

**Die Anpassung der Hörschwelle von
einheimischen Fischarten an ihre
hydroakustische Umwelt**

Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)

der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von

Arne Rüter

aus Siegburg

Bonn 2013

Angefertigt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen
Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Gutachter:

1. Gutachter: Prof. Dr. H. Bleckmann

Institut für Zoologie

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

2. Gutachter: Prof. Dr. J.H.E. Koop

Institut für Integrierte Naturwissenschaften

Universität Koblenz - Landau

Tag der Promotion: 24.09.2013

Erscheinungsjahr: 2014

INHALT

| | |
|---|------------|
| ZUSAMMENFASSUNG | III |
| 1 EINLEITUNG | 1 |
| 1.1 Anpassung der Hörschwellen einheimischer Fischarten an ihre natürliche akustische Umwelt | 1 |
| 1.2 Anthropogene Geräuschbelastung in Bundeswasserstrassen | 7 |
| 2 METHODEN | 11 |
| 2.1 Hörschwellenbestimmung mittels der Auditory Brainstem Response Methode (ABR) | 11 |
| 2.2 Natürliche hydroakustische Umwelt und Hörschwellen einheimischer Fischarten | 19 |
| 2.3 Anthropogen gestörte hydroakustische Umwelt und Hörschwellen einheimischer Fischarten | 39 |
| 3 ERGEBNISSE | 49 |
| 3.1 Hörschwellenbestimmung mittels der Auditory Brainstem Response Methode (ABR) | 49 |
| 3.2 Natürliche hydroakustische Umwelt und Hörschwellen einheimischer Fischarten | 55 |
| 3.3 Anthropogen gestörte hydroakustische Umwelt und Hörschwellen einheimischer Fischarten | 82 |
| 4 DISKUSSION | 97 |
| 4.1 Hörschwellen | 97 |
| 4.2 Das Hörvermögen einheimischer Fischarten im Vergleich zu ihrer natürlichen akustischen Umwelt | 100 |
| 4.3 Möglichkeiten zur akustischen Orientierung in Fließgewässern | 108 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.4 | Das Hörvermögen einheimischer Fischarten im Vergleich mit Schiffsgerauschen der Bundeswasserstrasse Rhein | 112 |
| 5 | LITERATUR | 119 |
| 6 | ANHANG | 129 |
| 6.1 | Darstellung Akustische Messungen | 129 |
| 6.2 | ABR - Kalibriergeraden | 148 |
| 6.3 | Beschreibende Statistik der Leq von Fulda und Waldbrölbach | 149 |
| 6.4 | Hörschwellenvergleich mit Schiffsspektren | 150 |
| 6.5 | Erklärung des Verfassers | 151 |

Zusammenfassung

Anpassung der Hörschwelle einheimischer Fischarten an ihre natürliche akustischen Umwelt

Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Sinnessysteme der Tiere an die Reize ihrer Umwelt anpassen. Dies sollte auch für die Fische und ihre hydroakustische Umwelt gelten.

Da Substrat und Fließgeschwindigkeit die Qualität und Quantität der Fließgeräusche beeinflussen, müssten sich letztere longitudinal (zunehmende Entfernung zur Quelle) mit der morphologischen Veränderung eines Fließgewässers entwickeln. Da ein Fließgewässer ebenfalls longitudinal in Fischzonen mit unterschiedlichen Artengemeinschaften gegliedert ist, wurde vermutet, dass sich außerdem das Hörvermögen der Tiere in Quantität (Empfindlichkeit) und Qualität (Frequenzspektrum) vom Oberlauf zum Unterlauf verändern. Um dies zu belegen, wurden in der Fulda hydroakustische Untersuchungen und eine Analyse des Fischkatasters durchgeführt. Ergänzende hydroakustische Untersuchungen im Waldbrölbach sollten Hinweise auf akustische Unterschiede zwischen einem großen und einem kleinen Gewässer liefern.

Die Ergebnisse zeigten eine Abnahme des mittleren äquivalenten Schalldruckpegels (L_{eq}) mit zunehmender Entfernung zur Quelle. Die Gewässer sind also im Oberlauf lauter als im Unterlauf. Außerdem konnte in dem Fluss gezeigt werden, dass sich der Klang der Fließgeräusche mit zunehmender Entfernung zur Quelle ändert. In einem Bach konnte letzteres nicht gezeigt werden. Der Klang von Riffles bzw. Pools von Fluss und Bach unterschieden sich im übrigen nicht.

Wenn sich das Hörvermögen der Fische an die akustische Umwelt anpasst, leiten sich daraus verschiedene Hypothesen für die Anpassungen der Hörschwelle an die Unterschiede in Geräuschquantität und Geräuschqualität der Fließgewässer ab. Die erste Hypothese für die Anpassung der Hörschwellen an die Geräuschquantität lautete: In Abhängigkeit von der longitudinalen Geräuschentwicklung in Fließgewässern, ist das Hörvermögen der Fische im Oberlauf unempfindlicher, als im Unterlauf. Zur Überprüfung dieser Hypothese wurde das Hörvermögen verschiedener einheimischer Fischarten gemessen und mit den

hydroakustischen Messungen verglichen. In Zusammenhang mit Daten des Fischkatasters der Fulda zeigten sich die erwarteten Zusammenhänge. Mit zunehmender Fließtrecke nahm der Anteil der besser hörenden Hörspezialisten zu und der Anteil der schlechter hörenden Hörgeneralisten ab. D.h. je leiser das Hintergrundgeräusch des Lebensraums, desto höher der Anteil gut hörender Fischarten.

Die zweite Hypothese lautete: Der Hörschwellenverlauf dominanter Fischarten einer Fischzone passt sich an das Fließgeräuschspektrum des Gewässerabschnitts an. Es konnte gezeigt werden, dass die Hörschwellen der Hörspezialisten den mittleren Terzspektren der Pools und die Hörschwellen der Hörgeneralisten den mittleren Terzspektren der Riffles in der Forellenregion angepasst sind. Dies bedeutet, die Hörgeneralisten hören nur laute Geräuschquellen der Riffles aber keine der Pools. Die Hörspezialisten hören im Mittel Riffles und die lauten Geräuschquellen der Pools.

Anthropogene Geräuschbelastung - Schiffsgeräusche

Neben den natürlichen Umweltgeräuschen müssen sich Fische in den letzten Jahrzehnten zunehmend mit anthropogenen Geräuschbelastungen auseinandersetzen. In dieser Arbeit wurde analysiert, welche Geräuschqualität und -quantität Schiffsgeräusche in der Bundeswasserstrasse Rhein besitzen und von welchen Faktoren diese abhängen. Außerdem wurde der Einfluss von Schiffsgeräuschen, die den Geräuschimmissionen im Rhein entsprechen, auf die Hörschwelle von Rotaugen (*Rutilus rutilus*) untersucht.

Messungen und ein Versuch konnten keinen Zusammenhang zwischen der Geräuschimmission und verschiedenen gemessenen Umweltfaktoren aufzeigen. Die Immission scheint insbesondere von den individuellen Eigenschaften der Schiffe abzuhängen. Der Klang der Geräusche (Terzspektrenverlauf) zeigte dagegen einen Zusammenhang mit den Faktoren Aufnahmetiefe und Struktur (Prall-/Gleithang). Konkret zeigten die mittleren Terzspektren von drei Wassertiefen ein unterschiedlich breites ruhiges "Fenster", mit geringen Schalldruckpegeln, in denen die Schiffsgeräusche gedämpft wurden. Ein Vergleich der gemessenen ruhigen Fenster im Rhein mit den berechneten Cut-Off Frequenzen legte einen Zusammenhang zwischen Cut-Off Effekt und dem Verlauf der Spektren nahe.

Im letzten Schritt wurden die Auswirkungen der Schiffsgeräusche, entsprechend einer Immission in Wassertiefe von 3,2 m, auf die

Hörschwelle von Rotaugen (*Rutilus rutilus*, Hörspezialist) untersucht. Eine Beschallung über 5 Tage erzielte eine deutliche Hörschwellenverschiebung (Schwerhörigkeit). Sie betraf im Besonderen den empfindlichen Bereich der Hörschwelle zwischen 400 Hz und 800 Hz. Eine Regeneration des Hörvermögens der Tiere ist durch den kurzen Ruheintervall zwischen Schiffspassagen in einer stark befahrenen Wasserstraßen wie dem Rhein nicht zu erwarten.

1 Einleitung

1.1 Anpassung der Hörschwellen einheimischer Fischarten an ihre natürliche akustische Umwelt

Fische können hören. Diese einfache Aussage wurde Anfang des letzten Jahrhunderts bekannt (Parker 1903, von Frisch 1923). Allerdings unterscheidet sich der Mechanismus des Fischhörens von dem anderer Vertebraten. Wie hören also Fische? Zunächst die Gemeinsamkeiten: Fische besitzen wie andere Vertebraten zwei Ohren. Allerdings fehlen das äußere Ohr und das Mittelohr. Die morphologische Struktur des Innenohrs und die vestibulären Funktionsmechanismen ähneln denen anderen Vertebraten (Ladich & Popper 2004). So existieren Labyrinth, Ampullen, Sacculus, Utriculus, Lagena (= Ductus cochlearis) und Otholiten (= Statolithen). Der prinzipielle Funktionsmechanismus besteht in der Auslenkung von Haarzellen und der damit verbundenen Erzeugung von elektrischen Signalen. Dabei besitzen die Otholitenorgane eine doppelte Funktion: neben dem Lagesinn haben sie auch die Hörfunktion übernommen. Das unterscheidet das Ohr der Fische von dem anderer Wirbeltiere (z.B. Säugetieren). Fische hören mit Sacculus, Lagena und sehr wahrscheinlich auch mit dem Utriculus (Popper & Schilt 2008). Diese sind mit einem Sinnesepithel (Macula) ausgekleidet (Popper & Fay 1993), das in Abhängigkeit von der Fischart und Fischgröße mit tausenden oder hunderttausenden Haarzellen (Sinneszellen) besetzt ist (Popper & Schilt 2008). In der Mitte jedes Otholitenorgans liegt ein kalkhaltiger Otholit. Dieser ist über eine dünne Membran mit der Macula gekoppelt. Befindet sich ein Fisch in einem Schallfeld, schwingt er in diesem mit, da er die gleiche akustische Dichte wie Wasser besitzt (Schellart & Popper 1992). Er reagiert auf die Schnellekomponente des Schalls. Da der Otholit etwa die dreifache Dichte des Fisches besitzt (Schellart & Popper 1992), schwingt er mit einer anderen Amplitude und phasenverschoben zu dem mit dem Fisch verbundenem Sinnesepithel. Durch die Scheerbewegung im Verhältnis zur Macula kommt es zu einer Auslenkung der Stereovillibündel der Haarzellen (Schellart & Popper 1992, Popper & Schilt 2008). Der Fisch hört.

Neben dieser allgemeinen Form Geräusche wahrzunehmen, haben sich bestimmte Fischgruppen durch morphologische Anpassungen

spezialisiert und ihr Hörvermögen verbessert (Popper & Fay 1993). In europäischen Binnengewässern sind dies z.B. die Otophysi, die 70% der Fischarten ausmachen. Zu ihnen gehören die Cypriniformes, Siluriformes, Gymnotiformes und Characiformes. Diese haben die „Weberschen Knöchelchen“ ausgebildet (Weber 1820), die Schwingungen der Schwimmblase über die Weberschen Knöchelchen und den Sinus impar auf die Perilymphe des Labyrinths und den nahen Sacculus übertragen (Blaxter 1980, Braun & Grande 2008). Eine andere Spezialisierung ist z.B. die Ausbildung von Bullae bei den Clupeoidea (Blaxter 1980, Popper 1993, Popper & Schilt 2008). Bullae sind kugelförmige Gebilde nahe des Innenohres, die einen Mechanismus zur Verbindung zwischen Schwimmblase und Perilymphe des Ohres darstellen. Diese morphologischen Anpassungen der Hörspezialisten erweitern den Frequenzbereich und/oder die Sensitivität des Hörbereichs gegenüber den nicht spezialisierten Hörgeneralisten.

In dieser Arbeit soll diskutiert werden, ob die Hörspezialisten eine sensorisch angepasste Gruppe an leise Habitats darstellen. So formuliert die *Acoustic Adaption Hypothesis* (AAH), dass die Effizienz der Kommunikationssignale der Tiere optimal an die akustischen Eigenschaften ihres Lebensraums angepasst ist (Yao & Lin 2004). Dass sich das Hörvermögen und die Kommunikation von Tieren an die akustische Umwelt anpassen können, wurde bereits für andere Tiergruppen gezeigt. Betrachtet man unterschiedliche Lebensräume, zeigen diese unterschiedliche Umweltgeräusche (Slabbekoorn 2004). Um sich über diese Umweltgeräusche hinweg verständigen zu können, müssen sich die Tiere mit ihrer Kommunikation in Lautstärke und Frequenzband anpassen. Außerdem sind die akustischen Filtereigenschaften bei der Signalleitung in verschiedenen Lebensräumen unterschiedlich (Morton 1975, Marten & Marler 1977). So ist die Abschwächung und Reflexion von Geräuschen in verschiedenen Arten von Wald unterschiedlich stark und frequenzabhängig. Dies hat Auswirkungen z.B. auf die Kommunikation von Vögeln (Padgham 2004). Morton (1975) hat dies für mehrere Lebensräume von Vögeln untersucht. Diese passen ihre Rufe an die Eigenschaften des entsprechenden Lebensraums an und optimieren so die Reichweite. Auch die Infraschallkommunikation und Infraschallwahrnehmung von Elefanten ist eine Anpassung an ihre Umwelt. Sie können sich in der Savanne über weite Strecken

verständigen (50 km² - 200 km²), wobei sie Reflexionen an atmosphärischen (Temperatur-) Grenzschichten nutzen, um Infraschallrufe zu reflektieren (Römer 2001, Payne et al. 1986, Larom et al. 1996). Grillen bedienen sich des Mikroklimas am Boden, um über größere Strecken zu kommunizieren (*Forbidden mode of propagation*; Römer 2001, Embleton 1996).

Ähnliches sollte auch für aquatische Lebensräume gelten. Wie in terrestrischen Lebensräumen überlagern sich hier natürliche und anthropogen verursachte Hintergrundgeräusche (Urlick 1983, Lurton 2002). Natürliche Geräusche im Wasserkörper des Meeres sind z.B. Gezeitenbewegungen, Turbulenzen, seismischen Störungen (Urlick 1983, Lurton 2002) sowie Windgeräuschen (Wellen), Fließgeräusche, Regengeräusche und biologische Geräusche (Ferguson & Cleary 2001, Johnson 1947, Nystuen & Medwin 1995, Urlick 1983). In den letzten Jahrzehnten wird die Geräuschkulisse aber zunehmend durch anthropogene Quellen dominiert. Dazu gehören der zunehmende Schiffsverkehr und Baulärm (Urlick 1983, Richardson et al. 1995).

Eine Anpassung der Kommunikation an die akustischen Eigenschaften des Lebensraumes bedeutet neben einer Anpassung der Signale auch eine Anpassung des Hörvermögens an die genannten Hintergrundgeräusche. Schellart & Popper (1992) zeigten dafür ein Beispiel. Sie argumentieren, dass Binnengewässer wegen dem geringeren Windeinfluss leiser als das Meer seien. Außerdem wirke die geringe Wassertiefe als Hochpassfilter auf Geräusche (höhere Cut-Off Frequenz), was den Schalldruckpegel ebenfalls senke. Eine Anpassung der Binnengewässerfische an diese niedrigeren Schalldruckpegel mit höheren Frequenzbändern, fände bei den Ostariophysi (Hörspezialisten) statt. Diese benutzten die Schwimmblase als Schalldruckaufnehmer und verbänden Schwimmblase und Ohr durch die Weberschen Knöchelchen. Die Hörspezialisten können mit dieser morphologischen Anpassung empfindlicher und in einem breiteren (höhere obere Frequenzgrenze) Frequenzband hören. Zur Unterstützung dieser Argumentation vergleichen Schellart & Popper (1992) die empfindlichste Frequenz verschiedener Hörschwellen von Fischen aus Meer und Binnengewässern mit den windabhängigen Hintergrundgeräuschen im Meer. Sie fanden, dass Fische in lauten Umgebungen mit leisen biologischen Geräuschen (offenes Meer, turbulente Küstengewässer und Ästuare, starke Strömung in Fließgewässern) schlecht hören.

Tiere in leisen Habitaten (Mangroven, Lagunen, flache Fließgewässer) hörten dagegen besser. Wysocki et al. (2007) und Amoser & Ladich (2005) machten einige akustische Messungen der Hintergrundgeräusche in Fließ- und Standgewässern. Die Geräusche nutzten sie für Maskierungsexperimente mit Hörgeneralisten und Hörspezialisten. Das Ergebnis war, dass Geräusche, die über der Hörschwelle der Tiere lagen, diese maskierten. Da die Hörschwelle der Hörspezialisten empfindlicher als die der Hörgeneralisten war, wurde diese auch stärker maskiert. Sie schlossen daraus, dass Hörspezialisten an leisere Habitats als Hörgeneralisten angepasst sind. Außerdem verglichen sie die Akustik von zehn Fließ- und Standgewässern. Die Statistik zeigte, dass Standgewässer leiser als Fließgewässer waren. Sie charakterisierten allerdings ganze Gewässer an Hand einer bzw. weniger Messungen (1-3 Einzelmessungen). Lugli et al. (2003) und Lugli & Fine (2003) zeigten eine Anpassung der Kommunikation von Fischen an die Hintergrundgeräusche eines Baches. Sie identifizierten im Geräuschspektrum eines Baches ein rauscharmes, ruhiges Fenster im Frequenzbereich unter 1 kHz. Dies begünstigt die Kommunikation von Fischen in diesem „ruhigen Fenster“. Dort ist entsprechend die Maskierung von Kommunikationssignalen geringer. Tatsächlich verständigen sich die Tiere genau in diesem ruhigen Frequenzband (Lugli & Fine 2003).

In dieser Arbeit sollten Fließgeräusche und Hörschwellen in anderen Zusammenhängen untersucht werden. Betrachtet man Fließgewässer unter akustischen Aspekten, scheinen diese von der Quelle in Richtung Mündung leiser zu werden. Da es schlechter hörende Hörgeneralisten und besser hörende Hörspezialisten gibt, wäre bei einer Anpassung an die akustische Umwelt zu vermuten, dass im lauterem, oberen Fließgewässerabschnitt Hörgeneralisten und im leiserem, unteren Abschnitt Hörspezialisten leben. Dies wäre eine Anpassung der Hörschwelle an den Schalldruckpegel (SPL) des Lebensraums. Diese Hypothese wurde im Rahmen dieser Arbeit geprüft. Dazu wurden folgende Aspekte untersucht:

1. Es wurde die Hörschwellen einheimischer Fischarten gemessen, um das Hörvermögen einheimischer Hörspezialisten und Generalisten beschreiben zu können.
2. Es wurde mittels hydroakustischer Aufnahmen untersucht, ob und wie sich die Fließgeräusche in Fließgewässern qualitativ und quantitativ von der Quelle in Richtung Mündung verändern.

Als Versuchsgewässer dienten dazu die Fulda und der Waldbrölbach .

3. Es wurden die Fischbestandsdaten der Fulda nahe den akustischen Probenahmestellen auf die longitudinale Verteilung von Hörgeneralisten und Hörspezialisten untersucht. Dabei wurde sich auch an den Fischzonen (Thienemann 1925, Illies 1961) orientiert und das Verhältnis von Hörgeneralisten zu Hörspezialisten berechnet.

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden im Kontext mit der Gewässermorphologie und den ermittelten Hörschwellen diskutiert. Sie zeigten mögliche Anpassungsstrategien und die hohe akustische Variabilität der Fließgewässer, die maßgeblich von der Morphologie mitbestimmt werden kann (Tonolla 2009).

Zusätzlich zur quantitativen Beschreibung der Fließgeräusche, wurden diese qualitativ mit Hilfe von Terzspektren beschrieben. Der qualitative Aspekt wurde ebenfalls auf eine longitudinale Veränderung untersucht. Um einen Zusammenhang zwischen Hörschwellenverlauf und Geräuschqualität herzustellen wurden dementsprechend die Terzspektren der drei Fischregionen mit Hilfe einer SIMPER Analyse auf Unterschiede im Spektrenverlauf untersucht. Anschließend wurden die abweichenden Frequenzbereiche mit den Hörschwellenverläufen der für die Flussregionen charakteristischen Fischarten verglichen.

Während Amoser (2005) und Wysocki (2007) die Fließgeräusche als maskierenden Störungsfaktor bei der Kommunikation betrachten, wurde ihnen in dieser Arbeit eine Funktion als Informationsträger unterstellt. Die Frage war, was die Tiere hören und ob Fließgeräusche zur (akustischen) Orientierung beitragen können. Dass Fische sich orientieren, steht außer Frage. Sie reagieren auf eine Vielzahl sensorischer Reize, die Informationen über ihren Lebensraum beinhalten (Odling-Smee & Simpson & Braithwaite, 2006). So legen verschiedene Fischarten lange Strecken zu ihren Laichgebieten zurück. Dies funktioniert nur, wenn sie in ihrem Lebensraum navigieren und den Weg finden können. Das bekannteste Beispiel sind diadrome Fischarten wie der Lachs (anadrom) und der Aal (katadrom). Die Tiere kehren zur Paarung und zum Laichen über hunderte oder tausende Kilometer an ihren Geburtsort zurück (Tsukamoto et al. 2003, Quinn & Dittman 1990). Der Vorteil (und

Ursache) dieser kraftzehrenden Wanderung ist, dass die Tiere am Ziel geeignete Fortpflanzungsbedingungen vorfinden. Potamodrome Arten unternehmen nur kürzere Bewegungen zwischen einzelnen Habitaten. Für sie ist eine kleinräumigere, aber dafür auch genauere Orientierung notwendig. Dabei ist die Kenntnis von guten Futterplätzen (Warburton 2003), dem Revier von Konkurrenten (Matthews 1990 a,b), den Standorten von gefährlichen Raubfischen (Brown 2003) und dem wahrscheinlichen Aufenthaltsort von Paarungspartnern (Mazeroll & Montgomery 1998) wichtig. Es wurde gezeigt, dass Fische sich an Standorte erinnern (Green 1971) und sich auch visuell auf kürzere Distanzen (50 m) an Hand ihrer Umgebung orientieren können (Kolm et al. 2005). Die Orientierung findet vermutlich mit Hilfe von Landmarken statt (Braithwaite et al. 1996, Warburton 1990, Huntingford et al. 1998) mit denen sie sich kognitive Karten ihres Lebensraums erstellen (Aronson 1971).

Untersuchungen zeigen, dass akustische Signale viele (lebenswichtige) Informationen beinhalten können. So können Haie ihrer Beute auch akustisch orten (Myrberg 2001). Außerdem reagieren sie auf die Geräusche verletzter, zappelnder Fische. Umgekehrt reagierten Heringe auf die Geräusche ihrer Prädatoren (Mann et al. 2001, Popper et al. 2004). Hörten sie im Versuch Ortungslaute von Delphinen, versuchten sie sich von ihnen zu entfernen. Besonders wichtig ist auch die örtliche Orientierung. Es wurde gezeigt, dass sich Welse aktiv mittels Reflexionen von selbst produzierten Tönen orientieren (Tavolga 1976). Sie benutzten das gleiche Verfahren wie Delphine. Allerdings war ihre räumliche Auflösung durch die größere Wellenlänge der niedrigeren Frequenz von 300 Hz wesentlich schlechter als bei den Meeressäugern mit 200 kHz (Penzlin 1996). Riffische orientieren sich passiv-akustisch (Tollimeri et al. 2000, Tollimeri et al. 2004, Simpson 2005). In vielen Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass Riffgeräusche bei der Orientierung ihrer Larven eine Rolle spielten (Leis et al. 2003, Mann et al. 2007, Simpson et al. 2005, Simpson et al. 2008). Die verdrifteten Larven der Riffische benutzten die Geräusche, um zum Riff zurückzufinden. Dies scheint auch für die Larven von nicht-riffbewohnenden Fischen zu gelten (Higgs 2005). Die Larven von Adlerfischen (*Micropogonias undulatus*) schwammen nach ihrer Schlupf in offener See in die Küstengewässer. Sie sollen zur

Orientierung dabei die Meeresgeräusche an der Küste genutzt haben. Dies muss allerdings noch experimentell bestätigt werden.

Für Binnengewässer wurden noch keine Untersuchungen zur akustischen Orientierung von Fischen angestellt. Betrachtet man diese Frage theoretisch, wären drei Voraussetzungen notwendig: 1. Die Fließgeräusche an unterschiedlichen Strukturen klingen unterschiedlich. 2. Fische können akustische Unterschiede der Strukturen wahrnehmen und die Richtung zu ihnen bestimmen. 3. Fische können akustische kognitive Karte zu erstellen. Tonolla (2009) zeigte in ersten Experimenten, dass Fließgeräusche von der Rauigkeit des Substrats abhängen. Die erste Voraussetzung ist damit erfüllt. Fische sind ebenfalls in der Lage visuelle kognitive Karten zu erstellen (Aronson 1971), weshalb hier davon ausgegangen wird, dass dies auch für den akustischen Sinn gilt. Dies erfüllt die dritte Bedingung. Außerdem können sie die Richtung einer Schallquelle zu detektieren (Sand & Bleckmann 2008). Wie und ob sie die Fließgeräusche hören, ist nicht ausreichend belegt. Es muss also überprüft werden, ob Fische in Fließgewässern die Geräusche unterschiedlicher Strukturen wahrnehmen können. Dazu wurden Fließgeräusche von der Quelle in Richtung Mündung der Fulda und des Waldbrölbachs mit Hörschwellen einheimischer Fischarten verglichen. Da die Fließgeräusche einen zeitlich heterogenen Charakter aufweisen (Wysocki 2007), wurde der zeitliche Aspekt der Geräusche berücksichtigt. Wenn die Tiere verschiedene Strukturen wahrnehmen könnten, wäre auch die dritte Bedingung erfüllt. Sie wären in der Lage eine (akustische) kognitive Landkarte ihres Lebensraums mit verschiedenen akustischen Landmarken zu erstellen.

1.2 Anthropogene Geräuschbelastung in Bundeswasserstrassen

Laute Geräusche können einen Einfluss auf die Hörschwelle von Tieren und Menschen nehmen. Dies ist an Vögeln, Säugern und Menschen untersucht worden (z.B. Pugliano & Pribitikin & Saunders 1993, Ryals et al., 1999, Ryals & Rubbel, 1988, Campo & Subramaniam & Henderson, 1991 und Melnick, 1976). Dies gilt auch für Fische. Neben den natürlichen Geräuschen müssen sie sich zunehmend mit einer anthropogen veränderten akustischen Umwelt auseinandersetzen (Fay et al. 2008). Dies betrifft zunehmenden

Schiffsverkehr (Urlick 1983, Richardson 1995), Baumaßnahmen (Richardson et al. 1995, Urlick 1983), akustische Methoden zur Bodenexploration und neue Arten von Sonar in Unterseebooten (Lurton 2002). Die Geräuschpegel von Rammarbeiten liegen bei ~150 dB re 1µPa (Richardson 1995), akustische Methoden der Bodenexploration zwischen 210 - 270 dB re 1µPa und verschiedene Arten von Sonare zwischen 180 und 240 dB re 1µPa. Dabei sind militärische Sonare die stärksten und arbeiten im Hörbereich vieler mariner Säuger (Richardson 1995). Die Fahrtgeräusche von Schiffen variieren mit Ihrer Größe. Sie liegen bei kleineren Booten mit Außenbordmotor bei 175 dB re 1µPa (Young and Miller 1960) und steigern sich bis 205 dB re 1µPa bei Supertankern (Cybulski 1977, Richardson 1995). Diese Geräuschpegel haben verschiedene Auswirkungen auf Meeressäuger und Fische. Wale zeigen Verhaltensänderungen im Umfeld von Sonaren, die in einem Frequenzbereich zwischen 1 kHz und 4 kHz arbeiten (Lurton 2002, Richardson et al. 1995) und Ramm-/Bohrarbeiten führten zu Ausweichreaktionen (Richardson et al. 1990). Außerdem wurde nachgewiesen, dass Bodenexplorationen Fische aus dem Arbeitsbereich vertrieben (Slotte et al. 2004). Bei konkreten Untersuchungen von Lärmauswirkungen auf Fische, zeigten sich auch physiologische Effekte. Es kam zu einer temporären Hörschwellenverschiebung (Temporary Threshold Shift, TTS) der Fische (Smith et al. 2004a, 2004b) bzw. zu einer Schädigungen der Haarzellen im Ohr (McCauly et al. 2003). Untersuchungen zu Lärmbelastungen in Form von weißem Rauschen oder Schiffsgeräuschen führten zu ähnlichen Ergebnissen. So verschlechterte sich die Hörschwelle der Fettköpfigen Elritze bei einer Geräuschbelastungen von 142 dB re 1µPa durch weißes Rauschen oder Motorlärm um max. 13,5 dB (Scholik & Yan 2001, Scholik & Yan 2002a). Beim Sonnenbarsch (Hörgeneralist) zeigte sich bei gleicher Geräuschbelastung kein statistisch signifikanter Effekt (Scholik & Yan 2002b). Sowohl bei Hörspezialisten als auch bei einem Hörgeneralisten konnte man dagegen bei entsprechender Geräuschbelastung mit Schiffsgeräuschen einen Anstieg des Stresshormons Cortisol (Wysocki 2006) messen. Weißes Rauschen mit einem adäquaten Schalldruckpegel rief dagegen keine Stressreaktion hervor. In diesem Zusammenhang habe ich folgende Untersuchungen durchgeführt:

1. Es wurden die Fahrtgeräusche eines NACHENS in Abhängigkeit der Entfernung, Geschwindigkeit und Fahrtrichtung untersucht.
2. Es wurden die Fahrtgeräusche von Frachtschiffen im Rhein an drei verschiedenen Orten an jeweils beiden Ufern aufgenommen. Dazu wurden die Entfernung, Geschwindigkeit, Richtung, Schiffslänge, Prall-/Gleithang, Aufnahmetiefe und Ort notiert.
3. Es wurden die Hörschwellen eines Hörgeneralisten und eines Hörspezialisten mit den Fahrtgeräuschen verglichen.
4. Es wurde die Hörschwelle des Hörspezialisten Rotaugen (*Rutilus rutilus*) vor und nach einer Belastung mit Schiffsgeräuschen im Labor gemessen.

Der Versuch mit dem NACHEN diente zur Identifikation möglicher schalldruckbestimmender Faktoren, die bei den Messungen der Frachtschiffe bestätigt werden sollten. Der Vergleich Hörschwellen/Frachtschiffspektren sollte zeigen, ob und wie die Tiere die Fahrtgeräusche wahrnehmen. Abschließend sollte der Versuch mit den Rotaugen zeigen, ob die Tiere durch die Schiffsgeräusche beeinträchtigt werden.

2 Methoden

Die Arbeit besteht aus zwei Teilen, die getrennt zu betrachten sind:

1. Die quantitative und qualitative Untersuchung der natürlichen Geräusche in Fließgewässern und ihr Vergleich mit Hörschwellen einheimischer Fischarten.
2. Die quantitative und qualitative Untersuchung von Schiffsgeräuschen in der Bundeswasserstrasse Rhein und ihr Vergleich mit Hörschwellen einheimischer Fischarten.

Dies führt zu Messungen auf drei Gebieten:

1. Als Grundlage mussten die Hörschwellen einheimischer Fischarten bestimmt werden.
2. Es mussten akustische Messungen der natürlichen Hintergrundgeräusche/Fließgeräusche in Fließgewässern durchgeführt werden.
3. Es mussten Schiffsgeräusche im Fließgewässer untersucht werden:
 - 3.1. Dazu wurden akustische Aufzeichnungen von Schiffsgeräuschen in der Bundeswasserstrasse Rhein gemacht.
 - 3.2. Zur Untersuchung, ob die Geräusche einen Einfluss auf das Hörvermögen der Fische haben könnten, wurde ein physiologischer Versuch durchgeführt.

2.1 Hörschwellenbestimmung mittels der Auditory Brainstem Response Methode (ABR)

2.1.1 Fischarten

Die Hörschwellenbestimmung erfolgte mit der Auditory Brainstem Response Methode (ABR), die an folgenden Fischarten durchgeführt wurde. Nachfolgend findet sich eine kurze Beschreibung der Arten.

Rotfeder (*Scardinius erythrophthalmus*)

Geselliger Uferfisch, der in dicht bewachsenen, stehenden oder langsam fließenden Gewässern lebt. Der Fisch ernährt sich überwiegend vegetarisch. Rotfedern sind mit geringer Strukturverbundenheit limnophil, limnophar und tagaktiv.

Gründling (*Gobio gobio*)

Der Gründling ist ein geselliger bodenorientierter Fisch, der in Fließgewässern, Ufern von Seen und im Brackwasser der Ostsee vorkommt. Gründlinge sind positiv rheotaktisch. Sie sind benthivor und suchen sich ihre Nahrung mit Hilfe ihrer Barteln im Sediment. Gründlinge sind mit geringer Strukturverbundenheit rheophil, rheopar und tagaktiv.

Schleien (*Tinca tinca*)

Die Schleie bewohnt langsam fließende (Bleiregion) oder stehende Gewässer mit dichtem Pflanzenwuchs und schlammigem Boden. Sie ist dämmerungs- und nachtaktiv. Die Ernährung ist überwiegend benthivor. Schleien sind mit hoher Strukturverbundenheit limnophil, limnopar und nachtaktiv.

Barbe (*Barbus barbus*)

Die Barbe ist ein bodenorientierter Schwarmfisch, der klare, strukturreiche Fließgewässer (rheophil) mit Sand oder Kiesgrund bewohnt (Barbenregion). Die Barbe ist dämmerungs- und nachtaktiv. Die Ernährung besteht in erster Linie aus Makrozoobenthos. Barben sind mit geringer Strukturverbundenheit rheophil, rheopar und nachtaktiv.

Karpfen (*Cyprinus carpio*)

Der Karpfen ist ein bodenorientierter Bewohner in stehenden und langsam fließenden Gewässern. Sie bevorzugen dichten Pflanzenwuchs und weichen Bodengrund. Ihre Nahrung besteht überwiegend aus Makrozoobenthos, dass aus dem Boden gewühlt wird. Karpfen haben eine indifferente Strömungspräferenz, sind limnopar und tagaktiv.

Hechte (*Esox lucius*)

Hechte kommen in langsam fließenden oder stehenden Gewässern vor. Sie sind standorttreu und leben ufernah im Pflanzenbewuchs. Sie sind tagaktive Stoßräuber, die Fische und kleine Vertebraten (Frösche, Vögel) fressen. Hechte haben eine indifferente Strömungspräferenz und sind mit hoher Strukturverbundenheit limnopar und tagaktiv.

Hasel (*Leuciscus leuciscus*)

Die Hasel bevorzugt strömungsreiche Flüsse und Bäche. Haseln sind tagaktiv, halten sich dicht unter der Wasseroberfläche auf und ernähren sich von Anflugnahrung, tierischem Plankton und bodenlebenden Molusken. Haseln haben eine indifferente Strömungspräferenz und sind mit geringer Strukturverbundenheit rheopar und tagaktiv.

Döbel (*Leuciscus cephalus*)

Döbel sind euryöke Fische, die zwar die Äschen- und Barbenregion bevorzugen, aber auch in Stauseen vorkommen. Wie die Haseln ernähren sie sich von Anflugnahrung. Sie werden mit zunehmendem Alter zu Einzelgängern und verteidigen feste Standplätze. Ausgewachsen sind sie vorwiegend räuberisch und ernähren sich von kleinen Fischen, Fröschen und Säugetieren.

Äsche (*Thymallus thymallus*)

Äschen sind standorttreue Bewohner klarer, sauerstoffreicher Fließgewässer (Äschenregion). Sie bilden kleine Gruppen. Ihre Nahrung besteht aus Makrozoobenthos, vereinzelt aus Fischen. Die Eiablage findet in Laichgruben statt.

Bachforelle (*Salmo trutta f. fario*)

Die Bachforelle ist ein stationärer Leitfisch der Forellenregion. Ihre Nahrung besteht aus Makrozoobenthos, Anflugnahrung und Fischen. Bach- See- und Meerforellen unterscheiden sich morphologisch und ökologisch. Sie sind aber Formen derselben Art.

Lachs (*Salmo salar*)

Der Lachs ist ein anadromer Wanderfisch aus dem Nordostatlantik, der Nordsee, Ostsee und den in ihnen einmündenden Flüssen. Die Eiablage findet in Laichgruben statt. Die Larven schlüpfen im Frühjahr in den Laichgewässern und ziehen nach 1-3 Jahren im Meer. Sie fressen bis zu einer Größe von ca. 10 cm Makrozoobenthos und wechseln dann auf Fische.

Quappe (*Lota lota*)

Quappen sind die einzigen Vertreter der Dorschfamilie im Süßwasser. Sie sind nachtaktive Bewohner klarer, sauerstoffreicher Gewässer (Flüsse und Seen). Ihre Nahrung besteht aus Makrozoobenthos und kleinen Fischen. Quappen sind Laichräuber. Ihre aktive Phase ist im

Winter. Im Sommer findet eine Reduktion der Nahrungsaufnahme statt.

2.1.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die ABR-Methode wurde nach Kenyon et al. (1998) in einem begehbaren, schallisolierten Raum durchgeführt (Abb. 2.1). Dabei wurde der Versuchsfisch in ein mit Wasser gefülltes 30 Liter Becken (50 cm x 30 cm x 20 cm) gesetzt. Die Wassertemperatur entsprach der Raum bzw. Hälterungstemperatur. Der Fisch wurde unter MS222-Betäubung mit Pancuronium (Fa. Organon) vorübergehend relaxiert. Die Dosis des Relaxans war artspezifisch. Der Fisch wurde unter Wasser durch ein Mundstück während des Experiments mit belüftetem Wasser beatmet (Abb. 2.1). Die Halterung des Fisches bestand aus zwei/drei Gummibändern, die den Fisch distal der Afterflosse und der Brustflossen stützten. Die Elektroden bestanden aus Silberdraht (Durchmesser 1mm), der am Ende platt geklopft und um 90° gebogen wurde. So erhielt man eine 2-4 mm² große Auflagefläche. Mittels eines Mikromanipulators wurden die Elektroden dorsal auf den Fischkopf aufgedrückt. Die Messelektrode wurde auf Höhe der Medulla, die Referenzelektrode zwischen Augen und Nasenlöchern platziert. Um die Leitfähigkeit der Elektroden zu verbessern, wurde Elektrodengel verwendet. Geräte und Software zur Reizgenerierung und Aufnahme der Summenpotentiale stammten von Tucker Davis Technologies (TDT). Benutzt wurde das System III mit BioSig- und SigGen-Software. Im Versuch wurden die Hörschwellen für unterschiedliche Fischarten mit der Untersuchung unterschiedlicher Frequenzen bestimmt (Tab. 2.1). Der Reiz sollte so kurz wie möglich und so lang wie nötig sein. Bei tiefen Frequenzen muss man darauf achten, dass genug Schwingungsperioden an der Membran des Lautsprechers durchlaufen werden, um den Ton darzustellen. Ist die Zeitdauer zu kurz, erhält man einen „Klick“ über viele Frequenzen statt des Signals. Die Signale wurden mit der Software SigGen erstellt.

Tab. 2.1: Mittels ABR-Methode untersuchte Hörschwellenfrequenzen (Hz) verschiedener Fischarten

| Frequenz | Cypriniden | Hecht | Äsche | Bachforelle | Lachse | Quappe |
|-----------------|-------------------|--------------|--------------|--------------------|---------------|---------------|
| 100 Hz | | | x | x | x | x |
| 150 Hz | | | x | | x | x |
| 200 Hz | x | x | x | x | x | x |
| 260 Hz | | | x | x | x | x |
| 300 Hz | | | | | | x |
| 400 Hz | x | x | x | x | x | x |
| 500 Hz | | | x | x | x | x |
| 600 Hz | x | x | | x | x | x |
| 800 Hz | x | x | | | | |
| 1000 Hz | x | x | | | | |
| 1500 Hz | x | | | | | |
| 2000 Hz | x | | | | | |
| 2500 Hz | x | | | | | |
| 3000 Hz | x | | | | | |

Es wurde ein Grundsignal mit einem maximalen Schalldruckpegel (SPL) programmiert. Die Software legte automatische abgeschwächte Signale (Attenuationen) dieses Grundsignals mit niedrigerem SPL an. Die Abschwächung nahm bei den Frequenzen 100Hz-1500Hz in 5-dB-Schritten, bei höheren Frequenzen in 2,5-dB-Schritte zu. Die Signale starteten und endeten mit einer Rampe (50 μ s). Die Reizwiederholrate betrug 9 Reize pro Sekunde. Die Phase wechselte bei jeder Reizgabe um 180 °, um Reizartefakte zu minimieren. Eine Reizgabe bestand jeweils aus der Präsentation von 2000 Signalen einer Lautstärke. Jede Reizgabe wurde zweimal durchgeführt. Die Potentiale wurden aufgezeichnet und nach jeder Reizgabe gemittelt. Die Aufzeichnungslänge der Hirnströme betrug 80 ms. Die Mittelung aller Aufzeichnungen einer Reizgabe verbesserte das Signal/Rausch-Verhältnis. Die beiden gemittelten Aufzeichnungen (Reizgabe mit

gleicher Frequenz und gleichem SPL) wurden korreliert (s. Auswertung). Die Reizgabe erfolgte über die Gerätereihe Computer - D/A-Wandler (TDT, RP 2.1) – Abschwächer - Verstärker (Kenwood, KAF1010)- Lautsprecher . Zur Kontrolle wurde der Reiz zusätzlich mit Hilfe eines Oszilloskops (Yokogawa, DL 1300A) dargestellt (siehe Abb. 2.1). Der Lautsprecher hing waagrecht in 1m Höhe über dem Versuchsbecken, parallel zur Wasseroberfläche (Abb. 2.1). Die Aufnahme der Hirnströme des Versuchsfisches erfolgte über die Gerätereihe Elektroden - Vorverstärker (TDT, RA 4 PA) - A/D-Wandler (RA 16) - Computer. Aufnahmen, Filterung und Auswertung erfolgten mittels der Software BioSig (Abb. 2.1).

2.1.3 Auswertung

Zur Bestimmung der Hörschwelle wurden die bei gleichem SPL (Attenuation) und gleicher Frequenz erzielten zwei Messungen korreliert. Die niedrigste Lautstärke, bei der ein Korrelationskoeffizient $\geq 0,3$ (Lu & Tomchik, 2002; Scholik & Yan, 2001, 2002) erzielt wurde, wurde als Hörschwelle festgelegt.

Zur Bestimmung des Schalldruckpegels der Hörschwelle, wurden für jede Frequenz eine Kalibriergerade erstellt. Die Kalibriergeraden ordneten einer Abschwächungsstufe/Attenuation einen Schalldruckpegel unter Wasser zu. Dazu wurden für möglichst viele Abschwächungsstufen (und alle Frequenzen) hydroakustische Aufnahmen im Versuchsbecken mittels Hydrophon (Bruel & Kjaer 8104, Reson TC4032) aufgenommen. Das Hydrophon wurde an der Fischhalterung befestigt. Zur Bestimmung des SPL's, wurde der Signalanteil mit der größten Amplitude (Peak-to-Peak) ermittelt und der RMS-Wert gemäß Kenyon (1998) berechnet. Mit Hilfe der Messungen wurde für jede Frequenz über alle Abschwächungsstufen eine Regressionsgerade in Excel erstellt (s. Anhang ABR – Kalibriergeraden). Der Schalldruckpegel wurde durch die Regressionsgerade gut dargestellt ($R^2 > 0,97$). Der SPL der Hörschwelle konnte anschließend durch Einsetzen der Abschwächungsstufe in die Formel der Kalibriergerade berechnet werden.

Wenn möglich, wurden alle Versuche mit 6 Tieren einer Art durchgeführt. Dabei erhielt man zunächst relative Hörschwellen. Anschließend wurde aus allen Hörkurven einer Art eine gemittelte Hörkurve berechnet. Die logarithmische Skalierung der Dezibelskala

wurde berücksichtigt, indem die Rechenoperation in der linearen Einheit Pascal durchgeführt wurde. Dazu musste der Schalldruckpegel von der Einheit dB (SPL_{dB}) in die Einheit Pascal (SPL_{Pa}) umgerechnet werden (Formel 2.1).

$$SPL_{Pa} = 10^{\frac{(SPL_{dB} - 120)}{20}} \quad (2.1)$$

SPL_{Pa} =Schalldruckpegel [Pa]; SPL_{dB} =Schalldruckpegel [dB re 1 μ Pa]

Für einige Arten konnte keine ausreichende Anzahl Tiere bezogen werden. Dies galt besonders für Freifänge. Nach den Versuchen wurden die Freifänge mit Antimaladin behandelt, > 6 Wochen gehältert und nach gründlicher Untersuchung wieder ausgesetzt.

Hörspezialisten benutzen die Schwimmblase als Schalldruckaufnehmer und übertragen das Signal auf das Ohr (Popper & Fay 1993). Bei den Hörgeneralisten ist demgegenüber zu beachten, dass sie nur die Schallschnelle und nicht den Schalldruck messen. Sie reagieren auf ihre Körperschwingung im Schallfeld. Dem entsprechen ist für sie die Wasserbewegung/Partikelgeschwindigkeit des Schallfeldes wichtiger (Schellart & Popper 1992). Die Schallschnelle konnte jedoch nicht gemessen werden. Deshalb ist ein direkter Vergleich der Hörschwellen von Hörspezialisten und Hörgeneralisten mit der gegebenen Vorsicht zu behandeln. Man kann aus dem Schalldruck die Partikelgeschwindigkeit berechnen (Kuchling, 1994).

$$p = v * c * \rho \quad (2.2)$$

p = Druck [Pa], v = Partikelgeschwindigkeit [m/s], c = Schallgeschwindigkeit (ca. 1480 [m/s]), ρ = 1000 [kg/m³]

Die Schwellenwerte werden jedoch auf Basis der gemessenen Schalldrücke (SPL) dargestellt.

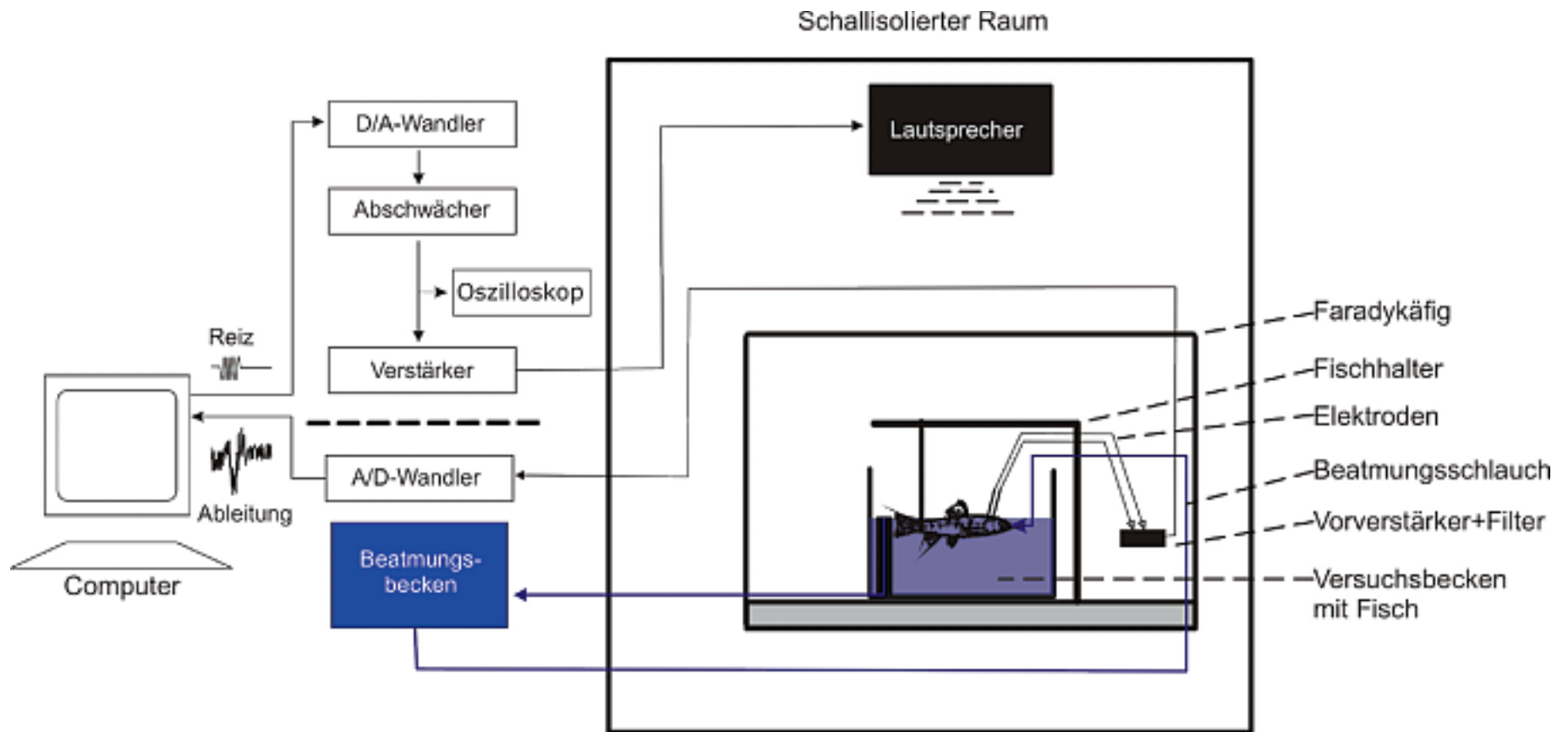


Abb. 2.1: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Fischhörschwelle mit Hilfe der ABR-Methode. Vom Computer wird ein Signal über einen D/A-Wandler, Abschwächer und Verstärker am Lautsprecher ausgegeben. Liegt das Signal über der Hörschwelle des Fisches, ruft es am am Ohr ein Summenpotentiale hervor, das an der Medulla mit Elektroden abgegriffen, verstärkt, gefiltert und über einen A/D-Wandler in den Computer eingelesen wird. Die Beatmung des Fisches geschieht über eine Tauchpumpe. Mit Hilfe eines Überlaufrohres wird der Wasserspiegel konstant gehalten.

2.1.4 Optimierung des Versuchsdesigns

Die Aufhängung der Fische wurde während der Experimente verbessert. Der oben beschriebene Aufbau gilt nur für die Cypriniden und die Hechte. Salmoniden, Äschen und Quappen wurden nicht mehr mit einem Mundstück beatmet, sondern mit einem Silikonschlauch. Außerdem bestand die Aufhängung aus Gummibändern. Beides sollte das Schwingungsverhalten des Fisches im Schallfeld verbessern. Die alten Vorrichtungen bestanden aus Stahl bzw. beschichtetem Draht. Für die Experimente mit den Quappen wurde das Becken ausgetauscht. Die Versuche fanden in einem runden Becken aus Plexiglas mit 40 cm Durchmesser und 20 cm Höhe statt.

2.2 Natürliche hydroakustische Umwelt und Hörschwellen einheimischer Fischarten

2.2.1 Gewässer und Probenahmestellen

Es wurde die Längsentwicklung der akustischen Profile in der Fulda und dem Waldbrölbach untersucht. Es sollte herausgefunden werden, ob ein Fließgewässer in quellnaher Region (Fulda: Forellenregion) anders klingt als in mündungsnaher Region (Fulda: Barbenregion). Anschließend sollte ein Vergleich der akustischen Messungen mit den Hörschwellen von Fischarten der verschiedenen Fischzonen mögliche Anpassungen an eine Längsentwicklung aufzeigen. Dazu wurden entlang der Fulda an 12 Probenahmestellen und am Waldbrölbach an 7 Probenahmestellen akustische Messungen von der Quelle bis zur Mündung vorgenommen (s. Abb. 2.2 und 2.3). Jede Probenahmestelle bestand aus einer Riffle/Pool Sequenz. An jeder Probenahmestelle wurden Messungen an verschiedenen Strukturen im Längsprofil der Sequenz durchgeführt. Im unteren Teil der Fulda musste wegen der Wassertiefe vom Boot aus gemessen werden. Das Boot trieb dabei in der Strömung oder lag am Ufer.

Waldbrölbach

Der Waldbrölbach entspringt in Waldbröl. Die Probenahmestellen lagen bei Rossenbach, 1,5 km unterhalb von Rossenbach, an der Hillesmühle und am Regenüberlaufbecken von Ruppicheroth (Abb. 2.2). Nach dem Zusammentreffen mit der Bröl wurde bei Schloss

Herrenstein, auf halber Strecke zwischen Herrenstein und dem Ort Bröl und unterhalb des Ortes Bröl beprobt.

Hydrologische Grundlagendaten:

Länge : 17,5 km

Einzugsgebiet : 67,6 km²
bis Bröleck

MQ Pegel Bröl : 1,31 m³/s

Der Bach entspringt rd. 350 m ü. NN und mündet bei Bröleck bei rd. 120 m ü. NN in die Bröl. Das mittlere Gefälle entspricht 0,13 ‰.



Abb. 2.2: Waldbrölbach (blaue Linie) mit Probenahmestellen (rote Punkte), die Quelle liegt in Waldbröl. Nach dem Zusammenfluss mit der Bröl (schwarz, gestrichelt) bei Bröleck (blau, gestrichelt), mündet das Gewässer bei Bröl in die Sieg.

Fulda

Die Fulda bildet zusammen mit der Werra die Quellflüsse der Weser und entspringt auf der Wasserkuppe in der Rhön.

Hydrologische Grundlagendaten:

Länge : 220 km

Einzugsgebiet : 6950 km²

MQ Pegel Guntershausen : 57,9 m³/s

Das Gefälle beträgt bis zur Fliedermündung 16,6‰, im Folgenden bis Hannoversch Münden zwischen 0,93 ‰ und 0,54 ‰. Die Probenahmestellen sind in Abb 2.3 dargestellt. Sie befanden sich nahe der Kläranlage von Kühnstein (1), bei Gersfeld (2), nahe Lütter (3), nahe Löschenrod (4), Üllershausen (5), Kerspenhausen (6), Mecklar (7), Braach (8), Beisenförth (9), Büchenwerra (10), Speele (11) und 2 km unterhalb von Speele (12).

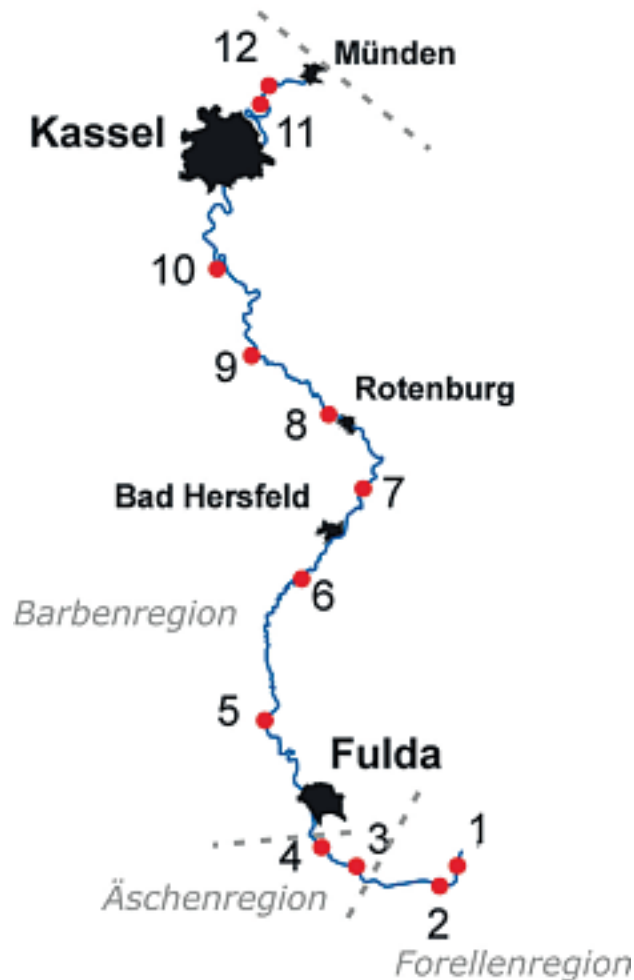


Abb. 2.3: Fulda mit Probenahmestellen (rote Punkte). Die Quelle liegt südlich auf der Wasserkuppe in der Nähe von Kühnstein (Probenahmestelle 1). Fischregionen nach der Einteilung im Fischkataster des Hessischen Landesumweltamtes.

2.2.2 Akustikmessungen

Die akustischen Messungen wurden mit Hydrophonen (Bruel & Kjaer 8104 und Reson TC4032 mit Bruel & Kjaer Verstärker 2635) durchgeführt und fanden auf zwei verschiedene Arten statt. Bei Messungen in der Fulda wurde ab der Probenahmestelle Üllershausen

flussabwärts mit dem Boot beprobt. Das Boot trieb dabei in der Strömung oder lag fest am Ufer. Das Hydrophon hing über Bord in einer Probenahmetiefe von 0,5 m. Bei größeren Tiefen bestand die Gefahr, dass das Hydrophon auf Grund oder gegen Hindernisse in der Strömung schlug. Im oberen Bereich der Fulda war das Wasser für ein Boot nicht tief genug. Das Hydrophon wurde in natürlichen Vertiefungen ca. 2 cm über Grund positioniert, um das Hydrophon der Strömung zu entziehen. Damit wurde versucht, artifizielle Fließgeräusche am Hydrophon durch Wirbelbildung zu umgehen. Als Befestigung wurde ein Erdnagel von 10 cm bzw. 20 cm Länge gewählt, an dessen oberem Ende das Hydrophon befestigt wurde. Die Ausrichtung des Hydrophons war horizontal, parallel zum Grund. Bei Messungen im Waldbrölbach/Bröl wurde ausschließlich letztere Methode verwendet. Die aufgezeichneten Signale wurden entweder über eine A/D-Wandlertkarte (DAS16/16AO, Fa. Computer Boards) auf einen Laptop oder mit dem Datenerfassungssystem Liberty von LDS aufgezeichnet. Die Steuersoftware Perception des Liberty zeichnete 30 Sekunden bei einer Samplingrate von 20 kHz auf. Im Verstärker war ein 2Hz High-Pass Filter geschaltet. Die Einstellungen erlaubten eine Frequenzanalyse bis zur Nyquist-Frequenz von 10 kHz. Nach dem Nyquist-Shannon Theorem müssen in einem Signal alle Anteile kleinere Frequenzen als die Nyquist-Frequenz haben, damit das abgetastete Signal wieder ohne Informationsverlust rekonstruiert werden kann. Die Nyquist-Frequenz entsprach in unserem Fall der halben Samplingrate. Da im Mittelpunkt unseres Interesses der Frequenzbereich 1Hz bis 4000 Hz lag, wurde eine Samplingrate von 20 kHz für ausreichend erachtet.

2.2.3 Datenanalyse

Beschreibung natürlicher Fließgeräusche

Geräusche bestehen im Gegensatz zu Tönen aus verschiedenen Frequenzen. Man kann Geräusche quantitativ und/oder qualitativ beschreiben:

1. Qualitativ: Man gibt den zeitlich gemittelten Schalldruckpegel einzelner Frequenzen (z.B. Energiedichtespektren) oder definierter Frequenzbänder in Form von Terzbandspektren an. Siehe dazu *RMS-Amplitudenspektrum*, *gemitteltes Terzspektrum*, *Terzspektrum*.

2. Quantitativ: Man gibt den momentanen Schalldruckpegel (L_p , in dieser Arbeit SPL nach DIN EN ISO 3743-1) oder den über ein Zeitintervall gemittelten äquivalenten Schalldruckpegel der Summe aller Frequenzen an. Dies ist nach DIN 45 641 der L_{eq} (Siehe dazu *Schalldruckpegel ($L_p=SPL$)* und *Äquivalenter Dauerschalldruckpegel (L_{eq})*).

Konkret wurden die Daten im ersten Schritt in Form von Terzspektren dargestellt und farblich nach Probenahmestellen gruppiert. Diese Daten legten eine Untersuchung auf einen akustischen Unterschied zwischen den Strukturen Riffle und Pool nahe (s.u.). Deshalb wurde neben einer Veränderung der Terzspektren im Längsverlauf der Gewässer auch der Faktor Struktur (Riffle /Pool) untersucht.

Die Untersuchung der qualitativen hydroakustischen Längsentwicklung der Gewässer wurde mit dem Programm R (freie Software, R-project) durchgeführt. Zunächst wurden dafür alle Messungen einer Probenahmestelle gemittelt (s. *Gemitteltetes Terzspektrum*). Da die Anzahl der Messungen in Pools und Riffles zwischen den Probenahmestellen stark variierte, gingen Pool und Riffle mit gleicher Gewichtung in das gesamtgemittelte Spektrum ein. Ansonsten wäre das gemittelte Spektrum in erster Linie durch das Mengenverhältnis der Messungen in Pool und Riffle bestimmt worden. Dazu wurden im ersten Schritt die mittleren Terzspektren von Pool und Riffle getrennt berechnet. Im zweiten Schritt wurden diese beiden gemittelten Spektren zu einem gesamtgemittelten Spektrum zusammengefasst. Im Unterlauf der Fulda waren keine Riffles vorhanden. Es ging hier das gemittelte Spektrum der Pools in die Berechnung ein. Man erhielt so für die 12 Probenahmestellen der Fulda 12 gesamtgemittelte Spektren. Es ist zu beachten, dass vor jeglichen Berechnungen die logarithmische Einheit dB in die lineare Einheit Pascal umgerechnet werden muss. Mit der Funktion metaMDS (Programm R) wurde eine MDS (Multidimensionale Skalierung) der gemittelten Terzspektren berechnet und mit der Funktion envfit (Programm R) auf Änderungen mit zunehmender Entfernung zur Quelle getestet. Die Entfernung der Probenahmestelle zur Quelle wurde mit Hilfe von GoogleEarth ermittelt. Die MDS stellt die Ähnlichkeit multivariater Daten am Euklidischen Abstand zweidimensional, graphisch dar. Die Daten werden dabei auf zwei Dimensionen reduziert, so dass sie in einem Diagramm darstellbar

sind. Je näher zwei Datenpunkte zusammenliegen, desto ähnlicher sind die beiden Datensätze. Die Datensätze sind in diesem Fall Terzspektren von akustischen Messungen. Verglichen wurde der SPL der einzelnen Bänder der Terzspektren. Zur Untersuchung der Änderung der Geräuschqualität im Längsverlauf wurde den Terzspektren der Faktor *Distanz zur Quelle* [km] zugeordnet. Die Funktion *envfit* (Programm R) korreliert diesen Faktor mit den Terzspektren. Man kann mit dieser Methode untersuchen, ob sich die Terzspektren mit zunehmender Distanz zur Quelle (Längsverlauf) ändern.

Die Untersuchung der qualitativen hydroakustischen Unterschiede zwischen Riffles und Pools wurde mit Hilfe des Programms PRIMER durchgeführt. Riffles und Pools sind die größten morphologischen Unterschiede in einem Gewässer. Da die Definition beider Strukturen nicht eindeutig ist (Schwoerbel, 1993; Schönborn, 1992), wurden die Messungen subjektiv Riffles und Pools zugeordnet. In der Fulda trat das Problem auf, das im Mittel- und Unterlauf keine Strukturierung in Riffles und Pools vorhanden war. Diese Messungen wurden als „Strömung“ definiert und mit den Pools verglichen. Es gab keinen statistisch signifikanten Unterschied (ANOSIM, $p < 0,05$). Pools und Strömung wurden deshalb zur Gruppe „Pools“ zusammengefasst.

Zur statistischen Bewertung wurde zunächst eine Multidimensionale Skalierung (MDS) der Terzspektren berechnet. Diesmal wurde den Spektren der Faktor Riffle/Pool zugeordnet. Anschließend wurde eine ANOSIM (Analysis of Similarities) berechnet, um die Trennung der Datensätze in der MDS statistisch zu bewerten. Die ANOSIM-Analyse (Programm Primer) berechnet die Ähnlichkeit von Stichprobengruppen.

Zuletzt wurde mit Hilfe der SIMPER-Analyse (Similarity percentages) untersucht, ob bestimmte/wenige Frequenzbänder innerhalb der Datensätze für den Unterschied der Gruppierungen (Riffles und Pools) verantwortlich sind.

Zur quantitativen Analyse wurde der äquivalente Schalldruckpegel (L_{eq}) der akustischen Aufnahmen berechnet. Eine beschreibende Statistik über alle Messwerte eines Gewässers (Mittelwert, Std-Abweichung, -Fehler, Varianz) bot sich für die Analyse nicht an. Diese würde nicht das Gewässer beschreiben, da die Ergebnisse vom

zufälligen Verhältnis der Anzahl der Messungen in Pools und Riffles abhängig wären. Um den L_{eq} für die Strukturen von Fulda und Waldbrölbach statistisch zu beschreiben, wurde mit einer zweifaktorielle ANOVA auf Unterschiede in der Geräuschquantität zwischen den Strukturen und den beiden Gewässern getestet (N=86). Außerdem wurden die Daten als Mittelwert mit Standardfehler für die Gewässer nach Pool und Riffle getrennt dargestellt (Fulda: N=48, Waldbrölbach: N=38). Auch hier wurden jeweils die Daten des L_{eq} vor der Analyse in Pascal umgerechnet. Dies setzte die Daten in ein lineares Verhältnis.

Zur Untersuchung der longitudinalen, hydroakustischen Entwicklung wurden die L_{eq} jeder der Probenahmestelle gemittelt. Wie bei den Terzspektren musste ein gesamtgemittelter L_{eq} mit gleicher Gewichtung von Riffle und Pool jeder Probenahmestelle berechnet werden. Jedem gesamtgemitteltem L_{eq} wurde seine Entfernung zur Quelle (Faktor: *Distanz zur Quelle*) zugeordnet. Mit Hilfe der 12 gesamtgemittelten L_{eq} der Fulda bzw. 7 L_{eq} des Waldbrölbachs und der zugehörigen Entfernungen zur Quelle wurde ein Diagramm erstellt. Anschließend wurde für den L_{eq} und die Entfernung zur Quelle eine Regressionsgerade und der Pearson-Korrelationskoeffizient berechnet.

2.2.4 Anpassung der Hörschwelle von Fischarten an die Hintergrundgeräusche ihres Lebensraums

Will man eine Anpassung von Hörschwellen an einen akustischen Lebensraum untersuchen, muss man zunächst die Unterschiede zwischen Hörschwellen eindeutig definieren. In diesem Fall wird eine einfache und eindeutige Unterscheidung in zwei Kategorien durchgeführt: Hörschwellen von Hörgeneralisten und Hörspezialisten. Die Hörschwellen der Hörspezialisten unterscheiden sich in Empfindlichkeit und Breite des wahrnehmbaren Frequenzspektrums von denen der Hörgeneralisten. Dies kann eine Anpassung an Qualität (Spektrum) und Quantität (L_{eq}) des akustischen Lebensraums darstellen. Dementsprechend wurde das Hörgeneralisten/Hörspezialisten-Verhältnis in Bezug auf den L_{eq} und die gemittelten Terzspektren der Lebensräume untersucht. Die Lebensräume stellten dabei die Forellen-, Äschen- und Barbenregion

der Fulda dar. Der Waldbrölbach war zu klein für solch eine Gliederung und wurde deshalb außer Acht gelassen.

Um die Verteilung von Hörgeneralisten und Hörspezialisten im Längsverlauf der Fulda zu erfassen, wurde das Fischkataster der Fulda ausgewertet. Dieses wurde kostenfrei vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie zusammen mit der Benutzeroberfläche NATIS zur Verfügung gestellt. Dazu wurden die prozentualen Anteile von Hörgeneralisten und Hörspezialisten in den Fischzonen Forellen-, Äschen- und Barbenregion berechnet (N=27457). Die Hörgeneralisten wurden noch einmal in Salmoniden bzw. andere Arten getrennt. Das Verhältnis sollte zeigen, ob es zu einer Artenverschiebung im Längsverlauf der Fulda über die Fischzonen kommt. Man kann zwar damit argumentieren, dass durch Besatzmaßnahmen die natürliche Fischverteilung gestört wird. Jedoch sollte davon ausgegangen werden, dass die eingesetzten Tiere im Gewässer wandern und sich in ihrer Fischzone ansiedeln.

Zuerst wurde der Zusammenhang zwischen Hörschwellenempfindlichkeit und Geräuschquantität der akustischen Umwelt untersucht. Hörspezialisten hören empfindlicher als Hörgeneralisten. Dies wäre eine Anpassung, wenn in ihrem Lebensraum die Geräusche leiser wären, als im Lebensraum der Generalisten. Zur Untersuchung dieses Zusammenhangs wurde das logarithmierte Hörgeneralisten/Hörspezialisten-Verhältnis in Abhängigkeit von der *Distanz zur Quelle* dargestellt. Dazu wurde aus dem Fischkataster das logarithmierte Hörgeneralisten/Hörspezialisten-Verhältnis jeweils an den 12 akustischen Probenahmestelle (oder möglichst nahe daran) berechnet. Räumliche Abweichungen gab es nur bei drei Probenahmestellen. Im Oberlauf lag diese bei max. 2 km, aber nie außerhalb der gleichen Fischzone. Eine Pearson-Korrelation zwischen Fischartenverhältnis und *Distanz zur Quelle* sollte mögliche Zusammenhänge aufzeigen. Als letzte quantitative Untersuchung wurde das Hörgeneralisten/Hörspezialisten-Verhältnis mit dem L_{eq} im Längsverlauf der Fulda verglichen. Dazu wurde die Pearson-Korrelation beider Größen berechnet und dargestellt.

Außerdem wurde die Möglichkeit einer qualitativen Hörschwellenanpassung betrachtet. Eine qualitative Hörschwellenanpassung wäre eine Änderung in der wahrnehmbaren

Frequenzbandbreite der Umgebungsgeräusche als Anpassung an ein bestimmtes Klangspektrum des Lebensraums. Für die Untersuchung eines qualitativen Zusammenhangs zwischen einer Anpassung der Hörschwelle an die Geräuschqualität wurden Hörschwellen mit Terzspektren der Hintergrundgeräusche verglichen. Konkret wurden die Hörschwellen der Leitfischarten Bachforelle (*Salmo trutta f. fario*, Hörgeneralist), Äsche (*Thymalus thymalus*, Hörgeneralist) und Barbe (*Barbus barbus*, Hörspezialist) mit dem gemittelten Terzspektren von Riffle bzw. Pool ihrer Fischzone verglichen. In der Äschen- und Barbenregion wurde zusätzlich das Audiogramm des Hörspezialisten Döbel eingefügt. Dieser kommt in diesen Fischzonen auch natürlich vor (Gerstmeier & Romig 2003). Die Messungen verteilten sich auf die Forellenregion (Riffle = 7 Messungen, Pool = 3 Messungen) mit zwei Probenahmestellen, die Äschenregion (Riffle = 5 Messungen, Pool = 9 Messungen) mit zwei Probenahmestellen und die Barbenregion (Riffle = 6 Messungen, Pool = 21 Messungen) mit acht Probenahmestellen) s. Abb. 2.3). Die Grenze zwischen Forellen- und Äschenregion befindet sich zwischen Probenahmestelle 2 und 3, die Grenze von Äschen- und Barbenregion befindet sich kurz hinter Probenahmestelle 4. Ein Vergleich der Hörschwellen mit den gemittelten Terzspektren zeigt, welche Frequenzen Fische in dem jeweiligen Lebensraum hören können. Es ist zu beachten, dass Terzspektren den zeitlich gemittelten Schalldruckpegel einer Frequenz über den Aufnahmezeitraum wiedergeben. Dabei werden laute, transiente (kurze) Signale aus dem Spektrum herausgemittelt. Dementsprechend eignet sich der Vergleich Hörschwelle/Terzspektrum gut, um eine Hörschwellenanpassung an ein mittleres Fließgeräusch zu untersuchen.

Um akustische Einzelereignisse in einer Aufnahme zu berücksichtigen, wurde eine neue Auswertemethode entwickelt (s. nächstes Kapitel). Diese zerlegt die akustische Aufnahme in viele kurze Teilstücke, berechnet für jedes ein Terzspektrum und vergleicht diese mit den Hörschwellen. Mit Analysen dieser Methode wird versucht im Ergebnisteil zu erklären, wie akustische Orientierung in Fließgewässern funktionieren könnte.

Neben dem Vergleich der Terzspektren mit den Hörschwellen wurde untersucht, ob und in welchem Frequenzbereich sich die Geräusche der Lebensräume (Fischzonen) voneinander unterscheiden. Dazu

wurde jedes Terzspektrum mit der Eigenschaft seiner Fischzone gekennzeichnet. Mit Hilfe einer SIMPER-Analyse wurde anschließend berechnet, welches Frequenzband einen wie großen Anteil am akustischen Qualitätsunterschied zwischen den Fischzonen besitzt. Mit diesen Ergebnissen wurden maßgeblich unterschiedliche Frequenzbänder (Beitrag zum Gesamtunterschied >5%) zwischen Forellen- und Äschen- und Barbenregion identifiziert. Diese Frequenzbänder wurden im zweiten Schritt mit den Hörschwellen von Bachforellen (Hörgeneralist) und Döbeln (Hörspezialist) verglichen. Es wurde nach einer Übereinstimmung zwischen empfindlichsten Hörbereich und charakteristischen Frequenzbändern der Fischzonen gesucht.

Orientierung an akustischen Landmarken

Zum Thema *Orientierung von Fischen an akustischen Landmarken* wurden einige Messungen in der Sieg durchgeführt. Eine einfache Messung bestand aus drei hydroakustischen Messungen in der Sieg. Dort wurden die Fließgeräusche im Querprofil in der Flussmitte, am Gleithang und in Ufernähe aufgezeichnet (Aufnahmelänge: 30 s, Samplingrate: 20000 Hz; Hydrophon Bruel&Kjaer 8104, Verstärker Bruel&Kjaer 2635, High-Pass Filter 2Hz, A/D Wandler Liberty der Firma LDS). Das Substrat war an allen drei Messstellen gleich. Begleitend wurde die Wassertiefe und die Fließgeschwindigkeit gemessen. In der Auswertung wurden die RMS-Terzspektren der Aufnahmen mit den Hörschwellen von Döbel (*Leuciscus cephalus*) und Karpfen (*Cyprinus carpio*) verglichen. Der Vergleich soll zeigen, welche Frequenzbänder welches Tier an welchem Ort wie laut hört. Eine Änderung der Geräuschqualität und -quantität, die mit einem Ortswechsel verbunden ist, deutet auf die Möglichkeit einer Orientierung an relativen Geräuschänderungen hin.

Desweiteren wurden alle akustischen Messungen einer Probenahmestelle an Fulda und Waldbrölbach in Form eines Contourplots für jede Probenahmestelle zusammengefasst. Der Contourplot zeigt in der Übersicht die quantitative und qualitative Geräuschänderungen innerhalb einer Probenahmestelle. In der Arbeit ist allerdings nur eine Probenahmestelle beispielhaft besprochen. Die vollständigen Ergebnisse finden sich im Anhang.

Zuletzt wurde eine Methode zur Berechnung des prozentualen Fließgeräuschanteils über der Hörschwelle entwickelt. Bei dem Thema „Hörvermögen von Fischen“, interessiert häufig, welche Geräusche Fische wahrnehmen können. Um festzustellen, ob Geräusche über oder unter der Hörschwelle von Fischen liegen, wird in einigen Publikationen die Hörschwelle von verschiedenen Fischarten mit den Powerspektren von hydroakustischen Geräuschen verglichen (z.B. Amoser & Ladich 2005). Ist das Geräusch ein homogenes Signal (z.B. weißes Rauschen) ist die Methode ausreichend. Misst man dagegen Geräusche im Freiland finden sich häufig einzelne, kurze Ereignisse (z. B. Plätschern, Aneinanderstoßen von Steinen) im Signal. Dabei ist es möglich, dass das ständige Hintergrundrauschen des Signals unterhalb der Hörschwelle liegt (unhörbar), die einzelnen Ereignisse aber über der Hörschwelle (hörbar). Zum Vergleich letzterer Signale mit der Hörschwelle sind Powerspektren ungeeignet. Sie mitteln den Schalldruck einzelner Frequenzen über den gesamten Aufnahmezeitraum. Finden sich in einer Aufnahme kurze laute Ereignisse, können sie aus dem Spektrum durch die Mittelung eliminiert werden. Der zeitliche Aspekt des Signals geht verloren.

Eine alternative Analyse verringert dieses Problem. Zerlegt man das Signal in kurze Signalabschnitte, werden kurze Ereignisse in den Teilspektren wieder sichtbar. Vergleicht man dann die einzelnen Spektren mit einer Hörschwelle, kann man berechnen welche Frequenz, wie lange (prozentual) über der Hörschwelle lag. Man bekommt so einen Eindruck darüber, wann der Fisch tatsächlich etwas hört und wann nicht. Es erlaubt aber keine Aussage darüber, wie laut er das Geräusch gehört hat. Dies wird im Zusammenhang mit der Fragestellung der akustischen Orientierung in Fließgewässern interessant. In vielen Veröffentlichungen ist vom Gehör der Fische als Orientierungssinn im Meer zu lesen (z. B. Codarin et al. 2009, Tolimeri et al. 2000, Tolimeri et al. 2004), für Fließgewässer gibt es dazu keine Untersuchungen. Dass Fische sich an Landmarken orientieren können, wurde für optische und hydrodynamische Landmarken bereits gezeigt (Warburton 1990, Teyke 1989). Mit den in dieser Arbeit verwendeten Methoden könnte belegt werden, dass theoretisch die Möglichkeit einer Orientierung mit Hilfe akustischer Landmarken in Fließgewässern besteht. In Abbildung 2.4 ist die

Methode zur Berechnung des prozentualen Geräuschanteils über der Hörschwelle von Fischen dargestellt:

A: Ein hydroakustisches Signal ist eine Druckamplitudenänderung über die Zeit. Die Signalamplitude wurde von dB re 1 μ Pa in Pa umgerechnet.

B: Zur Berechnung des prozentualen Geräuschanteils über der Hörschwelle von Fischen wurde mit diesem Signal in der Software FlexPro eine Zeit-Frequenz-Analyse durchgeführt. Die Parameter waren: Kurzzeit Fourier-Transformation (STFT), 50 % Overlap, Kaiser-Bessel Filter 3. Ordnung und ein FFT-Window von 8008 Punkten Breite. Die Breite des Windows wurde je nach Samplingrate angepasst, so dass in jedem Fall das gleiche Zeitintervall abgedeckt wurde. Man erhält 148 Spektren wovon jedes ein Zeitintervall von ca. 0,2 s des Signals beschreibt. Eine Frequenz auf der Ordinate beschreibt ein Frequenzband von 12,5 Hz Breite. Aus jedem der 148 Spektren wurden die Hörschwellenrelevanten Frequenzen (hF) herausgesucht. HF's waren die Frequenzen, die den Hörschwellenmessungen von Döbel und Bachforelle zugeordnet werden konnten. Konkret waren es die Frequenzen: 104 Hz, 155 Hz, 205 Hz, 255 Hz, 305 Hz, 405 Hz, 505 Hz, 605 Hz, 705 Hz, 805 Hz, 1004 Hz, 1504 Hz, 2003 Hz, 2503 Hz, 3002 Hz.

C: Jedes hF der 148 Spektren eines Signals wurde mit der Hörschwelle von Döbeln (*Leuciscus cephalus*) und Bachforellen (*Salmo trutta f. fario*) verglichen. Lag die Hörschwelle unter dem Wert der hF (grau), ist die Frequenz für den Fisch hörbar. Es wurden für Waldbrölbach und Fulda 11988 Spektren ausgewertet und 97828 Vergleiche einzelner Frequenzen durchgeführt.

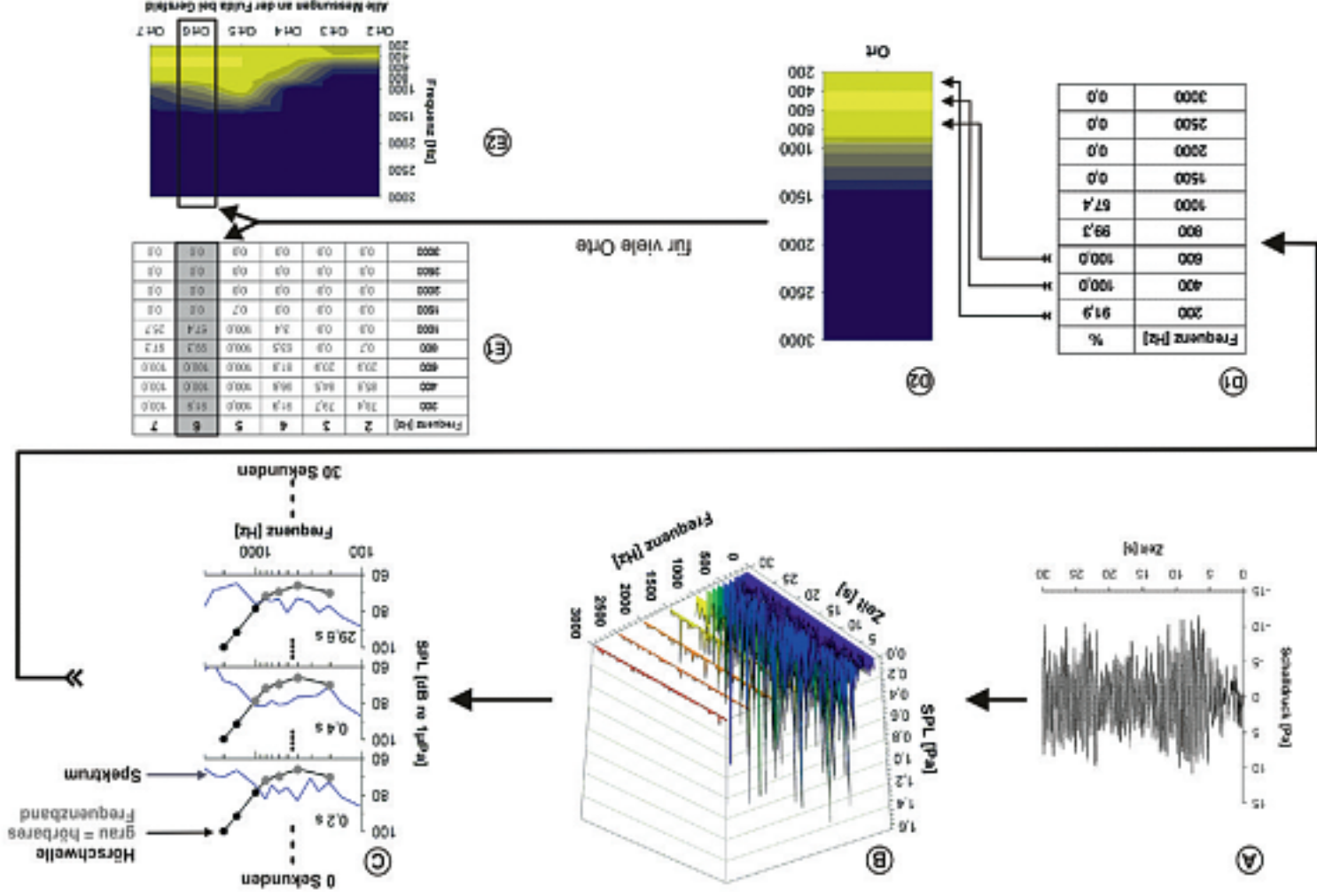
D1: Nach der Analyse wird für jede Frequenz der prozentual hörbare Zeitanteil des Signals berechnet und in einer Tabelle dargestellt.

D2: Diese Tabelle kann als Contour-Plot dargestellt werden. Dabei zeigt die Abszisse den Ort, die Ordinate die Frequenz und die Farbe den prozentualen Geräuschanteil über der Hörschwelle (Abb. 2.4, D2).

E1: Führt man diese Berechnungen für alle Messorte an einem Gewässer durch, erhält man eine vollständige Tabelle für das Gewässer (Abb. 2.4, D1).

E2: Diese vollständige Tabelle kann wie in Abb. 2.4, D2 abgebildet werden und zeigt welcher Ort wie gut für eine Fischart wahrnehmbar sind.

Abb. 2.4: Methode zur Berechnung des prozentualen Geräuschanteils hörschwellenrelevanter Frequenzen (hf) über der Hörschwelle von Fischen
A: Signal, **B:** Darstellung der hf der Zeit-Frequenz-Analyse des Signals (Zeitintervall 0,201 s), **C:** Vergleich der Hörschwelle von Döbel mit jedem einzelnen Spektrum der Zeit-Frequenz-Analyse des Signals, **D1:** Prozentualer Anteil der hf über der Hörschwelle von Döbeln, **D2:** Darstellung von D1 als Contourplot, **E1:** Tabelle mit den Ergebnissen von 6 Messstellen, Beisp. = Nr.6, **E2:** Contourplot von E1



2.2.5 Begriffserklärung

Schalldruckpegel L_p (SPL)

Der Schalldruckpegel von Geräuschen und Tönen ist der 20fache dekadische Logarithmus vom Verhältnis zweier Schalldrücke (Kuchling, 1994). Zur Angabe des absoluten Schalldruckpegels unter Wasser wird als Referenzschalldruck $1\mu\text{Pa}$ angegeben. Diese logarithmische Verhältnisgröße ist eigentlich ohne Dimension, jedoch wird sie mit dB gekennzeichnet. Die Bezeichnung dB wird in dieser Beziehung als Einheit benutzt. Da Menschen linear denken, haben wir Probleme uns das Verhältnis von zwei Schalldruckpegeln im Vergleich vorzustellen.

Um Eckpunkte zur Orientierung zu geben sei gesagt, dass 6 dB re $1\mu\text{Pa}$ eine Verdopplung, 20 dB eine Verzehnfachung, und 40 dB eine Verhundertfachung des Schalldruckpegels bedeutet.

In dieser Arbeit erfolgten die Berechnung des Schalldruckpegels (L_p) mit der Formel nach DIN EN ISO 3743-1 mit der Referenz von $1\mu\text{Pa}$ (Urick) für Wasser statt Luft (Formel 2.3):

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{\text{Schalldruck}^2 [\text{Pa}]}{10^{-6} [\text{Pa}]} = 20 \cdot \log \text{Schalldruck} [\text{Pa}] - 20 \cdot \log 10^{-6} [\text{Pa}]$$
$$\Rightarrow 20 \cdot \log \text{Schalldruck} [\text{Pa}] + 120 = \text{SPL} [\text{dB re } 1\mu\text{Pa}] \quad (2.3)$$

Die Rückrechnung von dB re $1\mu\text{Pa}$ in die lineare Einheit für Druck (Pascal) kann Formel 2.4 verwendet werden:

$$10^{(\text{Schalldruck} [\text{dB}] - 120) / 20} = \text{Schalldruck} [\text{Pa}] \quad (2.4)$$

Mittlerer äquivalenter Dauerschalldruckpegel (L_{eq})

Der mittlere Schalldruckpegel der Fließgeräusche in Fulda/Waldbrölbach und der mittlere Schalldruckpegel verschiedener Schiffe im Rhein wurde nach der Formel (2.5) berechnet (DIN 45 641). Man beachte, dass die akustischen Messungen den Schalldruck [Pascal] aufnehmen. Dies ist eine Feldgröße. Entsprechend muss mit dem Quadrat des Drucks gerechnet werden. Die Aufnahmedauer bei der Messung der Fließgeräusche betrug 30 s. Die Aufnahmedauer bei der Messung der Schiffsgeräusche betrug bei jedem Schiff 60 s. Die

30. Sekunde des Analyseabschnitts lag bei der maximalen Amplitude des Schiffsignals. Bei der Analyse der Fließgeräusche wurde die gesamte Aufnahme von 30 s Länge ausgewertet. Die korrekte Schreibweise $L_{pSeq, T=30s}$ bzw. $L_{pSeq, T=60s}$ wird im Text der Einfachheit halber mit L_{eq} abgekürzt!

$$L_{pSeq, T=30s} = 10 * \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0} dt \right) dB \quad (2.5)$$

T = Messdauer, p = Schalldruck, Pa =Pascal, die Indices von $L_{pSeq, T=30s}$ bedeuten: physikalische Messgröße Schalldruck p, Seq ist die zeitliche Mittelungsdauer von T = 30s bei Fließgeräuschen bzw. T = 60s bei Schiffsmessungen.

RMS-Amplitudenspektrum

Die Frequenzanalyse wurde mit Hilfe der Software FlexPro 6.0 durchgeführt. Die Beschreibung der Arbeitsschritte zur Frequenzanalyse ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Jede Messung wird vom Computer als Spannungsschwankung über die Zeit aufgezeichnet (Abb. 2.5, A1). Abhängig von den Verstärkereinstellungen kann dieses mittels eines Faktors in ein Zeit/Schalldruck Signal [Pa] (Abb. 2.5, A2) umgerechnet werden. Es folgt die Umrechnung der Werte zu einem Zeit/RMS-Schalldruck Signal (Abb. 2.5, A3). Mit einer Fast-Fourier Transformation und einem FFT-Window von 16384 Punkten Breite (Samplingrate: 20 kHz; Hamming-Window; no overlap) erhält man für jeweils ein 0,813 s langes Teilstück des Signal eine berechnete FFT. Man kann die Spektren aller Teilstücke in einem Wasserfalldiagramm darstellen (Abb. 2.5, B). Berechnet man aus all den Spektren den Mittelwert jeder Frequenz erhält man ein RMS-Amplitudenspektrum (Abb. 2.5, C). Stellt man die Spektren zweidimensional dar (Abb. 2.5, D), erhält man einen Contour-Plot. Im Contour-Plot ist die Zeit auf der Abzisse, die Frequenz auf der Ordinate und der SPL farblich kodiert. Die Einheit der Schalldruckpegel (SPL) ist dB re 1µPa.

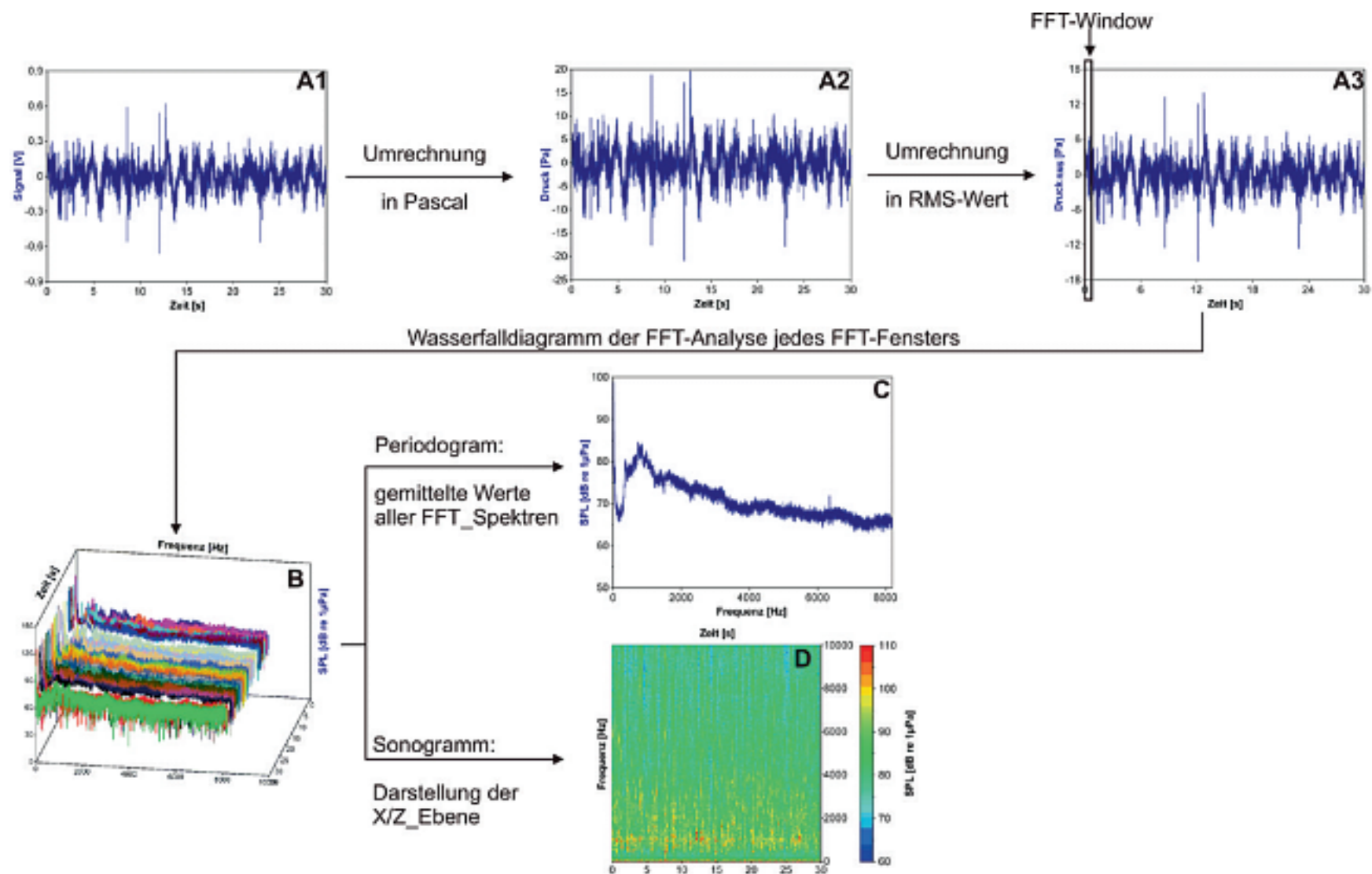


Abb. 2.5 : Berechnung eines Periodogramms (C) und eines Sonogramms (D) aus einem Signal (A). Signal: A = Zeit-Volt-Darstellung, A2 = Zeit-Druck-Darstellung, A3 = Zeit-Druck_{RMS}-Darstellung mit FFT-Fenster; B = Wasserfalldiagramm der FFT-Analyse der FFT-Fenster, C = Periodogramm, D = Sonogramm.

RMS-Terzspektrum

In dieser Arbeit werden vorwiegend RMS-Terzspektren zur Beschreibung der akustischen Eigenschaften der Gewässer benutzt. Hintergrund ist, dass die Hörschwelle der Fischarten als RMS-Werte erhoben wurden. Zum Vergleich werden die Fließgeräusche ebenfalls als RMS-Wert dargestellt. Zur Berechnung des RMS-Terzspektrums werden die Frequenzlinien eines RMS-Amplitudenspektrums in Frequenzbänder aufgeteilt und die Schalldruckpegel der Frequenzen innerhalb jedes Bandes gemittelt. Im Spektrum wird jeweils die Mittenfrequenz des Bandes dargestellt. Man reduziert so die Datenmenge, in unserem Fall über 8000 Punkte pro Spektrum, auf 27 Punkte pro Spektrum. Die Frequenzbreite der Bänder ist nicht äquidistant, sondern nimmt mit steigender Frequenz zu. Die Terzbandanalysen wurden aus Signalen mit einer Aufnahmelänge von 30 s berechnet. Die FFT-Fensterbreite betrug 16384 Punkte (Frequenzauflösung: 1,2 Hz), die Samplingrate 20 kHz. Die Spektren wurden mit einem Hamming-Window bewertet und gemittelt (keine Überlappung). Sie gingen von 0,04-10 kHz in die Analyse ein, um hydrodynamische Signale von Wellen im Infraschallbereich auszuschließen. In der vorliegenden Arbeit sind wegen vieler statistischer Berechnungen zur Datenreduktion Terzanalysen benutzt worden. Das RMS-Terzspektrum wird zur Vereinfachung im Text als Terzspektrum bezeichnet.

Gemitteltes (Terz-)Spektrum

In der Arbeit wurden häufig mehrere Spektren zu einem gemittelten Spektrum zusammengefasst. Dies betraf z.B. alle Spektren einer Fischregion. Will man mehrere Spektren gleicher Art mitteln, ist es wichtig den Schalldruckpegel von der relativen, logarithmischen Einheit dB in die lineare Einheit Pa umzurechnen (s. Formel 2.4). Im Anschluss wird für jede einzelne Frequenz der mittlere SPL über alle zu mittelnden Spektren berechnet. Dieses wird im letzten Schritt von der Einheit Pascal in dB re 1 μ Pa umgerechnet (s. Formel 2.3). In der vorliegenden Arbeit werden gemittelte Terzspektren von Geräuschen zum Vergleich mit Hörschwellen einheimischer Fischarten benutzt. Es soll damit aufgezeigt werden, wie sich die Hörschwellen an Fließgeräusche angepasst haben.

Cut-Off Frequenz

In den geringen Tiefen der Binnengewässer spielt wahrscheinlich die Cut-Off Frequenz eine Rolle. Nach der Normal Mode Theory wird Schall (Frequenz) ohne Abschwächung im Wasser geleitet, wenn das Argument der Hankel-Funktion eine reelle Zahl ist. D.h. die Frequenz einer Schallwelle, von der ein Viertel ihrer Wellenlänge der Wassertiefe entspricht, nennt man **Cut-Off Frequency** (Formel 2.6 und 2.7). Frequenzen, die größere Wellenlängen als die Cut-Off Frequency haben (also tiefere Frequenzen), werden im Schallkanal nur mit größeren Verlusten transportiert (Urick, 1983). Dabei nimmt das abgeschwächte Frequenzband mit abnehmender Tiefe zu (Formel 2.8, abgeleitet nach Urick 1983):

$$h = \lambda_{\text{cutoff}}/4 \quad \rightarrow \quad \lambda_{\text{cutoff}} = h*4 \quad (2.6)$$

$$f_{\text{cutoff}} = c/\lambda_{\text{cutoff}} \quad (2.7)$$

aus (2.6) und (2.7) folgt:

$$f_{\text{cutoff}} = 370 \text{ Hz} \quad (2.8)$$

h = Wassertiefe [m]; λ_{cutoff} = Wellenlänge der Cutoff-Frequency [m]; f_{cutoff} = Cut-Off-Frequency [Hz]; c = Schallgeschwindigkeit = 1480 m/s

Berechnet man von 0,1 m bis 4 m Wassertiefe die Cut-Off Frequenz, erhält man eine Kurve, die als Funktion beschrieben werden kann (Formel 2.8). Konkret bedeutet dies, dass bei einer Wassertiefe von 0-1,75 m Frequenzen über 200 Hz abgeschwächt werden (Tab. 2.2).

Tab. 2.2: Cut-Off Frequenz in Abhängigkeit von der Wassertiefe [m].

| Tiefe h [m] | 4 | 3 | 2 | 1,5 | 1 | 0,5 | 0,25 |
|--------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Cut-Off Freq. [Hz] | 93 | 123 | 185 | 247 | 370 | 740 | 1480 |

Flow-noise

Es können verschiedene nicht akustische Störungen die Aufnahmen beeinflussen:

1. Wird das Hydrophon über Bord eines Bootes gehängt, kann das Kabel durch die Strömung in Schwingung gebracht werden. Es reagiert wie eine äolische Harfe. Es ist derselbe Effekt, der Telefondrähte im Wind zum Singen bringt (Rayleigh). Die

Frequenz, mit der das Kabel schwingt, berechnet sich durch Formel 2.9 (Urick 1983):

$$f = S \cdot v / d \quad (2.9)$$

S = Strouhal-Zahl = 0,18; v = Fließgeschwindigkeit (cm/s); d = Kabel- durchmesser (cm)

2. Triboelektrischer Lärm: Wird während der Aufnahme das Kabel durch die Strömung bewegt, kommt es zu Triboelektrischen Effekten. Dies bedeutet, dass das Abschirmungskabel am Leiterkabel durch Reibung Ladungen erzeugt (Donovan, 1970).
3. Hydrophone bilden in der Strömung Hindernisse, an denen sich Wirbel bilden. Dies führt zu Druckschwankungen, die als akustische Signale aufgezeichnet werden. Der Frequenzbereich dieser Artefakte liegt im Infraschallbereich (McGrath, 1977).
4. Das Hydrophon kann während der Messung angestoßen werden. Dies führt zu Störungen in einem breiten Frequenzspektrum. Artefakte dieser Art sind akustisch sofort zu identifizieren.

Außer bei Messungen an der Fulda wurde das Hydrophon auf dem Boden exponiert. In diesem Fall kann die erste Art der Störung keinen Einfluss gehabt haben. Bei Messungen an der Fulda mit dem Boot wurde das Hydrophon über Bord gehängt. Da das Boot mit Strömung trieb (v klein), war die Bootsgeschwindigkeitsdifferenz zum Wasser gering. Bei einer Geschwindigkeitsdifferenz von 10 cm/s und einem Kabeldurchmesser von 2 cm ergibt sich ein Artefakt bei 0,9 Hz.

Der Triboelektrische Lärm spielt bei einem grundexponierten Hydrophon deshalb keine Rolle, weil sich das Kabel nach einiger Zeit auf dem Grund „zurechtgelegt“ hat. Es bewegt sich nicht mehr.

Die dritte Fehlerquelle spielt die wichtigste Rolle bei der Beurteilung der Messungen. Durch die Strömung kommt es immer zu Wirbel- und Artefaktbildungen am Hydrophon. Druckänderungen durch Wirbelablösungen führen zu Schwankungen im Infraschallbereich (Strouhal-Zahl).

Nichts desto trotz bleiben noch die Fließgeräusche, die direkt durch die Strömung am Hydrophon hervorgerufen werden. Diesem Problem wurde versucht aus dem Weg zu gehen, indem das Hydrophon entweder in Kuhlen des Gewässerbetts, möglichst außerhalb der Strömung, exponiert wurde oder indem das Hydrophon an einem

treibenden Boot befestigt war. Allerdings schließen diese Maßnahmen nicht alle störenden Einflüsse aus. In einem Versuch wurde von Haddle & Skudrzyk (1969) die Geräuschentwicklung an einem torpedoförmigen Körper gemessen. Dieser war 18 Fuß (5,47 m) lang. Es zeigten sich im Spektrum hohe Schalldrücke (ca. 141 dB bei 300 Hz), die mit der Frequenz im Verhältnis f^{-3} oder -9 dB/Oktave abfielen. Die hohen Schalldrücke kamen allerdings bei hohen Geschwindigkeiten von 42 Knoten zustande. Ihr Level fiel um ca. 18 dB mit sich halbierender Geschwindigkeit ab. Die Fließgeschwindigkeit in Fließgewässern ist deutlich geringer. Konkret bedeutet dies einen Schalldruck von ca. 53 dB bei 300 Hz und einer Geschwindigkeit von 2,5 m/s. Dies würde die Messungen nur unerheblich beeinträchtigen. Im Zusammenhang mit der Hörschwelle von Fischen spielen Schalldrücke dieser Größenordnung auch keine Rolle, da ihr Gehör zu unempfindlich ist (s.u.). Messungen, die durch Bewegungen des Hydrophons oder Anstoßen verfälscht sind, konnten akustisch identifiziert und aussortiert werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Messartefakte überwiegend im Infraschallbereich zu finden sind, der in der Auswertung nicht berücksichtigt wurde.

2.3 Anthropogen gestörte hydroakustische Umwelt und Hörschwellen einheimischer Fischarten

2.3.1 Abhängigkeit des Äquivalenten Schalldruckpegels eines Nachens von Richtung, Geschwindigkeit und Entfernung

Ziel des Experimentes war die Untersuchung einer Abhängigkeit des L_{eq} (hydroakustisch) eines Bootes von den Faktoren Richtung, Geschwindigkeit und Entfernung

Bootsdaten

Aluminiumboot

Länge: 5,50 m

Breite 1,50 m

Motor:

Mercury 15 M (2-Takter)

3-Blatt-Schraube

2 Zündkerzen

Motor:

11,2 kW, 15 PS

Volllast-Drehzahlbereich: 5000-6000

Leerlaufdrehzahl im Vorwärtsgang: 725 (+/-50)

Leerlaufdrehzahl bei eingelegtem Vorwärtsgang: 850 (+/-50)

Versuchsdurchführung

Es wurde die Fragestellung untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen dem L_{eq} und den Faktoren Geschwindigkeit, Entfernung bzw. Richtung eines Nachens zu erkennen ist.

Dazu wurde ein Versuch in einem Seitenarm des Rheins an der Spitze der Insel Niederwerth (km 595,6) durchgeführt. Zur Messung der Geräusche wurde ein Hydrophon (B&K 8104, Verstärker B&K 2635) in 3,4 m Entfernung vom Ufer in 0,8 m Wassertiefe dicht mit einem Erdnagel über Grund exponiert. Die Geräusche wurden mit dem Datenerfassungssystem Liberty (Fa. LDS) digital auf einem Laptop (Fa. Dell) gespeichert.

Für den Nachen wurde mit zwei Ankerbojen eine Fahrstrecke in 30 m bzw. 75 m Abstand parallel zum Ufer markiert. Das Boot fuhr langsam, mittelschnell und schnell die Strecke zwischen den Schwimmern ab. Dies konnte nur nach Gefühl mit dem Handgas durchgeführt werden. Die korrekte Geschwindigkeit wurde später aus dem Quotienten von Strecke und Zeit pro Strecke berechnet. Die Entfernung wurde mit Hilfe eines Fernglases mit Laser-Entfernungsmesser gemessen (Leica Geovid).

Von jeder Geschwindigkeit (*Langsam*, *Mittelschnell*, *Schnell*) und Richtung (mit oder gegen den Strom) wurden in 30 m Entfernung zehn Aufnahmen gemacht. In 75 m Entfernung wurden von jeder Richtung und den Geschwindigkeiten *Schnell* und *Langsam* fünf Aufnahmen gemacht. In der Auswertung wurde der L_{eq} im Zeitraum von einer Sekunde berechnet. Dieser Zeitabschnitt wurde aus dem Signalabschnitt mit den größten Amplitudenwerten gewählt.

Auswertung

Die Daten des L_{eq} wurden in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Richtung bzw. Entfernung des Bootes dargestellt. Der L_{eq} wurde nach Formel 2.5 berechnet.

Die Darstellung der Daten im Zusammenhang mit den Schiffseigenschaften erfolgt in Form von Boxplots. Der Schalldruck wurde dazu von der logarithmischen Einheit dB re $1\mu\text{Pa}$ in die lineare Einheit Pa umgerechnet. Dies war für das Statistikprogramm nötig. Eine Rückrechnung und Darstellung in dB war für einen Boxplot technisch nicht möglich.

Der statistisch signifikante Einfluss der Faktoren Geschwindigkeit, Richtung bzw. Entfernung auf den L_{eq} wurde mit einer ANCOVA getestet. Die Voraussetzungen der Normalverteilung und Varianzhomogenität waren erfüllt.

2.3.2 Hydroakustische Untersuchung von Schiffsgeräusche in der Bundeswasserstrasse Rhein

Es wurden Fahrgeräusche von Frachtschiffen im Rhein aufgenommen. Die Geräusche wurden analysiert und statistisch auf den Einfluss der Faktoren Entfernung, Geschwindigkeit, Fahrtrichtung, Schiffslänge, Messort, Prall- oder Gleithang der Messung und Wassertiefe an der Messstelle getestet.

Probenahmestellen

Die Probenahmestellen befanden sich in Bonn (km 657,5, rechtes und linkes Ufer), in Koblenz (km 595,6, rechtes und linkes Ufer) und in der Nähe des Duisburger Hafens (km 795,9, rechtes und linkes Ufer). In Bonn wurde nur in 0,5 m Wassertiefe gemessen. In Koblenz wurde in 0,5 m , 1,0 m und 3,2 m Wassertiefe gemessen. In Duisburg wurde am Gleithang in 0,5 m und 3,2 m Wassertiefe, am Prallhang in 0,5 m , 1,0 m und 3,2 m Wassertiefe gemessen.

Akustikmessungen

In Bonn wurden am rechten und linken Rheinufer mit einem Hydrophon (Bruel & Kjaer Hydrophon 8104 und Verstärker 2635) in 0,5 m Wassertiefe akustische Aufnahmen durchgeführt. Das

Hydrophon wurde mit einem Erdnagel dicht über Grund ohne Kontakt zum Substrat befestigt. Die Messungen am linken und rechten Ufer fanden nicht gleichzeitig statt.

In Koblenz und Duisburg wurde auf einer Flussseite gleichzeitig in den Wassertiefen 0,5 m, 1,0 m und 3,2 m gemessen. Die Ausnahme war in Duisburg auf dem Gleithang wo auf Grund eines Ausfalls des Hydrophonverstärker nur in 0,5 m und 3,2 m Wassertiefe gemessen wurde. Wie in Bonn wurde in 0,5 m Wassertiefe mit dem Bruel & Kjaer Hydrophon gemessen. Für die Messungen in 1,0 m und 3,2 m Wassertiefe wurden Hydrophone von Reson benutzt (Typ TC 4040, 50 m Kabel, Verstärker Bruel & Kjaer 2635). Die Befestigung der Hydrophone erfolgte in 0,5 m und 1,0 m Wassertiefe mit einem Erdnagel. Für die Messungen in 3,2 m Wassertiefe wurde an das Hydrophon mit ca. 1m Leine ein Bleigewicht befestigt. Mit einem Boot und einem Echolot wurde im Fluss eine Stelle mit 3,2 m Wassertiefe gesucht und das Hydrophon mit dem Gewicht abgelassen. Durch die Strömung positionierte sich das Hydrophon beim Ablassen 1 m stromabwärts vom Gewicht. Das Hydrophon war mit einem Käfig gesichert, so dass es nicht in direkten Kontakt mit dem Substrat kam.

Es Aufnahme erfolgte mit einem A/D-Wandler System von Gould-Nicolett (System Liberty). Dies stellte acht Kanäle mit einer Samplingrate von 100 kS/s zur Verfügung. Aufgezeichnet wurde mit einer Samplingrate von 20000.

Es wurde versucht, jedes Schiff möglichst ohne Störgeräusche anderer Schiffe aufzunehmen. Dies gelang auf Grund des hohen Verkehrsaufkommens nicht immer. Zu jedem Schiff wurden die Eigenschaften Name, Länge, Entfernung, Geschwindigkeit, Richtung, Probenahmeort, Aufnahmezeit und Prall/Gleithang aufgezeichnet. Die Geschwindigkeit wurde aus dem Quotienten von Strecke pro Zeit berechnet. Dazu wurde die Zeit gestoppt, die ein Schiff benötigte, um einen Punkt zu passieren. Die Länge (=Strecke) der Frachtschiffe war auf dem Bug angegeben. Die Entfernung (auf gleicher Höhe, senkrecht zum Ufer) wurde mit einem Fernglas mit Laser-Entfernungsmesser bestimmt.

Insgesamt wurden die Geräusche von 192 Schiffen in 0,5 m Wassertiefe an drei verschiedenen Messorten (Koblenz, Bonn, Duisburg) aufgezeichnet. Von diesen 192 Schiffen wurden zusätzlich

in 120 Fällen Aufnahmen in 1,0 m und in 140 Fällen Aufnahmen in 3,2 m Wassertiefe gemacht.

Auswertung

Im zweiten Teil der Arbeit wurden Schiffsgeräusche im Zusammenhang mit der Hörschwelle einheimischer Fischarten untersucht. Die Geräusche wurden qualitativ mit Hilfe von Terzanalysen und quantitativ an Hand des L_{eq} (s. Formel 2.5) untersucht. Die Terzanalysen stellen den mittleren Schalldruckpegel von 34 Frequenzbändern dar. In der verwendeten Software FlexPro sind die Mittenfrequenzen dieser Bänder [Hz]: 1.25, 2.5, 4, 5, 6.3, 8, 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000.

Zur quantitativen Analyse wurde der $L_{eq,T=60s}$ (DIN 45 641) der Schiffsgeräusche bestimmt. Die Schiffspassage an der Probenahmestelle kennzeichnete den Mittelpunkt des 60-Sekunden-Zeitraums aus dem der $L_{eq,T=60s}$ (kurz L_{eq}) berechnet wurde. Ein Zusammenhang zwischen den Schiffseigenschaften Richtung, Geschwindigkeit bzw. Entfernung und dem L_{eq} wurde mittels einer ANCOVA getestet. Da von dem gleichen Schiff z.T. mehrere Aufnahmen in verschiedenen Wassertiefen existierten, wurden die Schiffe zufällig in drei Gruppen (à 40 Schiffe) aufgeteilt. Jeder Gruppe wurde dann zufällig eine Aufnahmetiefe mit dem entsprechenden L_{eq} zugeordnet. Man erhielt so einen Datensatz mit nur einem Wert pro Schiff für die ANCOVA. Dies vermied Pseudoreplikationen in der Statistik.

Anschließend erfolgte eine Berechnung des AIC (Akaike Information Criterion) zur Durchführung einer Model-Selection. Ziel der Untersuchung war herauszufinden, ob bzw. welche aufgezeichneten Parameter eine Prognose des Schalldrucks (L_{eq}) der Schiffsgeräusche zulassen. Dazu wurde eine Model-Selection durchgeführt und der AIC (Akaike 1974) für verschiedene Modelle berechnet. In das Modell gingen die Faktoren Entfernung, Geschwindigkeit, Fahrtrichtung, Schiffslänge, Messort, Prall-/Gleithang der Messung und Wassertiefe ein. Die Berechnung erfolgte im Programm R (Funktion "aic")

Für die qualitative Untersuchung wurde der Zusammenhang zwischen Terzspektrenverlauf und Einflussfaktoren (Entfernung,

Geschwindigkeit, Fahrtrichtung, Schiffslänge, Prall-/Gleithang der Messung und Wassertiefe) mittels der Funktion „*envfit*“ (Environmental Fitting, Programm R) in der Software R untersucht. Der SPL der Spektren wurden vorher in die Einheit Pascal umgerechnet. Eine Multidimensionale Skalierung stellte im Anschluss die Ergebnisse grafisch dar.

Die Terzspektren wurden für die identifizierten Faktoren zu gemittelten RMS-Terzspektren zusammengefasst. Eine SIMPER-Analyse identifizierte die durch die Faktoren maßgeblich beeinflussten Frequenzbänder.

2.3.3 Mittlere Geräuschbelastung von Fischen in der Bundeswasserstrasse Rhein in unterschiedlichen Wassertiefen (standardisierte mittlere Schalldruckpegel von Frachtschiffen)

Da in flachen Gewässern wie Flüssen durch Reflexionen an den Grenzflächen die Schallabschwächung nicht einfach berechnet werden kann (Urlick 1983), wird ein einfaches Verfahren genutzt: Man mittelt die Messwerte der mittleren Schalldruckpegel der jeweiligen Tiefenstufen und definiert sie als Standardwert für ein Habitat der jeweiligen Tiefe. Dies ist fehlerbehaftet. Wie jedoch die Statistik gezeigt hat, ist nicht mit einer sphärischen oder zylindrischen Abschwächung zu rechnen. Man erhält drei Werte für die Schiffsgeräusche in drei Habitaten mit verschiedenen Tiefenstufen. Man benutzt dafür den $L_{eq,T=1s}$. Dieser wird zum Zeitpunkt des höchsten SPL während der Schiffspassage erhoben. Die Werte können im Anschluss in Zusammenhang mit einer Formel 2.10 nach (Smith et al. 2004a) zur Berechnung der durchschnittlichen Hörschwellenverschiebung (TTS) in dem jeweiligen Habitat verwendet werden:

$$TTS=0,58*L_{eq}-66,3 \text{ [dB]} \\ (2.10)$$

Die Datengrundlage sollte zukünftig noch ausgebaut werden. Zur Berechnung der standardisierten Werte für die jeweiligen Habitate mit 0,5 m, 1,0 m und 3,2 m Wassertiefe wird der $L_{eq,T=1s}$ der 453 Aufnahmen verwendet. Der Mittelwert des L_{eq} der Schiffe der

jeweiligen Tiefenstufe wird als Standardwert der Geräuschbelastung in dieser Wassertiefe definiert. Die Werte betragen für

0,5 m Wassertiefe $L_{eq}=137,76$ dB re $1\mu Pa$,

1,0 m Wassertiefe $L_{eq}=141,00$ dB re $1\mu Pa$,

3,2 m Wassertiefe $L_{eq}=145,13$ dB re $1\mu Pa$.

2.3.4 Vergleich der Schiffsgeräusche mit Hörschwellen eines Hörgeneralisten bzw. Hörspezialisten

Es wurde ein Vergleich zwischen den Hörschwellen eines Hörgeneralisten (Bachforelle) bzw. eines Hörspezialisten (Döbel) und den mittleren Terzspektren der Schiffsgeräusche für die drei Wassertiefen und für Prall- und Gleithang durchgeführt. Es sollte so untersucht werden, ob bzw. welchen Einfluss die Faktoren Wassertiefe und Struktur in den Habitaten auf die Stärke der Geräuschbelastung besitzen.

2.3.5 Physiologischer Versuch zur Auswirkung von Schiffsgeräuschen auf die Hörschwelle von Rotaugen (*Rutilus rutilus*)

Fischart

Für den Versuch wurden Rotaugen (*Rutilus rutilus*) aus der Ordnung der Cypriniden als Versuchsart ausgewählt. 70% der einheimischen Fischfauna gehören zu den Cypriniden (Gerstmaier, 2003). Zusammen mit den Welsen bilden sie die Ostariophysii. Diese sind Hörspezialisten, die im Rhein häufig vorkommen. Für den Versuch hat dies zwei Vorteile:

1. Es werden die akustisch-physiologischen Eigenschaften einer Vielzahl einheimischer Fischarten abgedeckt.
2. Hörspezialisten sind auf Grund ihres empfindlicheren Gehörs von Lärm stärker betroffen als Hörgeneralisten. Für den Fall, das im Versuch keine Hörschwellenverschiebung auftritt, würde dies auch für die Hörgeneralisten gelten.

Versuchsaufbau

Der Versuch sah ein Blockdesign vor, in dem die Hörschwelle von sechs Rotaugen in einem Vorher - Nachher Experiment auf eine Beeinträchtigung durch Schiffsgeräusche untersucht wurde. Ein Block umfasste 2 Fische, deren Hörschwelle zunächst im nicht beschallten, dann im beschallten Zustand bestimmt wurde. Darauf folgte der zweite und dritte Block mit jeweils zwei Fischen, die gleich behandelt wurden.

Die Beschallung erfolgte mit Aufnahmen von Schiffgeräuschen, die im Rhein bei Duisburg (Flusskilometer 795,9) aufgezeichnet wurden. Die Aufnahmen wurden mit einem Hydrophon (Fa. Reson, Modell TC 4040) in der Mitte eines Bühnenfeldes in 3,2 m Wassertiefe und ca. 15 m Entfernung zum Ufer (Prallhang) gemacht. Die Wassertemperatur betrug $4,1 \pm 1$ °C. Das Hydrophon wurde mit einem Bleigewicht auf Grund gelegt. Ein Drahtkäfig um das Hydrophon verhinderte einen direkten Kontakt von Messkopf und Grund. An der Probenahmestelle passierten zwischen 12.15 Uhr und 14.45 Uhr 42 Schiffe. Diese wurden aufgezeichnet. Laut mündlicher Auskunft der Bundesanstalt für Gewässerkunde passieren ca. 200 Schiffe am Tag Duisburg. Aus diesem Grund wurden aus den 42 Schiffsaufnahmen 197 Schiffspassagen als Reiz zusammen geschnitten. Die Reize simulierten auf- und abwärts fahrende Schiffe, verschiedene Schiffstypen, verschiedene Geschwindigkeiten und gleichzeitige Passage von zwei bis drei Schiffen.

Der Reizgabe in den Versuchbecken erfolgte mit einem Unterwasserlautsprecher UW 30 (Fa. ElectroVoice) in das Versuchsbecken (60x30x29 cm) aus PVC. Da die Akustik in den Versuchsbecken anders als im Freiland war, wurden die Geräusche mit Hilfe eines Verstärkers (KAF1010, Fa. Kenwood), eines Equalizers (SH-8010K, Fa. Technics) und eines Mischpults (SA-100, Fa. Sound) angepasst (Abb. 2.6). Ein Fisch konnte 90 min. mit einem mittleren Schalldruckpegel ($L_{eq,T=60}$) von 149 dB beschallt werden. Dann zerstörten mehrere Spitzen im SPL der Geräusche den Lautsprecher. Mit Rücksicht auf die Lautsprecher, die den einzelnen SPL-Spitzen der Geräusche nicht standhielten, wurde der $L_{eq,T=60}$ der Geräusche um 20 dB abgeschwächt. Es folgte die Beschallung bei 129 dB für sechs Fische über 5 Tage mit 197 Schiffen / d.

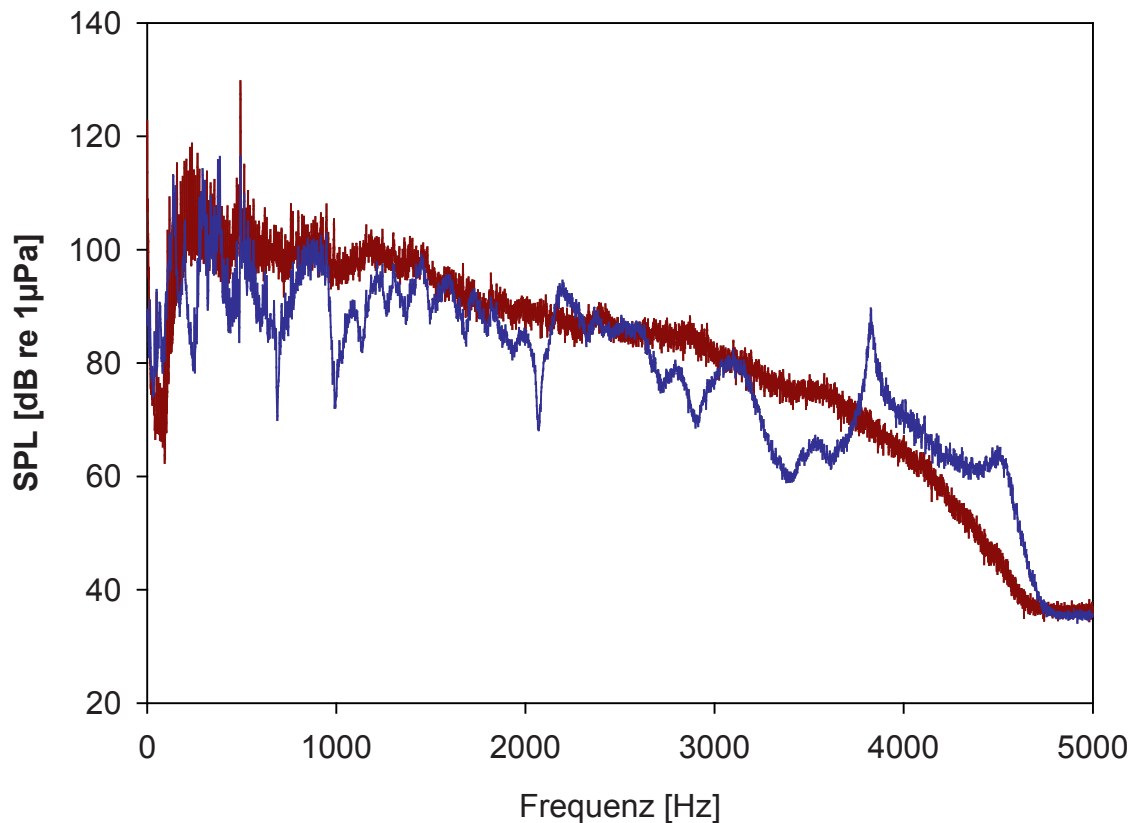


Abb. 2.6: Frachtschiff „Estate“: Frequenzanalyse seines Geräusches im Rhein (rot) und Frequenzanalyse des Signals im Versuchsbecken (blau).

Versuchsdurchführung

Die Fische wurden 5 Tage in den Versuchsbecken ohne Reizgabe bei $16\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ gehalten. Nach Ende dieser Referenzphase folgte eine zweistündige Erholungsphase nach deren Ablauf die erste Hörschwelle bestimmt wurde (Referenzhörschwelle). Die Bestimmung erfolgte mit der Auditory Brainstem Response Methode (Canyon et al.1998) mit den Frequenzen 100 Hz, 300 Hz, 500 Hz, 700 Hz, 1000 Hz, 1500 Hz und 3000 Hz. Nach der Bestimmung der Hörschwelle im akustisch unbelasteten Zustand wurden die Tiere fünf Tage dem Schiffsärm exponiert (s.o. Reiz). Nach zwei Stunden Erholungsphase wurde die Hörschwelle ein zweites Mal bestimmt (Experimentalhörschwelle).

Die Fütterung der Fische im Versuch erfolgte vom 1. – 3. Tag der jeweilig fünftägigen Versuchsdauer mit und ohne Reizgabe. Die Tierversuche waren angemeldet und genehmigt.

Auswertung

Die Hörschwellen der Rotaugen wurden vor und nach einer Beschallung mit Schiffsgeräuschen bestimmt (s.

Hörschwellenbestimmung mittels Auditory Brainstem Respons). Es wurde statistisch untersucht, ob sich die Hörschwelle nach der Beschallung verändert hat. Dazu wurden folgende statistische Verfahren benutzt:

1. Es wurden der Mittelwert, die Standardabweichung und der Standardfehler für jede Frequenz der Hörschwelle vor und nach dem Versuch berechnet.
2. Es wurde getestet, ob sich die gemittelte Hörschwelle ($N = 6$) vor dem Versuch von der gemittelten Hörschwelle nach dem Versuch signifikant unterschied. Ein gepaarter t-Test jeder einzelnen Frequenz vor und nach dem Versuch hätte die Unterschiede der Frequenzen, nicht aber die Unterschiede der Hörschwellen, berechnet. Es wurde deshalb entschieden, die Differenzen der Schalldruckpegel jeder Frequenz (Vorher / Nachher) einer Hörschwelle eines Fisches zu berechnen und diese zu mitteln. Man erhält 6 Werte für 6 Fische, die mit einem One-Sample t-Test gegen 0 getestet wurden. Bei einem signifikanten Unterschied zu 0 hat sich die Hörschwelle verändert. Ein Beispiel, wie die Hörschwelle eines Fisches auf einen Wert gemittelt wird, findet sich in Tabelle 2.3.

Alle Berechnungen erfolgten in der linearen Einheit Pascal (Pa). Dazu wurde der SPL mit der Formel 2.4 von dB re $1\mu\text{Pa}$ in Pa umgerechnet:

Tab. 2.3: Berechnung des Mittelwerts der Hörschwellendifferenz eines Fisches. Umrechnung von dB in Pascal nach Formel 2.4.

| <i>Frequenz</i> | <i>unbeschallt</i> [dB] | <i>beschallt</i> [dB] | <i>unbeschallt</i> [Pa] | <i>beschallt</i> [Pa] | <i>Differenz</i> [Pa] |
|-----------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 100 | 85,2 | 90,0 | 0,0182 | 0,0317 | 0,0135 |
| 300 | 79,9 | 84,9 | 0,0099 | 0,0176 | 0,0077 |
| 500 | 81,9 | 87,0 | 0,0124 | 0,0223 | 0,0099 |
| 700 | 80,7 | 90,7 | 0,0108 | 0,0343 | 0,0235 |
| 1000 | 84,8 | 95,1 | 0,0175 | 0,0569 | 0,0394 |
| 1500 | 100,9 | 111,2 | 0,1115 | 0,3630 | 0,2515 |
| 3000 | 126,7 | 131,6 | 2,1561 | 3,7975 | 1,6414 |
| | | | | Rotaug | |
| | | | Mittelwert | 1: | 0,283852 |

3 Ergebnisse

3.1 Hörschwellenbestimmung mittels der Auditory Brainstem Response Methode (ABR)

Es wurden die Hörschwellen von 12 Fischarten untersucht. Diese Fischarten ließen sich in sieben Vertreter mit Hörspezialisierung (Hörspezialisten) und fünf Vertreter ohne Hörspezialisierung (Hörgeneralisten, Salmonidae, Gadidae, Esocidae) teilen. Die Hörspezialisten gehörten zur Familie der Cyprinide, die jedoch zumeist unterschiedliche Ansprüche an ein Gewässer (Strömungspräferenzen und Aktivitätszeiten) besaßen (Tabelle 3.1). Die Hörgeneralisten entstammten der Familien der Salmoniden, Thymalliden, Esociden und Gadiden (Tab. 3.1).

Tab. 3.1: Eigenschaften der untersuchten Arten (nach Zauner & Eberstaler 1999)

| <i>Fischart</i> | <i>Strömungs- präferenz</i> | <i>Strömungs- präferenz a. Laichplatz</i> | <i>Struktur- gebundenheit</i> | <i>tagaktiv</i> | <i>nachtaktiv</i> |
|-----------------|---------------------------------|---|-----------------------------------|-----------------|-------------------|
| Barbe | rheophil | rheopar | Gering | | x |
| Rotfeder | limnophil | limnopar | Gering | x | |
| Schleie | limnophil | limnopar | Hoch | | x |
| Karpfen | indifferent | limnopar | Gering | x | |
| Gründling | rheophil | rheopar | Gering | x | |
| Döbel | indifferent | euryopar | Hoch | x | |
| Hasel | indifferent | rheopar | Gering | x | |
| Hecht | indifferent | limnopar | Hoch | x | |
| Bachforelle | rheophil | rheopar | Hoch | x | |
| Äsche | rheophil | rheopar | Gering | x | |
| Lachs | rheophil | rheopar | Hoch | x | |
| Quappe | | | | | x |

In den Methoden findet sich eine kurze Beschreibung der Lebensweise der Fischarten (Gerstmaier & Romig 2003, Kaestner 1991).

Die Hörschwellen der Tiere wurden mit der **Auditory Brainstem Response** Methode bestimmt (Kenyon et al., 1998). Die Hörschwellen, die mittels der ABR-Methode erstellt wurden, finden sich für Hörspezialisten und Hörgeneralisten getrennt in den Abbildungen 3.1 und 3.2. Nachfolgend findet eine kurze Charakterisierung der einzelnen Hörschwellen und ein Vergleich der Hörschwellen jeweils innerhalb der Gruppen Hörgeneralisten bzw. Hörspezialisten statt.

Rotfeder (*Scardinius erythrophthalmus*) - Hörspezialist

Der Kurvenverlauf des Audiogramms ist sigmoid. Der empfindlichste Bereich der Hörschwellen liegt zwischen 400 Hz - 600 Hz. Die zur Antwortauslösung notwendigen Schalldrücke liegen zwischen 64 dB re 1 μ Pa und 73 dB re 1 μ Pa. Der unempfindlichste Bereich der Hörschwelle liegt bei Frequenzen zwischen 2000 Hz - 3000Hz. Die zur Antwortauslösung notwendigen Schalldruckpegel liegen zwischen 110 dB-120 dB re 1 μ Pa (Abb. 3.1).

Gründling (*Gobio gobio*) - Hörspezialist

Der empfindlichste Bereich der Hörschwellen liegt zwischen 200 Hz - 1000 Hz. Die zur Antwortauslösung notwendigen Schalldrücke liegen zwischen 60 dB re 1 μ Pa und 76 dB re 1 μ Pa. Der unempfindlichste Bereich der Hörschwelle liegt bei Frequenzen zwischen 2000 Hz - 3000 Hz. Die zur Antwortauslösung notwendigen Schalldruckpegel liegen zwischen 88 dB-106 dB re 1 μ Pa (Abb. 3.1).

Schleien (*Tinca tinca*) - Hörspezialist

Der empfindlichste Bereich der Hörschwellen liegt zwischen 200 Hz - 800 Hz. Die zur Antwortauslösung notwendigen Schalldrücke liegen zwischen 60 dB re 1 μ Pa und 78 dB re 1 μ Pa. Der unempfindlichste Bereich der Hörschwelle liegt bei Frequenzen zwischen 2000 Hz - 3000 Hz. Die zur Antwortauslösung notwendigen Schalldruckpegel liegen zwischen 103 dB-120 dB re 1 μ Pa (Abb. 3.1).

Barbe (*Barbus barbus*) - Hörspezialist

Barben hören im Verhältnis zu den anderen untersuchten Cypriniden am schlechtesten. Der empfindlichste Bereich der Hörschwellen liegt zwischen 400 Hz - 800 Hz. Die zur Antwortauslösung notwendigen

Schalldrücke liegen um 84 dB re 1 μ Pa. Die Hörschwelle bei 3000 Hz liegt über 120 dB re 1 μ Pa (Abb. 3.1). Die Hörschwelle ist im Vergleich zu anderen Cypriniden deutlich höher. Die Barben sind allerdings Freifänge aus dem Rhein (Genehmigung der Rheinfischereigenossenschaft lag vor). Wie später im physiologischen Experiment (s.u.) gezeigt wird, hat vermutlich der Schiffslärm im Rhein eine Verschiebung der Hörschwelle bei Rotaugen (*Rutilus rutilus*) zur Folge. Der Verlauf der Hörschwelle der Barben wird noch ausführlich diskutiert (siehe weiter unten).

Karpfen (*Cyrinus carpio*) - Hörspezialist

Der empfindlichste Bereich der Hörschellen liegt bei Frequenzen zwischen 400Hz-1000Hz mit Schwellenwerten zwischen 61 dB re 1 μ Pa und 65 dB re 1 μ Pa. Der unempfindlichste Bereich der Hörschwellen liegt bei Frequenzen zwischen 2000 Hz - 3000 Hz mit Schwellenwerten im Bereich 100dB - 115 dB re 1 μ Pa (Abb. 3.1).

Hasel (*Leuciscs leuciscus*) - Hörspezialist

Das Audiogramm der Haseln beginnt bei 200 Hz – 400 Hz in ihrem empfindlichsten Hörbereich (64 dB – 65 dB re 1 μ Pa). Die Hörschwelle nimmt an Empfindlichkeit über 1000 Hz (81 dB) bis 3000 Hz (125 dB) stetig ab (Abb. 3.1).

Döbel (*Leuciscus cephalus*) - Hörspezialist

Das Audiogramm des Döbels zeigt die niedrigsten Werte im Bereich zwischen 200 Hz bis 800 Hz. Das lokale Minimum beträgt dort 66 dB re 1 μ Pa bei 400 Hz , sein lokales Maximum von 72 dB re 1 μ Pa bei 800 Hz. Bei höheren Frequenzen nimmt die Empfindlichkeit der Hörschwelle bis 3000 Hz auf einen Schwellenwert von 121 dB ab (Abb. 3.1).

Hechte (*Esox lucius*) - Hörgeneralist

Das Audiogramm des Hechtes zeigt die niedrigsten Werte im Bereich zwischen 200 Hz bis 600 Hz. Das lokale Minimum beträgt 86 dB re 1 μ Pa bei 400 Hz, das lokale Maximum 91 dB re 1 μ Pa bei 200 Hz. Bei höheren Frequenzen nimmt die Empfindlichkeit der Hörschwelle bis 1500 Hz auf einen Schwellenwert von >124 dB ab (Abb. 3.2).

Äsche (*Thymallus thymallus*) - Hörgeneralist

Das Audiogramm der Äsche zeigt die niedrigsten Werte im Bereich 100 Hz bis 200 Hz. Das Minimum beträgt dort ca. 91 dB re 1 μ Pa bei 150 Hz. Die Empfindlichkeit der Hörschwelle überschreitet bei höheren und tieferen Frequenzen 99 dB re 1 μ Pa (Abb. 3.2).

Bachforelle (*Salmo trutta f. fario*) - Hörgeneralist

Das Audiogramm der Bachforelle zeigt die niedrigsten Werte zwischen 200 Hz bis 300 Hz. Das lokale Minimum beträgt dort 88 dB re 1 μ Pa bei 200 Hz, sein lokales Maximum von 90 dB re 1 μ Pa bei 300 Hz. Die Empfindlichkeit der Hörschwelle nimmt unter 100 Hz und über 400 Hz über 100 dB re 1 μ Pa (Abb. 3.2).

Lachs (*Salmo salar*) - Hörgeneralist

Die Hörkurve entspricht dem Audiogramm der Bachforellen. Die Empfindlichkeit in den Frequenzen unter 100 Hz und über 300 Hz ist allerdings beim Lachs um 2 –4 dB re 1 μ Pa unempfindlicher als bei der Bachforelle (Abb. 3.2).

Quappe (*Lota lota*) - Hörgeneralist

Die Hörschwelle der Quappen zeigt die empfindlichsten Werte zwischen 150 Hz und 250 Hz mit Empfindlichkeiten zwischen 80 dB re 1 μ Pa und 85 dB re 1 μ Pa. Von 300 Hz bis 600 Hz steigt die Hörschwelle von 92 dB re 1 μ Pa auf 129 dB re 1 μ Pa an. Bei 100 Hz liegt sie bei 102 dB re 1 μ Pa (Abb. 3.2).

Die untersuchten Hörspezialisten (Abb. 3.1) gehörten alle zu den Cypriniden.

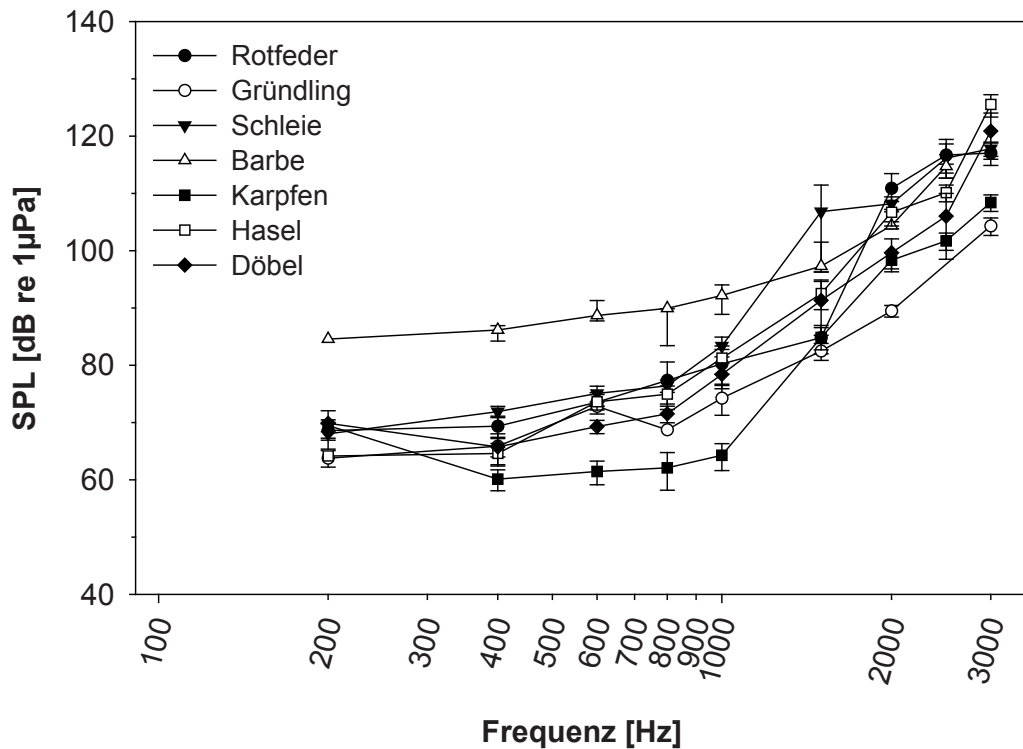


Abb. 3.1: Hörkurven von 7 Hörspezialisten: Rotfeder (*Scardinius erythrophthalmus*, N = 4), Gründling (*Gobio gobio*, N=3), Schleie (*Tinca tinca*, N=6), Barbe (*Barbus barbus*, N=6), Karpfen (*Cyprinus carpio*, N=6), Hasel (*Leuciscus cephalus*, N=6), Döbel (*Leuciscus cephalus*, N=6). Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardfehlern.

Obwohl die Audiogrammverläufe aller Arten ähnlich sind, war die Hörschwelle des Karpfens zwischen 400 Hz und 1000 Hz um 6 dB bis 10 dB empfindlicher als die der übrigen Hörspezialisten. Umgekehrt zeigte sich die Hörschwelle der Barben (*Barbus barbus*) extrem unempfindlich. Sie bewegte sich zwischen 200 Hz - 1000 Hz mit einem Abstand von 9 dB - 16 dB re 1µPa oberhalb der anderen Hörschwellen. Die Ursachen werden weiter unten diskutiert. Die übrigen Hörschwellen zeigten einen ähnlichen Verlauf zur Hörschwelle des Karpfens mit Schwellenwerten zwischen 63 dB und 76 dB im Frequenzbereich von 200 Hz - 800 Hz. Im höheren Frequenzbereich stiegen die Hörschellen auf Werte zwischen 100 dB - 125 dB re 1µPa an.

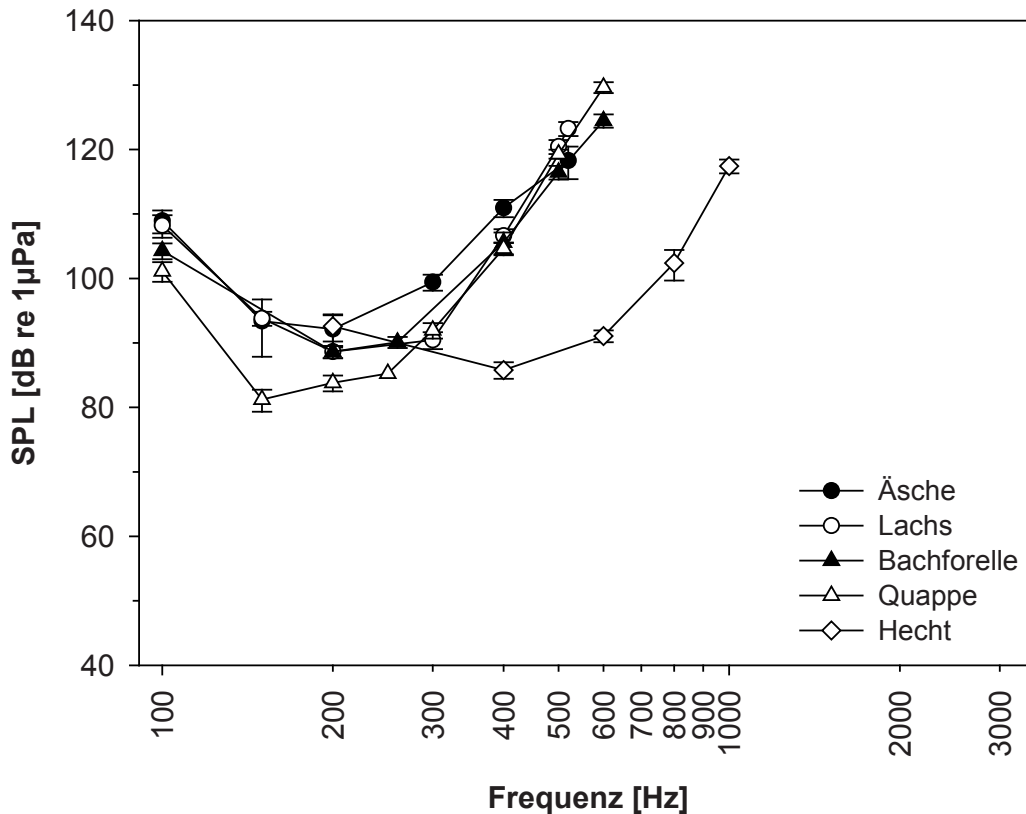


Abb. 3.2: Gemessene Hörkurven von 5 Hörgeneralisten: Äsche (*Thymallus thymallus*, $N=4$), Lachs (*Salmo salar*, $N=6$), Bachforelle (*Salmo trutta m. Fario*, $N=6$), Quappe (*Lota lota*, $N=6$), Hecht (*Esox lucius*, $N=6$). Darstellung der Mittelwerte und Standardfehler.

Bei den Hörgeneralisten (Abb. 3.2) zeigten die Audiogramme der Salmoniden einen ähnlichen Verlauf. Bachforelle, Äsche und Lachs zeigten den empfindlichsten Hörbereich um 200 Hz mit einem Schwellenwert zwischen 89 dB und 92 dB re 1µPa. Die Hörschwelle stieg bei ihnen für niedrigere Frequenzen bis 100 Hz auf 104 dB bis 108 dB re 1µPa an. Der Hörbereich endete zwischen 500 Hz und 600 Hz mit einer messbaren Empfindlichkeit von 118 bis 124 dB re 1µPa.

Die Hörschwelle der Äschen (Abb. 3.2) glich bis 200 Hz der der Salmoniden, zeigte in höheren Frequenzen aber einen unempfindlicheren Verlauf (Differenz ca. 5 dB).

Die Hörschwelle der Quappen (Abb. 3.2) unterscheidet sich von denen der Salmoniden nur im empfindlichsten Frequenzbereich zwischen 150 Hz und 200 Hz. Die Quappen hören bei 150 Hz am besten und mit einem Schwellenwert von 81 dB re 1µPa um 12 dB empfindlicher als Lachse. Bei 200 Hz betrug die Differenz der Quappen-Hörschwelle zu der Forellen-Hörschwelle noch 5 dB. In den

anderen Frequenzbereichen folgte die Hörschwelle der der Salmoniden.

Die Hörschwelle der Hechte (Abb. 3.2) zeigte einen gänzlich anderen Verlauf. Dies lag an der großen Frequenzbreite, die bis 1000 Hz reichte. Die empfindlichste Frequenz ihrer Hörschwelle lag mit einem Wert von 87 dB re 1 μ Pa bei 400 Hz. Die Hörschwelle stieg bis 200 Hz auf 94 dB re 1 μ Pa und bis 1000 Hz bis auf 117 dB re 1 μ Pa an.

3.2 Natürliche hydroakustische Umwelt und Hörschwellen einheimischer Fischarten

In dieser Arbeit werden die Geräuschquellen nach ihrer Herkunft in natürliche Geräuschquellen und anthropogen hervorgerufene Geräuschquellen unterteilt. Die folgenden Kapitel beschäftigen sich mit unterschiedlichen Aspekten der natürlichen Fließgeräusche in den Fließgewässern Fulda und Waldbrölbach.

3.2.1 Beschreibung natürlicher Fließgeräusche

Es wurden die Hypothesen aufgestellt, dass die Geräusche eines Flusses (1) von verschiedenen Strukturen beeinflusst werden und (2) sich von der Quelle in Richtung Mündung verändern. Geräusche besitzen einen qualitativen und einen quantitativen Aspekt. Die Qualität läßt sich durch Spektralanalysen darstellen. Diese stellen den mittleren Schalldruckpegel (SPL) von einzelnen Frequenzen oder Frequenzbändern gemittelt über den Aufnahmezeitraum dar. Quantitativ läßt sich ein Geräusch als mittlerer äquivalenter Schalldruckpegel (L_{eq}) darstellen. Dieser beschreibt den Mittelwert des Schalldruckes über alle Frequenzen und den gesamten Aufnahmezeitraum.

Qualitative Untersuchungen

In der Fulda ist eine ausgeprägte Heterogenität der Geräuschqualität zu beobachten (Abb. 3.3). Für die gleiche Probenahmestelle fanden sich Spektren mit ausgeprägten Peaks und Spektren mit einem logarithmisch abnehmenden Verlauf auf niedrigem Niveau.

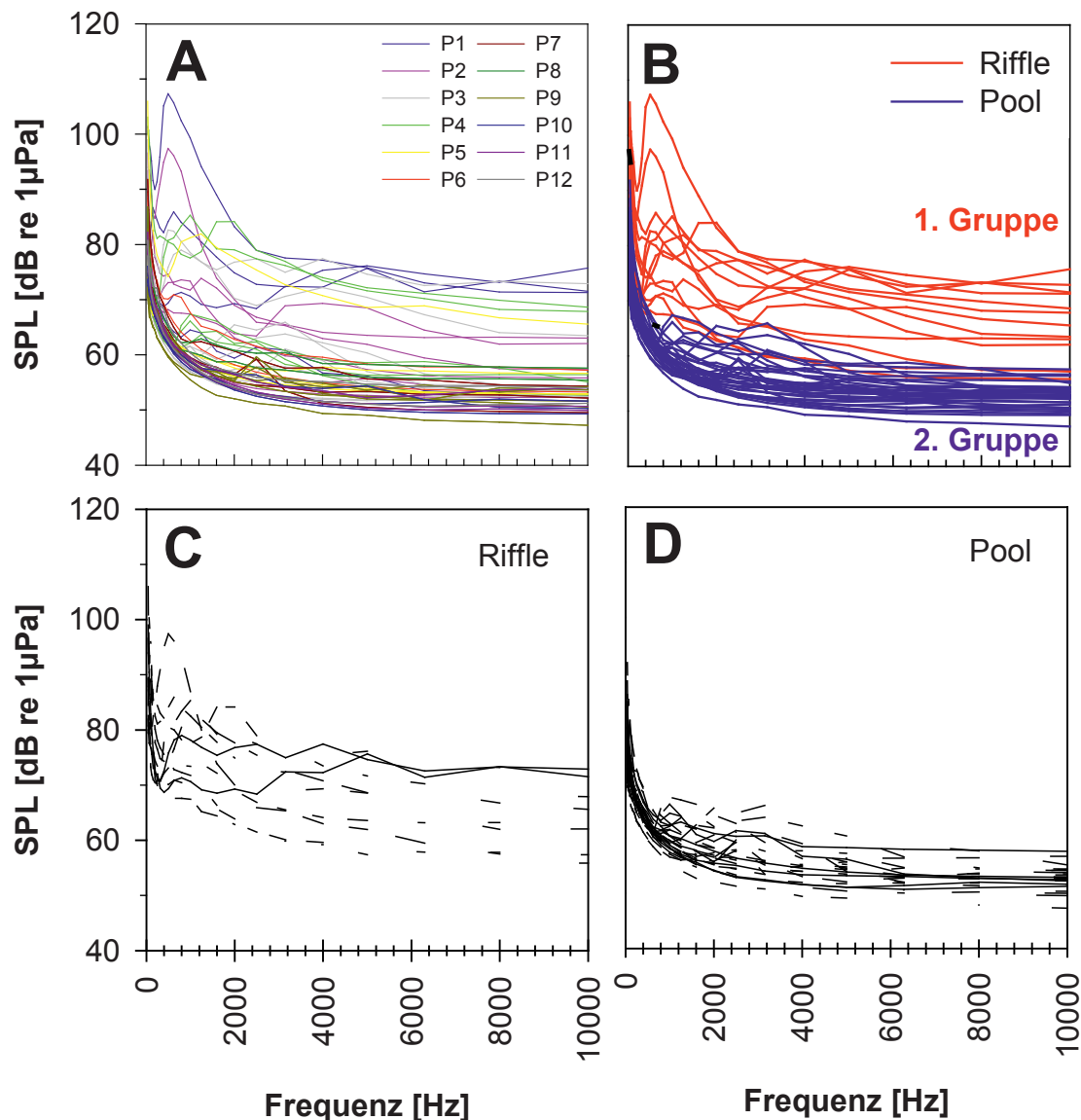


Abb. 3.3: **A** zeigt 50 Terzspektren akustischer Aufnahmen in der Fulda. Sie wurden nach den Probenahmestellen (P) geordnet. P1 befindet sich nah der Quelle, P12 nah der Mündung. **B** zeigt 50 Spektren der Fulda. Rot kennzeichnet Riffles, blau Pools. **C** zeigt zur besseren Übersicht ausschließlich die gemessenen Terzspektren der Riffles (N=13), **D** die Terzspektren der Pools (N=37).

Betrachtete man alle Terzanalysen ohne Ortsinformation, schienen sich die Spektren in zwei Gruppen aufzuspalten (Abb. 3.3 B). Die erste Gruppe ist durch ein höheres Gesamtniveau und ausgeprägte Peaks gekennzeichnet (Abb. 3.3, rot). Die zweite Gruppe zeigte eine logarithmisch abfallende Funktion, die ein tieferes Niveau als die erste Gruppe und geringere Signaturen aufwies (Abb. 3.3, blau). Diese zwei Gruppen der Spektren ließen sich überwiegend durch die Einteilung in die zwei Gewässerstrukturen Riffle und Pool erklären. Die Terzspektren der Riffles (Abb. 3.3 C) zeigten starke Signaturen

(Peaks) im Bereich 0 - 4 kHz mit Schalldruckpegeln bis zu 108 dB re 1 μ Pa. Ihr Pegel variierte in den darüber liegenden Frequenzen in einem Bereich von 60 dB bis 80 dB ohne Peaks zu zeigen.

Auch im Waldbrölbach zeigte sich ein ähnliches Muster (Abb. 3.4). Die Spektren der Pools in Abb. 3.3 D zeigten nur kleine Signaturen im Bereich 1 – 5 kHz. Außerdem variierte das Niveau des Rauschens in den Frequenzen darüber in einem Bereich zwischen 50 dB - 60 dB re 1 μ Pa auf einem niedrigeren Niveau als bei den Riffles.

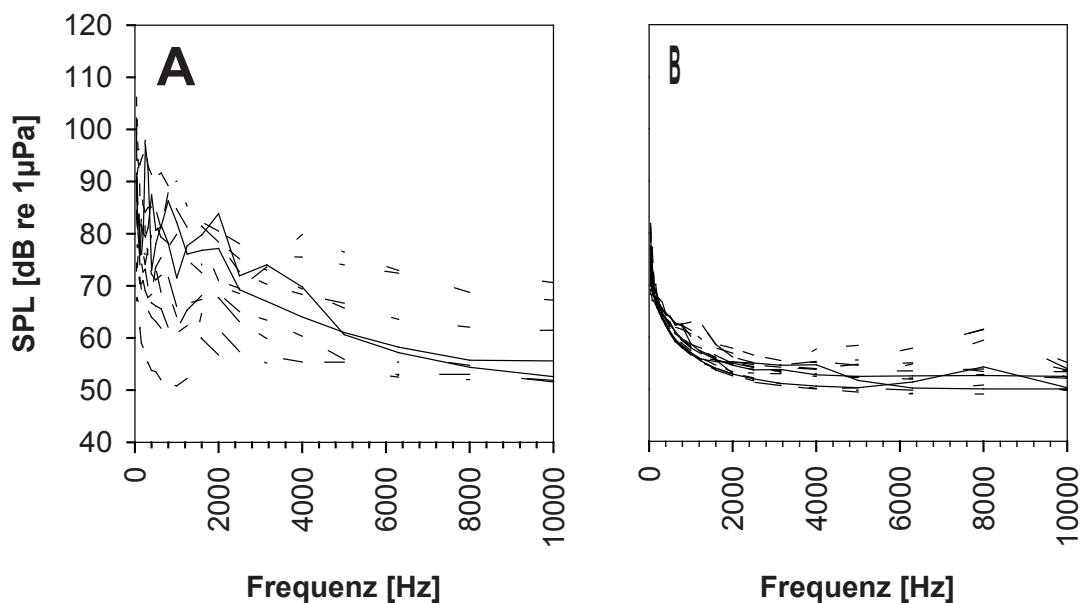


Abb. 3.4: Spektren (Terzanalysen) von Riffles (A, N=12) und Pools (B, N=22) des Waldbrölbachs

Wie bei der Fulda variierte in den höheren Frequenzen das Geräusch auf niedrigerem Niveau ohne Peaks in einem Bereich von 55 dB – 75 dB re 1 μ Pa. In den Pools zeigten sich bis 4 kHz geringe Signaturen, zwischen 6 kHz und 10 kHz größere Signaturen. Letztere lassen sich vermutlich auf das Zirpen von aquatischen Insektenlarven zurückführen (Aiken 1985).

Im Vergleich von Fulda und Waldbrölbach lagen die Signaturen der Riffles des Waldbrölbachs in einem breiteren Frequenzband als in der Fulda. Das Niveau der Spektren befand sich in den Riffles beider Gewässer annähernd auf gleichem Niveau. Die Pools in der Fulda zeigten ihre größten Signaturen im Frequenzbereich bis 4 kHz, die des Waldbrölbachs zwischen 6 und 10 kHz. Der Schalldruckpegel der Pools im lag im Frequenzbereich > 4 kHz auf ähnlichem Niveau.

Unabhängig vom Abstand zur Quelle unterscheidet sich die Geräuschqualität in beiden Gewässern signifikant zwischen Pools und Riffles (ANOSIM, $p < 0.05$). Die qualitativen Unterschiede zwischen diesen Habitaten wurden mittels Multidimensional Scaling (MDS) visualisiert (Abb. 3.5). Die Methode stellt multidimensionale Daten zweidimensional dar. Dementsprechend sind die Achsen dimensionslos. Die Punkte stellen die Terzanalysen der 50 bzw. 34 akustischen Messungen in der Fulda (Abb. 3.5 A) bzw. des Waldbrölbachs (Abb. 3.5 B) dar. Je mehr sich zwei Terzspektren ähneln, desto näher liegen die beiden Punkte in der Abbildung beieinander.

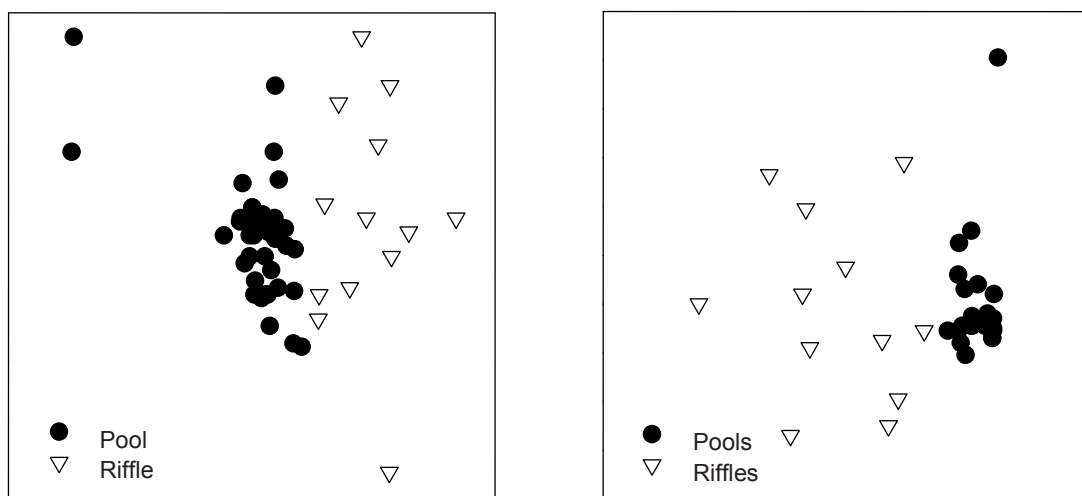


Abb. 3.5: Multidimensional Scaling (MDS) aller Terzanalysen (0,04-10 kHz) der Fulda (A, Stress 0,07) und des Waldbrölbachs (B, Stress 0,1) mit den Faktoren Struktur (Riffle u. Pool) Die Achsen sind dimensionslos. Fulda (A): Die Strukturen Riffle und Pool zeigten signifikante Unterschiede ($p = 0,0195$, $R^2 = 0,897$). Waldbrölbach (B): Die Strukturen Riffle und Pool zeigten signifikante Unterschiede ($p = 0,0021$, $R^2 = 0,1583$).

In einer weiteren Analyse wurden die Terzspektren beider Gewässer gegeneinander verglichen (ANOSIM-Analyse). Das Ergebnis zeigt, dass sich sowohl die Spektren der Pools ($p=0,281$) als auch die Spektren der Riffles (ANOSIM, $p=0,146$) beider Gewässer untereinander nicht signifikant unterschieden. Der systematische Unterschied der Geräuschqualität zwischen den Habitaten (Pool und Riffle) ist also wesentlich größer als der Unterschied zwischen den gleichen Strukturen in beiden untersuchten Gewässern. Das unterstützt die Hypothese, dass natürliche Hintergrundgeräusche von der Art der Struktur beeinflusst werden. Als nächstes wurde der akustische Längsverlauf der Gewässer untersucht. Da der Unterschied

der Geräuschqualität zwischen Riffles und Pools sehr groß war, bestand die Gefahr, dass er den Faktor „Distanz zur Quelle“ in einem gemeinsamen Datenpool überdeckte. Aus diesem Grund wurden die Terzanalysen von Riffles bzw. Pools beider Gewässer getrennt darauf untersucht, ob die Entfernung zur Quelle einen Einfluss auf die Spektren der einzelnen Habitats hat. Abbildung 3.6 A zeigt die MDS der Terzspektren der gemessenen Riffles der Fulda zusammen mit einer Isoplethendarstellung der Entfernung der Probenahmestelle zur Quelle. Die Isoplethendarstellung ist nicht linear, da mehr als 25 Dimensionen (Mitten-Frequenzen der Terzanalyse) reduziert auf zwei Dimensionen (X-/Y-Achse) dargestellt werden mussten. Die Messungen wurden in Riffles der Fulda zwischen Fließkilometer 2 und Fließkilometer 207 durchgeführt. Natürliche Riffles kamen nur bis etwa Flusskilometer 57 vor. Danach handelte es sich um Sand- und Kiesbänke vor und hinter Brückenpfeilern. In der MDS ist sichtbar, dass die Messungen der quellenahen Riffles (kleine Zahlen, niedrige Isoplethewerte) eher im linken unteren und die Messungen der quellenfernen Riffles (große Zahlen, hohe Isoplethewerte) eher im rechten oberen Quadranten zu finden sind. Dies lässt eine graduelle Veränderung der Spektren der Riffles von der Quelle in Richtung Mündung vermuten.

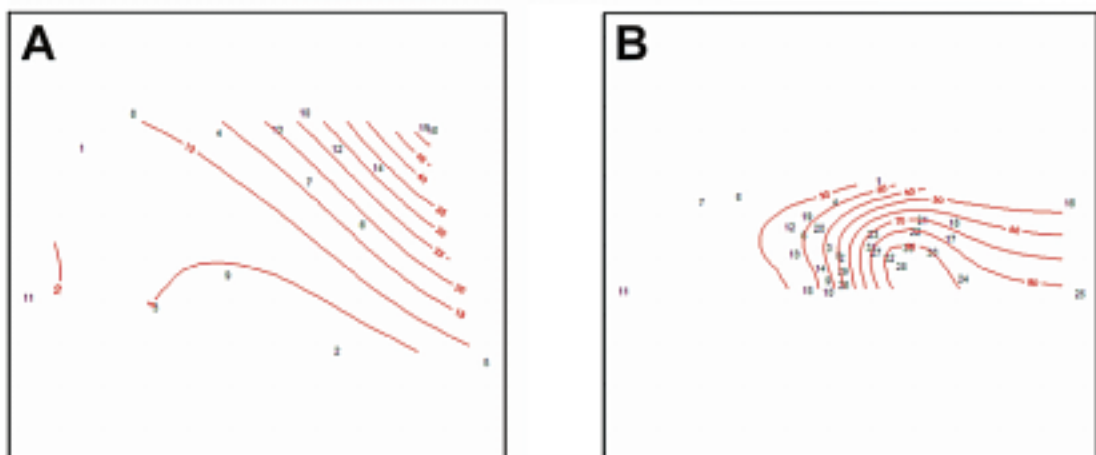


Abb. 3.6: MDS der Terzspektren von Riffles (**A**) und Pools (**B**) der Fulda (schwarze Zahlen in Reihenfolge der Messung, Stress Riffles = 0,06, Pools = 0,07) und envfit-Analyse des Faktors „Entfernung zur Quelle“ (rote Isoplethen zeigen Distanz zur Quelle, nicht-linear).

Abb. 3.6 B zeigt die entsprechenden Messungen in Pools. Dort finden sich die Spektren der Pools nahe der Quelle mehr im linken oberen (niedrige schwarze Zahlen, niedrige Isoplethewerte) und die

quellfernen Pools mehr im rechten unteren Quadranten (hohe schwarze Zahlen, hohe Isoplethenwerte). Eine statistische Analyse mit der Funktion „envfit“ (Statistik-Software R, Okasanen 2011), bestätigte eine signifikante Änderung der Terzspektren von der Quelle bis zur Mündung (riffles: $p = 0,0326$, $R^2 = 0,4037$; pools: $p=0,006$, $R^2=0,2786$).

Im Waldbrölbach zeigten sich dagegen keine signifikante Entwicklung der Terzspektren von der Quelle bis zur Mündung (riffles: $p=0,8857$, $R^2=0,0146$; pools $p=0,5132$, $R^2=0,1185$).

Quantitative Untersuchungen

Die Geräuschquantität wird als berechneter, zeitlich gemittelter Schalldruck über alle Frequenzen beschrieben. Er wird als äquivalenter Schalldruckpegel (L_{eq}) bezeichnet. Im Gegensatz zur Terzanalyse ist der L_{eq} eine eindimensionale Größe und kann in einem Diagramm als Punkt dargestellt werden (Abb. 3.7).

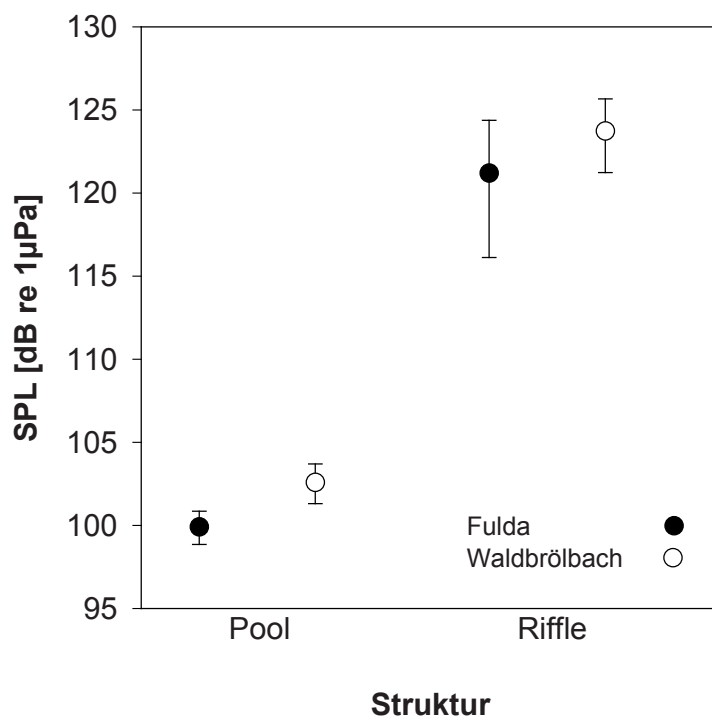


Abb. 3.7: Vergleich der gemittelten äquivalenten Schalldruckpegel (\pm Standardfehler) von Fulda (riffles: $N=13$, pools: $N=35$) und Waldbrölbach (riffles: $N=13$, pools: $N=25$)

Die Daten zeigen, dass Riffles lauter sind als Pools (Abb. 3.7). Sowohl im Waldbrölbach als auch in der Fulda war der mittlere L_{eq} in den Riffles höher als in den Pools. Der Schalldruckpegel unterschied sich

signifikant zwischen beiden Strukturen (Tabelle 3.2, Faktor *Struktur*). Der L_{eq} beider Gewässer unterschiede sich im Gegensatz dazu nicht (Faktor Ort).

Tab. 3.2: Ergebnisse der zweifaktoriellen ANOVA zur Untersuchung des mittleren äquivalenten Schalldruckpegels (L_{eq} , abhängige Variable). von Fulda und Waldbrölbach mit den Faktoren Struktur (Riffle/Pool) und Ort (Fulda/Waldbrölbach).

| <i>Source</i> | <i>Type III Sum of Squares</i> | <i>df</i> | <i>Mean Square</i> | <i>F</i> | <i>Sig.</i> |
|----------------|--------------------------------|-----------|--------------------|----------|-------------|
| Struktur | 26,369 | 1 | 26,369 | 34,183 | ,000 |
| Ort | ,767 | 1 | ,767 | ,994 | ,322 |
| Struktur * Ort | ,526 | 1 | ,526 | ,682 | ,411 |
| Error | 63,256 | 8 | ,771 | | |

Untersucht man den mittleren äquivalenten Schalldruckpegel auf Veränderungen mit der Fließstrecke, zeigt sich in der Fulda eine signifikante Änderung des mittleren Schalldruckes von der Quelle zur Mündung (Abb. 3.8 A). Der mittlere Schalldruck nahm mit der Entfernung zur Quelle ab ($p < 0,01$, $R^2=0,81$, Pearson Korrelationskoeffizient).

Im Waldbrölbach fand sich ein anders Bild (Abb. 3.8 B). Unter Einschluss aller Werte bestand kein Zusammenhang zwischen Fließstrecke und mittleren Schalldruckpegel ($p = 0,468$, $R^2=0,331$). Betrachtet man die Daten, erkennt man einen Trend für die ersten vier Datenpunkte (Abb. 3.8 B, gepunktete Linie, $R^2=0,924$, $p=0,039$, Pearson Korrelationskoeffizient). Diese repräsentieren den eigentlichen Waldbrölbach. Die Gewässerentwicklung wurde aber nachfolgend durch den Zusammenfluss mit der größeren Bröl gestört. Im Verlauf des Waldbrölbaches fiel der SPL zuerst von 116 dB auf 103 dB bis zur vierten Probenahmestelle ab. Nach dem Zusammenfluss mit der Bröl in Bröleck stieg der L_{eq} auf 126 dB bzw. 117 dB um nach dem Zulauf des Derenbachs auf 86 dB abzufallen.

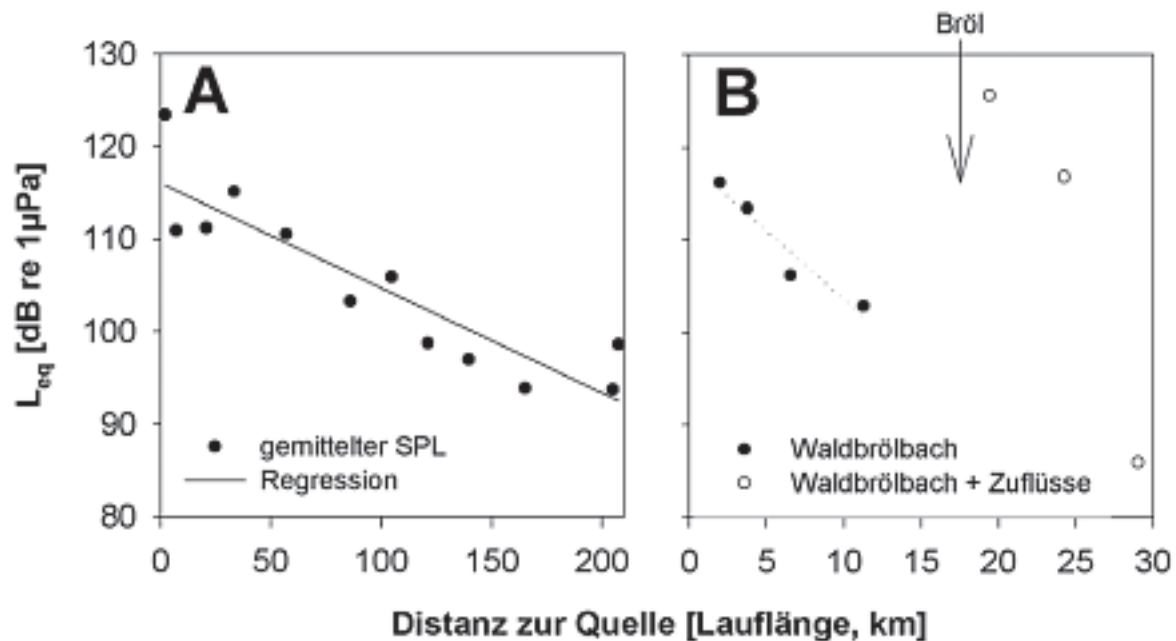


Abb. 3.8: **A** L_{eq} (gemittelt für Pools und Riffles der 12 Probenahmestellen) der **Fulda** in Abhängigkeit von der Distanz zur Quelle. Eine Korrelation zeigt einen deutlichen Zusammenhang zwischen mittlerem L_{eq} und Lauflänge ($R^2=0,81$, $p < 0,01$), **B** L_{eq} des **Waldbrölbach** (schwarze Punkte) ($R^2=0,331$, $p=0,468$) akustischer Änderung nach dem Zusammenfluss mit größeren Bächen. Der Waldbrölbach

Die quantitative Untersuchung der Längsentwicklung wurde ebenfalls getrennt für die Strukturen Pool und Riffle durchgeführt. Sie zeigte eine signifikante Korrelation zwischen L_{eq} und Distanz zur Quelle in den Pools, aber nicht in den Riffles (Tab. 3.3)

Tab. 3.3: Korrelation von L_{eq} und Distanz zur Quelle. Getrennte Berechnung des Korrelationskoeffizienten (Pearson) für die Strukturen Pool und Riffle der Gewässer

| Gewässer | Struktur | P | R^2 |
|--------------|----------|----------|-------|
| Fulda | Pool | $< 0,01$ | 0,443 |
| | Riffle | 0,204 | 0,377 |
| Waldbrölbach | Pool | $< 0,01$ | 0,541 |
| | Riffle | 0,379 | 0,266 |

3.2.2 Hörschwellenanpassungen an Hintergrundgeräusche des Lebensraums

Eine grundlegende Hypothese dieser Arbeit ist eine Anpassung der Fischhörschwelle an die Fließgeräusche von Gewässern. Eine

Voraussetzung für eine Anpassung ist die Änderung der Geräusche im Längsverlauf der Gewässer, was am Beispiel der Fulda belegt werden konnte. Unter Betrachtung der Längsentwicklung natürlicher Geräusche und unter Beachtung der Fischzonierung in Fließgewässern (Illies, 1961) wurde folgend Hypothese aufgestellt:

Entsprechend der Abnahme des mittleren Schalldruckpegels mit der Fließrichtung halten sich in den oberen Fischregionen bevorzugt schlechter hörende Hörgeneralisten und in den unteren Fischregionen verstärkt besser hörende Hörspezialisten auf.

Quantitativer Vergleich

Um die Verteilung von Hörgeneralisten und Hörspezialisten darzustellen, wurde das Fischkataster der Fulda ausgewertet. Abb. 3.9 A zeigt den prozentualen Anteil der Hörspezialisten (Cypriniformes) und Hörgeneralisten (Salmoniformes und andere) an der Gesamtabundanz der Fische in den drei Fischzonen der Fulda. Die Hörspezialisten gehörten ausschließlich der Ordnung Cypriniformes an. Der eingangs aufgestellten Hypothese folgend, nimmt der Anteil der Hörgeneralisten von der Forellenregion (94,8 %) über die Äschenregion (68,5 %) zur Barbenregion (26,6 %) hin ab. Dabei kommt es zu einer Verschiebung von Salmoniformes hin zu anderen Hörgeneralisten wie beispielsweise Perciden und Gadiiden. Der Anteil der Salmoniformes innerhalb der Hörgeneralisten nimmt von 91,6 % über 57,1 % auf 4,8 % ab.

Sowohl der mittlere Schalldruck (L_{eq}) als auch das Hörgeneralisten/Hörspezialisten - Verhältnis nimmt mit zunehmender Fließstrecke ab (Abb. 3.9 B). Die Abnahme des logarithmierten Generalisten/Spezialisten-Verhältnisses korreliert mit der Entfernung zur Quelle (Pearson Korrelationskoeffizient, $p=0,02$, $R^2=0,659$). Während in der Forellen- und Äschenregion die Hörgeneralisten überwiegen oder das Verhältnis etwa ausgeglichen ist (minimaler Wert = -0,16), überwiegen in der Barbenregion Hörspezialisten (negativer Quotient). Es gibt eine Ausnahme in Beisenförth. Dort fand sich an einer Brücke ein größeres Aalvorkommen, dass einen positiven Koeffizienten verursachte.

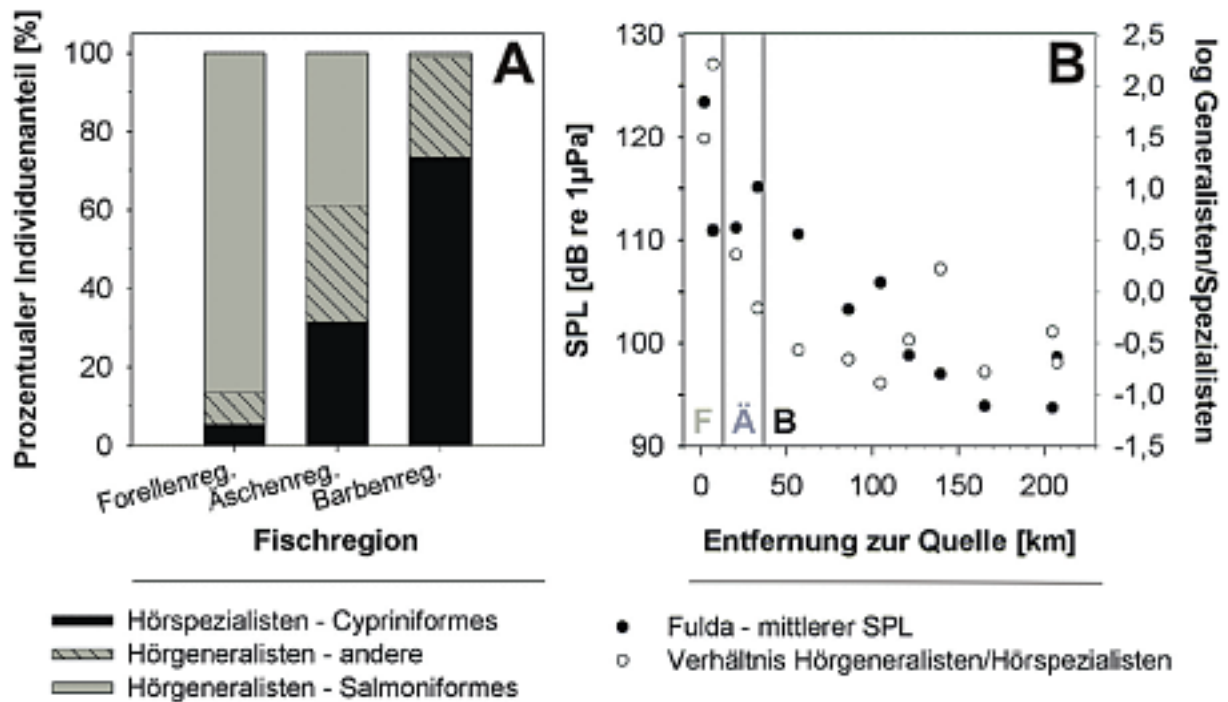


Abb. 3.9: **A** Prozentualer Anteil der Hörspezialisten (Cypriniformes) und Hörgeneralisten, geteilt in Salmoniformes und übrige Hörgeneralisten, an der Gesamtindividuenzahl der Fische für die einzelnen Fischregionen der Fulda (N=27457, Fischkataster der Fulda) **B** Vergleich der mittleren Schalldruckpegel aller Probenahmestellen der Fulda mit dem Verhältnis von Hörgeneralisten zu Hörspezialisten über die Fließstrecke. Ein positiver Quotient bedeutet überwiegend Hörgeneralisten, ein negativer Quotient bedeutet überwiegend Hörspezialisten (F= Forellenregion, Ä= Äschenregion, B = Barbenregion)

Da sowohl der mittlere Schalldruckpegel der Probenahmestellen als auch das Hörgeneralisten/Hörspezialisten-Verhältnis mit der Entfernung zur Quelle sank, wurde untersucht, ob beide Faktoren zusammenhängen. Eine Korrelation zwischen dem mittleren Schalldruckpegel und dem Fischartenverhältnis (Abb. 3.10) zeigte einen signifikanten Zusammenhang (Pearson Korrelationskoeffizient, $p=0,043$, $R^2=0,592$). Dies deutet auf einen Zusammenhang zwischen dem mittleren Schalldruckpegel im Gewässer und dem Hörvermögen der vorkommenden Fischartengemeinschaft hin (Abb. 3.10).

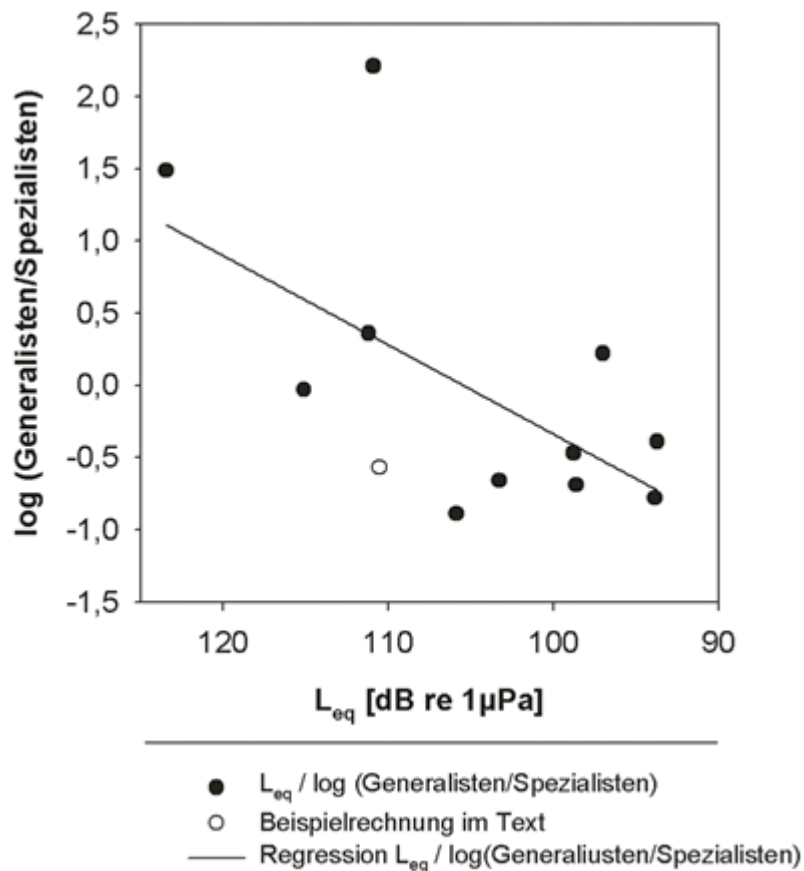


Abb. 3.10: Der mittlere L_{eq} und das logarithmische Verhältnis von Hörgeneralisten zu Spezialisten korrelieren in der Fulda miteinander (Pearson Korrelationskoeffizient, $\rho=0,043$, $R^2=0,592$). Der weiße Punkt stellt das Beispiel im Text dar.

Die Punkte in Abb. 3.10 berechnet man aus dem Fischverhältnis (Hörgeneralisten/Hörspezialisten) und dem mittleren L_{eq} jeder Probenahmestelle. Beispielsweise wurden laut Fischkataster in Üllershausen 24 Hörgeneralisten und 110 Hörspezialisten gefangen. Bildet man das Verhältnis Hörgeneralisten/Hörspezialisten und logarithmiert das Ergebnis erhält man $-0,66$. Dieses wurde mit dem mittleren Schalldruckpegel von Üllershausen ($103,29$ dB re $1\mu\text{Pa}$, s. Abb. 3.8 A) in Abb. 3.10 eingetragen (Abb. 3.10, weißer Punkt).

Qualitativer Vergleich

Die Fulda besitzt eine Forellen-, Äschen- und Barbenregion. Von den 12 Geräuschmessungen befanden sich jeweils 2 in den ersten beiden Zonen und acht in der Barbenregion. Die Daten der Fischbestände und die Einteilung der Fischzonen basiert auf dem Fischkataster der

Fulda. Für einen qualitativen Vergleich der Hörschwellen mit den Hintergrundgeräuschen wurde aus allen Spektren von Pools bzw. Riffles einer Fischzone ein mittleres Spektrum für die jeweilige Struktur (Pool bzw. Riffle) berechnet. Dazu wurden die jeweiligen Spektren in die lineare Einheit Pascal umgerechnet, gemittelt, und das Ergebnis dieses mittleren Spektrums in Dezibel zurück gerechnet. Zum Vergleich mit dem Spektrum boten sich die Hörschwelle der Leitfischart der jeweiligen Region und des Döbels als Hörspezialist an.

Abbildung 3.11 A zeigt den Vergleich der Hörschwelle von Bachforellen (*Salmo trutta f. fario*) mit den gemittelten Spektren der Pools bzw. Riffles in der Forellenregion der Fulda. Es fällt auf, dass die Hörschwelle bei vielen Frequenzen über dem gemittelten Geräuschspektrum der Riffles liegt. Es kommt jedoch zu Berührungspunkten mit der Standardabweichung des gemittelten Spektrums und dem empfindlichsten Bereich der Hörschwelle. Dieser liegt mit 88 dB und 90 dB zwischen 200 Hz und 300 Hz und erreicht dort die obere Standardabweichung der Spektren (87 dB bzw. 92 dB). Ein Vergleich einzelner Spektren mit der Forellenhörschwelle zeigte lediglich beim Spektrum mit dem höchsten Schalldruckpegel im Bereich zwischen 200 Hz und 300 Hz um 2 dB bis 5 dB höhere Schalldrücke als die Hörschwelle. Diese Aufnahme wurde im quellnahen Bereich mit einer Wassertiefe von 20 cm aufgenommen. Aus Abbildung 3.11 A kann gefolgert werden, dass Bachforellen (*Salmo trutta f. fario*) - bis auf eine Ausnahme - keinen der gemessenen Riffles oder Pools in der Forellenregion wahrnehmen können.

Abb. 3.11 B zeigt die gemittelten Spektren von Riffles und Pools der Äschenregion im Vergleich mit der Hörschwelle von Äschen (*Thymallus thymallus*) und Döbeln (*Leuciscus cephalus*). Hier teilt sich das Bild. Die Hörschwelle der Äschen liegt selbst in ihrem empfindlichsten Bereich von 150 Hz bis 200 Hz 15 dB - 16 dB über dem gemittelten Spektrum. Auch ein Vergleich einzelner Spektren mit der Äschenhörschwelle zeigte lediglich beim Spektrum mit dem höchsten Schalldruckpegel im Bereich von 150 Hz eine Überlappung mit dem Standardfehler der Hörschwelle. Die Hörschwelle der Döbel (*Leuciscus cephalus*) verläuft zwischen 200 Hz und 400 Hz parallel und ca. 3 dB oberhalb der gemittelten Spektren der Pools. Der Standardfehler der Hörschwelle schließt das Spektrum mit ein.

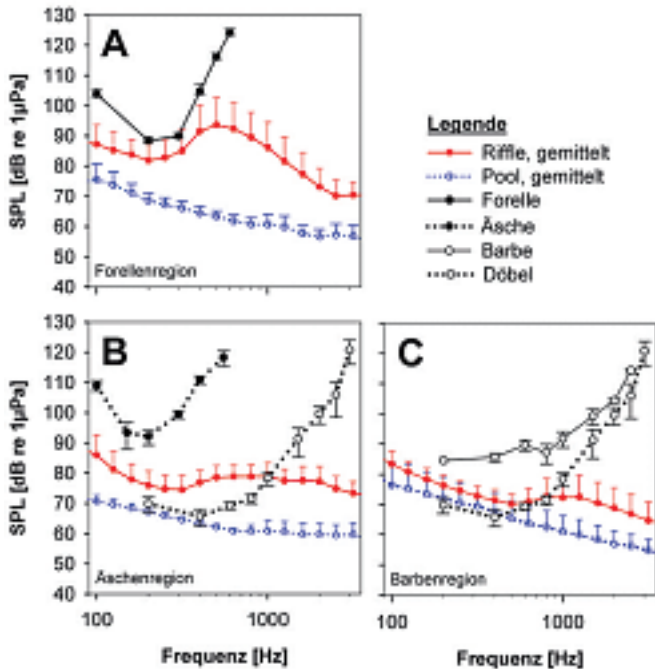


Abb. 3.11: **A** Vergleich der Hörschwellen von Bachforelle (schwarz) mit den gemittelten Spektren von Riffle (N=7) und Pool (N=3) der Forellenregion der Fulda. **B** Vergleich der Hörschwelle von Äsche (*Thymallus thymallus*) und Döbel (*Leuciscus cephalus*) mit den gemittelten Spektren von Riffles (N=5) und Pools (N=9) der Äschenregion der Fulda. **C** Vergleich der Hörschwelle von Barbe (*Barbatula barbatula*) und Döbel (*Leuciscus cephalus*) mit den gemittelten Spektren von Riffles (N=6) und Pools (N=21) der Barbenregion der Fulda. Die Spektren von Riffle (rot) und Pool (blau) sind mit Standardabweichung, die Hörschwelle mit Standardfehler dargestellt. Zur besseren Übersicht sind die Spektren nur zwischen 50 Hz und 3500 Hz dargestellt.

Im Vergleich zu den Geräuschen der Riffles verläuft die Hörschwelle bis 1000 Hz unterhalb des gemittelten Spektrums. Aus Abb. 3.11 B kann gefolgert werden, dass die Äschen (*Thymallus thymallus*) weder Riffles noch Pools der Probenahmestellen wahrnehmen konnten. Döbel (*Leuciscus cephalus*) hörten dagegen Riffles im unteren Frequenzbereich (200 Hz – 1000 Hz). Für tiefere Frequenzen wurde keine Hörschwelle ermittelt.

Abb. 3.11 C zeigt die gemittelten Spektren von Riffles und Pools der Barbenregion im Vergleich mit den Hörschwellen von Barbe

(*Barbatula barbatula*) und Döbel (*Leuciscus cephalus*). Hier befindet sich die Hörschwelle der Barben (*Barbatula barbatula*) über den gemittelten Spektren der Riffles und Pools. Die Hörschwelle der Döbel (*Leuciscus cephalus*) verläuft zwischen 200 Hz und 400 Hz etwa 2 dB unterhalb des gemittelten Spektrums der Pools und steigt von 400 Hz bis 800 Hz auf das Niveau des gemittelten Spektrums der Riffles an. Aus Abbildung 3.11 C kann gefolgert werden, dass Barben (*Barbatula barbatula*) weder Riffles noch Pools in der Barbenregion wahrnehmen konnten. Im Gegensatz dazu hören Döbel (*Leuciscus cephalus*) Hintergrundgeräusche bis 400 Hz in Pools und zwischen 400 Hz und 800 Hz in Riffles.

Die Ergebnisse zeigen eine klare Trennung der untersuchten Fische in zwei Gruppen. Die erste Gruppe hört nach diesen Messungen weder Riffles noch Pools in ihrem Lebensraum. Zu ihr gehören überwiegend Hörgeneralisten wie Bachforelle (*Salmo trutta f. fario*) und Äsche (*Thymallus thymallus*) aber auch Lachse (*Salmo salar*), Quappen (*Lota lota*) und Hechte (*Esox lucius*). Bemerkenswerterweise zeigte sich außerdem ein gleiches Bild bei der Hörschwelle von Barben (*Barbatula barbatula*), die zu den Cypriniden und damit zu den Hörspezialisten gehören. Es handelte sich dabei um ca. 20 cm große Exemplare aus dem Rhein. Die zweite Gruppe besteht ausschließlich aus Cypriniden, die Hörspezialisten sind. Die Arten dieser Gruppe hörten zumindest von 200 Hz bis 400 Hz die Riffles, wobei der hörbare Bereich je nach Art variiert (bis 1000 Hz) und z.T. auch die Pools einschließt. Zu den Arten mit den Merkmalen der zweiten Gruppe gehörten Döbel (*Leuciscus cephalus*), Karpfen (*Cyprinus carpio*), Schleien (*Tinca tinca*), Gründlinge (*Gobio gobio*), Rotfedern (*Scardinius erythrophthalmus*) und Haseln (*Leuciscus cephalus*).

Nachdem untersucht worden war, was die Tiere in ihrem Lebensraum hören, wurden die akustischen Unterschiede der Fischzonen im Vergleich mit den Hörschwellentypen untersucht. Dieses erfolgte mittels einer SIMPER-Analyse. Diese gibt an, zu welchem Anteil eine Variable (Frequenzband eines Spektrums) einer Messung (Spektrum) zum Unterschied zu anderen Messungen beiträgt. Für die Untersuchungen wurden die Frequenzbänder der Spektren mit einem Anteil (Contribution) $\geq 5\%$ betrachtet.

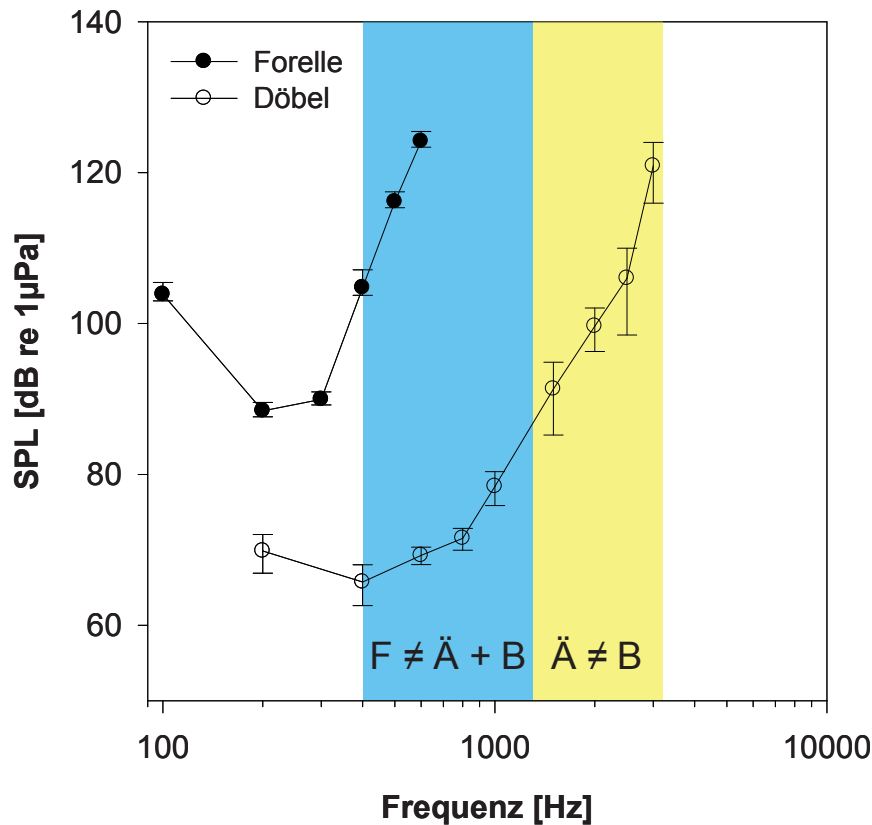


Abb. 3.12: Vergleich der Hörschwelle von Forelle (*Salmo trutta*) und Döbel (*Leuciscus cephalus*). Frequenzbereiche, in denen sich die Forellenregion von der Äschen- und Barbenregion bzw. die Äschenregion von der Barbenregion am stärksten unterscheidet sind blau bzw. grün hinterlegt (F: Forellenregion, Ä: Äschenregion, B: Barbenregion).

Der Lebensraum der Hörspezialisten (Äschen- und Barbenregion) unterscheidet sich akustisch am stärksten zwischen 400 Hz und 1000 Hz von dem der Hörgeneralisten (Forellenregion, Abb. 3.12 blau markiert). Die einzelnen Terzbänder zwischen 400 Hz und 1000 Hz zeigten im Vergleich zwischen der Forellen- und Äschenregion den deutlichsten Unterschied (Contribution $\geq 5\%$) und bestritten in der Summe 34,67 % des Gesamtunterschiedes zwischen den beiden Regionen. Gleiches galt für den Vergleich von Forellen- und Barbenregion. Die unterschiedlichsten Terzbänder (Contribution $\geq 5\%$) lagen hier zwischen 400 Hz und 1250 Hz und zeigten 40,97 % des Gesamtunterschiedes der Spektren. Die Äschen- und Barbenregion unterschieden sich in Terzbändern zwischen 1000 Hz und 3150 Hz (Contribution $\geq 5\%$). Der Gesamtbeitrag dieses Frequenzbereichs zum Unterschied der beiden Regionen betrug 46,35%.

Der Vergleich der genannten Frequenzbänder der Fischzonen mit den gemessenen Fischhörschwellen zeigte folgendes (Abb. 3.12): Während Generalisten wie die Bachforelle ihren empfindlichsten Hörbereich bei tiefen Frequenzen besitzen (150 Hz und 250 Hz), haben Spezialisten diesen Bereich häufig in einem höheren Frequenzband (Döbel: 400 Hz und 800 Hz bzw. Karpfen 400 Hz und 1000 Hz). Dies entspricht dem Frequenzbereich, in dem sich der Lebensraum der Hörspezialisten durch einen geringeren Schalldruck von dem der Hörgeneralisten unterscheidet (Abb. 3.12, blauer Bereich). Die beiden Fischzonen Äschen- und Barbenregion im Lebensraum der Cypriniformes (Hörspezialisten) unterscheiden sich nach der gleichen Analyse insbesondere zwischen 1000 Hz und 3150 Hz (Abb. 3.12, gelber Bereich). Dies liegt zwar im Hörbereich der Hörspezialisten, die Schalldruckpegel dieser Frequenzen sind im Gewässer jedoch so gering, dass sie im Mittel von den Tieren nicht wahrgenommen werden. Die qualitativen akustischen Unterschiede innerhalb der Hörspezialistenregion (Äschen- und Barbenregion) spielen also kaum eine Rolle. Äschen- und Barbenregion unterscheiden sich jedoch im mittleren Schalldruckpegel (Abb. 3.9 B). Dies deutet auf eine Anpassung der Hörschwelle der Hörgeneralisten und Hörspezialisten sowohl an die mittlere Lautstärke als auch an das mittlere Geräuschspektrum ihres Lebensraumes hin.

3.2.3 Orientierung von Fischen an akustischen Landmarken

Im Folgenden soll an Hand einer Datenanalyse gezeigt werden, wie sich Fische in Fließgewässern – **theoretisch** – an akustischen Landmarken orientieren könnten. Eine Möglichkeit wäre eine relative Orientierung. Schwimmt ein Fisch von der Flussmitte zum Ufer, ändern sich z.B. die Wassertiefe und die Fließgeschwindigkeit. Dies kann einen Einfluss auf die Akustik haben. Dementsprechend müsste eine Geräuschänderung relativ zur Positionsänderung stattfinden, die der Fisch wahrnehmen kann. Das diese Voraussetzung prinzipiell erfüllt ist, soll an folgendem Beispiel illustriert werden.

Tab. 3.4: Beschreibung von 3 Messstellen im Querprofil der Fulda

| | <i>Flussmitte</i> | <i>Gleithang</i> | <i>Ufer</i> |
|----------------------------|-------------------|------------------|-------------|
| Wassertiefe (cm) | 60 | 40 | 26 |
| Fließgeschwindigkeit (m/s) | 0,48 | 0,45 | 0,29 |
| Substrat | Kies | Kies | Kies |

In Abb. 3.13 sind die RMS-Amplitudenspektren von drei Aufnahmen im Querprofil der Sieg im Vergleich mit Hörschwellen von Döbel und Karpfen dargestellt. Im Querprofil änderte sich die Wassertiefe aller drei Messstellen und die Fließgeschwindigkeit am Ufer (Tab. 3.4). Das Substrat blieb gleich. Im Vergleich mit den Hörschwellen von Döbel und Karpfen, zeigt sich in Abhängigkeit zur Position eine Änderung des hörbaren Frequenzbandes.

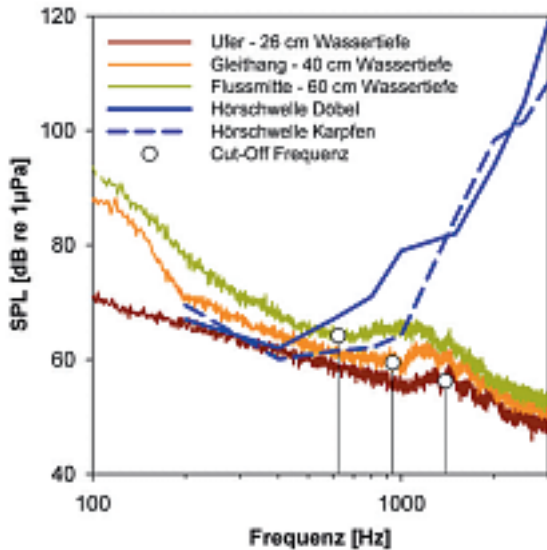


Abb. 3.13: RMS-Amplitudenspektren (Samplingrate: 25000 Hz; FFT-Window: 8192; Hamming-Window) im Querprofil der Sieg im Vergleich mit Hörschwellen von Döbel und Karpfen. Die Messstellen mit Wassertiefen von 60 cm, 40 cm und 25 cm befanden sich in der Flussmitte, auf halben Weg zum Ufer und nahe am Ufer. Die Fließgeräusche nehmen von der Flussmitte zum Ufer hin ab.

Beide Arten hören am Ufer keine Fließgeräusche aber am Gleithang ein Frequenzband zwischen 200 Hz – 400 Hz (Tab. 3.5). In der

Flussmitte hört der Döbel das gleiche Frequenzband lauter und der Karpfen ein breiteres Frequenzband (200 Hz –1000 Hz), ebenfalls lauter. Während einer angenommenen Bewegung von der Flussmitte in Richtung Ufer bedeutet das für beide Arten eine deutliche Verringerung des Schalldruckpegels und eine Veränderung des Klangs (Tab. 3.5).

Neben dieser Art der Darstellung kann man einen Gewässerabschnitt im akustischen Längsprofil darstellen. Fasst man die Frequenzanalysen einer Probenahmestelle im Überblick eines Contour-Plots zusammen, erkennt man wie stark die Unterschiede zwischen Riffle und Pool sind (Abb. 3.14). Es zeigte sich ein starker Gegensatz zwischen einfachen Signaturen der Frequenzanalyse in einem Pool und stark ausgeprägten Signaturen in dem Riffle.

Tab. 3.5: Differenzen [dB] zwischen der Hörschwelle von Döbeln und Karpfen und den Fließgeräuschen im Querprofil der Sieg bei 26 cm (Ufer), 40 cm (Gleithang) und 60 cm (Flussmitte) Wassertiefe. „0“ bedeutet Hörschwelle oberhalb des Geräuschspektrums.

| Frequenz | <i>Döbel</i> | | | <i>Karpfen</i> | | |
|-----------------------|--------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| | 26 cm | 40 cm | 60 cm | 26 cm | 40 cm | 60 cm |
| 200 | 0 | 4 | 11 | 0 | 2 | 9 |
| 400 | 0 | 3 | 6 | 0,3 | 5 | 8 |
| 600 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,1 | 3 |
| 800 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| 1000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Gesamt-Differenz [dB] | 0 | 7 | 17 | 0 | 7 | 24 |

In diesem Frequenzbereich kommt es zu einem Einbruch der Schalldruckpegel (Abb. 3.14, unten rechts). Dieses Phänomen wurde bereits bei Lugli et al. (2003) beschrieben. Dies führt dazu, dass selbst die lauten Geräusche der Walze für Hörgeneralisten laut Hörschwellen-Spektrenvergleich im Mittel nicht wahrzunehmen sind.

An der Messstelle „Riffle“ sind dagegen auch die leiseren Geräusche im Frequenzbereich unter 1 kHz für viele Hörspezialisten noch

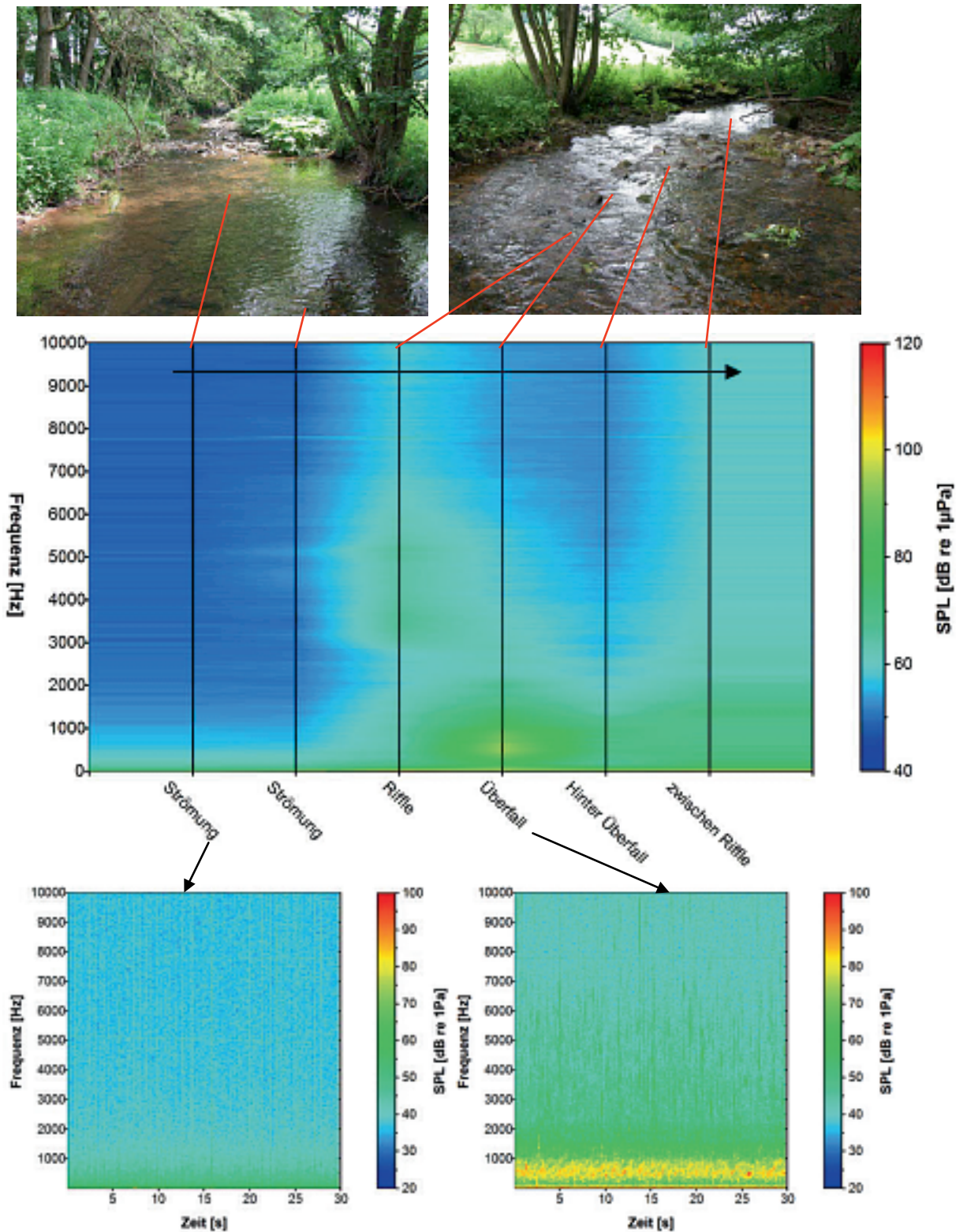


Abb. 3.14: Gersfeld - oben, linkes: Pool oberhalb der Riffles; oben, rechts: Riffle u. Überfall; Mitte: Amplitudenspektren der einzelnen Messstellen im Contour-Plot; unten links: Zeit-Frequenz-Plot (Sonogramm) der Fließgeräusche am Messpunkt „Strömung“; unten, rechts: Zeit-Frequenz-Plot (Sonogramm) der Fließgeräusche am Messpunkt „Überfall“.

wahrnehmbar (Rotfeder, Gründling Karpfen, Döbel, Hasel, s.o.). Der hohe Geräuschpegel im tieferen Teil des Riffles (Contour-Plot: „Hinter Riffle“, „zwischen Riffle“) wurde vermutlich durch große Steine und die Kurve im Gewässer verursacht. Die Pegel betragen zwischen 450 Hz – 1000 Hz um 70 dB und liegen an der Hörschwellengrenze der Hörspezialisten. Die Ausnahme bildet der Karpfen, der jedoch vorwiegend in Standgewässern vorkommt. Der Pool im oberen Bereich der Probenahmestelle (Contour-Plot: „Strömung“) läge außerhalb des Hörbereichs aller von uns gemessenen Fischarten.

Dieses konkrete Beispiel bestätigt im Prinzip die Ergebnisse des letzten Kapitels: Viele Geräusche liegen gerade so oder gerade so nicht im Hörbereich der Fisch. Die spärliche Ausbeute an gerade so hörbaren Strukturen spricht eigentlich gegen die Möglichkeit von akustischen Landmarken. Allerdings haben wir bei der Betrachtung eine Dimension vergessen: Die Zeit.

Analysieren wir einmal zwei extreme Messstellen der Probenahmestelle unter Berücksichtigung der Zeit. In Abb. 3.14 unten/links befindet sich das zeitlich aufgelösten RMS-Amplitudenspektrum einer Messstelle im Pool, unten/rechts das des Überfalls (Analysesoftware: FlexPro → Zeit-Frequenz-Spektralanalyse: Samplingrate 20000; FFT-Window: 4096; Segmentlänge: 4096; Hamming-Window; 50% overlap). Der Contour-Plot des Pools (Abb. 3.14, unten/links) zeigte zwischen DC – 400 Hz zeitweise Schalldruckpegel zwischen 70 dB – 80 dB. Im Riffle (Abb. 3.14, unten/rechts) zeigten sich zwischen 400 Hz – 600 Hz zeitweilig Maxima über 100 dB. Im Gegensatz zu dem Vergleich mit den zeitgemittelten Spektren scheint es doch zeitweilig möglich, dass zusätzlich der Pool für die Hörspezialisten und das Riffle für Hörgeneralisten wahrnehmbar ist. Im folgenden Kapitel wird jede einzelne Messung aus Fulda und Waldbrölbach neu ausgewertet. In der Darstellung findet man den prozentualen zeitlichen Anteil eines Geräusches der im Gesamtaufnahmezeitraum für einen Hörspezialisten und einen Hörgeneralisten wahrnehmbar ist. Die Beschreibung aller Probenahmestellen in der Form von Abb. 3.14 findet sich im Anhang („Beschreibung der Probenahmestellen“).

In Abb. 3.11 konnte eine mögliche Anpassung der Hörschwellen von Hörgeneralisten und besonders von Hörspezialisten an die mittleren Spektren von Riffle und Pool gezeigt werden. Diese bestehen jedoch

aus mehreren Spektren. Außerdem darf man nicht vergessen, dass schon ein einziges Spektrum zeitlich gemittelte Schalldruckpegel der Frequenzen darstellt. Die Folge ist, dass zeitlich kurze Ereignisse durch die Mittelung eliminiert werden. Will man eine mittlere Anpassung der Hörschwelle an eine akustische Umwelt untersuchen, ist dies eine geeignete Art der Darstellung. Dies sagt jedoch nichts darüber aus, was die Fische zeitlich aufgelöst hören. Deshalb wurde eine Methode entwickelt, mit der man Geräusche auf ihre „Markertauglichkeit“ untersuchen kann. Um durch Mittelwertbildung über Zeit und Ort keine Informationen zu verlieren, zerlegt man das Signal einer akustischen Messung in viele kurze Zeitabschnitte (ca. 0,2 s). Von jedem dieser Zeitabschnitte wird ein (RMS) Terzspektrum berechnet und einzeln mit der Hörschwelle des Hörspezialisten Döbel (*Leuciscus cephalus*) und der Hörschwelle des Hörgeneralisten Bachforelle (*Salmo trutta f. fario*) verglichen. Anschließend wird der zeitliche, prozentuale Anteil des Signals angegeben, der von den Fischen wahrgenommen werden kann. Der Vorteil dieser Herangehensweise ist die bessere Detektion kurzer, für Fische hörbarer Signalabschnitte, die sonst in der Rechnung der Terzspektren durch die Mittelung eliminiert würden. Ein Vergleich der zeitlich aufgelösten Geräusche von Fulda und Waldbrölbach mit der Hörschwelle von Döbeln und Bachforellen zeigt, dass Hörspezialisten fast überall in Riffle und Pool Geräusche wahrnehmen, während Hörgeneralisten ausschließlich die lautesten aufgenommen Riffle wahrnehmen. Döbel können in Riffles des Waldbrölbachs relativ häufig Signale wahrnehmen (Abb. 3.15, Mitte, n=13). Im Mittel der Messungen lag ihre Hörschwelle in den hohen Frequenzen (200 / 400 Hz) in 83 - 85 % der Zeit unter dem Geräuschpegel. Mit zunehmender Frequenz sank der Anteil der Zeit, in dem Signale wahrgenommen wurden auf 38 % bzw. 0,1 - 4% (1000 Hz bzw. 1500 Hz - 2500 Hz). In den Pools (Abb. 3.15, unten, n=21) lag ihre Hörschwelle in den hohen Frequenzen 46 % bzw. 60 % der Zeit unter dem Geräuschpegel (200 Hz - 400 Hz). Mit zunehmender Frequenz sank der mittlere, hörbare Anteil auf 24 % (600 Hz) bzw. 4 % (800 Hz) der Zeit ab. Im darüber liegenden Frequenzbereich waren nur sehr vereinzelt Geräusche im Hörbereich (0,1% bei 1000Hz). Die Hörschwelle der Bachforellen (*Salmo trutta f. fario*) als Hörgeneralisten war unempfindlicher und deckte einen schmaleren Frequenzbereich ab als die der Döbel (*Leuciscus cephalus*).

Dementsprechend entstand ein anderes Bild, wenn man die Geräusche des Waldbrölbachs mit der Hörschwelle der Bachforellen (*Salmo trutta f. fario*) verglich (Abb. 3.16). Im Riffle (N = 13) konnten sie bei 200 Hz bzw. 260 Hz im Mittel 22 % bzw. 19 % der Geräusche wahrnehmen (Abb. 3.16, Mitte). Tiefere Frequenzen von 100 Hz und 150 Hz konnten im Mittel zu 6 % und 10 % gehört werden. Höhere Frequenzen zwischen 400 Hz und 600 Hz zeigten mit einer Ausnahme hörbare Signaturen unter 1 % des Aufnahmezeitraums. Hier spielten nur kurze Ereignisse eine Rolle. Dazu gehörte das Klacken eines Steins oder ein kurzes Gluckern. Der Anteil der für Bachforellen hörbaren Geräusche in den Pools ist einfach beschrieben (Abb. 3.16, unten). Sie konnten hier keine Geräusche wahrnehmen.

Der Vergleich der Hörschwellen mit den Ergebnissen der Fulda zeigten ähnliche Ergebnisse wie beim Waldbrölbach. Dies war zu erwarten, da die Spektren sich nicht statistisch signifikant von denen des Waldbrölbachs unterschieden. Im Prinzip gilt für alle Ergebnisse, dass die Tiere in der Fulda einen etwas höheren Geräuschanteil als im Waldbrölbach hören. Vergleicht man die Hörschwellen von Döbeln (*Leuciscus cephalus*) mit den Geräuschen der Fulda, fanden sich im Riffle (N=16) die höchsten Werte in den tiefen Frequenzbereichen von 200 Hz bis 600 Hz (Abb. 3.17, Mitte). Zwischen 200 Hz und 600 Hz lagen im Mittel über 84 % des Geräuscheanteils (85 %, 91 %, 84 %) über der Hörschwelle der Tiere. Bei 800 Hz und 1000 Hz sank der mittlere, hörbare Anteil der Geräusche von 79 % auf 57 % ab. Zwischen 1500 Hz und 3000 Hz waren im Mittel zwischen 13 % (1500 Hz) und 0,1 % (3000 Hz) wahrnehmbar. Es ist zu bemerken, dass echte Riffles nur in den obersten fünf Probenahmestellen vorkamen. Bei den Messungen in Kerspenhausen und Mecklar waren die Riffles hinter den Brücken durch anthropogen Einfluss entstanden. In den Pools (N=30) der Fulda (Abb. 3.17, unten) waren in den tiefen Frequenzbereichen 200 Hz – 400 Hz im Mittel 59 % und 69 % der Geräusche für Spezialisten wahrnehmbar. In den höheren Frequenzbereichen um 600 Hz, 800 Hz und 1000 Hz sank der mittlere hörbare Geräuschanteil von 32 % über 8 % auf 4 % ab. Über 1000 Hz lagen vereinzelt Geräuschanteile nicht mehr (unter 1 %) im Hörbereich der Döbel. Der Vergleich der Hörschwellen von Bachforellen (*Salmo trutta f. fario*) mit den Geräuschen in Riffles der

Fulda (Abb. 3.18, Mitte) zeigte einen empfindlichen Frequenzbereich zwischen 150 Hz und 260 Hz (im Mittel 21 % bei 150 Hz, 25 % bei 200 Hz, 22 % bei 260 Hz). Der hörbare Anteil dieses Frequenzbandes war, auch innerhalb der Riffles, sehr heterogen aufgeteilt. So fanden sich einige Messungen (N = 6), in denen ein hoher Anteil der Geräusche (21 % bis 93 %) wahrgenommen werden kann (Abb. 3.22, Kühnstein, Mecklar). Der größte Anteil der Messungen (N = 10) zeigte dagegen einen hörbaren Anteil zwischen 0 % und 7 %. Höhere Frequenzen fielen von 8 % bei 400 Hz auf < 1 % (bis 600 Hz) ab. Die Heterogenität fiel hier noch extremer aus. Bei 100 Hz lag der mittlere hörbare Anteil der Geräusche bei 4 %. Dies verfälscht aber das Bild. Eigentlich hörten die Tiere in diesem Frequenzbereich nichts. Ein Ausreißer mit einem hörbaren Anteil von 58 % verschob aber das Bild. In den Pools (Abb. 3.18, unten) lag der mittlere hörbare Geräuschanteile für alle Frequenzen unter 1%. Die Geräusche lagen in den Pools der Fulda ebenso wie im Waldbrölbach nahe oder unterhalb der Hörschwelle der Bachforellen.

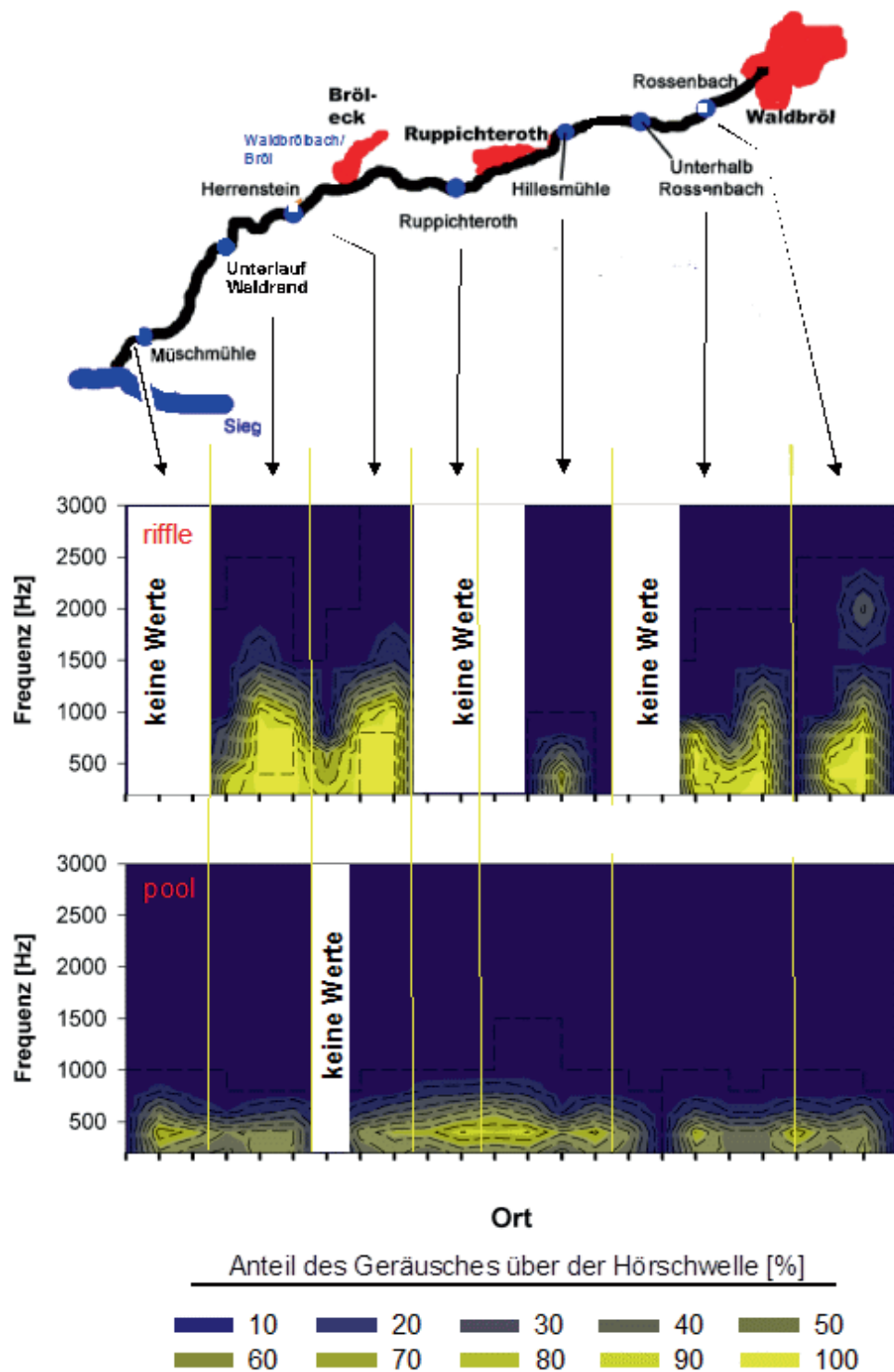


Abb. 3.15: Geräuschanteile des Waldbrölbachs über der Hörschwelle von Döbeln (*Leuciscus cephalus*). Oberer Teil: Gewässerkarte des Waldbrölbachs mit den Probenahmestellen. Mittlerer Teil: Riffles - Zeitlicher Anteil [%] der Hintergrundgeräusche (30 s Aufnahme) in den Riffles des Waldbrölbachs über der Hörschwelle von Döbeln (*Leuciscus cephalus*). Abszisse: gelbe Striche begrenzen Probenahmestellen, kleine schwarze Striche bezeichnen einzelne Messungen. Ordinate: Frequenzen der Hörschwelle. Der zeitliche Anteil [%] von Hintergrundgeräusche über der Hörschwelle ist farblich kodiert (s. Legende). Unterer Teil: Pool - Darstellung entsprechend dem Riffle.

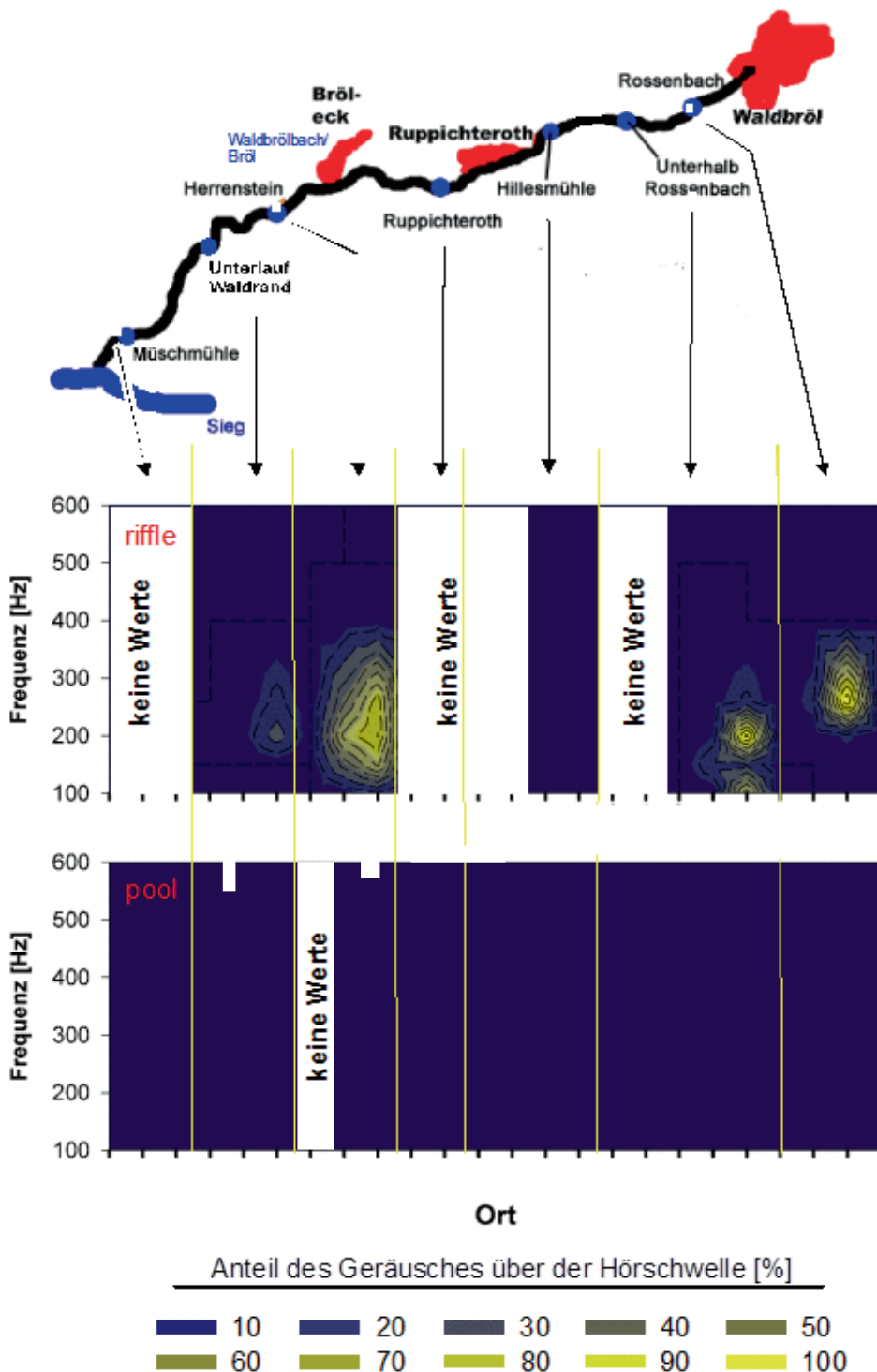


Abb. 3.16: Geräuschanteile des Waldbrölbachs über der Hörschwelle von Bachforellen (*Salmo trutta f. fario*). **Oberer Teil:** Gewässerkarte des Waldbrölbachs mit den Probenahmestellen. **Mittlerer Teil:** Riffles - Zeitlicher Anteil [%] der Hintergrundgeräusche (30 s Aufnahme) in den Riffles des Waldbrölbachs über der Hörschwelle vom Lachs (*Salmo trutta f. fario*). Abszisse: gelbe Striche begrenzen Probenahmestellen, kleine schwarze Striche bezeichnen einzelne Messungen. Ordinate: Frequenzen der Hörschwelle. Der zeitliche Anteil [%] von Hintergrundgeräusche über der Hörschwelle ist farblich kodiert (s. Legende). **Unterer Teil:** Pool - Darstellung entsprechend dem Riffle

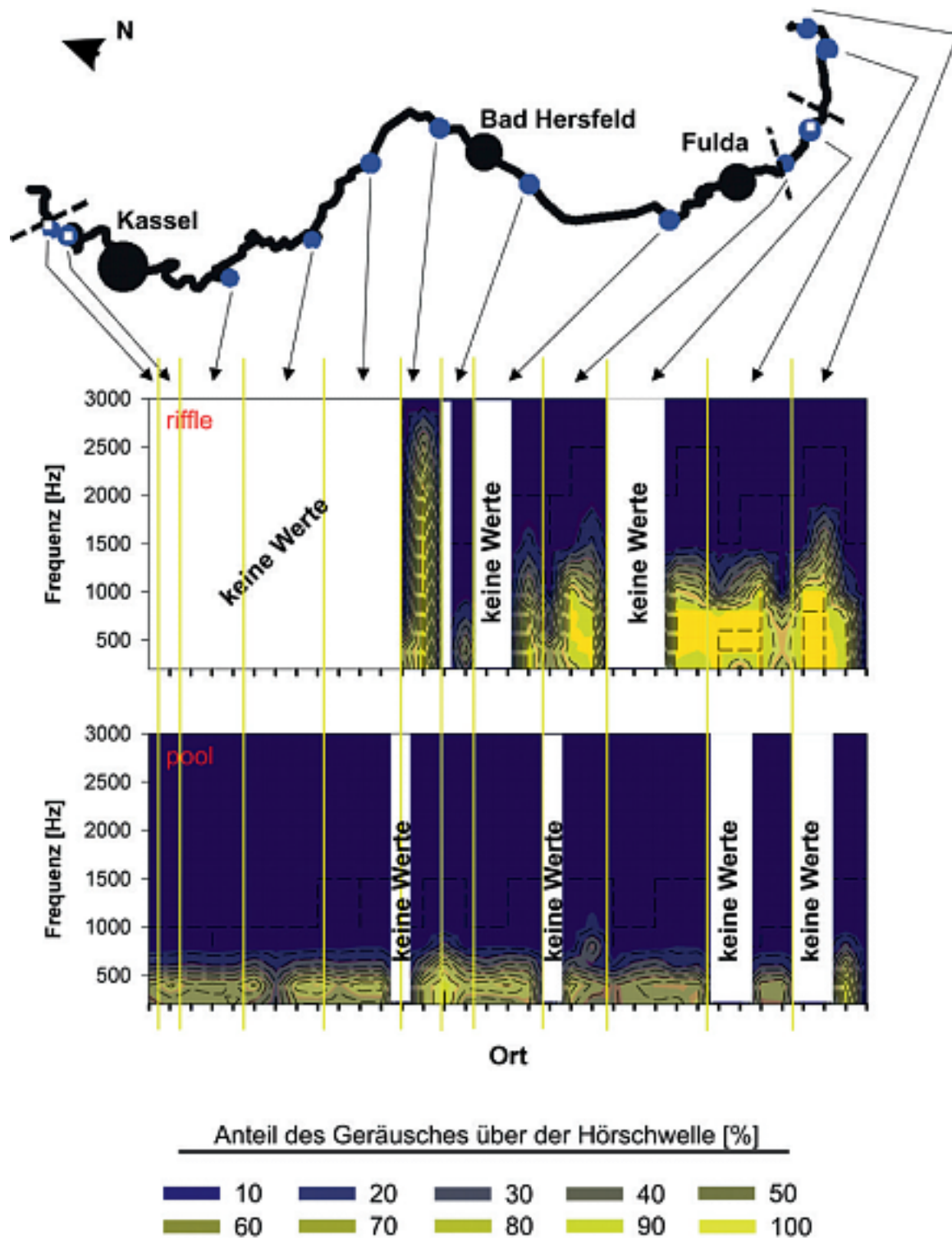


Abb. 3.17: Geräuschteile der Fulda über der Hörschwelle von Döbeln (*Leuciscus cephalus*). **Oberer Teil:** Gewässerkarte der Fulda mit den Probenahmestellen. **Mittlerer Teil:** Riffles - Zeitlicher Anteil [%] der Hintergrundgeräusche (30 s Aufnahme) in den Riffles der Fulda über der Hörschwelle vom Döbel (*Leuciscus cephalus*). Abszisse: gelbe Striche begrenzen Probenahmestellen, kleine schwarze Striche bezeichnen einzelne Messungen. Ordinate: Frequenzen der Hörschwelle. Der zeitliche Anteil [%] von Hintergrundgeräusche über der Hörschwelle ist farblich kodiert (s. Legende). **Unterer Teil:** Pool – Darstellung entsprechend dem Riffle.

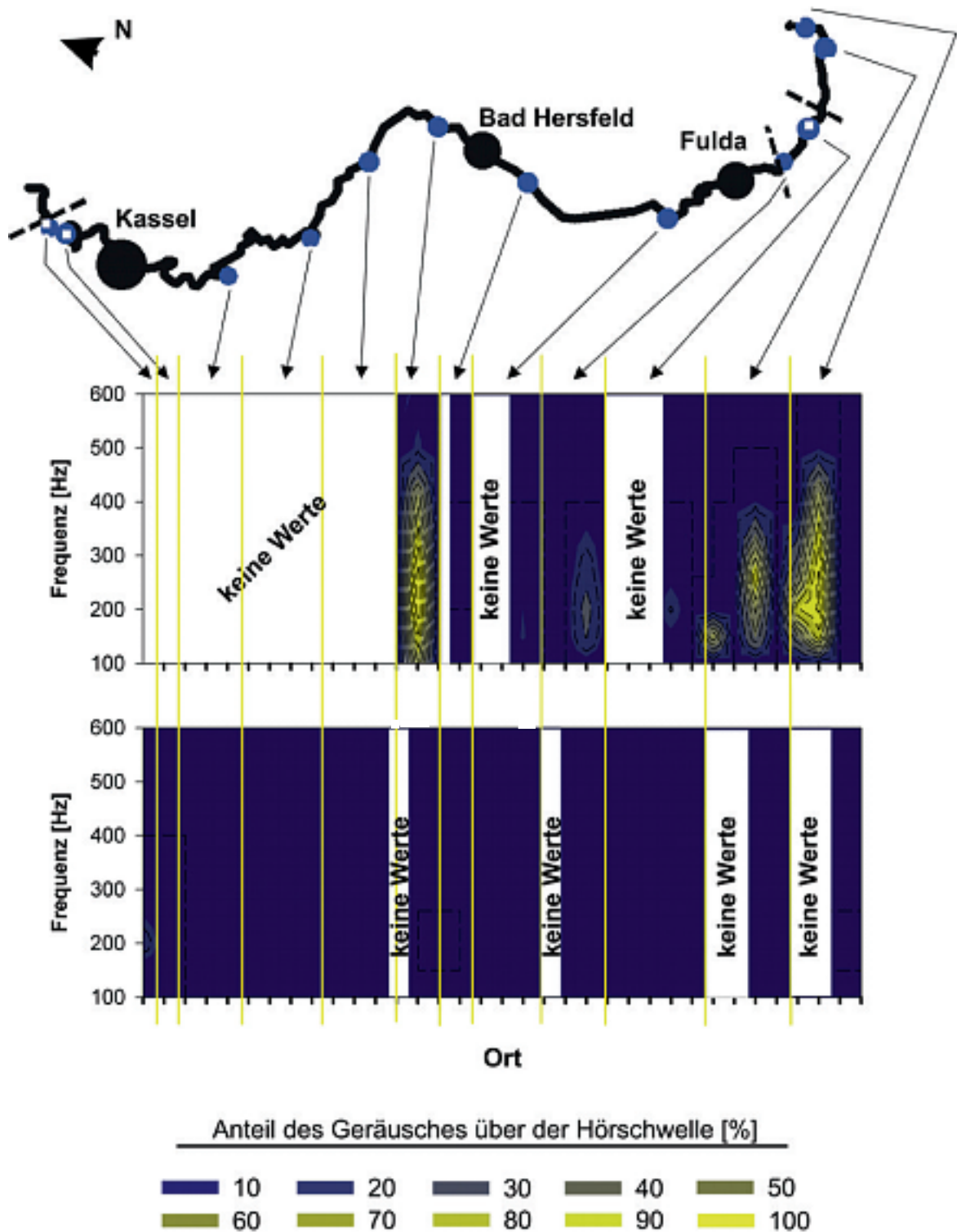


Abb. 3.18: Geräuschanteile der Fulda über der Hörschwelle von Lachsen (*Salmo trutta f. fario*). **Oberer Teil:** Gewässerkarte der Fulda mit den Probenahmestellen. **Mittlerer Teil:** Riffles - Zeitlicher Anteil [%] der Hintergrundgeräusche (30 s Aufnahme) in den Riffles der Fulda über der Hörschwelle vom Lachs (*Salmo trutta f. fario*). Abszisse: gelbe Striche begrenzen Probenahmestellen, kleine schwarze Striche bezeichnen einzelne Messungen. Ordinate: Frequenzen der Hörschwelle. Der zeitliche Anteil [%] von Hintergrundgeräusche über der Hörschwelle ist farblich kodiert (s. Legende). **Unterer Teil:** Pool – Darstellung entsprechend dem Riffle.

Mit Hilfe dieser Methode kann gezeigt werden, dass Bachforellen (Hörgeneralisten) in fast jedem Riffle eine Struktur zumindest zeitweilig hören können. Dies sind andere Ergebnisse als bei einem Vergleich der Hörschwelle der Bachforelle mit den Terzspektren verschiedener Geräusche in den Riffles. Vor diesem Hintergrund und auf Grund der unterschiedlichen Frequenzbreite, die die Tiere in den Riffles und Pools wahrnehmen können, sollte es für potamodrome Arten möglich sein, verschiedene Riffles zu identifizieren. Die Pools stellen sich ihnen als stille Gewässerabschnitte dar. Diese Informationen können die Möglichkeit der Orientierung an akustischen Landmarken eröffnen. Die Döbel sollten die Fließgeräusche sowohl in Riffles als auch in Pools hören können. Es variieren hier jedoch das hörbare Frequenzband und der hörbare Zeitanteil. Dementsprechend unterscheiden sich Pools und Riffles im Klang. Ob und welcher Zusammenhang zwischen den wahrgenommenen Fließgeräuschen und der Gewässerstruktur herrscht, wäre Aufgabe für weitere Untersuchungen.

3.3 Anthropogen gestörte hydroakustische Umwelt und Hörschwellen einheimischer Fischarten

Im zweiten Teil der Arbeit wurden Geräuschbelastungen durch Schiffe im Zusammenhang mit Hörschwellen einheimischer Fischarten betrachtet. Dazu wurden Faktoren analysiert die Schiffsgeräusche beeinflussen. Konkret wurden mehrfach die Geräusche eines Bootes in unterschiedlichen Entfernungen, Richtungen und Geschwindigkeiten aufgezeichnet. Zusätzlich wurden Geräusche von Frachtschiffen im Rhein in verschiedenen Wassertiefen aufgenommen. Die Geräusche wurden qualitativ und quantitativ analysiert. Anschließend wurden die Schiffsgeräusche mit den Hörschwellen von Fischen verglichen. Um die daraus folgenden Schlüsse experimentell abzusichern, wurde der Einfluss der Schiffsgeräusche auf die Hörschwellenverschiebung von Rotaugen (*Rutilus rutilus*) bei einer 5tägigen Belastung gemessen.

3.3.1 Schiffsgeräusche

Im Rahmen der Untersuchungen von Schiffslärm in Bundeswasserstrassen wurde untersucht, welche Faktoren den mittleren Schalldruckpegel (L_{eq}) von Schiffen beeinflussen können.

Der L_{eq} beschreibt die quantitativen Eigenschaften der Fahrtgeräusche. Für die Untersuchung wurden in einem Seitenarm des Rheins (Insel Niederwerth) Versuche mit einem Nachen durchgeführt. Es wurde der Einfluss der Faktoren *Geschwindigkeit*, *Richtung* und *Entfernung* auf den L_{eq} der Fahrtgeräusche untersucht (Abb. 3.19).

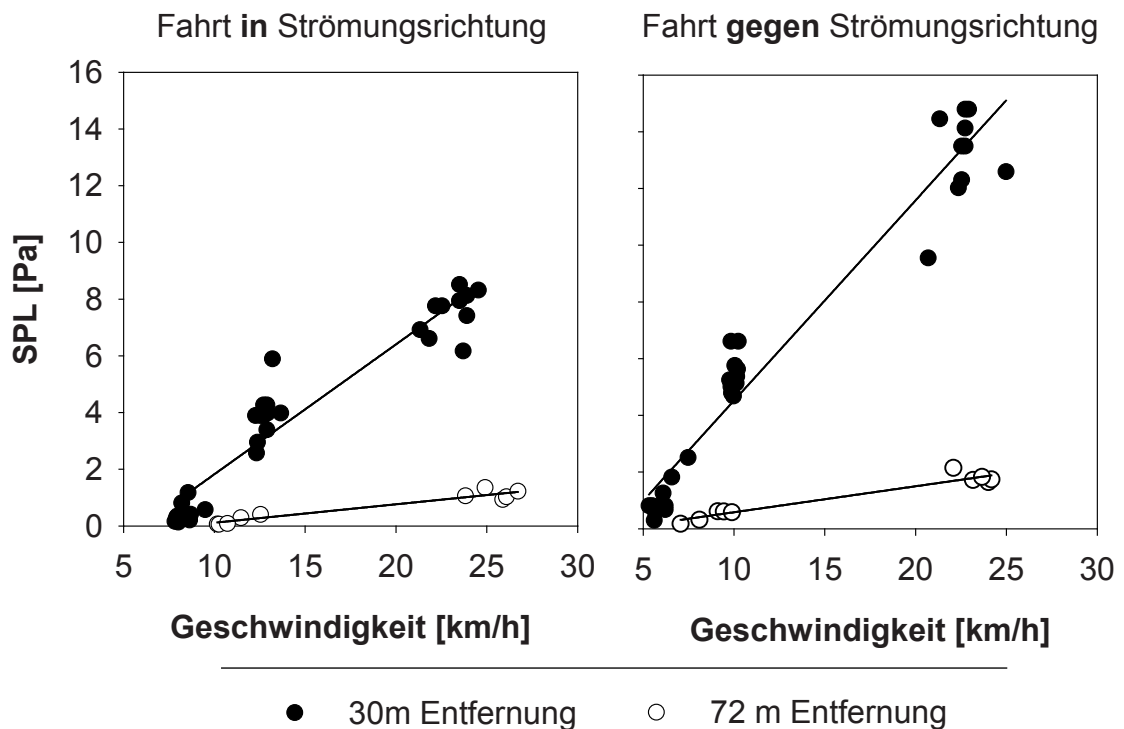


Abb. 3.19: Schalldruckpegel [Pa] der Geschwindigkeitsklassen Langsam (Werte) und Schnell (Werte) in den Fahrtrichtungen (stromauf und stromab) in zwei Entfernungen vom Ufer (30 und 75 m).

Alle drei untersuchten Faktoren *Geschwindigkeit*, *Entfernung* und *Fahrtrichtung* hatten einen Einfluss auf den mittleren SPL des Nachens. Der Schalldruckpegel eines fahrenden Nachens nahm mit steigender Geschwindigkeit (über Grund) zu (ANCOVA, $p < 0,001$, Abb. 3.19; Tabelle 3.6). Außerdem waren Fahrten gegen den Strom stets lauter als Fahrten mit dem Strom (ANCOVA, $p < 0,001$, Abb. 3.19, Tabelle 3.6). Zusätzlich war innerhalb jeder Geschwindigkeitsklasse eine Abnahme der Schalldruckpegel mit zunehmender Entfernung zu beobachten. Der Abnahmeeffekt war bei der Klasse *Schnell* größer als bei der Klasse *Langsam*. Der Effekt war bei der Fahrtrichtung gegen den Strom größer als mit dem Strom.

Tab. 3.6: ANCOVA Ergebnisse des Schalldruckpegels in Abhängigkeit der Entfernung (intervallskaliert), Richtung (stromauf und stromab) und Geschwindigkeit (langsam: intervallskaliert; schnell: intervallskaliert). $R^2 = 0,887$

| Source | Type III Sum of Squares | Df | Mean Square | F | Sig. |
|-----------------------|-------------------------|----|-------------|---------|--------|
| Geschwindigkeit | 57,003 | 1 | 57,003 | 343,516 | <0,001 |
| Entfernung | 21,737 | 1 | 21,737 | 130,995 | ,000 |
| Richtung | 6,951 | 1 | 6,951 | 41,888 | ,000 |
| Entfernung * Richtung | ,147 | 1 | ,147 | ,883 | ,351 |
| Error | 9,459 | 57 | ,166 | | |

Es sollte überprüft werden, ob dies auch für Frachtschiffe im Rhein gilt. Abbildung 3.20 stellt den Schalldruckpegel (L_{eq}) in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit und Richtung (Abb. 3.20, A) bzw. in Abhängigkeit zur Entfernung (Abb. 3.20, B) dar. Es wurden nur Daten von Schiffen berücksichtigt, bei denen Messungen in allen drei Wassertiefen durchgeführt werden konnten ($n=120$). Gegen die Strömung fahrende Schiffe fahren in der Regel langsamer (Mittelwert: $9,6 \pm 2,7$ km/h, $n=83$) als mit der Strömung fahrende Schiffe (Mittelwert: $20,2 \pm 5,0$ km/h, $n=98$). Die durchschnittliche Entfernung der Schiffe zum Ufer betrug $134,4$ m \pm $50,0$ m.

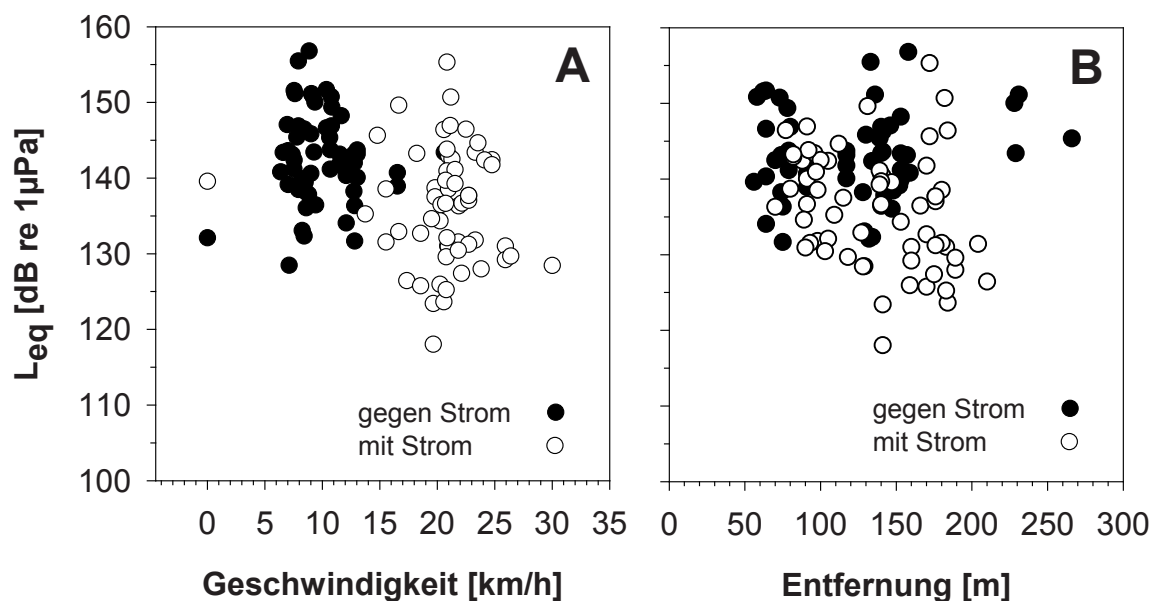


Abb. 3.20: Mittlerer Schalldruckpegel (L_{eq}) in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und Richtung (A) bzw. zur Entfernung (B) von 120 Frachtschiffen.

Zur statistischen Untersuchung der drei Faktoren musste der Datensatz mit den Schiffsaufnahmen bearbeitet werden. In 120 Fällen wurde das Geräusch eines Schiffes gleichzeitig in drei verschiedenen Wassertiefen (0,5 m, 1,0 m, 3,2 m) aufgenommen. In 72 Fällen existierten Aufnahmen von einer oder zwei Wassertiefen. Um in der Statistik Pseudoreplikationen zu vermeiden, wurden die 120 Schiffe von denen Geräusche aus allen drei Wassertiefen vorhanden waren zufällig in drei Gruppen à 40 Schiffe aufgeteilt. Jeder Gruppe wurde eine Wassertiefe (0,5 m, 1,0 m, 3,2 m) zugeordnet. Danach wurde von jedem Schiff sein L_{eq} bei der zugeordneten Wassertiefe ermittelt und zugewiesen. Es entstand so ein Datensatz mit 120 Schiffen mit jeweils 40 L_{eq} 's aus allen drei Wassertiefen.

Der mittlere L_{eq} aller 120 Schiffe bei gleichen Anteilen von Geräuschen aus drei Wassertiefen betrug 142,4 dB re 1 μ Pa. Die durchschnittliche Länge der Schiffe betrug 100,5 m \pm 31,2 m (Mittelwert \pm Standardabweichung). Ein deutlich erkennbarer Trend des L_{eq} in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit (ANCOVA, $p=0,199$, Tab 3.7) oder Richtung (ANCOVA, $p=0,72$, Tab 3.7) zeigte sich nicht. Es war ebenfalls keine Abhängigkeit der Entfernung der Schiffe zum Ufer zu erkennen (ANCOVA, $p=0,998$, Tab 3.7). Neben Geschwindigkeit, Richtung und Entfernung wurden zusätzliche Umweltfaktoren aufgenommen. Dazu gehörten der Messort, die Flusseite, die Flussmorphologie (Prall-/Gleithang) und die Schiffslänge. Mittels der Güte der Anpassung verschiedener statistischer Modelle („model selection“, Akaike 1974) sollten die Faktoren bestimmt werden, die die Lautstärke der Frachtschiffe maßgeblich beeinflussten. Die Güte wird mittels eines Index (AIC) verglichen. Je kleiner der AIC desto besser die Anpassung des Modells. Bei einer Untersuchung mittels AIC ohne Interaktionen bestand das beste Modell aus einer Kombinationen der Faktoren Entfernung (AIC = 1465,6), Richtung (AIC = 1446,0), Prall-/Gleithang (AIC = 1442,2), Länge (AIC = 1444,3), Geschwindigkeit (AIC = 1447,0), Ort (AIC = 1443,9), Tiefe (AIC = 1550,4). Das Modell L_{eq} = Entfernung + Geschwindigkeit + Länge + Ort + Prall-/Gleithang + Richtung + Tiefe besaß einen AIC von 1441,96.

Tab. 3.7: ANCOVA Ergebnisse der Abhängigkeit des L_{eq} fahrender Frachtschiffe (n=120) von den Faktoren Geschwindigkeit, Richtung (stromauf/ stromab) und Entfernung. $R^2 = 0,126$

| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|-----------------|-------------------------|-----|-------------|-------|------|
| Geschwindigkeit | 210,894 | 1 | 210,894 | 1,669 | ,199 |
| Entfernung | ,001 | 1 | ,001 | ,000 | ,998 |
| Richtung | 16,358 | 1 | 16,358 | ,129 | ,720 |
| Error | 14658,695 | 116 | 126,368 | | |

Die beste Anpassung (= niedrigster AIC) konnte für ein Modell erreicht werden, dass alle sieben Faktoren und 94 Interaktionen enthielt. Dieses Modell lässt die Annahme zu, dass alle sieben Faktoren gemeinsam den L_{eq} beeinflussen. Der Hohe AIC Wert lässt außerdem die Möglichkeit auf einen noch unbekanntem Faktor offen.

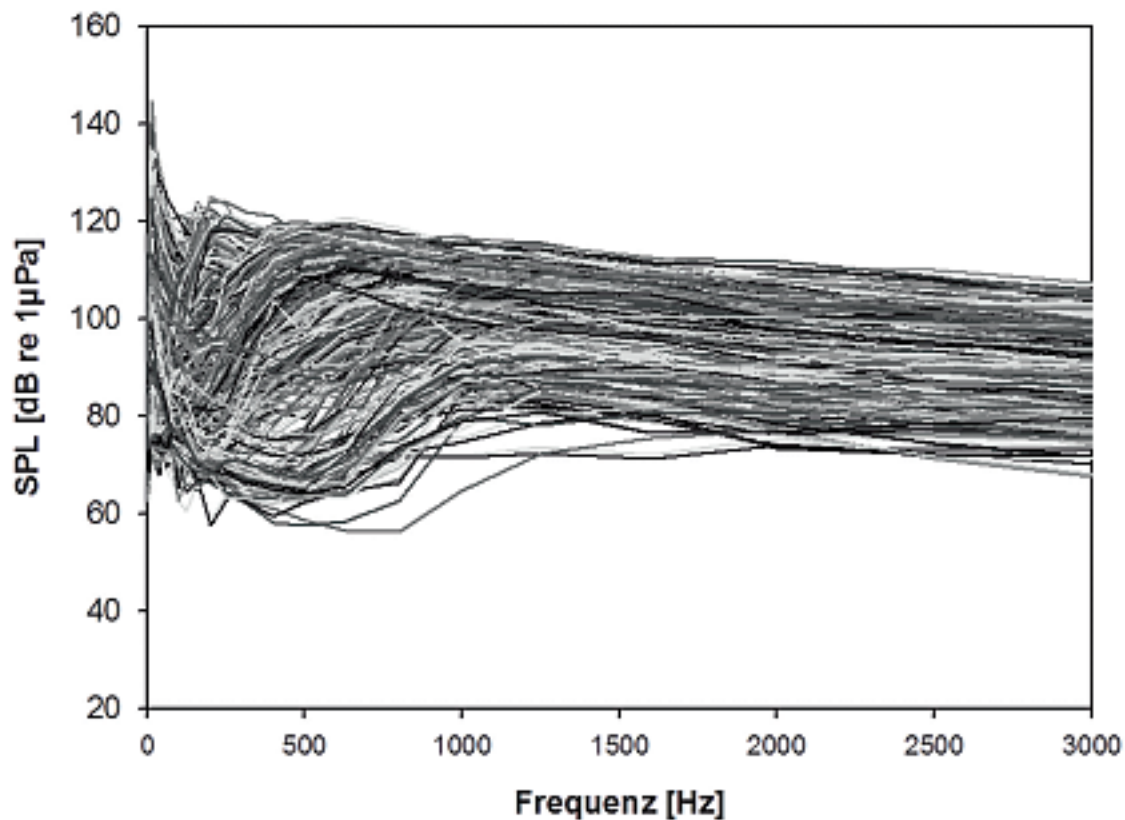


Abb. 3.21: Terzspektren aller akustischen Aufnahmen aller Schiffe (n= 192) in bis zu drei verschiedenen Wassertiefen (N=453) gleichzeitig. Für jede Aufnahme ist der mittlere Schalldruckpegel der Frequenzbänder ihrer Terzanalyse dargestellt. Grautöne zur besseren Unterscheidung einzelner Terzspektren.

Im Anschluss an die quantitative Analyse der Geräusche folgte die qualitative Analyse. Zur qualitativen Analyse wurden die RMS-Terzspektren der Schiffsgeräusche benutzt. Diese zeigten eine große Variabilität (Abb. 3.21). Der SPL im hörschwellenrelevanten Frequenzbereich (100 Hz – 3000 Hz) lag zwischen 58 dB und 122 dB. Gemeinsamkeiten der Spektren bestanden in einem lokalen Minimum im Frequenzbereich unter 1000 Hz und einer Schalldruckabnahme im Frequenzbereich von ca. 1000 Hz bis zum Frequenzmaximum. Das Schalldruckpegelminimum war unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Schalldruckpegelabnahme im Frequenzbereich > 1000 Hz war nicht für alle Spektren zu beobachten. Letzteres ist ein Artefakt von zwei unterschiedlichen Samplingraten bei Bonn bzw. Koblenz und Duisburg.

Mit der Funktion *envfit* im Programm R wurde der statistische Zusammenhang zwischen der Form der Spektren und erhobenen Faktoren untersucht. Die Faktoren Tiefe und Prall/Gleithang schienen bestimmend für die qualitative Ausprägung der Geräusche zu sein. Mit einem R^2 von 0,5395 bzw. 0,4840 zeigen diese Faktoren die beste Anpassungsgüte an die Messwerte. Die Anpassung der Faktoren Länge, Entfernung und Seite an die Messwerte war zwar signifikant, aber der Regressionskoeffizient R^2 war gering ($< 0,1$) und wurden deshalb von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen (Tab. 3.8).

Tabelle 3.8: Untersuchung der für die Terzspektren (N=453) bestimmenden Faktoren mittels MDS und der Funktion *envfit* (Programm R). Das R^2 zeigt die Güte der Anpassung der MDS an die Faktoren.

| <i>Faktor</i> | R^2 | p |
|------------------|--------|--------|
| Tiefe | 0,4840 | 0,0001 |
| Prall-/Gleithang | 0,5394 | 0,0001 |
| Richtung | 0,0017 | 0,6781 |
| Länge | 0,0228 | 0,0054 |
| Geschwindigkeit | 0,0049 | 0,3303 |
| Entfernung | 0,0640 | 0,0001 |
| Seite | 0,0225 | 0,0059 |

Stellt man die Terzspektren in Form einer MDS für die beiden hochsignifikanten Faktoren dar, erkennt man die deutliche Trennung der Daten nach den Faktorengruppen (Abbildung 3.22).

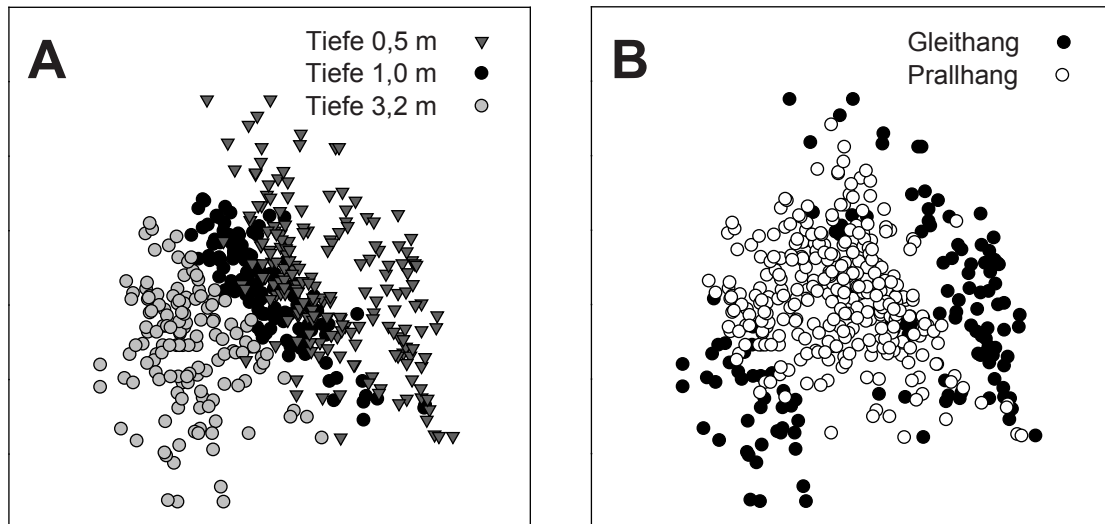


Abb. 3.22: **A** - MDS aller Terzspektren (N=453) der Schiffsaufnahmen nach Tiefe geordnet. Die Daten staffeln sich von rechts Oben nach links Unten in der Reihenfolge 0,5 m, 1 m, 3,2 m. **B** – MDS aller Terzspektren (N=453) der Schiffsaufnahmen nach Prall-/Gleithang geordnet. Die Daten der Gleithänge schließen die Daten der Prallhänge rechts Oben und links Unten ein.

Um die Unterschiede zwischen den drei Tiefengruppen zu visualisieren wurden die Terzspektren jeder Wassertiefe gemittelt (Abb. 3.23). Die Kurven verlaufen zwischen 1000 Hz und 3000 Hz gleich und fallen mit 2-4 dB/Terz. Im Frequenzband von 3500 Hz bis 5000 Hz sinken die gemittelten Spektren von 1 m und 3,2 m Wassertiefe rapide ab. Dagegen behält das gemittelte Spektrum von 0,5 m Wassertiefe die vorhergehende Rate bei. Die Unterschiede im letzten Frequenzband sind ein Artefakt der FFT-Analyse und der Samplingrate von 10 kHz in Koblenz und Duisburg bzw. 20 kHz in Bonn.

Im Frequenzband zwischen 16 Hz und 1000 Hz zeigten sich tiefenabhängige, unterschiedlich breit und stark ausgeprägte Schalldruckabnahmen (Cut-Off Frequenz). Die Frequenzbandbreite und Abschwächungsstärke dieses „Fenster effekts“ verhielt sich umgekehrt proportional zur Wassertiefe. Der linke Rand aller Fenster begann am 16 Hz Band wobei der rechte Rand des Fensters bei 0,5

m Wassertiefe im 1000 Hz-Band, des Fensters bei 1 m Wassertiefe im 500-Hz Band und des Fensters bei 3,2 m Wassertiefe im 200 Hz-Band endete. Die schwarzen Punkte (Abb. 3.23 A) geben die Cut-Off Frequenz (s.o.) der entsprechenden Tiefe an (0,5 m = 750 Hz, 1 m = 375 Hz, 3,2 m = 117 Hz). Der Vergleich mit den Spektren zeigt, dass der rechte Rand des Fensters mit der Cut-Off Frequenz zusammenfällt.

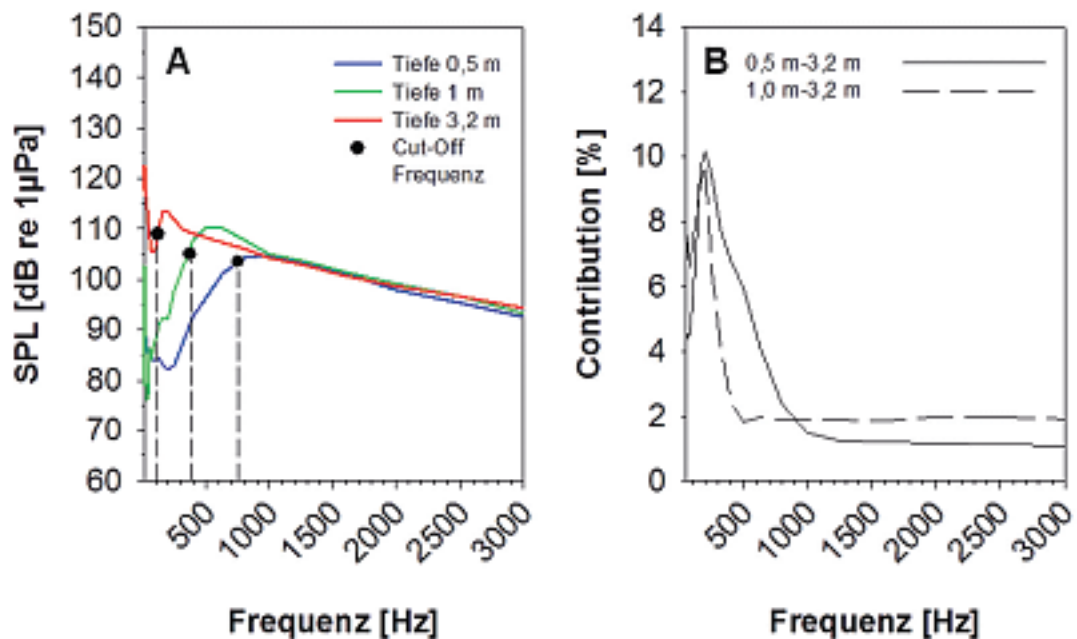


Abb. 3.23: **A** - Darstellung der für jede Tiefe (0,5 m, 1m, 3,2 m) gemittelten Terzspektren (N: 0,5 m=192, 1m=120, 3,2 m=140) der Schiffsgeräusche im Hörbereich der Fische **B** – Ergebnisse der SIMPER-Analyse. Vergleich der gemittelten Spektren von 0,5 m und 1,0 m mit der Referenztiefe (3,2 m). Die Abbildung zeigt den Beitrag [%] einzelner Frequenzbänder am Unterschied der verglichenen Spektren.

In der Abbildung 3.23 B wurden die Ergebnisse einer Simperanalyse dargestellt. Diese zeigt beim Vergleich zweier Spektren den Beitrag einzelner Frequenzen zum Gesamtunterschied der Spektren. Bei beiden Wassertiefen war die Differenz des 200 Hz Bandes zu dem der Referenztiefe (3,2 m) am größten (10,16 % bzw. 9,79 %). Außerdem zeigt sich an der Breite des Peaks die unterschiedliche Ausprägung des Fensters. Im 0,5m - 3,2 m Vergleich tragen Frequenzen zwischen 100 Hz und 500 Hz und im 1,0 m - 3,2 m Vergleich tragen die Frequenzen 40 Hz - 250 Hz zu jeweils mehr als 5% zum Gesamtunterschied bei.

Der zweite Faktor, der die Form der Spektren bestimmte, war die Uferform an der Messstelle (Prall-/Gleithang). Um den Einfluss der Wassertiefe auf die Terzspektren zu eliminieren, werden die Spektren von Prall- bzw. Gleithang nach Tiefenstufen getrennt betrachtet (Abb. 3.24 A – C). Bei einer Wassertiefe von 0,5 m ist das oben beschriebene Fenster (Cut-Off Frequenz) am Gleithang deutlich ausgeprägt (100 - 1000 Hz, Abb. 3.24 A). Sein Minimum liegt mit 73 dB bei 400 Hz, sein Maximum bei 100 dB und 1250 Hz. Am Prallhang findet sich kein deutliches Fenster. Hier sinkt der Schalldruckpegel ab 800 Hz von 107 dB auf ein tieferes Niveau von 80 dB bei 50 Hz ab.

Abb. 3.24 B zeigt die gemittelten Terzspektren für Prall- und Gleithang in 1 m Wassertiefe. In 1 m Wassertiefe steigt das Spektrum des Prallhangs von 77 dB bei 40 Hz bis zu seinem Maximum bei 500 Hz mit 111 dB (Abb. 3.24 B) an und fällt dann bis 2500 Hz auf 97 dB und bis 500 Hz auf 49 dB ab. Das Spektrum des Gleithangs unterscheidet sich vom Prallhang wesentlich im Frequenzbereich von 125 Hz bis 630 Hz. Hier zeigt sich ein Fenster mit einem Minimum bei 250 Hz und 80 dB.

Bei 3,20 m Wassertiefe verlaufen die gemittelten Spektren von Prall- und Gleithang in 3,2 m Wassertiefe weitgehend gleich (Abb. 3.24 C). Die Unterschiede finden sich hier im Frequenzband bis 100 Hz. Das Spektrum vom Gleithang bildet entgegen den Erwartungen kein Fenster. und besitzt ab dem Terzband 125 Hz (Cut-Off Frequenz = 117 Hz) einen niedrigeren Schalldruckpegel als der Prallhang.

Für die Tiefe 0,5 m finden sich die größten Unterschiede zwischen Prall- und Gleithang mit 12,8 % für das Frequenzband um 630 Hz (Abb. 3.24 D, SIMPER-Analyse). Bei 1 m Wassertiefe findet sich der größte Unterschied im Frequenzband 315 Hz. Bei 3,2 m wird ein hoher Anteil der tiefen Frequenzen an der Spektrendifferenz angezeigt. Mit zunehmender Frequenz nimmt der Anteil an der Differenz zwischen Prall- und Gleithang ab. Es sei darauf hingewiesen, dass sich die Cut-Off Frequenzen jeweils am rechten Rand der Peaks bzw. der Flanke befanden.

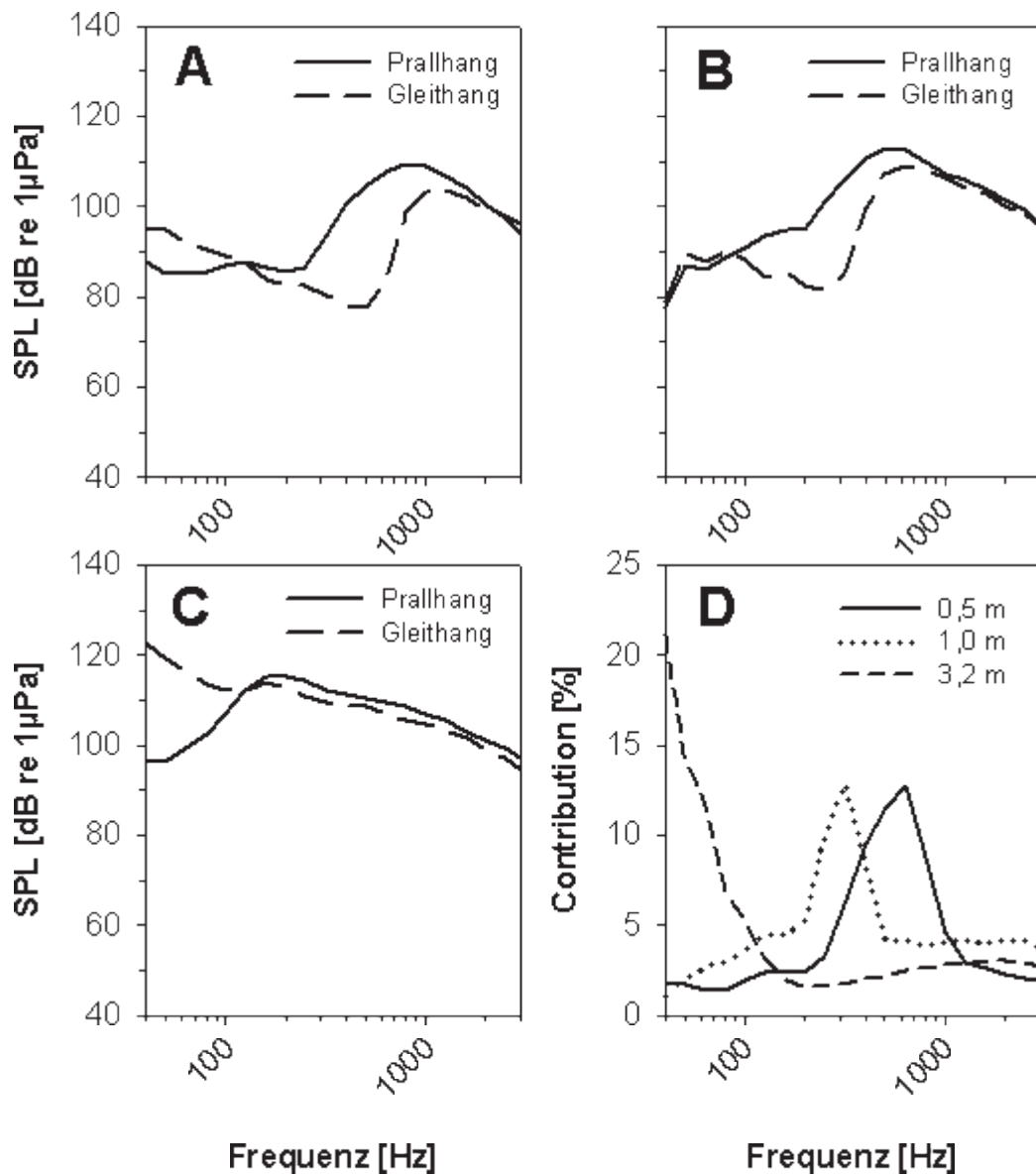


Abb. 3.24: Gemittelte Terzspektren von Prall- und Gleithang in 0,5 m (A), 1,0 m (B) und 3,2 m (C) Wassertiefe. Anzahl der gemittelten Spektren (P=Prallhang, G=Gleithang): A: P=122, G=71, B: P=97, G=22, C: P=97, G=42. D zeigt den Beitrag jeder Frequenz am Gesamtunterschied der Spektren von Prall- und Gleithang (Simper-Analyse).

3.3.2 Mittlere Geräuschbelastung von Fischen in der Bundeswassertrasse Rhein in unterschiedlichen Wassertiefen (standardisierte mittlere Schalldruckpegel von Fracht-schiffen)

Die Definition einer standardisierten Geräuschbelastung durch Schiffsverkehr kann dafür genutzt werden, die Auswirkungen auf die Fische einzuschätzen. Man erhält durch die Mittelwertbildung der vorhandenen Daten (N=453) drei Werte für drei Tiefenstufen (Tab. 3.9). In Kombination mit der Formel zur Berechnung der Hörschwellenverschiebung in Abhängigkeit zur Geräuschbelastung (Smith et al. 2004) lassen sich die Hörschwellenverschiebungen in Habitaten mit unterschiedlicher Wassertiefe berechnen. Die Formel nach Smith (2004) berechnet die mittlere Hörschwellenverschiebung bei einer bestimmten Geräuschbelastung. Für die Belastung durch Schiffsgeräusche ergeben sich nach Smith (2004) tiefenabhängige Hörschwellenverschiebungen zwischen 13,6 dB und 17,9 dB.

Tab. 3.9: Standardwerte für die Geräuschbelastung durch Schiffsgeräusche in unterschiedlichen Wassertiefen in der Bundeswassertrasse Rhein (nach Smith et al. 2004).

| Wassertiefe [m] | Geräuschpegel [dB re 1µPa] | mittlere Hörschwellenverschiebung Cypriniden [dB] |
|--------------------|-------------------------------|---|
| 0,5 m | 137,76 | 13,6 |
| 1,0 m | 141,00 | 15,5 |
| 3,2 m | 145,13 | 17,9 |

3.3.3 Vergleich der Schiffgeräusche mit Hörschwellen eines Hörgeneralisten bzw. Hörspezialisten

Abbildung 3.25 A zeigt die gemittelten Terzspektren aller Frachter in 0,5 m, 1,0 m und 3,2 m Wassertiefe am Prallhang und die Hörschwellen eines Hörspezialisten (Döbel, *Leuciscus cephalus*) und eines Hörgeneralisten (Bachforelle, *Salmo trutta f. fario*) im Vergleich. Liegt die Hörschwelle unterhalb des gemittelten Spektrums, kann die Fischart die Geräusche im Mittel hören. Im Anhang findet sich Tabellen mit den SPL-Differenzen zwischen Hörschwelle und gemitteltem Terzspektrum.

Abbildung 3.25 A zeigt, dass die Hörschwelle der Bachforelle über dem gemittelten Spektrum der Geräusche von Frachtschiffen in 0,5 m Wassertiefe verläuft. Die Schiffe werden in dieser Wassertiefe im Mittel nicht wahrgenommen. Da es sich um ein gemitteltes Spektrum handelt, kann es aber einzelne Schiffe geben, die für die Hörgeneralisten trotzdem hörbar sind. In den Wassertiefen 1 m und 3,2 m liegt die Hörschwelle der Bachforelle unter den gemittelten Terzspektren (200 - 400 Hz bzw. 100 - 400 Hz) der Schiffe. Diese sind also im Durchschnitt hörbar. Die Differenz zu den Schiffsgeräuschen ist dabei in 1,0 m Wassertiefe mit max. 10,9 dB (250 Hz) noch gering, das Geräusch für Bachforellen also als „leise“ einzustufen. In der Wassertiefe 3,2 m fällt die maximale Differenz mit 26,8 dB (200 Hz) dagegen wesentlich höher aus. Die Schiffsgeräusche werden von der Bachforelle mit zunehmender Wassertiefe zunehmend lauter wahrgenommen.

Die Hörschwelle der Döbel (*Leuciscus cephalus*, Hörspezialist) liegt dagegen in allen drei Wassertiefen unter den Geräuschspektren (200 - 1500 Hz). Im Gegensatz zu den Forellen ist die Hörschwellen/Geräusch Differenz größer. Die Frequenz mit der maximalen SPL-Differenz verschiebt sich zwischen den Wassertiefen (Fenstereffekt). So liegt die Frequenz der max. SPL-Differenz bei 0,5 m bei 600 Hz (38,4 dB) und bei 1,0 m und 3,2 m bei 400 Hz (45,1 dB bzw. 45,7 dB). Die maximale SPL-Differenz nimmt mit steigender Wassertiefe zu.

Am Gleithang (Abb. 3.25, B) verläuft die Hörschwelle der Bachforelle bei 0,5 und 1,0 m Wassertiefe oberhalb der Geräuschspektren. Die Tiere hören in diesen Wassertiefen nur wenige Schiffe. In 3,2 m Wassertiefe liegt die Hörschwelle unterhalb des gemittelten Terzspektrums und zeigt, seine max. SPL-Differenz bei 200 Hz. Die Höhe der max. SPL-Differenz liegt mit 24,2 dB unterhalb der SPL-Differenz am Prallhang (26,8 dB). Die Bachforellen können dementsprechend die Schiffsgeräusche mindestens zwischen 200 Hz und 400 Hz wahrnehmen. In 3,2 m Wassertiefe sind die Schiffsgeräusche also für Bachforellen am Gleithang leiser als am Prallhang. In 1,0 m Wassertiefe hören sie die Schiffe im Gegensatz zum Prallhang nicht.

Döbel können am Gleithang wie am Prallhang Schiffsgeräusche in allen Wassertiefen wahrnehmen. Ihre Hörschwelle liegt am Gleithang

ebenfalls zwischen 200 Hz und 1500 Hz unterhalb der drei gemittelten Spektren. Die Frequenz mit der max. SPL-Differenz verschiebt sich auch hier mit zunehmender Wassertiefe durch den Fenstereffekt von 800 Hz bei 0,5 m Wassertiefe über 600 Hz bei 1,0 m zu 400 Hz bei 3,2 m. Die Geräusch/Hörschwellen Differenzen liegen bei Werten von 41,1 dB, 37,1 dB und 21,1 dB. Im Vergleich zu den Werten am Prallhang sind die Wert niedriger. Die Schiffsgeräusche werden also am Gleithang von Döbeln leiser wahrgenommen als am Prallhang.

Vergleicht man die Belastung beider Fischarten ist die Geräuschbelastung des Hörspezialisten an Prall- und Gleithang höher als die des Hörgeneralisten.

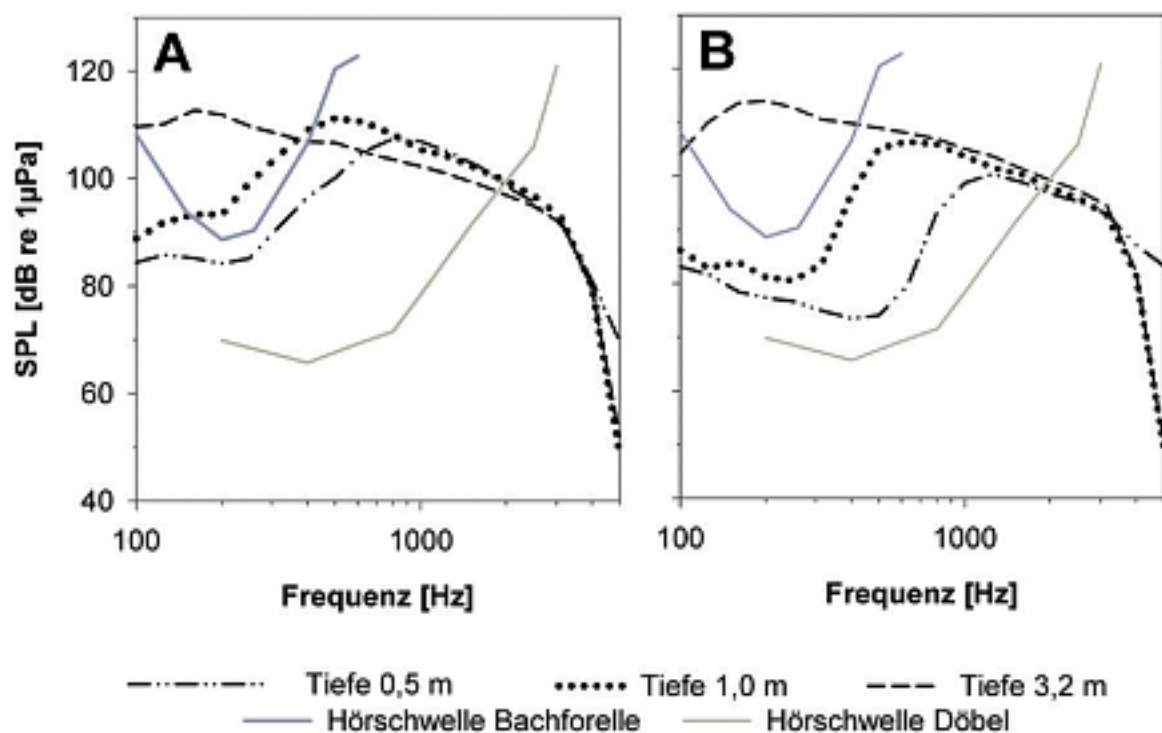


Abb. 3.25: Vergleich von gemittelten Schiffsgeräuschspektren in 0,5 m, 1,0 m und 3,2 m Wassertiefe an Prallhang (A, N: 0,5 m= 122, 1,0 m= 97, 3,2 m= 97) und Gleithang (B, N: 0,5 m: 71, 1,0 m: 22, 3,2 m: 42) mit den Hörschwellen von Bachforelle (*Salmo trutta f. fario*) und Döbel (*Leuciscus cephalus*).

3.3.4 Physiologischer Versuch zur Auswirkung von Schiffsgeräuschen auf die Hörschwelle von Rotaugen (*Rutilus rutilus*)

Um den Einfluss von Schiffsgeräuschen auf das Hörvermögen von Hörspezialisten zu untersuchen, wurden Rotaugen (*Rutilus rutilus*) 5 Tage lang mit jeweils 197 Schiffspassagen pro Tag beschallt.

In Abb. 3.26 ist die Hörschwelle der Rotaugen vor (schwarze Kreise) und nach (weiße Kreise) dem Beschallungsversuch dargestellt. Die Hörschwelle wurde durch die Beschallung in allen Frequenzen unempfindlicher, das Hörvermögen der Fische also reduziert. Es konnte eine signifikante Verschiebung der Hörschwellen zwischen den Messungen vor und nach der Beschallung festgestellt werden ($p=0,009$, paarweiser t-test).

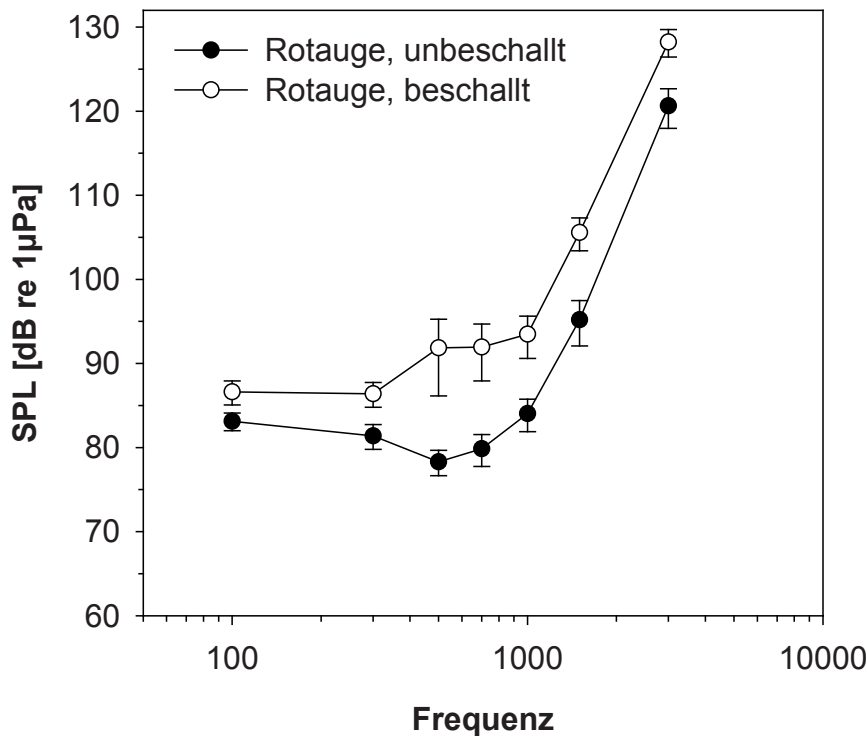


Abb. 3.26: Mittlere Hörschwelle von Rotaugen (*Rutilus rutilus*, Mittelwert \pm Standardfehler, $n = 6$) vor und nach einer fünftägigen periodischen Beschallung mit Schiffslärm ($LeqT60 = 127,2$ dB re $1\mu Pa$).

Die Hörschwellenverschiebung fiel in den tiefen Frequenzen (< 500 Hz) mit einer Verschiebung zwischen 3-5 dB am geringsten aus. Der empfindlichste Bereich des Hörvermögens zwischen 500 Hz und 700 Hz war mit einer Verschiebung zwischen 12 und 14 dB am stärksten

betroffen. Im Mittel kam es zu einer Verschiebung von 8,79 dB. Dies entspricht der berechneten TTS nach Smith et al. (2004) von 8,52 dB. Eine Verschiebung der Hörschwelle bei 500 Hz von 79 dB auf 93 dB bedeutet, dass der SPL des Tones in dieser Frequenz um das 5fache steigen muss, damit der Fisch ihn wahrnehmen kann.

4 Diskussion

4.1 Hörschwellen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden als Grundlage die Hörschwellen von 12 einheimischen Fischarten bestimmt. Diese lassen sich einfach beschreiben: Die Hörspezialisten hören empfindlicher und in einem breiterem Frequenzbereich als die Hörgeneralisten.

In den einheimischen Binnengewässern besteht die Gruppe der Ostariophysen (Hörspezialisten) überwiegend aus Arten der Cypriniformes (Fiedler 1991). Sie zeichnen sich unter anderem durch den Besitz eines Weberschen Apparates aus, der die Schwimmblase mit dem Innenohr (Labyrinth) der Fische verbindet (Fiedler 1991). Die Schwimmblase fungiert als Schalldruckaufnehmer der das Hörvermögen der Fische verbessert (Blaxter 1980). Sie wird durch Schall in Schwingungen versetzt, die durch den Weberschen Apparat auf das Innenohr übertragen werden. Untersuchungen von Clarke et al. (1975) haben gezeigt, dass die Schwimmblase eines Goldfisches besonders im Frequenzbereich bis 900 Hz empfindlich reagiert. Dieses Ergebnis passt zu den Hörschwellenmessungen in den Versuchen. Karpfen (*Cyprinus carpio*), Gründling (*Gobio gobio*), Schleie (*Tinca tinca*) und Döbel (*Leuciscus cephalus*) zeigten Hörschwellen mit Empfindlichkeitsmaxima in dem Bereich zwischen 200 Hz und 1000 Hz. Die empfindlichste gemessene Hörschwelle war die des Karpfens. Sie lag zwischen 400 Hz und 1000 Hz bei 61 – 65 dB. Außer den Barben (*Barbatula barbatula*) hören alle Cypriniden zumindest in einem kleinen Frequenzbereich empfindlicher als 70 dB. Die Barben hingegen stellen eine Ausnahme dar. Ihre Hörschwelle beginnt bei 200 Hz mit einer Empfindlichkeit von 85 dB. Diese nimmt mit zunehmender Frequenz langsam ab. Dieses Bild entspricht nicht dem der Cypriniden. Ein Grund könnte sein, dass die Barben Freifänge aus dem Rhein waren und daher bereits Schiffslärm ausgesetzt waren, der die Hörschwelle der Tiere verschoben haben könnte (TTS, Smith 2004). Der Verlauf der Barbenhörschwelle wird noch ausführlich diskutiert werden.

Betrachten man die Hörschwellen der Hörgeneralisten, kann die hier gemessene Hörschwelle des Lachses (*Salmo salar*) mit der von Hawkins & Johnstone (1978) verglichen werden. Die Hörschwelle

von Hawkins findet ihre empfindlichste Frequenz bei 160 Hz und 95 dB. Die hier ermittelte Hörschwelle liegt bei 150 Hz bei 94 dB. Allerdings ist die empfindlichste Frequenz nicht 150 Hz, sondern 200 Hz mit 89 dB. Dort liegt die Hörschwelle von Hawkins bei ca. 100 dB und verschlechtert sich bis 400 Hz auf ca. 130 dB. Im Vergleich liegt die gemessene Hörschwelle dort bei 106 dB (400 Hz). Anders verhält sich der Hörschwellenvergleiches im tieferen Frequenzbereich. Zwischen 100 Hz und 30 Hz nimmt die Empfindlichkeit der Lachshörschwelle bei Hawkins von ca. 98 dB auf 108 dB ab. Unsere Hörschwelle erreicht bereits bei 100 Hz die 108 dB. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass gerade in den extrem tiefen Frequenzbereichen die saubere Tondarstellung schwer fällt. Die Folge kann eine Frequenzstreuung in höhere Töne sein, auf die der Fisch empfindlich reagiert und falsch positive Reaktion zeigt.

Die Hörschwelle der Bachforelle (*Salmo trutta f. fario*) entspricht relativ genau der des Lachses. Sie liegt bei 100 Hz und 500 Hz 4 dB unter der des Lachses, stimmt aber ansonsten (+/- 3 dB) mit ihr überein. Das Audiogramm der Äsche (*Thymallus thymallus*) entspricht bis 150 Hz dem des Lachses und ist in den Frequenzen darüber um ca. 4 dB unempfindlicher. Die Ursache könnte darin liegen, dass die Äschen regelmäßig ihren Magen bei der Nahrungsaufnahme mit Kies gefüllt haben. Dies könnte zu einer Änderung Ihres Schwingungsverhaltens im Bereich höherer Frequenzen geführt haben.

Die Hörschwelle des Hechts (*Esox lucius*) zeigt die Empfindlichkeit der Hörgeneralisten (> 85 dB re 1µPa), aber einen breiteren Empfindlichkeitsbereich. So findet sich seine empfindlichste Frequenz bei 400 Hz. Dies könnte eine Anpassung an seinen Lebensraum in langsam fließenden und stehenden Gewässern sein.

Um herauszufinden, ob die ABR-Methode richtig implementiert wurde, fand ein Vergleich von gemessenen Hörschwellen mit bereits publizierten Hörschwellen statt. Die in dieser Arbeit gemessene Hörschwelle des Karpfens entsprach der von Wysocki (2005). Es fand sich lediglich eine schwache Parallelverschiebung der Hörschwellen. Die selbst gemessenen waren ~3 dB unempfindlicher. Außerdem fiel auf, dass die hier gemessenen Hörschwellen der Hörspezialisten ihren empfindlichsten Bereich zwischen 400 Hz und 600 Hz zeigen. Messungen aus dem Labor von Prof. Ladich weisen eher die

empfindlichsten Frequenzen um 800 Hz bis 1000 Hz auf (Amoser & Ladich 2005, Amoser et al. 2004, Wysocki 2005). Auch ein Vergleich der hier gemessenen Hörschwelle des Döbels (*Leuciscus cephalus*) mit der des See-Zwergdöbels (*Couesius plumbeus*, Popper 2005), zeigte eine gute Übereinstimmung, wobei die hier vorgestellte Hörschwelle um bis zu 4 dB empfindlicher war. Außerdem konnte unsere Hörschwelle vom Hecht visuell mit der von Amoser (2004) verglichen werden. Sie stimmten ab 400 Hz überein (+/- 3dB), während in tieferen Frequenzen Amoser (2004) niedrigere Werte zeigte.

Ursache für diese Abweichungen könnten die unterschiedliche Definition des Schwellenwertes, andere Hintergrundgeräusche, Populationsunterschiede und Kalibrierfehler sein (Ladich & Wysocki, 2009). Vermutlich gab es außerdem Unterschiede im Versuchsaufbau, die zu Abweichungen führten. Neben den unterschiedlichen Wassertiefen (Wysocki: 12 cm, hier: 27 cm) ist die wahrscheinlichste Quelle die Art der Aufhängung. Diese beeinflusst direkt das Schwingungsverhalten des Fisches im Schallfeld. Im Labor von Prof. Ladich werden Fische in einem Netz aufgehängt (Kenyon et al. 1998), im hier vorgestellten Versuchen wurden die Tiere durch drei Gummis gehalten. Die Gummis sollten ein freieres Schwingen des Fisches ermöglichen, außerdem wurde der Fisch nicht durch ein Netz zusammengepresst.

Ein weiterer Punkt ist die Reizgebung. Der Lautsprecher gibt keinen reinen Ton als Reiz ab. Dies wird durch die kurze Signallänge im Versuch (< 0,1 s) noch verstärkt, da sich die Lautsprechermembran nicht in der Kürze der Zeit sauber einschwingen kann. Es gilt: Je länger die Reizdauer, desto reiner ist der Ton (Silman & Silverman 1991). In unserem Versuch wurde deshalb die Reizlänge so lang gewählt, dass die Lautsprechermembran mindestens 5-7 Schwingungen (+ Rampe) vollführte. Trotzdem kann die Streuung der Frequenzen des Reiztones bei den hohen Frequenzen zu Schwierigkeiten führen. Man sieht die Hörschwellen einiger Fischarten bei 3000 Hz „umklappen“. Sie steigen nicht mehr dem Kurvenverlauf entsprechend, sondern nur sehr flach an (s. Schleie Abb. 3.1, Rotfeder Abb. 3.1; Amoser 2004: Karpfen, Felchen). Das Hörvermögen der Fische ist in diesem Frequenzbereich schlecht und der Reiz entsprechend laut. Gibt man den Reiz über den

Lautsprecher, streut er über ein ganzes Frequenzband (Beispiel: Kenyon 1998). Dabei könnte es dazu kommen, dass der SPL niedrigerer Frequenzen bei denen die Fische empfindlicher hören, bereits über der Hörschwelle liegt, während der SPL der Testfrequenz noch unter der Hörschwelle liegt. Trotzdem wäre aber ein evoziertes Potential messbar. Man bekommt ein Ergebnis für eine tiefere Frequenz, trägt diese im Diagramm aber bei einer höheren Frequenz ein.

4.2 Das Hörvermögen einheimischer Fischarten im Vergleich zu ihrer natürlichen akustischen Umwelt

In dieser Arbeit wurde der akustische Lebensraum eines Fließgewässers betrachtet. Es konnten dabei eine akustische Längsentwicklung aber auch kleinräumigere akustische Unterschiede dargestellt werden. Anschließend zeigte ein Vergleich von Hörschwellen einheimischer Fischarten mit den Hintergrundgeräuschen eine mögliche Anpassung an den akustischen Lebensraum. Anpassung bedeutet in diesem Zusammenhang eine Optimierung des Hörvermögens auf eine Informationsaufnahme aus den Fließgeräuschen. Im Gegensatz zu bisherigen Betrachtungsweisen (Schellart & Popper 1992; Morton 1975; Yao & Lin 2004; Slabbekoorn 2004; Wysocki et al. 2007; Amoser & Ladich 2005) wurde hier das Hintergrundgeräusch nicht als kommunikationsstörendes Rauschen sondern als Informationsträger betrachtet. Es wurde weiterhin die Frage untersucht, ob das Hörvermögen einheimischer Fische und ihre akustische Umwelt prinzipiell die Möglichkeit der akustischen Orientierung ermöglichen.

Die erhobenen Daten belegen, dass sich Fließgewässer akustisch im Längsverlauf qualitativ und quantitativ verändern. Fließgeräusche entstehen durch Turbulenzen und Einmischung von Luftblasen in fließendem Wasser an Hindernissen wie z.B. Substrat und Felsen (Tonolla 2009). Dabei steigt der Geräuschpegel mit zunehmender Fließgeschwindigkeit und Substratgröße. Betrachtet man die longitudinalen Gradienten der Fließgeschwindigkeit und Korngröße in Fließgewässern, sollten die Fließgeräusche im Oberlauf bei höherer Fließgeschwindigkeit und gröberem Substrat (Klee 1991) lauter sein als im Unterlauf. In dieser Arbeit konnte erstmals solch eine akustische Längsentwicklung in der Fulda nachgewiesen werden

(Abb. 3.13 A). Der mittlere äquivalente Schalldruckpegel der Fließgeräusche einer Probenahmestelle sank mit zunehmender Entfernung zur Quelle signifikant. Berechnete man ein gesamtgemitteltetes Terzspektrum für jede Probenahmestelle, fand man auch hier eine signifikante Änderung mit der Entfernung zur Quelle (3.10. A) statt. Dies bedeutet, dass sich die Fließgeräusche in der Forellenregion im Mittel in Schalldruck und Klangspektrum von den Geräuschen in Äschen- und Barbenregion unterscheiden. Äschen- und Barbenregion unterschieden sich im hörbaren Bereich der Fische nur in der Lautstärke der Geräusche. Die Unterschiede im Klangspektrum liegen am Rand des Wahrnehmungsbereichs der Hörspezialisten, wobei der Schalldruck oft unterhalb der Hörschwelle liegt. Für den Waldbrölbach konnten solche Zusammenhänge nicht bestätigt werden, da sich nach dem Zusammenfluss mit der größeren Bröl die akustischen Verhältnisse grundlegend änderten. Betrachtet man die vier Messungen des Waldbrölbachs, zeigt sich eine signifikante akustische Längsentwicklung des mittleren äquivalenten Schalldruckpegels. Im Umkehrschluss zeichnete sich ab, dass es für Gewässer eine individuelle longitudinale hydroakustische Entwicklung in der Geräuschquantität geben könnte. Fließt ein Gewässer in ein Gewässer höherer Ordnung, bricht die lineare Geräuschentwicklung über die Fließstrecke ab. Interessant wäre es gewesen zu messen, ob die Bröl ebenfalls eine lineare akustische Entwicklung zeigt und ob diese durch den Zusammenfluss mit dem Waldbrölbach gestört wird. Diese neue Hypothese müsste mit weiteren Messungen an den beiden Gewässern und an anderen Fließgewässern belegt werden, da der Stichprobenumfang (Waldbrölbach $n=4$, Bröl $n=3$) zu gering ist, um verlässliche Aussagen zu treffen.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass die longitudinale Abnahme der Lautstärke und graduelle Veränderung des Geräuschs für gleichgewichtete Mittelwerte von mehreren Messungen aus Riffle und Pool einer Probenahmestellen gilt ($n>3$). Innerhalb einer Probenahmestelle kann eine große Heterogenität herrschen, die abgebildet werden muss. Dies gilt besonders für den Unterschied zwischen Riffle und Pool. Sowohl die Lautstärke als auch die Geräuschqualität unterscheidet sich signifikant zwischen diesen beiden Strukturen.

Parallel zu dem akustischen Längsgradienten konnte eine Verschiebung der Fischartengemeinschaft festgestellt werden. Eine Auswertung des Fischkatasters der Fulda (N=27457) zeigte eine Dominanz der Hörgeneralisten in den lautereren, oberen Regionen (Forellenregion: 94,8 %, Äschenregion: 68,5 %) und eine Dominanz der Hörspezialisten in den leiseren, unteren Bereichen (Barberegion: 73,4 %). Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Verhältnis Hörgeneralisten/Hörspezialisten und dem mittleren Schalldruckpegel (3.14 B). Beide Befunde stützen die Hypothese, dass Hörgeneralisten die oberen, lautereren Abschnitt des Gewässers (Forellen- und Äschenregion) und die Hörspezialisten besonders die unteren, leiseren Flussregionen (Barben-/Brachsenregion) besiedeln. Außerdem lässt sich vermuten, dass sich das Hörvermögen der einzelnen Arten an ihren akustischen Lebensraum anpasst (Schellart & Popper 1992; Amoser & Ladich 2005). Was bedeutet aber eine Anpassung des Hörvermögens an die akustische Umwelt? Es könnte einerseits bedeuten, dass konstante und damit informationsarme Hintergrundgeräusche ausgeblendet werden. Im Gegensatz dazu sollten die Fische allerdings in der Lage sein, einzelne akustische Signale mit Informationsgehalt aus ihrer akustischen Umwelt aufzunehmen (z.B. lokale und stärkere hydrodynamische Einzelereignisse). Bisher wurden die Fließgeräusche meist als Störung untersucht (Amoser 2005, Wysocki 2007, Hawkins & Myrberg 1983), die die Wahrnehmung von Signalen zur Kommunikation bzw. Räuber- und Beuteortung verhindern. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass Fließgeräusche für die Fische wichtige Informationen über die Strömung und die Lebensraummorphologie enthalten. Wie oben erwähnt, werden Fließgeräusche größtenteils durch Fließgeschwindigkeit und Bodenstrukturen beeinflusst (Tonolla 2009). Dementsprechend muss auch eine Information über diese beiden Faktoren im Geräusch enthalten sein. Diese Betrachtungsweise folgt also nicht dem Ansatz der Maskierung, sondern geht von Signalen aus, die einen Informationsgehalt besitzen. Eine Anpassung der Fische an ihre akustische Umwelt wird als Hypothesen folgendermaßen definiert:

1. Die Fische nehmen in ihrem jeweiligen Lebensraum das mittlere und deshalb informationsarme Fließgeräusch nicht wahr. Dieses mittlere Fließgeräusch wurde in der Arbeit als spektral aufgelöster

aber räumlicher und zeitlich gemittelter Schalldruck beschrieben (Terzspektren).

2. Zeitlich diskrete und über diesen Mittelwert hinausgehende Einzelereignisse werden von den Fischen in ihrem jeweiligen Lebensraum wahrgenommen.

Um eine Anpassung der Fische an das mittlere Hintergrundrauschen zu untersuchen, wurden die Hörschwelle wichtiger Fischarten in Forellen-, Äschen- und Barbenregion mit den gemittelten Terzspektren der zugeordneten Regionen verglichen (Forellenregion: Bachforelle, Äschenregion: Äsche, Döbel; Barbenregion: Döbel). Aus methodischen Gründen wurde statt der Barbenhörschwelle in der Barbenregion die Hörschwelle der Döbel verwendet (s.u.). Die Untersuchung der Hörschwellenanpassung an ein mittleres Fließgeräusch wurde mittels Terzspektren durchgeführt. Diese eignen sich deshalb gut für den Vergleich, weil sie den Schalldruck jeder dargestellten Frequenz über den Aufnahmezeitraum mitteln. Es kann demnach gezeigt werden, ob das mittlere Fließgeräusch wahrnehmbar ist. Die Vergleiche der Hörschwellen mit den Terzspektren unterstützen weitestgehend die oben beschriebene Annahme, dass die mittleren Hintergrundgeräusche im Lebensraum nicht wahrgenommen werden können (Hypothese 1). Es zeigte sich, dass die Hörschwelle von der Hörgeneralisten (Bachforellen, Äschen) über den gemittelten Terzspektren der Hintergrundgeräusche ihres Lebensraumes lagen. Demzufolge hören sie in keiner Fischregion Geräusche, weder im Pool noch im Riffle. Dies gilt allerdings nur für das mittlere Fließgeräusch. Hörspezialisten, die generell in leiseren Fließgewässerbereichen vorkommen, haben einen empfindlicheren Hörsinn als Hörgeneralisten, die in den eher lautereren Oberläufen leben. Ihre Hörschwelle ist bis zu 21 dB empfindlicher als die der Hörgeneralisten. Der Hörspezialist Döbel kommt sowohl in der Äschenregion als auch in der Barbenregion vor. Die Daten legen nahe, dass Döbel die Hintergrundgeräusche in den Pools gar nicht oder nur sehr leise (Barbenregion) wahrnehmen können. Die Hintergrundgeräusche in den Riffles sollten sie dagegen deutlich hören. Letzteres widerspricht der Annahme einer Anpassung an das mittlere Fließgeräusch nicht zwangsläufig, da Döbel im allgemeinen Pools über Riffles präferieren (Eros et al. 2003). Döbel als Vertreter der Hörspezialisten hören im Mittel die Fließgeräusche der Pools

höchstens leise und kommen im allgemein in der Barbenregion vor. Letztere charakterisiert etwa $\frac{3}{4}$ der beprobten Fließstrecke der Fulda (152 km von 207 km). Hier finden sich kaum noch Riffle-Pool Sequenzen und die wenigen vorhandenen Riffles sind überwiegend anthropogen geschaffen (z.B. an Brücken).

Die Barbenhörschwelle wurde in dieser Untersuchung nicht verwendet, obwohl die Hörschwellenmessungen an den Tieren durchgeführt wurden. Ihre Hörschwelle war für Cypriniden ungewöhnlich unempfindlich. Da die Tiere aus dem Rhein stammten, war zu vermuten, dass sie durch die Schiffsgeräusche eine Hörschwellenverschiebung (PTS=Permanent Threshold Shift, Schwerhörigkeit) erlitten hatten. Für anderer Cypriniden (Rotaugen, *Rutilus rutilus*) konnte im Versuch eine eindeutige Hörschwellenverschiebung unter Einfluss von Schiffsgeräuschen aus dem Rhein nachgewiesen werden (s.u.). Ein Vergleich der Barbenhörschwelle mit der Hörschwelle von Rotaugen nach der Beschallung mit Schiffsgeräuschen, zeigte einen ähnlichen Verlauf und ähnliche Empfindlichkeiten (Abb. 3.2). Es wurde daraus geschlossen, dass die gemessene Barbenhörschwelle nicht charakteristisch für ihre Art in anthropogen unbeeinflussten Gewässern ist. Dementsprechend eignete sie sich nicht für einen Vergleich mit natürlichen Fließgeräuschen. Als Ersatz für die Barbe wurde die Hörschwelle des Döbels herangezogen (s.o.).

Um die zweite Hypothese, also die Wahrnehmung zeitlich diskreter, lauterer Einzelereignisse zu überprüfen, wurde der zeitliche Aspekt des Signals berücksichtigt. Fließgeräusche enthalten häufig kurze Signale wie zum Beispiel das Aneinanderschlagen von Steinen oder ein kurzes Glucksen oder Plätschern. Diese kurzen hörbaren Ereignisse in einem Signal werden im Powerspektrum einer FFT-Analyse durch die Mittelwertbildung eliminiert, da lange leisen Phasen überwiegen. Um dies zu umgehen, wurden die akustischen Aufnahmen aus Fulda und Waldbrölbach in Abschnitte von ca. 0,2 s Länge zerlegt. Die Spektren dieser Abschnitte wurden mit den Hörschwellen von Döbel (*Leuciscus cephalus*) und Bachforelle (*Salmo trutta f. fario*) verglichen. Dazu wurden insgesamt über 170 000 Vergleiche durchgeführt. Das Ergebnis zeigte im Gegensatz zu den Hörschwellenvergleichen dass der Hörspezialist Döbel in den Pools

aller Fischregionen der Fulda relativ häufig Einzelsignale wahrnehmen kann. Als Beispiel für die Hörgeneralisten wurde die Rechnung für den Bachforelle durchgeführt. Bachforellen könnten auch nach dieser Vergleichsmethode in den Pools der Fulda vermutlich keine Geräusche wahrnehmen. In den Riffles sollten sie dagegen (Ausnahme Kerspenhausen) mindestens eine Struktur zwischen 6,2 % – 92,6 % der Zeit hören können. Der Döbel hat eine deutlich empfindlichere Hörschwelle (21 dB in der empfindlichsten Frequenz). Er hört bei 400 Hz damit 11,2 mal besser als die Forelle bei 200 Hz. Damit lag die Empfindlichkeit der Hörschwelle des Döbels in diesem Frequenzbereich etwas über der Höhe des Schalldruckpegels der durchschnittlichen Fließgeräuschen (Fulda). Die Tiere sollten deshalb in allen gemessenen Pools in > 43,2 % der Zeit und in allen Riffles in > 59,5 % der Zeit Fließgeräusche hören können. Die hörbare Frequenzbandbreite und die Lautstärke waren im Riffle deutlich größer als im Pool. Diese Befunde legen nahe, dass Döbel ständig vorhandene Hintergrundgeräusche leise und hervorstechende Einzelsignale deutlich wahrnahmen. Bachforellen sollten ausschließlich einzelne Strukturen in Riffles hören können. Dementsprechend scheint die akustische Wahrnehmung für Döbel (Hörspezialisten) eine wichtigere Rolle zu spielen als für Bachforellen (Hörgeneralisten). Dies erscheint logisch, betrachtet man den Lebensraum. Die Fulda zeigt im Bereich der Barbenregion tieferes aber auch trüberes Wasser (Klee, 1991) mit entsprechend geringen Sichtweiten. In diesem Bereich hat das Ohr Vorteile gegenüber den Augen als Fernsinnesorgan. Dies wird durch die Verschiebung der empfindlichsten Frequenz von 200 Hz (Bachforelle) nach 400 Hz (Döbel) verstärkt. Die Döbel umgehen damit das Problem des Cut-Off Effekts (Abschwächung tiefer Frequenzen) in ihrem Lebensraum (Schellart & Popper 1992). Die Barbenregion besitzt in der Regel höhere Wassertiefen als die oberen Fischregionen (Klee 1991). So liegt z. B. die Cut-Off Frequenz bei 1m Wassertiefe um 370 Hz (Schallgeschwindigkeit = 1480 m/s) und damit unterhalb des empfindlichsten Hörbereichs des Döbels. Außerdem ist ein weiterer Punkt auffällig. Eine Verbreiterung und Verbesserung des Hörbereichs auf ein Frequenzband zwischen 200 Hz und 800 - 1000 Hz betrifft genau den Frequenzbereich, in dem sich der Lebensraum der Hörspezialisten (Äschen-, Barbenregion) am stärksten von der Forellenregion unterscheidet. Sowohl Äschen- als auch Barberegion

zeigen in diesem Frequenzbereich akustische Signaturen mit geringeren SPL's als die Forellenregion. Eine SIMPER-Analyse zeigte, dass diese Frequenzbänder den größten Beitrag (jeweils > 5%) zum Gesamtunterschied zwischen diesen Regionen beitragen. Dieses Ergebnis unterstützt zusätzlich die Hypothese einer Anpassung der Hörschwelle der Fische an ihre akustische Umwelt. Eine Erweiterung und Verbesserung der Hörschwelle in den Bereich höherer Frequenzen ermöglicht den Hörspezialisten nur in dieser Kombination eine optimale Ausnutzung der Informationen in ihrem Lebensraum. So unterscheidet sich die Forellenregion von der Barben- und Äschenregion mit einem höheren Schalldruckpegel und einem anderen Klangspektrum. Äschen- und Barbenregion unterscheiden sich wiederum durch unterschiedliche Schalldruckpegel. So können Döbel (Hörspezialisten) beispielsweise ihren Lebensraum deutlich von der Forellenregion unterscheiden, während Unterschiede zwischen Äschen- und Barbenregion schlechter unterscheidbar sind. Beide Regionen zeigen den stärksten akustischen Unterschied in einem höheren Frequenzbereich (1000 - 3150 Hz). Die Schalldruckpegel der Fließgeräusche in diesem Frequenzbereich liegen aber häufig unterhalb der Hörschwelle der Fische. Außerdem ist nicht klar, welche Fischarten die Geräusche in diesem Frequenzbereich überhaupt differenzieren können. Von Elritzen (Ostariophyse) ist bekannt, dass sie Töne nur bis ca. 1200 Hz unterscheiden können (Penzlin, 1996). Die Hypothese der Anpassung der Fische an die akustischen Bedingungen ihres Lebensraums fordert allerdings nicht unbedingt die Fähigkeit zur akustischen Differenzierung zwischen Äschen- und Barbenregion, denn beide Fischzonen sind der Lebensraum der Hörspezialisten.

Bei den Hörgeneralisten lag die Anpassung des Hörvermögens darin, die Hintergrundgeräusche möglichst auszublenden. Dafür kann es mehrere Gründe geben:

1. Das Wasser im Lebensraum der Generalisten (Forellenregion) ist meist klar, dadurch können die Tiere ihren visuellen Sinn nutzen. Dieser arbeitet mit einer wesentlich höheren Auflösung als der akustische Sinn und ist deshalb in diesen Lebensräumen von Vorteil. Die Nutzung des akustischen Sinns könnte im Zusammenhang mit hydrodynamischen Phänomenen wie Wirbeln und Walzen trotzdem sinnvoll sein, denn diese sind schlecht zu

sehen. Die vorgenommenen Messungen legen nahe, dass diese stärkeren hydrodynamischen Ereignisse auch für Forellen gut zu hören sind. Insofern erscheint es sinnvoll, für diese „durchsichtigen Ereignisse“ einen anderen Sinn zur Verfügung zu haben.

2. Es besteht die Möglichkeit, dass die Hörschwellenanpassung der Hörspezialisten in der Forellenregion keine gravierenden Vorteile hat. Die Wassertiefe ist im Oberlauf der Flüsse meist sehr gering. Dies hat weitreichende Folgen für die Hydroakustik. Im flachen Wasser der Flussoberläufe schwächen sich durch den Cut-Off Effekt tiefe Frequenzen stark ab. Nehmen wir an die Wassertiefe beträgt einen Meter. In diesem Fall liegt die Cut-Off Frequenz bei 375 Hz, d.h. alle niedrigeren Frequenzen werden abgeschwächt. In diesem Frequenzbereich geht der Vorteil des Schalldrucks gegenüber der Schallschnelle im Fernfeld verloren. Die Ausdehnung des Nahfeldes entspricht je nach Definition (Blaxter 1980; Hawkins 1993; Schellart & Wubbels, 1983) für 50 Hz und 1000 Hz ca. 4,6 m bzw. 0,23 m. Bis zu dieser Entfernung reagieren Fische auf die Schallschnelle – Komponente der Geräuschquelle. Dazu benötigen sie keine Spezialisierungen, denn Fische hören im Nahfeld direkt mit dem Ohr. Wenn man bedenkt, dass Riffles und Pools in der Forellen- und Äschenregion nur eine Ausdehnung von einigen Metern haben, könnte die Reichweite des Ohres der Hörgeneralisten genügen. Hinzu kommt, dass Geräusche in flachem Wasser verändert oder sogar teilweise ausgelöscht werden. Dies liegt daran, dass eine Schallquelle nicht nur direkt auf den Empfänger (Fisch), sondern auch in andere Richtungen ein Geräusch abstrahlt. Es kommt zu Reflexionen von der Wasseroberfläche und dem Boden, die ebenfalls auf den Fisch treffen. Bei einer Reflexion von der Wasseroberfläche wird die Phase des Signals umgekehrt. Ist der Weg des reflektierten Schalls nicht wesentlich länger als der direkte Weg, überlagern sich das direkte und das reflektierte Signal. Dies ist in den geringen Wassertiefen der oberen Flussregionen der Fall. Es kommt durch Überlagerung des Schalls zu Interferenzen und teilweiser Veränderung oder Auslöschung des Signals (Urlick, 1983; Hawkins & Myrberg, 1983). In den Messungen im Oberlauf

der Fulda waren selbst die lautesten Geräuschquellen nach einigen Metern in der jeweiligen Struktur nicht mehr messbar (s. Anhang).

Wie man sieht, ist die Anpassung von Hörschwellen nicht auf eine ganz einfache Aussage zu reduzieren. Die von Amoser (2005) aufgestellten Theorien, dass es in Binnengewässern wegen dem aus der geringen Wassertiefe resultierenden Cut-Off Effekts generell leise sei weshalb Süßwasserfische generell empfindlich hören, muss daher an wichtigen Stellen ergänzt werden. Träfe dies so zu, müssten die Spezialisten alle im flachen Oberlauf der Fließgewässer leben, da dort der Cut-Off Effekt am stärksten wirkt. Wie oben diskutiert wurde, könnten dort aber ganz andere Mechanismen greifen. Auch die Aussage dass Standgewässer leiser sind als Fließgewässer und entsprechend die Fische in Standgewässer besser hören sollten (Wysocki, 2007) sollte man ergänzen. Grundlage dieser Aussage ist ein Vergleich von 10 Gewässern (Stand- und Fließgewässer) an Hand von 13 Einzelmessungen. In der hier vorliegenden Untersuchung konnten allein in Messungen an der Fulda SPL-Werte beobachtet werden, die die gesamte Messspannweite von Stand- und Fließgewässern bei Wysocki (2007) abdeckten. Die Aussage sollte also eher lauten: Fließgewässer besitzen in verhältnismäßig mehr Bereichen einen höheren SPL als Standgewässer. Sie besitzen einen longitudinal abnehmenden SPL-Gradienten. Entsprechend finden sich im Oberlauf mehr Hörgeneralisten und im Unterlauf mehr Hörspezialisten, die die Empfindlichkeit und den Frequenzgang ihrer Hörschwelle an den geringeren Schalldruckpegel und das geänderte Spektrum der Fließgeräusche angepasst haben.

4.3 Möglichkeiten zur akustischen Orientierung in Fließgewässern

Die Ergebnisse der Terzanalysen verdeutlichen, dass sich Riffles und Pools akustisch unterscheiden. Dies erschloss sich vor dem Hintergrund, dass Fließgeschwindigkeit und Gewässerbettstruktur Fließgeräusche bestimmen (Tonolla 2009). In Riffles fließt das Wasser schneller, dadurch steigt die Schubspannung und damit der Sedimenttransport. Entsprechend ist das Substrat gröber als in den Pools (Klee 1991). Diese Kombination aus höherer Fließgeschwindigkeit und gröberem Substrat sollte in den Riffles zu qualitativ (Klangspektrum) und quantitativ (L_{eq}) anderen Geräuschen

als in den Pools führen. Tatsächlich lag der mittlere äquivalente Schalldruckpegel der Riffles 21 dB über dem der Pools. Dieser Wert wurde unabhängig vom Gewässer in Fulda und Waldbrölbach erreicht. Ob die Größenordnung der Differenz allgemeingültig ist, lässt sich nur durch zusätzliche Messungen in weiteren Gewässern ermitteln. Es sei daran erinnert, dass die absoluten Werte des mittleren L_{eq} von ~ 100 dB (Pools) bzw. ~ 121 dB (Riffles) abflussspezifisch waren. Unter anderen Abflussbedingungen werden sie sich ändern (Tonolla 2009). Ob dies in beiden Strukturen im gleichen Maß geschieht, so dass die L_{eq} -Differenz konstant bleibt, müsste getestet werden. Außerdem sei darauf hingewiesen, dass die Hörschwelle der Hörspezialisten in den durchgeführten Messungen im Rahmen dieser Differenz (< 21 dB) empfindlicher war, als die der Hörgeneralisten. Ob dies ein Hinweis auf eine Anpassung an den Lebensraum ist, müsste allerdings ebenfalls noch untersucht werden. Der Vergleich von Riffles bzw. Pools zwischen den beiden Gewässern zeigte in der Bröl in beiden Strukturen jeweils einen 2,6 dB höheren L_{eq} als in der Fulda (siehe Anhang).

In Bezug auf die Geräuschqualität konnte ein Unterschied des Klangspektrums zwischen Riffles und Pools in beiden Gewässern beobachtet werden. Außerdem ist das Klangspektrum von Riffles und Pools nicht gewässerspezifisch. Die Riffles (bzw. Pools) von Fulda und Waldbrölbach klingen ähnlich und sind statistisch nicht zu unterscheiden. Ob dies auf alle Fließgewässer zu übertragen ist, müsste ebenfalls durch weitere Messungen belegt werden.

In Anbetracht der beschriebenen akustischen Unterschiede stellt sich die Frage ob Fische diese Information zur Orientierung nutzen könnten. Prinzipiell können sich Fische orientieren und benutzen dazu auch Landmarken (Aronson 1971, Dodson 1988). Dass Fische sich prinzipiell anhand akustischer Landmarken orientieren können, wurde an Riffischen gezeigt (Leis et al. 2003). Es ist also zu vermuten, dass Fließgeräusche von Riffles oder bestimmten Strukturen (Felsen, verschiedenes Substrat, Todholz) als Landmarken genutzt werden könnten. Betrachtet man den Lebensraum der Fische im Verhältnis zu ihren sensorischen Kanälen, funktioniert der visuelle Sinn nur in klaren Oberläufen und der euphotischen Schicht klarer Seen. In den Unterläufen von Fließgewässern mit steigender Primärproduktion und steigender Schwebstofffracht (Klee 1991) und in Standgewässern mit

höherer Primärproduktion sinkt die Sichtweite rapide ab. Der Geruchs- und Geschmackssinn funktioniert prinzipiell nur gegen die Strömung oder in der direkten Umgebung. Auch der Tastsinn ist auf die direkte Umgebung begrenzt. Es bleibt nur das Gehör für eine Orientierung der Fische in trüben Gewässern. Beide Sinne reagieren auf unterschiedliche physikalische Parameter des selben Reizes. Schwingt ein Gegenstand, setzt er das Wasser in Bewegung. Die Seitenlinie registriert die Wasserbewegung direkt mit Hilfe von Oberflächenneuromasten und die parallel zu den Wasserbewegungen auftretenden Druckgradienten mit den Kanalneuromasten (Frequenzbereich > DC bis 150 Hz (Popper & Fay 1993)). Die Seitenlinie arbeitet allerdings nur im Bereich bis zu einer Körperlänge des Tieres. Eine Schallwelle enthält ebenfalls eine Partikelbewegungskomponente (Schallschnelle) sowie eine Druckkomponente (Popper & Fay 1993). Dabei schwächt sich die Partikelbewegung/Wasserbewegung mit der Entfernung zur Quelle stärker ab als die Druckkomponente. Im Fernfeld wirkt also überwiegend die Druckkomponente, im Nahfeld die Schallschnelle. Hörgeneralisten nehmen mit ihren Ohren in erster Linie die Schallschnelle wahr. Hörspezialisten, in den Binnengewässern überwiegend Cypriniden, benutzen ihre Schwimmblase als Schalldruckaufnehmer und nehmen deshalb auch die Druckkomponente wahr. Der akustische Sinn stellt demnach in trüben und tiefen Gewässern das einzige Fernsinnesorgan dar. Dies macht die Nutzung des Hörsinnes wahrscheinlich. In trüben und flachen Gewässern funktionieren Seitenlinie und Gehör. Dabei liegt der empfindlichste Bereich der Seitenlinie in einem Frequenzbereich <150 Hz und der des Gehörs bei 100 - 200 Hz. Wie könnte eine akustische Orientierung aussehen? Zuerst müssen die Tiere die benötigten akustischen Signale wahrnehmen. Dabei greift wieder die Argumentation aus der Anpassung der Hörschwelle an ihre akustische Umwelt. Die Cypriniden leben in einer Umwelt mit relativ tiefem und trüben Wasser (überwiegend Barbenregion). Sie benötigen ein nicht-visuelles Fernsinnesorgan und einen nicht-visuellen Reiz der unter diesen Bedingungen transportiert und aufgenommen werden kann. Alle diese Voraussetzungen sind erfüllt. Im tiefen Wasser wird die Druckkomponente des Schalls transportiert und Cypriniden besitzen durch ihre Anpassung als Hörspezialisten die Fähigkeit diesen Reiz aufzunehmen und zu verarbeiten. Hörgeneralisten können

Schwingungsreize überwiegend im Nahfeld durch Gehör und Seitenlinie wahrnehmen. Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, nutzt in ihrem Lebensraum ein akustischer Fernsinn aber nicht viel bzw. die vorhandenen akustischen Fähigkeiten reichen bei der Ausdehnung der Strukturen Riffle und Pool aus.

Als nächstes müssen die Tiere die Signale einordnen, um sich zu orientieren. Es wurde gezeigt, dass Fische akustische Landmarken und eine Gedächtniskarte ihrer Umgebung benutzen können (Reese 1989). In der Gedächtniskarte wäre die Information über die Morphologie des Gewässers, Futterplätze, Deckung, Laichplätze, Winterquartiere und ähnliches gespeichert. Bei der Passage einer bestimmten Landmarke, wie einem Riffle oder einem großen Stein, könnten die Fische dessen Fließgeräusche nutzen, um sich anhand dieser Karte zu orientieren. Da sich die Fließgeräusche je nach Wasserstand und Fließgeschwindigkeit ändern (Tonolla 2009), wäre nicht klar, ob Fische individuelle Riffles und Pools unterscheiden können oder beide Strukturen lediglich als solche erkennen. Wie bereits dargestellt, können nicht nur Hörspezialisten sondern auch Hörgeneralisten Geräusche in den Riffles wahrnehmen. Es zeigte sich außerdem, dass eine starke Heterogenität in der Wahrnehmung verschiedener Frequenzbänder und der Intensität der Geräusche besteht. Es scheint daher wahrscheinlich, dass diese Informationen einerseits Auskunft über die physikalischen Eigenschaften des Lebensraums geben, andererseits aber auch als Landmarke dienen könnten. Allerdings basiert diese Aussage auf der Berechnung von Zeitanteilen in denen Signale theoretisch wahrgenommen werden können und ist nicht experimentell nachgewiesen. Außerdem ist anzunehmen, dass die akustischen Informationen durch andere Sinne ergänzt werden. Zum Beispiel kann die Seitenlinie im Zusammenhang mit der Strömung zusätzlich die Richtung (stromauf, stromab) und die Uferseite (links, rechts) bestimmen. In der Summe bedeutet dies, dass Hörgeneralisten und Hörspezialisten akustische Signale zur akustischen Orientierung nutzen könnten. Für Hörgeneralisten ist der Informationsgehalt im flachen Wasser der Forellen- und Äschenregion jedoch deutlich geringer. Wie weiter oben beschrieben, verliert hier die Fähigkeit zur Schalldruckwahrnehmung teilweise ihren Vorteil. Das flache und klare Wasser in der Forellen- und Äschenregion führt zu einer guten Sicht und einer schlechten Akustik. Deshalb scheint in

diesen Bereichen die Nutzung einer optischen Orientierung, zumindest für tagaktive Fischarten, wahrscheinlicher. Außerdem ist bei den geringen Ausdehnungen von Riffles und Pools im Oberlauf auch eine geringere Reichweite des visuellen Sinns nicht von Nachteil. Zusätzlich muss davon ausgegangen werden, dass eine Hörspezialisierung in den oberen Fischzonen nur geringen Nutzen bringt. Die akustischen Messungen in der Fulda zeigen, dass Geräusche nicht strukturübergreifend zu hören sind. Die Tiere hören also maximal alle Geräusche innerhalb der Struktur (Riffle bzw. Pool), in der sie sich aufhalten und die häufig nur eine Ausdehnung von einigen Metern hat. Diese geringe Ausdehnung bedeutet aber ebenfalls, dass die Strukturgrenzen nur wenig weiter reichen als das Nahfeld des Schalls. Deshalb reicht die Wahrnehmung der Schallschnellkomponente, die im Nahfeld dominiert, zur Orientierung wahrscheinlich aus. Der Vorteil der Hörspezialisten mit der Wahrnehmung der Druckkomponente des Schalls im Fernfeld spielt deshalb eine wesentlich geringere Rolle als in der Barbenregion.

Außer festen Landmarken können auch relative Geräuschänderungen Navigationshilfen im Lebensraum liefern. Erste Messungen an der Sieg zeigen, dass sich mit der Wassertiefe und dem Abstand zum Ufer auch die Fließgeräusche verändern. Im Vergleich mit Hörschwellen von Döbeln und Karpfen zeigte sich, dass sich mit der Position im Gewässer Lautstärke und Geräuschqualität der Fließgeräusche für den Fisch ändern. Auf diese Weise könnten Fische allgemeine Informationen über ihren Standpunkt erhalten, ohne sich ortsgebundene Signaturen merken zu müssen. Eine Reduktion der Lautstärke in Kombination mit einem schmaler werdenden Frequenzband, würde eine Bewegung hin zu flacherem Wasser oder sandigem Untergrund bedeuten. Besitzt der Fisch eine Gedächtniskarte mit seinem jeweils aktuellen Standpunkt, wäre dies eine Navigationshilfe.

4.4 Das Hörvermögen einheimischer Fischarten im Vergleich mit Schiffsgeräuschen der Bundeswasserstrasse Rhein

Die Fahrgeräusche von Frachtschiffen in der Bundeswasserstrasse Rhein breiten sich über und unter Wasser aus. Während es für den Schutz von Menschen gegen übermäßige Lärmbelastungen

festgelegte Grenzwerte und Messmethoden gibt (TA-Lärm, DIN 45682, DIN 45645 -1), wurden für Wasserorganismen (oder Fische) nur Grenzwerte für impulshaltige hydroakustische Lärmbelastungen gefunden (Hastings & Popper 2005). Schiffsgeräusche besitzen keinen so hohen SPL wie impulshaltige Signale wie z.B. Explosionen, Rammgeräusche oder Airguns (Lurton 2002). Sie sind aber in Bundeswasserstrassen kontinuierlich vorhanden. Es stellt sich nun die Frage, ob und wie die Schiffsgeräusche für Fische wahrnehmbar sind. Sollten Fische die Schiffsgeräusche wahrnehmen und wäre die Belastung hoch, stellt sich die Frage, ob die Belastung in den Habitaten überall gleich ist. Ein Ziel wäre die Identifikation von gering belasteten Gewässerabschnitten. Zur Beantwortung dieser Frage sollten die Fahrtgeräusche von Binnenfrachtschiffen auf dem Rhein analysiert und in Beziehung zu dem Hörvermögen der einheimischen Fischarten bzw. ihren Auswirkungen auf das Hörvermögen von Hörspezialisten beschrieben werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass Schiffe laut sind und vermutlich in erster Linie Hörspezialisten belasten. Im Versuch reagierten Rotaugen auf eine 5tägige Beschallung mit Schiffsgeräuschen mit einer deutlichen Hörschwellenverschiebung (Schwerhörigkeit). Im Rhein ist es dabei unerheblich, ob diese temporär oder permanent ist. Durch die hohe Frequenz der Schiffspassagen (< 200 pro Tag) im Untersuchungsgebiet (km 595 - km 796) ist eine Regeneration des Hörvermögens nicht möglich, da diese Tage bis Wochen benötigt (Smith & Kane & Popper 2004b). Ein Vergleich der Hörschwelle des Hörgeneralisten Bachforelle (*Salmo trutta f. fario*) mit den Schiffsgeräuschen zeigte eine deutlich geringere Geräuschbelastung durch Schiffsgeräusche. In diesem Zusammenhang wurde untersucht, welche Faktoren Schalldruck und Klang von Schiffsgeräuschen beeinflussen. Sollten sich einzelne maßgebliche Einflussfaktoren isolieren lassen, wäre dies ein Ansatzpunkt für ein mögliches Lärmmanagement.

In einem Versuch mit einem Nachen mit Außenbordmotor zeigte sich wie erwartet ein signifikanter Anstieg des SPL's mit steigender Fahrtgeschwindigkeit und abnehmender Entfernung. Der Schalldruckpegel (SPL) lag bei gleicher Fahrtgeschwindigkeit über Grund bei Fahrtrichtung gegen den Strom über dem SPL bei Fahrtrichtung mit dem Strom. Letzteres entspricht den Erwartungen,

da bei gleicher Fahrtgeschwindigkeit über Grund die relative Geschwindigkeit zum Wasser gegen den Strom höher ist als stromab. Geringere Geräuschentwicklung war mit zunehmender Entfernung und abnehmender Geschwindigkeit zu beobachten.

Anschließend wurde untersucht, ob diese Einflussfaktoren auch für die Geräuschbelastung in den Fischhabitaten durch viele unterschiedlichen Schiffstypen im Rhein maßgeblich sind. Deshalb wurden die Fahrtgeräusche von Frachtschiffen im Rhein aufgenommen. In diesem Datensatz konnte allerdings kein statistischer Zusammenhang zwischen SPL und den drei Faktoren Geschwindigkeit, Richtung und Entfernung nachgewiesen werden. Es ist anzunehmen, dass entweder andere Faktoren wie z.B. die Gewässermorphologie den Einfluss dieser drei Faktoren überdeckten oder die Ergebnisse aus dem Versuch mit dem Nachen nicht auf Frachtschiffe übertragbar sind. Auch mit einer „model selection“ (Johnson & Omland 2004) konnte kein Faktor mit einem hervorgehobenen Einfluss auf die Schiffsgeräusche isoliert werden. Das bestangepasste Modell beinhaltete alle gemessenen Faktoren.

Die Analyse der Geräuschqualität (Terzspektren) zeigte einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Verlauf des Spektrums und den Faktoren Gewässertiefe am Hydrophon (Faktor: Wassertiefe) und Gewässerstruktur (Prall-/Gleithang). In Abhängigkeit von der Wassertiefe entstehen unterschiedlich breite Frequenzbänder ("Fenster") im Spektrum, in denen der Schalldruck abgeschwächt wird. Ein visueller Vergleich mit der berechneten Cut-Off Frequenz der jeweiligen Wassertiefe, deutet darauf hin, dass diese Fenster durch den Cut-Off Effekt hervorgerufen werden. Dabei ist der Effekt bei 0,5 m Wassertiefe am Gleithang stärker ausgeprägt als am Prallhang. Bei 3,2 m Wassertiefe verhielt es sich umgekehrt. Dies kann daran liegen, dass sich am Gleithang große Wassertiefen weit weg vom Ufer direkt neben der Fahrrinne befinden. Die Schiffe fahren hier in direkter Nähe des Hydrophons. Der Schall hat kaum Strecke über Grund, die zu seiner Abschwächung führen könnte. Am Prallhang ist die Strecke meist größer. Vergleicht man das Spektrum von 0,5 m Wassertiefe mit dem Spektrum von 3,2 m Wassertiefe als Referenz für nicht abgeschwächte Schalldrücke, ist bei 200 Hz eine Abschwächung um bis zu 25 dB festzustellen. Dieser Effekt ist für die Messungen in 0,5 m und 1,0 m Wassertiefe am Gleithang deutlicher

ausgeprägt als am Prallhang. Vermutlich spielt auch hier die Strecke, die der Schall in flachem Wasser zurücklegen muss, eine Rolle für die Ausprägung des Effekts.

Die Veränderung des Klangs von Schiffsgeräuschen durch Flachwasserbereiche (Gleithang) betraf das Frequenzband am stärksten, das dem empfindlichsten Hörbereich der Fische entsprach. Die wassertiefenabhängige Geräuschbelastung von Hörgeneralisten und Hörspezialisten wurde deshalb durch den Vergleich der Hörschwelle von Bachforelle und Döbel mit den Terzspektren der Schiffsgeräusche untersucht. Die Bachforelle als Vertreter der Generalisten hörte die Schiffe nur in größeren Wassertiefen. Hörspezialisten wie Döbel hörten die Schiffe im Rhein in allen Wassertiefen an Prall und Gleithang. Die Geräuschbelastung lag dabei für die Bachforellen nur bei Wassertiefen von 3,2 m weit über der Hörschwelle (>20 dB). In den Wassertiefen $< 1,0$ m hörten sie die Schiffe im Mittel gar nicht (Gleithang) oder nur mit maximal 9,2 dB (Prallhang). Bei den Spezialisten waren durchweg höhere Werte zu beobachten (30 – 44 dB). Zonen mit einer Geräuschbelastung < 30 dB konnten für die Döbel nur am Gleithang in einer Wassertiefe von 0,5 m gemessen werden. Der hier gezeigte Vergleich von Hörschwelle und Geräusch bezieht sich auf das mittlere Terzspektren aller Schiffsaufnahmen über einen Zeitraum von 60 s. Das Geräusch einzelner Schiffe oder ein kürzerer Zeitraum der Schiffspassage kann durchaus lauter sein. Eine starke Geräuschbelastung der Hörspezialisten ist auf jeden Fall anzunehmen, eine Belastung für Hörgeneralisten ist nicht auszuschließen.

Andere Untersuchungen zeigten, dass bei Dorschen eine Geräuschbelastung von 28-34 dB über der empfindlichsten Hörschwellenfrequenz zu einer Verhaltensänderung führte (Mitson 1995). Sie wichen der Signalquelle (Schiffe) aus. Überträgt man das Verhalten der Dorsche auf die Hörspezialisten im Rhein, sollten die Schiffsgeräusche Verhaltensänderungen verursachen. Das ist besonders problematisch da die Tiere im Gegensatz zu Fischen im Meer den Schiffen nicht in die Tiefe oder zu den Seiten hin ausweichen können. Der Rhein ist nicht tief und nicht breit genug für Ausweichbewegungen. Eine Flucht in Längsrichtung ist ebenfalls nicht möglich, da die Fische dauerhaft nicht schnell genug sind und ihnen Schiffe entgegen kommen. Sie können sich der Geräuschbelastung

nicht entziehen. Versuche zeigen, dass eine Geräuschbelastung durch Schiffsgeräusche zu Stress bei Hörgeneralisten und Hörspezialisten führen kann. Dies wurde in Versuchen mit der Messung von Cortisolwerten als Stressindikator nachgewiesen (Wysocki, 2006). Weitere Versuche zeigten, dass eine massive Belastung mit lauten Geräuschen bei Tieren in der Regel zu einer Beeinträchtigung des Hörvermögens führt (Smith et al. 2004a). Eine Geräuschbelastung mit kontinuierlichem, weißem Rauschen führt bei Fischen schon ab 130 dB zu einer Hörschwellenverschiebung (Temporary Threshold Shift, Smith 2004a). Dabei entsprechen 130 dB einer Überschreitung der Hörschwelle der Goldfische um ca. 70 dB. Zusätzlich wurde in dieser Arbeit nachgewiesen, dass die Stärke der Hörschwellenverschiebung linear mit dem Schalldruck des weißen Rauschens korreliert. Im Vergleich zu vorhergehenden Versuchen mit Fischen (Smith, 2004a) bestehen Schiffsgeräusche jedoch nicht aus kontinuierlichem weißem Rauschen, sondern stellen eine periodische Geräuschbelastung, die sich mit der Entfernung verändert. Die Frage ist, ob auch diese kurzen, wiederholten Geräuschbelastungen zu einer Hörschwellenverschiebung führen. In einem Beschallungsexperiment wurde dieser Frage mit dem Hörspezialisten Rotaugen (*Rutilus rutilus*) nachgegangen. Die Geräuschbelastung lag im Experiment 20 dB unterhalb der tatsächlichen Belastung im Rhein und damit bei einem durchschnittlichen $L_{eq,T=1s}$ von 129,0 dB re 1 μ Pa. Unter diesen Bedingungen zeigte sich eine deutliche Hörschwellenverschiebung. Am stärksten war der empfindliche Hörbereich zwischen 300 Hz und 1000 Hz betroffen. Die Hörschwelle wurde hier um das 3-5fache unempfindlicher. Dieses experimentelle Ergebnis zeigt, dass Fische durch die Geräuschbelastung im Rhein wahrscheinlich in ihrer Hörfähigkeit beeinträchtigt werden. Ein Prognoseinstrument zur Auswirkung von Schiffslärm auf das Hörvermögen von Hörspezialisten könnte die Formel zur lärmabhängigen Hörschwellenverschiebung nach Smith (2004a) sein. Diese beschreibt mit einer Regression die zunehmende Hörschwellenverschlechterung mit zunehmender Geräuschbelastung. Es sollte dabei der durchschnittliche $L_{eq,T=1s}$ der Schiffe eingehen. Eine Vergleichsrechnung zeigt, dass sich die Regression auf die gemessenen Daten übertragen lässt. Nach Smith et al. (2004a) müsste die durchschnittliche Hörschwellenverschiebung 8,52 dB betragen ($L_{eq, T=1s}=129$ dB re 1 μ Pa). Beim Rotaugen war eine Hörschwellenverschiebung von 8,79 dB zu messen. Dies deutet

darauf hin, dass man die Methode von Smith als Prognosetool benutzen kann. Da im Experiment die Schalldrücke 20 dB unterhalb der tatsächlich gemessenen lagen, kann man nach Smith die tatsächliche TTS berechnen. Extrapoliert man die Ergebnisse nach Smith erreicht man für einen tatsächlichen Geräuschpegel von 145 dB re 1 μ Pa eine Hörschwellenverschiebung von 17,9 dB für Cypriniden entsprechend einer Geräuschbelastung in 3,2 m Wassertiefe am Prallhang im Rhein (Duisburg). Dies entspricht einer Abnahme der Hörfähigkeit um das 7,8fache (auf 13 %). Die bedeutet z.B. für die Kommunikation, dass Fische, die auf 20 m Entfernung kommunizieren könnten, sich bei einer Hörschwellenverschiebung um 17,9 dB nur noch auf 1,27 m Entfernung wahrnehmen. Gleiches gilt für die akustische Wahrnehmung von Räubern bzw. Beute. Benutzt man für eine allgemeine Aussage die Werte der standardisierten Geräuschbelastung für die drei Wassertiefen, verursacht die Hörschwellenverschiebung eine Abnahme des Hörvermögens auf 20,9 % in Habitaten mit Wassertiefen von 0,5 m, auf 16,8 % für Habitate mit 1,0 m Wassertiefe und auf 12,7 % für Habitate mit 3,2 m Wassertiefe. Diese Werte könnten den eigenartigen Verlauf der Barbenhörschwelle erklären. Diese hatte für Cypriniden eine ungewöhnlich unempfindliche Hörschwelle. Sie lag bei 200 Hz bei 84 dB und stieg mit zunehmender Frequenz an. Die Tiere stammten allerdings aus dem Rhein (Entnahme-Genehmigung der Fischereigenossenschaft lag vor). Geht man von einer mittleren Hörschwellenverschiebung von 17,9 dB aus, läge ihre Hörschwelle ursprünglich bei 66,1 dB (200 Hz) und würde bis 800 Hz auf 72,1 dB ansteigen. Dies läge im Hörschwellenbereich anderer gemessener Hörspezialisten.

In der Summe heißt dies, dass Fische in Bundeswasserstrassen wahrscheinlich gestresst und zumindest die Hörspezialisten schwerhörig würden. Dementsprechend ist die Geräuschbelastung der Hörspezialisten in Bundeswasserstrassen als hoch einzustufen. Die Untersuchungen zeigen außerdem, dass die Geräuschbelastung für die Tiere nicht überall gleich hoch ist. Tiefes Wasser an Prallhängen zeigte die stärkste Geräuschbelastung, flaches Wasser an Gleithängen die niedrigste.

5 Literatur

- Aiken R.B. (1985): Sound production by aquatic insects, *Biol. Rev.* 65: 163-211
- Akaike, H. (1974): A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control* **19** (6): 716–723
- Amoser S., L.E. Wysocki, F. Ladich (2004): Noise emission during the first powerboat race in an alpine lake and potential impact on fish communities. *J. Acoust. Soc. Am.* 116: 3789-3797
- Amoser S., F. Ladich (2005) : Are hearing sensitivities of freshwater fish adapted to the ambient noise of their habitats ? *J. Exp. Biol.* 208: 3533-3542
- Aronson L.R. (1971) : Further studies on orientation and jumping behaviour in the Gobiid fish *Bathygobius soporator*. *American museum novitates* 1486: 1-22
- Arveson R.T., D.J. Vendittis (2000): Radiated noise characteristics of a modern cargo ship. *J. Acoust. Soc. Am.* 107 (1): 118-129
- Blaxter J.H.S. (1980). Fish Hearing. In: 'Oceanus, Senses of the Sea', 23(3), 27-33. Woods Hole.
- Boussard, A. (1981): The reactions of roach (*Rutilus rutilus*) and rudd (*Scardinius erythrophthalmus*) to noises produced by high speed boating, *Proc. 2nd Brit. Freshw. Fish. Conf.*, 188–200.
- Braithwaite V.A., J.D. Armstrong, H.M. McAdam, F.A. Huntingford (1996): Can juvenile Atlantic Salmon use multiple cue system in spatial learning? *Animal Behaviour* 51: 1409-1415
- Braun C.B., T. Grande: Evolution of Peripheral Mechanisms for Enhancement of Sound Reception. In: *Fish Bioacoustics.*, edited by J.F. Webb, A.N. Popper, R.R. Fay (Springer-Verlag): 99-144
- Brown C. (2003): Habitat-predator association and avoidance in rainbowfish (*Melanotaenia* spp.). *Ecology of freshwater fishes* 12:118-126
- Campo P., M. Subramaniam, D. Henderson (1991): The effect of "conditioning" exposures on hearing loss from traumatic exposure. *Hear.Res.* 55, 195-200.

- Codarin A., L.E. Wysocki, F. Ladich, M. Picciulin (2009): Effects of ambient and boat noise on hearing and communication in three fish species living in a marine protected area (Miramare, Italy). *Marine Pollution Bulletin* 58 (12): 1880-1887
- Cybulski B. (1977): Probable origin of Measured supertanker radiated noise spectra. 15C-1 – 15C-8. In: *Oceans '77 Conference Record*, Inst. Electr. Electron. Eng. , New York Var. pag.
- DIN 45 641: Mittelung von Schallpegeln
- DIN EN ISO 3743-1: Akustik - Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen;
- Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 für kleine, transportable Quellen in Hallfeldern - Teil 1: Vergleichsverfahren in Prüfräumen mit schallharten Wänden (ISO 3743-1:1994); Deutsche Fassung EN ISO 3743-1: 1995
- DIN 45645-1: Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen - Teil 1: Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft
- DIN 45882: Schallimmissionspläne
- Donovan J.E. (1970): Triboelectric noise Generation in Some Cables Commonly Used with Underwater Electroacoustic transducers. *J. Acoust. Soc. Am.* 48: 714
- Embleton T.F.W. (1996): Tutorial on sound propagation outdoors. *J. Acoust. Soc. Am.* 100 (1): 31-48
- Eros T., Z. Botta-Dukát, G. Grossman (2003): Assemblage structure and habitat use of fishes in a Central European submontane stream: a patch-based approach, *Ecology of Freshwater Fish* 12 (2): 141-150
- Fay R.R., A.N. Popper, J.F. Webb (2008): Introduction to Fish Bioacoustics, In: *Fish Bioacoustics.*, edited by J.F. Webb, A.N. Popper, R.R. Fay (Springer-Verlag): 1-16
- Ferguson B. G., J.L. Cleary (2001): In situ source level and source position estimates of biological transient signals produced by snapping shrimp in an underwater environment, *J. Acoust. Soc. Am.* 109 (6):3031-3037
- Fiedler K (1991): Fische. In: *Lehrbuch der speziellen Zoologie*, Band 2/2, A. Kaestner, Gustav Fischer Verlag Jena
- Gerstmeier R., T. Romig (2003): *Die Süßwasserfische Europas.* Franckh-Kosmos Verlag

- Gloza I. (2010): Experimental Investigation of Underwater Noise Produced by Ships by Means of Sound Intensity Method. *Acta Physica polonica A* 118: 58-61
- Green J.M. (1971): High tide movements and homing behaviour of the tidepool sculpin *Oligocottus maculosus*. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 28: 383-389
- Haddle G.P., E.J. Skudrzyk (1969): The Physics of flow noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 46: 130-156
- Hawkins A.D. (1993): Underwater Sound and fish behaviour. In: *Behaviour of Teleost Fishes*. T.J. Pitcher (ed.), Fish and fisheries series 7, Chapman & Hall: 129-169
- Hawkins A.D., A.A. Myrberg (1983): Hearing and sound Communication under water. In: *Bioacoustics, a Comparative Approach*, London: Academic Press: 347-405
- Higgs DM (2005): Auditory cues as ecological signals for marine fishes. *Mar Ecol Prog Ser* 287: 278-281
- Huntingford F.A., V.A Braithwaite, J.D. Armstrong, D. Aird, P. Joiner (1998): Homing in juvenile salmon in response to imposed an spontaneous displacement: experiments ia an artificial stream. *Journal of Fish Biology* 53: 847-852
- Illies J. (1961) : Versuch einer allgemeinen biozönotischen Gliederung der Fließgewässer. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* 46: 205-213
- Johnson M.W. et al. (1947): The role of snapping shrimp (*Crangon* and *Synalpheus*) in the production of underwater noise in the sea, *The Biological bulletin*
- Johnson J.B., K.S. Omland (2004): Model selection in ecology and evolution. *Trend in Ecology and Evolution*, Vol. 19 (2): 101 - 108
- Kenyon T.N., F. Ladich, H.Y.Yan (1998): A comparative study of hearing ability in fishes: the auditory brainstem response approach. *J. Comp. Physiol. A* 182: 307-318
- Ketten, D.R. (1994): Functional Analyses of Whale Ears: Adaptations for Underwater Hearing, *I.E.E.E Proceedings in Underwater Acoustics*, Vol. I: 264 - 270.
- Klee O. (1991): *Angewandte Hydrobiologie*. Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York

- Kolm N., E.A. Hoffman, J. Olsson, A. Berglund, A.G. Jones (2005): Group stability and homing behavior but no kin group structures in a coral reef fish. *Behavioral Ecology* 16: 521-527
- Kuchling H. (1994): Taschenbuch der Physik. Fachbuchverlag Leipzig - Köln
- Ladich F., and Popper, A. N. (2004). Parallel evolution in fish hearing organs. In: *Evolution of the Vertebrate Auditory System*, edited by G. A. Manley, A. N. Popper, and R. R. Fay (Springer-Verlag, New York), 98-127.
- Larom D. et al. (1997): Meteorology and elephant infrasound at Etosha National Park, Namibia, *J. Acoust. Soc. Am.* 101 (3): 1710-1717
- Leis JM, Carson-Ewart BM, Hay AC, Cato DH (2003) Coralreef sounds enable nocturnal navigation by some reef-fish larvae in some places and at some times. *J Fish Biol* 63: 724-737
- Lu Z., S. Tomchik (2002) : Effects of red-tide toxine on fish hearing. *J. Comp. Physiol. A* 188 (10): 807-813
- Lugli et al. (2003): Acoustic communication in two freshwater gobies: The relationship between ambient noise, hearing thresholds and sound spectrum. *J. Comp. Physiol. A* 189:309-320
- Lugli M, M. L. Fine (2003): Acoustic communication in two freshwater gobies: Ambient noise and sound propagation in shallow streams. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 114, No. 1: 512-521
- Lurton Xavier (2002): An introduction to underwater Acoustics, Springer-Praxis Books in Geophysical Sciences, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- Mann D.A. et al (2001): Ultrasound detection by clupeiform fishes. *J. Acoust. Soc. Am.* Volume 109, Issue 6, pp. 3048-3054 (June 2001)
- Mann D.A., B.M. Casper, K. S. Boyle, T. C. Tricas (2007): On the attraction of larval fishes to reef sounds. *Marine Ecology Progress Series* 338: 307-310
- Matthews K.R. (1990a): A telemetry study of home ranges and homing of copper and quillback rockfishes on shallow rocky reef. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 68: 2243-2250
- Matthews K.R. (1990b): An experimental study of the habitat preferences and movement patterns of copper, quillback, and

- brown rockfishes (*Sebastes* spp.). *Environmental Biology of Fishes* 29: 161-178
- Mazeroll A.I., W.L. Montgomery (1998): Daily migration of a coral reef fish in the Red Sea (Gulf of Aqaba, Israel): Initiation and orientation. *Copeia* 4: 893-905
- McCauley, R.D., Fewtrell, J., Popper, A.N., (2003): High intensity anthropogenic sound damages fish ears. *J. Acoust. Soc. Am.* 113(1):638-642
- McGrath J.R., O.M. Griffin, R.A. Finger (1977): Infrasonic Flow-noise measurements Using an H-J8 Omnidirectional Cylindrical Hydrophone . *J. Acoust. Soc. Am.* 61: 390
- Melnick, W. (1976): Human asymptotic threshold shift. In: *Effects of Noise on Hearing* (ed. D. Henderson, R. P. Hamernik, D. S. Dosanjh and J. H. Mills), New York: Raven Press: 277-289.
- Mitson (1995): Underwater noise of research vessels, ICES Report
- Morton E.S. (1975): Ecological sources of selection on avian sounds. *American Naturalist* 109 (No. 965): 17-34
- Myrberg A.A. (2001): The acoustical biology of elasmobranchs. *Environmental Biology of Fishes* 60: 31-45
- Nystuen J.A., H. Medwin (1995): Underwater sound produced by rainfall: Secondary splashes of aerosols. *J. Acoust. Soc. Am.* 97 (3): 1606-1613
- Odling-Smee L., D. Simpson, V.A. Braithwaite (2006): Fish cognition and behavior. In: *Fish and Aquatic Resources Series 11*, ed. C. Brown, K. Laland, J. Krause, Blackwell Publishing
- Okasanen, Jari (2011): Multivariate Analysis of Ecological Communities in R: vegan tutorial. Online-Tutorial.
- Padgham M. (2004): reverberation and frequency attenuation in forests – implications for acoustic communication in animals. *JASA* 115 Issue 1: 402 - 410
- Parker G.H. (1903): The sense of hearing in fish. *Am Nat* 37: 185-203
- Payne K.B., W.R. Langbauer, E.M. Thomas (1986): Infrasonic calls of the elephant (*Elephas maximus*), *Behavioral Ecology and Sociobiology* 18 (4): 297-301
- Penzlin (1996): *Tierphysiologie*. Gustav Fischer Verlag

- Popper A.N., R.R. Fay(1993): Sound detection and Processing by Fish: Critical Review and Major Research Questions. *Brain Behav. Evol.* 41: 14-38
- Popper A.N. et al (2004): Response of clupeid fish to ultrasound: a review. *ICES Journal of Marine Science*, 61: 1057-1061
- Popper A.N., C.R. Schilt (2008): Hearing and Acoustic Behaviour: Basic and Applied Considerations. In: *Fish Bioacoustics.*, (ed. J.F. Webb, A.N. Popper, R.R. Fay), Springer-Verlag: 17-48
- Pugliano, F. A., E. Pribitikin, J.C. Saunders (1993): Growth of evoked potential amplitude in neonatal chicks exposed to intense sound. *Act. Oto-Laryngol.* 113, 18-25.
- Qinn T.P., A.H. Dittmann (1990): Pacific salmon migrations and homing: mechanisms and adaptive significance. *Trends in Ecology and Evolution* 5: 174-177
- Rayleigh, Lord: The Theory of sound Vol. II, p. 413, Dover Publications, Inc. New York
- Richardson W.J., B. Würsig, C.R. Greene Jr. (1990): Reactions of bowhead whales, *Balaena mysticetus*, to drilling and dredging noise in the Canadian Beaufort Sea. *Marine Environmental Research* 29 (2): 135-160
- Richardson W.J., C.R. Green, C.I. Malme, D.H. Thomson (1995) : Marine Mammals and noise. Academic Press
- Römer H. (2001): Ecological constraints for Sound Communication: From Grasshopper to Elephants. In: *Ecology ogf sensing*, F.G. Barth, A. Schmid (ed).
- Ryals, B. M., R.J. Dooling, E. Westbrook, M.L. Dent, A. MacKenzie, O.N. Larsen (1999): Avian species differences in susceptibility to noise exposure. *Hear. Res.* 131, 71-88.
- Ryals, B. M., E.W. Rubel (1988): Hair cell regeneration after acoustic trauma in adult *Coturnix* quail. *Science* 240, 1774-1776.
- Sand O., H. Bleckmann (2008): Orientation to Auditory and Lateral Line Stimuli. In: *Fish Bioacoustics.*, edited by J.F. Webb, A.N. Popper, R.R. Fay (Springer-Verlag): 183-232
- Schelart A.M., A.N. Popper (1992): Functional Aspects of the Evolution of the auditory System of Actinopterygian fish. In: *The Evolutionary Biology of Hearing.* (ed. D.B. Webster, R.R. Fay, A.N. Popper) Springer verlag: 295-322

- Schönborn W. (1992): Fließgewässerbiologie. Gustav Fischer Verlag
- Scholik A.R., H.Y. Yan (2002b): Effects of boat engine noise on the auditory sensitivity of the fathead minnow, *Pimephalespromelas*. Environmental Biology of fishes 63: 203 – 209
- Scholik A.R., H.Y. Yan (2002a): The effects of noise on the auditory sensitivity of the bluegill sunfish, *Lepomis macrochirus*. Comparative Biochemistry and Physiology A 133: 43 - 52
- Scholik A.R., H.Y. Yan (2001): Effects of underwater noise on auditory sensitivity of a cyprinid fish. Hearing research 152: 17-24
- Schwörbel J. (1993): Einführung in die Limnologie. UTB für Wissenschaft, Gustav Fischer Verlag
- Silman, S., C.A. Silverman (1991):: Auditory Diagnosis: Principles and Applications. Academic, San Diego
- Simpson S.D. et al.(2005): „Homeward sound“, Science 308: 221
- Simpson S.D., M.G. Meekan, A. Jeffs, J.C. Montgomery, R.D. McCauley (2008): Settlement-stage coral reef fish prefer the higher-frequency invertebrate-generated audible component of reef noise. Animal Behaviour 75, Issue 6: 1861-1868
- Slabbekoorn H. (2004): habitat-dependent ambient noise: Consistent spectral profiles in two African forest types. J. Acoust. Soc. Am. 116 (6): 3727-3733
- Slotte A., K. Hansen, J. Dalen, E. Ona (2004): Acoustic mapping of pelagic fish distribution and abundance in relation to a seismic shooting area off the Norwegian west coast. Fisheries research Vol. 67 (2): 143-150
- Smith M.E., A.S. Kane, A.N. Popper (2004a): Acoustical stress and hearing sensitivity in fishes: does the linear threshold shift hypothesis hold water? J. Exp. Boil. 207: 3591-3602
- Smith M.E., A.S.Kane, A.N. Popper (2004b): Noise-induced Stress response and hearing loss in goldfish (*Carassius auratus*). J. Exp. Biol. 207: 427-435
- TA-Lärm: Sechste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm)
- Tavolga W.N. (1976). Acoustic obstacle detection in the sea catfish (*Arius felis*). In: Sound Reception in Fish: Symposium Proceedings

- (ed. A. Schuijf and A. D. Hawkins), Amsterdam: Elsevier, p: 185-204
- Teyke, T. (1989): Learning and remembering the environment in the blind cavefish *Anoptichthys jordani*. *J. Comp. Physiol. A* 164 (5): 655-662
- Thienemann A. (1925): Die Binnengewässer Mitteleuropas. In: Die Binnengewässer 1. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- Tolimeri N., A. Jeffs, J.C. Montgomery (2000): Ambient sound as a cue for navigation by the pelagic larvae of reef fish. *Marine Ecology Progress Series* 207: 219-224
- Tolimeri N., O. Haine, R.D. McCauley, A. Jeffs, J.C. Montgomery (2004): Directional orientation of pomacentrid larvae to ambient reef sound. *Coral reefs* 23: 184-191
- Tonolla D., M.S. Lorang, K. Heutschi, K. Tockner (2009): A flume experiment to examine underwater sound generation by flowing water. *Aquat. Sci.* 71: 449-462
- Tsukamoto K., J. Aoyama, M.J. Miller (2003): Migration, speciation, and the evolution of diadromy in anguillid eels. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 59: 1989-1998
- Urick R.J. (1983): Principles of underwater sound. McGraw-Hill
- Vasconcelos R.O., M.C.P. Amorim, F. Ladich (2007): Effects of ship noise on the detectability of communication signals in the Lusitanian toadfish. *J. Exp. Biol.* 210: 2104-2112
- Von Frisch K. (1923): Ein Zwergwels der kommt, wenn man ihn pfeift. *Biol. Zentralbl. Leipzig* 43: 439-446
- Warburton K. (1990): The use of local landmarks by foraging goldfish. *Animal Behaviour* 40: 500-505
- Warburton K. (2003): Learning of foraging skills by fish. *Fish and Fisheries* 4: 203-215
- Weber E.H. (1820): De Aure et Auditu Hominis et Animalium. Pars I. De Aure Animalium Aquatilium. Leipzig : Gerhard Fleischer
- Wysocki L.E., F. Ladich (2005): Hearing in Fish under noisy conditions. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology* 6 (1): 28-36

- Wysocki L.E., J.P. Dittami, F. Ladich (2006): Ship noise and cortisol secretion in European freshwater fishes. *Biological Conservation* 128: 501-508
- Wysocki L.E., S. Amoser, F. Ladich (2007): Diversity in Ambient noise in European freshwater habitats: Noise levels, spectral profiles, and impact on fishes. *J. Acoust. Soc. Am.* 121 (5): 2559-2566
- Yang S. Z. Li, X. Wang (2002): Ship recognition via its radiated sound: The fractal based approaches. *J. Acoust. Soc. Am.* 112 (1): 172-177
- Young R.W., C.N. Miller (1960): Noise data for two outboard motors in air and water, *Noise control* 6(1): 22-25
- Yao Yuan, Y. Lin (2004): Acoustic adaption hypothesis in macro- and micro environments: An analysis of frog calls (A). *J. Acoust. Soc. Am.* 116 (4): 2639-2639
- Zauner G., J. Eberstaler (1999): Klassifizierungsschema der österreichischen Flussfischfauna in Bezug auf ihre Lebensraumansprüche. *Österr. Fischerrei* 52: 198-205

6 Anhang

6.1 Darstellung Akustische Messungen

Fulda: Kühnstein

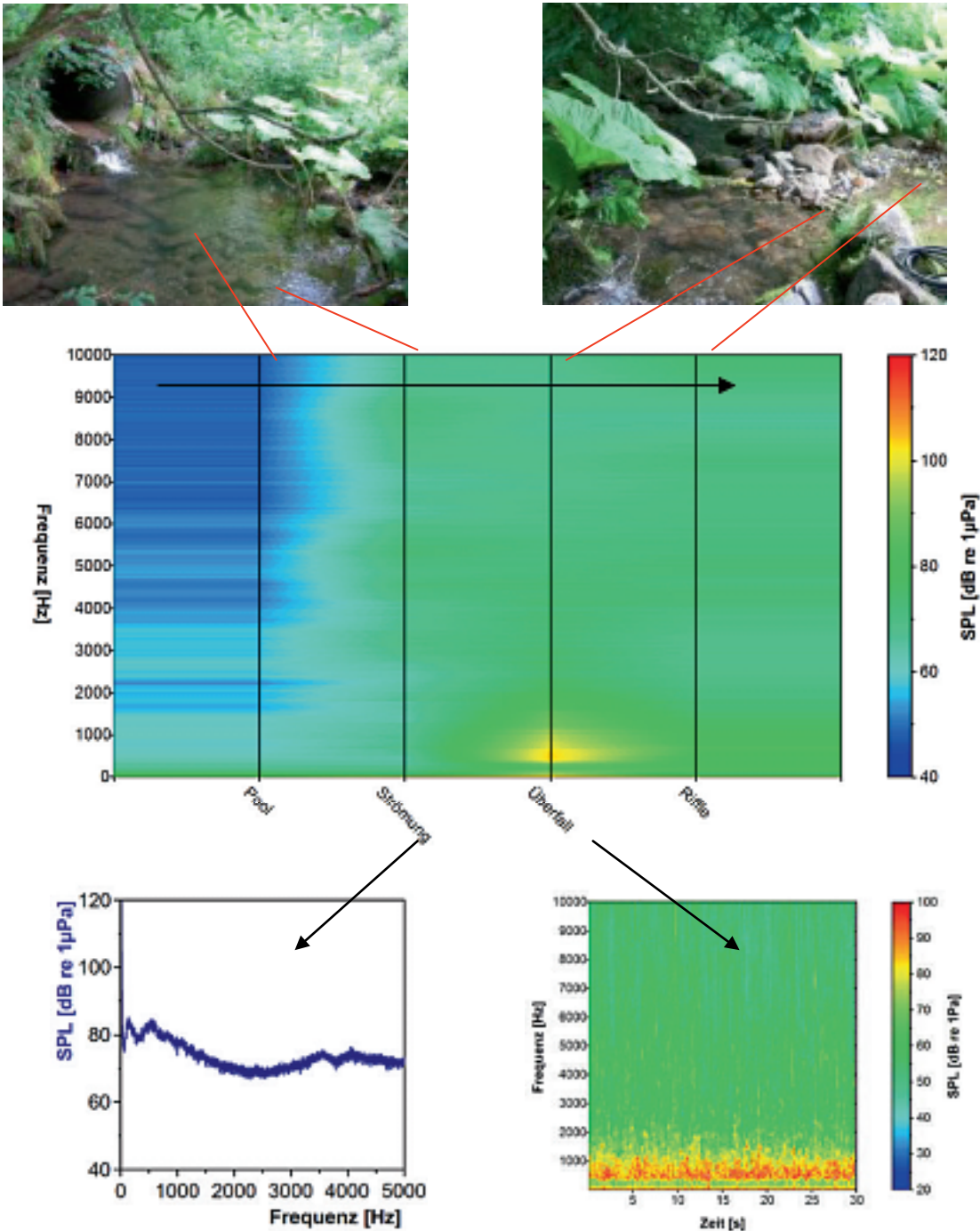


Abb. 6.1: Kühnstein - oben, linkes: Pool oberhalb der Riffles; oben, rechts: Überfall und Riffle; Mitte: Powerspektren der einzelnen Messstellen in Isopletendarstellung; unten links: Powerspektrum der Strömungsmessung; unten, rechts: Spektralanalyse der Sohlenschwelle.

Fulda: Gersfeld

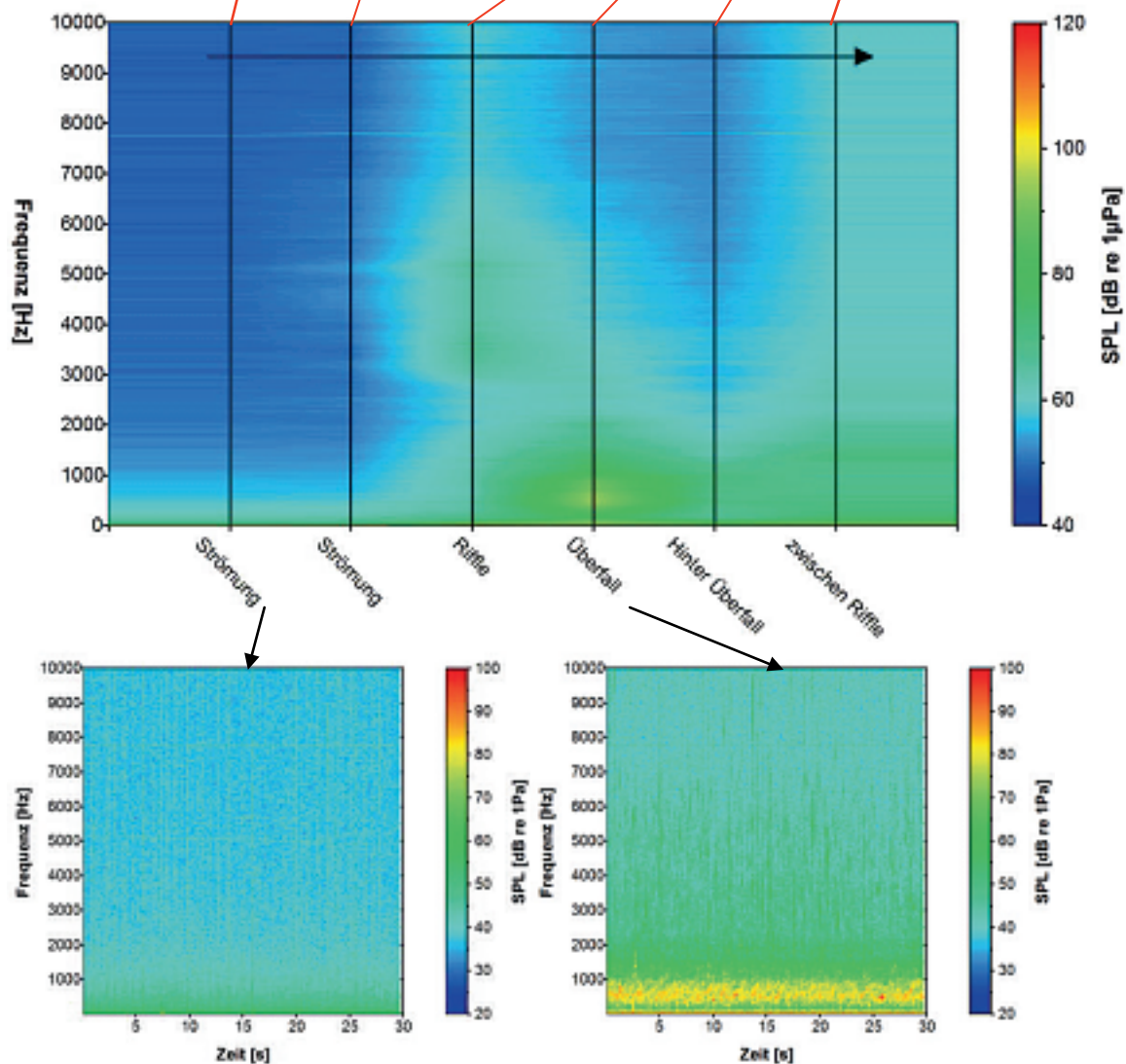


Abb. 6.2: Gersfeld - oben, links: Pool oberhalb der Riffles; oben, rechts: Riffle u. Überfall; Mitte: Amplitudenspektren der einzelnen Messstellen in Isopletendarstellung; unten links: zeitlich aufgelöste Spektralanalyse (Sonogramm) der Fließgeräusche am Messpunkt „Strömung“; unten, rechts: zeitlich aufgelöste Spektralanalyse der Fließgeräusche am Messpunkt „Überfall“.

Fulda: Lütter

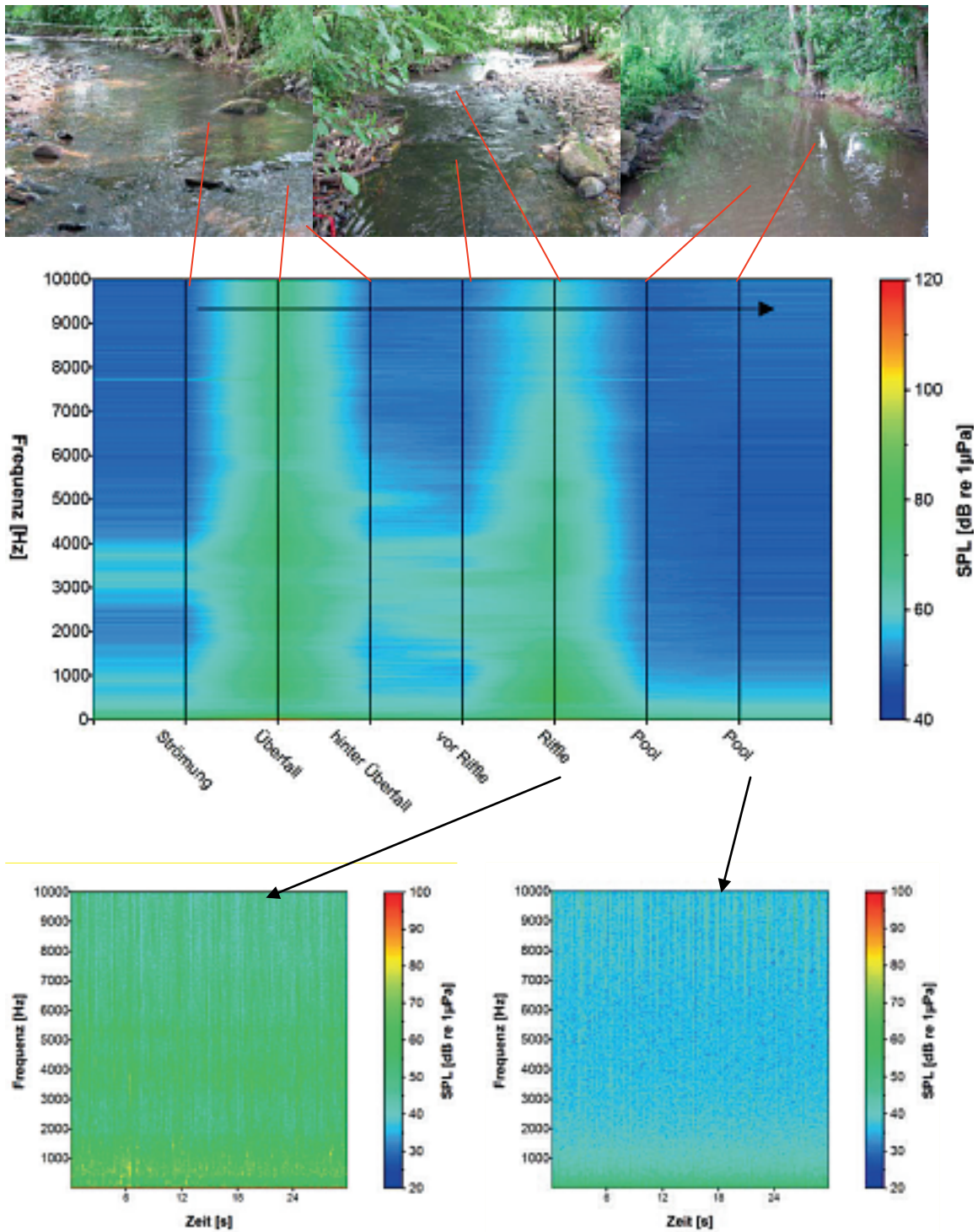


Abb. 6.3: Lütter - oben, links: 1. Überfall; oben, Mitte: Blick vom 1. zum 2. Überfall; oben, rechts: großer Pool; Mitte: Powerspektren der einzelnen Messstellen in Isoplethendarstellung; unten links: Spektralanalyse vom 2. Überfall; unten, rechts: Spektralanalyse vom Pool.

Fulda: Löschenrod

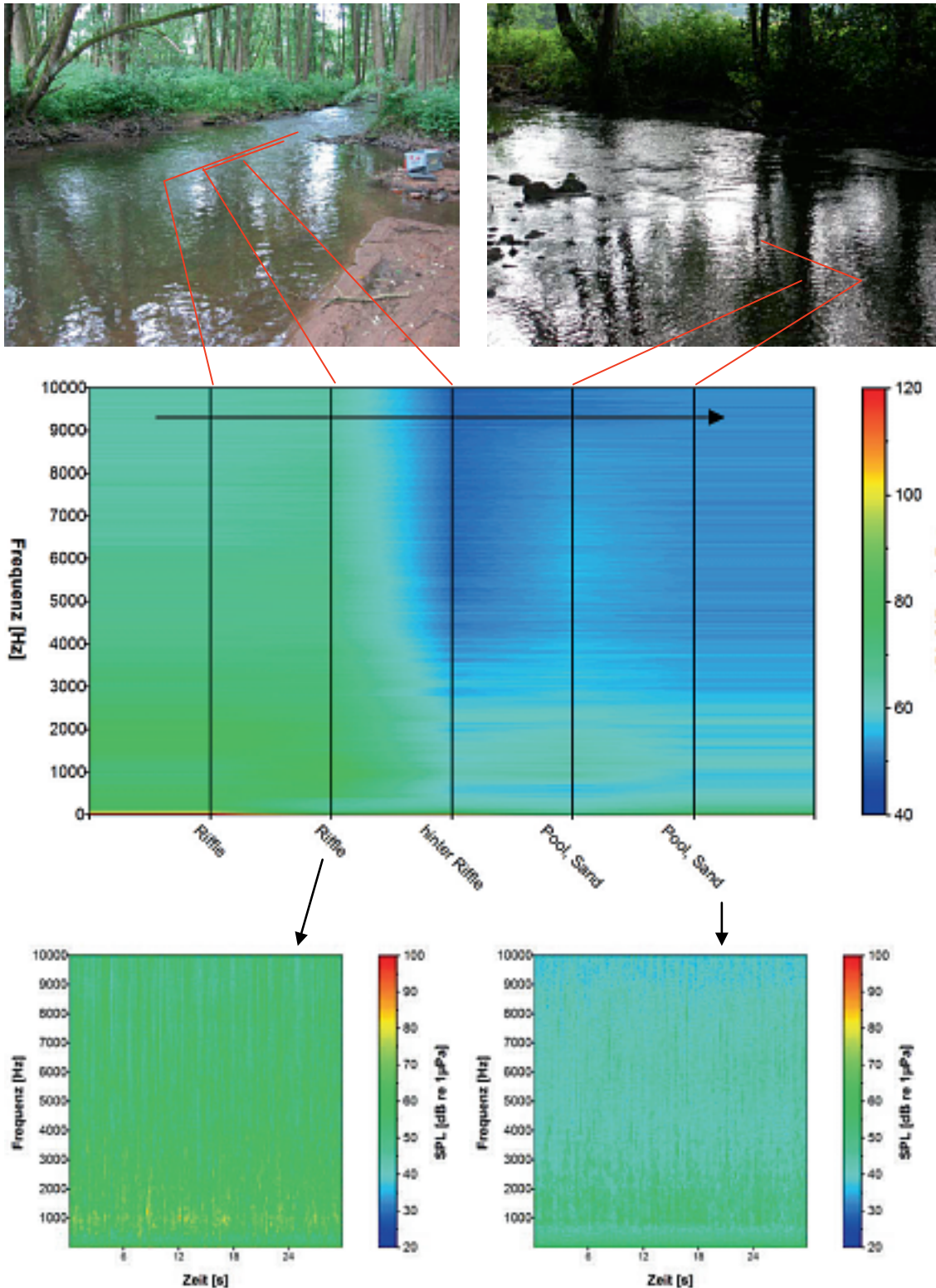


Abb. 6.4: Löschenrod - oben, linkes: Pool u. Schnelle im Hintergrund; oben, rechts: Ende vom Pool; Mitte: Powerspektren der einzelnen Messstellen in Isopletendarstellung; unten links: Spektralanalyse von der Schnelle (Riffle2); unten, rechts: Spektralanalyse vom Pool.

Fulda: Üllershausen

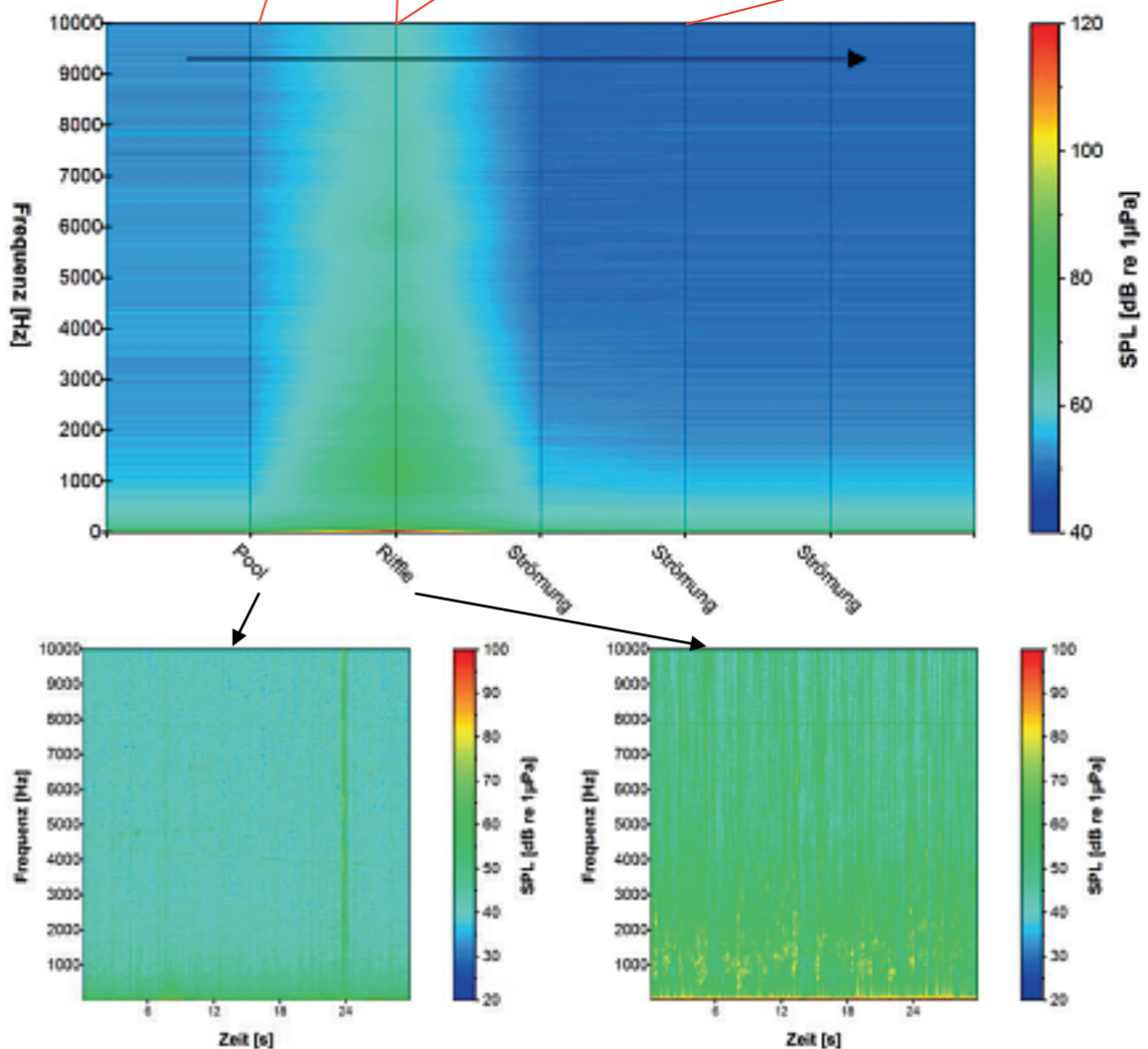
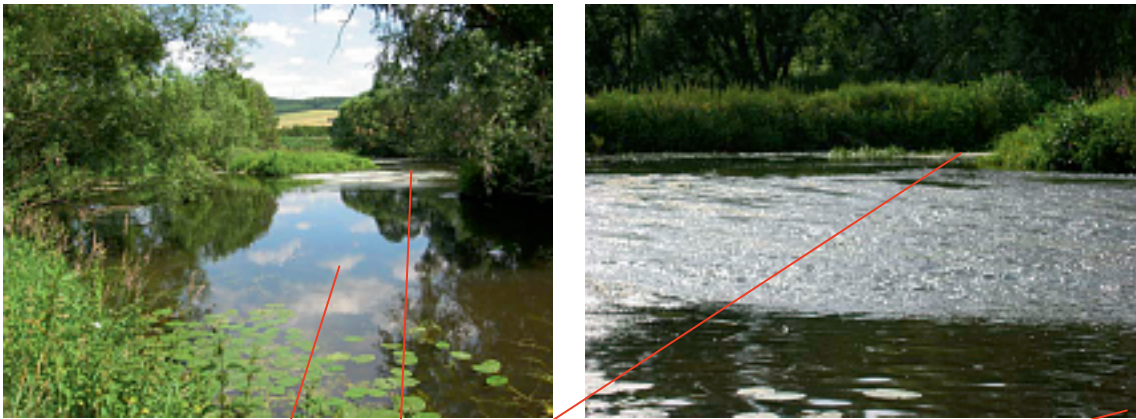


Abb. 6.5: Üllershausen - oben, links: Pool u. Riffle im Hintergrund; oben, rechts: Ende vom Riffle u. Poolanfang; Mitte: Powerspektren der einzelnen Messstellen in Isopletendarstellung; unten links: Spektralanalyse vom 1. Pool; unten, rechts: Spektralanalyse vom Riffle.

Fulda: Kerspenhausen

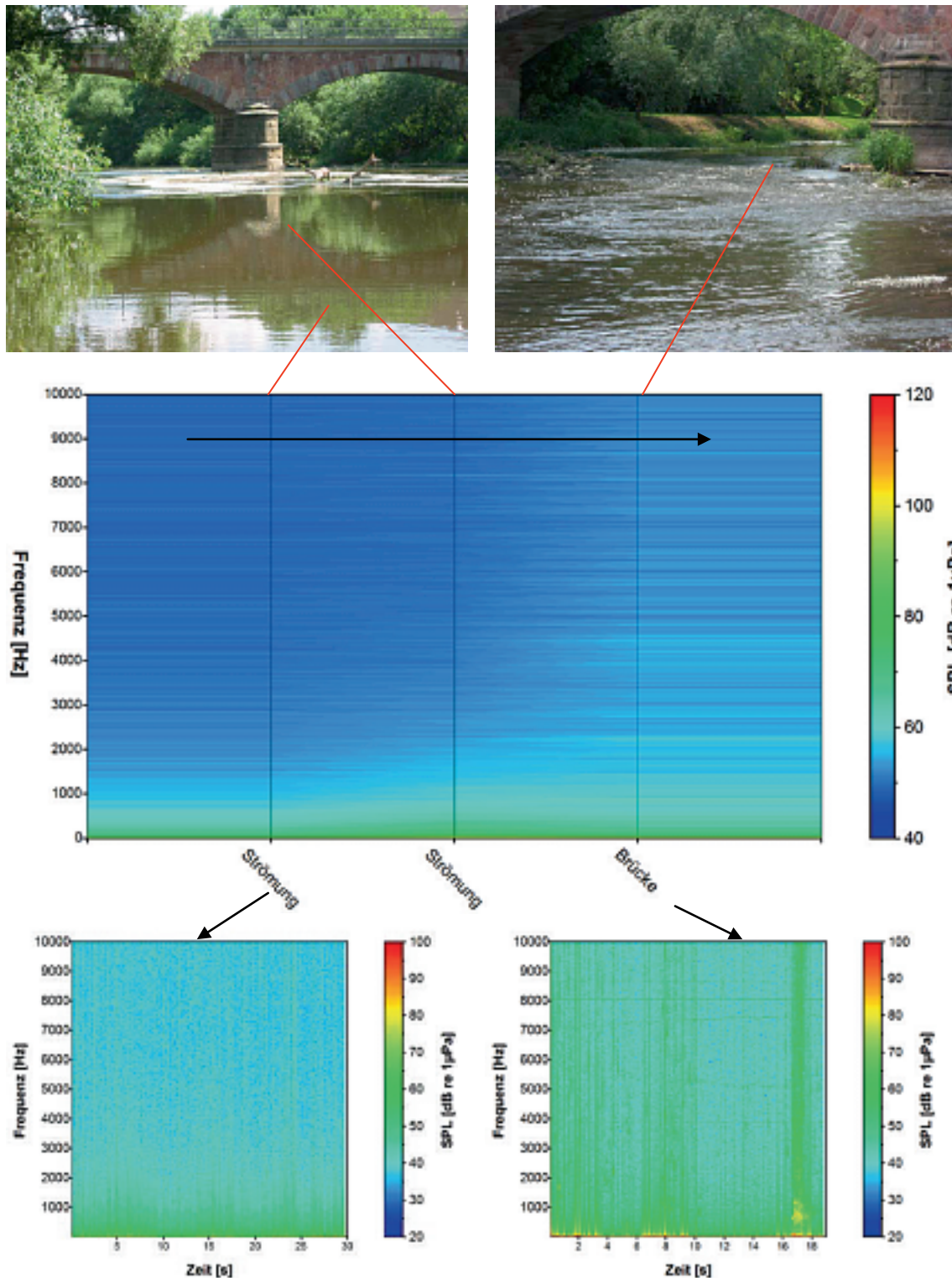


Abb. 6.6: Kerspenhausen - oben links: Pool u. Brücke im Hintergrund; oben rechts: Ende vom Pool; Mitte: Powerspektren der einzelnen Messstellen in Isopletendarstellung; unten links: Spektralanalyse von Messung in der Strömung; unten rechts: Spektralanalyse von der Brücke.

Fulda: Mecklar

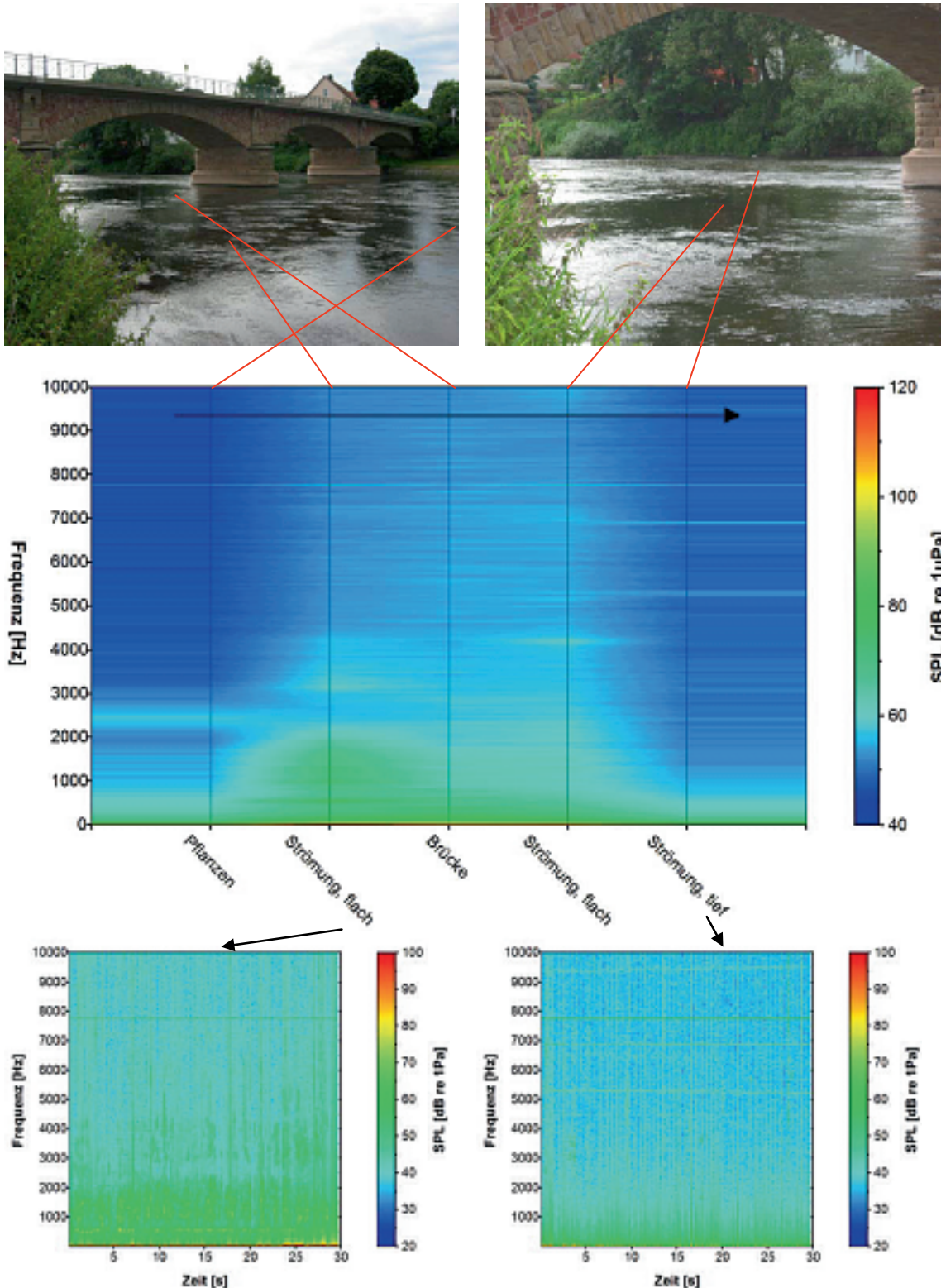


Abb. 6.7: Mecklar - oben, links: Flussabschnitt vor der Brücke; oben, rechts: Flussabschnitt hinter der Brücke; Mitte: Powerspektren der einzelnen Messstellen in Isoplethendarstellung; unten links: Spektralanalyse der Strömung (Flachwasser, Tiefe < 1m); unten, rechts: Spektralanalyse der Strömung (tief) hinter der Brücke (Tiefe > 1m).

Fulda: Braach

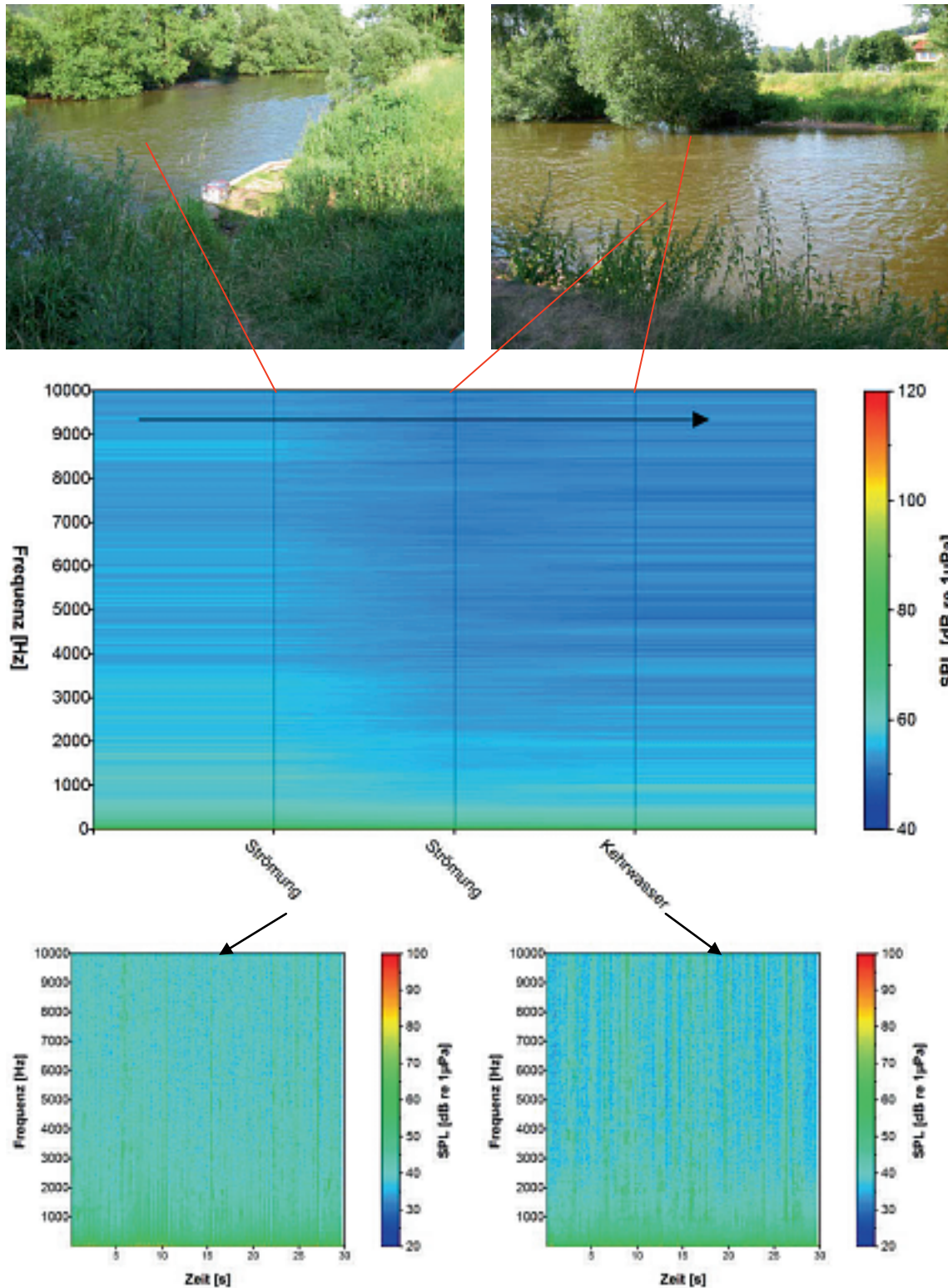


Abb. 6.8: Braach - oben, links: Flussabschnitt oberhalb des eigenen Standpunktes; oben, rechts: Ende vom Pool; Mitte: Powerspektren der einzelnen Messstellen in Isopletendarstellung; unten links: Spektralanalyse von der Strömung; unten, rechts: Spektralanalyse vom Kehrwasser.

Fulda: Beiseförth

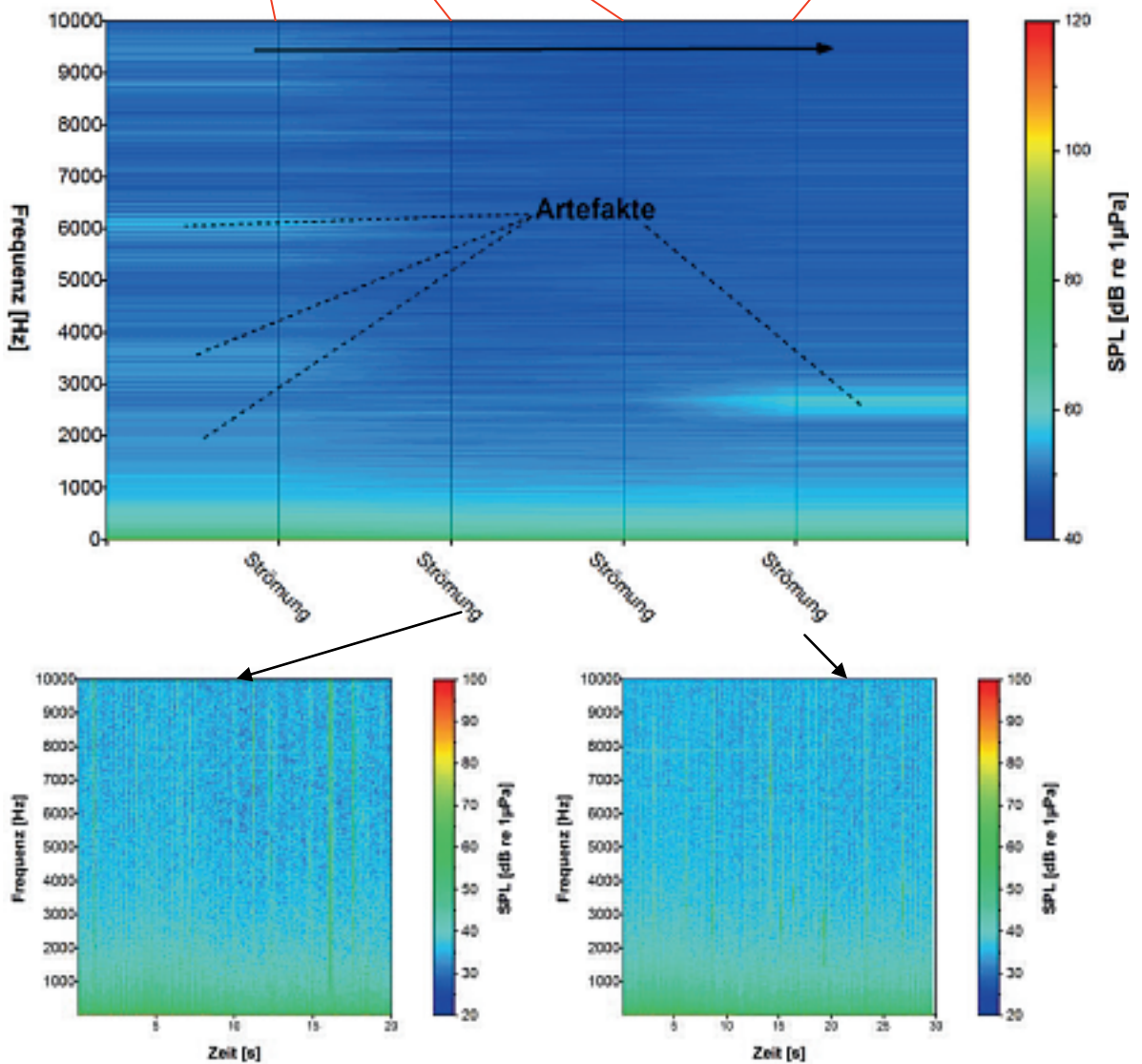


Abb. 6.9: Beiseförth - oben, links: Flussabschnitt (Probennamestelle); oben, rechts: Ufer-befestigung; Mitte: Powerspektren der einzelnen Messstellen in Isopletendarstellung; unten links: Spektralanalyse der zweiten Störungsmessung; unten, rechts: Spektralanalyse der vierten Störungsmessung .

Fulda: Büchenwerra

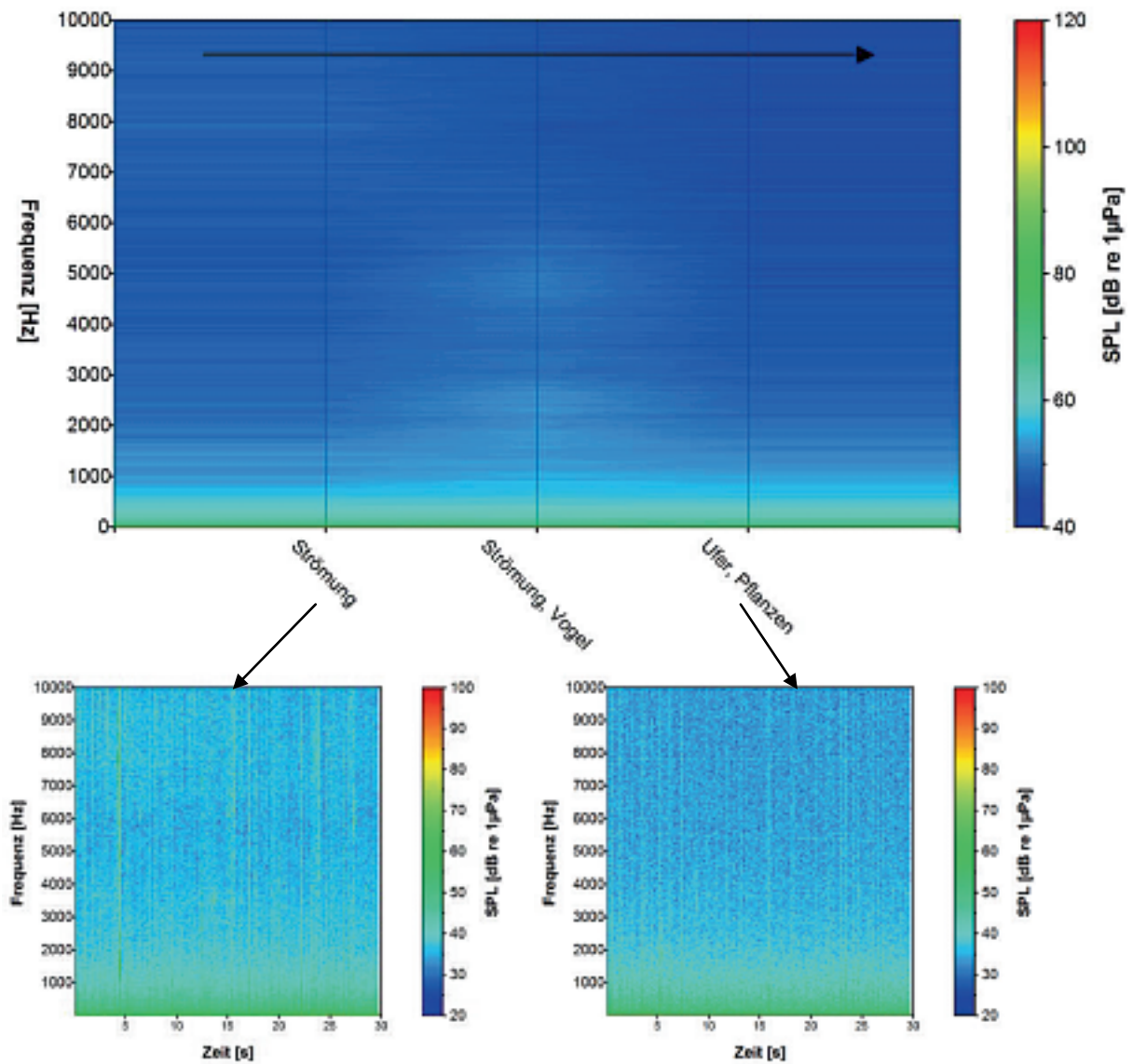


Abb. 6.10: Büchenwerra - Flussmorphologie entspricht der in Beisenförth; Oben: Powerspektren der einzelner Messstellen in Isoplethendarstellung; unten links: Spektralanalyse der Messung in der Strömung; unten, rechts: Spektralanalyse der Messung im Uferbereich.

Fulda: Speele

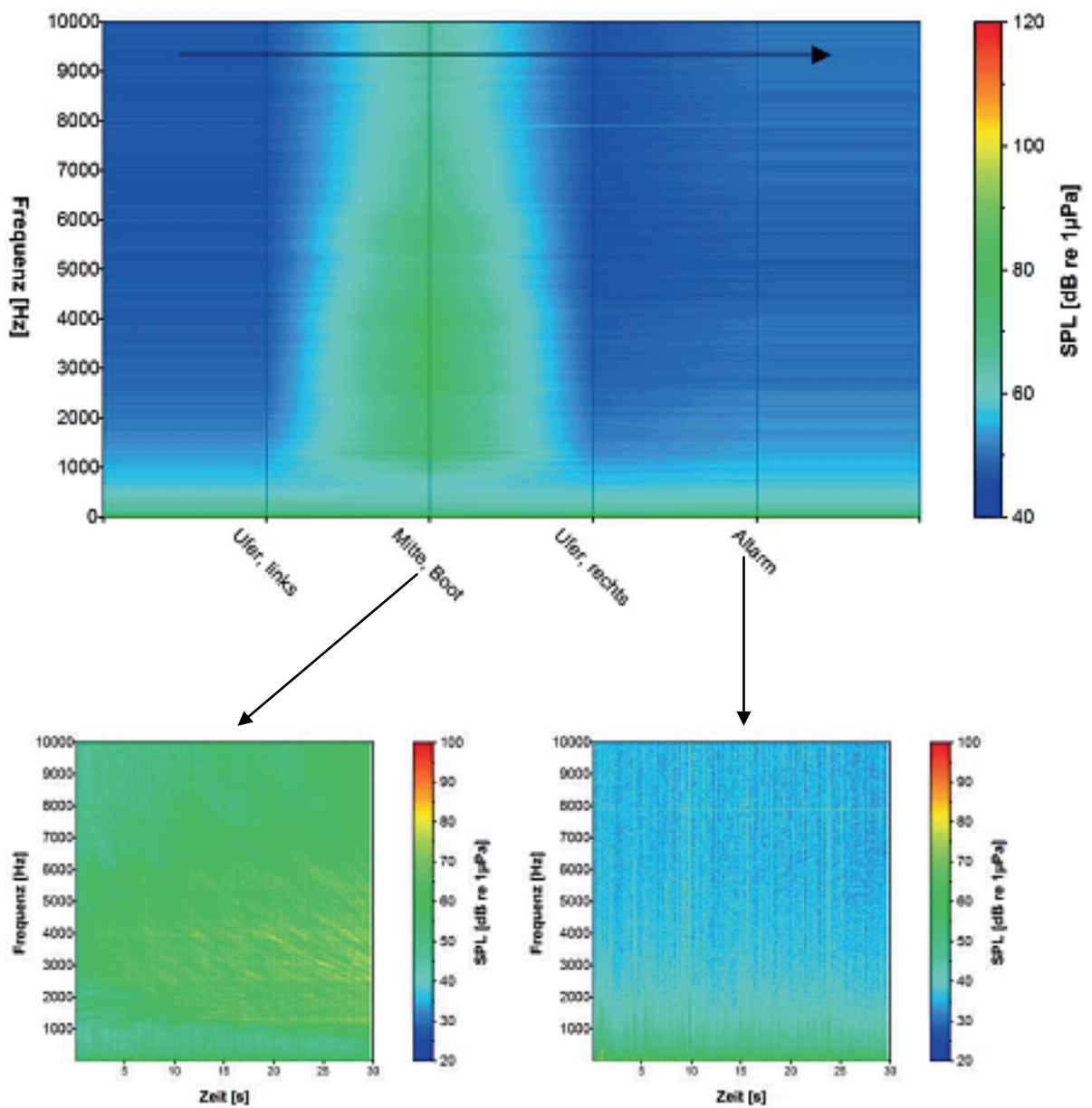


Abb. 6.11: Speele - Flussmorphologie entspricht der in Beisenförfth; Oben: Powerspektren der einzelner Messstellen in Isopletendarstellung; unten links: Spektralanalyse der Messung eines mit der Strömung aufkommenden Sportbootes. Unten, rechts: Spektralanalyse im Alarm

Fulda: 2 km unterhalb von Speele

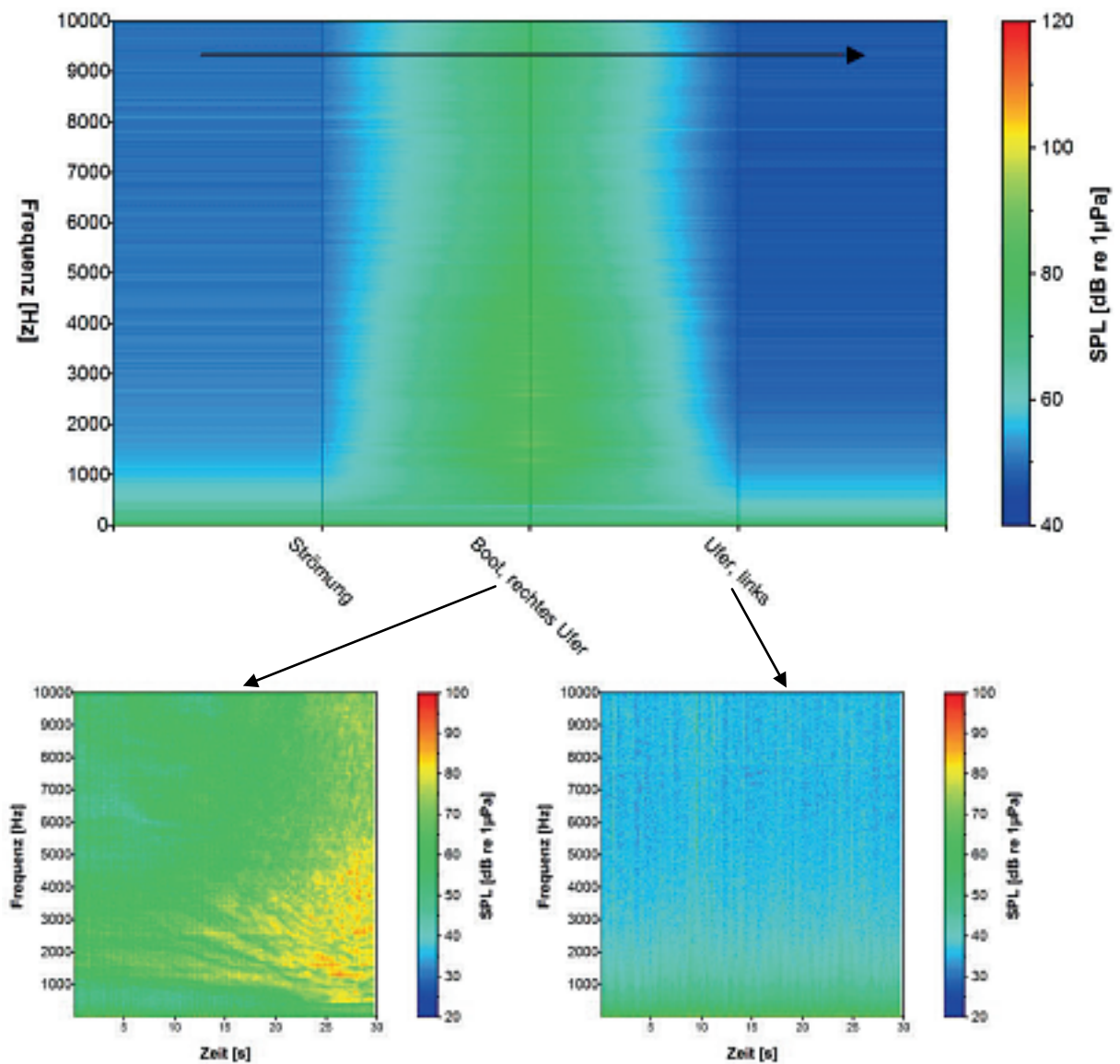


Abb. 6.12: 2km unterhalb v. Speele: Flussmorphologie entspricht der in Beisenförrth; Oben: Powerspektren der einzelner Messstellen in Isopletendarstellung; unten links: Spektralanalyse der Messung eines gegen die Strömung aufkommenden Sportbootes; unten, rechts: Spektralanalyse einer Messung im Uferbereich (Wassertief: 1,1 m)

Waldbrölbach: Rossenbach

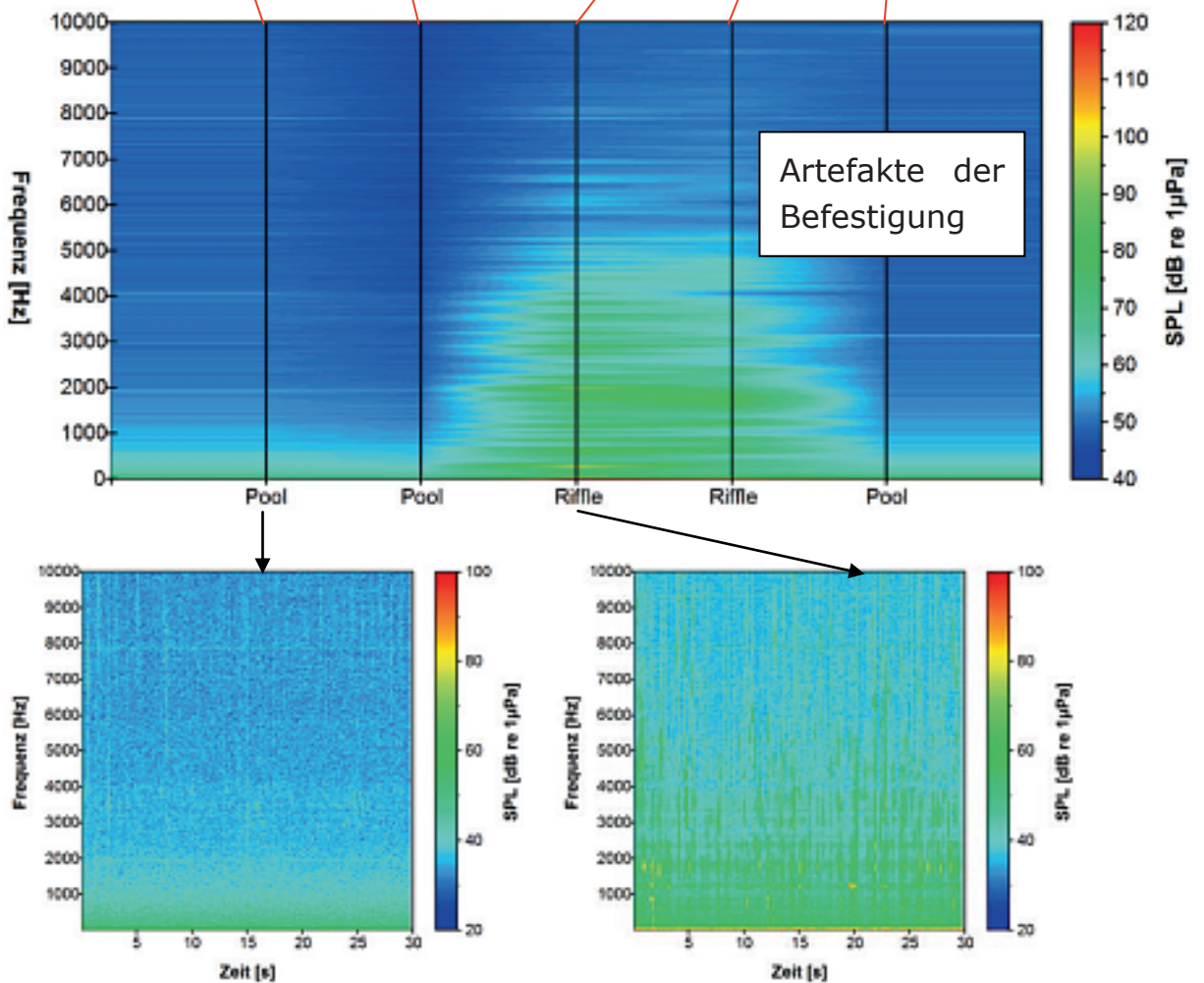


Abb. 6.13: Rossenbach – oben, links: Blick auf den Pool; oben, rechts: Blick auf das Riffle unterhalb des Pools; Mitte: Isopletendarstellung aller Powerspektren der Probenamestelle; unten, links: Spektralanalyse einer akustischen Aufnahme in einem Pool; unten, rechts: Spektralanalyse einer akustischen Aufnahme in einem Riffle, Signale sind mit Artefakten der Befestigung überlagert

Waldbrölbach: Unterhalb Rossenbach

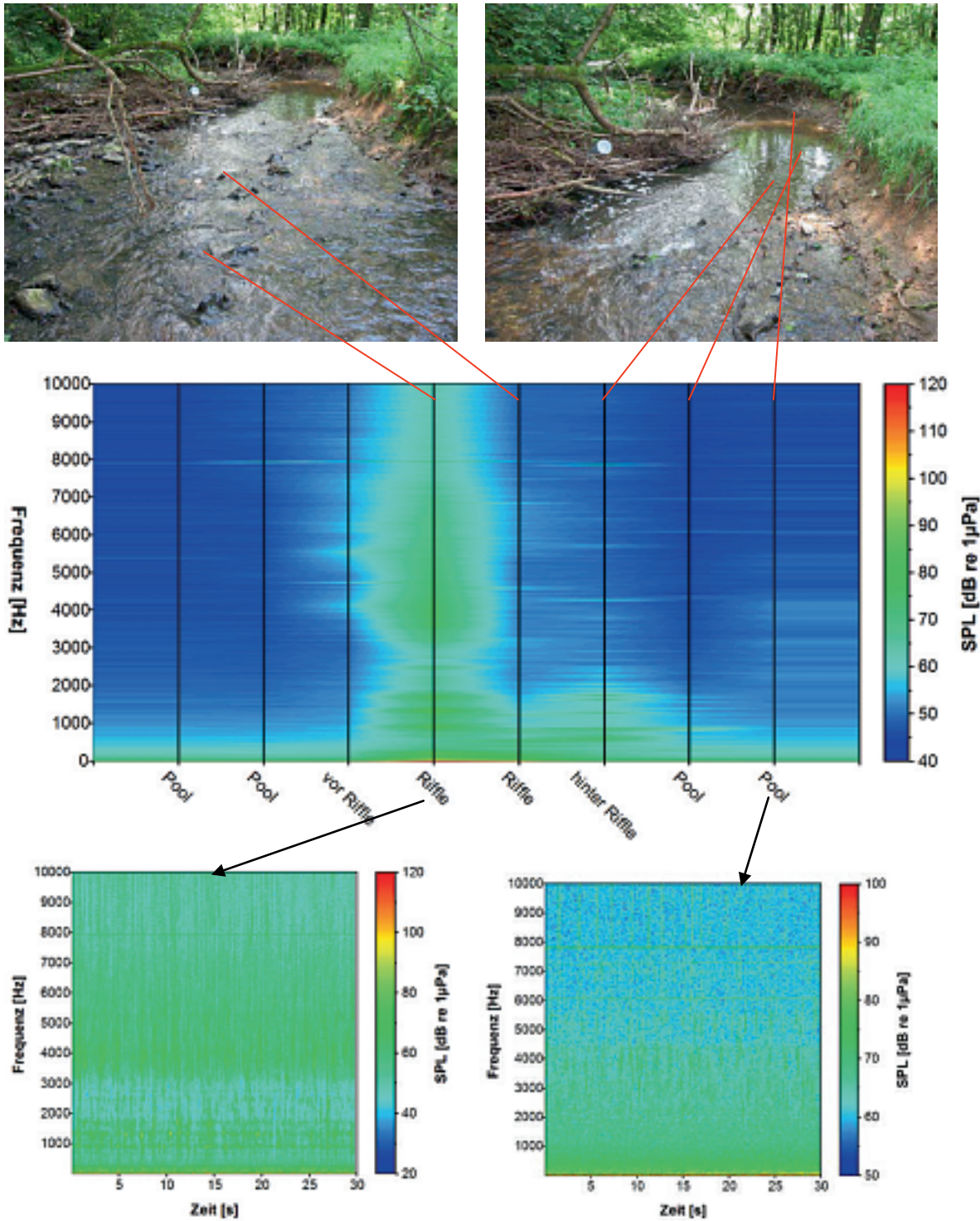


Abb. 6.14: 1,5 km unterhalb v. Rossenbach – oben, links: Blick auf das Riffle; oben, rechts: Blick über das Riffle auf den Pool; Mitte: Isopletendarstellung aller Powerspektren der Probenamestelle; unten, links: Spektralanalyse einer akustischen Aufnahme in einem Riffle; unten, rechts: Spektralanalyse einer akustischen Aufnahme in einem Pool (Plätschern u. Sand bis 5 kHz, kurze Summen (biologische Herkunft?) > 7 kHz)

Waldbrölbach: Benroth

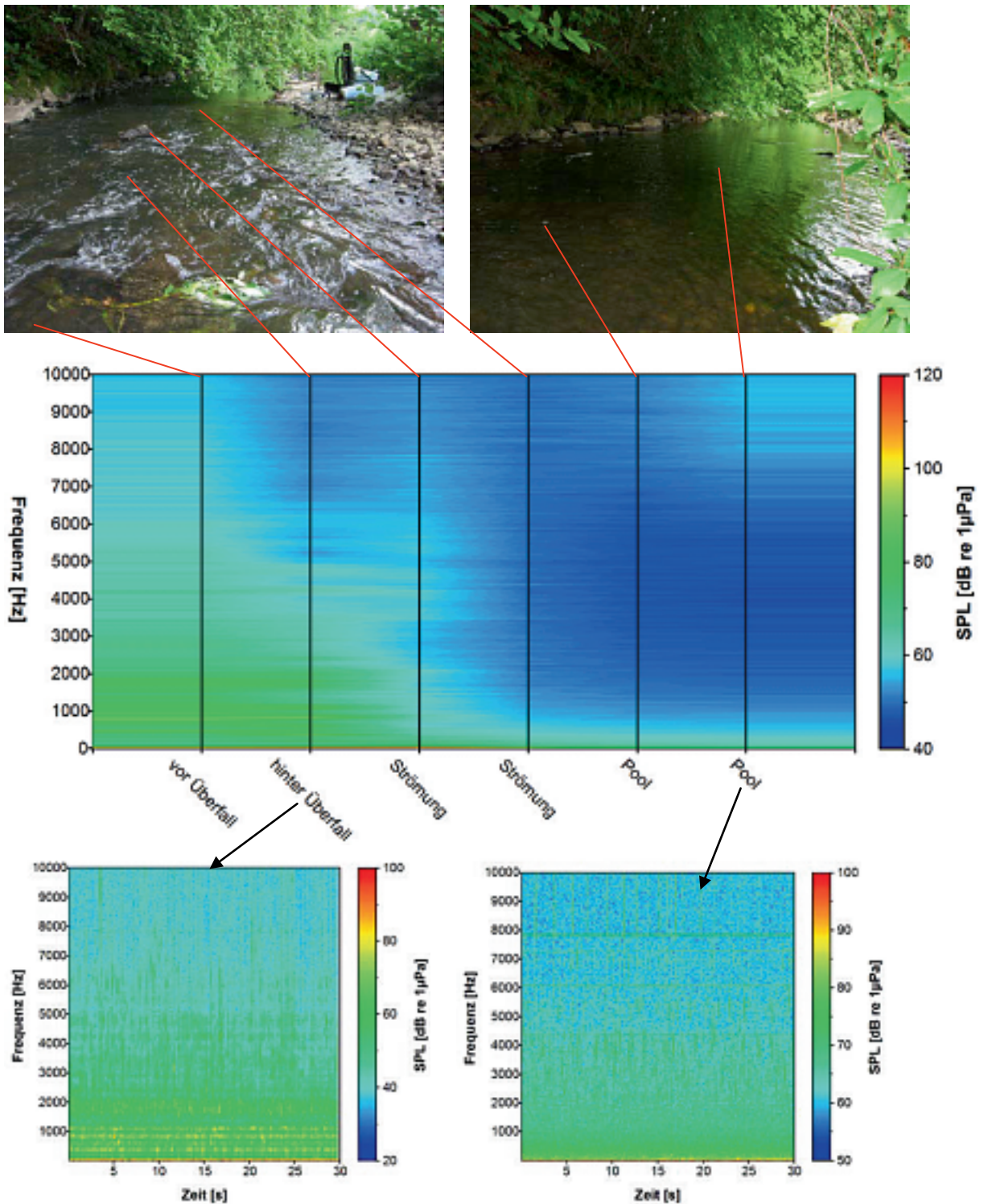


Abb. 6.15: Benroth – oben, links: Blick auf das Riffle; oben, rechts: Blick auf den Pool unterhalb des Riffles; Mitte: Isoletendarstellung aller Powerspektren der Probenamestelle; unten, links: Spektralanalyse einer akustischen Aufnahme hinter einem Überfall; unten, rechts: Spektralanalyse einer akustischen Aufnahme in einem Pool. Die Signale > 8kHz sind unglärter (biologischer) Herkunft

Waldbrölbach: Hillesmühle

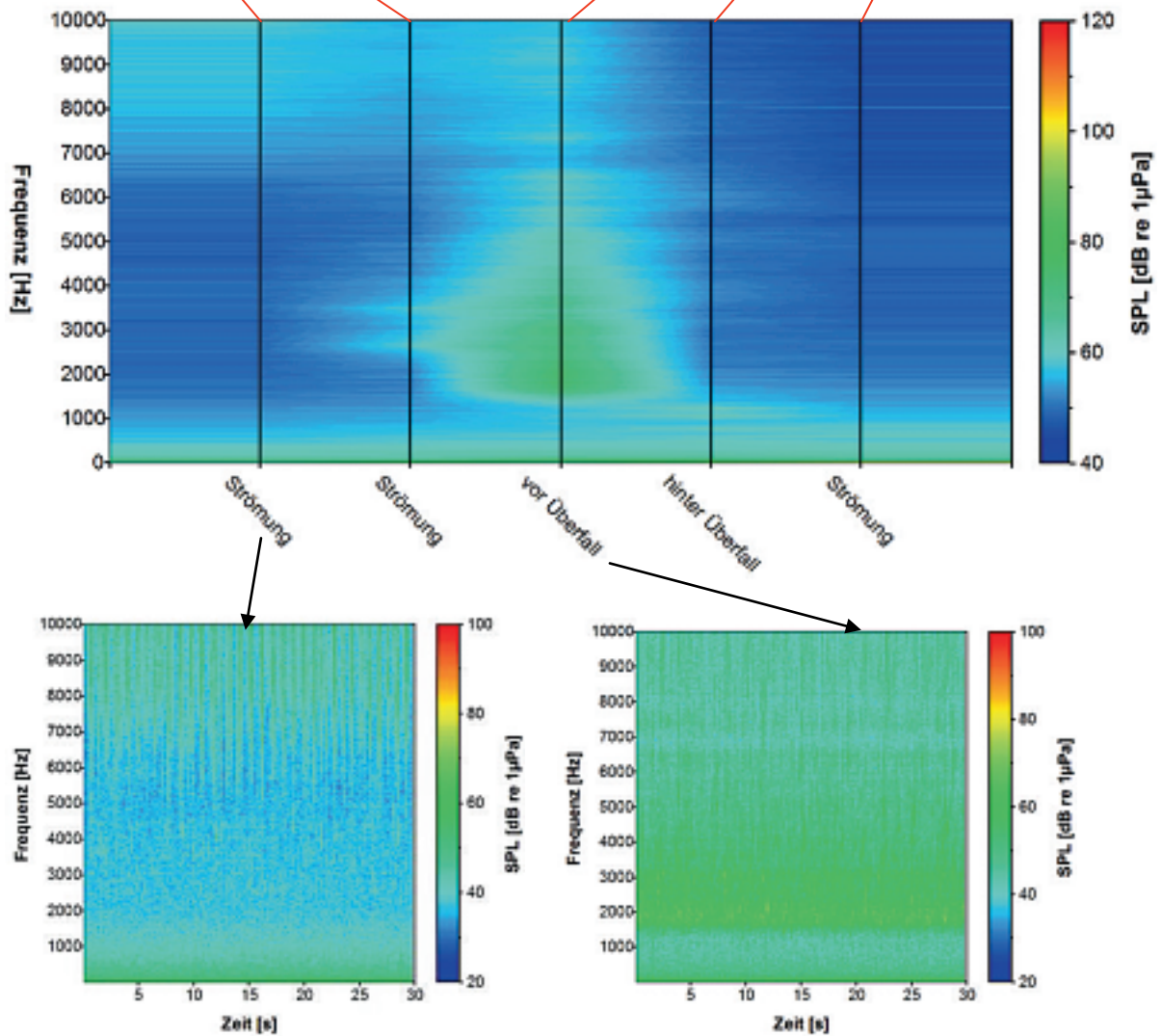


Abb. 6.16: Hillesmühle – oben, links: Blick auf den Pool; oben, rechts: Blick auf das Riffle unterhalb des Pools; Mitte: Isopletendarstellung aller Powerspektren der Probennamestelle; unten, links: Spektralanalyse einer akustischen Aufnahme in einem Pool. Die Signale > 8kHz sind unglklärter (biologischer) Herkunft; unten, rechts: Spektralanalyse einer akustischen Aufnahme in einem Riffle.

Waldbrölbach: Ruppichteroth

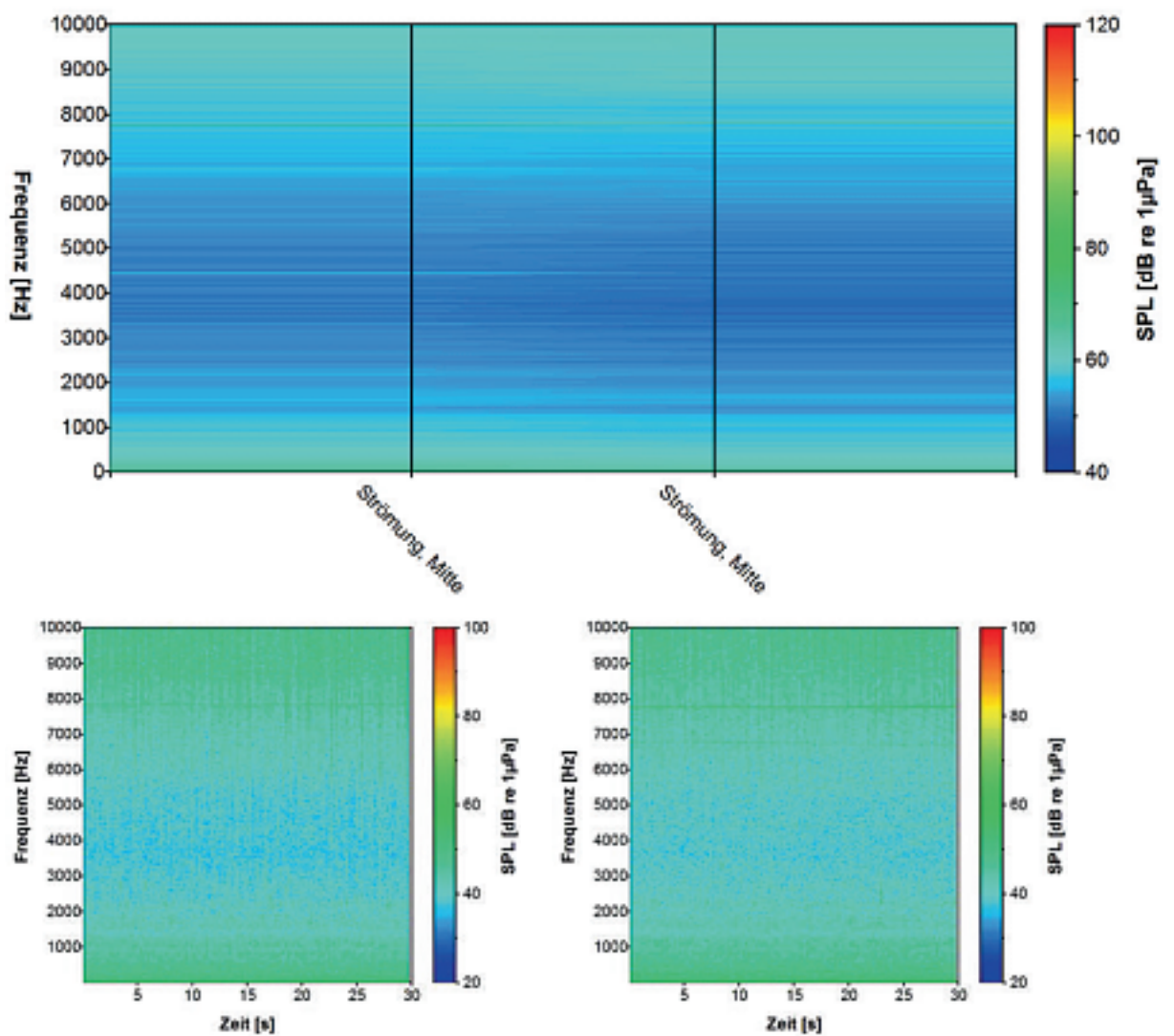
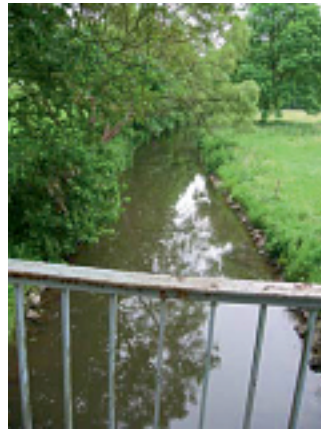


Abb. 6.17: Ruppichteroth – oben: Blick auf die Probenamestelle; Mitte: Isoplethendarstellung beider Powerspektren der Probenamestelle; unten: Spektralanalyse beider akustischen Aufnahmen der Probenamestelle, die Signal > 8kHz sind ungeklärter (biologischer) Herkunft

Waldbrölbach: Herrenstein

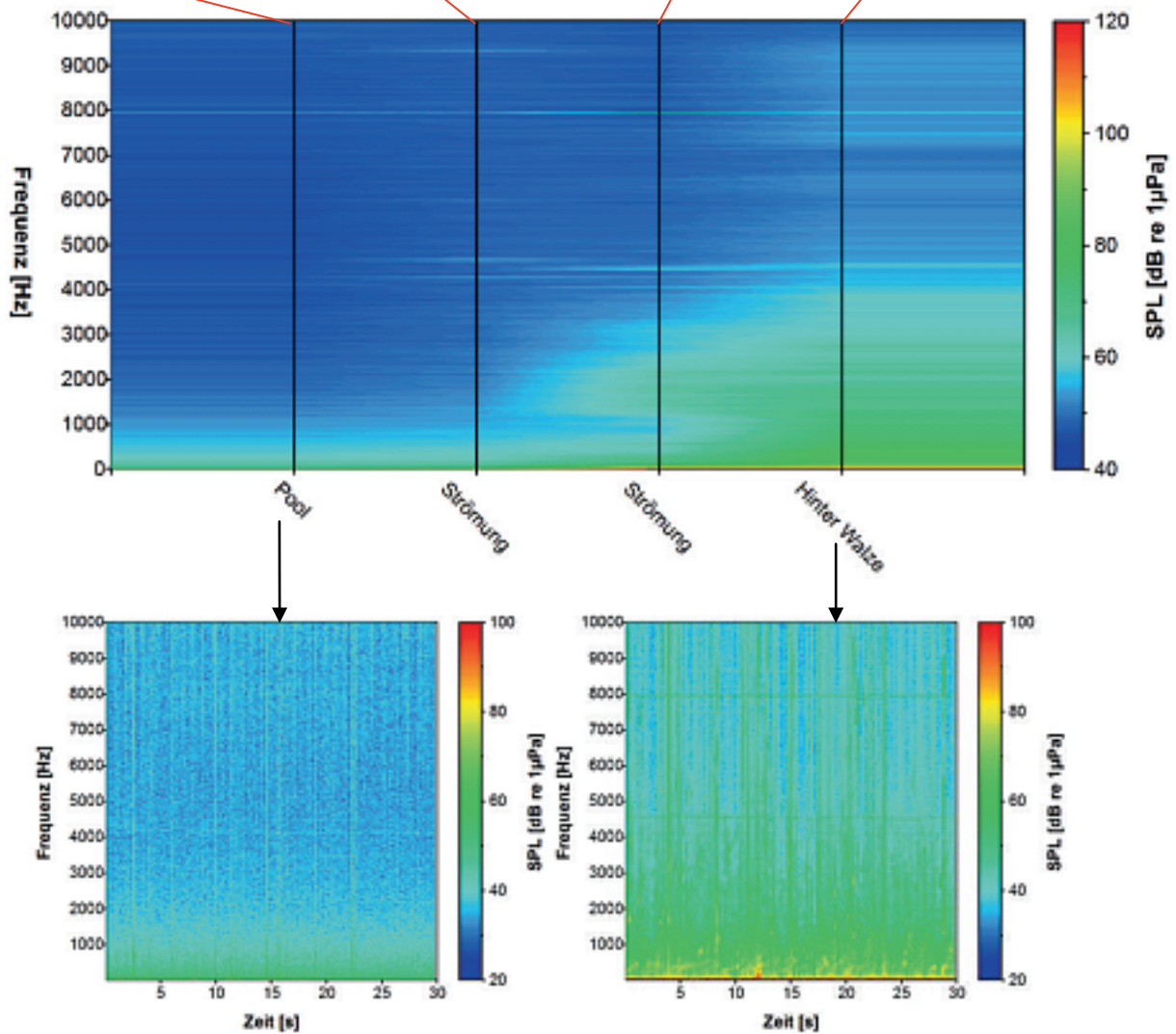


Abb. 6.18: Herrenstein – oben, links: Blick auf die Strömung unterhalb des Riffles; oben, rechts: Blick auf das Riffle; Mitte: Isopletendarstellung aller Powerspektren der Probenamestelle; unten, links: Spektralanalyse einer akustischen Aufnahme hinter einem Überfall; unten, rechts: Spektralanalyse einer akustischen Aufnahme in einem Pool

Waldbrölbach: Müschmühle

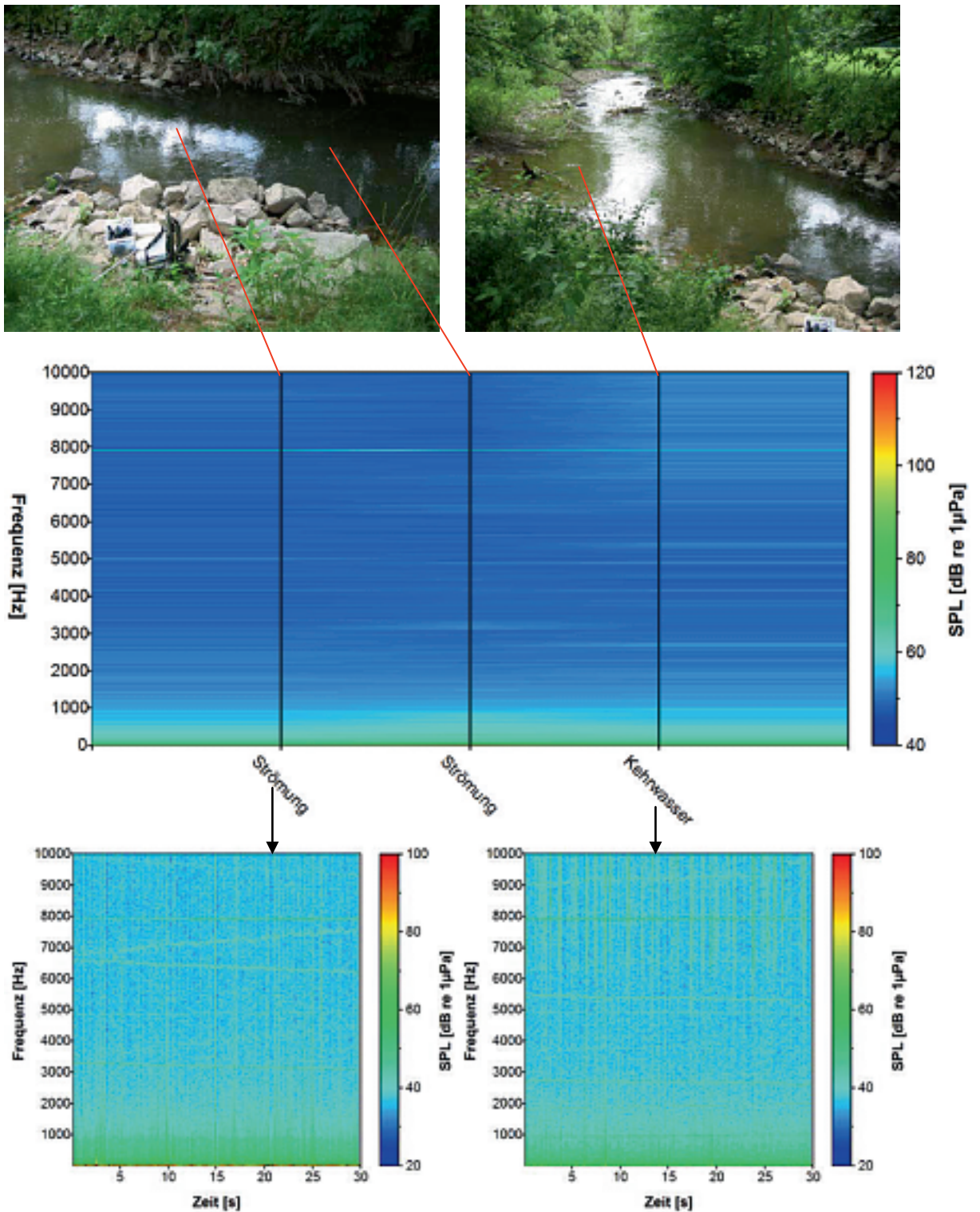


Abb. 6.19: Müschmühle – oben, links: Blick auf die Messstelle; oben, rechts: Blick auf das Kehrwasser; Mitte: Isopletendarstellung beider Powerspektren der Probenamestelle; unten, links: Spektralanalyse einer akustischen Aufnahmen in der Strömung; unten, rechts: Spektralanalyse einer akustischen Aufnahmen in der Strömung.

6.2 ABR - Kalibriergeraden

Tab. 6.1: Formeln zur Umrechnung der Hörschwellen von Forellen, Lachsen und Äschen. Umrechnung von dem gemessenen Attenuationswert (Att.) in den Schalldruckpegel SPL (dB re 1 μ Pa).

| <i>Frequenz (Hz)</i> | <i>Umrechnung der Attenuation (Att.) in SPL (dB re 1μPa)</i> | <i>R²</i> |
|--------------------------|---|----------------------|
| 100 | -0,8252*Att.+123,8 | 0,9770 |
| 150 | -1,000*Att. + 125,96 | 0,9928 |
| 200 | -0,9514*Att.+130,45 | 0,9983 |
| 300 | -0,8896*Att.+124,78 | 0,9991 |
| 400 | -0,9475*Att.+128,44 | 0,9988 |
| 500 | -0,9609*Att.+132,95 | 0,9975 |
| 600 | -0,9456*Att.+131,25 | 0,9968 |
| 700 | -0,9075*Att.+128,75 | 0,9964 |

Tab. 6.2: Formeln zur Umrechnung der Hörschwellen von Quappen. Umrechnung von dem gemessenen Attenuationswert (Att.) in den Schalldruckpegel SPL (dB re 1 μ Pa).

| <i>Frequenz (Hz)</i> | <i>Umrechnung der Attenuation (Att.) in SPL (dB re 1μPa)</i> | <i>R²</i> |
|--------------------------|---|----------------------|
| 100 | -0,852*Att. + 126,01 | 0,9897 |
| 150 | -0,9185* Att. + 127,95 | 0,9979 |
| 200 | -0,9267*Att. + 129,73 | 0,9973 |
| 250 | -0,8621*Att. + 128,35 | 0,9910 |
| 300 | -1,0985*Att. + 132,73 | 0,9887 |
| 400 | -0,9821*Att. + 133,07 | 0,9977 |
| 500 | -0,9908*Att. + 139,78 | 0,9996 |
| 600 | -0,9211*Att. + 135,54 | 0,9986 |

Tab. 6.3.: Formeln zur Umrechnung der Hörschwellen von Haseln und Döbeln. Umrechnung von dem gemessenen Attenuationswert (Att.) in den Schalldruckpegel SPL (dB re 1 μ Pa).

| <i>Frequenz (Hz)</i> | <i>Umrechnung der Attenuation (Att.) in SPL (dB re 1μPa)</i> | <i>R²</i> |
|--------------------------|---|----------------------|
| 200 | -1,0186*Att. +130,99 | 0,9914 |
| 400 | -0,9754*Att.+129,65 | 0,9964 |
| 600 | -1,031*Att.+133,74 | 0,9711 |
| 800 | -0,997*Att.+133,3 | 0,9993 |
| 1000 | -1,0132*Att.+130,94 | 0,9945 |
| 1500 | -0,8785*Att.+128,1 | 0,9935 |
| 2000 | -0,9982*Att.+130,93 | 0,9952 |
| 2500 | -1,001*Att+129,25 | 0,9961 |
| 3000 | 0,998*Att.+129,18 | 0,9950 |

6.3 Beschreibende Statistik der Leq von Fulda und Waldbrölbach

Tab. 6.4: Beschreibende Statistik der L_{eq} von Fulda und Waldbrölbach, differenziert nach der Struktur.

| <i>Ort</i> | <i>Mittelwert</i> | <i>Std-Error oben</i> | <i>Std-Error unten</i> | <i>Max.</i> | <i>Min.</i> | <i>N</i> |
|--------------|-------------------|-----------------------|------------------------|-------------|-------------|----------|
| Fulda Pool | 99,9 | 100,8 | 98,9 | 112,4 | 77,3 | 35 |
| Fulda Riffle | 121,2 | 124,4 | 116,1 | 137,0 | 103,3 | 13 |
| Bröl Pool | 102,6 | 103,7 | 101,3 | 111,1 | 80,8 | 25 |
| Bröl Riffle | 123,7 | 125,7 | 121,2 | 133,1 | 101,7 | 13 |

6.4 Hörschwellenvergleich mit Schiffsspektren

Tab. 6.5: Differenz zwischen der Hörschwelle von Döbeln (*Leuciscus cephalus*) und dem entsprechenden Schalldruck in Prall- und Gleithang (gemittelte Terzanalyse). Die Frequenzen der Hörschwelle und der Terzanalyse stimmen teilweise nicht genau überein. Ein negativer Wert bedeutet, die Hörschwelle liegt über dem Geräuschspektrum.

| Mitten-Freq. Terzanalyse [Hz] | Hörschwelle Döbel [Hz] | Differenz Prallhang | | | Differenz Gleithang | | |
|-------------------------------------|------------------------------|---------------------|-------|-------|---------------------|-------|-------|
| | | 0,5 m | 1,0 m | 3,2 m | 0,5 m | 1,0 m | 3,2 m |
| 200 | 200 | 14,3 | 23,4 | 44,1 | 7,5 | 11,3 | 42,0 |
| 400 | 400 | 30,8 | 43,3 | 44,0 | 7,7 | 30,9 | 41,1 |
| 630 | 600 | 35,7 | 41,3 | 38,7 | 10,4 | 37,1 | 35,7 |
| 800 | 800 | 35,9 | 36,7 | 35,4 | 21,7 | 34,3 | 32,0 |
| 1000 | 1000 | 28,5 | 27,0 | 26,6 | 20,3 | 25,3 | 23,9 |
| 1600 | 1500 | 10,9 | 10,4 | 9,9 | 7,5 | 8,8 | 7,6 |
| 2000 | 2000 | -1,0 | -0,2 | -0,4 | -3,0 | -1,9 | -2,7 |
| 2500 | 2500 | -10,4 | -9,2 | -8,6 | -10,7 | -10,0 | -11,1 |
| 3150 | 3000 | -29,8 | -28,5 | -26,3 | -27,9 | -28,2 | -29,3 |

Tab. 6.6: Differenz zwischen der Hörschwelle von Bachforelle (*Salmo trutta f. fario*) und dem entsprechenden Schalldruck in Prall- und Gleithang (gemittelte Terzanalyse). Die Frequenzen der Hörschwelle und der Terzanalyse stimmen nicht immer genau überein. Ein negativer Wert bedeutet, die Hörschwelle liegt über dem Geräuschspektrum.

| Mitten Freq. Terzanalyse | Hörschwelle Lachs | Differenz Prallhang | | | Differenz Gleithang | | |
|-----------------------------|----------------------|---------------------|-------|-------|---------------------|-------|-------|
| | | 0,5 m | 1,0 m | 3,2 m | 0,5 m | 1,0 m | 3,2 m |
| 100 | 100 | -19,9 | -15,5 | 5,3 | -21,2 | -18,1 | -0,1 |
| 200 | 200 | -4,4 | 4,6 | 23,3 | -11,3 | -7,5 | 25,3 |
| 250 | 260 | -5,0 | 9,1 | 19,7 | -13,4 | -9,6 | 22,6 |
| 400 | 400 | -9,1 | 3,4 | 1,2 | -32,1 | -9,0 | 4,2 |
| 500 | 500 | -16,3 | -5,2 | -9,8 | -42,4 | -11,4 | -7,6 |
| 630 | 600 | -19,5 | -13,9 | -19,5 | -44,8 | -18,1 | -16,5 |

6.5 Erklärung des Verfassers

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Hilfsmittel erstellt habe.

Rhens, den 28.01.2013