

Der Transport von lebenden Fischen – Entwicklung und Optimierung wichtiger Wasserparameter beim kommerziellen Forellentransport mit und ohne Belüftung

Tamara Wind¹, Stephan Hofer², Alexander Brinker¹, Mark Schumann¹

¹ Fischereiforschungsstelle Baden-Württemberg, Argenweg 50/1, 88085 Langenargen

² Hofer Forellen GmbH, Stuttgarterstr. 66, 78727 Oberndorf a.N.

Korrespondierender Autor

Mark Schumann
Mark.Schumann@lazbw.bwl.de

Eingereicht: 04.08.2020

Begutachtet: 18.08.2020

Erhalt Überarbeitung: 18.09.2020

Akzeptiert: 18.09.2020

Zitierhinweis

Wind, T., Hofer, S., Brinker, A., Schumann, M. (2021): Der Transport von lebenden Fischen – Entwicklung und Optimierung wichtiger Wasserparameter beim kommerziellen Forellentransport mit und ohne Belüftung. Zeitschrift für Fischerei 1: Artikel 5: 1-10.

DOI: [10.35006/fischzeit.2020.5](https://doi.org/10.35006/fischzeit.2020.5)

Verantwortlicher Redakteur:

Robert Arlinghaus
ra@zeitschrift-fischerei.de

Finanzierung

Keine

Interessenkonflikt

Keiner

Ergänzendes Material

Keines

Copyright

© Autor(en) 2021, veröffentlicht unter der creative commons Lizenz [CC-BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) www.zeitschrift-fischerei.de

Zusammenfassung

Fische werden in Deutschland meist vom Fischzüchter zum Mastbetrieb, Verarbeitungsbetrieb oder zum Besatzgewässer transportiert. Die jahrzehntelange Erfahrung der Transporteure sorgt dabei in der Regel für einen tiergerechten Ablauf. Die genaue Entwicklung der Wasserparameter während eines Transportvorganges ist bisher allerdings nur unzureichend untersucht. Die vorliegende Studie zielte darauf ab, ein umfassendes Monitoring sämtlicher fischrelevanter Wasserparameter während einer repräsentativen Reihe von Lebendfischtransporten durchzuführen.

Im Zuge mehrerer kommerzieller Transportfahrten von Regenbogenforellen wurden Messreihen mit zeitlich hoher Auflösung durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass einzelne Wasserparameter sich weit über die gängigen Richtwerte hinaus anreicherten. Während sich Kohlendioxid beim unbelüfteten Transport in einer annähernd exponentiellen Sättigungsfunktion akkumulierte und Höchstwerte von bis zu 80 mg/l erreichte, stieg die Ammoniumkonzentration gleichzeitig linear bis auf Werte von 5 mg/l an. Sauerstoff war stark übersättigt, der Gesamtdruck insgesamt deutlich unterhalb der Sättigung. Der pH-Wert sank mit steigender CO₂-Konzentration kontinuierlich und verlangsamte somit den Anstieg von Ammoniak.

In belüfteten Transporten stellte sich das Bild anders dar: Hier wurde durch einen Onboard-Kompressor gezielt atmosphärische Luft zugeführt und sämtliche Messungen unter ansonsten gleichen Bedingungen wiederholt. Im Ergebnis reduzierte sich die finale CO₂-Konzentration im Transportbehälter um 50 mg/l auf unter 20 mg/l, während der Verlauf der Sauerstoffsättigung gleichmäßiger ausfiel. Die finale Ammoniakkonzentration war aufgrund des weniger stark abnehmenden pH-Werts allerdings mehr als dreimal so hoch.

Eine Analyse von physiologischen Stressparametern ergab kein eindeutiges Bild bezüglich der Unterschiede zwischen den Transportvarianten und zeigte insgesamt für das Tierwohl unkritische Werte. Allgemein lässt sich die Empfehlung ableiten, die Intensität der Belüftung an die jeweilige Situation anzupassen, wie etwa die Ausgangsparameter des genutzten Transportwassers oder idealerweise gesteuert über Online-Monitoring von pH und Gasparametern.

Schlagworte: Fischtransport, Wasserqualität, Stressparameter, Entgasung, Fischzucht

Abstract

In Germany, fish are mostly transported from the fish breeder to the fattening farm or to the stocking waters. The decades of experience of the carriers generally ensure that the process is animal-friendly. The exact development of the water parameters during a transport process has, however, been insufficiently investigated. The aim of the present study was to carry out a comprehensive monitoring of all fish-relevant water parameters during a representative series of live fish transports. In the course of several commercial trips transporting rainbow trout, series of measurements were carried out with high temporal resolution. It was found that individual water parameters sometimes accumulated far beyond the usual recommended values. While carbon dioxide accumulated in an almost exponential saturation function during non-ventilated transport and reached maximum values of up to 80 mg/l, the ammonium concentration simultaneously increased linearly to values of 5 mg/l. Oxygen was heavily oversaturated, while the overall gas pressure was well

below saturation. The pH value decreased continuously with increasing CO₂-concentration and thus slowed the rise of un-ionized ammonia.

The picture looked different in ventilated transports: Here, atmospheric air was supplied to the transport container by an onboard compressor and all measurements were repeated under identical conditions. As a result, the final CO₂-concentration in the transport container was reduced by 50 mg/l to below 20 mg/l, while the course of oxygen saturation was more even. In contrast to the non-ventilated transports, the total gas pressure showed an increasing tendency, but remained below saturation and thus critical concentrations. However, the final ammonia concentration was more than three times as high due to the less pronounced decrease in pH.

An analysis of physiological stress parameters did not give a clear picture of the differences between the transport treatments and showed non-critical values for animal welfare. A general recommendation derived from this study is the adaption of the ventilation intensity to the respective situation initial parameters of the transport water used or ideally controlled via online monitoring of pH and gas parameters.

Keywords: fish transport, water quality, stress parameters, degassing, fish farming

Fazit für die Praxis

Beim Transport von Forellen, wie er üblicherweise in Deutschland durchgeführt wird, reichern sich einzelne Wasserparameter stark an. Vor allem CO₂ und Ammoniak können in dem geschlossenen System in wenigen Stunden Konzentrationen erreichen, die deutlich außerhalb des für Forellen empfohlenen Wertespektrums liegen. Für die relativ geringen Expositionszeiten, wie sie beim Transport auftreten, ist eine konkrete Abschätzung der Auswirkungen auf Fische bisher zwar nicht möglich, da überwiegend Daten für chronische Expositionen vorliegen, trotzdem ist die Vermeidung von extremen Wasserwerten auch hier empfehlenswert und durchaus möglich. Das Ausmaß der Anstiege wird auch von den Ausgangsparametern des Transportwassers bestimmt und kann durch Entgasung effektiv beeinflusst werden. Hohe initiale pH-Werte begünstigen eine übermäßige Anreicherung von Ammoniak, weshalb hier tendenziell ein gewisser Anstieg von CO₂ wünschenswert ist, also eine moderate Belüftung angestrebt werden sollte. Bei niedrigen Ausgangswerten sollte die Belüftungsintensität jedoch stärker gewählt werden, um einem weiteren Absinken des pH-Wertes entgegenzuwirken und gleichzeitig die CO₂-Anreicherung zu kontrollieren. Mit einem flexiblen Belüftungssystem in Kombination mit der Kenntnis der Ausgangsparameter des Wassers und unter Einbeziehung weiterer Faktoren, wie der Länge des Transports, können effizient Akkumulationsspitzen relevanter Wasserparameter im Transportbehälter vermieden werden.

1. Einleitung

Im Jahre 1913 ließ sich Josef Hofer aus dem baden-württembergischen Oberndorf den ersten Lebendfischtransportbehälter mit Sauerstoffzufuhr patentieren und leistete damit einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung der modernen Fischzucht (Patent Nr. D.R.P. 245509 1913). Auch heute hat der Transport von lebenden Fischen in der Aquakultur nach wie vor eine große Bedeutung und gehört zum Alltagsgeschäft (TACCHI et al. 2015; PROSKE & LUKOWICZ 2018). Gerade für Fischzuchtbetriebe, die Satzische aus eigener Erzeugung an Mastbetriebe liefern, wo sie dann auf die gewünschte Größe zum Speisefisch herangezogen werden, sind Lebendtransporte von Fischen Routine. Hierbei handelt es sich überwiegend um Regenbogenforellen oder andere heimische Salmonidenarten, die zwischen den einzelnen Betrieben oder Betriebsteilen transportiert werden. Ein weiterer Anlass, Fische zu befördern, sind die Besatzbestrebungen vieler Angelvereine, die überwiegend im Frühjahr und Herbst verschiedenste Fischarten entweder zur angelfischereilichen Nutzung oder der Arterhaltung in ihre Gewässer verbringen (VOLLMANN-SCHIPPER 1975).

Neben dem sogenannten Handling, das Arbeitsschritte wie Sortieren, Keschern und Wiegen einschließt, die im Vorfeld eines jeden Transportes notwendig sind, stellt auch der Transportvorgang an sich eine außergewöhnliche Situation für Fische dar, der mit gewissem Stress verbunden ist

(SOUTHGATE 2008). Aus Gründen des Tierwohles und der Tiergesundheit ist dieser nach guter fachlicher Praxis möglichst fischschonend zu gestalten, doch auch wirtschaftliche Überlegungen müssen angestellt werden. Daraus folgt unweigerlich, dass beim Transport höhere Fischdichten in Kauf genommen werden müssen, als es in der Haltungseinheit für gewöhnlich üblich ist (SCHÄPERCLAUS & LUKOWICZ 2018). Transportiert werden Fische meist in speziellen Behältern aus GFK, die entweder auf Anhängern oder LKWs montiert sind. Die Zufuhr von technischem Sauerstoff ist bei kommerziellen Fischtransporten obligatorisch, eine Überwachung von Wasserparametern findet bisher kaum statt. Die Dauer der meisten Transporte bewegt sich im Bereich von wenigen Stunden, wobei in der Regel kein Wasseraustausch erfolgt (SOUTHGATE 2008). Folglich ist davon auszugehen, dass sich einige Wasserparameter mit zunehmender Dauer im Transportbehälter anreichern. Dies betrifft insbesondere die Endprodukte des Energiestoffwechsels Kohlendioxid und Ammonium, die von Fischen über die Kiemen ausgeschieden werden (PIPER et al. 1982; BROMAGE et al. 1992; WEDEKIND et al. 2020). Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass die empfohlenen Höchstwerte dieser Stoffe während eines Transports teils signifikant überschritten werden können. Beim Kohlendioxid ist dies laut existierender Literatur mit einer besonderen Dynamik der Fall, so dass bereits kurz

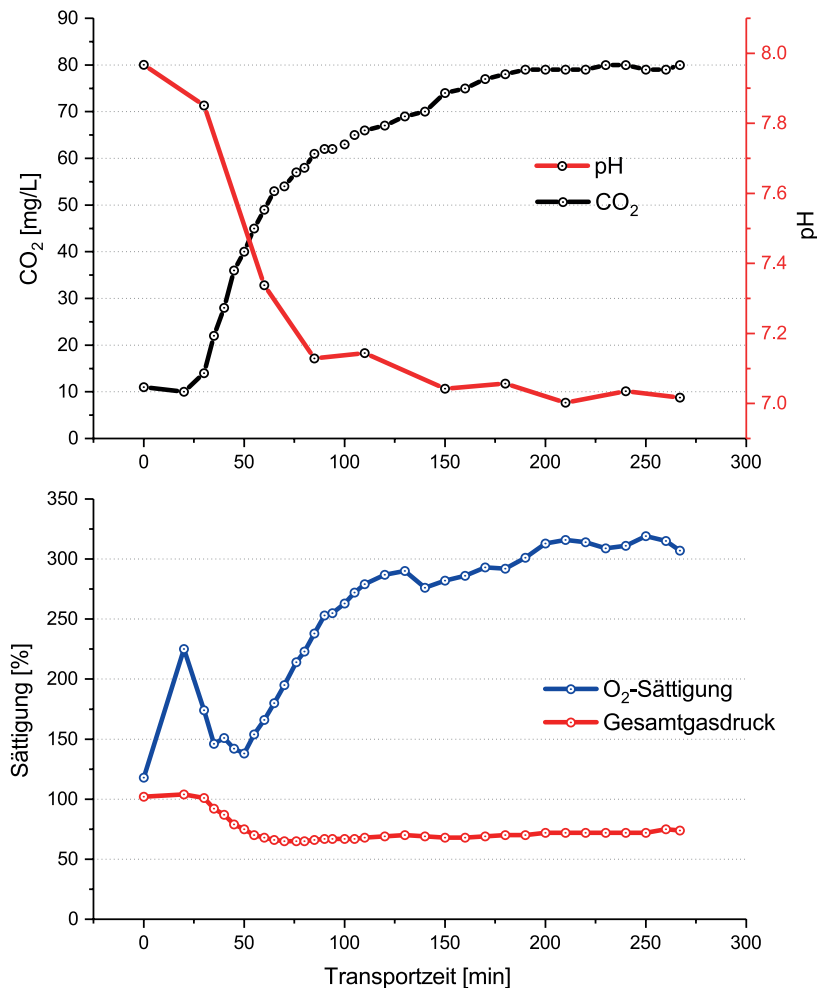


Abbildung 1

Entwicklung der Gasparameter und des pH-Wertes während eines exemplarischen kommerziellen Transportes von lebenden Forellen mit einem Schnittgewicht von ca. 400 g und einer Besatzdichte von ca. 250 kg/m³.

nach Beginn des Transportes (30-60 min) mit deutlich erhöhten Konzentrationen zu rechnen ist (WEDEMEYER 1996; KING 2009; TANG et al. 2009). Um die Ammoniumausscheidungen der Fische zu minimieren, wird die Fütterung in der Regel 2-3 Tage vor einer Transportfahrt ausgesetzt (SOLOMON & TAYLOR 1979), dennoch deuten bisherige Studien auch hier auf einen deutlichen, wenn auch weniger steilen Anstieg als beim CO₂ hin (TANG et al. 2009). Da das für Fische weitaus toxischere Ammoniak in einem Dissoziationsgleichgewicht mit Ammonium steht (THURSTON et al. 1981), ist vor allem der pH-Wert das Zünglein an der Waage, der dieses Gleichgewicht maßgeblich beeinflusst, selbst jedoch wiederum stark von der CO₂-Konzentration abhängt (TAYLOR & SOLOMON 1979). Diese Ausführungen verdeutlichen bereits, dass ein komplexes Zusammenspiel einzelner Wasserparameter mit zahlreichen Wechselwirkungen in einem geschlossenen Transportsystem besteht, deren Intensität neben Besatzdichte und Dauer des Transportes auch von der Beschaffenheit des verwendeten Wassers abhängt. Weitere wichtige Parameter, wie z.B. der Gesamtgasdruck und die Sauerstoffsättigung gilt es ebenfalls im Blick zu behalten, da wenig über ihre Entwicklung beim Transport bekannt ist.

Die überwiegende Anzahl der Studien zum Lebendfischtransport beschränken sich auf die Untersuchung von Stressparametern im Blut (BARTON et al. 1980; BARTON 2000; SAMPAIO & FREIRE 2016), systematische Untersuchung von Wasserparametern in diesem Zusammenhang fehlen bisher.

Aus diesem Grund ist noch weitgehend unklar, in welchem Ausmaß und mit welcher Dynamik sich diese Stoffe im Laufe eines Fischtransportes anreichern und welche indirekten Effekte sich durch Wechselwirkungen mit anderen Wasserparametern ergeben.

In der Praxis werden seit einiger Zeit vermehrt Onboard-Kompressoren beim kommerziellen Transport zur Belüftung des Transportwassers eingesetzt, vor allem um den CO₂-Gehalt zu senken. Diese Idee ist nicht ganz neu und solche Systeme kamen bereits vor einigen Jahrzehnten zum Einsatz (BROMAGE et al. 1992), haben sich aber zumindest nicht flächendeckend in Deutschland etabliert. Aktuelle Studien über die Effizienz des CO₂-Austrages solcher Systeme und welcher Einfluss sich dadurch auf andere Parameter ergibt, fehlen bisher.

Für Salmoniden existieren zwar belastbare Richtwerte der für die Haltung wichtigsten Wasserparameter (COLT 2006; TIMMONS et al. 2018), diese haben allerdings nur eingeschränkte Aussagekraft für die relativ kurze Expositionsdauer während des Transportes von wenigen Stunden.

Ziel der Studie war es deshalb, die Entwicklung der verschiedenen Wasserparameter im Laufe eines typischen kommerziellen

Fischtransportes zu untersuchen. Hierfür wurden mehrere randomisiert ausgewählte Transportfahrten begleitet und alle relevanten Wasserparameter mit hoher zeitlicher Auflösung erfasst.

Im zweiten Teil der Studie wurde der Effekt der Belüftung während des Transportes untersucht. Zu diesem Zweck wurde ein wöchentlich stattfindender Fischtransport, bei dem eine vergleichbare Fischdichte und Transportdauer gewährleistet werden konnte, mit und ohne Einsatz eines Onboard-Kompressors begleitet.

2. Material und Methoden

2.1. Transport, Transportstrecke und Beladung

Die begleiteten Fischtransporte wurden von der Firma „Hofer Forellen GmbH“ in Oberndorf durchgeführt (www.hofer-forellen.de). Die Transportstrecke der initialen Messungen variierte je nach Standort des Kunden, das Fas-

sungsvermögen des Transportbehälters betrug hier ca. 1,6 m³ (Länge x Breite x Höhe der Wassersäule: 210 cm x 90 cm x 85 cm, bei 10 cm Freibord). Um die Stressparameter vergleichen zu können, wurde eine standardisierte Streckenlänge begleitet. Dabei betrug die Entfernung immer etwa 180 km (ausgehend vom Startpunkt im Betriebsteil in Epfendorf) bei einer Gesamttransportzeit von ca. 3,5 Stunden. Die Verladung fand am frühen Morgen von ca. 05:00–06:00 Uhr statt. Während des Ladevorgangs wurden die Fischtanks bis zum Transportbeginn mit Frischwasser aus der Zuchtanlage versorgt. Bei Transporten mit Belüftung wurde das System kurz vor dem Transport zugeschaltet und je nach Lademenge justiert (im Schnitt 11 l/min atmosphärische Luft). Die Belüftung befindet sich seitlich im Behälter in einem von den Fischen abgetrennten Bereich und arbeitet nach dem Prinzip einer Mammutpumpe bzw. eines Lufthebers, das Wasser wird von oben nach unten durchmischt. Die Lademenge im Probetank betrug immer zwischen 400–500 kg Regenbogenforellen (Schnittgewicht 400–850 g). Die zu transportierenden Fische wurden zwei Tage vor dem Transport ausgenüchert. Der Transportbehälter hatte ein Fassungsvermögen von ca. 2 m³ (Länge x Breite x Höhe der Wassersäule: 210 cm x 98 cm x 95 cm bei 10 cm Freibord).

2.2. Beprobung und Analyse der Wasserparameter

CO₂, O₂ und der Gesamtgasdruck wurden kontinuierlich während der Fahrt bestimmt (CO₂ Portable und Handy Polaris, OxyGuard International A/S, Farum, Dänemark). Für die spätere Bestimmung von Ammonium, Nitrit und Nitrat im Labor wurden während der Fahrt Wasserproben (Intervall 30 min) durch eine manuelle Pumpe (Kraftstoffpumpe mit Pumpball) entnommen, der pH-Wert wurde dann direkt bestimmt (pH 320 pH Elektrode SenTix 41, WTW, Weilheim, Deutschland). Um ein Fortschreiten der Nitrifikation zu unterbinden, wurde diese mit Zugabe von 0,16 g Nitrifikationshemmer (Formel 2533, TCMP, Hach, Düsseldorf, Deutschland) gehemmt. Die Proben wurden vor der Analyse filtriert (Nalgene MN615 ¼, Ø 150 mm). Gesamtammoniumstickstoff (TAN), Nitrat und Nitrit (Nitrat Küvetten-Test LCK 339, Hach GmbH, Weinheim, Deutschland; Nitrit-Test, 1.14776.0001, Merck KGaA, Darmstadt Deutschland) wurden photometrisch bestimmt (IGKB 2000/ DR 6000 UV-VIS Spektralphotometer, Hach GmbH, Weinheim, Deutschland). Der NH₃-Gehalt wurde unter Angabe des pH-Wertes und der Wassertemperatur rechnerisch mit Hilfe des Ablaufwasser-Rechners ermittelt (www.lazbw.de). Zusätzlich wurde die Alkalinität mittels Titrationsverfahren bestimmt (ISO 9963-1:1994), die Wasserhärte wurde photometrisch ermittelt (Küvetten-Test LCK 327, Hach GmbH, Weinheim, Deutschland).

2.3. Blutentnahme und Bestimmung der Stressparameter

Für die Untersuchung der Stressindikatoren im Blut wurden je zehn Fische vor und nach dem Transport fachgerecht ge-

tötet und unmittelbar ca. 2 ml venöses Blut aus der Kaudalvene entnommen. Der Blutglukosegehalt wurde direkt nach der Blutabnahme gemessen (ACCU CHEK Aviva, Roche Diagnostics GmbH, Mannheim, Deutschland). Ein Teil des Blutes wurde in Lithium-Heparin Röhrchen (25IU/ml Blut, Sarstedt AG & Co. KG, Numbrecht, Deutschland) überführt. Hieraus wurde Blut entnommen und der Hämatokrit vor Ort durch Zentrifugation bestimmt (10 min bei 12.500 rpm, HEMATOCRIT 210, Andreas Hettich GmbH und Co. KG, Tuttlingen, Deutschland).

Die Blutprobe wurde für 10 min bei 3.100 rpm zentrifugiert (Mini Fuge PLUS, STARLAB International GmbH, Hamburg, Deutschland), das gewonnene Plasma mit einer Pipette extrahiert und bei -20 °C eingefroren.

Die Harnstoffkonzentration wurde im Blutplasma bestimmt (LT-UR 0100, Labor und Technik LT-Sys, Berlin, Deutschland; Spektrophotometer ND-2000 UV-Vis, Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, Massachusetts, USA).

2.4. Statistik

Sämtliche statistischen Analysen wurden mit JMP Pro 15 (SAS Institute, North Carolina, USA) durchgeführt. Als Signifikanzniveau wurde $p < 0,05$ festgelegt (* = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$).

Die Daten wurden zunächst auf Normalverteilung getestet (Shapiro-Wilk). Im Fall einer Normalverteilung wurde ein t-Test angewandt, nicht-normalverteilte Daten wurden mit einem Wilcoxon-Test analysiert (SOKAL & ROHLF 1994).

Die Blutparameter wurden mit dem folgenden linearen, parametrischen Modell analysiert:

$$y_{ijk} = \mu + a_i + b_j + (ab)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

wobei „ y_{ijk} “ der bewertete Parameter ist; „ μ “ ist der allgemeine Mittelwert; „ a “ steht für den Belüftungsmodus und „ b “ für das Gewicht; „ $(ab)_{ij}$ “ ist die Interaktion zwischen den unterschiedlichen Faktoren; „ ϵ_{ijk} “ gibt den zufälligen Residuenfehler an. Im Fall von nicht normalverteilten Residuen wur-

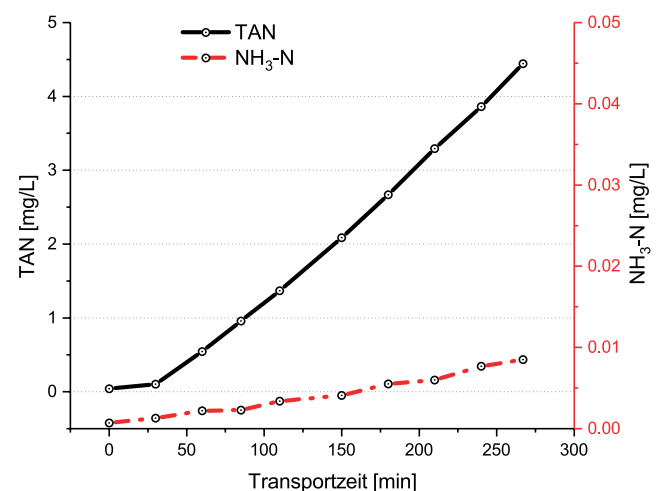


Abbildung 2

Entwicklung der Konzentration von TAN und NH₃-N während eines exemplarischen kommerziellen Transportes von lebenden Forellen mit einem Schnittgewicht von ca. 400 g und einer Besatzdichte von ca. 250 kg/m³.

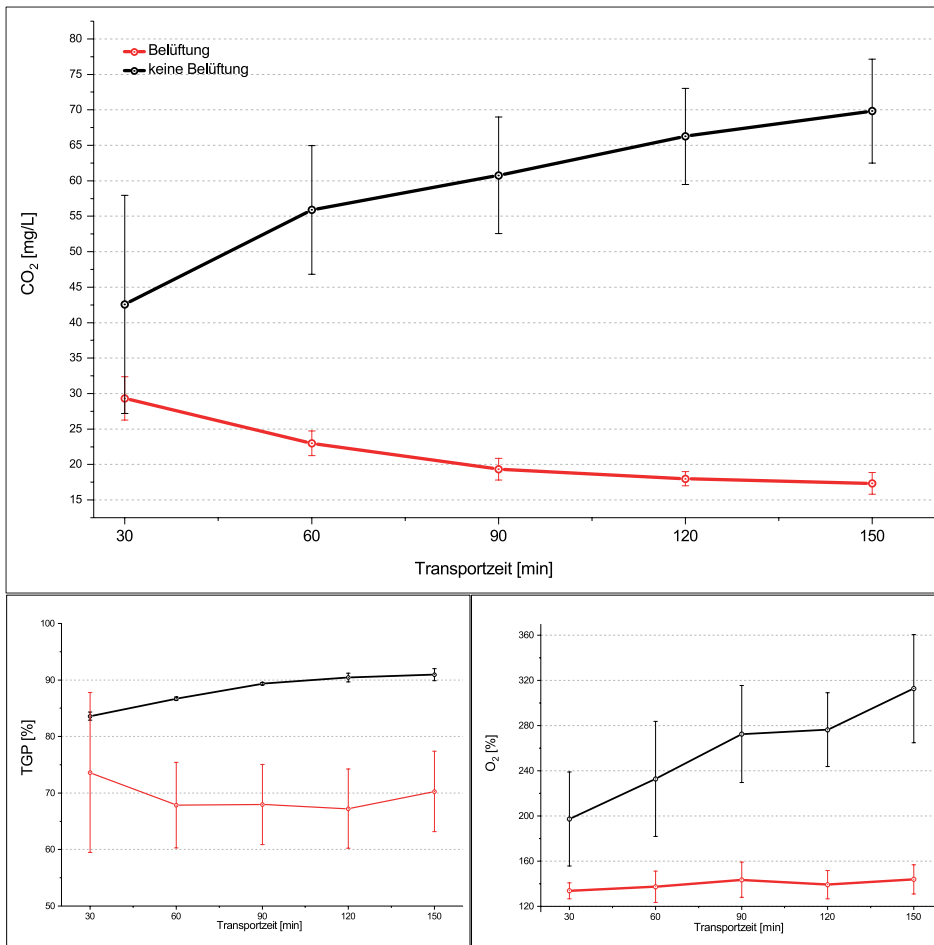


Abbildung 3

Vergleich der Gasparameter CO_2 , Gesamtgasdruck (TGP) und O_2 mit ($n=3$) und ohne Belüftung ($n=7$) während kommerzieller Transporte von lebenden Forellen mit einer Besatzdichte von ca. 250 kg/m^3 .

den die Daten mittels des Box-Cox-Verfahrens transformiert (SAKIA 1992). Der Post-hoc-Vergleich für zwei Faktorstufen erfolgte mit Hilfe des Student-t-Tests. Weiterhin wurden die Messgruppen auf Unterschiede in den Blutparameter vor und nach dem Transport untersucht, ebenso wie die Unterschiede nach den beiden Transporttypen. Dies geschah anhand einer Kontrast-Analyse. Für den Vergleich von mehr als zwei Werten wurde der Tukey-HSD-Test verwendet (HAYTER 1984).

3. Ergebnisse

3.1. Typische Entwicklung der Wasserparameter im Verlauf eines Fischtransportes

Ausgehend von der Konzentration in der Haltungseinheit von etwa 10 mg/l stieg der CO_2 -Gehalt in den ersten 100 min des Transports drastisch bis auf über 60 mg/l an, wonach sich der Anstieg deutlich verlangsamte und die Konzentration nach 200 min etwa 80 mg/l betrug, anschließend jedoch relativ stabil blieb. Eine gegenläufige Entwicklung ist beim pH-Wert zu beobachten, der hier anfangs bei knapp 8 lag

und nach 100 min auf etwa 7,1 absank, sich danach nur noch relativ geringfügig veränderte. Initial zeigte der Sauerstoffgehalt eine leichte Übersättigung von 120 %, während diese nach 100 Minuten bereits auf 250 % angestiegen war und sich im weiteren Verlauf auf etwa 300 % einpendelte. Der Gesamtgasdruck im Haltungswasser war nahezu bei 100 %, befand sich also im Gleichgewicht, sank dann innerhalb der ersten 60 Minuten deutlich auf Werte um 75 % Sättigung ab und blieb bis zum Ende des Transport annähernd auf diesem Niveau. Der Gesamtammoniumstickstoff (TAN) zeigte nach kurzer Zeit einen starken linearen Anstieg, der sich kontinuierlich bis zum Transportende fortsetzte und in einem finalen Wert von etwa $4,5 \text{ mg/l}$ resultierte (Abb. 2). Der NH_3 -Anstieg verlief ebenfalls während des gesamten Transportzeitraums linear, allerdings weit weniger steil als beim TAN.

3.2. Weitere Wasserparameter

Die gemessenen Nitrat- und Nitritkonzentrationen blieben stets unterhalb der für Fische problematischen Werte und reicherten sich auch nicht relevant während des Transportes an. Die maximal gemessene Nitratkonzentration betrug 7 mg/l , die maximale Nitritkonzentration $0,05 \text{ mg/l}$. Die Alkalinität des Transportwassers betrug zwischen 5,5 und 6,1 und die Wasserhärte zwischen 45 und 50 dH° (Grad deutscher Härte). Beide Parameter veränderten sich während der Fahrt nicht und wurden somit nur initial erfasst. Die Temperatur des Transportwassers lag, je nach Jahreszeit, zwischen 8-11 °C und änderte sich im Verlaufe der Fahrt nur geringfügig.

3.3. Vergleich der Entwicklung von Kohlendioxid und Gesamtgassättigung zwischen belüfteten und nicht-belüfteten Tanks

Abbildung 3 zeigt die Entwicklung der CO_2 -Konzentrationen mit und ohne zugeschaltete Onboard-Belüftung. Durch die Belüftung konnte eine effektive CO_2 -Entgasung mit Werten deutlich unter 20 mg/l nach 3,5 Stunden Transportzeit erreicht werden, während sich im nicht belüfteten Behälter im gleichen Zeitraum bis zu $70 \text{ mg CO}_2/\text{l}$ anreicherten. Sauer-

stoff war im nicht belüfteten Behälter deutlich übersättigt und stieg auf Spitzenwerte von über 300 %, wobei die Belüftung den Wert insgesamt auch hier deutlich absenkte und für einen konstanteren Verlauf sorgte. Der Gesamtgasdruck ist in beiden Fällen als unproblematisch einzustufen, da er durchgehend unterhalb der Sättigung lag, obwohl die Belüftung im Vergleich zum nicht belüfteten System zu einem Anstieg führte.

3.4. Stickstoffverbindungen und pH-Wert

Während TAN während des unbelüfteten Transports einen linearen Anstieg verzeichnete und nach 150 Minuten bei über 2 mg/l lag, schwächte die Belüftung den TAN-Anstieg deutlich ab (Abb. 4). Die Projektion auf eine Transportdauer von 300 Minuten deutet auf einen über 2 mg/l höheren Endwert bei Fahrten ohne Belüftung hin.

Der Anstieg der Konzentration von Ammoniak in den Transportbehältern zeigte extreme Unterschiede zwischen beiden Varianten (Abb. 5). Während der nicht belüfteten Fahrten war lediglich ein moderater Anstieg zu verzeichnen auf durchschnittlich etwa 0,005 mg/l, mit Belüftung wurden höhere Endwerte von annähernd 0,02 mg/l erreicht. Der Vergleich des pH-Wert-Verlaufs zeigt eine gegenläufige Entwicklung der beiden Ansätze. Mit Belüftung stieg der pH-Wert kontinuierlich an, bei fehlender Belüftung sank er entsprechend ab, so dass im Durchschnitt eine Differenz des pH-Wertes nach 150 Minuten Transport von ca. 0,5 erreicht wurde.

3.5. Vergleich der Stressparameter zwischen belüfteten und nicht belüfteten Tanks

Die Fische zeigten sowohl nach den belüfteten als auch den nicht belüfteten Transporten signifikant höhere Blutglukosewerte (Abb. 6). Unterschiede zwischen den Behandlungen konnten nicht beobachtet werden, der Blutglukosewert vor dem Transport mit Belüftung war leicht erhöht.

Der Gehalt an Blutharnstoff blieb während den nicht belüfteten Transportfahrten unverändert, zeigte aber nach den Transporten mit Belüftung einen signifikanten Anstieg. Der Anteil von Hämatokrit im Blut nahm während der Transporte ohne Belüftung stark zu, blieb aber bei zugeschalteter Belüftung unverändert, allerdings war ein signifikant höherer Endwert im Vergleich zum Transport ohne Belüftung zu beobachten.

4. Diskussion

4.1. Typische Entwicklung der Wasserparameter im Verlauf eines Fischtransportes

Die dargestellten Wasserparameter zeigen die Entwicklung während eines typischen Transportes von Regenbogenforellen mit einer Besatzdichte von 250 kg/m³ exemp-

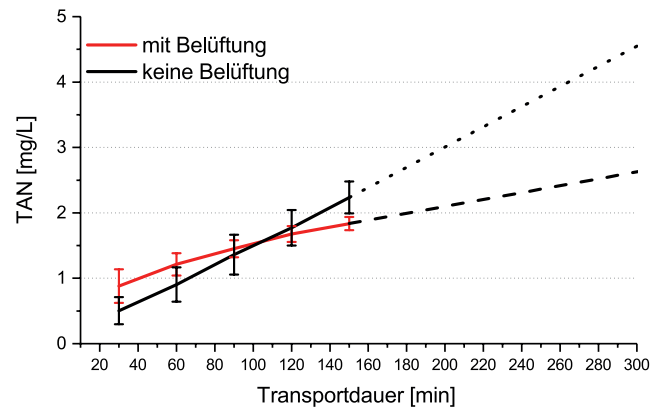


Abbildung 4

Entwicklung der Konzentration von TAN mit (n=3) und ohne Belüftung (n=7) während kommerzieller Transporte von lebenden Forellen mit einem Schnittgewicht von ca. 400 g und einer Besatzdichte von ca. 250 kg/m³.

larisch. Ähnliche Verläufe wurden während allen anderen Transportfahrten beobachtet, auch wenn sie je nach Besatzdichte und Transportroute (Teilentladung, Dauer, etc.) leicht variierten. Dabei zeigten CO₂, TAN und O₂ besonders starke Anstiege. Während von der hohen Sauerstoffübersättigung kaum negative Auswirkungen auf die Fische zu erwarten sind, da der Gesamtgasdruck stets unterhalb der Sättigung und somit im für Fische unproblematischen Bereich lag, erreichten CO₂- und TAN-Konzentrationen, die die Empfehlungen chronischer Exposition bei Forellen deutlich überschreiten (HAFS et al. 2012; TIMMONS et al. 2018). Allerdings ist die Expositionszeit bei Transporten vergleichsweise kurz und die mangelnde Datenlage lässt hierfür somit kaum eine Gefährdungsbewertung zu. Gleichzeitig sank aber der pH-Wert durch den extremen Anstieg von CO₂ auf etwa 7 ab, wodurch der Anstieg der NH₃-Konzentration aufgrund des Dissoziationsgleichgewichtes abgeschwächt wurde und somit durchweg unterhalb der für Salmoniden toxischen Werte blieb (TIMMONS & EBELING 2010). Ob sich die hohe CO₂-Konzentration während der relativ kurzen Expositionsdauer unmittelbar auf Fische auswirkt, und wenn ja in welchem Ausmaß, ist bisher kaum untersucht.

4.2. Vergleich der Entwicklung der Gaswerte zwischen belüfteten und nicht belüfteten Behältern

Die mittleren CO₂-Werte am Ende der unbelüfteten Transporte lagen mehr als 50 mg/l über denen der belüfteten Variante und somit in einem Bereich, in dem eine längere Exposition negative Auswirkungen auf Wachstum, Tierwohl und die Überlebensrate von Salmoniden hat, z.B. ausgelöst durch die Beeinträchtigung der Atmung aufgrund der verminderten Sauerstofftransportfähigkeit des Blutes (KHAN et al. 2018). Für die vergleichsweise kurze Expositionszeit eines Transports von wenigen Stunden sind es vor allem

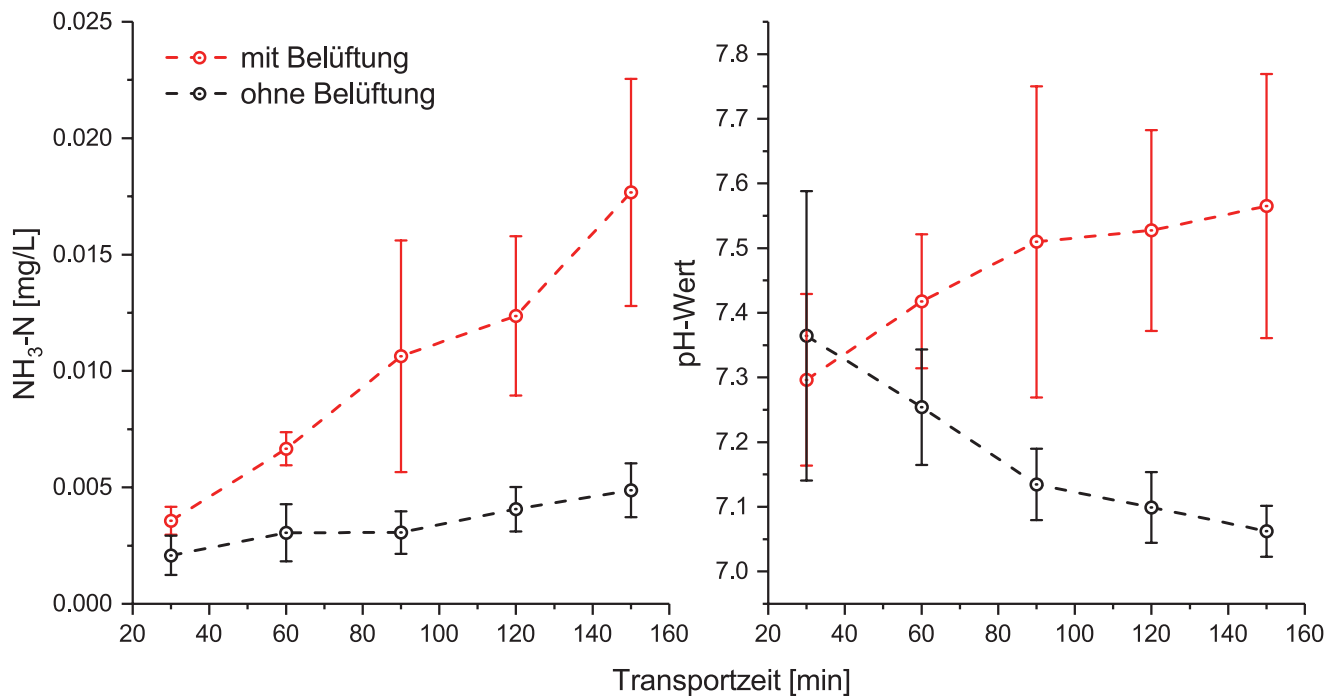


Abbildung 5

Entwicklung der Konzentration von Ammoniak und pH-Wert mit (n=3) und ohne Belüftung (n=7) während kommerzieller Transporte von lebenden Forellen mit einem Schnittgewicht von ca. 400 g und einer Besatzdichte von ca. 250 kg/m³.

Veränderungen von Blut- und Verhaltensparametern (ISHIMATSU et al. 2005; SADOUL et al. 2017), die dokumentiert sind und zumindest auf eine transiente Beeinträchtigung hindeuten.

Wie erwartet senkte die Belüftung die CO₂-Konzentration im Transportwasser stetig, bis am Ende Werte von 16 mg/l erreicht wurden, welche auch bei längerer Exposition als unkritisch einzuschätzen sind (SMART et al. 1979; GOOD et al. 2010; HAFS et al. 2012).

Auch beim Gesamtgasdruck zeigten sich Unterschiede zwischen belüfteten und nicht belüfteten Transporten. In den nicht belüfteten Transporten fiel dieser zu Beginn durch den Eintrag von Sauerstoff stark ab. Dieser Effekt ist bekannt und findet auch in anderen Bereichen der Aquakultur Anwendung, z.B. bei der Vorkonditionierung von Grundwasserschüttungen (DWYER & PETERSON 1993). Der erneute Anstieg des Gesamtgasdruckes im weiteren Verlauf des Transportes wurde durch die starke Sauerstoffübersättigung verursacht. Bei den belüfteten Transporten wurde zusätzlich zum Sauerstoff atmosphärische Luft zugeführt, was den Entgasungseffekt für Stickstoff abschwächte, da Luftstickstoff kontinuierlich nachgeführt wurde, insgesamt blieb der Gesamtgasdruck unterhalb der Sättigung und somit im unkritischen Bereich. Durch die Belüftung wurden die extremen Sauerstoffübersättigungen deutlich abgemildert und konstant zwischen 130-140 % gehalten. Diese nur moderate Übersättigung minimiert das Risiko von Kiemenirritationen und Oxidationsprozessen (RITOLA et al. 2002), verkleinert aber auch gleichzeitig den O₂-Puffer im Tank für den Fall eines technischen Defektes.

4.3. Stickstoffverbindungen und pH-Wert

Die TAN-Konzentration stieg im nicht belüfteten Behälter linear an, was in einem geschlossenen System bei kontinuierlicher Ammonium-Exkretion über die Kiemen der Fische zwangsläufig zu erwarten ist. Im System mit Belüftung flachte der Anstieg der gemessenen TAN-Kurven allerdings deutlich ab. Da Ammoniak im gasförmigen Zustand vorliegt und sein Anteil durch die hohen pH-Werte bei zugeschalteter Belüftung zunimmt, könnte eine Ausgasung hier die Ursache für den weniger starken Anstieg sein. Die Ausgasung von NH₃ bei noch vergleichsweise niedrigen Konzentrationen, wie in den Transporttanks gemessen, hat sich nicht als sonderlich effektiv erwiesen, ist aber im geringen Umfang durchaus möglich (OBAID-UR-REHMAN & BEG 1990).

Direkte Auswirkungen durch die Veränderungen des pH-Wertes im Transportwasser waren in den von uns gemessenen Transporten nicht zu erwarten, da sich der pH-Wert in für Fische ungefährlichen Bereichen zwischen 7-8 bewegte. Allerdings bewirkt die Veränderung des pH-Wertes indirekte Effekte, die potentiell gefährlich für Fische sein können. Der Anstieg des pH-Wertes in den belüfteten Transporten führte zu einem rasanten Anstieg von Ammoniak, dessen Konzentration sich im Transportzeitraum vervierfacht hat, während die Konzentration in den nicht belüfteten Transporten nur moderat anstieg. Durch den pH-Anstieg verschiebt sich das Dissoziationsgleichgewicht in Richtung Ammoniak und verstärkt somit seine Akkumulation. Folglich stieg der Wert schon während der relativ kurzen Transportfahrten mit Belüftung über die Empfehlung von 0,0125 mg/l (TIMMONS & EBELING 2010), die allerdings rein auf Basis chronischer Ex-

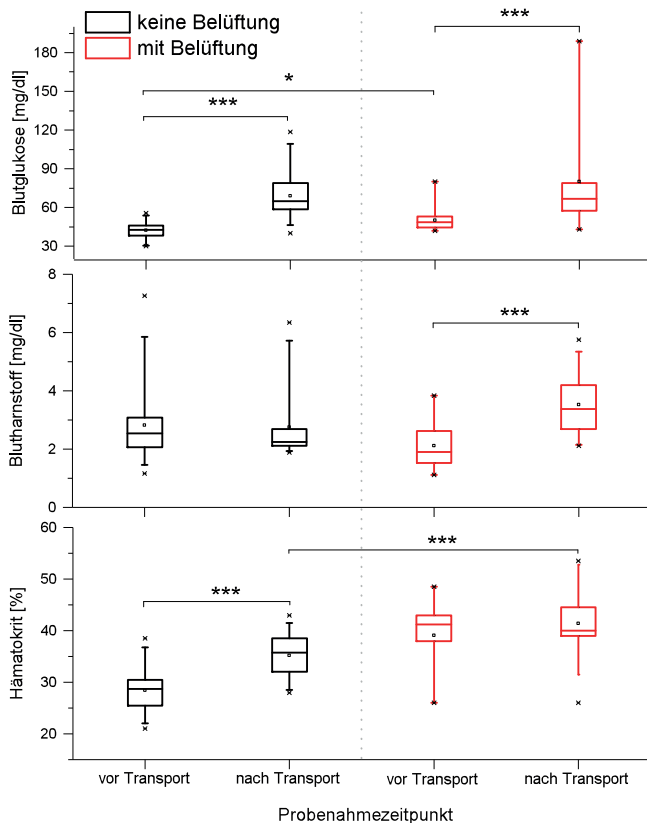


Abbildung 6
Konzentration von Blutglukose, Blutharnstoff und Hämatokrit vor und unmittelbar nach einer standardisierten Transportstrecke (ca. 3,5 h) mit und ohne Belüftung.

position empirisch ermittelt wurden. Längere Fahrten von 5-6 Stunden bergen hier ein deutlich größeres Risiko, da sich der NH_3 -Wert verdoppeln könnte.

4.4. Vergleich der hämatologischen Stressparameter zwischen belüfteten und nicht belüfteten Tanks

Die Messung hämatologischer Stressparameter sollte erste Hinweise auf mögliche unterschiedliche Auswirkungen der beiden Transportvarianten auf das Tierwohl der Fische liefern. Für die Konzentrationen der Blutglukose ergaben sich keine Unterschiede zwischen den Transportarten. Der gleichmäßige Anstieg nach dem Transport ist in erster Linie auf den Handlingstress zurückzuführen (FARBRIDGE & LEATHERLAND 1992; BARTON 2000) und kann nicht mit den Wasserparametern verknüpft werden. Die initialen Blutglukose-Level der Fische zwischen 40-50 mg/dl liegen im unteren Bereich der Literaturwerte, die von 40 bis über 90 mg/dl reichen (WEDEMEYER & CHATTERTON 1970; MANERA & BRITTI 2006; BECKE et al. 2019). Nach dem Transport stiegen die Werte auf 70-80 mg/dl im Schnitt und sind zum Zeitpunkt der Messung somit vergleichsweise nur moderat erhöht. Es besteht aber die Möglichkeit, dass der durch den Handlingstress verursachte Peak schon früher erreicht und hier bereits ein absinkender Blutzuckerspiegel erfasst wurde (BARTON 2000).

Die hohen CO_2 -Konzentrationen sind eine wahrscheinliche Ursache für die signifikanten Steigerungen der Hämatokrit-Werte in den nicht belüfteten Transporten. Bereits bei geringeren Werten als den gemessenen 70 mg/l kann der Root-Effekt auftreten, welcher mit einer verminderten Sauerstoffbindungskapazität des Hämoglobins einhergeht (ROOT 1931; WEDEMEYER 1996) und somit zu einem Anstieg des Hämatokrits führen kann. Obwohl beim belüfteten Transport keine Zunahme von Hämatokrit gemessen wurde, lagen die Werte insgesamt höher als beim nicht belüfteten Transport. Dies kann verschiedene unbekanntere Gründe haben, da zwischen den Transporten oft mehrere Wochen lagen.

Der signifikante Anstieg von Blutharnstoff in den belüfteten Transporten könnte mit den erhöhten Ammoniakkonzentrationen bei den Transportfahrten mit Belüftung in Verbindung stehen. Erhöhte Blutharnstoffwerte bei Fischen treten oft in Zusammenhang mit Atemstress auf, welche z.B. auch durch hohe Ammoniakkonzentrationen verursacht werden (MCDONALD et al. 2006; ZIMMER et al. 2017). Basalwerte von Blutharnstoff bei Regenbogenforellen sind kaum dokumentiert, Studien deuten auf Normalwerte zwischen 1-4,5 mg/dl hin (WEDEMEYER & CHATTERTON 1970; SHIEH & MACLEAN 1976; ÇAKICI & AYDIN 2006). Folglich fällt auch hier die gemessene Erhöhung während des Transportgeschehens eher gering aus.

Die hier gemessenen hämatologischen Stressparameter können Anhaltspunkte liefern, ob Fische auf bestimmte Stressoren reagieren, eignen sich aber nicht dazu, Aussagen über mögliche Langzeiteffekte der jeweiligen Transportmethode auf die Fischgesundheit zu machen. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig.

4.5. Optimierung des Transportes von Fischen durch ein flexibles Belüftungssystem

Die höheren Besatzdichten und das geschlossene System beim Fischtransport bedingen einen Anstieg verschiedener Wasserparameter, der bis zu einem gewissen Grad unvermeidbar ist. Während bei nicht belüfteten Transporten die CO_2 -Konzentration unerwünschte Extremwerte annimmt, sind es bei Transporten mit Belüftung die Ammoniakwerte, die die für Salmoniden empfohlenen Bereiche überschreiten. Hier ist aber nochmals darauf hinzuweisen, dass keine belastbaren Erkenntnisse zu negativen Folgen für Fische bei solch kurzen Expositionszeiten während des Transports von wenigen Stunden für diese Parameter vorliegen, sondern die existierenden Richtwerte auf Basis chronischer Expositionen ermittelt wurden. Somit ist nicht abschließend zu bewerten, ob im nicht belüfteten Fall die exzessiven CO_2 -Werte oder im belüfteten Fall der erzwungene Ammoniakanstieg das größere Risiko birgt. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf und möglicherweise ist ein optimaler Kompromiss zu erarbeiten, der auch weitere Komponenten wie eine Pufferung des Transportwassers beinhalten könnte. Insgesamt stellt der Transport für Fische grundsätzlich eine Stresssituation dar, während der es gilt, die Bedingun-

gen so optimal wie möglich zu gestalten und somit Risiken von Krankheitsausbrüchen und oder erhöhter Mortalität im Nachgang möglichst zu vermeiden.

Eine flexible Belüftungsvorrichtung bietet die Möglichkeit, je nach initialem pH-Wert des Transportwassers, einer extremen Anreicherung von CO₂ oder Ammoniak durch Modifikation der Belüftung entgegenzuwirken. Ausgehend von einem pH-Wert von beispielsweise 8 würde eine moderate Anreicherung von CO₂ diesen senken und somit gleichzeitig einen übermäßigen Ammoniakanstieg verhindern, was durch eine Justierung der Luftzufuhr möglich wäre. Liegt der Ausgangs-pH-Wert bei 7 oder tiefer, kann eine stärkere Belüftung die CO₂-Werte niedrig halten, ohne dass die Gefahr einer kritischen Ammoniakakkumulation besteht. Der initiale pH-Wert des Transportwassers kann in diesem Fall zusätzlich durch Zugabe von puffernden Substanzen stabilisiert oder mit Säure/Base entsprechend eingestellt werden (Pi-

PER et al. 1982; BERKA 1986). Auch ohne Belüftungseinrichtung kann die Zugabe von puffernden Substanzen hilfreich sein, wenn beispielsweise sehr niedrige initiale pH-Werte vorliegen, kann so ein weiteres Absinken durch starke CO₂-Anreicherung verhindert werden.

Eine weitere Optimierung der Belüftung könnte durch die Ausstattung der Fischbehälter mit CO₂- und pH-Sonden erreicht werden. Der Fahrer könnte unmittelbar auf kritische Werte reagieren und die Belüftung entsprechend anpassen. Um Aussagen über eventuelle Effekte auf die Fischgesundheit machen zu können, sind zukünftige Untersuchungen zum Einfluss der Transportbedingungen auf verschiedene Parameter (Kiemenbild, Verhalten, Mortalitätsrate etc.) während des Transportes und einem gewissen Zeitraum danach erforderlich.

Literaturverzeichnis

- Barton, B. A., Peter, R. E., und Paulencu, C. R. (1980): Plasma Cortisol Levels of Fingerling Rainbow Trout (*Salmo gairdneri*) at Rest, and Subjected to Handling, Confinement, Transport, and Stocking. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(5), 805–811. <https://doi.org/10.1139/f80-108>
- Barton, B. A. (2000): Salmonid Fishes Differ in Their Cortisol and Glucose Responses to Handling and Transport Stress. *North American Journal of Aquaculture*, 62(1), 12–18. [https://doi.org/10.1577/1548-8454\(2000\)062<0012:SFDITC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8454(2000)062<0012:SFDITC>2.0.CO;2)
- Becke, C., Schumann, M., Steinhagen, D., Rojas-Tirado, P., Geist, J., und Brinker, A. (2019): Effects of unionized ammonia and suspended solids on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture*, 499, 348–357. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.09.048>
- Berka, R. (1986): The transport of live fish: a review (Bd. 48). Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome.
- Bromage, N. R., Shepherd, C. J., und Roberts, J. (1992): Farming systems and husbandry practice. In *Intensive Fish Farming* (S. 50–98). Oxford, UK: Blackwell Science Ltd.
- Cakici, H., und Aydin, S. (2006): Changes in Blood Parameters of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum) after Physical Pollution. *Journal of Applied Animal Research*, 29(1), 77–80. <https://doi.org/10.1080/09712119.2006.9706576>
- Colt, J. (2006): Water quality requirements for reuse systems. *Design and Selection of Biological Filters for Freshwater and Marine Applications*, 34(3), 143–156.
- Dwyer, W. P., und Peterson, J. E. (1993): Evaluation of a Low Head Oxygenator at Giant Springs State Fish Hatchery, Great Falls, Montana. *The Progressive Fish-Culturist*, 55(2), 121–124. [https://doi.org/10.1577/1548-8640\(1993\)055<0121:EOALHO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8640(1993)055<0121:EOALHO>2.3.CO;2)
- Farbridge, K. J., und Leatherland, J. F. (1992): Plasma growth hormone levels in fed and fasted rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) are decreased following handling stress. *Fish Physiology and Biochemistry*, 10(1), 67–73. <https://doi.org/10.1007/BF00004655>
- Good, C., Davidson, J., Welsh, C., Snekvik, K., und Summerfelt, S. (2010): The effects of carbon dioxide on performance and histopathology of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in water recirculation aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 42(2), 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2009.11.001>
- Hafs, A. W., Mazik, P. M., Kenney, P. B., und Silverstein, J. T. (2012): Impact of carbon dioxide level, water velocity, strain, and feeding regimen on growth and fillet attributes of cultured rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 350–353, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.020>
- Hayter, A. J. (1984): A Proof of the Conjecture that the Tukey-Kramer Multiple Comparisons Procedure is Conservative. *The Annals of Statistics*, 12(1), 61–75. <https://doi.org/10.2307/2241034>
- Hofer, J. (1913): Patent Nr. D.R.P. 245509. Stuttgart.
- Ishimatsu, A., Hayashi, M., Lee, K.-S., Kikkawa, T., und Kita, J. (2005): Physiological effects on fishes in a high-CO₂ world. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C9). <https://doi.org/10.1029/2004JC002564>
- Khan, J. R., Johansen, D., und Skov, P. V. (2018): The effects of acute and long-term exposure to CO₂ on the respiratory physiology and production performance of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in freshwater. *Aquaculture*, 491, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.03.010>
- King, H. R. (2009): Fish transport in the aquaculture sector: An overview of the road transport of Atlantic salmon in Tasmania. *Journal of Veterinary Behavior*, 4(4), 163–168. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2008.09.034>
- Manera, M., und Britti, D. (2006): Assessment of blood che-

- mistry normal ranges in rainbow trout *Journal of Fish Biology*, 69(5), 1427–1434. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2006.01205.x>
- McDonald, M. D., Smith, C. P., und Walsh, P. J. (2006): The physiology and evolution of urea transport in fishes *The Journal of Membrane Biology*, 212(2), 93–107. <https://doi.org/10.1007/s00232-006-0869-5>
- Obaid-ur-Rehman, S., und Beg, S. A. (1990): Ammonia removal by air stripping— from origin to present state of technology *Journal of Environmental Science and Health . Part A: Environmental Science and Engineering and Toxicology*, 25(4), 343–365. <https://doi.org/10.1080/10934529009375563>
- Piper, R. G., McElwain, I. B., Orme, L. E., McCraren, J. P., Fowler, L. G., und Leonard, J. R. (1982): Transportation of live fishes *In Fish hatchery management* (S. 348–368). US Fish Wildl. Serv. Washington, DC.
- Proske, C., und Lukowicz, M. von (2018): Fischtransport *In W. Schäperclaus & M. von Lukowicz (Hrsg.), Lehrbuch der Teichwirtschaft* (S. 531–552). Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
- Ritola, O., Tossavainen, K., Kiuru, T., Lindström-Seppä, P., und Mölsä, H. (2002): Effects of continuous and episodic hyperoxia on stress and hepatic glutathione levels in one-summer-old rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) *Journal of Applied Ichthyology*, 18(3), 159–164. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0426.2002.00324.x>
- Root, R. W. (1931): The respiratory function of the blood of marine fishes *The Biological Bulletin*, 61(3), 427–456. <https://doi.org/10.2307/1536959>
- Sadoul, B., Friggens, N. C., Valotaire, C., Labbé, L., Colson, V., Prunet, P., und Leguen, I. (2017): Physiological and behavioral flexibility to an acute CO₂ challenge, within and between genotypes in rainbow trout *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 209, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2017.04.002>
- Sakia, R. M. (1992): The Box-Cox Transformation Technique: A Review *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 41(2), 169–178. <https://doi.org/10.2307/2348250>
- Sampaio, F. D. F., und Freire, C. A. (2016): An overview of stress physiology of fish transport: changes in water quality as a function of transport duration *Fish and Fisheries*, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1111/faf.12158>
- Schäperclaus, W., und Lukowicz, M. von (2018): *Lehrbuch der Teichwirtschaft* (5. Aufl.). Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
- Shieh, H. S., und Maclean, J. R. (1976): Blood changes in brook trout induced by infection with *Aeromonas salmonicida* *Journal of Wildlife Diseases*, 12(1), 77–82. <https://doi.org/10.7589/0090-3558-12.1.77>
- Smart, G. R., Knox, D., Harrison, J. G., Ralph, J. A., Richard, R. H., und Cowey, C. B. (1979): Nephrocalcinosis in rainbow trout *Salmo gairdneri* Richardson; the effect of exposure to elevated CO₂ concentrations- *Journal of Fish Diseases*, 2(4), 279–289. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.1979.tb00170.x>
- Sokal, R. R., und Rohlf, F. J. (1994) *Biometry: The Principles and Practices of Statistics in Biological Research* (3rd edition). New York: W. H. Freeman.
- Solomon, D. J., und Taylor, A. L. (1979): Critical Factors in the Transport of Live Freshwater Fish — II. State of Feeding and Ammonia Excretion *Aquaculture Research*, 10(2), 81–86. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.1979.tb00258.x>
- Southgate, P. J. (2008): Welfare of fish during transport *In E. J. Branson (Hrsg.), Fish Welfare* (S. 185–194). Oxford, UK: Blackwell Publishing.
- Tacchi, L., Lowrey, L., Musharrafieh, R., Crossey, K., Larra-goite, E. T., und Salinas, I. (2015): Effects of transportation stress and addition of salt to transport water on the skin mucosal homeostasis of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) *Aquaculture*, 435, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.027>
- Tang, S., Thorarensen, H., Brauner, C. J., Wood, C. M., und Farrell, A. P. (2009): Modeling the accumulation of CO₂ during high density, re-circulating transport of adult Atlantic salmon, *Salmo salar*, from observations aboard a sea-going commercial live-haul vessel *Aquaculture*, 296(1), 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.07.020>
- Taylor, A. L., und Solomon, D. J. (1979): Critical Factors in the Transport of Living Freshwater Fish — I. General Considerations and Atmospheric Gases *Aquaculture Research*, 10(1), 27–33. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.1979.tb00251.x>
- Thurston, R. V., Russo, R. C., und Vinogradov, G. A. (1981): Ammonia toxicity to fishes. Effect of pH on the toxicity of the unionized ammonia species *Environmental Science & Technology*, 15(7), 837–840. <https://doi.org/10.1021/es00089a012>
- Timmons, M. B., und Ebeling, J. M. (2010): *Recirculating Aquaculture* (2nd Aufl.). Ithaca: Cayuga Aqua Ventures, LLC.
- Timmons, Michael B., Guerdat, T., und Vinci, B. J. (2018) *Recirculating Aquaculture* 4th Edition (4th Aufl.). Ithaca Publishing Company LLC.
- Vollmann-Schipper, F. (1975): *Transport lebender Fische: Abfischen, Hältern, Sortiren, Verladen: mit 44 Abbild. und 11 Tab.* Paul Parey.
- Wedekind, H., Harrer, D., Geiser, M., und Kraus, G. (2020): *Praktische und rechtliche Aspekte beim Transport lebender Fische*. Starnberg: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL).
- Wedemeyer, G. (1996): Transportation and Handling *In Principles of salmonid culture* (S. 727–755). Amsterdam Netherlands: Elsevier.
- Wedemeyer, G., und Chatterton, K. (1970): Some Blood Chemistry Values for the Rainbow Trout (*Salmo gairdneri*) *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 27(6), 1162–1164. <https://doi.org/10.1139/f70-135>
- Zimmer, A. M., Wright, P. A., und Wood, C. M. (2017): Ammonia and urea handling by early life stages of fishes *Journal of Experimental Biology*, 220(21), 3843–3855. <https://doi.org/10.1242/jeb.140210>