



# Evaluierung von Maßnahmen zur Wiederherstellung der Durchgängigkeit gemäß § 35 WHG

Rita Keuneke, Pia Anderer, Gereon Hermens, Bastian Pietzsch,  
Edith Massmann, Ulrich Schwevers, Beate Adam,  
Sven Mögeltönder-Löwenberg und Boris Lehmann

**Naturschutz und Biologische Vielfalt  
Heft 173**

# **Evaluierung von Maßnahmen zur Wiederherstellung der Durchgängigkeit gemäß § 35 WHG**

**Ergebnisse des gleichnamigen F+E-Vorhabens  
des Bundesamtes für Naturschutz**

Rita Keuneke  
Pia Anderer  
Gereon Hermens  
Bastian Pietzsch  
Edith Massmann  
Ulrich Schwevers  
Beate Adam  
Sven Mögeltönder-Löwenberg  
Boris Lehmann

**Bundesamt für Naturschutz  
Bonn - Bad Godesberg 2021**

**Titelfotos:** Hintergrund: Oberwasserseitige Ansicht der Wasserkraftanlage Eddersheim (G. Hermens); unten links: Horizontalrechenanlage an der WKA Mulde (S. Birenbaum); unten Mitte: Detail Rechen Stababstand 10 mm, WKA ECI Centrale Roermond/NL (G. Hermens); unten rechts: Plötze an der WKA Geesthacht (Institut für angewandte Ökologie GmbH)

**Adressen der Autorinnen und der Autoren:**

Rita Keuneke                    Ingenieurbüro Floecksmühle GmbH  
Pia Anderer                    Bachstraße 62-64, 52066 Aachen  
Gereon Hermens                E-Mail: info@floecksmuehle-fw.de  
Bastian Pietzsch  
Edith Massmann

Dr. Ulrich Schwevers            Institut für angewandte Ökologie  
Beate Adam                    Neustädter Weg 25, 36320 Kirtorf-Wahlen  
Sven Mögeltönder-Löwenberg    E-Mail: info@ifoe.eu

Prof. Dr.-Ing. Boris Lehmann    TU Darmstadt, Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik  
Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt  
E-Mail: lehmann@wb.tu-darmstadt.de

**Fachbetreuung im BfN:**

Bernd Neukirchner                Fachgebiet II 2.4 „Gewässerökosysteme,  
Jonas Kötting                    Wasserhaushalt, Blaues Band“

Die vorliegende Veröffentlichung fasst die Ergebnisse des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Evaluierung von Maßnahmen zur Wiederherstellung der Durchgängigkeit gemäß § 35 WHG“ (FKZ 3515 83 0100) zusammen.

Gefördert durch das Bundesamt für Naturschutz mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU).

Diese Veröffentlichung wird aufgenommen in die Literaturdatenbank DNL-online ([www.dnl-online.de](http://www.dnl-online.de)).

Institutioneller Herausgeber: Bundesamt für Naturschutz (BfN)  
Konstantinstr. 110, 53179 Bonn  
URL: [www.bfn.de](http://www.bfn.de)

Der institutionelle Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des institutionellen Herausgebers übereinstimmen.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des institutionellen Herausgebers unzulässig und strafbar.

Nachdruck, auch in Auszügen, nur mit Genehmigung des BfN.

Druck: Westermann Druck Zwickau GmbH

Bezug über: BfN-Schriftenvertrieb – Leserservice –  
im Landwirtschaftsverlag GmbH  
48084 Münster  
Tel.: 02501/801-300, Fax: 02501/801-351

oder im Internet:  
[www.buchweltshop.de/bfn](http://www.buchweltshop.de/bfn)

ISBN 978-3-7843-4073-9 // eISBN 978-3-7843-9239-4

DOI 10.19213/973173

Gedruckt auf „Circle Silk Premium White“, hergestellt aus 100% Recyclingmaterial, FSC® zertifiziert und mit dem EU Ecolabel ausgezeichnet.

Bonn - Bad Godesberg 2021



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>9</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>25</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>27</b>
<b>Vorwort</b> .....	<b>31</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>33</b>
<b>2 Übersicht über die ausgewerteten Quellen</b> .....	<b>34</b>
<b>3 Grundlegende Anforderungen an den Fischschutz und Fischabstieg</b> .....	<b>40</b>
3.1 Biologische Aspekte und Mechanismen .....	40
3.1.1 Abwandernde Entwicklungsstadien .....	40
3.1.2 Schwimmleistung .....	48
3.1.3 Schwimmverhalten .....	54
3.1.4 Abwanderverhalten.....	57
3.1.5 Tages- und Jahresrhythmik .....	64
3.2 Auswirkungen einer eingeschränkten stromab gerichteten Durchgängigkeit .....	70
3.2.1 Einfluss von Staubaauwerken auf die Abwanderung .....	71
3.2.2 Mortalität bei der Passage von Turbinen .....	80
3.2.3 Mortalität durch Prädation.....	114
3.2.4 Andere Risiken bei der Abwanderung.....	116
3.2.5 Auswirkungen der eingeschränkten Durchgängigkeit auf Fischpopulationen .....	116
<b>4 Fischökologisch-technische Wirkungsweise von Fischschutz- und Abstiegsanlagen</b> .....	<b>130</b>
4.1 Verhaltensbarrieren .....	130
4.1.1 Elektrische Scheuchanlagen .....	131
4.1.2 Akustische Scheuchanlagen.....	137
4.1.3 Optische Scheuchanlagen.....	141
4.1.4 Kettenvorhänge .....	142
4.1.5 Luftblasenvorhänge .....	143
4.1.6 Wasserstrahlvorhänge.....	144

4.1.7	Scheuchen durch chemische Substanzen .....	145
4.1.8	Hybrid-Verhaltensbarrieren .....	145
4.2	Mechanische Barrieren .....	145
4.2.1	Bauweisen .....	146
4.2.2	Reinigung mechanischer Barrieren .....	179
4.2.3	Lichte Weite mechanischer Barrieren .....	192
4.2.4	Anströmung mechanischer Barrieren .....	206
4.2.5	Anordnung mechanischer Barrieren.....	218
4.3	Leiteinrichtungen .....	246
4.3.1	Tauchwand .....	246
4.3.2	Sohlleitwand .....	249
4.4	Bypässe.....	252
4.4.1	Auffindbarkeit von Bypässen.....	255
4.4.2	Akzeptanz von Bypässen.....	277
4.4.3	Passierbarkeit der Bypassleitung .....	287
4.4.4	Bauformen von Bypässen .....	289
4.4.5	Unterhaltung von Bypässen .....	297
4.5	Fischschonende Turbinen.....	298
4.5.1	Mechanismen .....	298
4.5.2	Bauformen fischschonender Turbinen .....	300
4.5.3	Minimum Gap Runner.....	301
4.6	Fischschonendes Betriebsmanagement .....	308
4.6.1	Fischschonendes Betriebsmanagement für potamodrome Arten ...	308
4.6.2	Fischschonendes Betriebsmanagement für anadrome Arten .....	310
4.6.3	Fischschonendes Betriebsmanagement für den katadromen Aal...	312
4.7	Fang und Transport .....	324
4.7.1	Fang und Transport von Lachssmolts .....	325
4.7.2	Fang und Transport von Blankaalen .....	325
4.8	Habitatmaßnahmen .....	329
<b>5</b>	<b>Art- und entwicklungsspezifische Anforderungen an Fischschutz und Fischabstieg .....</b>	<b>333</b>
5.1	Zielarten.....	333

5.2	Bemessungsarten.....	336
<b>6</b>	<b>Offene Fragen und Wissensdefizite .....</b>	<b>338</b>
6.1	Populationsschutz .....	338
6.2	Mortalitätsursachen .....	339
6.3	Verhaltensbarrieren .....	341
6.4	Leiteinrichtungen .....	342
6.5	Mechanische Barrieren.....	342
6.6	Bypässe .....	343
6.7	Fischschonende Turbinen .....	345
6.8	Fischschonendes Betriebsmanagement.....	345
6.9	Fang und Transport.....	346
6.10	Habitatmaßnahmen .....	346
6.11	Technische und hydraulische Fragestellungen .....	346
6.12	Zusammenstellung der Forschungsfragen.....	348
<b>7</b>	<b>Grundlagen für den Bau von Fischschutz- und -abstiegsanlagen .....</b>	<b>357</b>
7.1	Standörtlich relevante Faktoren .....	357
7.1.1	Allgemeine Angaben .....	357
7.1.2	Angaben zur Wasserkraftanlage und zur Betriebsweise .....	358
7.1.3	Relevante Angaben für die Planung von Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen.....	358
7.2	Auswirkungen auf die Wasserkraftnutzung.....	359
7.2.1	Strömungsmechanische Auswirkungen .....	359
7.2.2	Energetische Auswirkungen .....	363
7.2.3	Betriebliche Auswirkungen .....	373
7.3	Kostenfaktoren .....	379
7.3.1	Fischschutz .....	379
7.3.2	Fischabstieg .....	382
7.4	Synergien mit Fischaufstiegsanlagen .....	382
7.4.1	Hydraulische Synergien.....	383
7.4.2	Bauliche Synergien.....	385

<b>8</b>	<b>Charakterisierung der Pilotstandorte Eddersheim und Griesheim .....</b>	<b>386</b>
8.1	Standort Eddersheim .....	386
8.1.1	Beschreibung des Standortes .....	386
8.1.2	Hydrologie .....	391
8.1.3	Turbinenbetrieb Eddersheim.....	391
8.1.4	Vorhandene Abstiegskorridore.....	393
8.1.5	Schutzziele und planungsrelevante Arten .....	397
8.2	Standort Griesheim.....	400
8.2.1	Beschreibung des Standortes .....	400
8.2.2	Hydrologie .....	403
8.2.3	Turbinenbetrieb Griesheim .....	403
8.3	Daten zu chemisch-physikalischen Parametern und deren Einfluss auf Fische und Wasserkraftanlagen .....	404
8.3.1	Wassertemperatur .....	405
8.3.2	Sauerstoffgehalt.....	407
8.3.3	pH-Wert .....	408
8.3.4	Leitfähigkeit .....	409
<b>9</b>	<b>Identifikation konkreter Maßnahmen für den Fischschutz und den Fischabstieg an den Wasserkraftanlagen Eddersheim und Griesheim .....</b>	<b>411</b>
9.1	Grundsätzlich geeignete Maßnahmen für die Standorte .....	411
9.1.1	Verhaltensbarrieren .....	411
9.1.2	Mechanische Barrieren .....	411
9.1.3	Leiteinrichtungen .....	414
9.1.4	Bypässe.....	414
9.1.5	Fischschonende Turbinen.....	415
9.1.6	Fischschonendes Betriebsmanagement .....	416
9.1.7	Fang und Transport .....	416
9.1.8	Habitatmaßnahmen .....	416
9.2	Empfohlene Bauweisen .....	417
9.2.1	Alternative 1: Schrägrechen mit horizontalen Stäben, Bypass am Wehr.....	417

9.2.2	Alternative 2: Schrägrechen mit horizontalen Stäben, Bypass am Ufer .....	423
9.2.3	Alternative 3: Flachrechen mit vertikalen Stäben .....	426
9.2.4	Prüfung der technischen Umsetzungsmöglichkeit.....	431
9.2.5	Auswahl der Vorzugsalternativen und Standortzuordnung.....	432
9.2.6	Interimsmaßnahmen.....	439
<b>10</b>	<b>Studydesign-Vorschläge für die Pilotstandorte Eddersheim und Griesheim .....</b>	<b>443</b>
10.1	Administrative Voraussetzungen .....	443
10.1.1	Fischerei.....	443
10.1.2	Tierschutz.....	444
10.1.3	Wasserrecht .....	445
10.1.4	Arbeitsschutz.....	446
10.1.5	Schifffahrt.....	446
10.2	Bauliche Voraussetzungen .....	447
10.3	Fragestellungen.....	450
10.3.1	Verteilung der abwandernden Fische im Gewässer.....	452
10.3.2	Schutzfunktion des Rechens .....	454
10.3.3	Leitfunktion des Rechens .....	456
10.3.4	Wirksamkeit von Leitstrukturen.....	458
10.3.5	Auffindbarkeit und Akzeptanz von Bypässen .....	459
10.3.6	Auffindbarkeit und Akzeptanz anderer Abstiegskorridore.....	461
10.3.7	Effizienz des Fischabstiegs .....	463
10.3.8	Mortalität bei der Turbinenpassage .....	464
10.3.9	Mortalität bei der Passage anderer Wanderkorridore.....	466
10.3.10	Zuverlässigkeit von Frühwarnsystemen.....	468
10.3.11	Effizienz eines fischschonenden Anlagenmanagements .....	469
10.3.12	Gesamt mortalität bei der Passage des Standortes.....	470
10.3.13	Technische Fragestellungen.....	471
10.4	Methoden .....	472
10.4.1	Hydraulische Modellierung .....	473
10.4.2	Erfassung abiotischer Parameter.....	474

10.4.3	Telemetry.....	475
10.4.4	HDX-Transponder.....	485
10.4.5	Imaging Sonare .....	494
10.4.6	Fang abwandernder Fische .....	498
10.4.7	Erfassung von Verletzungen und Schädigungen.....	510
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>520</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>526</b>
	<b>Artenliste .....</b>	<b>590</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Alter der ausgewerteten Quellen .....	34
Abb. 2.2:	Art der ausgewerteten Literatur.....	35
Abb. 2.3:	Themen der ausgewerteten Quellen.....	36
Abb. 2.4:	In den Quellen behandelte Anlagen und Verfahren zum Fischschutz und Fischabstieg.....	37
Abb. 2.5:	In den Quellen behandelte Gilden bzw. Arten.....	38
Abb. 2.6:	Herkunft der ausgewerteten Quellen aus verschiedenen Ländern.....	39
Abb. 3.1:	Längenfrequenz der in der Saison 2009 in der Weser bei Drakenburg bei der Abwanderung mittels Schokkerfängen registrierten Lachsmolts.....	42
Abb. 3.2:	Längenfrequenz der in der Saison 2009 in der Weser bei Drakenburg bei der Abwanderung mittels Schokkerfängen registrierten Meerforellensmolts .....	43
Abb. 3.3:	Historische Aufnahme vom Lachsfang an der Ahr (Rheinland-Pfalz).....	44
Abb. 3.4:	Kadaver abgelaichter Maifische am Rechen eines Kraftwerks an der französischen Dordogne .....	45
Abb. 3.5:	Längenfrequenz der in der Saison 2008/09 in der Weser bei Landesbergen mit Schokkern gefangenen Aale.....	46
Abb. 3.6:	Größenspektrum Fische Saale .....	47
Abb. 3.7:	Größenspektrum Fische Ivan'kovskoe-Stausee.....	47
Abb. 3.8:	Schwimmleistung von Fischen .....	49
Abb. 3.9:	Kritische Schwimmggeschwindigkeit verschiedener Arten in Abhängigkeit von der Körperlänge.....	50
Abb. 3.10:	Fortbewegungstypen.....	51
Abb. 3.11:	Schwanzflossentypen.....	52
Abb. 3.12:	Amerikanisches Laborexperiment zur Ermittlung der Schwimmleistung eines Meerneunauges.....	54
Abb. 3.13:	Vektoren bei der aktiven Abwanderung .....	56
Abb. 3.14:	Vektoren bei der aktiv/passiven Abwanderung .....	56
Abb. 3.15:	Vektoren bei der passiven Abwanderung .....	57

Abb. 3.16:	Suchverhalten eines telemetrisch besenderten Amerikanischen Aals vor dem Einlaufbauwerk des Wasserkraftwerks Cabot am Connecticut River .....	62
Abb. 3.17:	Vergleich der circadianen Rhythmik der Blankaalabwanderung .....	67
Abb. 3.18:	Vektoren bei ungestörter Abwanderung, Unterbrechung und Flucht.....	71
Abb. 3.19:	Schematischer Querschnitt einer Walze des Wehres Offenbach am hessischen Main.....	75
Abb. 3.20:	Unterströmte Walze des Wehres Offenbach bei hohem Abfluss.....	75
Abb. 3.21:	Das Wehr Kostheim am hessischen Main bei Hochwasser.....	76
Abb. 3.22:	Schematischer Querschnitt durch eine Klappe .....	77
Abb. 3.23:	Klappe des Wehres Mühlheim am hessischen Main mit Strömungsaufreißern an der Oberkante.....	77
Abb. 3.24:	Trockengelegtes mittleres Wehrfeld des Wehres Offenbach am hessischen Main.....	78
Abb. 3.25:	Multiple Fraktur der Wirbelsäule bei einem äußerlich ungeschädigten Aal nach der Turbinenpassage .....	84
Abb. 3.26:	Wirbelbrüche und Hämatome entlang der Wirbelsäule eines turbinierten Aals .....	85
Abb. 3.27:	Schematische Darstellung des Wasserstroms im Bereich der Laufradschaufelkanten im Zeitraum einer Umdrehung eines 4-flügeligen Laufrades.....	87
Abb. 3.28:	Geschwindigkeitsvektoren beim Eintritt des Wassers in eine Turbine.....	89
Abb. 3.29:	Position und Ausrichtung von Schnittwunden .....	91
Abb. 3.30:	Überlebensrate von Regenbogenforellen nach einem Aufprall .....	95
Abb. 3.31:	Überlebensrate von Regenbogenforellen und Weißen Stören bei einer Aufprallgeschwindigkeit von 10 bis 12 m/s .....	96
Abb. 3.32:	Spalten zwischen dem Laufrad einer Kaplan turbine und der Nabe (links) sowie dem Turbinengehäuse (rechts).....	97
Abb. 3.33:	Durchtrennter Aal im Unterwasser eines Wasserkraftwerkes .....	98
Abb. 3.34:	Decapitierte Plötze aus dem Unterwasser eines Wasserkraftwerkes .....	98

Abb. 3.35:	Teildurchtrennung eines Fischkörpers infolge des Abtauchens des Schaufelblattes eines Wasserrades in sein Kropfgerinne .....	99
Abb. 3.36:	Schwimmbasenruptur (links) und prall gedehnte Schwimmblase bei Zandern (rechts) .....	101
Abb. 3.37:	Röntgenaufnahmen von Kaulbarschen mit geplatzter (links) und mit intakter Schwimmblase (rechts).....	101
Abb. 3.38:	Hilflos an der Wasseroberfläche treibender Zander mit Barotrauma .....	101
Abb. 3.39:	Mortalitätsrate von Fischen in Abhängigkeit von einer Druckentlastung .....	102
Abb. 3.40:	Mortalitätsrate von Fischen in Abhängigkeit von der Dekompressionsrate.....	103
Abb. 3.41:	Modell der Stauanlage Kesselstadt am hessischen Main (BAW 1981).....	105
Abb. 3.42:	Von einem Drucksensor während der Passage der Turbine des Wasserkraftwerks Kesselstadt am Main aufgezeichneter Druckverlauf .....	106
Abb. 3.43:	Darstellung von Pavlov (2002) zur Mortalität juveniler Plötzen, Moderlieschen und Salmoniden in Abhängigkeit vom Druckgradienten .....	107
Abb. 3.44:	Gasblasenkrankheit bei einer Groppe (links) in Form gasgefüllter Blasen unter der Haut und einer Bachforelle (rechts) im Bereich des Auges.....	109
Abb. 3.45:	Bachforelle im Unterwasser einer Mühle am Dörsbach in Rheinland-Pfalz, die einen turbinieren Aal erbeutet hat .....	115
Abb. 3.46:	Fiktives Szenario für die kumulativen Verluste abwandernder Lachssmolts im Verlauf der Sieg.....	119
Abb. 3.47:	Modellhafte Darstellung der kumulativen Verluste bei der Abwanderung in Abhängigkeit von der Anzahl der Wasserkraftanlagen .....	121
Abb. 3.48:	Im „Mosellum“ am Moselwehr Koblenz ausgestellttes Präparat einer Meerforelle .....	123
Abb. 3.49:	Fiktives Szenario für die kumulativen Verluste abwandernder Blankaale im Verlauf der Sieg.....	126
Abb. 4.1:	Aufbau einer elektrischen Fischelektrode .....	133
Abb. 4.2:	Typische Anordnung der Elektroden einer elektrischen Fischelektrode vor einem Einlaufbauwerk .....	134

Abb. 4.3:	Elektroden der Elektroscheuchanlage am Entnahmebauwerk eines thermischen Kraftwerks während der Bauphase .....	135
Abb. 4.4:	Hörschwellen einheimischer Fische .....	138
Abb. 4.5:	Schema des Bio-Acoustic Fish Fence (BAFF) .....	139
Abb. 4.6:	Infrasound-Anlage im Oberwasserkanal des Wasserkraftwerks Biron am Gave de Pau, Frankreich .....	140
Abb. 4.7:	Bypass für die Lachsabwanderung am Wasserkraftwerk Pointis an der Garonne (Frankreich).....	142
Abb. 4.8:	Kettenvorhang an der Wasserkraftanlage Prossen im Lachsbach, Sachsen .....	143
Abb. 4.9:	Luftblasenvorhang an der Baustelle eines Windkraftwerks im Windpark Borkum als Schallschutzmaßnahme gegenüber Schweinswalen .....	144
Abb. 4.10:	Aufbau eines konventionellen Rechens .....	147
Abb. 4.11:	Konventioneller Rechen mit Rechenreiniger am Wasserkraftwerk Ahl an der Lahn (Rheinland-Pfalz).....	148
Abb. 4.12:	Detail eines konventionellen 40 mm-Rechen (WKA ECI Centrale, Roermond/NL, vor dem Umbau).....	148
Abb. 4.13:	Aufbau und Anströmung eines Modified Bar Racks, im Vergleich zu einem herkömmlichen Schrägrechen (Bar Rack) und einem Louver (Draufsicht).....	149
Abb. 4.14:	Die Wasserkraftanlage "Auer Kotten" an der Wupper (Nordrhein-Westfalen) .....	151
Abb. 4.15:	Rechenanlage mit horizontaler Stabausrichtung (Bauphase).....	151
Abb. 4.16:	Wasserkraftanlage Unkelmühle; Einlaufbereich zur WKA mit Rechenanlage.....	152
Abb. 4.17:	Wasserkraftanlage Unkelmühle; Rechenfelder mit Reinigungsanlagen .....	153
Abb. 4.18:	Rechen bzw. Rechenstab mit Tropfenprofil an der Wasserkraftanlage Mihla (Werra, Thüringen).....	154
Abb. 4.19:	Der sogenannte „FischSchonRechen“ in Seiten- und Frontalansicht .....	154
Abb. 4.20:	Dreiecksprofil eines Wedge-Wire-Screens mit 1 mm lichter Weite .....	156

Abb. 4.21:	Flach geneigter Wedge-Wire-Screen vor dem Einlauf des Wasserkraftwerk Floecksmühle an der Nette (Rheinland- Pfalz).....	156
Abb. 4.22:	Flach geneigter 10 mm-Lochblechrechen mit Bürstenreiniger am überströmten Wasserkraftwerk in Wetzlar an der Lahn, Hessen .....	157
Abb. 4.23:	Funktionsprinzip des Chan Bar-Rechens.....	159
Abb. 4.24:	Einbau eines aus vier Feldern bestehenden Chan Bar im Winkel von 40° im ethohydraulischen Modellgerinne, im Bild links der Bypass .....	159
Abb. 4.25:	Aufbau und Anströmung eines Louver (Draufsicht) in Kombination mit einem Bypass am abstromigen Ende .....	161
Abb. 4.26:	Aufbau und Anströmung eines Louvers im Vergleich zu einem konventionellen Schrägrechen (Draufsicht).....	161
Abb. 4.27:	Louver für ethohydraulische Tests in der wasserbaulichen Versuchshalle der Technischen Universität Darmstadt.....	162
Abb. 4.28:	Louver im Oberwasserkanal eines Wasserkraftwerks am Holyoke Dam am Connecticut River (USA) .....	162
Abb. 4.29:	Prinzipskizze einer umlaufenden Abschirmung.....	164
Abb. 4.30:	Oberer Scheitelpunkt einer Multi-Diskanlage.....	167
Abb. 4.31:	Funktionsweise Multi-Diskanlage.....	167
Abb. 4.32:	Ehemaliger Rollrechen mit aufgeschraubten Trögen an der Wasserkraftanlage Hadamar am Elbbach (Hessen).....	169
Abb. 4.33:	„Intelligenter Rechen“ am Wasserkraftwerk Griesheim .....	170
Abb. 4.34:	Prinzipskizze der Fischableitung am dynamischen Rechen...	171
Abb. 4.35:	Rollrechen in Haslach an der Kinzig (Baden-Württemberg)...	172
Abb. 4.36:	Detail des 10 mm-Lochblech-Rollrechens der WKA Steinach .....	172
Abb. 4.37:	Lageplan des Einlaufbauwerks für Bewässerungszwecke und Wasserkraftnutzung am Roza Dam, Yakima River (USA, Washington).....	174
Abb. 4.38:	Schematischer Längsschnitt durch eine Trommelsiebanlage .....	175
Abb. 4.39:	Aus einem Wedge-Wire-Screen gefertigtes Trommelsieb mit einem Durchmesser von ca. 1 m .....	175
Abb. 4.40:	Kühlwasserentnahme des Rheinhafendampfkraftwerks Karlsruhe (Baden-Württemberg).....	177

Abb. 4.41:	Teilabschirmung im Turbineneinlauf des Wasserkraftwerks Bonneville Dam am Columbia River (USA, Washington State).....	178
Abb. 4.42:	Schematische Darstellung einer Wasserkraftanlage mit Flachrechen, Spülrinne und Knickarm- bzw. Teleskoparm- Rechenreiniger .....	182
Abb. 4.43:	Reinigungsarm und Spülrinne an der Wasserkraftanlage Unkelmühle an der Sieg (Nordrhein-Westfalen).....	182
Abb. 4.44:	Knickarm-Rechenreiniger mit Grobrechen im oberen Bereich des Flachrechenfeldes an der Wasserkraftanlage Willstätt an der Kinzig (Baden-Württemberg) .....	183
Abb. 4.45:	Reinigungsbürste des Flachrechens der Wasserkraftanlage Willstätt an der Kinzig (Baden- Württemberg).....	183
Abb. 4.46:	Reinigungsbürste nach Reinigungseinsatz an der Wasserkraftanlage Willstätt an der Kinzig (Baden- Württemberg).....	184
Abb. 4.47:	Teleskoparmreiniger .....	185
Abb. 4.48:	Seilzugreiniger an einem Rechen mit vertikaler Stabausrichtung mit Mehrschalengreifer zur Entnahme von grobem Treibgut.....	186
Abb. 4.49:	Seilzugreiniger am Rechen mit vertikaler Stabausrichtung der Wasserkraftanlage Lahnstein an der Lahn (Rheinland- Pfalz); .....	186
Abb. 4.50:	Reinigungsanlage Horizontalrechen an der Wasserkraftanlage Auer Kotten an der Wupper (Nordrhein-Westfalen) .....	188
Abb. 4.51:	Knickarmreiniger und Schienensystem an einem Horizontalrechen.....	188
Abb. 4.52:	Reinigungsanlage Horizontalrechen an der Wasserkraftanlage Auer Kotten an der Wupper (Nordrhein-Westfalen) .....	189
Abb. 4.53:	Hydraulik-Ladekran mit Mehrschalengreifer zur Entnahme von grobem Treibgut an der Wasserkraftanlage Lehmen an der Mosel (Rheinland-Pfalz).....	190
Abb. 4.54:	Bemessungsrelevante Körpermaße von Fischen.....	193
Abb. 4.55:	Bei Stabrechen entscheidet die Körperdicke des Fisches über die Passierbarkeit.....	193

Abb. 4.56:	Bei mechanischen Barrieren mit Maschen oder Löchern entscheidet die Körperhöhe des Fisches über die Passierbarkeit.....	194
Abb. 4.57:	Längenfrequenz der in der Saison 2009 in der Weser bei Drakenburg bei der Abwanderung mittels Schokkerfängen registrierten Lachsmolts.....	200
Abb. 4.58:	Längenfrequenz der in der Saison 2009 in der Weser bei Drakenburg bei der Abwanderung mittels Schokkerfängen registrierten Meerforellensmolts .....	201
Abb. 4.59:	Längenfrequenz der in der Saison 2008/09 in der Weser bei Landesbergen bei der Abwanderung mittels Schokkerfängen registrierten Aale.....	202
Abb. 4.60:	Smolt-Bypass Kraftwerk Auerkotten .....	206
Abb. 4.61:	Anströmgeschwindigkeit vor einem Rechen .....	207
Abb. 4.62:	Vektoren der Anströmgeschwindigkeit an einem senkrecht stehenden und einem zur Sohle im Winkel $\alpha$ geneigt Rechen.....	208
Abb. 4.63:	Das Wasserkraftwerk Wahnhausen an der Fulda (Hessen).....	212
Abb. 4.64:	Aale im Rechengutcontainer Wasserkraftwerk Wahnhausen .....	213
Abb. 4.65:	Quergestreifte Aale im Rechengutcontainer der Wasserkraftanlage Wahnhausen.....	213
Abb. 4.66:	Anpressen eines Aals an einen 20 mm-Rechen im ethohydraulischen Versuch bei $V_A > 0,5$ m/s .....	214
Abb. 4.67:	Herkömmlicher Kraftwerksrechen im Schnitt: $\alpha \approx 80^\circ \beta \approx 90^\circ$ .....	218
Abb. 4.68:	Flachrechen im Schnitt $\alpha < 45^\circ$ , $\beta \approx 90^\circ$ .....	219
Abb. 4.69:	Schrägrechen in Draufsicht: $\alpha \approx 90^\circ$ , $\beta < 45^\circ$ .....	219
Abb. 4.70:	Verharrende Fische vor mechnischen Barrieren.....	220
Abb. 4.71:	Phasen der Umkehrreaktion von Aalen .....	222
Abb. 4.72:	Beispiele für flach geneigte Rechen an historischen Kleinwasserkraftanlagen im hessischen Mittelgebirge .....	223
Abb. 4.73:	Flachrechen mit vertikaler Stabausrichtung .....	224
Abb. 4.74:	Ethohydraulische Tests mit Aalen auf einem flach geneigten Wedge-Wire-Screen .....	225

Abb. 4.75:	Ein ca. 70 cm langer Aal passiert aktiv Schwanz-voran einen Flachrechen mit einer lichten Weite von 20 mm .....	226
Abb. 4.76:	Prinzipskizze des Modular Inclined Screen in Längsschnitt (oben) und Aufsicht (unten) .....	229
Abb. 4.77:	Versuchsaufbau mit einem Modular Inclined Screen im Wasserbaulabor des Alden Research Laboratory in Holden (USA) .....	230
Abb. 4.78:	Prinzipskizze des Eicher Screens im Längsschnitt.....	230
Abb. 4.79:	Versuchsanlage des Eicher-Screen im Wasserborlabor des Alden Research Laboratory in Holden (USA) .....	231
Abb. 4.80:	Versuchsanlage eines dort entwickelten Schachtkraftwerks an der TU München .....	233
Abb. 4.81:	Schrägrechen mit Spülschutz am stromabwärtigen Ende am Döllbach in Rothemann (Hessen) .....	234
Abb. 4.82:	Schrägrechen Wasserkraftanlage Baigts am Gave de Pau (Frankreich) .....	235
Abb. 4.83:	Wasserkraftanlage Planena, Ansicht von Oberwasser.....	236
Abb. 4.84:	Fischabstiegsrinne mit Drehtor an der Wasserkraftanlage Planena (Saale).....	237
Abb. 4.85:	Schema der Fischbewegung im Bereich einer schräg zur Anströmung angeordneten Barriere .....	238
Abb. 4.86:	Wellenförmige Schwimmbahn eines Fisches entlang einer schräg angeordneten mechanischen Barriere.....	239
Abb. 4.87:	Schema der Fischbewegung in der Nähe einer Barriere .....	240
Abb. 4.88:	Prinzip des Gierens bei Fischen .....	242
Abb. 4.89:	Ein Scherbretthamen wird vom Ufer aus mittels Steuerdraht durch das Gieren des Schwimmkörpers aufgespannt.....	242
Abb. 4.90:	Die Fäden einer Fadenharfe vor einem Schrägrechen werden tangential nicht ausgelenkt.....	243
Abb. 4.91:	Schrägrechen des Wasserkraftwerks „Auer Kotten“ an der Wupper (Nordrhein-Westfalen) .....	245
Abb. 4.92:	Prinzipskizze einer Tauchwand, Schnitt.....	246
Abb. 4.93:	Anordnung der Tauchwand am Wasserkraftwerk Bellows Falls am Connecticut River (USA) mit einem am abstromigen Ende gelegenen Bypass.....	247

Abb. 4.94:	Tauchwand vor dem Einlauf des Wasserkraftwerks Bellows Falls am Connecticut River (USA) .....	247
Abb. 4.95:	Schematische Darstellung eines der Tauchwandelemente, wie sie an den Wasserkraftwerken Sikfors (Piteälven) und Norrfors (Umeälven/Vindelälven) installiert wurden .....	248
Abb. 4.96:	Verhalten von Aalen an Leitelementen .....	249
Abb. 4.97:	Geschiebeschwelle unterhalb des Schrägrechens an der Wasserkraftanlage Auer Kotten an der Wupper (Nordrhein-Westfalen) .....	250
Abb. 4.98:	Einlauf des Wasserkraftwerks „Auer Kotten“ an der Wupper (Nordrhein-Westfalen) .....	254
Abb. 4.99:	Simulation massereicher Hauptströmung und Teilstömungen durch Bypassöffnungen .....	256
Abb. 4.100:	Sohlennaher ( $\rightarrow$ ) und oberflächennaher ( $\uparrow$ ) Bypass an der ECI Zentrale, Roermond, Niederlande .....	258
Abb. 4.101:	Aufteilung der abwandernden Exemplare ausgewählter Arten auf den sohlen- und den oberflächennahen Bypass an der ECI Zentrale, Roermond, Niederlande .....	259
Abb. 4.102:	Stromaufwärts vor dem Rechen gelegene Bypässe können nur zufällig aufgefunden werden .....	260
Abb. 4.103:	Schema der Bypassanordnung am Wasserkraftwerk Soeix am Gave d’Aspe (Frankreich) sowie bei gelenktem Oberwasserkanal .....	262
Abb. 4.104:	Flach zur Sohle in Fließrichtung geneigter Rechen mit Bypassrinne (Draufsicht) .....	264
Abb. 4.105:	Im Winkel von 15° zur Sohle in Fließrichtung geneigter 5 mm-Wedge-Wire-Screen mit Bypassrinne im Labor .....	265
Abb. 4.106:	Phasen der Verdriftung eines Aals .....	266
Abb. 4.107:	Im Winkel von 24° flach zur Sohle geneigter 5,3 mm Wedge-Wire-Screen vor dem Wasserkraftwerk Floeksmühle an der Nette (Rheinland-Pfalz) .....	267
Abb. 4.108:	Aal bei der Passage sowie ein weiteres Exemplar vor der nur knapp überstauten Rechenoberkante .....	268
Abb. 4.109:	Flach geneigter 10 mm-Rechen der Wasserkraftanlage „Unkelmühle“ an der Sieg (Nordrhein-Westfalen) .....	269
Abb. 4.110:	Bypasseinstieg am abstromigen Ende eines schräg zur Anströmung gestellten Rechens .....	271
Abb. 4.111:	Funktionsprinzip der Bottom Gallery® .....	272

Abb. 4.112:	Die nach einer Umkehrreaktion an einem Rechen stromauf fliehenden Aale (links) finden Schutz in der Bottom Gallery® (rechts) .....	273
Abb. 4.113:	Die Bottom Gallery® am Wasserkraftwerk Gerlachshausen am Main.....	274
Abb. 4.114:	Im Modellgerinne quer zum Rechen verlaufendes Zickzackrohr in Kombination mit Borstenbündeln.....	275
Abb. 4.115:	Von der Firma KLAWA an der Enz (Baden-Württemberg) installiertes Zickzackrohr.....	276
Abb. 4.116:	Bypassöffnung (links) strömungsparallel neben dem Rechen und (rechts) orthogonal dazu .....	279
Abb. 4.117:	Draufsicht auf einen Schrägrechen (links unten) mit orthogonaler Bypassöffnung (rechts).....	280
Abb. 4.118:	Vergleich der Vena contracta abstrom einer runden und einer flächengleichen quadratischen Bypassöffnung .....	282
Abb. 4.119:	Numerische Analyse der Strömungssignaturen innerhalb eines Konfusors von einer rechteckigen Bypassöffnung auf eine Röhre DN 300 .....	283
Abb. 4.120:	Trichterförmige Einlaufgestaltung des Lachsbypasses am Staudamm Poutès am Allier (Frankreich) .....	286
Abb. 4.121:	Einlauf des Lachsbypasses an der ECI-Centrale (Roermond NL) mit temporären Einbauten zur Optimierung der Strömungsverhältnisse .....	286
Abb. 4.122:	Mündung des Bypasses am Wasserkraftwerk Bellows Falls am Connecticut River (USA) .....	289
Abb. 4.123:	Konventioneller Rechen des Wasserkraftwerks Herrenhausen an der Leine (Niedersachsen) .....	293
Abb. 4.124:	Umlaufender Lochblechrechen an der Kinzig (Baden-Württemberg).....	293
Abb. 4.125:	Bonneville Dam am Columbia River (USA).....	296
Abb. 4.126:	Dauerhafte Verlegung der oberflächennahen Bypassöffnung an der Wasserkraftanlage Auer Kotten an der Wupper (Nordrhein-Westfalen) durch Äste und Laub.....	297
Abb. 4.127:	Detail einer MGR Turbine .....	302
Abb. 4.128:	Vergleich eines konventionellen Laufrades links mit einem MG-Runner rechts .....	303
Abb. 4.129:	Alden-Turbine .....	305
Abb. 4.130:	Pentair Fairbanks Nijhuis-Turbine.....	305

Abb. 4.131:	Fischschonende Turbine Dörverden.....	307
Abb. 4.132:	Das Pumpspeicherkraftwerk Geesthacht an der Elbe (Schleswig-Holstein).....	309
Abb. 4.133:	Zusammenhang zwischen dem Abfluss der Lahn am Standort Lahnstein (Rheinland-Pfalz) und dem Abwanderzeitpunkt von Lachssmolts zwischen dem 25. April und dem 27. Mai 1996.....	311
Abb. 4.134:	Fangzahlen von Salmonidensmolts in der Zeit vom 10. April bis zum 31. Mai 2009 sowie Abfluss der Weser am Pegel Drakenburg (Niedersachsen).....	311
Abb. 4.135:	MIGROMAT® am Wasserkraftwerk Wahnhausen an der Fulda (Hessen).....	314
Abb. 4.136:	Schematischer Aufbau des MIGROMAT®.....	315
Abb. 4.137:	Abflussaufteilung an der Staustufe Mühlheim bei Normalbetrieb des Wasserkraftwerkes, absolute Abflüsse (bei 500 m³/s abgeschnitten). ....	317
Abb. 4.138:	Abflussaufteilung an den Staustufen Mühlheim und Offenbach während des aalschützenden Betriebs in der Saison 2014/15 (bei 500 m³/s abgeschnitten).....	317
Abb. 4.139:	Mortalitätsrate von Blankaalen im Wasserkraftwerk Linne an der Maas (NL) in Abhängigkeit vom Turbinendurchfluss...	319
Abb. 4.140:	MIGROMAT® in Killaloe am Shannon (Irland).....	322
Abb. 4.141:	An der Brücke von Killaloe für den Fang von Aalen installierte Hamen.....	322
Abb. 4.142:	Heben einer Reuse mit Aalen vor der Sperrzone (Schild auf der Boje links) des Wasserkraftwerks Lehmen/Mosel.....	326
Abb. 4.143:	Skizze Reusenordnung (Dreiecke) an einem Moselstandort.....	327
Abb. 4.144:	Verletzungen von Aalen, die durch die Fangtechnik entstehen .....	329
Abb. 7.1:	Bedeutung der Strömungsstrukturen an einem Wasserkraftstandort für unterschiedliche Aspekte (exemplarisch).....	361
Abb. 7.2:	Querschnitt durch eine Rechenanlage parallel zur Gewässerachse, Definition der Verlusthöhe $h_{v,re}$ .....	364
Abb. 7.3:	Querschnittsformen von parallel angeströmten Rechenstäben und deren experimentell ermittelte Formbeiwerte $\beta$ , .....	365

Abb. 7.4:	Simulationsergebnisse für Rechen mit lichter Weite von 10 mm .....	366
Abb. 7.5:	Ergebnisübersicht mit Auswahl wichtiger Konfigurationen ....	369
Abb. 7.6:	Auswirkungen der Bypassabgabe auf die Jahresarbeit von Wasserkraftanlagen.....	372
Abb. 8.1:	Übersicht Standort Eddersheim .....	386
Abb. 8.2:	Draufsicht Stauanlage Eddersheim.....	387
Abb. 8.3:	Nordschleuse WKA Eddersheim, Blick Richtung Unterwasser .....	388
Abb. 8.4:	Unterwasserseitige Ansicht der WKA Eddersheim.....	389
Abb. 8.5:	Unterwasserseitige Ansicht des linken Wehrfeldes .....	390
Abb. 8.6:	Dauerlinie des Mains am Standort Eddersheim/Pegel Raunheim .....	391
Abb. 8.7:	Anordnung der einzelnen Turbinen und Wehrfelder Eddersheim .....	392
Abb. 8.8:	Dauerlinie Eddersheim mit Einsatzbereich Turbinenbetrieb..	393
Abb. 8.9:	Mögliche Abstiegskorridore an der WKA Eddersheim .....	394
Abb. 8.10:	Ganglinie Eddersheim 2008 mit Abstiegszeiten für Lachssmolts und Aale.....	395
Abb. 8.11:	Ganglinie Eddersheim 2009.....	395
Abb. 8.12:	Ganglinie Eddersheim 2010.....	396
Abb. 8.13:	Oberwasserseitige Ansicht der WKA Griesheim .....	401
Abb. 8.14:	Unterwasserseitige Ansicht der Wehranlage Griesheim.....	402
Abb. 8.15:	Dauerlinie des Mains am Pegel Osthafen .....	403
Abb. 8.16:	Verlaufskurve der monatlichen Durchschnittswerte für die Wassertemperatur [°C] im hessischen Untermain.....	406
Abb. 8.17:	Verlaufskurve der halbstündlichen Messungen der Wassertemperatur [°C] im hessischen Untermain.....	407
Abb. 8.18:	Verlaufskurve der monatlichen Durchschnittswerte für den Sauerstoffgehalt [mg/l] im hessischen Untermain .....	408
Abb. 8.19:	Verlaufskurve der monatlichen Durchschnittswerte für den pH-Wert im hessischen Untermain .....	409
Abb. 8.20:	Verlaufskurve der monatlichen Durchschnittswerte für die Leitfähigkeit [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] im hessischen Untermain.....	410

Abb. 9.1:	Lageplan Alternative 1, Schrägrechen mit horizontalen Stäben, Bypass am Wehr, beispielhaft am Standort Eddersheim .....	418
Abb. 9.2:	Längsschnitt Alternative 1, Schrägrechen mit horizontalen Stäben, Bypass am Wehr, beispielhaft am Standort Eddersheim .....	420
Abb. 9.3:	Lageplan Alternative 2, Schrägrechen mit horizontalen Stäben, Bypass am Ufer, beispielhaft am Standort Eddersheim .....	424
Abb. 9.4:	Lageplan Alternative 3, Flachrechen mit vertikalen Stäben, beispielhaft am Standort Eddersheim .....	426
Abb. 9.5:	Detail Alternative 3, Flachrechen mit vertikalen Stäben .....	427
Abb. 9.6:	Rechen (10 mm) mit Grobrechen und Bypassöffnungen an der WKA Willstätt.....	429
Abb. 9.7:	Längsschnitt Alternative 3, Flachrechen mit vertikalen Stäben, beispielhaft am Standort Eddersheim.....	430
Abb. 9.8:	Wertzahlmatrix für die Auswahl der Vorzugsalternative .....	437
Abb. 10.1:	Funktionsprinzip der Radiotelemetrie und der akustischen Telemetrie .....	476
Abb. 10.2:	Akustischer Sender L-AMT 5.1 (Hintergrund ist ein mm-Raster) .....	477
Abb. 10.3:	Geöffnetes Hydrophon .....	478
Abb. 10.4:	Absenken eines Hydrophons an einem Ausleger .....	479
Abb. 10.5:	Zwei Diamantbojen an ihren jeweiligen Ankergewichten .....	480
Abb. 10.6:	Positionierung der Hydrophone an der Staustufe Offenbach.....	481
Abb. 10.7:	Setzen des Schnittes bei einem Blankaal, durch den der Sender in die Bauchhöhle eingeführt wird .....	482
Abb. 10.8:	Mit chirurgischer Heftung verschlossene Wunde nach Implantation des Senders.....	482
Abb. 10.9:	Bewegungsmuster eines Aals im Oberwasser der Staustufe Kesselstadt.....	484
Abb. 10.10:	HDX-Transponder der Größen 11,9 x 2 mm, 23 x 3,9 und 32 x 3,9 mm .....	486
Abb. 10.11:	Funktionsprinzip der HDX-Technologie .....	487
Abb. 10.12:	6,0 m hohe und 1,3 m breite Rahmenantenne aus Kunststoff .....	488

Abb. 10.13:	Als Seilantenne konstruierte „schwimm durch“-Antenne in einem naturnahen Fischweg.....	489
Abb. 10.14:	Auf der Sohle eines Mutterbettes verlegte „schwimm drüber“-Antenne in Strickleiterbauweise .....	489
Abb. 10.15:	Subkutane Injektion eines 12 mm langen PIT-Tags dorsolateral hinter dem Kopf eines Aals.....	490
Abb. 10.16:	Transpondierung eines kleinschuppigen Salmoniden mit einem 23 mm langen PIT-Tag.....	491
Abb. 10.17:	Schema der mit HDX-Antennen überwachten Wanderkorridore am Auer Kotten .....	492
Abb. 10.18:	Rekonstruktion des Bewegungsmusters einer Barbe im Unterwasser und in den beiden Fischaufstiegsanlagen am Wehr Geesthacht an der Elbe.....	493
Abb. 10.19:	Sonarkörper des DIDSON™ 300 .....	495
Abb. 10.20:	DIDSON™-Aufnahme verschiedener Fische einer Länge zwischen 5 und 45 cm im Identification Mode .....	496
Abb. 10.21:	Längsschnitt durch den Einlauf, das Spiralgehäuse und eine der Kaplan-Turbinen des Wasserkraftwerks Eddersheim .....	500
Abb. 10.22:	Schwimmponton zur Aufnahme der im Hamen gefangenen Fische .....	501
Abb. 10.23:	Schokker an der Mittelweser in Ruhestellung, mit angehobenen Unterbäumen (Ansicht in Fließrichtung) .....	507
Abb. 10.24:	Schokker an der Mittelweser (Seitenansicht) .....	508
Abb. 10.25:	An einem Fisch befestigter HI-Z Turb´n-Tag in komprimiertem (links) und gefülltem (rechts) Zustand, schematisch.....	509
Abb. 10.26:	Beispiele äußerer Verletzungen bei Güstern.....	513
Abb. 10.27:	Hämatome bei einem Stint.....	514
Abb. 10.28:	Rötungen an Körperfläche und Flossen bei einem Zander ...	514
Abb. 10.29:	Phasen einer Sektion, am Beispiel eines Güsters.....	515
Abb. 10.30:	Typische Angelverletzung an der Oberlippe eines Döbels ....	517
Abb. 10.31:	Kratzer einer Bachforelle nach vergeblichen Zugriffsversuchen eines Kormorans.....	517
Abb. 10.32:	Tiefe Fleischwunden nach Graureiher-Angriff.....	518
Abb. 10.33:	Schwere Verletzungen an der Flanke eines Döbels.....	518

Abb. 10.34: Schuppenverluste in Form der Struktur des Fangnetzes  
bei einem Lachssmolt.....519



## Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1:	Alter und Gesamtlänge juveniler Wanderstadien anadromer Arten .....	41
Tab. 3.2:	Anhand markierter Fische ermittelte Wanderdistanzen potamodromer Arten.....	60
Tab. 3.3:	Jahresrhythmik juveniler Wanderstadien anadromer Arten.....	70
Tab. 3.4:	Endgeschwindigkeit in der Abhängigkeit von Fischlänge und Höhe der zurückgelegten Strecke im freien Fall .....	79
Tab. 3.5:	Grenzwerte für das Mortalitätsrisiko bei der Passage von Wehren.....	80
Tab. 3.6:	Durchfluss, Drehzahl, und Mortalitätsrate bei den Untersuchungen zur Turbinenmortalität mit Regenbogenforellen .....	94
Tab. 3.7:	Letale Druckwellen für verschiedene Fischarten.....	110
Tab. 3.8:	Ermittlung der Gesamtüberlebensrate abwandernder Blankaale für das fiktive Beispiel von Anderer et al. (2008) ...	127
Tab. 4.1:	Formeln zur Berechnung der Körperdicke $D_{\text{Fisch}}$ und Körperhöhe $H_{\text{Fisch}}$ in Abhängigkeit von der Gesamtlänge $L_{\text{Fisch}}$ .....	195
Tab. 4.2:	Passierbarkeit von Rechen in Abhängigkeit von Länge und Eintwicklungsstadium .....	198
Tab. 4.3:	Passierbarkeit von Rechen in Abhängigkeit von der Fischlänge sowie die zugehörige kritische Schwimmgeschwindigkeit.....	217
Tab. 4.4:	Abwanderquoten von Lachssmolts und Blankaalen über Fischeaufstiegsanlagen.....	291
Tab. 4.5:	Zeiträume, Standorte, Methoden und Resultate von Monitoringuntersuchungen zum aalschonenden Betrieb von Wasserkraftanlagen.....	323
Tab. 4.6:	Fangmengen, Zahl der Transporte und Kosten für Fang und Transport von Aalen im Mainingebiet (STMELF 2013) .....	328
Tab. 6.1:	Derzeitige Anwendungsgrenzen von mechanischen Barrieren .....	347
Tab. 6.2:	Wissensdefizite mit Angabe von Untersuchungsmethoden, -dauer, -zeitraum und Relevanz .....	349

Tab. 7.1:	Untersuchte Konfigurationen für Projektierung und Vorbemessung des Rechensystems für ein Schweizer Kraftwerk an der Limmat ( $Q_A = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	382
Tab. 8.1:	Anlagendaten der Wasserkraftanlage Eddersheim .....	390
Tab. 8.2:	Fischfaunistische Referenz für den hessischen Untermain sowie Gildenzugehörigkeit der Arten.....	398
Tab. 8.3:	Anlagendaten der WKA Griesheim .....	402
Tab. 9.1:	Abmessungen von mechanischen Barrieren.....	413
Tab. 9.2:	Baukostenannahme für Alternative 1 .....	423
Tab. 9.3:	Baukostenannahme für Alternative 2 .....	426
Tab. 9.4:	Baukostenannahme für Alternative 3 .....	431
Tab. 10.1:	Übersicht über die zur Beantwortung der einzelnen biologischen Fragestellungen geeigneten Methoden .....	451

## Abkürzungsverzeichnis

A	durchflossene Fläche
ATV	Abwassertechnische Vereinigung e. V.
ATV-DVWK	Abwassertechnische Vereinigung - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (bis 2004)
BAFF	Bio-Acoustic Fish Fence
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BinSchStrO	Binnenschiffahrtsstraßen-Ordnung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
D	Dekompressionsrate
$D_{\text{Fisch}}$	maximale Dicke des Fischkörpers
$d_{\text{max}}$	maximaler Durchmesser (hier: Kreisfläche des Turbinenquerschnitts)
$d_{\text{min}}$	minimaler Durchmesser (hier: Kreisfläche der innenliegenden Narbe)
$d_{\text{M,L}}$	lichte Weite der Maschen oder Durchmesser der Löcher undurchlässiger mechanischer Barrieren
DN	Nennweite, innerer Durchmesser eines Rohres
$d_{\text{R}}$	lichte Weite der Rechenstäbe
$d_{\text{St}}$	lichter Stababstand undurchlässiger mechanischer Barrieren
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (seit 2004)
ECl	„Elektro Chemische Industrie“-Komplex
FAA	Fischaufstiegsanlage
FELASA	Federation of European Laboratory Animal Science
FFH	Fauna-Flora-Habitat
FGE	Flussgebietseinheit
FSR	„FischSchonRechen“
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GSK	Gewässerstrukturgüte
$H_{\text{Fisch}}$	maximale Höhe des Fischkörpers

HFischG	Hessisches Fischereigesetz
HFO	Hessische Fischereiverordnung
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
$h_{v,re}$	bernoulli'sche Verlusthöhe; Fallhöhenverlust
IEC	Internationale elektrotechnische Kommission
IGB	Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei
IKSMS	Internationale Kommission zum Schutz der Mosel und der Saar
$K_{dick}$	relative Dicke des Fischkörpers in Relation zur Gesamtlänge
$K_{hoch}$	relative Höhe des Fischkörpers in Relation zur Gesamtlänge
L; l	Fischkörperlänge
LFULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Sachsen)
$l_{max}$	maximale Fischkörperlänge
M	Gesamtmortalitätsrate
$M_{gesamt}$	prognostizierte Mortalität
$M_{Kollision}$	Wahrscheinlichkeit, infolge einer Kollision in der Turbine zu sterben
MNQ	mittlerer Niedrigwasserabfluss
MQ	mittlerer Abfluss
$M_{Spalten}$	Wahrscheinlichkeit, durch das Einklemmen in einem Spalt getötet zu werden
MUNLV	Ministerium für Umwelt, Natur, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
N	Anzahl der Laufradschaufeln
n	Drehzahl; Anzahl der Standorte/ Messungen
p	Gesamtüberlebensrate
$p_{gesamt\_T}$	prognostizierte Mortalität
$p_{Klemm}$	Wahrscheinlichkeit, in einen Spalt zu geraten
$p_{Klemm\_T}$	Wahrscheinlichkeit, beim Einklemmen in den Spalt letal verletzt zu werden
$p_{Koll}$	Kollisionswahrscheinlichkeit
$p_{Koll\_T}$	Wahrscheinlichkeit, bei Kollision den Tod zu erleiden

$P_1$	Adaptionsdruck (im Oberwasser)
$P_2$	minimaler Druck hinter den Laufradschaufeln
$q$	Überlebensrate am Einzelstandort
$Q$	Durchfluss
$Q_A$	Ausbaudurchfluss einer Wasserkraftanlage
RP	Regierungspräsidium
SPA	Sound Projector Array
STMELF	Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
$t$	Zeit; Dauer; Dicke der Vorderkante einer Laufradschaufel
$T_{\text{Ausdauer}}$	Ausdauer (Zeit, die ein Fisch eine bestimmte Schwimmgeschwindigkeit aufrechterhalten kann)
TierSchG	Tierschutzgesetz
U	Umdrehungen
UBA	Umweltbundesamt
$V_A$	Anströmgeschwindigkeit
$V_{\text{absol}}$	Eintrittsgeschwindigkeit
$V_{\text{Dauer}}$	Dauerschwimmgeschwindigkeit
$V_{\text{dis}}$	Geschwindigkeit mit der sich der Fisch entlang der Barriere bewegt
$V_{\text{gesteigert}}$	gesteigerte Schwimmgeschwindigkeit
$V_{\text{kritisch}}$	kritische Schwimmgeschwindigkeit
VLH	Very-Low-Head (Turbine)
$V_{\text{mittel}}$	Durchschnittsgeschwindigkeit, hier: Rinnendurchfluss pro senkrecht durchlossene Rinnenquerschnittsfläche
$V_N$	theoretische Normalgeschwindigkeit
$V_{\text{relativ}}$	Relativgeschwindigkeit des Fisches
$V_{\text{Sprint}}$	Sprintgeschwindigkeit
$V_T$	theoretische Tangentialgeschwindigkeit
$V_{\text{Tr}}$	Transportgeschwindigkeit des Fisches über dem Grund
$V_{\text{überGrund}}$	absolute Geschwindigkeit des Fisches
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WKA	Wasserkraftanlage