzeuge

Das ISUT war an der OVGU für die Entwicklung einer Verhaltensmodellierung für Fische auf Basis von CFD-DEM Simulationen im RETERO Projekt verantwortlich.

Zu Beginn des Projektes (RETERO I) stand die Entwicklung und das generelle Konzept der Kopplung verschiedener Methoden im Vordergrund. Hierbei war die Ausgangslage eine geeignete Softwareumgebung zu nutzen, die strömungsrelevante Informationen über hydraulische Anlagen liefern kann, zu gleich individuelle Beschreibung von Fischesurrogaten ermöglicht und Kollisionereignisse berücksichtigt. Dies kann durch die Kopplung zwischen CFD (Computational Fluid Dynamics) und DEM (Diskrete Elemente Methode) ermöglicht werden. Die DEM Methode ermöglicht es, Teilchenbewegungen in Wechselwirkung mit dem sich umgebenden Fluid zu beschreiben. Hier wird die Impulsänderung der Teilchen mit der Summe der auf sie wirkenden Oberflächen- und Körperkräfte gleichgesetzt. Die Wechselwirkung mit dem Fluid findet über die Oberflächenkräfte (Kraft aufgrund eines Druckgradienten und Widerstandskraft) statt. Die Schwerkraft wirkt auf den Körper. In dem hier genutzten Modell ist es zusätzlich möglich eine Nutzer-definierte Kraft zu definieren, die auf das Teilchen wirkt. In dem Modell dienen die Teilchen als Fischesurrogate und die Nutzer-definierte Kraft zur Modellierung der Schwimmkapazität des Fisches. Die Definition der Schwimmkapazität erlaubt es, dass sich Orientierung und Schwimmgeschwindigkeit des virtuellen Fisches beeinflussen lassen. Wie die Orientierung ausgeprägt ist, wird in Verhaltensregeln bestimmt. Diese können aus lokalen oder globalen Ereignissen bestehen. Das Modell ist so gestaltet, dass mehrere Verhaltensregeln gewichtet miteinander angewendet werden können. Es ist bewusst flexibel und modular entwickelt worden, um eine möglichst breites Anwendungsfeld bedienen zu können.

Das in der ersten Projektphase (RETERO I) entwickelte Simulationsmodell wurde auf seine numerische Effizienz untersucht. Dabei stand der rechnerische Overhead (bezogen auf reine CFD-Simulationen ohne Kopplung mit aktiven DEM-Teilchen) im Vordergrund. Hauptaugenmerk wurde auf die vier möglichen Kopplungswege des CFD/DEM-Modells gelegt, um deren Einfluss auf bestehende Ergebnisse und die numerischen Kosten zu bestimmen. Hierbei wurde ersichtlich, dass der Einfluss der DEM-Teilchen auf das Fluid in den meisten Anwendungen vernachlässigt werden kann und deutliche Einsparpotenziale bestehen.

Durch eine drei-Wege-Kopplung (Fluid-zu-Fisch, Fisch-zu-Fisch und Fisch-zu-Wand) reduziert sich nicht nur der Anteil der numerischen Kosten signifikant, sie ermöglicht auch die parallele Injektion einer größeren Zahl virtueller Fische pro Volumen. Dies führt zu einer weiteren Einsparung und erlaubt eine höhere virtuelle Probandenzahl bei gleicher Rechenzeit, die wiederum zu einer höheren statistischen Aussagekraft führt.

Ein weiteres Ziel war die Erweiterung bestehender CFD/DEM Verhaltensmodelle. Abbildung 3 zeigt zusammengefasst die Verhaltensregeln die für das Verhaltensmodell in den Projektphasen für RETERO I und RETERO II entwickelt wurden. Die Verhaltensregeln können in zwei grundsätzliche Bereiche eingeteilt werden.

1. das Beeinflussen der Orientierung des virtuellen Fisches. Dieser kann wiederum in lokale, globale und domain Trigger unterschieden werden:
 - (a) Lokale Trigger: sie ermöglichen die Orientierung entlang oder gegen die Strömung anhand der der lokalen Geschwindigkeitsvektoren der Strömung. Damit ist es möglich die stromaufwärts- und die stromabwärts- gerichtete Wanderung, sowie die Ausrichtung entlang der Hauptströmung zu simulieren.
 - (b) Globale Trigger: sie sind im Model unabhängig vom Fluid definiert und werden über globale Orientierungspunkte eingestellt. Die Platzierung eines Orientierungspunktes ist dabei abhängig von der Anwendung. In einer Turbine, beispielsweise kann dieser Punkt in einem Bereich unterhalb der Turbine im Auslaufbereich liegen. Die abschließliche Orientierung zu dem Punkt durch die Turbine - unabhängig von der Um-

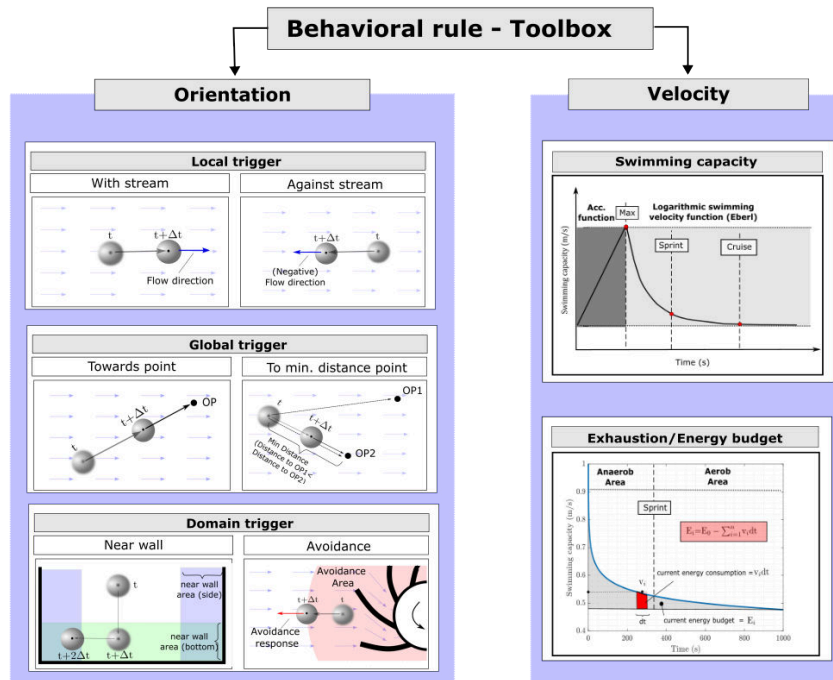


Abbildung 3: Übersicht der Verhaltensregeln für virtuellen Fisch. links: Verhaltensregeln für Orientierung. Lokales Verhalten: Schwimmen mit dem und gegen den Strom. Globales Verhalten: Orientierung zu einem oder mehreren Orientierungspunkt/en als *Wanderwille*. Verhalten bezogen auf Bereich: Wandnahe Orientierung und Meidungsreaktion auf rotierende Teile. rechts: Schwimmkapazität anhand von empirischen Funktionen und die Funktion der Ermüdung mit Erschöpfung für die virtuellen Fische.

gebung - soll den übergeordneten Willen dieses Hindernis zu passieren darstellen (z.B. Migrationswille). Ein weiterer Nutzen des Ansatzes ist es, dass die Trajektorie des virtuellen Fisches robuster gegen lokale Rezirkulationsbereiche (Totwasser) ist. Für manche Anwendungen kann es von Vorteil sein, dass mehrere globale Orientierungspunkte zum Einsatz kommen und der virtuelle Fisch sich zu dem Punkt hin orientiert, der am nächsten zu ihm liegt. Der Algorithmus berechnet dabei die Entfernung aller globalen Orientierungspunkte und wählt den Punkt der minimalen Entfernung als Bezugsgröße.

- (c) Domain trigger: Die implementierten domain Trigger sind die wand nahe Orientierung und die Meidungsreaktion. Laut verhaltensbiologischen Untersuchungen bevorzugen insbesondere schwimmschwache Arten die Nähe von Boden oder Wänden. Um dieses Verhalten in der Modellierung abzubilden, wurde ein entsprechendes Modul dafür entwickelt. Das Modul der wand-nahen Orientierung berücksichtigt zum einen die Orientierung hin zu einer Seitenwand und zum anderen die Orientierung hin zum Boden. Gleichzeitig wart der Fisch eine Mindestdistanz um Kollisionen zu vermeiden.

Das Meidungsverhalten soll in seiner Anwendung hauptsächlich an hydraulischen Anlagen angewandt werden. Dabei muss die Reaktion der Fische auf die rotierenden Teile einer hydraulischen Anlagen dargestellt werden. Es wird angenommen, dass die virtuellen Fische eine Meidungsverhalten gegenüber rotierenden Teilen haben, da sie als potentielle Gefahr angesehen werden. Hier stehen sich zwei gegenteilige Verhalten gegenüber: Zum einen der Versuch die lokale Gefahr zu meiden, zum anderen den biologischen Drang das Hindernis zu überwinden, um die Wanderung stromaufwärts/stromabwärts fortzusetzen, so dass der Lebenszyklus der Spezies nicht unterbrochen wird.

2. Erschöpfungsverhalten: basierend auf biologischen Modellrechnungen nach Ebel 2013

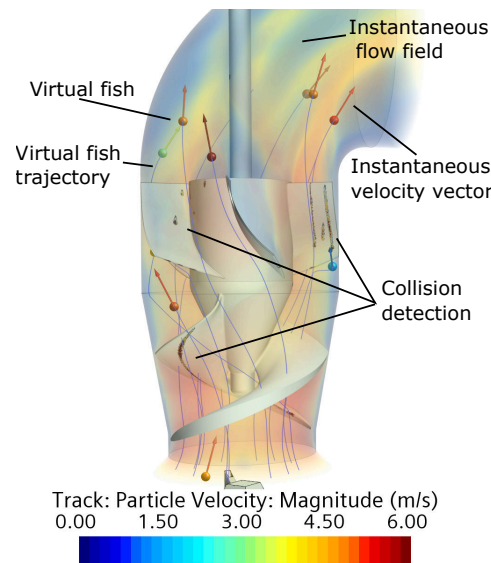


Abbildung 4: Anwendung des CFD-DEM Verhaltensmodell auf eine axiale fischschonendes Pumpendesign. Der Simulationausschnitt zeigt die virtuellen Fische und deren Bahnlinie, das Strömungsfeld des Fluids, sowie die Kollisionsereignisse an der Pumpengeometrie.

[3] ist es möglich den virtuellen Fischen Erschöpfungsreaktionen auf zu erlegen. Das Erschöpfungsverhalten, welches als Schwimmkapazität aufgefasst werden kann, liefert die Schwimmgeschwindigkeit die ein Individuum über einen festgelegten Zeitraum leisten kann. Sie ist abhängig von der Körperlänge, der Wassertemperatur und der Zeitspanne, in der das Individuum die Schwimmleistung aufbringt. Überschreitet die erforderliche Schwimmgeschwindigkeit (um z.B stromaufwärts zu schwimmen) die Geschwindigkeit der Wandergeschwindigkeit der Spezies, verliert der virtuelle Fisch abhängig von der aufgebrauchten Leistung ein Teil seines Energiebudgets. Ist das komplette Budget aufgebraucht, führt die Erschöpfung zu passivem verdriften in der Strömung.

Die Anwendung der Modelle in der Praxis fand erstmals in Zusammenarbeit mit dem Pumpenhersteller KSB statt. KSB war daran interessiert eine fischschonende Pumpe herzustellen, die in Pumpstationen an Poldern/Deichanlagen zum Einsatz kommen sollen. Dabei entwickelte KSB die Pumpenhydraulik (siehe Abbildung 4) und das in RETERO entwickelte Werkzeug wurde zur Abschätzung von kritischen Bereichen der Pumpe eingesetzt.

Diese konkrete Anwendung der numerischen Modelle auf die Pumpenanlage gab Aufschluss über eine notwendige Ausweitung der Analysemethoden auf Basis der Track-Daten der virtuellen Fische. Insbesondere konnten die in RETERO entwickelten Auswerteskript dahingehend optimiert werden, dass Teilchen-Teilchen-Kontakte aus den Ergebnissen gefiltert wurden, da diese die vorherigen Ergebnisse verzerrten.

Vergleichende Untersuchungen von passiven und aktiv schwimmenden virtuellen Fischen stützen die Hypothese, dass aktives Verhalten das Schädigungsrisiko in kritischen Regionen von hydraulischen Anlagen signifikant ansteigen lässt. Das aktive Verhalten bedeutet, dass die virtuellen Fische im Einsaugbereich der Pumpe mit einer artspezifischen maximalen Schwimmgeschwindigkeit gegen die Strömung schwimmen.

In der Anwendung der KSB-Pumpe wurde eine Ausweichreaktion für die virtuellen Fische bezogen auf den Rotoreinlass definiert. Das bedeutet, dass die virtuellen Fische, je näher sie der Rotornabe kommen, desto stärker gegen die Strömung anschwimmen (Rheotaktisch positiv). Die der Nabe zugewiesene kritische Position für die Ausweichreaktion wurde zunächst willkürlich gewählt, da dazu bisher keine Daten existieren: Die Bestimmung einer realistischeren Position ist daher eine wichtige Forschungsfrage, die Gegenstand ethohydraulischer Folgeuntersuchungen sein sollte.

Die im Modell implementierten Verhaltensbedingungen sind schematisch in Abbildung 5 darge-

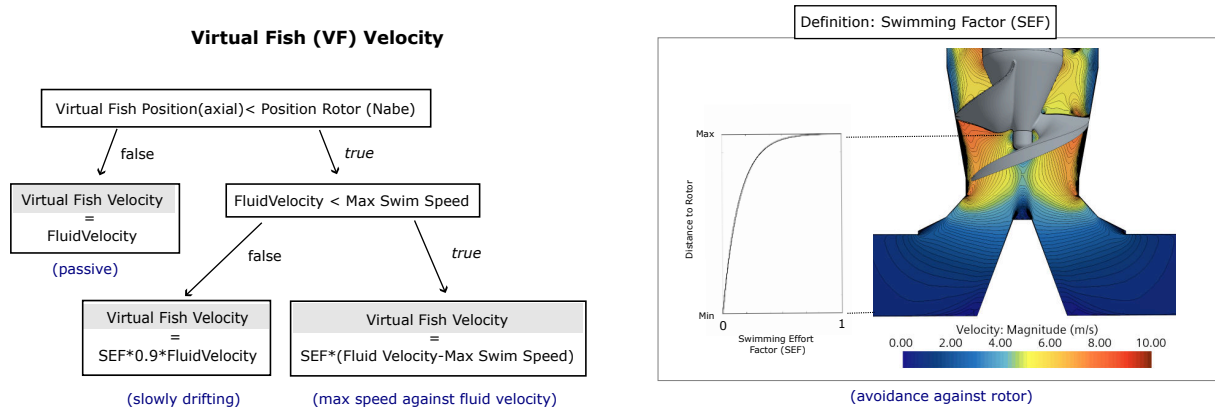


Abbildung 5: inks: Fließschema des aktiven Verhaltens der virtuellen Fische im Einlaufbereich der Pumpenanlage rechts: Gültigkeitsbereich und Funktionsverlauf des Schwimmaufwandsfaktors.

stellt. Zunächst wird geprüft, ob sich der virtuelle Fisch noch unterhalb der Rotornabe befindet. Falls die Bedingung nicht zutrifft, verhält sich der virtuelle Fisch wie ein passiver Körper. Es wurde mangels Daten angenommen, dass Fische nach dem Passieren des Rotors das Pumpensystem passiv durchlaufen, da die Strömungsgeschwindigkeiten ihre Schwimffähigkeiten bei weitem übersteigen. Dies deckt sich nicht mit den Ethohydraulischen Untersuchungen am IWD, konnte aber in der Projektlaufzeit nicht mehr implementiert werden.

Wenn die Bedingung erfüllt ist (Fisch vor dem Rotor), prüft das System, ob die Strömungsgeschwindigkeit die maximale Schwimmggeschwindigkeit der Art übersteigt (Ebel 2013 [3]). Falls dies nicht der Fall ist, bewegt sich der virtuelle Fisch mit einem zuvor definierten Anteil der Strömungsgeschwindigkeit gegen die Strömung. Da im Einlassbereich Geschwindigkeiten vorherrschen, gegen die Fische mehrere Stunden schwimmen können, wurde im Rotorbereich langsames Driften implementiert. Dies war notwendig, um Rechenzeit zu sparen und die durch den Schwimmaufwand dennoch verursachte Ermüdung abzudecken.

Falls die Strömungsgeschwindigkeit die maximale Schwimmggeschwindigkeit übersteigt, schwimmt der virtuelle Fisch mit seiner maximalen Schwimmggeschwindigkeit gegen die Strömung. Driften und aktives Schwimmen gegen die Hauptströmung wurden jeweils mit einem Schwimmaufwandsfaktor (SEF) verknüpft. Dieser Faktor berücksichtigt eine zunehmende Ausweichreaktion, je näher der virtuelle Fisch dem kritischen Punkt kommt. Der Faktor wurde durch eine Funktion beschrieben, die bei maximalem Abstand zum Rotor 0 beträgt und exponentiell auf 1 ansteigt. Wie zu erwarten war, konnte nachgewiesen werden, dass ein aktives Verhalten von virtuellen Fischen beim Durchgang durch eine Pumpe zu einer erhöhten Kollisionshäufigkeit und damit auch zu einem erhöhten Schädigungsrisiko führt.

Abbildung 6 gibt eine Übersicht über die genutzten Anwendungsfelder des Verhaltensmodell. Die Anwendungsfelder lassen sich grob in Laboranwendung, Anwendung auf Fischpassagen und hydraulische Anlagen unterteilen.

1. Laboranwendung (Abbildung 6 linke Säule)

Die Definition von Laboranwendung ist in dem gezeigten Kontext so aufzufassen, dass die jeweiligen Anwendungen im Labor statt gefunden haben und für die Simulationen ausreichend Validierungs-Messdaten zur Verfügung standen. Die Laborrinne ist in der Laborhalle an der TU Dresden errichtet worden, in der Verhaltensuntersuchungen für Fische durchgeführt wurden. Neben den Tracking-Daten der Fischversuche wurden auch Optische Messverfahren (LDA, PIV) eingesetzt, um die Strömungsverhältnisse in der Rinne aufzuzeichnen. Im Labor des LSS in Magdeburg sind Fallexperimente mit Sensoren der Taltech durchgeführt worden, die Aufschluss über die Vergleichbarkeit der Sensordaten und den Daten der Simulation liefern sollen. In einer studentischen Abschlussarbeit wurde die starke Streuung der Sensordaten beobachtet und das die Kontaktmodelle, die das genutzte Simulationstool zur Berechnung der Kollisionen nutzt ohne Kalibrierung un-

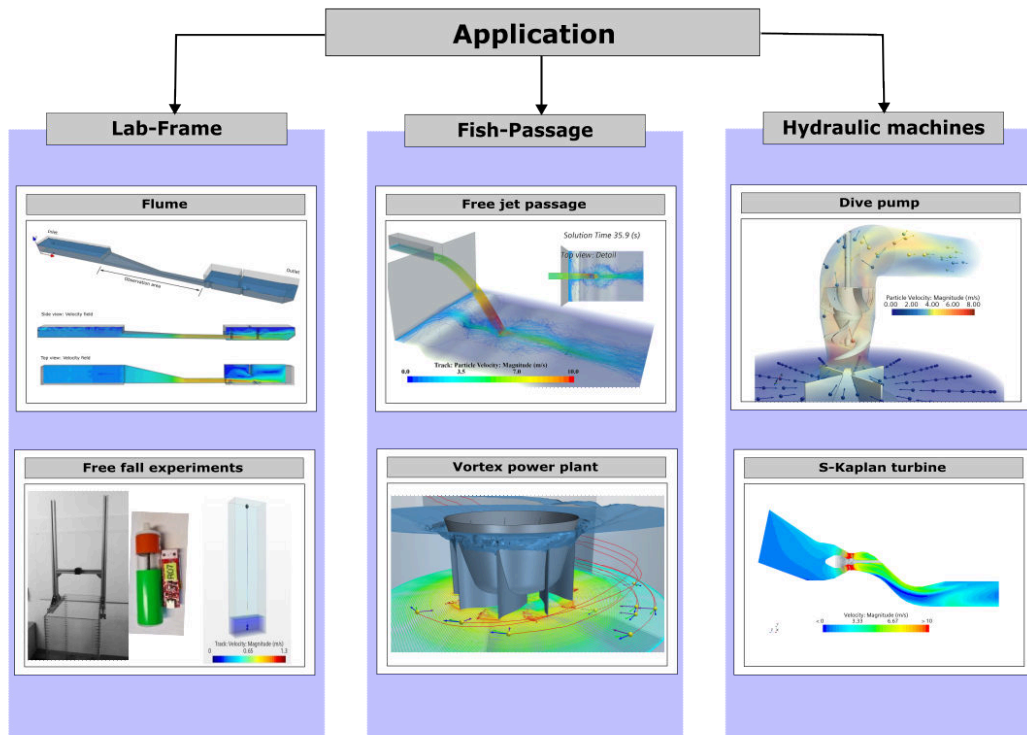


Abbildung 6: Übersicht über die genutzten Anwendungsfelder des Verhaltensmodell. Anwendung im Labor: Parcourstrecke an der TU-Dresden und Fallexperiment am ISUT. Anwendung an Fischpassagen: Wasserfall-Bypass-Anlage und Kleinwasserwirbelkraftwerk. Hydraulische Anlagen: Fischschonende axiale Tauchpumpe und Kaplan-Turbine.

zuverlässige Ergebnisse liefert.

2. Anwendung auf Fischpassagen (Abbildung 6 mittlere Säule)

Für die Entwicklung des Schädigungsrisikomodells ist es notwendig das Modell auch an realen Anlagen zu prüfen. Ein Teil der zu betrachten ist, sind Anlagen die Fische bei ihrer Wanderung stromaufwärts bzw. stromabwärts überwinden müssen. Zu diesen gehören Fischpassagen, die an Flusswasserkraftwerken installiert sind. Hier interessieren besonders Ausführungen, die ein gewisses Schädigungsrisiko beinhalten. Eine solche Anlage ist eine Wasserfall-Bypass-Anlage die an einer französischen Flusswasserkraftanlage installiert ist. Für die Anlage stehen außerdem Sensordaten, und Messungen zur Verfügung. Erste Simulationen sind bereits durchgeführt und auf einer Konferenz in Budapest [4] vorgestellt worden. Die Zusammenführung von Messdaten, Sensordaten und dem CFD-DEM-Modell ist in einer gemeinsamen Publikation mit der Office français de la biodiversité (OFB) und dem Französischen Forschungsinstituten LEGI (Grenoble) und PPRIME (Poitiers) in Bearbeitung. Eine weitere Anlage die untersucht wurde, ist eine Wasserwirbelkraftanlage, die als sich selbst amortisierende Fischaufstiegsanlage konzipiert wurde. Ihre Validierung ist in Powalla et al. 2021 [5] und die generelle Implementierung der Verhaltensregeln in Powalla et al. 2022 [6] vorgestellt. Die letzten Untersuchungen an der Anlage war das Testen der Ermüdungsfunktion für stromaufwärts gerichtete Wanderung.

3. Hydraulische Anlagen (Abbildung 6 rechte Säule)

Die Hauptanwendung des Modells ist an hydraulischen Anlagen vorgesehen. Es erweist sich allerdings als schwierig geeignete Informationen über hydraulische Anlagen zu bekommen. Nötige Geometriedaten für die Simulation sind meist nicht über die Betreiber sondern nur direkt über die Hersteller zu bekommen. Während der Projektlaufzeit war es möglich den Kontakt zu Pumpen- und Turbinenherstellern aufzubauen und Koopera-

tionen weiter zu vertiefen. Einer dieser Kooperationen, mit dem Pumpenhersteller KSB, erlaubte Untersuchungen für Designoptimierungen mit Hilfe des CFD-DEM-Modells einer fischschonenden axialen Tauchpumpe durchzuführen (siehe auch weiter oben). Mit dem Turbinenhersteller Voith gab es ebenfalls eine Kooperation in der Geometrie- und Simulationsdaten einer S-Kaplan Turbine eines bestehenden Flusswasserkraftwerks bereitgestellt wurden. Vorläufige Simulationen dieser Anlage wurden in einer studentischen Abschlussarbeit durchgeführt in der eine stabile dynamische Berechnung bereitgestellt wurde, die die Grundlage für den Einsatz des CFD-DEM Modells liefert, das aber im Rahmen der studentischen Arbeit nicht mehr abgeschlossen werden konnte.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die numerischen Werkzeuge durch die Implementierung des Schwimmverhalten die realen Passagen von hydraulischen Maschinen besser modellieren können. Das führt zu realistischeren Pfaden durch die Anlage und damit einer besseren Abschätzung von Verletzungsrisiken. Die Werkzeuge sind mit der Anwendung im Fall der fischschonenden Pumpe von KSB in der Praxis angekommen. Dies ist ein großer Erfolg. Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht in der Modellierung der Kollisionsintensitäten. Erste Validierungsarbeiten – anhand von am ISUT generierten Labordaten – zeigen Verzerrungen bei Nutzung der Standardkollisionsmodelle des DEM Solvers.

Durchgeführte Arbeiten – Experimentelle Werkzeuge

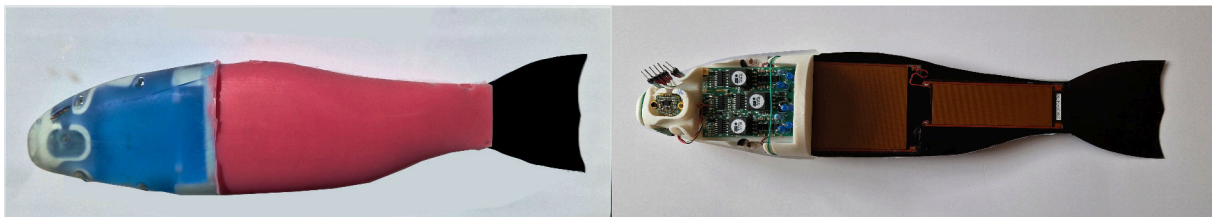


Abbildung 7: eine Version des Roboterfisches mit flexible Körper mit einem Blick in innere Bauteile

Das IESY verantwortete im RETERO Projekt die Entwicklung der aktiven Sonden. Die aktiven Sonden dienen als zweite Säule und der Vervollständigung der Numerik. Im Sinne der 3R Regeln sollen die echte Fische in der gängigen Tierversuchspraxis durch diese Sonden ersetzt werden (Replace) um das Verletzungsrisiko der Tiere in hydraulischen Anlagen zu ermitteln.

Während der erste Projektphase, RETERO I, wurden zwei Sensorsysteme entwickelt:

1. Ein nicht-invasives Biologger-System, so genannte Rucksack-Sensoren, mit einem Gewicht von 3-5 g und einer Größe von $25 \times 14 \times 4 \text{ mm}^3$ (LxHxB) wurde von Taltech entwickelt. Die Sensoren erfassen Druck, lineare Beschleunigung, Drehgeschwindigkeit und magnetische Feldstärke bei 100 Hz. Damit kann das Verletzungs- oder Sterberisiko durch Barotrauma, aber auch durch Kollisionen oder andere Aufprallereignisse bestimmt werden. Sie können auch für die Bewertung von Wasserkraftwerken und für ethohydraulische Studien zum Verhalten bei der Passage von Wasserbauwerken eingesetzt werden.
2. Ein angetriebenes flexibles Sensorsystem oder ein sogenannter Roboterfisch. Für die Untersuchung der Schädigung sollten die Fischersatzsysteme die gleichen oder zumindest ähnliche Eigenschaften wie echte Fische aufweisen, d.h. Größe und Form sollten annähernd mit Fischen vergleichbar sein. Darüber hinaus musste der mit Sensoren ausgestattete Fischersatz einen positiven Auftrieb aufweisen, um nach der Turbinenpassage wieder aufgefunden werden zu können. In Absprache mit IGF wurde eine 370 mm lange Bachforellen inspirierte Form für den Roboterfisch ausgewählt. Das daraufhin entwickelte Design des Roboters besteht aus einem starren, 3D-gedruckten Kopf, gefolgt von einem weichen, beweglichen Teil und einer 100 mm langen passiven Schwanzflosse. Das

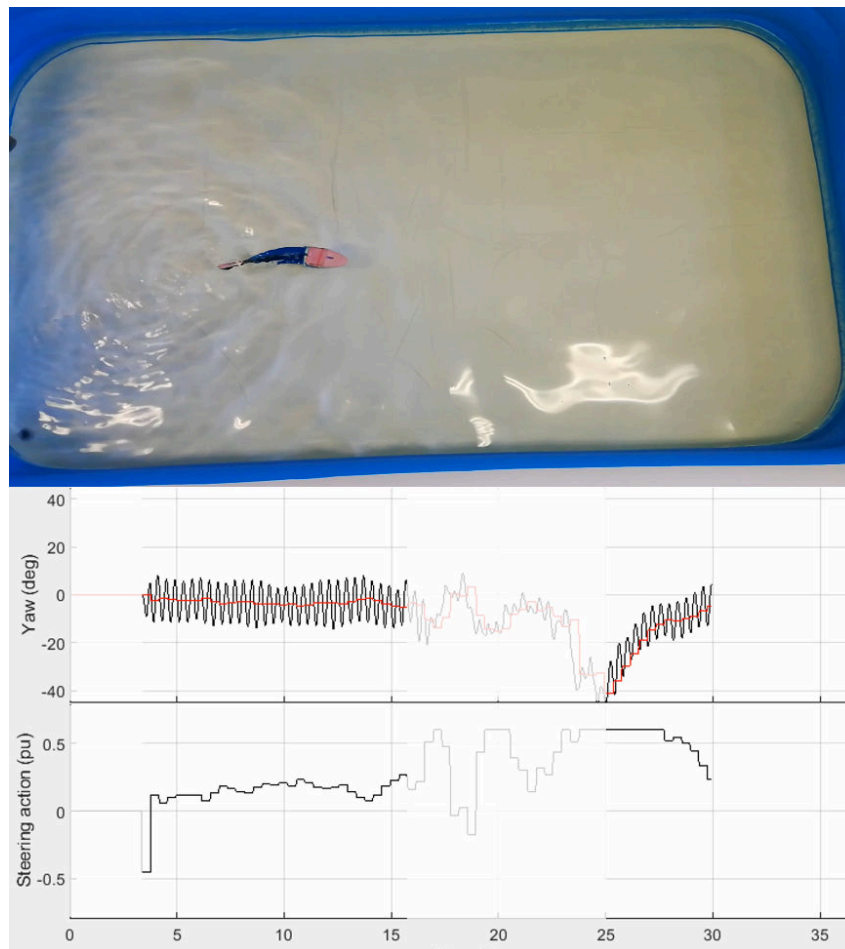


Abbildung 8: Vorbereitungen zur Navigation des Roboterfisches im stehendes Wasser an der OVGU. Oben: Der frei schwimmende Roboterfisch im stehenden Wasser. Unten: Der Roboterfisch richtet sich nach einer absichtlich herbeigeführten Störung in der Strömung wieder neu aus.

Antriebssystem besteht aus zwei Muskeln", die aus sehr leichten, unkonventionellen Aktuatoren bestehen, die unabhängig voneinander gesteuert werden und eine fischähnliche Fortbewegung ermöglichen. Die von der Taltech entwickelten Beschleunigungs-, Druck- und Gyroskopsensoren wurden in den Kopf integriert.

In der zweite Projektphase (RETERO II) beschäftigte sich IESY mit der Weiterentwicklung der aktiven Sonden (Fischroboter) durch Nutzung additiver Fertigungsverfahren um die Fertigung zu verbessern und die Herstellungskosten zu reduzieren. Die größte Herausforderung war es einen flexiblen, leichten und dennoch perfekt wasserdichten Körper herzustellen. In Absprache mit IGF wurden Fischsurrogate aus verschiedenen Materialien mit unterschiedlicher Dichte und Elastizitätsmodulen/Shorehärte getestet um eine vergleichbare Materialcharakteristik zu echten Fischen zu erzielen. Der Widerstand, den ein (weiches) Material gegen Eindrücken aufweist, wird mittels seiner Shore-Härte angegeben. Je niedriger die Shore-Härte ist, desto weicher ist das Material. In den Versuchen wurden Materialien mit Shore-Härten von 4, 8 und 16 getestet. Bei einer Shore-Härte von 8 wurden haptisch die ähnlichsten Ergebnisse erzielt (Abbildung 7).

Diese Material war für die Schlagversuche, die in der Schlagapparat durchgeführt wurden geeignet, zeigt aber keinerlei positive Auftrieb. Um die Navigationstests durchzuführen wurde deshalb mit einem weiteren Material mit selbstheilenden Eigenschaften und einem positiven Auftrieb gearbeitet. Es ist außerdem durch die selbstheilenden Eigenschaften möglich, die Elektrische Bauteile und Aktoren innerhalb des Kopfs und des Körpers zu reparieren und gegebenenfalls zu ersetzen, was zuvor nicht möglich war.

Eine weitere Aufgabe war die Umsetzung der Navigationsfähigkeit (rheotaktische Ausrichtung beim Schwimmen). Durch den integrierten IMU Sensoren im Kopf des Roboterfisches kann die Ausrichtung bestimmt werden. Eine Schwierigkeit ist das Driften des Roboters über die Zeit, da sich Abweichungen und Ungenauigkeiten, z.B. durch die Diskretisierung der Daten über die Zeit akkumulieren. Um den Fehler zu minimieren wurden zwei IMU parallel ausgewertet und Oversampling genutzt.

Nach Implementierung der Navigationsalgorithmen wurden zunächst Versuche in stehendem Wasser an der OVGU durchgeführt. Hier konnte gezeigt werden, dass der Roboter auf Störungen reagiert und sich verlässlich wieder in die gewünschte Position ausrichtet (siehe Abb. 8). Die Fähigkeit zur Rheotaxis kann daher bis zur Überschreitung der Schwimmkapazitäten des Roboters aufrecht erhalten werden.

Nach der erfolgreichen Kalibrierung in stehendem Wasser wurde der Roboterfisch im Strömungskanal des IWD in Dresden eingesetzt. Auch hier konnte der Roboter sich rheotaktisch ausrichten und aktiv gegen die Strömung anschwimmen. Es wurden erste Daten unter anderem per 3D Videotracking aufgenommen (Abbildung 9). Eine weitere interessante Option ist die Verwendung des Roboters zur Erweiterung ethohydraulischer Untersuchungen. Durch gezieltes Anschwimmen der Triggerpositionen an denen es zu Verhaltensänderungen bei echten Fischen kam, kann so zielgerichtet das Strömungsfeld vermessen werden. Der Roboterfisch kann daher durch Nachahmung von relevantem Fischverhalten zur Verhaltensforschung und zur Untersuchung des Wahrnehmungsraums von Fischen eingesetzt werden.

Zusätzlich wurden von der Taltech künstliche Seitenlinienorgane entwickelt. Diese bestehen

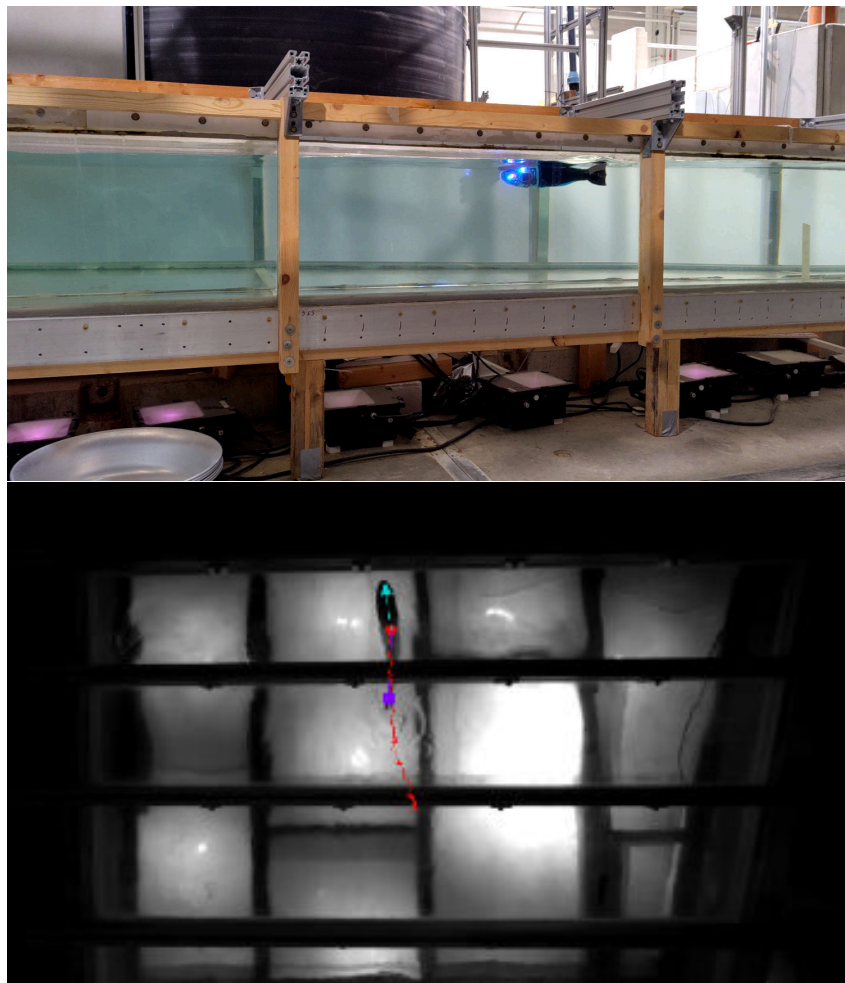


Abbildung 9: Oben: Gegen die Strömung schwimmender Roboterfisch (IESY) mit positiver Rheotaxis in der Versuchsrinne im IWD. Unten: Getrackter Pfad des gegen die Strömung schwimmenden Roboterfisches

aus einer Anordnung von hochdynamischen Drucksensoren, die über einem I2C-Bus mit dem Mikrocontroller verbunden sind (Abbildung 10). Die Sensoren dienen dazu, bei Bedarf die Rheotaxis von IMU-Referenzen unabhängig zu machen. Außerdem können sie später zur Untersuchung des Wahrnehmungsraums der Fische eingesetzt werden. Die weiteren Forschungen in diesem Bereich werden als Nachfolge des RETERO Projekts vorbereitet und weiter entwickelt.

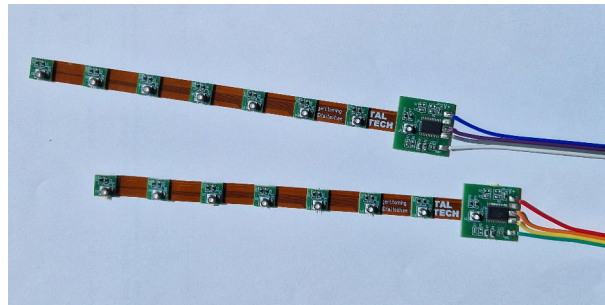


Abbildung 10: Entwicklung und Integration eines Seitenlinienorgans auf flexiblen PCBs

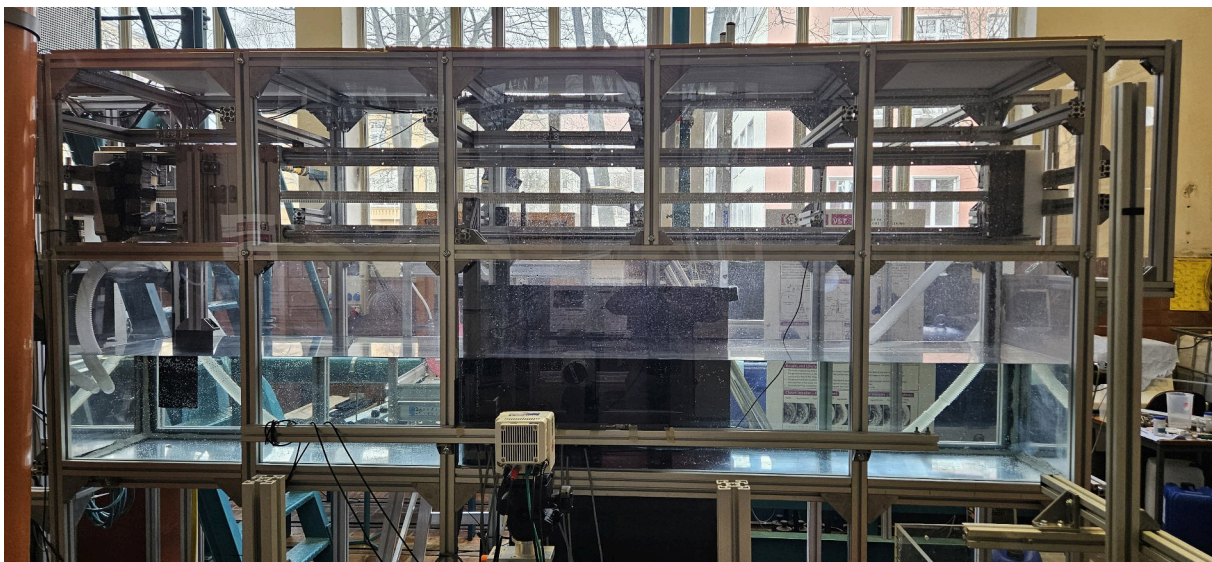


Abbildung 11: Blattkollisionssimulator an der OvGU

Ein weiteres Ziel des Projektes war die Korrelation realer Schädigungen an Fischen mit den aus Simulationen und Experimenten gewonnenen Sensordaten. Diese sollte durch ein Modell erfolgen, das auf breit angelegten Schlagversuchen mit Fischesurrogaten (Silikonkörper verschiedener äquivalenter Steifigkeit zu der von Fischen) und auf Fischrobotern fußt. Das Modell wurde anhand von veröffentlichten Schlagversuchsdaten mit identischem Versuchsaufbau entwickelt, die in der Vergangenheit an anästhesierten Lebendfischen durch die PNNL (USA) vorgenommen wurden. Für diese Zweck wurde in der ersten Projektphase ein Schlagversuchsstand konzipiert. Dieser bewegt die Nachbildung der Anströmkannte eines Turbinenblattes, welches mit definierter Geschwindigkeit und Position auf den Fischesurrogaten einschlägt. Der Schlagversuchsstand wurde in der zweiten Phase erweitert und seine Sicherheitsprinzipien verbessert.

Dazu wurde der Schläger vollständig eingehaust und mit Sicherheitsabschaltmechanismen ausgestattet, um jegliches Verletzungsrisiko für die Nutzer:innen zu verhindern. Im Rahmen einer Masterarbeit wurden darüber hinaus umfassende experimentelle Protokolle entwickelt, um die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Experimente zu gewährleisten. Die Durchführungs- und Auswertungsprotokolle werden nun veröffentlicht und als neues

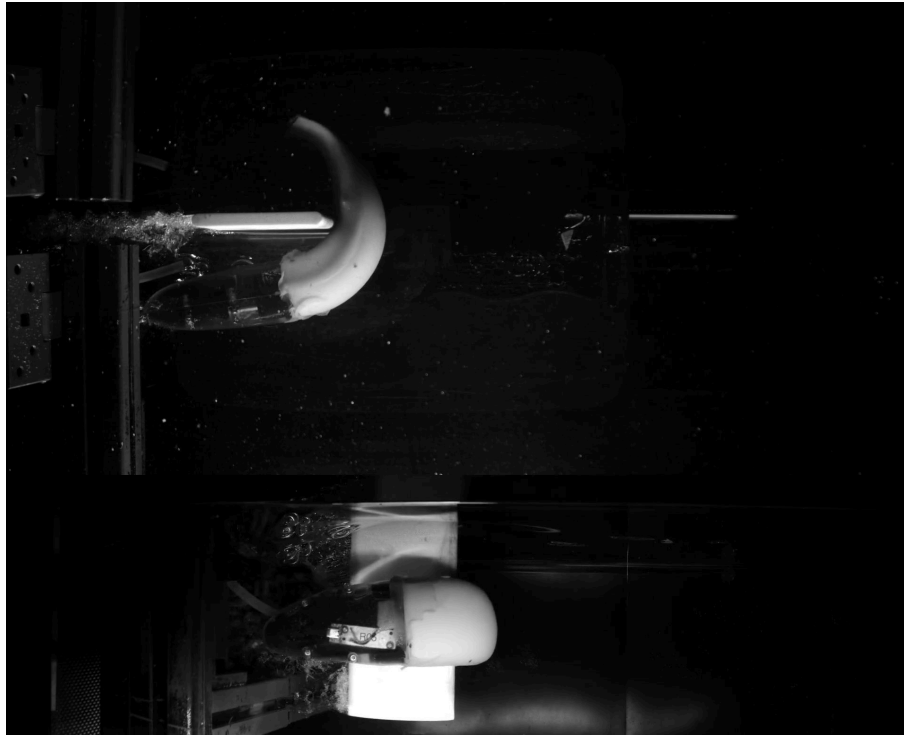


Abbildung 12: Durchführung der Schlagversuche an den flexiblen Fischersatzkörper an der OVGU

Standardverfahren vorgeschlagen.

Zur Korrelation von Messungen an (passiven sowie aktiven) Sensoren zu realen Schädigungen mussten die Beschleunigungen für die Referenzschlagversuche mit echten Fischen aus der Literatur bestimmt werden. Dazu wurden von der Taltech hoch dynamische Sensoren mit hoher Abtastrate sowie mit integrierter Datenspeicherung entwickelt. Diese wurden sowohl als harte BDS-Sensoren als auch als integrierte Sensoren in flexible Körpern mit vorbestimmte Shore-Härte integriert und nach vordefinierte Protokollen mit verschiedene Schlaggeschwindigkeiten zwischen 1 bis 10 m/s in Blattkollisionssimulator geschlagen um die auf den Sensoren wirkenden Beschleunigungen und Druckänderungen aufzunehmen (Siehe Abbildung 12).

Für die bisherige Bewertung der Verletzungswahrscheinlichkeit nach einer Kollision mit einer Turbinenschaufel wurde das sogenannte 95 g-Kriterium als Stand der Technik durch Arbeiten an der PNLL in den USA etabliert. Dieses Kriterium beschreibt eine Unterscheidung zwischen einer Scherströmung und einer Kollision. Dabei liegt 70% des Spitzenwertes der Beschleunigungsmagnitude entweder innerhalb eines 7,5 ms-Intervalls (Kollision) oder außerhalb (Scherströmung). Diese Annahme fußt auf empirischen Untersuchungen, die auf Versuchsdaten mit dem an den PNLL entwickelten Sensorsystem ATS800 basieren [7].

Eine Verletzungswahrscheinlichkeit wird aus dem Spitzenwert der Beschleunigungsmagnitude abgelesen (25 bis 50 g: gering, 50 bis 95 g: mittel, > 95 g: hoch). Dieser Zusammenhang wurde über Versuche mit Scherströmungen validiert, allerdings nicht für Kollisionen [8], dennoch wird es seit langem für diesen Zweck verwendet [9, 10, 11, 12].

Um eine Validierung der Hypothese nachzuholen, dass gleiche Beschleunigungen aufgrund von Scherströmungen ähnliche Verletzungsmuster hervorrufen, wie Kollisionen mit einem harten Sensorkörper und einer Turbinenschaufel, wurden zunächst Schlagversuche mit dem RAPID Sensor der TalTech Universität durchgeführt. Da es nach der Hypothese keinen spezifischen Sensortyp erfordert, sollten theoretisch die gleichen Grenzwerte auch auf für diesen Sensor gültig sein. Ziel der Versuche war es, das 95 g-Kriterium zu validieren und dessen Unsicherheit bei der Vorhersage von Schlagverletzungen zu bestimmen. Dies beinhaltete eine Untersuchung der Wiederholbarkeit des Spitzenwertes der Beschleunigungsmagnitude unter denselben Eingangsbedingungen bei einem Schlag. Zusätzlich wurde ein zweites Set

con Sensorsystemen, die Barotrauma Detection System (BDS) Sensoren mit demselben Protokoll untersucht, um den Einfluss des Sensors auf die Schlagdynamik zu untersuchen. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit mit den Lebendtierversuchen der Oak Ridge National Laboratories (ORNL, USA) [13] wurde deren Sensorhalterung übernommen. Der Sensor wurde mittig geschlagen, was in den Fischversuchen zur höchsten Mortalität führte. Um den Einfluss einer unterschiedlichen Steifigkeit des Sensors durch die interne Orientierung der PCB auszuschließen, wurde die Rotation des RAPID-Sensors verhindert. Nach einigen Vorversuchen und basierend auf den vorhandenen Erfahrungen mit dem Sensor wurde die Stichprobengröße mit Hilfe einer Trennschärfeanalyse auf 30 festgelegt. Die Schlaggeschwindigkeit begann bei 1 m/s und wurde in ganzen Schritten so lange erhöht, bis alle vorhandenen Sensoren durch die Schläge zerstört waren. Die Ergebnisse der Versuche sind in Abbildung 13 für BDS und RAPID Sensoren dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Beschleunigungssensor ab 4 m/s in Sättigung geht, was zu einem nahezu konstanten Mittelwert des Spitzenwertes führt. Eine Verminderte Aussagekraft der Messwerte durch eine mögliche vollständige Sättigung einer Achse tritt bereits bei 2 m/s für beide Sensoren auf. Dies ist auf die harte Bauweise zurückzuführen, bei der Kollisionen zu sehr kurzen und sehr hohen Beschleunigungswerten führen. Da eine erhöhte Mortalitätswahrscheinlichkeit für die meisten getesteten Fischarten erst bei dieser Schlaggeschwindigkeit auftritt [14], ist eine Bewertung des Mortaliätsrisikos mit diesen Sensoren und dem 95 g-Kriterium für die getesteten Fischarten nicht möglich.

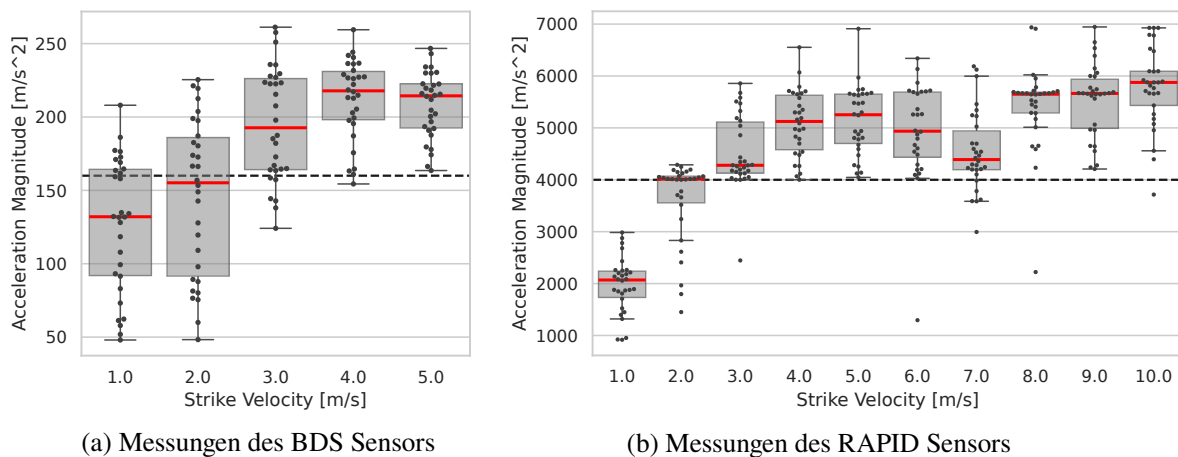


Abbildung 13: Verteilung der Spitzenwerte der Beschleunigungsmagnitude im untersuchten Bereich für jeweils 30 Versuche. Die roten Linien stellen den Median dar, während das Kästchen den Interquartilsabstand enthält, der mit 1,5 skaliert ist. Die Punkte stellen einzelne Messungen dar und die Strichlinie zeigt den Sättigungswert einer Achse des jeweiligen Beschleunigungssensors an. Falls die Schlagrichtung gleich der Achsausrichtung des Beschleunigungssensors ist, wird in beiden Fällen bereits bei Schlaggeschwindigkeiten über 2 m/s gesättigt.

Abbildung 14 zeigt den Verlauf des Medians der Beschleunigungsamplituden bei Schlägen zwischen 1 und 9 m/s für den RAPID-Sensor. Bei jedem Schlagversuch konnten mehrere Kollisionen kurz hintereinander aufgezeichnet werden. Um die Bewegungsverläufe und Verformungen der Fischsurrogate während des Schlagereignisses zu untersuchen und um sicherzustellen, dass die Beschleunigungswerte die Kollision mit dem Turbinenblatt repräsentieren und nicht andere unerwünschte Effekte wie Kollisionen mit der Halterung, wurden zwei Hochgeschwindigkeitskameras eingesetzt. Die Videoaufnahmen wurden anschließend numerisch verarbeitet, um eine 3D-Trajektorie und die Ausrichtung des Fisches zu bestimmen. Kollisionen mit Fremdobjekten konnten ausgeschlossen werden, siehe Abbildung 15. Auffällig sind hier drei kurz hintereinander auftretende Schlagereignisse, deren Abstand mit steigender Schlaggeschwindigkeit zunimmt. Es handelt sich um elastische Kollisionen zwischen dem Blatt und dem Sensor. Die Verringerung des Abstands ist auf den quadratisch zunehmenden

Wasserwiderstand zurückzuführen, der die lineare Impulsübertragung übersteigt. Deshalb wird der Sensor bei höheren Geschwindigkeiten schneller von dem Blatt eingeholt. Basierend auf Schlagversuchen mit RAPID- und BDS-Sensoren wurde die Reproduzierbarkeit des Spitzenwerts der Beschleunigungsmagnitude über alle Schlaggeschwindigkeiten hinweg untersucht. Hierfür wurde die Bland-Altman-Methode ausgewählt, welche zur Bewertung der Übereinstimmung zwischen zwei verschiedenen Messmethoden eingesetzt wird. In diesem Fall wurden jedoch die Einzelverläufe mit dem Mittelwert einer bestimmten Schlaggeschwindigkeit verglichen. Hierbei wird der Mittelwert der beiden Messungen gegen ihre Differenz in einem Streudiagramm aufgetragen. Diese Darstellungsweise hat den Vorteil, dass systematische Messfehler leicht erkannt werden können. Zudem wird eine mögliche Veränderung der Varianz in Abhängigkeit von der Höhe des Messwertes sichtbar.

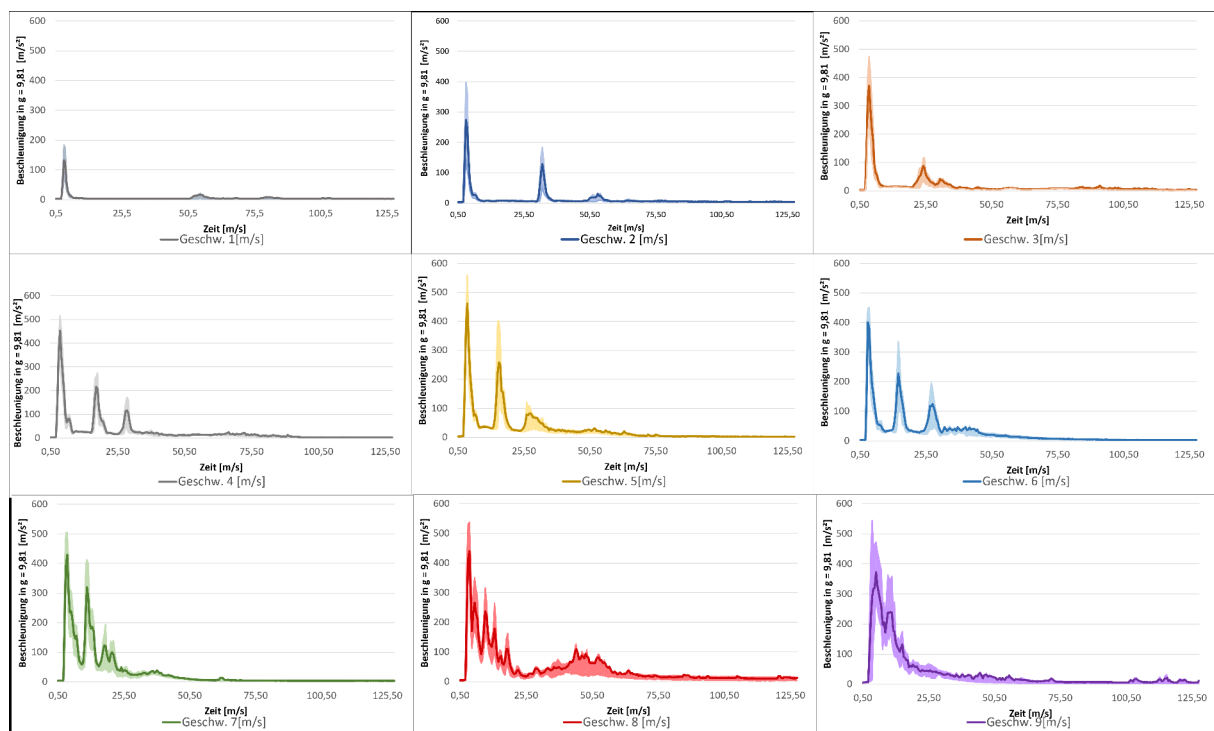


Abbildung 14: Verläufe des Medians der Beschleunigungsmagnitude bei Schlägen zwischen 1 bis 9 m/s für den RAPID Sensor. Die getönte Fläche zeigt die Minimal- und Maximalwerte. Entnommen aus [15].

Abbildung 16 zeigt eine unerwartet hohe Reproduzierbarkeit der Messwerte und keine systematischen Fehler. Ein ähnliches Verhalten ist auch bei der Darstellung von jeweils drei Trajektorien zwischen 1 bis 9 m/s zu beobachten. Die Trajektorien liegen praktisch übereinander und divergieren erst mit zunehmender Schlaggeschwindigkeit (siehe Abbildung 17). Daraus ist abzuleiten, dass eine Bewertung der Schlaggeschwindigkeit mit der derzeitigen Methode und Sensorik zwar nicht möglich ist, jedoch mit angepasster Methode oder verbesserter Sensorik realisiert werden könnte.

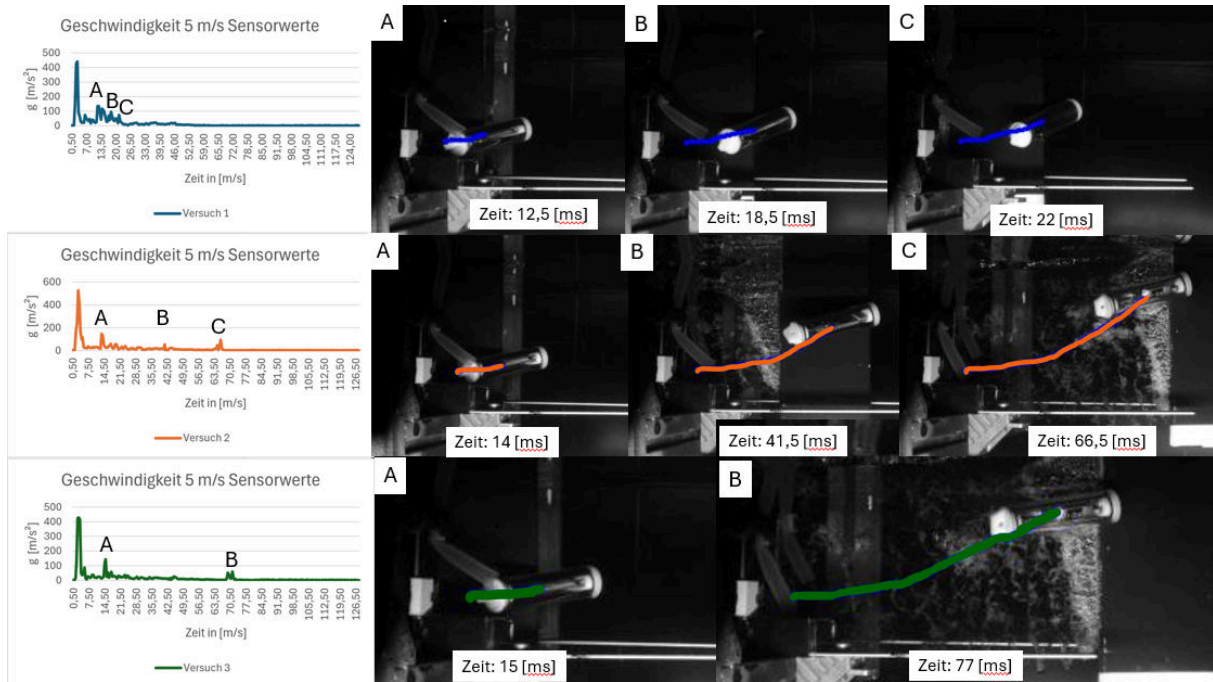


Abbildung 15: Halbautomatisch generierte Trajektorien des RAPID Sensor bei Schlaggeschwindigkeit von 5 m/s. Die weiteren Spitzenwerte stellen Kollisionen mit dem Turbinenblatt dar. Entnommen aus [15].

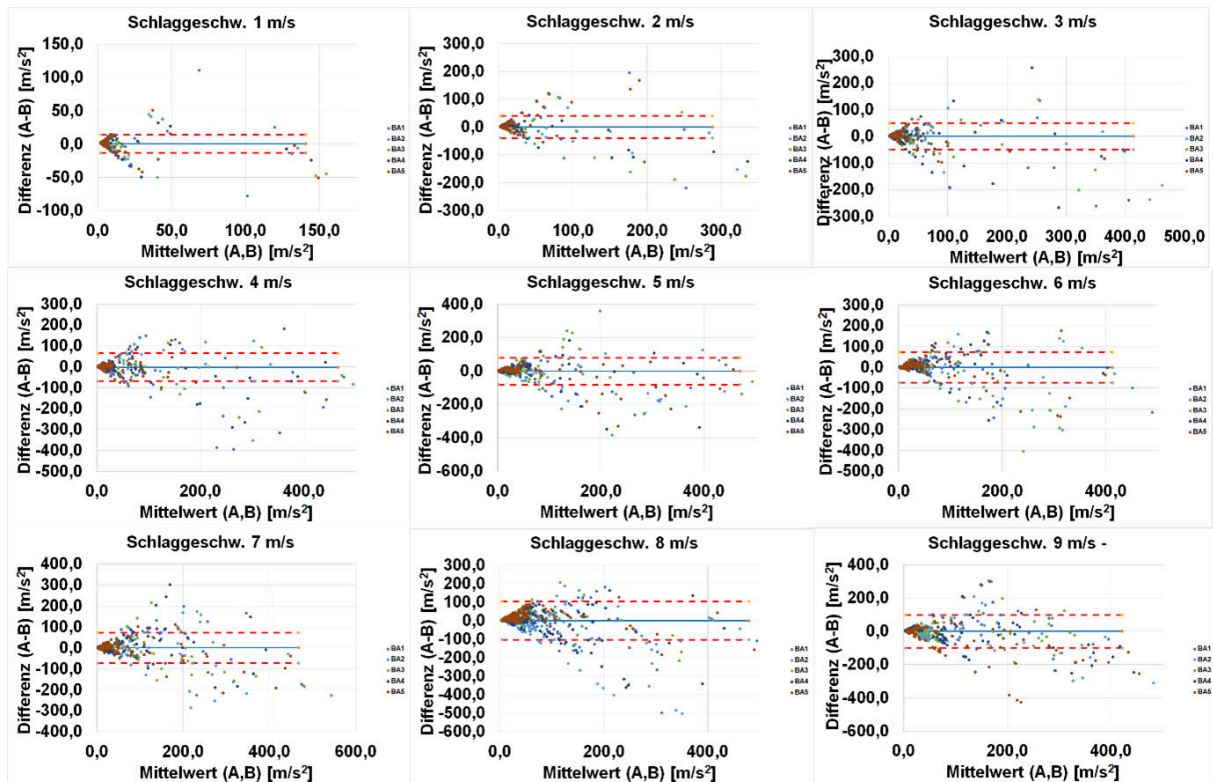


Abbildung 16: Auftragung nach Bland-Altman für einen Vergleich der Beschleunigungsmagnituden von jeweils 5 Versuchen, mit dem Mittelwert aller Beschleunigungsverläufe, ein Zeitschritt wird durch einen Punkt dargestellt. Für die Annahme einer Normalverteilung der Punkte ist eine rote Strichlinie für die Grenze einer 95 % Standardabweichung eingezeichnet. Es zeigt sich, dass kein systematischer Fehler auftritt. Die Wiederholbarkeit ist erstaunlich hoch, nimmt aber mit steigender Schlaggeschwindigkeit ab. Entnommen aus [15].

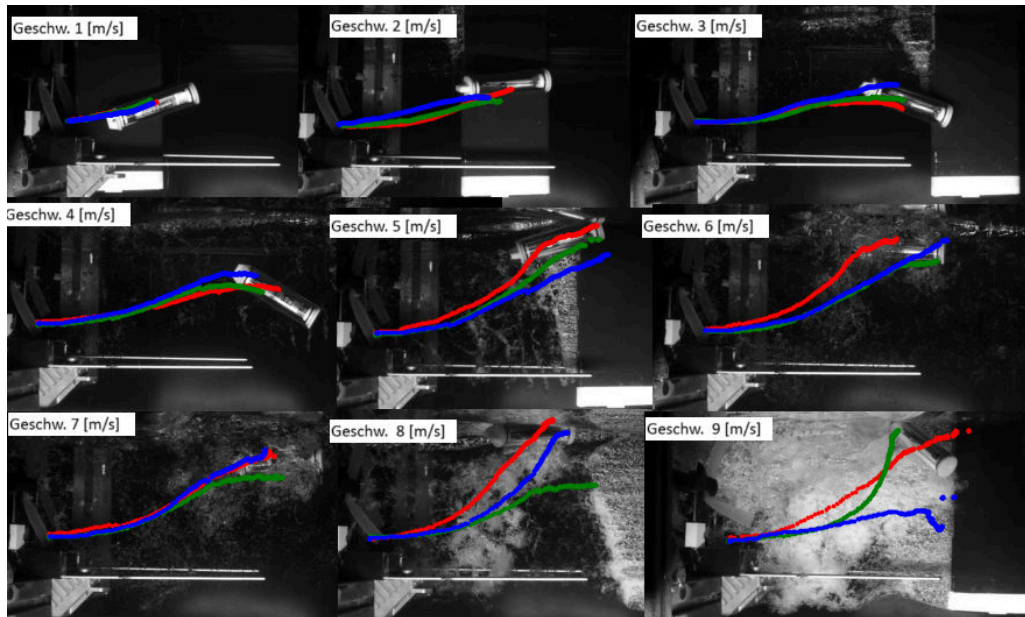


Abbildung 17: Zusammengesetztes Bild aus Momentaufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera bei Geschwindigkeiten von 1 bis 9 m/s. Die Einzelbilder enthalten Trajektorien des Kinovea-Programms mit Messungen von jeweils drei Versuchen auf Mittelpunkt der Sonde. Entnommen aus [15].

Eine Kollision zwischen steifem Blatt und harten Sensoren ist sehr kurz und führt schnell zu Beschleunigungen in einer sehr hohen Größenordnung von mehreren hundert g. Aus diesen Grund wurde die Möglichkeit untersucht, bestehende Sensoren in einen weichen Körper zu integrieren, um den Beschleunigungsverlauf des Körpers durch die Körperdeformation, wie in einem echten Fisch, zu verzögern und damit die Datenlage zu verbessern. Hierfür wurde die Platine des RAPID-Sensors ohne Polycarbonatröhre in einem flexiblen Roboterfisch ähnlichem Körper untergebracht. Um die Platine zu schützen, wurde sie in einen Kopf aus 3D-gedrucktem Polycarbonat eingebettet. Sie wurde dann mit dem zuvor genannten selbstheilenden Material vergossen, um sie vor Wasser zu schützen. Zum Auslesen der Daten wurden die USB-Kontakte an die Außenseite des Kopfes geführt. Wie erwartet reduzierte dies die Spitzenwerte der Beschleunigungsamplituden und verlängerte die Messzeit, wie in Abbildung 18 sichtbar wird.

3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für das Teilvorhaben wurden finanzielle Mittel in Höhe von 582.989,87 € (inklusive Projektpauschale) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) zur Verfügung gestellt. Die Aufteilung der einzelnen Ausgabearten lassen sich dem zahlenmäßigen Nachweis entnehmen. Für die Laufzeit vom 01.04.2022 - 30.09.2024 wurden zwei wissenschaftliche Mitarbeiter in Vollzeit sowie eine 16-monatige Teilzeitstelle und mehrere wissenschaftliche Hilfskräfte finanziert. Eine weitere große Position der Ausgaben war die Entwicklung und Sonderanfertigung der Spezielsensorik für die Roboterfische, die von der Tallinn University of Technology hergestellt wurde.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Alle im Projekt geleisteten Arbeiten waren zur Erreichung des Ziels, der Entwicklung von Alternativmethoden zum Tierversuch in der Bewertung des Verletzungsrisikos von Fischen bei Tur-

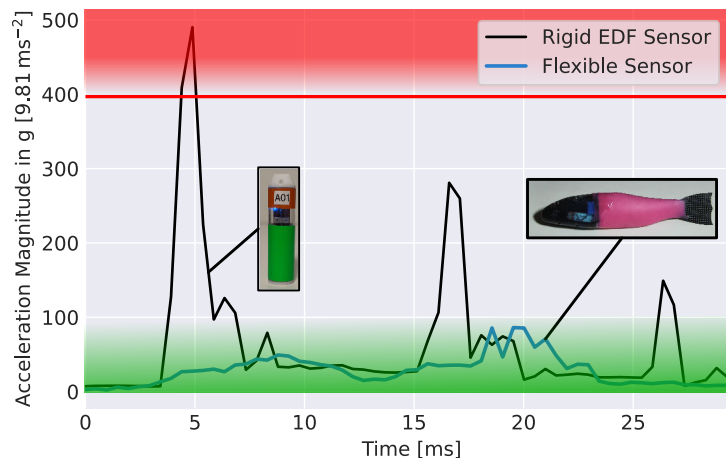


Abbildung 18: Vergleich der Beschleunigungsmagnitude zwischen einem RAPID Sensor und einer RAPID Platine in einem flexiblen Sensor. Die rote Linie bei 400 g stellt den Sättigungsgrenzwert für eine Achse dar, höhere Werte kommen durch die Überlagerung mehrerer Achsen in der Magnitude zustande (Diagramm aus Habilitation Hoerner 2024).

binenpassagen notwendig. Aufgrund der Heterogenität der Aufgaben und der Beteiligung zweier Institute waren zwei volle Stellen notwendig, die mit Promovierenden besetzt wurden. Die im Projekt eingestellten Wissenschaftlichen Hilfskräfte waren zu ihrer Unterstützung ebenfalls notwendig. Eine weitere kurzzeitige Stelle zur Unterstützung des Roboterdesigns durch einen Maschinenbauingenieur wurden durch Mittelumwidmungen und Haushaltsmittel realisiert.

5 Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Entwicklung der numerischen Methoden ist so weit fortgeschritten, dass eine erfolgreiche Nutzung in einem industriellen Umfeld möglich ist, sobald eine Validierung anhand Feldstudien stattgefunden hat. Diese finden derzeit im Rahmen von durch die Industrie finanzierten Studien statt. Der Roboterfisch hat ebenfalls ein hohes Maß an Aufmerksamkeit erzielt und wird zukünftig insbesondere in Ethohydraulischen Studien eingesetzt werden. Derzeit werden in einem vom DBU finanzierten Projekt flexible Sensoren entwickelt, die die herkömmlichen Sensoren ersetzen sollen, da sie eine Klassifizierung der Kollisionen erlauben. Die Rucksackensensoren der Taltech werden mittlerweile weltweit in Ethohydraulischen Studien eingesetzt und haben im Sinne der 3R zu einer Verfeinerung der Methoden beigetragen.

6 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Nicht bekannt

7 Die Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Artikel in begutachteten Zeitschriften:

1. S. Abbaszadeh, S. Hoerner, R. Leidhold: Experimental optimization of a fish robot's swimming modes: a complex multiphysical problem. *J. Experiments in Fluids*. 65, (2024)
2. S. Abbaszadeh, Y. Kiiski, R. Leidhold, S. Hoerner: On the influence of head motion on the swimming kinematics of robotic fish. *J. Bioinspiration & Biomimetics*. 18, (2023)

3. S. Abbaszadeh, R. Leidhold, S. Hoerner: A Design Concept and Kinematic Model for a Soft Aquatic Robot with Complex Bio-mimicking Motion. *J. Bionic Engineering*. (2022)
4. O. Cleynen, D. Powalla, S. Hoerner, D. Thévenin: An efficient method for computing the power potential of bypass hydropower installations. *Energies* 15, (2022) 3228/1-13.
5. A.H. Khan, S. Hoerner, G. Toming, M. Kruusmaa, J.A. Tuhtan: 3D CFD analysis of pressure, boundary layer and shear stresses on a gudgeon (*Gobio gobio*). *Journal of Ecohydraulics*, 1–15 (2024).
6. A.H. Khan, K. Ruiz Hussmann, D. Powalla, S. Hoerner, M. Kruusmaa, J.A. Tuhtan: An open 3D CFD model for the investigation of flow environments experienced by freshwater fish. *Ecol. Inform.* 69, (2022) 101652.
7. W.I. Kösters, J.A. Tuhtan, D. Efimov, M. Kruusmaa, S. Hoerner: An Open Laboratory Blade Strike Rig to Evaluate the Risk of Injury and Mortality to Fish and to Test Passive Sensors, (in Begutachtung).
8. D. Powalla, S. Hoerner, O. Cleynen, D. Thévenin: A numerical approach for active fish behaviour modelling with a view toward hydropower plant assessment. *Renew. Energ.* 188, (2022) 957-966.
9. D. Powalla, S. Hoerner, O. Cleynen, N. Müller, J. Stamm, D. Thévenin: A Computational Fluid Dynamics model for a Water Vortex Power Plant as platform for etho- and ecohydraulic research. *Energies* 14, (2021) 639/1-14.
10. M.S. Roth, F. Wagner, T. Rossgger, I. Kopecki, D. Powalla, J. Stamm: An Experimental Approach for the Quantitative Assessment of Downstream Swimming Fish Behavior. *J. River Research and Applications* (2024)

Konferenzbeiträge:

11. S. Abbaszadeh, G. Toming, J.A. Tuhtan, R. Leifhold, S. Hoerner: A robotic fish-mimicking device for ecohydraulic research, In: 40th IAHR World Congress (2023), Vienna, Austria
12. S. Abbaszadeh, G. Toming, J.A. Tuhtan, R. Leidhold, S. Hoerner: Bio-inspired robotic fish for assessment of injury risks during the fish passage. In: 15th International Symposium on Ecohydraulics and Fish Passage, Quebec, 2024
13. I. Abdelghafar, J. Bolland, D. Thévenin, P. Rubini, R. Wright, S. Hoerner: On the numerical methods for tracking a European eel motion in a closed-conduit system. In: 10th International Symposium on Hydraulic Structures, Zurich, Switzerland, June, 2024
14. S. Hoerner, W.I. Koesters, S. Abbaszadeh, F. Wagner, J.A. Tuhtan: Towards a reliable and validated toolbox to replace live fish tests for the assessment of injury and mortality during downstream passage. In: 15th International Symposium on Ecohydraulics and Fish Passage, Quebec, 2024
15. S. Hoerner, E. Kerikous, D. Powalla, F., Wagner, M. Lebkücher, A. Disterhof, D. Thévenin: Critical areas for fish passage in large axial flow pumps, In: 40th IAHR World Congress (2023), Vienna, Austria
16. S. Hoerner, S. Abbaszadeh, A. Busch, I. Kopecki, R. Leidhold, N. Müller, D. Powalla, T. Rössger, M.S. Roth, M. Schneider, J. Stamm, D. Thévenin, G. Toming, J.A. Tuhtan, F. Wagner, P. Warth: The RETERO project: 3R motivated risk assessment methods for downstream fish passage through hydraulic structures. In: 14th International Symposium on Ecohydraulics, Nanjing, China, 2022.

17. W.I. Kösters, S. Hoerner, J.A. Tuhtan: Development of a blade-strike apparatus for fish-surrogate sensor probes, In: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research IAHR (2023)
18. I. Kopecki, J.A. Tuhtan, F. Wagner, T. Roessger, T. Hägele, M. Schneider, S. Hoerner: Estimating fish swimming speed using non-invasive backpack sensors in a laboratory flume at high flow velocities, In: 15th International Symposium on Ecohydraulics and Fish Passage (2024), Quebec, Canada
19. I. Kopecki, F. Wagner, S. Hoerner: Quantifying fish response to extreme hydraulic conditions during downstream passage. In: IAHR 10th International Symposium on Hydraulic Structures, ETH Zurich, Jun 2024, Zurich, Switzerland.
20. D. Powalla, E. Kerikous, S. Hoerner: Einführung von Erschöpfung und Schwimmkapazität von Fischen in Schädigungsrisikomodellen durch CFD-DEM-Kopplung. In: 47. Dresdner Wasserbaukolloquium 2024 - Von der Technischen Hydromechanik zu Environmental Fluid Dynamics Dresden, 2024
21. D. Powalla, S. Hoerner, D. Thévenin: Upstream Migration and Fish Passage using active CFD-DEM models, In: 40th IAHR World Congress (2023), Vienna, Austria
22. D. Powalla, S. Hoerner, D. Thévenin: Numerical assessment of fish injury risk combining agent-based fish behavior with turbine blade-strike detection. In: Fish Passage 2022: International Conference on River Connectivity, Richland, USA, 2022.
23. D. Powalla, R. Saha, S. Hoerner, D. Thévenin: Fish injury assessment of a hydropower facility bypass, In: 18th Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'22), Budapest, Hungary, 2022
24. D. Powalla, S. Abbaszadeh, K. Ruiz, S. Hoerner, D. Thévenin: Near-body flow field measurements on a fish robot, 9th International Symposium on Environmental Hydraulics, Seoul, July 2021.
25. F. Wagner und S. Hoerner: Go with the flow, oder was tut der Fisch wenn es gleich rund geht, SVK Sachverständigentagung Fischereiwesen, (2025) Fulda
26. F. Wagner, S. Hoerner, J.A. Tuhtan, S. Abbaszadeh, A. Busch, W.I. Kösters, I. Kopecki, R. Leidhold, D. Powalla, T. Roessger, M.S. Salgueiro-Roth, M. Schneider, J. Stamm, G. Toming: Risk assessment for fish passing turbines, pumps and hydraulic structures – New methods and a methodological framework, In: Free-flow conference Groningen, (2024), Groningen, Netherlands
27. F. Wagner, T. Rossgger, S. Hoerner, I. Kopecki, J. Elings, D. Powalla, M.S. Roth, J. Stamm: Fischverhalten in Turbinen und Pumpen – Ergebnisse ethohydraulischer Modellversuche. In: 47. Dresdner Wasserbaukolloquium 2024 - Von der Technischen Hydromechanik zu Environmental Fluid Dynamics Dresden, 2024
28. F. Wagner, A. Busch, D. Buysse, S. Hoerner, M. Kenndorf, D. Pauwels, T. Rößger, M. Roth, M. Schletterer, J. Stamm, G. Toming, J.A. Tuhtan: A new, non-invasive fish backpack biogger to measure the physical conditions experienced by swimming fish during downstream passage. In: Fish Passage 2022: International Conference on River Connectivity, Richland, USA, 2022.

Wissenschaftskommunikation:

29. Wegweiser Tierversuchsfreie Wissenschaft von Deutscher Tierschutzbund, „Alternative Verfahren statt Tierversuche“, 18.09.2024

30. SWR Wissen, „Roboterfische sollen Tierversuche mit echten Fischen ersetzen“, 16.05.2024
31. Deutschlandfunk– Forschung aktuell, „Todesfalle Wasserkraftwerk: Tierversuche mithilfe von Roboterfischen vermeiden“, 08.05.2024
32. MDR, „Streit um Energiesicherheit: Keine Förderung für kleine Wasserkraftwerke“, 28.06.2022

Studentische Abschlussarbeiten und Praktika:

33. N. Aubague, Experimentation of collision events between turbomachinery blades and fish, Pflichtpraktikum der Universität Grenoble
34. F. Aust, Auslegung und Konstruktion einer Verstärkerplatine mit hohem Rauschabstand, Forschungsprojekt
35. D. Efimov, Experimental calibration of sensor data for collision events between turbomachinery blades and fish, Masterarbeit
36. L. Fischer, Numerische Darstellung einer Kaplan turbine in einem Flusswasserkraftwerk, Masterarbeit
37. P. Heise, Auslegung und Konstruktion eines Antriebssystems eines aquatischen Roboters, Bachelorarbeit
38. S. B. Iqbal, Comparison and validation of virtual sensor probes based on CFD-DEM simulations with sensor data gained by laboratory experiments, Masterarbeit
39. Y. Kiiski, Design eines flexiblen Unterwasserroboters mit Fokus auf additiven Fertigungsverfahren, Bachelorarbeit
40. E. Koch, Analyse von Kollisionereignissen zwischen Fischersatzsystemen und Turbinenblättern anhand der Daten eines Kollisionsversuchsstands, Masterarbeit
41. W. I. Kösters, Experimental setup for the calibration of collision events between turbomachinery blades and fish, Masterarbeit

abgeschlossene Dissertationen und Habilitationen mit Projektbezug:

42. S. Hoerner, Sustainability Aspects on Hydraulic Machines, Habilitation
43. S. Abbaszadeh, Experimentelle Optimierungsmethoden für aktuierte Systeme mit komplexen Fluid-Struktur Wechselwirkungen, Dissertation

noch laufende Dissertationen mit Projektbezug:

44. D. Powalla, Viruelle Fische als Ersatzverfahren zum Tierversuch in hydraulischen Maschinen und Installationen, Disseration (vorausichtlicher Abschluss 10/25)
45. W. I. Kösters, Standardisierte Verfahren zur Validierung von Sensorsystemen zur Analyse von Unterwasserkollisionen elastischer und unelastischer Körper. Dissertation (vorausichtlicher Abschluss 10/25)

Literatur

- [1] S. Hoerner u. a. “Towards a reliable and validated toolbox to replace live fish tests for the assessment of injury and mortality during downstream passage”. In: Mai 2024.
- [2] W. M. S. Russell und R. L. Burch. “The Principles of Humane Experimental Technique”. In: *Medical Journal of Australia* 1.13 (1960), S. 500–500. DOI: <https://doi.org/10.5694/j.1326-5377.1960.tb73127.x>.
- [3] G. Ebel. “Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen: Handbuch Rechen- und Bypasssysteme”. In: *BGF, Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel* 4 (2013).
- [4] D. Powalla u.a. “Upstream Migration and Fish Passage using active CFD-DEM models”. In: *40th IAHR World Congress (Vienna). Rivers – Connecting Mountains and Coasts*. Aug. 2023.
- [5] D. Powalla u. a. “A Computational Fluid Dynamics Model for a Water Vortex Power Plant as Platform for Etho- and Ecohydraulic Research”. In: *Energies* 14.3 (2021). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en14030639.
- [6] D. Powalla u. a. “A numerical approach for active fish behaviour modelling with a view toward hydropower plant assessment”. In: *Renewable Energy* 188 (Feb. 2022). DOI: 10.1016/j.renene.2022.02.064.
- [7] Z. D. Deng u. a. “Use of an autonomous sensor to evaluate the biological performance of the advanced turbine at Wanapum Dam”. In: *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2.5 (2010). ISSN: 1941-7012. DOI: 10.1063/1.3501336. URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.3501336> (besucht am 11.03.2021).
- [8] Z. D. Deng u. a. “Evaluation of fish-injury mechanisms during exposure to turbulent shear flow”. In: *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 62.7 (2005). Publisher: NRC Research Press Ottawa, Canada, S. 1513–1522.
- [9] J. Martinez u.a. “Characterization of a siphon turbine to accelerate low-head hydro-power deployment”. In: *Journal of Cleaner Production* 210 (Feb. 2019), S. 35–42. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.345.
- [10] J.J. Martinez u. a. “Hydraulic and biological characterization of a large Kaplan turbine”. In: *Renewable Energy* 131 (Feb. 2019), S. 240–249. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2018.07.034. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148118308310> (besucht am 19.01.2024).
- [11] A. Salalila u. a. “Evaluation of a fish-friendly self-cleaning horizontal irrigation screen using autonomous sensors”. In: *Marine and Freshwater Research* 70.9 (2019), S. 1274. ISSN: 1323-1650. DOI: 10.1071/MF19194.
- [12] J. Knott u. a. “Ecological assessment of the world’s first shaft hydropower plant”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 187 (Nov. 2023), S. 113727. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113727.
- [13] R. K. Saylor u.a. *Fish injury and mortality caused by simulated impacts from turbine blades*. Unter Mitarb. von A. Fortner u. a. 2020. DOI: 10.21951/1755094.
- [14] B. D. Pflugrath u. a. *Biological Response Models: Predicting Injury and Mortality of Fish During Downstream Passage through Hydropower Facilities*. PNNL-30893. Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (United States), 12. Feb. 2021. DOI: 10.2172/1838202. URL: <https://www.osti.gov/biblio/1838202> (besucht am 26.06.2024).
- [15] E. Koch. “Analyse von Kollisionseignissen zwischen Fischersatzsystemen und Turbinenblättern anhand der Daten eines Kollisionsversuchsstands”. Master’s Thesis. Otto von Guericke University Magdeburg, 2024.