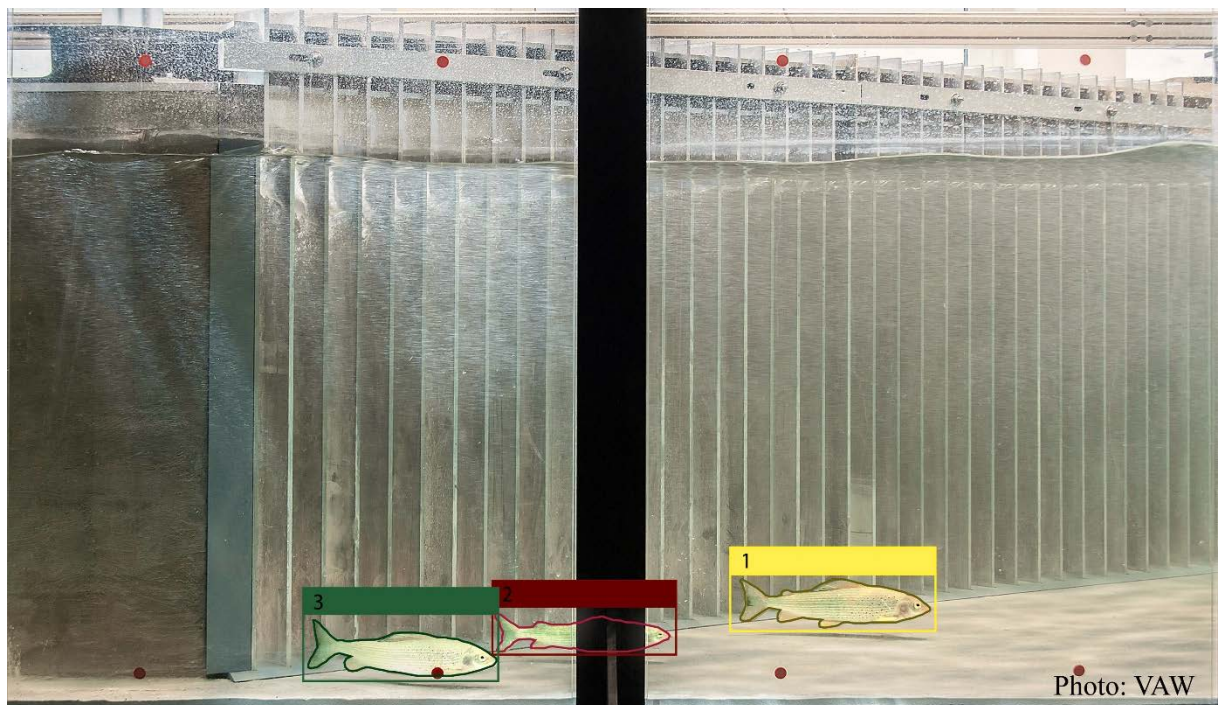




Schlussbericht 27.11.2015

Entwicklung und Anwendung eines automatisierten Fish-Tracking Moduls II

Development and application of an automated fish-tracking software (Part II)





ETH zürich



Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie

Datum: 27.11.2015

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Wasserkraft
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmerin:

ETH Zürich
Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie (VAW)
Hönggerberggring 26
CH-8093 Zürich
www.vaw.ethz.ch

Autoren:

Dr. Martin Detert, VAW, detert@vaw.baug.ethz.ch
Dr. Ismail Albayrak, VAW, albayrak@vaw.baug.ethz.ch
Prof. Dr. Robert Boes, VAW, boes@vaw.baug.ethz.ch

BFE-Bereichsleitung:	Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung:	Dr. Klaus Jorde, klaus.jorde@kjconsult.net
BFE-Vertragsnummer:	SI/500957-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Zusammenfassung

Fische sind bei der Abwärtswanderung über Flusskraftwerke einer Verletzungsgefahr ausgesetzt. Das Wissen um das Fischverhalten im Nahbereich von Abstieghilfen ist für deren Beurteilung und Optimierung entscheidend. Bis dato erfolgte die Beobachtung des Fisch-Schwimmverhaltens jedoch meist rein qualitativ. Im Rahmen des Projektteiles I wurde ein automatisiertes *Fish-Tracking* Modul entwickelt, welches das Wanderverhalten direkt aus Videoaufnahmen an einem ethohydraulischen Labormodell auswertet, basierend auf der *Computer Vision System Toolbox*™ der Software MATLAB. Das *Tracking*-Modul detektiert den Schwimmpfad eines Einzelfisches oder eines Schwarmmittelpunktes. Eine eindeutige Separierung von vollständigen Pfaden einzelner Schwarmfische ist jedoch derzeit nicht möglich. Dieses Modul ist nun im Rahmen des Projektteiles II weiter optimiert und automatisiert worden. Das *Fish-Tracking* Modul wurde für eine exemplarische Analyse des Schwimmverhaltens in Abhängigkeit von verschiedenen Fischarten für einen grösseren Datensatz erfolgreich eingesetzt. Das neu entwickelte *Fish-Tracking* Modul steht somit nunmehr zur Anwendung für detaillierte Analysen von Gesamtdatensätzen bereit.

Résumé

Lors de la dévalaison par les centrales hydrauliques, les poissons sont exposés à des risques de blessures. Des connaissances approfondies du comportement des poissons dans les environs des aides de descente est crucial pour leur évaluation et leur optimisation. À ce jour, l'observation du comportement des poissons nageants n'a eu lieu que de façon qualitative. Dans le cadre de ce projet, un module automatisé du *Fish-Tracking* a été développé, avec lequel le comportement migratoire est enregistré sur vidéo et peut être évalué directement sur une maquette éthohydraulique en laboratoire, basé sur le système de vision de l'informatique logiciel MATLAB Toolbox™. Le module de suivi détecte le chemin de la nage d'un poisson unique ou le centre d'un essaim. Cependant, une séparation claire des chemins d'accès d'un poisson individuel parmi un essaim n'est pas possible actuellement. Le module automatisé du suivi des poissons a été appliqué avec succès pour une analyse exemplaire de comportement de deux espèces de poissons. Le *Fish-Tracking* module nouvellement développé est maintenant prêt à être appliquée pour analyser de grands ensembles de données.

Abstract

Fishes are in risk of injury during their downstream migration via hydro power plants. The knowledge on fish behavior in the near field of fish guidance structures is of importance for both the evaluation of their effectiveness and their optimization. However, up to now, fish-observations have been only qualitatively realized. In the first part of this project an automatized *Fish-Tracking* Module had been developed that is able to detect either the path of a single fish or the midpoint of a schooling fish from video recordings obtained with etho-hydraulic laboratory flume experiments. The module is mainly based on the *Computer Vision System Toolbox*™ of the commercial software MATLAB. However, an unambiguous separation of the full length of each fish in a schooling still remains challenging. In the second part of the project, the *Fish-Tracking* Module has now successfully been automatized, further developed, and applied to a large data set of different fish species. The newly developed tool is now ready to be applied for analyzing large data sets.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Abstract	3
Inhaltsverzeichnis	4
Ziel der Arbeit	5
Nationale Zusammenarbeit	6
Internationale Zusammenarbeit	6
Grundlagen und Konzept	7
Ethohydraulische Untersuchungen	7
Videoaufnahmen	9
Methodik zum Fish-Tracking.....	14
Ergebnisse	23
Diskussion	27
Schlussfolgerungen und Ausblick	27
Referenzen	28
Anhang	28

Ziel der Arbeit

Das Forschungsprojekt „Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken“, welches u.a. durch das BFE gefördert wurde (Vertrag Nr. SI/500642-01), wurde durch die VAW und die EAWAG gemeinsam mit Industriepartnern durchgeführt. Es wurden Fischabstiegstechnologien für grössere Flusskraftwerke der Mittellandflüsse durch Untersuchung, Optimierung und Anpassung bekannter Massnahmentypen am hydraulischen Modell entwickelt und deren Effizienz mittels Fischmonitoring geprüft. Dazu wurden u.a. Lebendfischversuche im Rahmen von ethohydraulischen Laborversuchen durchgeführt, um das spezifische und bis heute nicht untersuchte Verhalten einheimischer Zielfischarten an Fischleiteinrichtungen zu erforschen.

Im Projektplan war vorgesehen, das Verhalten der Fische qualitativ und exemplarisch durch händische Vermessung anhand von Foto- und Videoaufnahmen vorzunehmen. Tatsächlich bieten neu gewonnene Forschungsarbeiten an der VAW zur Bildverarbeitung tiefergehende Analysemethoden im Bereich der Bildverarbeitung: (1) Die in-house Software BASEGRAIN ([1,2]) ermöglicht die berührungsfreie und georeferenzierte Erstellung von quasi Sieblinien aus *top-view* Fotoaufnahmen von Kiesbänken. (2) Im Projekt „Eggrankkurve Thur“ ([3,4]) werden Geschwindigkeitsfelder aus Drohnen-basierten Videoaufnahmen mittels *Particle-Image-Velocimetry* (PIV) nach Anwendung von komplexen Bildaufbereitungstechniken und Referenzpunkt-Detektierung berechnet.

Aus beiden obigen Projekten leitet sich auch das Potential zur Entwicklung und Anwendung eines automatisierten *Fish-Tracking* Moduls in einem eigenständigen BFE-finanzierten Projekt (Vertrag Nr. SI/500957-01) ab. Dieses Modul wurde im Rahmen einer ersten Projektphase bereits entwickelt und auf einen kleinen Datensatz erfolgreich angewendet. Aus Videoaufnahmen von Fischen werden diese per Objekterkennung am Einzelbild detektiert und deren Lage in Zeit und zum Hauptströmungsweg bestimmt. Videoaufnahmen sind dabei sowohl in Laborversuchen als auch in der Natur möglich, insofern die Wassertrübung eine Objekterkennung noch zulässt. Mit gewonnenen *Tracking*-Daten ist eine wesentlich verbesserte und berührungsfreie Analyse des Fischverhaltens möglich, welches für die Beurteilung der Effizienz von Fischabstiegshilfen entscheidend ist. Insbesondere von Bedeutung ist die mit der rechnergestützten Auswertung ermöglichte umfassende Auswertung statistisch wichtiger Grössen für grosse Datensätze; ein Unterfangen, das mit händischer Auswertung praktisch unmöglich ist.

Im Rahmen des Projektteiles II soll das *Fish-Tracking* Modul nun mittels nachstehender Schritte weiter optimiert werden:

- Händische Synchronisierung sämtlicher Videodatensätze;
- Automatisiertes Referenzieren sowie Kalibrierung der *Videoframes* auf Rinnenhauptachse;
- Entwicklung und Anwendung eines Algorithmus zum Filtern und Zusammenfügen von *Einzel-Fishtracks*.

Im Anschluss soll das optimierte *Fish-Tracking* Modul auf einen grösseren Datensatz adaptiert und angewendet werden. Eine Herausforderung stellen hier die sich verändernden Randbedingungen dar, wie z.B. Art, Grösse und Anzahl der Fische, Beleuchtungsintensität, Fliessgeschwindigkeit und Trübung, aber auch wechselnde Positionierungen und Anordnungen der Kameras während der Versuchsreihen. Die Analyse soll für die Variation der Parameter Fliessgeschwindigkeit, Fischart und Fischgrösse erfolgen. Abschliessend können die artenspezifischen Verhaltensmuster für die Testfischarten ausgewertet werden. In Kombination mit den durch die Versuche ebenfalls



gewonnenen Aussagen zur Fischleiteffizienz werden so Optimierungsoptionen für die getesteten Fischleiteinrichtungen möglich.

Mit verbesserten und detaillierten Kenntnissen können zukünftig bestehende Anlagen optimiert bzw. neue Fischabstiegshilfen gezielter dimensioniert werden. Da die Forschungsergebnisse für zahlreiche Anlagen, auch Fischaufstiegshilfen, eingesetzt werden können, vergrössert sich das Verbesserungspotential und damit auch finanzielle Einsparpotential entsprechend.

Nationale Zusammenarbeit

Das Forschungsprojekt „Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken“, in dessen Rahmen die Daten zur Entwicklung des automatisierten *Fish-Tracking* Moduls an einem ethohydraulischen Modell erhoben wurden, wurde finanziell von *swisselectric research*, dem BAFU und dem BFE unterstützt. Der Verband Aare-Rheinwerke (VAR) unterstützt das Vorhaben mit der Zurverfügungstellung von diversen Datengrundlagen. Der Forschungspartner *eawag* wird durch den Fischbiologen Dr. Armin Peter vertreten.

Die Projektpartner des o.g. Forschungsprojektes hatten die Bildung einer Begleitgruppe zum Forschungsprojekt lanciert. Die Mitglieder der Begleitgruppe setzten sich aus Vertretern kantonaler Behörden, der Fischereiverbände und von Umweltverbänden zusammen. In regelmässigen Sitzungen wurde über den Projektstatus informiert und der fachliche Austausch ermöglicht.

Internationale Zusammenarbeit

Seit Start des Projektteiles II am 1. Oktober 2014 wurden nachstehende Projektpartner ausserhalb der Schweiz kontaktiert. Ein persönlicher bzw. Emailkontakt fand mit folgenden Wissenschaftlern statt:

- Herrn Dr. Abdelaziz, ehem. Technische Universität München (Deutschland) zum Thema Versuchsaufbau und *Trackingmethodik*
- Frau T. Bös, BfG Koblenz (Deutschland) zum Themengebiet Fischbiologie
- Herr Dr. M. Henning und Herr Dr. W. Kampke, BAW Karlsruhe (Deutschland) zum Thema 3D-*Fishtracking* und Möglichkeiten zur Optimierung des Versuchsaufbaus und -ablaufs
- Herr Dr. M. Bandilla, Fa. Noldus IT (Deutschland) bzgl. *Trackingsoftware* zur Analyse von Tierversuchen
- Herr Dr. A. Rodriguez, ehem. Universität A Coruña (Spanien) zum Informationsaustausch über den Einsatz und die Synchronisierung von Unterwasserkameras

Grundlagen und Konzept

Ethohydraulische Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen wurden an der VAW im Rahmen des Forschungsprojekt „Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken“ durchgeführt. Die Untersuchungen wurden bereits im Projektteil I dargestellt, werden der Vollständigkeit halber nachstehend erneut beschrieben.

Der ethohydraulische Versuchsstand ist für die Durchführung von Fischversuchen im Massstab 1:1 konzipiert. Aus diesem Grund ergeben sich in Bezug auf die Modellabmessungen und auch die Modellwasserversorgung folgende Spezifikationen:

- Modellaussenmasse: Länge ca. 30 m, Breite 1.8 m und Höhe 1.4 m
- Abflussquerschnitt: Breite 1.5 m, Abflusstiefe 0.9 m
- Zufluss: stufenlos regelbar zwischen 400 bis 1200 l/s
- Resultierende mittlere Fliessgeschwindigkeiten bis 0.8 m/s

Abb. 1 veranschaulicht in einer Prinzipskizze den Aufbau des Modells mit den wichtigsten Konstruktionselementen und messtechnischen Instrumentierung, die im Anschluss beschrieben werden.

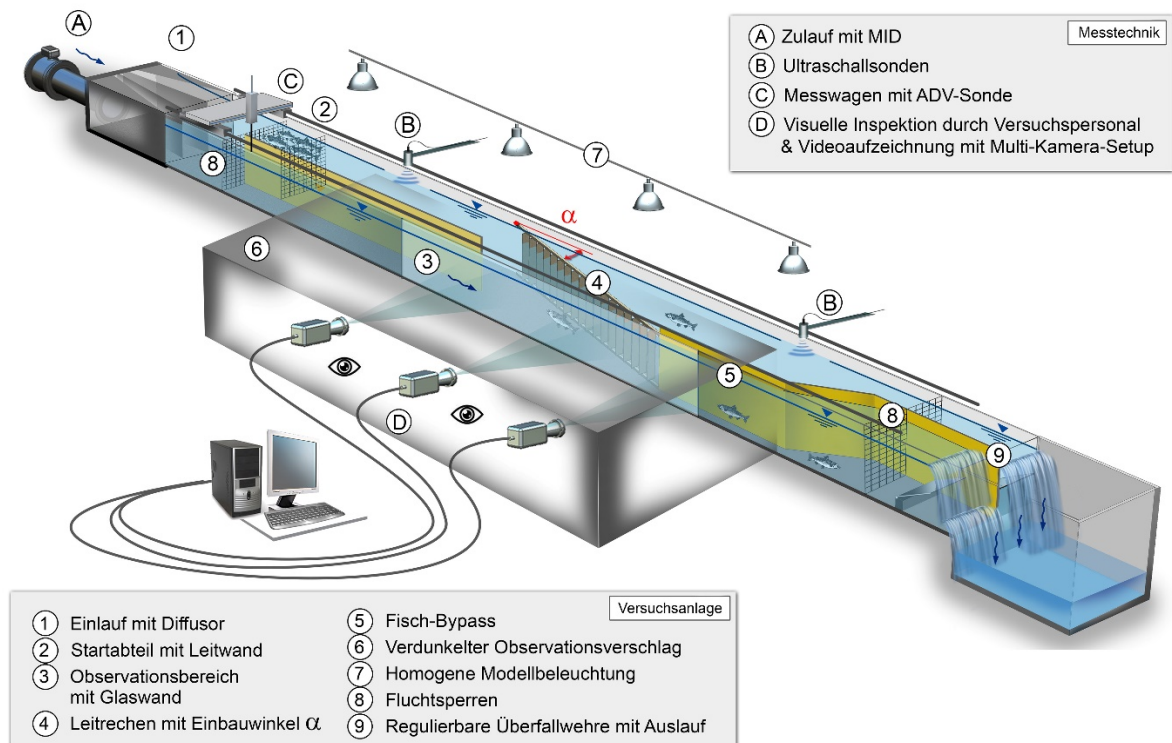


Abbildung 1: Versuchsaufbau des ethohydraulischen Modells. (Hinweis: Die Darstellung zeigt den Versuchsaufbau spiegelverkehrt, hier mit Strömungsrichtung von links nach rechts.)



Um ein naturnahes Schwimmverhalten auszuprägen, benötigen Fische einen ausreichend langen und homogen durchströmten Oberwasserbereich vor dem zu testenden Leitrechen. Zur Entwicklung einer solchen homogenen Strömungsverteilung ist bei konventioneller Ausbildung des Gerinneeinlaufes mit Lochblechen und Beruhigungsmatten eine grosse Vorlaufstrecke notwendig. Eine ökonomische Dimensionierung der Modelllänge wurde durch Ausbildung des Einlaufbereichs als Diffusor erreicht. Mittels im Verzug gemauerten Seitenwänden und strömungsführender Leitbleche wird darin die gleichmässige Aufteilung der Strömung im Übergang von der Rohrströmung des Zulaufes auf den rechteckigen Gerinnequerschnitt über eine kurze Fliessstrecke möglich.

Das Modell verfügt oberstrom des Leitrechens über ein Startabteil, in dem sich die Versuchsfische vor dem Versuchsbeginn an die Strömungsverhältnisse adaptieren können. Das 0.5 m breite und 1 m lange Startabteil befindet sich ca. 1 m unterstrom des Diffusors. In seiner Verlängerung liegt eine Leitwand, die die Fische bis kurz (1.5 m) vor den Leitrechen führt. Ziel dieser Anordnung ist es, für jeden Versuchsfisch sicherzustellen, dass die Passage des Leitrechens auf der dem Bypass abgewandten Gerinneseite beginnt.

Die Rechenstäbe des Leitrechens bestehen aus Aluminiumflachprofilen mit einer Breite von 1 cm, einer Tiefe von 10 cm und einer Höhe von 115 cm. Die Rechenstäbe besitzen leicht abgerundete Kanten, um die Verletzungsgefahr bei einer möglichen Durchquerung zu minimieren. Da es sich um ein Ausschnittmodell handelt, wurde auf Querverstrebungen zwischen den Rechenstäben verzichtet. Diese sind über der Wasseroberfläche durch ein dreiwertiges und am Gerinneboden durch ein einwertiges Auflager gehalten. Beide Stabaufleger sind modular ausgebildet und erlauben die speditiv Modifikation des Hauptanströmungswinkels, der Rechenstabausrichtung und des Rechenstababstandes. Über eine Länge von 9 m ist die Modellaussenmauer durch eine gläserne, durch Stahlrahmen gefasste Aussenwand unterbrochen. Dieser Observationsbereich erlaubt bei einer maximalen Länge des Fischleitrechens von 4.9 m somit auch die Auswertung des Fischverhaltens sowohl oberstrom des Leitrechens als auch im Bypass. Um Störungen des Fischverhaltens durch äussere Einflüsse auszuschliessen, ist der Aufenthaltsbereich für das Versuchspersonal ausserhalb des Modells mit einem verdunkelten Verschlag umbaut. In diesem befinden sich auch die Videokameras zur Aufnahme der Testfische. Der 20 cm breite Bypass schliesst sich unmittelbar an das Ende des Leitrechens an. Er ist vom Hauptgerinne durch eine 10 cm dicke Mauer getrennt und verfügt am Modellauslauf über eine stufenlos regulierbare Überfallklappe. Zur Regulierung des Hauptgerinnes befindet sich eine zweite, ebenfalls stufenlos regulierbare Überfallklappe am Modellauslauf. Es ist damit möglich, unterschiedliche Abfluss- und Geschwindigkeitsverhältnisse in beiden Teilgerinnen einzustellen. Die gleichmässige und vor allem gleichbleibende Ausleuchtung des Versuchssperimeters ist durch die Anordnung von leistungsstarken Strahlern über die gesamte Modelllänge sichergestellt. Somit können vergleichbare Versuchsverhältnisse für alle Testzeiträume realisiert werden und es wird das unerwünschte Auftreten von tageszeitabhängigen Schattenbildungen verhindert.

Der zur Analyse bereitstehende Gesamtdatensatz des Forschungsprojekts „Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken“ wurde zwischen dem 16.10.2013 und 17.07.2014 aufgenommen. Der Gesamtdatensatz umfasst rund 479 Einzelversuche mit je 3 Kameras über eine Zeitdauer von 0–30 min, bei einzelnen Versuchen auch bis zu 45 min. Die für den vorliegenden Bericht verwendeten Messdaten beziehen sich auf die Messreihen „15_45_5_0.x“. In dieser Konfiguration besitzt der Leitrechen den Rechenwinkel 15°, den Stabwinkel 45°, einen lichten Stababstand von 5 cm und wird mit einer mittleren Fliessgeschwindigkeit im Zulauf von $U = 0.3, 0.6$ und 0.8 m/s beaufschlagt. Hinsichtlich einer Videoauswertung ist die Konfiguration repräsentativ für das Gros der Messreihen im Rahmen dieses Projektes. Tab. 1 gibt

eine Zusammenfassung der Randbedingungen für die im vorliegenden Bericht analysierten Messdaten. Die Messreihe „15_45_5_0.x“ umfasst Versuche mit den Fischarten Schneider und Barbe für alle drei mittleren Fließgeschwindigkeiten. Bei $U = 0.6$ m/s wurden darüber hinaus Versuche mit Aalen und Forellen durchgeführt. Bei den Versuchen mit Schneidern wurden nur Einzelfische beprobt, bei den Versuchen mit Aalen nur je zwei Fische. Die Versuche mit Barben und Forellen wurden mit 1–3 Fischen durchgeführt.

Die Versuchsdauer bestimmt sich durch die Zeit, die ein Fisch entweder zur Passage des Rechens mit Einschwimmen in den Bypass oder das Durchschwimmen des Rechens in das Unterwasser benötigt. Sie ist begrenzt durch das Überschreiten eines maximalen Zeitlimits von 30 min (45 min). Nach Überschreiten des Zeitlimits wird der Einzelversuch abgebrochen. Es existieren demnach grundsätzlich drei mögliche Ergebnisszenarien, (1) das erfolgreiche Auffinden des Bypasses, (2) das Durchschwimmen des Rechens und damit im Prototyp das Einschwimmen in den Bereich des Kraftwerkseinlaufes und 3) das Verbleiben im Oberwasser ohne Wahl der Abstiegswege (1) oder (2).

Tabelle 1: Zusammenfassung der Randbedingungen für die in diesem Bericht analysierten Messdaten zur Messreihe „15_45_5_0.x“ (Leitrechen mit Rechenwinkel 15°, Stabwinkel 45°, lichter Stababstand 5 cm und $U = 0.3, 0.6$ und 0.8 m/s).

U	Art	Abmessungen	#Versuche ^{*)}	#Fisch/Versuch
		[min, Median, max]		
(m/s)	(-)	(mm)	(-)	(-)
0.3	Schneider	(95, 115, 130)	20(1)	1
	Barbe	(185, 334, 510)	8(2)	1-3
0.6	Schneider	(95, 115, 130)	19(2)	1
	Barbe	(135, 272, 465)	8(2)	1-3
	Aal	(440, 677, 840)	5(2)	2
	Forelle	(165, 195, 280)	9(4)	1-3
0.8	Schneider	(120, 125, 130)	2(1)	1
	Barbe	(130, 215, 295)	6(1)	1-3
*) in Klammern: #Versuche mit Versagen der Leitwirkung für mindestens einen Fisch				

Videoaufnahmen

Als Datengrundlage für die Objekterkennung sind Videoaufnahmen zentraler Bestandteil des Forschungsprojektes.

Zum Projektstart standen die Einrichtung und Justierung derameratechnik zur Erfassung des Schwimmverhaltens der Testfische im Fokus der Arbeiten. Die Vorversuchsphase zeigte in diesem Zusammenhang die Notwendigkeit zur Anpassung derameratechnik auf. Die anfangs eingesetzten infrarotfähigen Kameras wiesen eine starke Bildverzerrung, zu niedrige Bildfrequenz und zu geringe Einzelaufnahmeauflösung auf. Aus diesem Grund wurden sie durch hochauflösende Camcorder ersetzt und



eine Anpassung des Versuchsprogramms durchgeführt. Die bis dahin geplanten Nachtversuche wurden verworfen, da die Vorversuche zeigten, dass diese aktuell keine projektrelevanten Vorteile im Hinblick auf die verhaltensbiologischen Ergebnisse des Projektes aufwiesen.

In einem weiteren Optimierungsschritt wurde nach einem akzeptablen Kompromis aus geringer Beeinflussung der Testfische durch künstliche Lichtquellen auf der einen und ausreichender Beleuchtung des Modells für qualitativ hochwertige Videoaufnahmen auf der andern Seite gesucht. Dieser Prozess erfolgte iterativ und unter hohem Zeitaufwand. Im Ergebnis entschied sich die Projektgruppe für eine vollständig künstlich ausgeleuchtete Modellkonfiguration. Diese zeigte sich nicht nur im Hinblick auf die Bilderfassung vorteilhaft, sie erwies sich auch für die Bereitstellung stets vergleichbarer Versuchsbedingungen für die Tierversuche als günstig. Um die volle Länge des Leitrechens beobachten zu können, kamen letztendlich drei Kameras zum Einsatz: je zwei Canon XA10 und eine Canon Legria HF R406. Alle drei Kameras wurden im Modus 50i betrieben, d.h. mit einer Aufnahmezeit von 50 Hz im Zeilensprungverfahren. Videos wurden mit einer Full-HD Auflösung von 1920×1080 px quasi-synchron aufgenommen.

Eine echte Synchronisierung der Kameras war bautechnisch bedingt nicht möglich; eine Aufnahme konnte jeweils nur per Knopfdruck auf der jeweiligen Kamera ausgelöst werden, d.h. die drei Kameraaufnahmen wurden jeweils mit einem zeitlich Versatz von 2–4 s gestartet. Die Synchronisierungskorrektur wurde nachträglich händisch vorgenommen bei einen verbleibenden Synchronisierungsfehler als Zeitversatz von ca. ± 0.3 s. Während im Projektteil I bereits ein kleiner Datensatz synchronisiert wurde, wurde während der Bearbeitung des Projektteils II der komplette Datensatz der Messungen vom 16.10.2013 bis 17.07.2014 synchronisiert. Diese Arbeit stellte sich als sehr zeitintensiv dar und lies sich nicht effektiv automatisieren.

Eine weitere Herausforderung war die Skalierung und Orthorektifizierung der Kameras auf ein einheitliches Koordinatensystem. Für den kleinen Datensatz, welcher im Projektteil I analysiert wurde, wurde eine vereinfachte händische Digitalisierung an jeweils drei Kamerastandbildern entsprechend den drei verwendeten Kameras vorgenommen. Dieses Vorgehen war für diesen Datensatz zulässig, da die Kamerastandorte während dieser Versuchsreihe nicht geändert wurden. Für den Gesamtdatensatz der Messungen vom 16.10.2013 bis 17.07.2014 wurden die Kameras jedoch bedingt durch mehrfachen Auf- und Abbau in ihrer Position verändert. Ab 21.05.2014 wurde darüber hinaus die Canon Legria mit einer Canon XA10 getauscht, um den unterstromigen Messbereich anstelle des mittleren Messbereiches zu beobachten. Diese häufig wechselnden Positionen erforderten eine Automatisierung der Skalierungsprozedur. Wie bereits im Projektteil I erfolgte die Skalierung dabei zunächst für jeweils drei Standbilder über die händische Digitalisierung der Lage der Fixierungsschrauben (jeweils 150 mm rechts und links der vertikalen Rinnenverstreben) und anschliessender projektiver Transformation. Der leichte Fischaugeneffekt der Aufnahmen der Canon Legria wurde zuvor zusätzlich über eine einfache radiale Entzerrung korrigiert. Um allerdings die Lage der Fixierungsschrauben nun auch in anderen Standbildern mit geänderter Kameraposition zu detektieren, wurde ein *Punktematching*-Verfahren (SURF = *Speeded Up Robust Features*) verwendet, was gemeinsame charakteristische Punkte im Bild mit bekannter und im Bild mit unbekannter Kameraposition erkennt (Abb. 2). Die Lage der Fixierungsschrauben konnte dann in Relation zu den bekannten Matching-Punkten bestimmt werden. Sind auf diese Weise sämtliche Positionen der Fixierungsschrauben im Bild mit unbekannter Kameraposition bekannt, kann auch hier eine projektive Transformation zur Skalierung und Orthorektifizierung des Bildes vorgenommen werden.

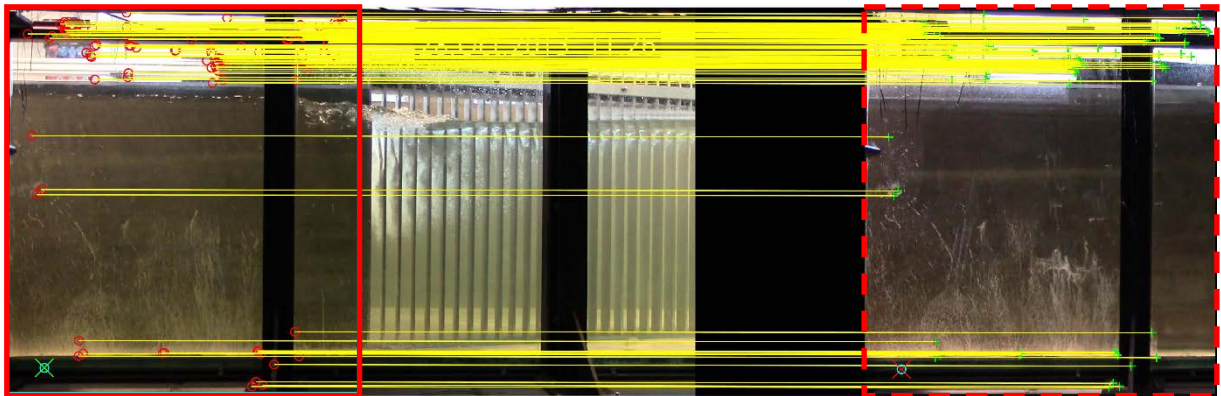


Abbildung 2: Punktematching zum Detektieren der Lage einer einzelnen Fixierungsschraube. Die Lage des Bildausschnittes mit bekannter Position (rechts: gestrichelte rote Umrandung) wird im Bild mit unbekannter Position (links: rote Umrandung) automatisiert ermittelt über das Finden von gemeinsamen charakteristischen Punkten (grüne kleine Kreuze verbunden mit gelben Strahlen hin zu roten kleinen Kreisen). Damit kann im Anschluss in Relation zu den gefundenen *Matchingpunkten* auch die Lage der Fixierungsschraube (grünes Kreuz unten links) geschätzt werden.

Obiges Verfahren kalibriert das Bild folglich auf eine von den Fixierungsschrauben aufgespannte Ebene, d.h. eine Massstäblichkeit gilt damit nur für den Nahbereich direkt an der Glasscheibe. Abb. 3 zeigt eine so aus allen drei Kamerabildern zusammengefügte und skalierte Gesamtansicht des Rechenbereiches. In den Bereichen der Kameraüberlappungen ausserhalb des Nahbereiches an der Glasscheibe werden in dieser Darstellung jedoch grössere Abweichungen von einer idealen, d.h. kongruenten Überdeckung deutlich, welche im Wesentlichen auf die Lichtbrechung zwischen den Medien Luft, Glasscheibe und Wasser zurückzuführen sind. Diese vergrössert sich mit zunehmendem Abstand zur Skalierungsebene. Durch eine Skalierung auf die Ebene der Glasscheibe entsteht ein Refraktionsfehler, welcher neu im Rahmen des Projektteiles II zusätzlich korrigiert bzw. abgemindert wurde.

Abb. 4 gibt eine Skizze zur näheren Betrachtung dieses Refraktionsfehlers – zur Vereinfachung als Projektion auf eine horizontale Ebene (bzw. als horizontale Schnittebene) durch die Mitte des Kamerasichtfeldes. Für die Verhältnisse der Messungen vom 16.10.2013 bis 17.07.2014 gilt in etwa: senkrechte Entfernung Kamera zu Glasscheibe $e = 2.40$ m, Dicke Glasscheibe $w = 0.02$ m, Rinnenbreite $b = 1.50$ m. Für einen typischen maximalen Aufweitungswinkel $\alpha = 27.5^\circ$ des Kamera-Bildfeldes ergibt sich eine sichtbare Halbbreite auf die Glasscheibenebene von $k = 1.25$ m und auf die Rückwandebene von $k + \Delta k' = 1.25 + 0.56 = 1.81$ m. Damit ist die absolute Lage eines Fisches, der am linken bzw. rechten Bildrand detektiert wird und sich auf Höhe der Rückwandebene befindet, maximal um den Faktor $k/(k + \Delta k') = 0.69$ zu kurz zur Kameraachse hin lokalisiert – während die absolute Lage eines Fisches am linken bzw. rechten Bildrand auf Höhe der Glasscheibenebene korrekt lokalisiert würde. Um ersteren Fehler abzumindern, wurde anstelle einer Skalierung auf die Glasscheibenebene eine zusätzliche, finale Skalierung auf die Mittenachse der Rinne bzw. im Bereich der Leiteinrichtung auf die Mittenachse der horizontalen Ebene links vom Leitrechen projiziert. Damit ergibt sich ein maximaler Verzerrungsfehler für die Lage am linken bzw. rechten Bildrand in Nähe der Glasscheibe von $k/(k + \Delta k'/2) = 0.82$ bzw. für die Rückwand $(k + \Delta k')/(k + \Delta k'/2) = 1.18$. Für den Bereich oberstrom vom Leitrechen kann entsprechend ein Verzerrungsfehler für die aus den *Tracks* berechneten Geschwindigkeiten in erster Näherung (für eine horizontale Schnittebene durch die Mitte des Kamerasichtfeldes) auf maximal 18% bzw. der *Track*-Lagefehler auf maximal absolut 28 cm abgeschätzt werden. Im Mittel liegt der Fehler, aufgrund der vereinfachten Projektion auf eine



Grundfläche, etwa bei einem Viertel davon, d.h. bei 5% bzw. absolut 7 cm. Bis hin zum Fischbypass mit einer Breite von 0.20 m nimmt der absolute Fehler ab auf <1 cm.

Bei obiger Betrachtungsweise wird allerdings vernachlässigt, dass auch in vertikaler Richtung ein Refraktionsfehler generiert wird. Dieser wurde im Rahmen des Projektteils II nicht durch Projektion minimiert. Bei einer Wassertiefe von $h \sim 1.0$ m und einer vertikalen Ausrichtung der Kameraachse auf die Hälfte der Wassertiefe kann der vertikale Refraktionsfehler analog zu obiger Betrachtung auf maximal 31% bzw. absolut 22 cm abgeschätzt werden. Dies gilt für die Lage eines Fisches, der sich am linken bzw. rechten Bildrand und auf Höhe der Rückwandebene an der Sohle bzw.

Wasseroberfläche befindet. Während der Versuche zeigte sich allerdings, dass sich die Fische fast ausschliesslich in der unteren Hälfte des Wasserkörpers aufhalten. Für den Bereich oberstrom vom Leitrechen (für eine horizontale sohlnahe Schnittebene) liegt der Fehler für die *Track*geschwindigkeit damit im Mittel bei einem Viertel des Maximums, d.h. bei 8% bzw. für die Lage bei 0–2 cm. Bis hin zum Fischbypass nimmt der absolute Fehler ab auf ~ 0 .

Tatsächlich wurden die Kamerapositionen (Entfernung zur Glasscheibe) und deren Orientierung (Abweichung vom idealen, senkrechten Winkel der Kameraachse zur Glasscheibenebene) während der einzelnen Versuchsreihen in einem nachträglich nicht mehr exakt quantifizierbaren Mass durch häufiges Auf- und Abbauen variiert. Die mittleren *Track*-Fehler resultierend aus Refraktion liegen mit einer konservativen Abschätzung daher eher bei etwa <10% bzw. absolut <0–15 cm in der Horizontalen bzw. bei <15% bzw. absolut <0–5 cm in der Vertikalen. Für nachfolgende Projekte besteht hier deutliches Optimierungspotential – entweder durch präzisere Aufstellung und Orientierung der Kameras oder durch Installation eines 3D-Videometriesystems.

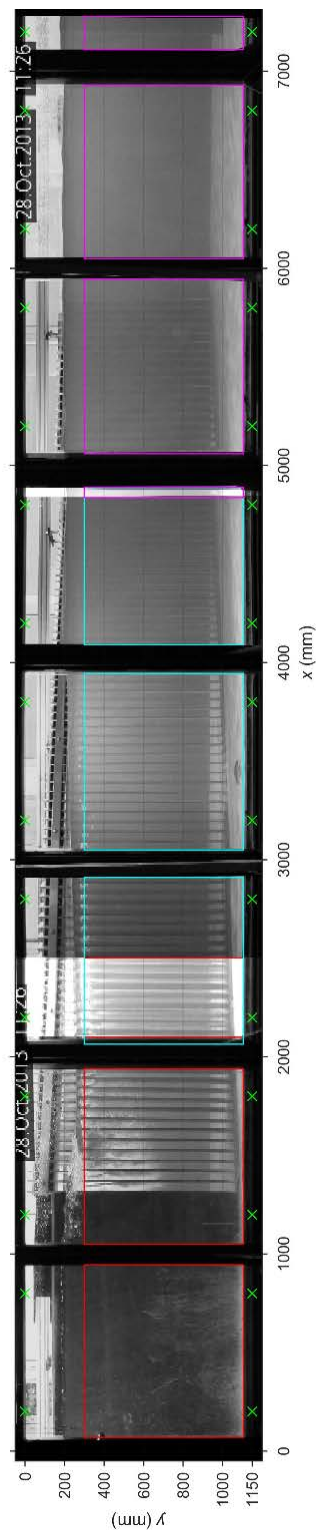


Abbildung 3: Gesamtansicht des aufgenommenen Rechens, skaliert auf Ebene Glasscheibe, mit Überlappungsbereichen der drei Kameras bei $x \approx 2'000\text{--}2'400\text{ mm}$ und $x \approx 4'900\text{--}4'950\text{ mm}$. Farblich kodiert die Kamerabereiche, welche anschliessend beim *Trackingverfahren* analysiert wurden. Grüne Kreuze geben die Lage der Fixierungsschrauben.

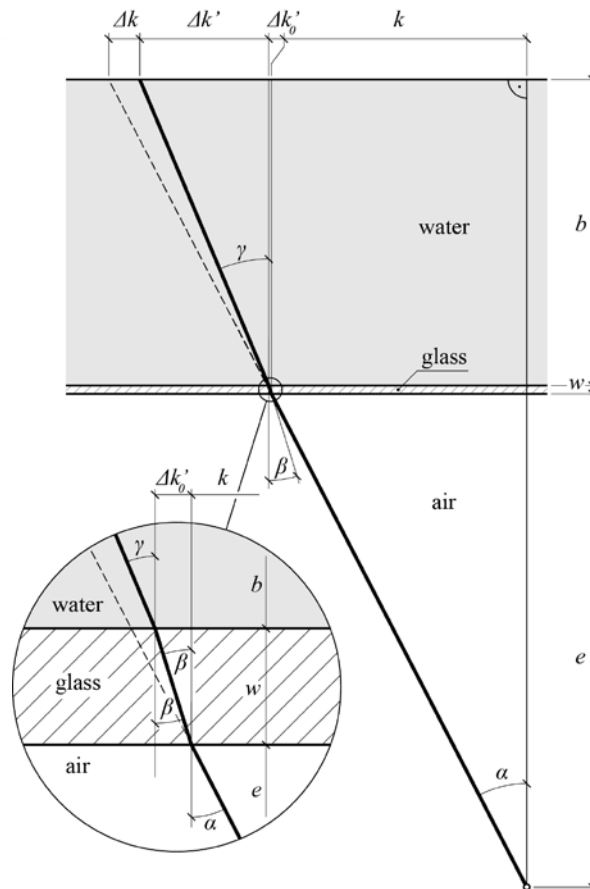


Abbildung 4: Definitionsskizze (Draufsicht) zum Refraktionsfehler resultierend aus dem Einfallswinkel α , Brechungswinkel β in der Glasscheibe und γ im Wasserkörper. Für die Verhältnisse der Messungen vom 16.10.2013 bis 17.07.2014 gilt im Mittel etwa: senkrechte Entfernung Kamera zur Glasscheibe $e = 2.40$ m, Dicke Glasscheibe $w = 0.02$ m, Rinnenbreite $b = 1.50$ m. Für einen typischen maximalen Aufweitungswinkel der Kamera in die Horizontale von $\alpha = 27.5^\circ$ ergibt sich eine sichtbare Halbbreite auf die Glasscheibenebene von $k = 1.25$ m und auf Rückwandebene von $k + \Delta k' = 1.81$ m (mit $\Delta k'_0 \sim 0$).

Methodik zum Fish-Tracking

Die Methodik zum *Fish-Tracking* beruht im Wesentlichen auf zwei Schritten. Im Rahmen des ersten Schrittes werden Objekterkennungstechniken mit einem *Tracking*-Verfahren kombiniert, um einzelne Objektpfade auf den Videoaufnahmen zu detektieren, die einer Bewegungsspur eines Fisches bzw. Fischwarmes entsprechen könnten (siehe Abb. 5 und 6). In einem zweiten Schritt müssen diese *Einzeltracks* zu einem Gesamtpfad eines Fisches bzw. Fischschwarmes verbunden werden – oder als Fehlerkennung, wie z.B. durch oberflächenwellengenerierte Schattenbewegungen, verworfen werden.

Der erste Schritt der Methodik zum *Fish-Tracking* lässt sich wie folgt beschreiben: Die Objekterkennung erfolgt auf Grundlage von MATLAB-Skripten ([6]) mittels eines sogenannten *motion-based multiple object tracking* Verfahrens, bei dem auch mehrere Objekte zeitgleich verfolgt werden

können. Das Verfahren erkennt in einem ersten Schritt Objekte auf binären Einzelbildern und assoziiert in einem zweiten Schritt die Detektionen bezüglich ihres zeitlichen Erscheinungsbildes. Abb. 5 zeigt exemplarisch eine Momentaufnahme, bei dem ein einzelner Fisch (Schneider) mit der Länge 120 mm erfolgreich erkannt und dessen Lage mittels des *Tracking*-Moduls beschrieben wird. Abb. 6 zeigt eine vergleichbare Momentaufnahme für einen Schwarm aus zwei Barben mit Längen von je 185 mm und einer Barbe mit 360 mm.

Die Erkennung sich bewegnender Objekte erfolgt über einen Algorithmus, der den Hintergrund auf Basis eines Gauss-Mixture Modells subtrahiert. Zur Minimierung des Bildrauschens werden morphologische Operationen auf die so herausgefilterte Maske des Vordergrundes angewendet. Final wird eine BLOb (*Binary Large Object*) Analyse auf gruppierte Pixel durchgeführt, die sich bewegnenden Objekten entsprechen könnten. Für das Testbeispiel in Abb. 5 wurde eine maximale BLOb-Grösse von 4×10^3 px gewählt, entsprechend einer maximalen Erscheinungsgrösse des Fisches. Für das Testbeispiel in Abb. 6 wurde eine maximale BLOb-Grösse von 2×10^6 px gewählt.

Die eigentliche Bewegung wird im Anschluss über einen Kalman-Filter berechnet, der die Mittelpunktlage einer möglichen Bewegungsspur im jeweiligen Einzelbild schätzt und je nach Wahrscheinlichkeit einzelnen erkannten Objekten im nächsten Bild zuweist. Wenn eine Bewegungsspur nicht über mehrere Bilder plausibel nachverfolgt werden kann, so endet diese. Für die Beispiele in Abb. 5 und 6 wurde eine Plausibilisierungsdauer von >0.2 s bzw. >5 Bildern gewählt, in denen das Objekt mindestens dreimal erkannt werden muss. Wird das gleiche Objekt über 10 Bilder nicht wiedererkannt, so endet dessen *Trackingspur*. Wird es zu einem späteren Zeitpunkt erneut erkannt, so wird eine neue, unabhängige Bewegungsspur definiert.

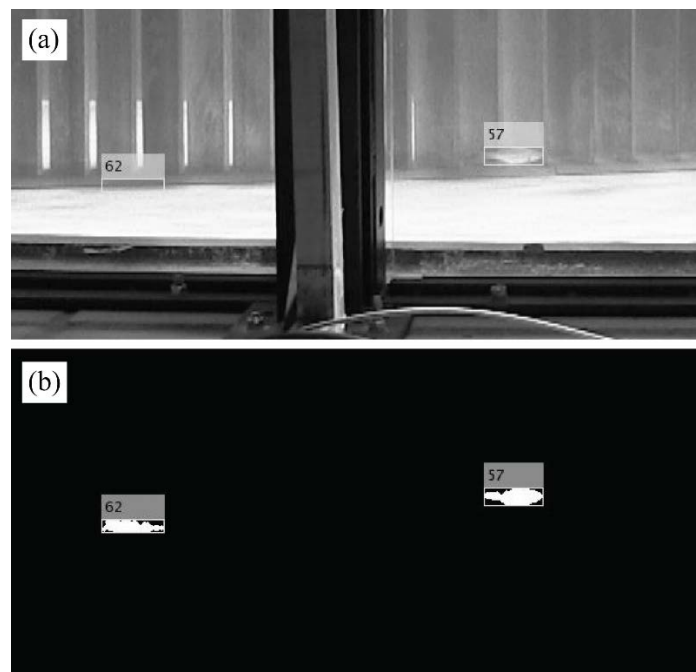


Abbildung 5: Exemplarische Einzelbildauswertung für einen Schneider. In der Mitte des Bildausschnittes ist ein Versuchsfisch (Schneider) zu erkennen, der durch die Objekterkennungsroutine detektiert und als *Track #57* gekennzeichnet wird. (a) Originalframe inkl. detektierter *Trackingobjekte*. (b) Binärbild aus Differenz von aktuellem Frame zu zeitlichem Median und nach Anwendung von morphologischen Operationen zur Bildfilterung, ebenfalls inkl. detektierter *Trackingobjekte*.

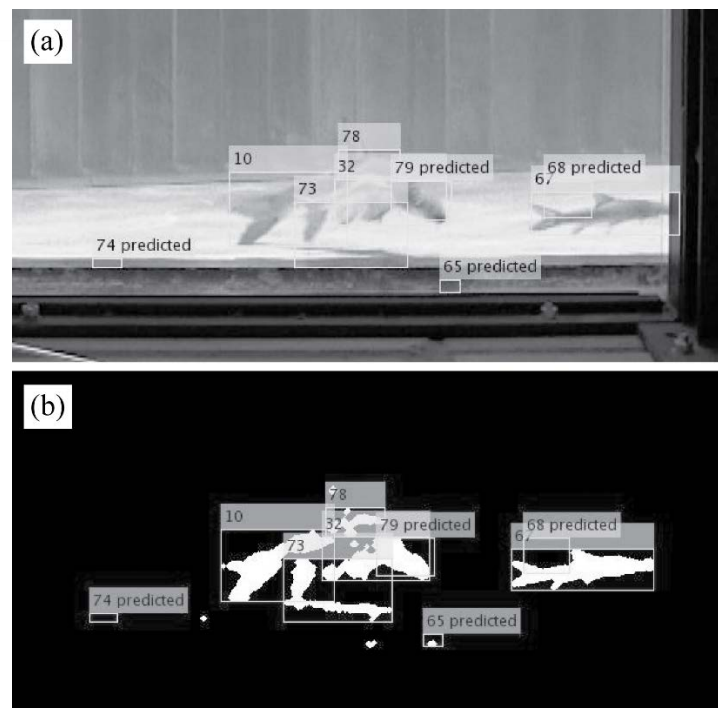


Abbildung 6: Exemplarische Einzelbildauswertung für einen Barbenschwarm. (a) Originalframe inkl. detektierter *Trackingobjekte*. In der Mitte des Bildausschnittes sind drei Versuchsfische (Barben) zu erkennen. Die Objekterkennungsroutine detektiert hier eine einzelne Barbe deutlich als *Track #67*. Allerdings kann zwischen den beiden anderen Barben und ihrem Schatten nicht deutlich differenziert werden, so dass letztendlich die *Tracks # (10, 32, 73+78)* erkannt werden. (b) Binärbild aus Differenz von aktuellem Frame zu zeitlichem Median und nach Anwendung von morphologischen Operationen zur Bildfilterung, ebenfalls inkl. detektierter *Trackingobjekte*.

Im Projektteil II wurde zunächst versucht, diesen Algorithmus zu optimieren. Im Fokus der Arbeiten standen Tests zur Optimierung des Quellcodes zur Erkennung der Einzelfische auf Basis von *Feature-Point-Detection* Methoden (z.B. SURF, MSER), welche in MATLAB (2014) implementiert sind. Tatsächlich führte dieser Ansatz aufgrund der zu geringen Auflösung und Tiefenschärfe der Videos für eine Erkennung von charakteristischen Punkten an sich bewegenden Objekten zu keinem in einer Massenanwendung nutzbaren Verfahren. Weiter enthüllte eine genauere Betrachtung des Gesamtdatensatzes, dass etwa 20–30% der Videodaten aufgrund ihrer Inhomogenität nur händisch und mit grossem zeitlichem (personellen) Aufwand bzw. gar nicht analysierbar sind. Anhang A gibt Beispiele für solche nicht optimalen Videoaufnahmen, welche kaum oder gänzlich ungeeignet sind für ein automatisiertes *Tracking*. Auf eine weitere Optimierung des *Tracking*-Algorithmus wurde daher verzichtet zugunsten der Ausarbeitung einer automatisierten Prozedur zum Filtern der *Trackrohdaten* mit dem Ziel der Bestimmung eines Fisch- bzw. Fischschwarm-Gesamtpfades. Diese Prozedur wird nachstehend erläutert.

Nach der Schätzung möglicher einzelner Bewegungsspuren (*Trackrohdaten*) in jeweiligen Pixelkoordinaten der drei Videoaufnahmen und deren Transformation (inkl. Korrektur der Refraktion) auf die globalen Rinnenkoordinaten erfolgt der zweite Schritt der Methodik zum *Fish-Tracking*, der Bestimmung eines Fisch- bzw. Fischschwarm-Gesamtpfades.

Im Projektteil I wurde folgendes Vorgehen gewählt: Zunächst wurden die drei Kameraaufnahmen einzeln hinsichtlich eines singulären, markanten *Tracks* analysiert. Es wurde für jeden einzelnen

Zeitschritt nur der jeweilige *Track* berücksichtigt, der zum aktuellen Zeitschritt die insgesamt grösste Lebensdauer besitzt – insofern zum aktuellen Zeitschritt Objekte *getrackt* wurden, die zusätzlich mindestens 10 Zeitschritte bzw. 0.4 s Länge aufwiesen. Danach wurden die so gefundenen Wegpunkte jeweils über eine kubische Spline-Interpolation und auch über eine ‚RLOESS‘-Glättung, eine robuste, nach Fehlerquadrat gewichtete Regressionsmethode, verbunden. Wegpunkte, die im Abstand von <25 Zeitschritte bzw. <1 s zu den zuvor bestätigten Wegpunkten für die beiden Interpolationslinien eine euklidische Differenz von <1000 px aufwiesen, wurden zusätzlich als neuer Wegpunkt bestätigt. Dieses Vorgehen führte zu jeweils einer vollständigen, jedoch teilweise fehlerbehafteten Fischspur pro Kameraaufnahme. Im Rahmen einer Synthese der drei *Trackingpfade* wurden diese Fehlerbereiche manuell mittels rudimentärem Graphical User Interface (GUI) definiert und für die weitere Auswertung gelöscht.

Im Projektteil II wurde dieses Vorgehen nun optimiert und vollständig automatisiert. Wie im Projektteil I wurden zunächst die drei Kameraaufnahmen hinsichtlich einzelner, markanter *Tracks* analysiert. Abb. 7 gibt ein Beispiel für eine Vorfilterung, bei der *Tracks* mit einer Lebensdauer von ≥ 20 Zeitschritten bzw. ≥ 0.8 s farblich als ‚pre-filtered‘ gekennzeichnet sind. Erkennbar wird eine wesentliche Ausdünnung des Rohdatensatzes, wobei im Gegensatz zum alten Vorgehen nun zum gleichen Zeitpunkt auch mehrere *Tracks* zulässig sind.

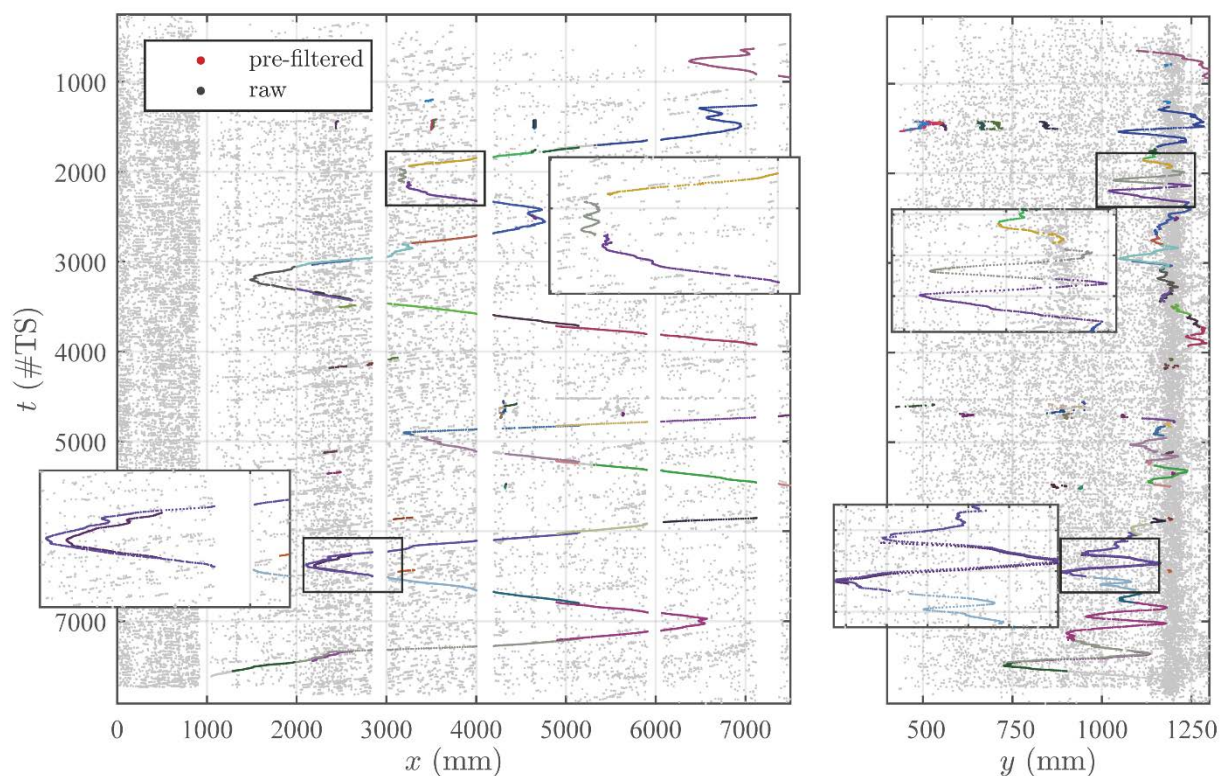


Abbildung 7: Rohdaten und vorgefilterte *Einzeltrackdaten*. Weg-Zeit Diagramm in horizontaler x- und vertikaler y-Richtung zur Synthese der detektierten *Einzeltracks* von Versuch #131 mit Einzelfisch Schneider (vgl. Abb. 5). Graue Punkte geben sämtliche erkannte *Trackpunkte* (Rohdaten inkl. *Fehltracks*), farbige kodierte Punkte geben *Tracks*, welche vorgefiltert wurden über Lebensdauer > 20 TS = 0.8 s (*time step* = TS). Die Fenster vergrössern zwei Bereiche, in denen der automatisierte Algorithmus den ‚echten‘ *Track* im weiteren Verlauf der Filterstufen nur suboptimal vervollständigen wird (vgl. Abb. 8–10).



Eine komplexere Stufe der Filterung setzt im Anschluss bewusst zu stark an und nimmt in Kauf, dass einige korrekte *Tracks* fälschlicherweise zunächst gelöscht werden. Auf diese Weise wird eine klare Trennung von den *Fehltracks* generiert. (Das Übersteuern des Filters wird in späteren Schritten teilweise wieder rückkorrigiert.) Die vorgefilterten Rohdaten der *Tracks* werden hinsichtlich fünf *Einzeltrack*-Charakteristika gefiltert:

- 1) Punkte eines *Tracks* mit einer Lebensdauer von ≥ 20 TS bzw. ≥ 0.8 s und einem Breiten zu Höhenverhältnis des aktuellen BLOb von > 1.5 wurden zunächst generell bestätigt.
- 2) Punkte eines *Tracks* mit einer Länge in x-Richtung von < 200 mm und einem Breiten zu Höhenverhältnis des aktuellen BLOb von > 4.0 wurden gelöscht.
- 3) *Tracks* mit einer Länge in x-Richtung von < 200 mm und einer Lebensdauer von ≥ 20 TS wurden gelöscht.
- 4) *Tracks* mit einem Median der Beschleunigung von < 0.03 m/s² und einer Lebensdauer von ≥ 20 TS wurden gelöscht.
- 5) *Tracks* mit einem Median der Beschleunigung von > 0.15 m/s² und einer Lebensdauer von ≥ 20 TS wurden gelöscht.

Abb. 8 gibt mit den als ‚possible‘ gekennzeichneten *Tracks* ein Beispiel für das Ergebnis dieser etwas komplexeren Stufe der Filterung. Am Beispiel von Abb. 8 zeigt sich auch, dass die Filterkriterien stellenweise korrekte *Tracks* herausfiltern, wie z.B. im Fenster bei #TS = 1800–2300 erkennbar wird. Der dortige *Track* wird herausgefiltert aufgrund zu geringer *Tracklänge* in x-Richtung bzw. aufgrund zu geringer Beschleunigung. Im Anschluss werden die so vorgefilterten Daten gerastert (d.h. gerundet) auf $[\Delta x, \Delta y] = 1$ mm bzw. $\Delta t = 1$ s. Dies bringt den Vorteil, dass Objekterkennungstechniken aus der Bildbearbeitung angewendet werden können. Mittels morphologischer Operationen in *xt*- und *yt*-Ebene werden die Daten gefiltert, um zusammenhängende *Tracks* zu detektieren. In *xt*-Ebene wurde mit einem Rechtekelement jeder Punkt um $[25, 50]$ px erweitert und anschliessend um $[15, 40]$ px erodiert (Basisoperation der morphologischen Bildverarbeitung, Gegenteil von Dilatation). Entstehende Flächen > 5000 px und mit einer Exzentrizität > 0.65 wurden zunächst bestätigt als Flächen aus korrekten *Tracks*. In *yt*-Ebene wurde mit einem Rechtekelement jeder Punkt um $[125, 100]$ px erweitert und anschliessend um $[75, 10]$ px erodiert. Entstehende Flächen > 20000 px und mit einer Exzentrizität > 0.95 wurden zunächst bestätigt als Flächen aus korrekten *Tracks*. Im Anschluss wurden die *Trackpunkte*, die sowohl auf bestimmten Flächen in *xt*- als auch in *yt*-Ebene liegen als echte *Trackpunkte* verifiziert. Abb. 8 gibt ein Beispiel für diese Auswertungsstufe, bei der einzelnen *Tracks* als bestätigte („confirmed“) *Tracks* beurteilt wurden.

Diese bestätigten *Tracks* wurden nun an ihrem Anfang, Ende sowie in bestehenden Lücken erweitert entsprechend der momentanen, über 25 TS (= 1 s) gemittelten *Trackgeschwindigkeiten*. Mittels morphologischer Operationen erfolgte dann eine Suche in der Nähe der *Trackerweiterungen* im Rohdatensatz. Ein Beispiel wird in Abb. 9 gegeben.

Abschliessend wurde der so gefundene finale *Trackdatensatz* mittels ‚RLOESS‘-Verfahren geglättet (Abb. 10).

In Abb. 11 wird eine Seitenansicht der *Tracks* als *Plot* in *xy*-Ebene dargestellt. Gezeigt wird ein vollständiges Weg-Zeit Diagramm des *Tracks* eines einzelnen Schneiders.

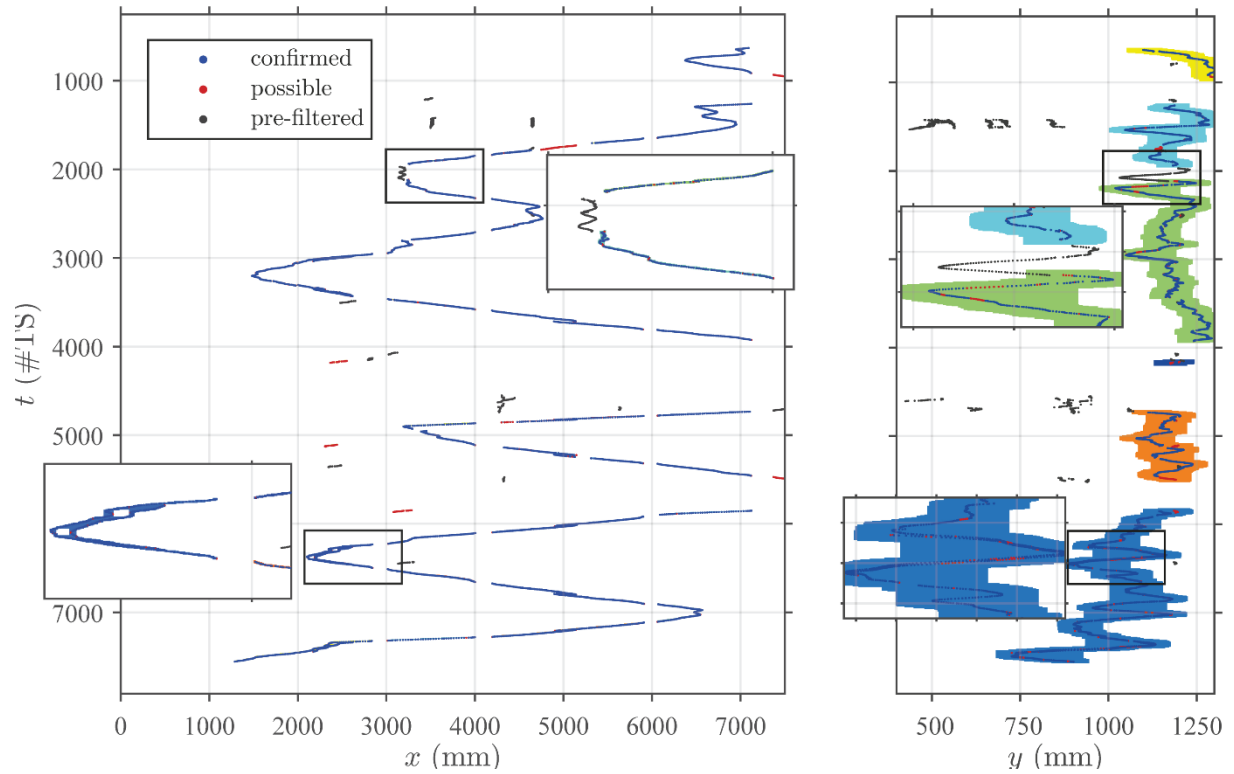


Abbildung 8: Vorgefilterte, mögliche und mittels morphologischer Operationen bestätigte *Trackdaten*. Weg-Zeit Diagramm in horizontaler x- und vertikaler y-Richtung zur Synthese der detektierten *Einzeltracks* von Versuch #131 mit Einzelfisch Schneider (vgl. Abb. 5). Blaue Punkte geben bestätigte *Trackpunkte*, welche aus den vorgefilterten und möglichen *Trackpunkten* bestimmt wurden. Farbige Hintergrundflächen kennzeichnen über morphologische Operationen gewonnene Vernetzungsbereiche von *Einzeltracks*. Die Fenster vergrößern zwei Bereiche, in denen der automatisierte Algorithmus den ‚echten‘ *Track* im weiteren Verlauf der Filterstufen nur suboptimal vervollständigen wird (vgl. Abb. 7, 9, 10).

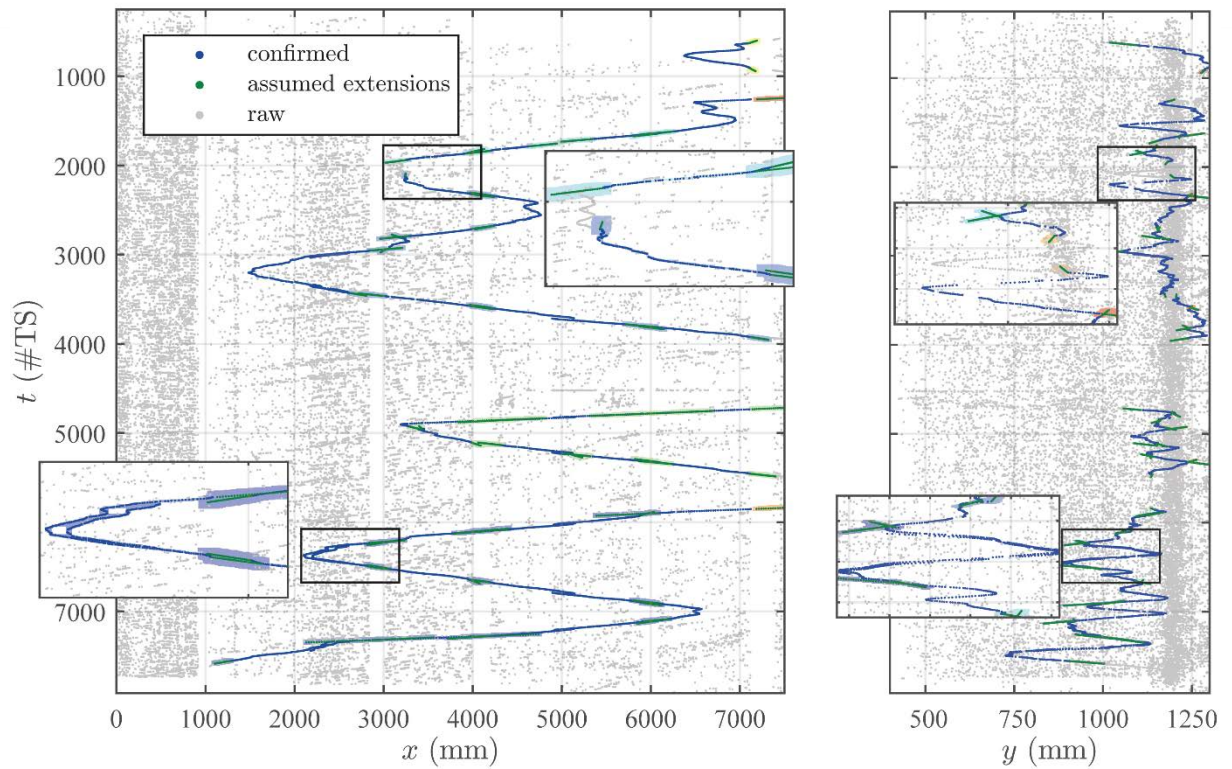


Abbildung 9: Rohdaten, bestätigte *Trackdaten* und deren extrapolierte, mögliche Erweiterungen. Weg-Zeit Diagramm in horizontaler x - und vertikaler y -Richtung zur Synthese der detektierten *Einzeltracks* von Versuch #131 mit Einzelfisch Schneider (vgl. Abb. 5). Farbige Hintergrundflächen kennzeichnen über morphologische Operationen gewonnene Vernetzungsbereiche für *Trackpunkte* aus Rohdaten. Die Fenster vergrössern zwei Bereiche, in denen der automatisierte Algorithmus den ‚echten‘ *Track* im weiteren Verlauf der Filterstufen nur suboptimal vervollständigen wird (vgl. Abb. 7, 8, 10).

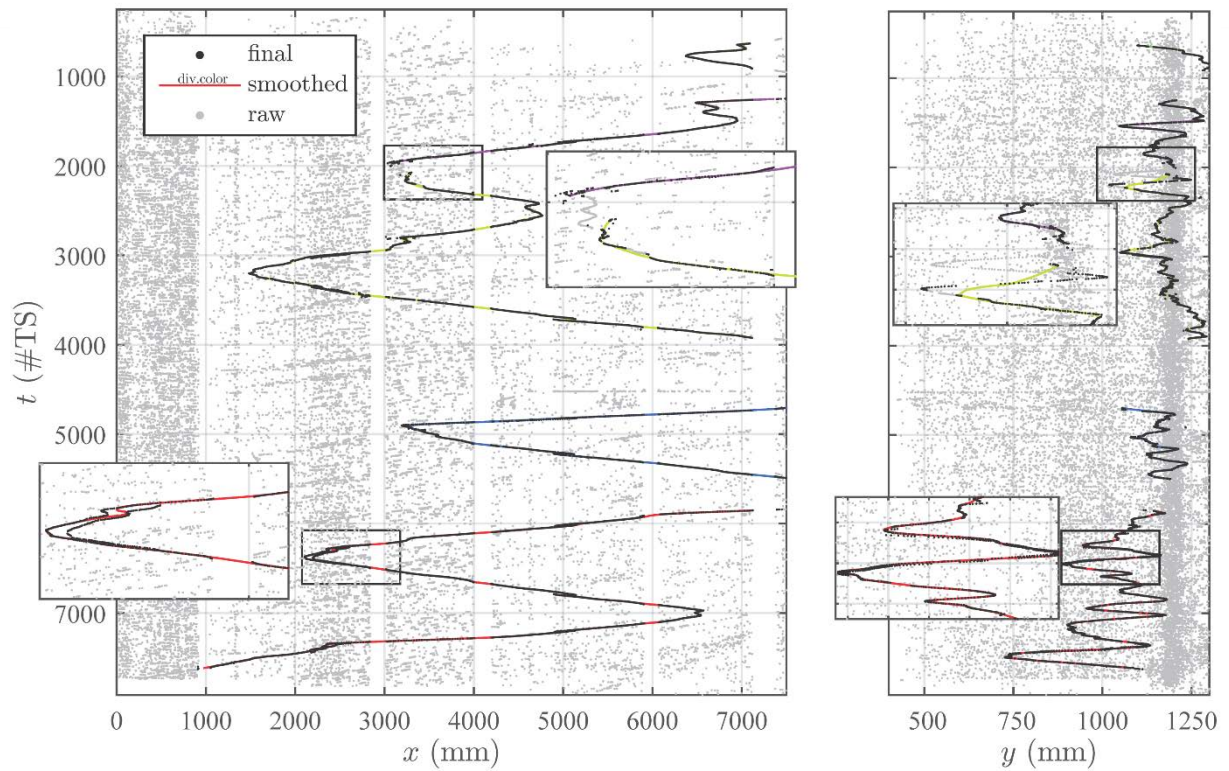


Abbildung 10: Rohdaten, finale *Trackpunktdaten* sowie deren Glättung. Weg-Zeit Diagramm in horizontaler x - und vertikaler y -Richtung zur Synthese der detektierten *Einzeltracks* von Versuch #131 mit Einzelfisch Schneider (vgl. Abb. 5). Die Fenster vergrössern zwei Bereiche, in denen der automatisierte Algorithmus den ‚echten‘ Track im weiteren Verlauf der Filterstufen nur suboptimal vervollständigt (vgl. Abb. 7–9).

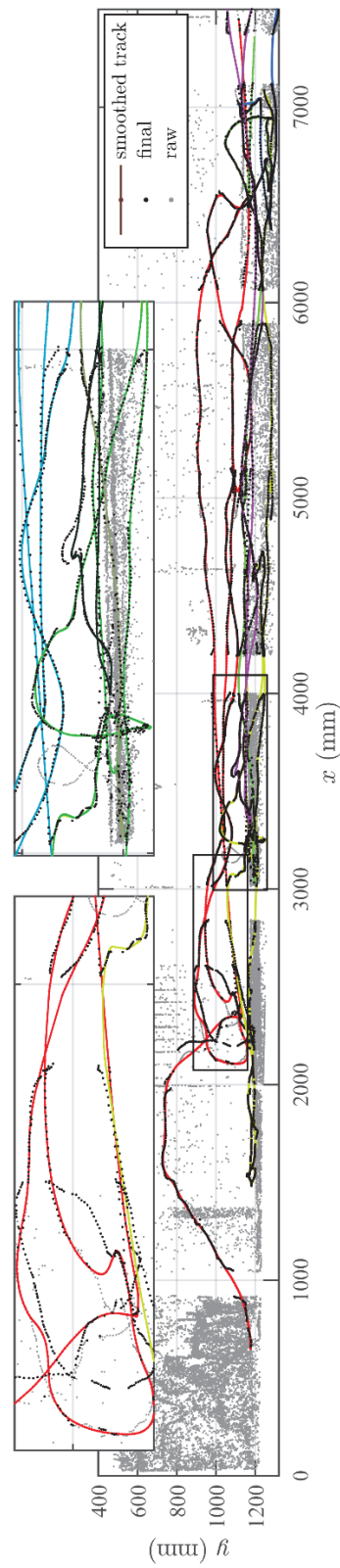


Abbildung 11: Finale *Trackpunktdaten*, deren Glättung (vgl. Farben in Abb. 10) und Rohdaten. Darstellung als xy-plot. Versuch #131 mit Einzelfisch Schneider (vgl. Abb. 5, 7-10).

Ergebnisse

Nachstehend werden exemplarische Analyse-Ergebnisse vorgestellt, wie sie nun mit erfolgreich detektierten *Einzeltracks* von Einzelfischen bzw. Fischschwärmen gewonnen werden können.

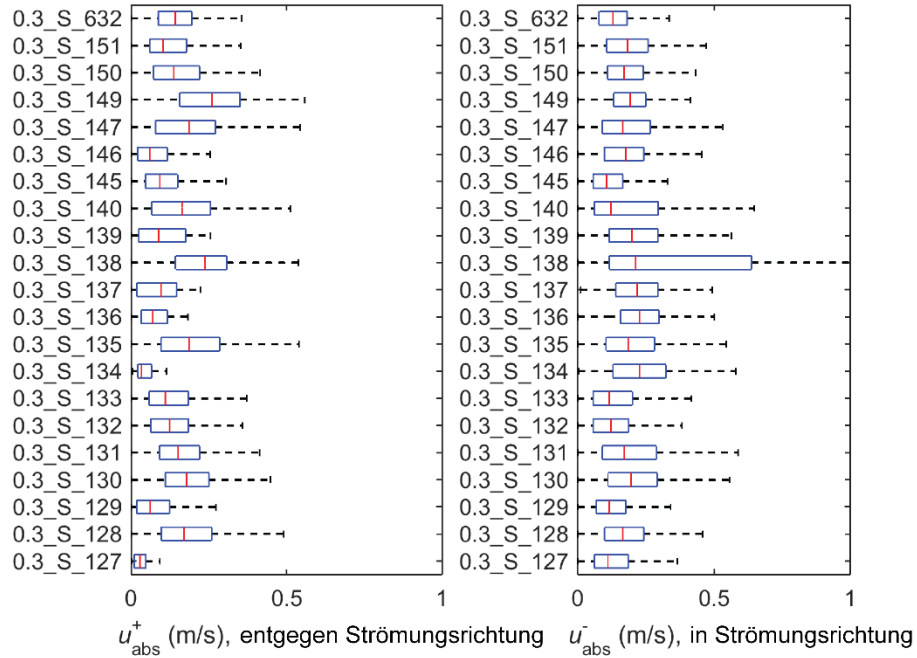
In Abb. 12 und 13 werden *Whiskerplots* zur mittleren Schwimmgeschwindigkeit während Schwimmphasen entgegen, u_{abs}^+ , und in Strömungsrichtung, u_{abs}^- , dargestellt. Die Schwimmgeschwindigkeit gibt dabei die absolute Geschwindigkeit im Verhältnis zum feststehenden Leitrochen bzw. zur Rinne. Für eine vom Fisch „gefühlte“ Geschwindigkeit im strömenden Wasserkörper hingegen müsste zusätzlich die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers berücksichtigt werden. Diese ist jedoch aufgrund des eingebauten Leitrechens lokal und temporär unterschiedlich und nicht für jeden Einzelversuch bekannt. Sie nimmt tendenziell von oberstrom bis zum Ende des Leitrechens zu (vgl. [5]). Die mittlere Fließgeschwindigkeit der Anströmung in Abb. 12 ist $U = -0.30$ m/s. (Das negative Vorzeichen entsteht aufgrund der Definition der x-Achse entgegen der Hauptströmungsrichtung, vgl. Abb. 3.) In Abb. 13 erfolgt eine analoge Darstellung für eine mittlere Anströmungsgeschwindigkeit von $U = -0.80$ m/s. Ergänzende Analysedarstellungen für eine mittlere Anströmungsgeschwindigkeit von $U = -0.60$ m/s werden im Anhang A2 gegeben. In Tendenz schwimmen die untersuchten Fischarten mit ca. der Hälfte der mittleren Fließgeschwindigkeit. Dabei zeigen die schwimmstärkeren Barben ein höheres Spektrum bei Geschwindigkeitsabweichungen von U .

Abb. 14 zeigt den Mittelwert der Aufenthaltswahrscheinlichkeit P am Leitrochen für eine mittlere Anströmungsgeschwindigkeit von $U = -0.30$ m/s und $U = -0.80$ m/s, bezogen auf eine Rastermatrix 50×50 mm², mit

$$P = \sum (\text{Trackpunkte in lokaler Rasterzelle}) / \sum (\text{Trackpunkte}). \quad (\text{Gl. 1})$$

Ausgewertet wurden die geglätteten finalen *Tracks* (vgl. Abb. 11). Ein Wert von $P = 0.0025$ für eine Rasterzelle bedeutet z.B., dass während 0.25% der *Gesamttrackdauer* der *Trackpunkt* genau in dieser Zelle liegt. (Hinweis: Aus Visualisierungsgründen wurde $P > 0.5\%$ als $P = 0.05$ und $P < 0.05\%$ als $P = 0$ geplottet.) Ergänzende Analysedarstellungen für eine Anströmungsgeschwindigkeit von $U = -0.60$ m/s werden im Anhang A3 gegeben. Sogenannte *Heatmaps* als 2D-Darstellungen bieten die Möglichkeit, die Präsenzwahrscheinlichkeit der Fische während eines Vorbeischwimmens am Leitrochen zu analysieren. Im Vergleich zu den Barben nutzen die Schneider einen wesentlich grösseren Bereich beim Vorbeischwimmen am Rechen. Bei der Deutung der bei einer mittleren Anströmungsgeschwindigkeit von $U = -0.80$ m/s erzielten Ergebnisse ist jedoch zu beachten, dass die Darstellung nur auf einer geringen Anzahl von auswertbaren Versuchen basiert. Weiter ist markant bei sämtlichen *Tracks*, dass die Fische sohnlah am Rechen entlang schwimmen. Dies gibt einen Hinweis für eine mögliche effektive Leit-Wirkungsweise durch den Einbau eines Bodenleitbleches.

(a)



(b)

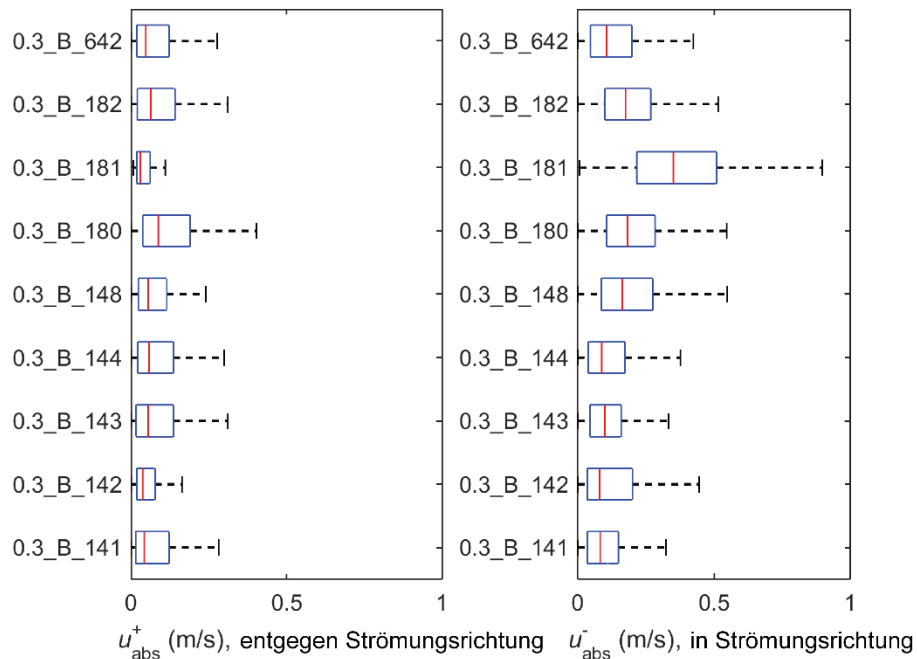
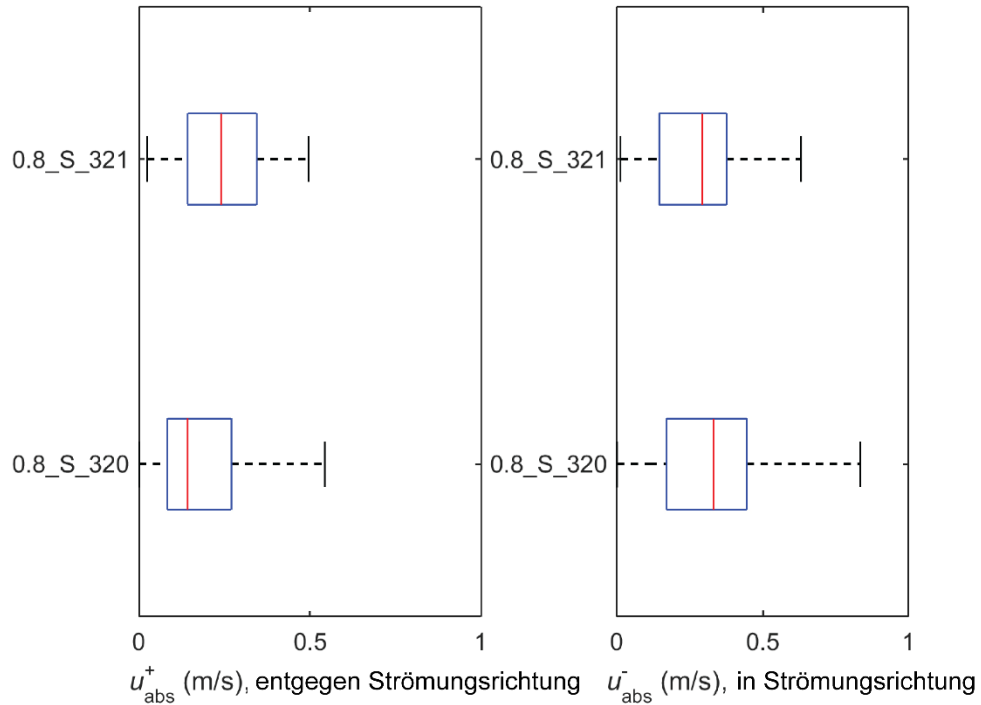


Abbildung 12: Whiskerplots zur mittleren Schwimmgeschwindigkeit aus geglätteten finalen *Tracks* während Schwimmphasen entgegen und in Strömungsrichtung von (a) Schnaidern (Gesamt: 20 Versuche, ,15_45_5_0.3_S') und (b) Barben (Gesamt: 11 Versuche/ 8 auswertbar, ,15_45_5_0.3_B'). Mittlere Geschwindigkeit der Anströmung $U = -0.30$ m/s. (Das negative Vorzeichen entsteht aufgrund der Definition der x-Achse entgegen der Hauptströmungsrichtung.) Markierung und *Whisker*: In jedem Kasten gibt die zentrale, rote Markierung den Median und das Rechteck das untere und obere Quartil. Die *Whisker* gehen bis zu den berücksichtigten Extremwerten. Untersucht wurden nur Zeiträume ab erstem Erscheinen bei $x = 6'500$ mm (oberstrom Rechen).

(a)



(b)

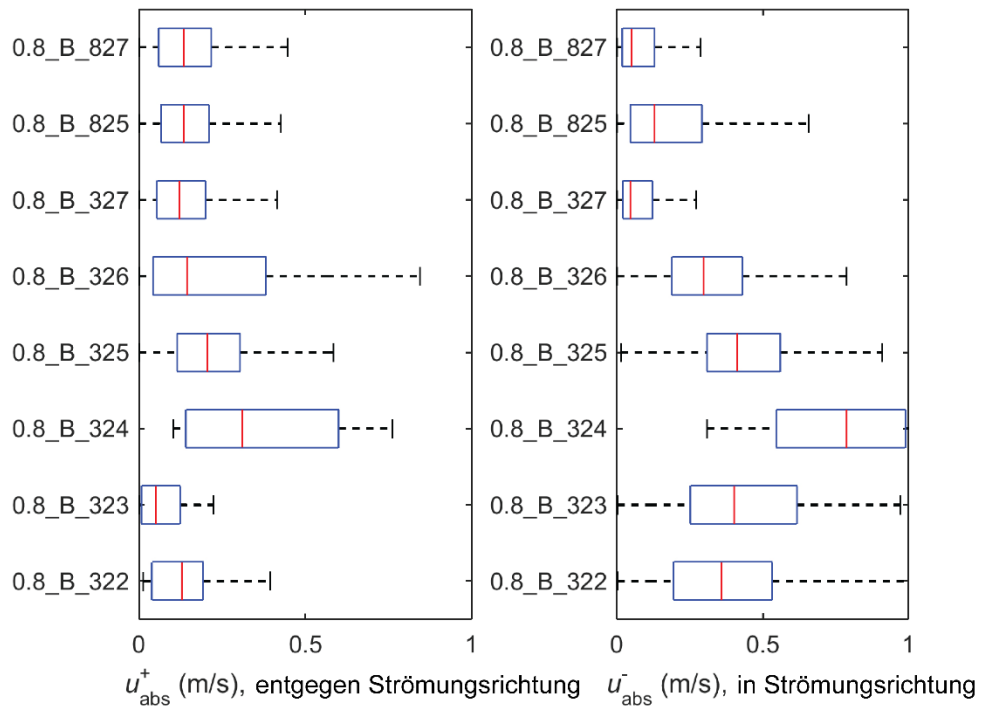


Abbildung 13: Whiskerplots zur mittleren Schwimmgeschwindigkeit aus geglätteten finalen Tracks während Schwimmphasen entgegen und in Strömungsrichtung von (a) Schnaidern (Gesamt: 2 Versuche, ,15_45_5_0.8_S') und (b) Barben (Gesamt: 6 Versuche, ,15_45_5_0.8_B'). Mittlere Geschwindigkeit der Anströmung $U = -0.80$ m/s. Markierung und Whisker: siehe Abb.12.

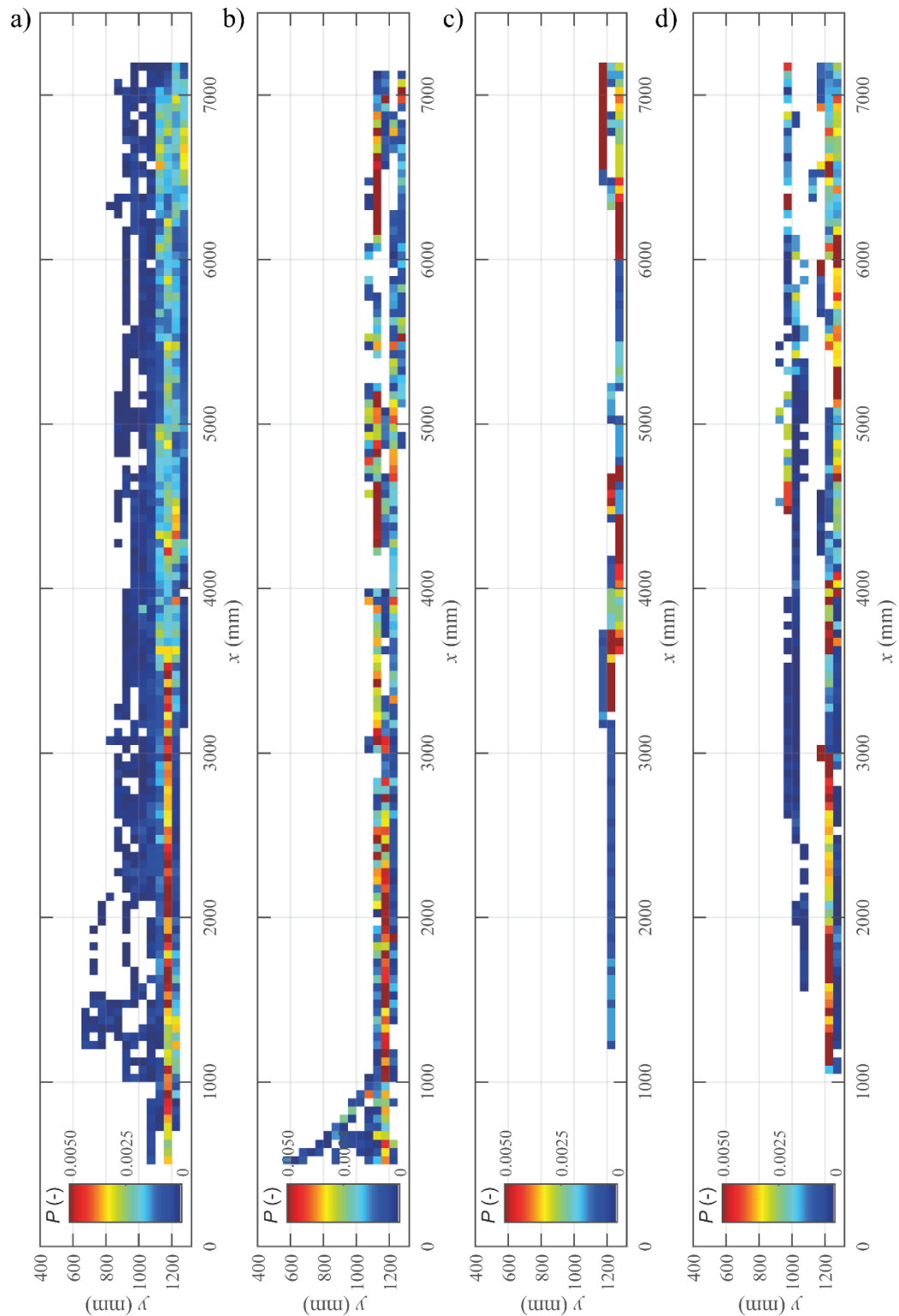


Abbildung 14: Gemittelte Aufenthaltswahrscheinlichkeit P am Leitrechen von (a) Schneidern (20 Versuche) und (b) Barben (8 Versuche) während Messreihe „15_45_5_0.3“, sowie (c) Schneidern (2 Versuche) und (d) Barben (6 Versuche) während Messreihe „15_45_5_0.8“, je als Rastermatrix 50x50 mm².

Diskussion

Nach Abschluss der hydraulischen Versuche mit Fischen im Sommer 2014 und mit dem Vorliegen eines optimierten *Trackingalgorithmus* für die Videoaufnahmen kann das *Fish-Tracking* Modul nun gezielter auf eine Gesamtanalyse der im Labor gewonnenen Datensätze angewendet werden. Abschliessend können auf Basis der Ergebnisse des automatisierten *Fish-Tracking* Moduls die artenspezifischen Verhaltensmuster für sämtliche Testfischarten ausgewertet und zusammengefasst werden. In Kombination mit der durch die Versuche ebenfalls gegebenen Fischleiteffizienz können dann Optimierungsoptionen für die getesteten Fischleiteinrichtungen gegeben werden.

Nachstehende Untersuchungen waren im Rahmen des Projektteiles II zunächst angedacht, mussten jedoch nach ersten Detailbetrachtungen zeitnah verworfen werden:

- Eine Optimierung des *Quellcodes* zur Erkennung der Einzelfische auf Basis von sogenannten *Feature-Point-Detection* Methoden (z.B. SURF, MSER) konnte tatsächlich nur für vereinzelte Bildframes angewendet werden. Bei der Analyse von grösseren Datensätzen zeigte sich jedoch, dass die Auflösung und Schärfe der Bilder des Gesamtdatensatzes bei weitem nicht ausreichend war, so dass diese Methoden hier versagten. Es konnte so also kein Weg aufgezeigt werden, um auch Einzelfische von einem Scharm zu separieren und dann deren Spur zu verfolgen.
- Ein Wechsel auf andere Programmiersprachen als MATLAB zwecks Verkürzung der für die Auswertung benötigten Rechnerzeit wurde nicht weiter verfolgt. Nach Optimierung des MATLAB Quellcodes in der Projektphase II erschien dieser zu komplex, als das ein einfacher Wechsel auf andere Programmiersprachen im Rahmen der vorgegebenen Projektzeit und dessen Budgets möglich wäre.
- Auf die Programmierung eines rudimentären GUI, wurde verzichtet. Die Auswertung von grösseren Datensätzen über ein *Batchprocessing* wurde stattdessen über MATLAB Skripte vorgenommen, was weniger Programmierzeit in Anspruch nahm und somit im Rahmen der vorgegebenen Projektzeit und dessen Budgets blieb.

Für das im aktuellen Projektteil II automatisierte Verfahren liegen die mittleren *Track*-Fehler resultierend aus Refraktion mit einer konservativen Abschätzung bei etwa <10% bzw. absolut <0–15 cm in der Horizontalen bzw. bei <15% bzw. absolut <0–5 cm in der Vertikalen. Für nachfolgende Projekte besteht hier deutliches Optimierungspotential – entweder durch präzisere Dokumentation von Aufstellung und Orientierung der Kameras oder durch Installation eines 3D-Videometriesystems. Nichtsdestotrotz erscheint die vollständige, d.h. lückenlose Erfassung des *Tracks* und der Rheotaxis eines Einzelfisches oder gar simultan von mehreren Fischen als grosse Herausforderung. Dabei sollte immer der Aufwand im Verhältnis zum verwertbaren Nutzen stehen.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Fische sind bei der Abwärtswanderung über Flusskraftwerke einer Verletzungsgefahr ausgesetzt. Das Wissen um das Fischverhalten im Nahbereich von Abstieghilfen ist für deren Beurteilung und Optimierung entscheidend. Bis dato erfolgte die Beobachtung des Fisch-Schwimmverhaltens jedoch meist rein qualitativ. Im Rahmen der Projekteile I und II wurde ein automatisiertes *Fish-Tracking* Modul entwickelt und hinsichtlich einer Vollautomatisierung optimiert, mit welchem das Wanderverhalten



direkt aus 2D-Videoaufnahmen an einem ethohydraulischen Labormodell ausgewertet werden kann. Basis gibt die *Computer Vision System Toolbox™* der Software MATLAB. Das *Tracking*-Modul detektiert den Schwimmpfad eines Einzelfisches oder, insofern die Fische sehr nah beieinander schwimmen, eines Schwarmmittelpunktes. Eine eindeutige Separierung von vollständigen Pfaden einzelner Schwarmfische stellt bei einer reinen 2D Betrachtung allerdings eine grosse Herausforderung dar. Das automatisierte *Fish-Tracking* Modul wird im Projektteil II für eine exemplarische Analyse des Schwimmverhaltens in Abhängigkeit von vier Fischarten erfolgreich angewendet. Das neu entwickelte *Fish-Tracking* Modul steht somit nunmehr zur Anwendung für detaillierte Analysen grösserer Gesamtdatensätze bereit.

Bei vergleichbaren zukünftigen Aufnahmen kann durch die Wahl von hochwertigeren Kameras und deren gezielterem Einsatz zur Bildauswertung (Kamerafixierung, Synchronisierung) die Effektivität des *Fish-Tracking* weiter verbessert werden. Bei der Verwendung der Kameras aus verschiedenen, sich überlagernden Blickwinkeln kann ein *Fish-Tracking* auch im 3D-Raum angewendet werden. So könnte dann auch der bisher unvermeidbare Messfehler durch Refraktion an den Grenzschichten Luft-Glas-Wasser herausgefiltert werden. Eine Optimierung des Quellcodes zur Erkennung der Einzelfische auf Basis von sogenannten *Feature-Point-Detection* Methoden (z.B. *SURF*, *MSER*) scheint hingegen keinen effektiv anwendbaren Weg aufzuzeigen, um auch Einzelfische von einem Scharm zu separieren und zu detektieren. Mit dem Aufsetzen eines Graphical User Interfaces (GUI) auf das *Fish-Tracking* Modul wäre es möglich, die neu entwickelte Methodik auch einem breiteren Nutzerkreis zur Verfügung zu stellen.

Die *Trackanalysen* aus dem Projektteil II für jede Fischart wird nun genutzt, um mögliche Korrelationen zwischen Fischverhalten und hydraulischer Charakteristik der verschiedenen Konfigurationen der Fischleiteinrichtungen zu untersuchen. Wir gehen davon aus, dass das Ergebnis dieser Untersuchung letztendlich einen wertvollen Beitrag sowohl zur hydraulisch effizienteren Gestaltung als auch zu einem fisch-freundlicheren Design von Fischleiteinrichtungen leisten wird.

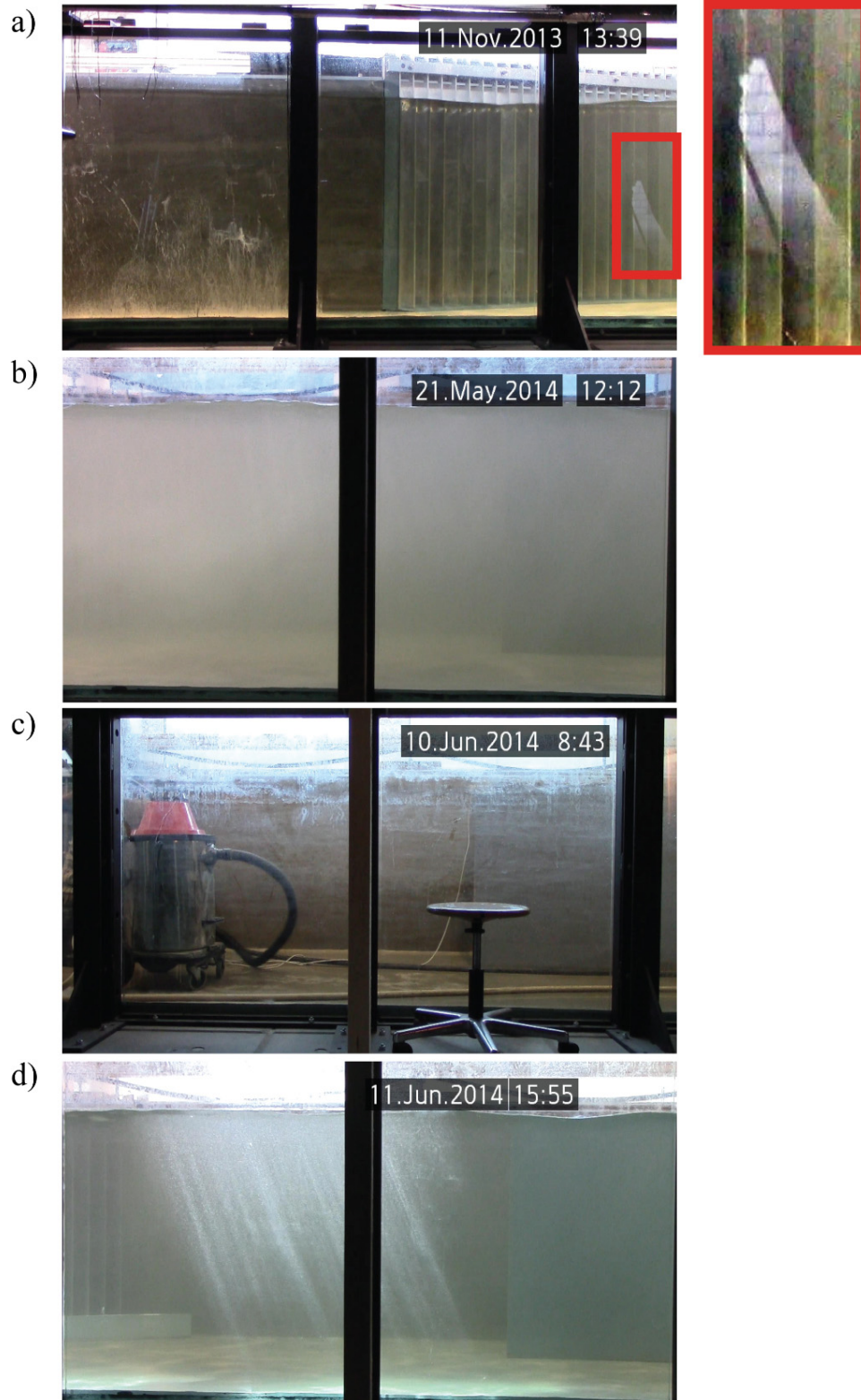
Referenzen

- [1] Detert, M., Weitbrecht, V. (2012). Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains – a free stand-alone tool. *River Flow 2012*, R.M. Muñoz (Ed.), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62129-8, pp. 595-600
- [2] Detert, M., Weitbrecht, V. (2013). User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN. In: *Advances in Science and Research*, S. Fukuoka, H. Nakagawa, T. Sumi, H. Zhang (Eds.), Taylor & Francis Grp., London, ISBN 978-1-138-00062-9
- [3] Detert, M., Weitbrecht, V. (2015). *A low-cost airborne velocimetry system: proof of concept*, Journal of Hydraulic Research, DOI: 10.1080/00221686.2015.1054322
- [4] Detert, M., Trachsel, J., Weitbrecht, V. (2015). *Quadrokooperbasierte Messung von Oberflächengeschwindigkeiten*, Wasser Energie Luft, 107(3), 211–217
- [5] Kriewitz, C.R. (2015). Leiteichen an Fischabstiegsanlagen: Hydraulik und fischbiologische Effizienz. In: *VAW-Mitteilungen 230, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)*, R. M. Boes, (Ed.), ETH Zürich, Schweiz
- [6] MATLAB (2014), <http://www.mathworks.ch>

Anhang

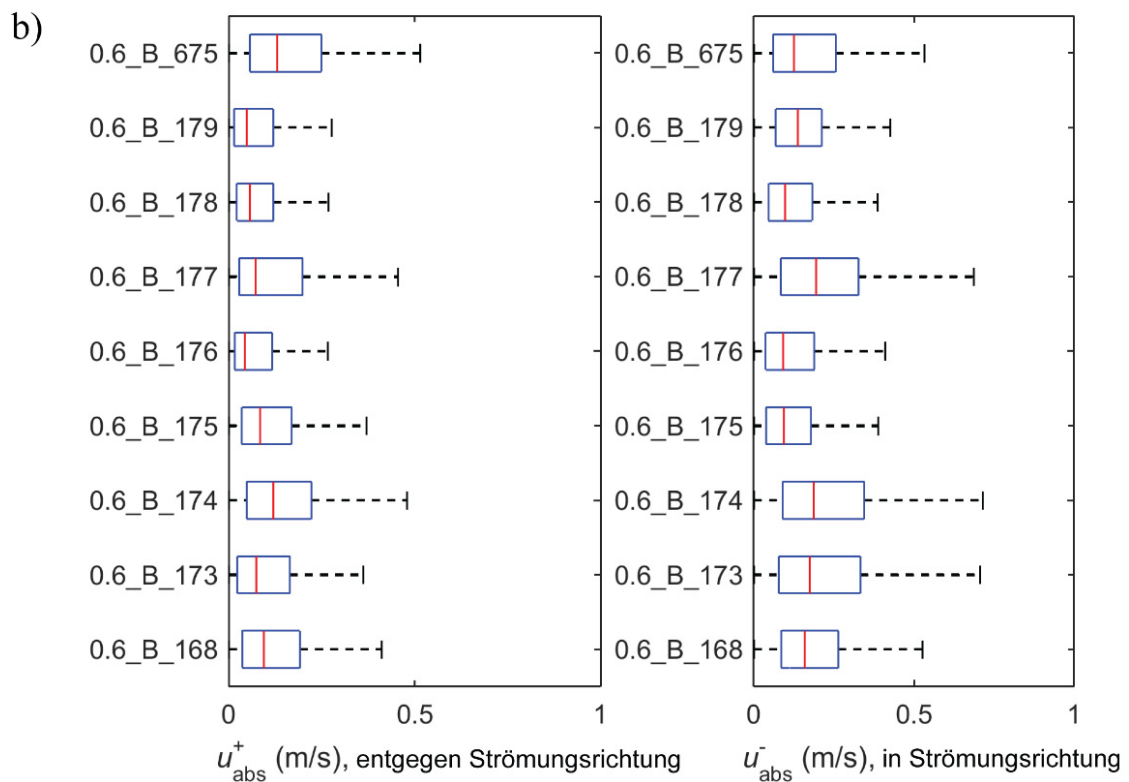
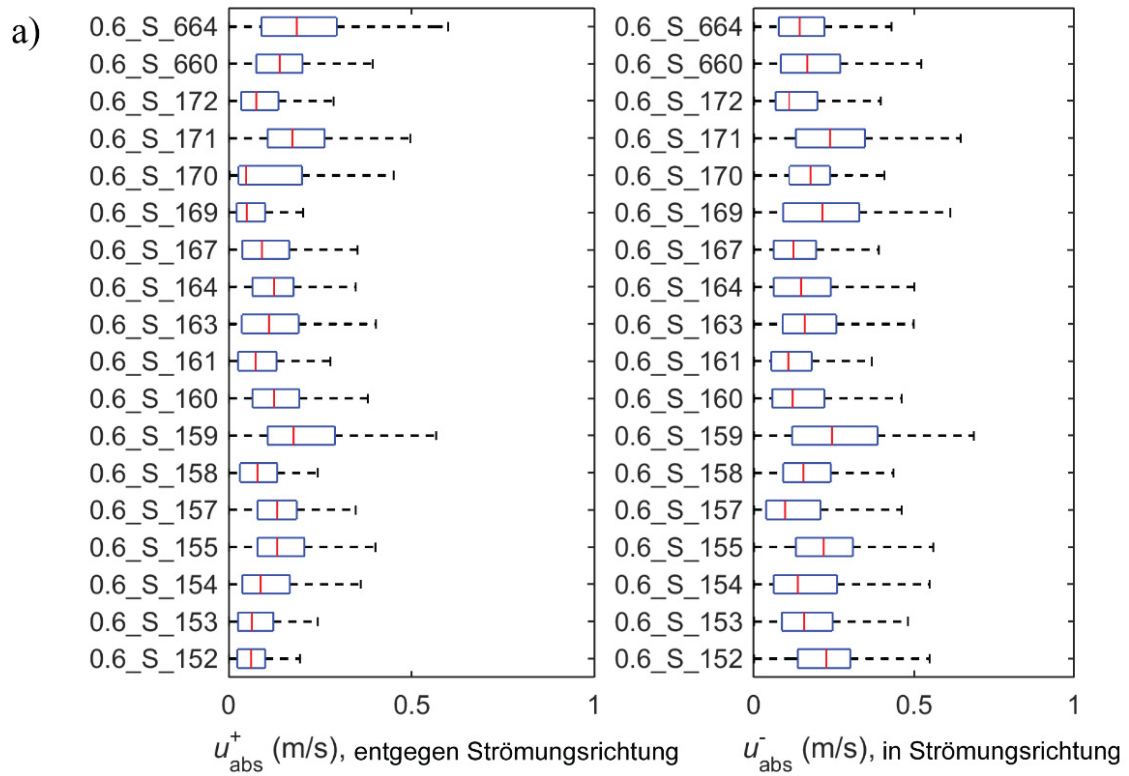
- [A1] Beispiele für nicht optimale Videoaufnahmen.
- [A2] *Whiskerplots* zur mittleren Schwimmgeschwindigkeit. Mittlere Geschwindigkeit der Anströmung $U = -0.60$ m/s.
- [A3] Gemittelte Aufenthaltswahrscheinlichkeit P am Leiteichen von Schneidern, Barben, Aalen sowie Forellen, je während Messreihe „15_45_5_0.6“.

A1 Beispiele für nicht optimale Videoaufnahmen

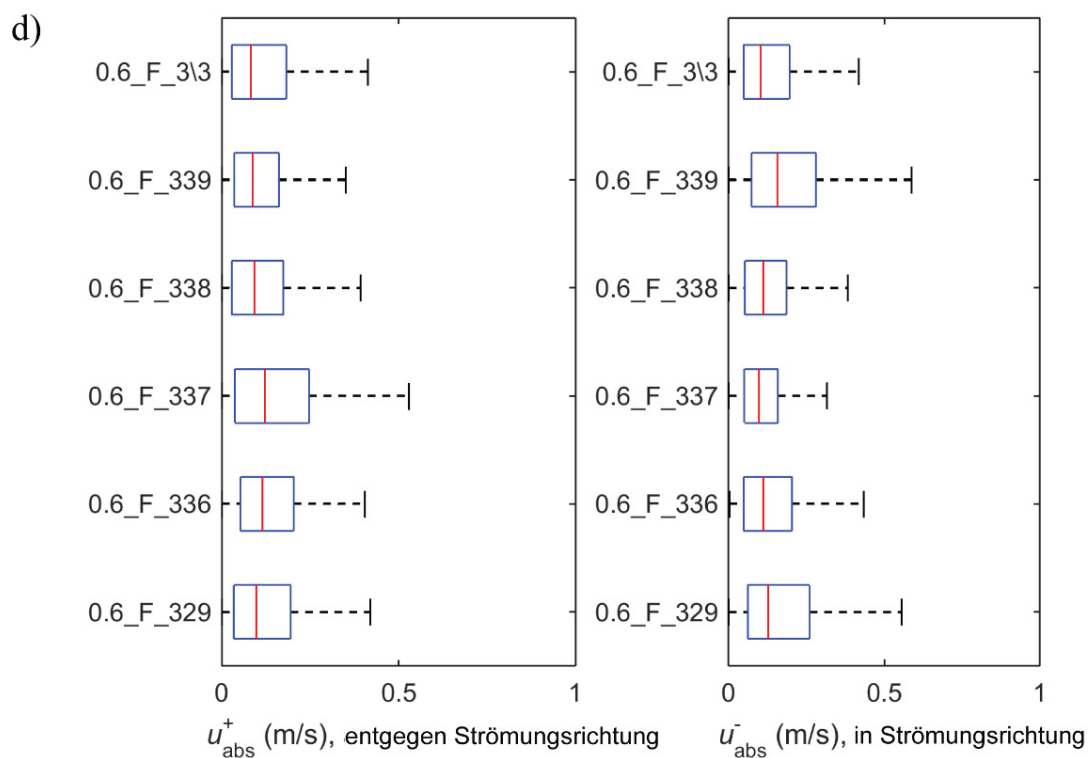
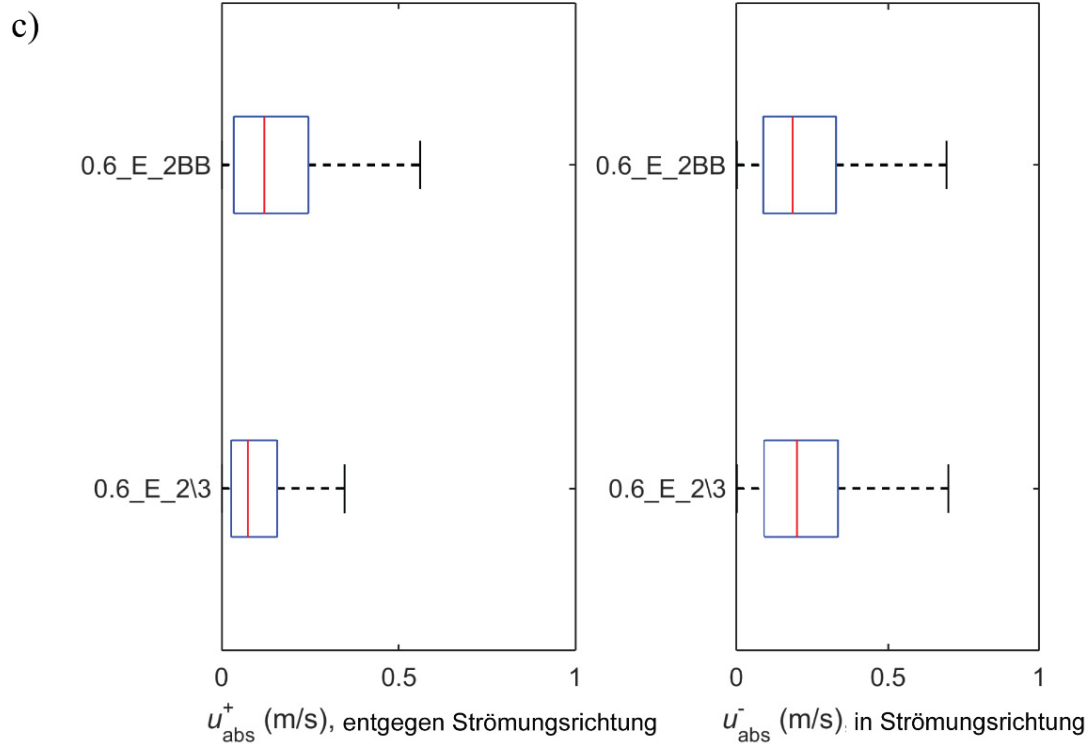


Anhang A1: Beispiele für nicht optimale Videoaufnahmen, welche für ein automatisiertes *Tracking* kaum bzw. gänzlich ungeeignet sind. (a) Reflektion an Glasscheibe bis hin zum Mauerwerk eines Nachbarmodells durch fehlender Abdunkelung, (b) starke Trübung und fehlende Referenzpunkte, (c) Fehlausgelöste Videoaufnahme, welche Automatisierung erschwert, (d) starke Reflektionen durch Sonnenstrahlen.

A2 Whiskerplots zur mittleren Schwimmgeschwindigkeit

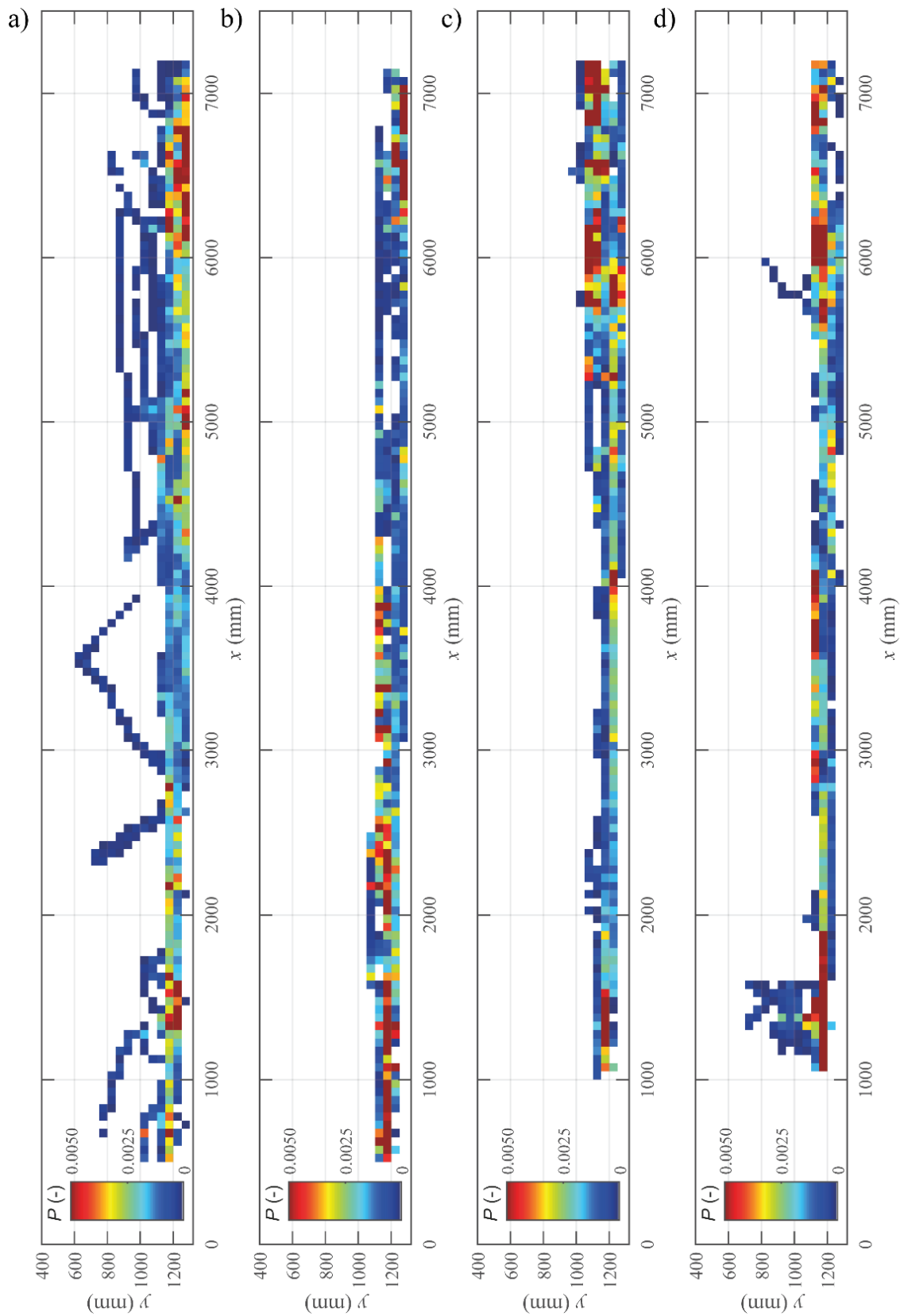


(Beschreibung siehe nächste Seite)



Anhang A2: *Whiskerplots* zur mittleren Schwimmgeschwindigkeit aus geglätteten finalen *Tracks* während Schwimmphasen entgegen und in Strömungsrichtung von (a) Schneidern (Gesamt: 19 Versuche/ 16 auswertbar, ,15_45_5_0.6_S'), (b) Barben (Gesamt: 8 Versuche/ 8 auswertbar, ,15_45_5_0.6_B'), (c) Aale (Gesamt: 5 Versuche/ 2 auswertbar, ,15_45_5_0.6_A') und (d) Forellen (Gesamt: 9 Versuche, 6 auswertbar, ,15_45_5_0.6_F'). Mittlere Geschwindigkeit der Anströmung $U = -0.60$ m/s. Markierung und Whisker: siehe Abb.11.

A3 Gemittelte Aufenthaltswahrscheinlichkeit P am Leitrechen von Fischen



Anhang A3: Gemittelte Aufenthaltswahrscheinlichkeit P am Leitrechen von (a) Schneidern (19 Versuche), (b) Barben (8 Versuche), (c) Aalen (5 Versuche) sowie (d) Forellen (9 Versuche), je während Messreihe „15_45_5_0.6“. Darstellung als Rastermatrix 50x50 mm².