

Anatomisch-makroskopische Untersuchungen von Fischaugen

Eine interaktive Anleitung zur Herstellung und Fotografie von
ophthalmologischen Präparaten als Grundlage zur Fischophthalmologie

von Andreas Sebastian Reimann

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Anatomisch-makroskopische Untersuchungen von Fischaugen

Eine interaktive Anleitung zur Herstellung und Fotografie von
ophthalmologischen Präparaten als Grundlage zur Fischophthalmologie

von Andreas Sebastian Reimann
aus Backnang

München 2015

Aus dem Zentrum für Klinische Tiermedizin der Tierärztlichen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität München

Klinik für Vögel, Reptilien, Amphibien und Zierfische

Arbeit angefertigt unter der Leitung von: Univ.-Prof. Dr. Rüdiger T. Korb

Gedruckt mit der Genehmigung der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Joachim Braun

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. Rüdiger T. Korbelt

Korreferent/en: Univ.-Prof. Dr. Roberto Köstlin

Tag der Promotion: 31. Januar 2015

Für meine Familie

INHALTSVERZEICHNIS

I. EINLEITUNG.....	1
II. LITERATURÜBERSICHT	3
1. Das Fischeauge – Anatomie, Histologie und Physiologie.....	3
1.1 Augenhöhle – Orbita	6
1.2 Augapfel – Bulbus oculi.....	6
1.3 Augenanhangsgebilde – Adnexe	7
1.3.1 Muskeln des Augapfels – Musculi bulbi.....	7
1.3.2 Augenlider – Palpebrae	8
1.4 Äußere Augenhaut – Tunica fibrosa bulbi	9
1.4.1 Lederhaut – Sklera.....	9
1.4.2 Hornhaut – Kornea.....	9
1.5 Mittlere Augenhaut – Tunica vasculosa bulbi	10
1.5.1 Regenbogenhaut – Iris.....	10
1.5.2 Strahlenkörper – Corpus ciliare	10
1.5.3 Aderhaut – Choroidea.....	11
1.6 Innere Augenhaut – Tunica interna bulbi – Netzhaut – Retina.....	11
1.7 Augenkammer – Camera bulbi.....	13
1.8 Linse – Lens	14
1.9 Glaskörper – Corpus vitreum.....	16
1.10 Processus falciformis.....	16
1.11 Blutversorgung und Innervation des Fischeauges	17
1.11.1 Blutversorgung	17
1.11.2 Innervation.....	18
1.12 Augenerkrankungen bei Fischen.....	18
1.12.1 Bulbus	19
1.12.2 Kornea.....	20
1.12.3 Linse.....	20
1.12.4 Retina	21
2. Pathologisch-anatomische Untersuchungen des Auges	23
2.1 E nukleation von Augen	23
2.2 Fixation von Augenpräparaten	23
2.3 Kalottierung von Augenpräparaten.....	24

3. Ophthalmologische Fotografie und Präparat-fotografie	25
3.1 Ophthalmologische Präparatfotografie bei Fischen	25
3.2 Grundlagen zur Optik und Begriffsdefinitionen.....	26
3.2.1 Nah- und Makrofotografie	26
3.2.2 Abbildungsmaßstab und Schärfentiefe	27
3.2.3 Schärfentiefe und effektive Blende	28
3.2.4 Schärfenkreis und Streukreisdurchmesser.....	29
3.3 Makrofotografie.....	29
3.3.1 Abbildungsmaßstab und Schärfentiefe	30
3.3.2 Beleuchtung.....	31
3.3.3 Hintergrund und Freistellung.....	31
3.3.4 Digitale Fotografie.....	32
3.4 Digitale Bildbearbeitung	33
4. Interaktive Lernprogramme.....	35
4.1 Computerbasiertes Lernen in der Tiermedizin	35
4.2 Didaktische Anforderungen	36
4.3 Gestaltung von Lernprogrammen.....	36
4.4 Gliederung und Navigation.....	37
III. MATERIAL UND METHODEN.....	38
1. Zielsetzung.....	38
2. Problematik.....	38
3. Untersuchungsmaterial	39
4. Präparationstechnik.....	41
4.1 E nukleation.....	41
4.2 Fixationsmedium	42
4.3 Präparation der vorderen Augenkammer	42
4.4 Fixationsdauer und Lagerung der Präparate.....	43
4.5 Kalottierung	44
5. Histologie.....	45
5.1 Anfertigung der Schnittpräparate	45
5.2 Fotografie	47
6. Fotografische Dokumentation.....	47

6.1	Technische Ausstattung	47
6.2	Objekt- und Kameraanordnung, Beleuchtung	47
6.3	Kameraeinstellungen.....	49
6.4	Abbildungsmaßstab und Schärfentiefe	50
6.5	Fokussierebene	50
6.6	Digitale Fotografie	51
6.6.1	Bearbeitungssoftware und Bildkomposition	51
6.6.2	Darstellung der Größenverhältnisse	51
6.6.3	Copyrightschutz	51
7.	Erstellung des Lernprogramms	52
7.1	Programmierung.....	52
7.2	Bereitstellung zur Nutzung	54
IV.	ERGEBNISSE.....	55
1.	Enukleations- und Präparationstechnik.....	55
2.	Fixation und Kalottierung	56
3.	Fotografie	57
3.1	Kameratechnik.....	57
3.2	Hintergrund und Freistellung	57
3.3	Blende, Abbildungsmaßstab und Schärfentiefe	57
3.4	Makroskopische Darstellung des Fischauges – Bildteil	58
3.4.1	Anatomie des Fischauges.....	58
3.4.2	Pathologie des Fischauges.....	70
3.4.3	Artefakte.....	80
4.	Digitale Fotografie	83
5.	Histologische Untersuchung.....	83
6.	Internetbrowserbasiertes Lernprogramm.....	88
6.1	Gestaltung und Struktur des Lernprogramms	88
6.2	Bildergalerien.....	91
V.	DISKUSSION	93
1.	Methodik.....	93
1.1	Enukleations- und Präparationstechnik.....	93
1.2	Fotografische Dokumentation	94

1.2.1	Makrofotografie – technische Ausrüstung.....	95
1.2.2	Kameraeinstellungen	96
1.2.3	Digitale Fotografie und Bildbearbeitung.....	97
2.	Erstellen des internetbrowserbasierten Lernprogramms	98
3.	Abschließende Betrachtung.....	100
VI.	ZUSAMMENFASSUNG.....	101
VII.	SUMMARY.....	103
VIII.	LITERATURVERZEICHNIS.....	104
IX.	ANHANG	120
1.	Abbildungsverzeichnis	120
2.	Tabellenverzeichnis	127
3.	Copyrightgeschützte Inhalte	128
4.	Danksagung.....	129

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abb.	Abbildung
abs.	absolut
AM	Abbildungsmaßstab
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cm	Zentimeter
D	dorsal, rückenwärts
dest.	destillata, destilliert
dpi	dots per inch, Maßeinheit für die Auflösung im Druck
DSLR	digital single-lens reflex
f	Brennweite
<i>f</i>	nominelle Blendenzahl bei der Aufnahme
HE-Färbung	Hämatoxylin-Eosin-Färbung
OCT	optical coherence tomography
ml	Milliliter
mm	Millimeter
Od	Oculus dexter, rechtes Auge
OS	Oculus sinister, linkes Auge
PC	Personal Computer
u.a.	unter anderem
V	ventral, bauchwärts
z.B.	zum Beispiel

BEDIENUNGSHINWEISE

Online-Version

Das zugehörige Lernprogramm ist über folgende Internetadresse zugänglich:

www.vogelklinik.net

Benutzername: **vogelklinikLMU2015**

Passwort: **fisheye2015**

CD-ROM

Windows-PCs: **selbststartend**, oder „**ShellExecute.exe**“ ausführen

Apple Mac: Doppelklick auf „**Tutorial starten**“,
oder Datei „**index.html**“ im Ordner „**fisheye**“ öffnen

I. EINLEITUNG

Die Evolution hat Fische in ihrer Anatomie und Physiologie den unterschiedlichen Lebensräumen im Element Wasser besonders angepasst. So steht der reich entwickelten Fischfauna zur Orientierung ein Spektrum an Sinnesorganen zur Verfügung. Dieses komplexe und perfekt angepasste Zusammenspiel wird nicht unerheblich vom Sehorgan (Organon visus) unterstützt. Das Auge als fotosensitives Organ hat dabei physikalische Grenzbereiche, vor allem unter Wasser, aber auch in der Atmosphäre über Wasser, zu bewältigen. Zudem leben Fische in den unterschiedlichsten Wasserwelten, von den großen Tiefen der Ozeane über klare Quellwasserflüsse bis hin zu trüben Süßwasserseen. Die visuelle Orientierung dient den Fischen, wie auch den landlebenden Wirbeltieren, dem Beuteerwerb, der Fortpflanzung sowie dem Fluchtverhalten. Das Auge (Oculus), in seiner großartigen strukturellen und funktionellen Komplexität, leistet hierbei einen wesentlichen Beitrag (Dukes, 1975).

Die moderne Aquakultur nimmt in Deutschland mit zahlreichen Arten von Süß- und Meerwasserfischarten sowohl in der Fischereiwirtschaft als auch in der Zierfischhaltung einen wichtigen ökonomischen Stellenwert ein (Williams & Whitaker, 1997). Des Weiteren ist die Haltung von Fischen – als wertvolle Versuchstiere – im Bereich der medizinischen Forschung stark vertreten. Um dem Menschen als Nahrungsmittel zu dienen, müssen Fische alle Kriterien für ein gesundes Lebensmittel erfüllen, darüber hinaus rückt die Zierfischhaltung durch Aquaristik- und Gartenteichhaltung immer stärker in den Fokus. Durch eine zunehmend intensive, emotionale Mensch-Tier-Beziehung in westlichen Industrienationen gewinnt insbesondere auch das Einzeltier immer mehr an Bedeutung. In den letzten Jahren spezialisierten sich immer mehr praktizierende Tierärzte gezielt auf die Behandlung von privat gehaltenen Fischen und Exoten (Wildgoose, 2006).

Erkrankungen jeglicher Ätiologie zeigen sich bei Fischen häufig zuerst an der Hautoberfläche; um prophylaktisch und vor allem rechtzeitig zu

therapieren, ist das Erkennen von bereits beginnenden pathologischen Veränderungen am Auge daher essentiell (Williams & Whitaker, 1997). Vor allem auch unter tierseuchenhygienischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist eine sichere Diagnose zu Beginn einer jeden Therapie entscheidend.

Pohl (2014) und Brandstetter (2014) konnten bereits okuläre 2D- und 3D-Sonographie bei Fischaugen erfolgreich etablieren. Des Weiteren bestehen mit der optischen Kohärenztomographie und der digitalen Scanner-Ophthalmoskopie hochsensitive, nicht-invasive Techniken zur routinemäßigen Untersuchung ophthalmologischer Befunde (Korbel et al., 2014). Ziel dieser Abhandlung ist es, eine Grundlage für die Fischophthalmologie zur Verbesserung bisheriger und zukünftiger Methoden im Rahmen der Diagnose von Augenerkrankungen bei Fischen zu erarbeiten. Besonders die Darstellung normal-anatomischer Verhältnisse des Fischauges sowie eine Anleitung zur Präparation und fotografischen Dokumentation stehen im Vordergrund. Bereits bestehende pathologisch-anatomische Untersuchungsmethoden sollen dabei berücksichtigt und evaluiert werden.

Um eine praktikable Nutzung für Studierende der Tiermedizin wie auch für praktizierende Tierärzte und den Bereich der medizinischen Forschung zu gewährleisten, soll ein online Lernprogramm für die Nutzung am PC zur Schritt-für-Schritt-Anleitung erstellt werden. Diese mit gängigen Internetbrowsern zugängliche Anwendung soll zum einen eine strukturierte und einfach verständliche Darstellung und zum anderen eine besonders anschauliche und didaktisch sinnvolle Bereitstellung des Bildmaterials ermöglichen. Unabhängig von der gedruckten Version können damit die Inhalte dieser Arbeit genutzt werden.

II. LITERATURÜBERSICHT

1. Das Fischauge – Anatomie, Histologie und Physiologie

Diese Arbeit befasst sich mit den Augen von Knochenfischen (Teleostei), die das am höchsten entwickelte und spezialisierte Auge aller Fische aufweisen (Duke-Elder, 1958). Es bestehen aber große Unterschiede in der Vielfalt der anatomischen Strukturen sowie der funktionellen Anpassung (Nicol & Somiya, 1989; Williams & Whitaker, 1997; Jurk, 2002). Der Aufbau der Augen von Knochenfischen ist dem landlebender Wirbeltiere und dem des Menschen sehr ähnlich (Dukes, 1975; Roberts & Ellis, 2001), obwohl sich Fische hauptsächlich unter Wasser orientieren müssen.

„In seiner Adaptionbreite sucht das Auge seinesgleichen: es kann für das Sehen in Wasser und in Luft, bei Tag oder bei Nacht, auf kurze oder auf große Entfernung und für das Sehen in Habitaten, die vom Himmel bis in die Tiefen des Ozeans reichen, abgewandelt sein“ (Hildebrand et al., 2003). Es existiert daher nicht nur als hoch differenziertes Linsenauge bei Wirbeltieren, sondern auch in Form von Pigmentbecherzellen, Grübchen-, Linsen- und Facettenaugen bei vielen verschiedenen Tiergattungen unterschiedlicher evolutionärer Entwicklungsstufen (Nickel et al., 1992). Schon Charles Darwin bezeichnete das Auge als anschauliches Beispiel, um die Evolution zu begreifen, und somit existieren im Tierreich Augen einfacher wie vollkommener Bauart (Darwin, 1859).

Die Augen der Fische müssen in völlig unterschiedlichen Gewässern ihre Funktion erfüllen und zeigen daher eine weitaus größere Vielfalt untereinander als die Augen landlebender Tiere (Bone & Marshall, 1997). Es existieren jedoch auch Fische, die in unterirdischen Höhlen beheimatet sind und trotz Augenanlagen nahezu blind sind (Lüling, 1953; Peters & Peters, 1966). Mit zunehmender Tiefe oder abnehmender Reinheit des Gewässers verändern sich die Lichtverhältnisse unter Wasser stark, Kontraste und das Farbsehen sind aufgrund des geringeren Lichtspektrums erschwert (Lythgoe, 1975, 1980). Diesen Bedingungen

sind die in ihrem jeweiligen Habitat lebenden Fische perfekt angepasst. Normales Sonnenlicht erreicht eine Wassertiefe von maximal 200 Metern, daher haben Tiefseefische für ihren nahezu lichtleeren Lebensraum besonders große Augen entwickelt (Schwartz, 1971; Douglas et al., 1998), ihnen ist damit aber nur eine Unterscheidung von Hell und Dunkel möglich (Hoffmann, 2005).

Das Auge als „Organ des Gesichtssinnes“ hat als Aufgabe die einfallenden Lichtstrahlen – Energie in Form von elektromagnetischen Schwingungen – eines begrenzten, sehr kurzen Wellenbereichs aufzunehmen und der Netzhaut (Retina) zuzuleiten. Die dort sitzenden Sinneszellen, die Stäbchen und Zapfen, werden durch das einfallende Licht in Erregungszustände versetzt, welche als Nervenimpulse über den Sehnerv (Nervus opticus) an das zentrale Nervensystem weitergeleitet werden (Demoll et al., 1964). Der eigentliche lichtleitende, das heißt dioptrische, Apparat besteht aus der Hornhaut (Kornea), der Linse (Lens) und dem Glaskörper (Corpus vitreum) (Demoll et al., 1964). Er sammelt und bündelt das einfallende Licht und führt es den Sinneszellen zu. Um jedoch Gegenstände aus einer bestimmten Entfernung scharf abbilden zu können, bedarf es noch weiterer Hilfsapparate (Demoll et al., 1964).

Anders als der Mensch und die meisten landlebenden Wirbeltiere sind Fische aufgrund der starren Linse in der Lage, die Position der Linse zu verschieben, um einen Gegenstand zu fokussieren und somit scharf darzustellen (Akkommodation) (Beer, 1894). Das Gesichtsfeld von Fischen ist abhängig von der Position der Augen am Kopf der Tiere und der Form des Augapfels. Seitlich liegende Augen ermöglichen einen optimalen Rundumblick für jagende Fische, wohingegen eine frontale Lage das Gesichtsfeld einschränkt. Tiefseefische weisen häufig eine tubuläre Form des Bulbus auf, diese Bauart bedingt eine Einengung des Gesichtsfeldes. Daher besitzt der Gespensterfisch (*Dolichopteryx longipes*) ein nach oben gerichtetes Röhrenauge mit einer nach unten durchsichtigen Hornhaut; eine sphärische Spiegelstruktur aus Guaninkristallen ermöglicht somit eine Vergrößerung des Gesichtsfeldes (Wagner et al., 2009).

Das Sehvermögen von Fischen variiert stark innerhalb der verschiedenen Arten. Barschartige Schützenfische (*Toxotes jaculatrix*) haben ein

hervorragendes Sehvermögen, sie sind in den Tropen beheimatet und schießen mit ihrer einzigartigen Jagdtechnik ihr Beutetiere von Blättern über der Wasseroberfläche. Dabei sind die Tiere in der Lage, die Brechung der Lichtstrahlen von Wasser zu Luft einzuschätzen, und treffen teilweise aus bis zu vier Metern Entfernung (Schlegel et al., 2006).

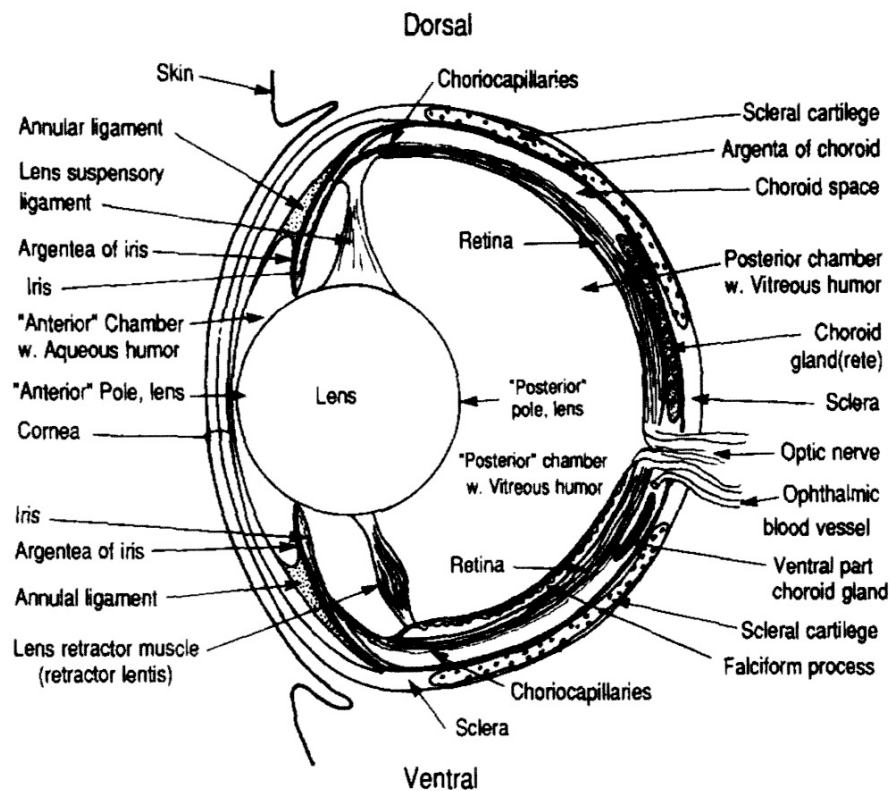


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Knochenfischauges (Hargis Jr, 1991); (mit freundlicher Genehmigung von Elsevier Verlag)

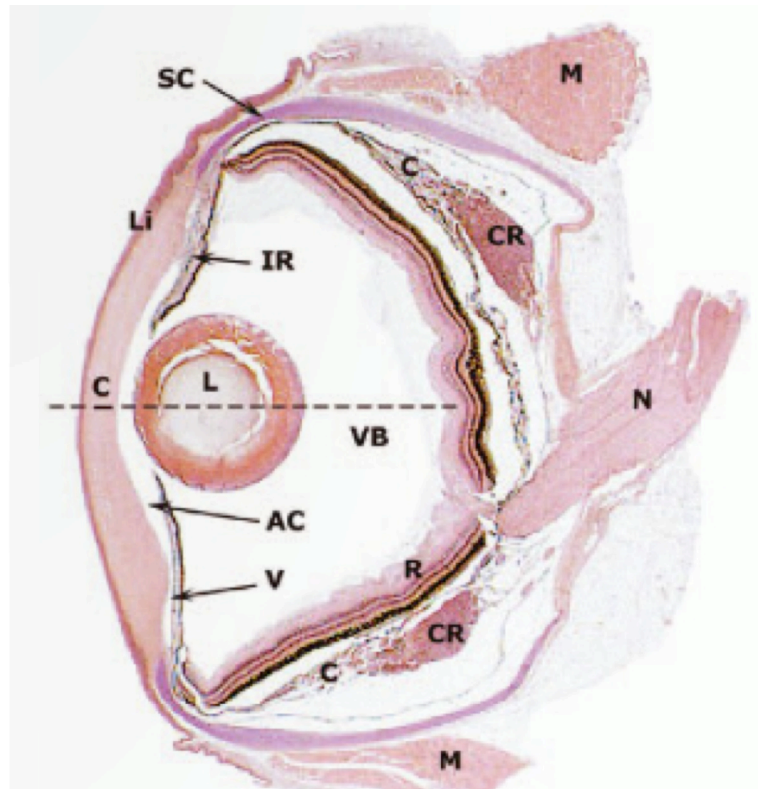


Abbildung 2: Innere Struktur des Auges eines atlantischen Lachses (Koppang & Bjerkås, 2006) gestrichelte Linie: optische Achse, SC: Skleralknorpel, Li: Limbus, C: Kornea, CR: Gefäße der Choroidea, C: Choroidea, IR: Iris, R: Retina, L: Linse, AC: hintere Augenkammer, V: vordere Ziliarspalte, M: Augenmuskulatur, N: Sehnerv, VB: Glaskörper (mit freundlicher Genehmigung von Scotian Press)

1.1 Augenhöhle – Orbita

Die Orbita bei Fischen stellt keine eigentliche Augenhöhle dar, vielmehr bilden die umgebenden Schädelknochen nur einen engeren oder weiteren Raum, in dem der Augapfel (Bulbus oculi) liegt und sich bewegen kann (Demoll et al., 1964). Das den Augapfel umgebende fetthaltige Bindegewebe (retobulbäres Fettgewebe) dient, neben den Augenmuskeln, dem Sehnerv (Nervus opticus) und den Blutgefäßen der Verbindung mit dem Schädel. Darüber hinaus erfüllt es auch eine dämpfende Funktion (Duke-Elder, 1958; Jurk, 2002)

1.2 Augapfel – Bulbus oculi

Bei Fischen wie auch bei Säugetieren (Mammalia) stellt der Augapfel eine Hohlkugel dar. Ihr Wandaufbau ist aus drei Häuten, deren Inhalt aus wässrigem bis teilweise weich-elastischem oder gallertigem Material

besteht. Bei den meisten Knochenfischen liegen die paarigen Augen seitlich am Schädel, begrenzt durch die knöcherne Orbita.

Gemeinsam mit der transparenten, gefäßlosen Hornhaut (Kornea) bildet die weiße undurchsichtige Lederhaut (Sklera) die äußere Augenhaut (Tunica externa bulbi, Tunica fibrosa bulbi) und gibt dem Augapfel somit seine kugelige Gestalt. Bei den meisten Knochenfischen ist der Bulbus von elliptischer Form, wobei der vordere Teil meist abgeflachter ist als der hintere. Duke-Elder (1958) stellt fest, dass langsam schwimmende Fische einen meist sphärischeren Bulbus aufweisen als schnell schwimmende Arten. Die Augenform verändert sich, je tiefer die Fische leben, und wird von zunehmend tubulärer Gestalt (Pointer et al., 2007).

Fische müssen zur Vergrößerung ihres Blickfeldes aufgrund ihres unbeweglichen Nackens und der teilweise nur rudimentär angelegten Augenmuskeln ihre Körperposition verändern (Duke-Elder, 1958; Wilcock & Dukes, 1989; Millichamp, 1991). Die Größe des Bulbus ist im Verhältnis zur Körpergröße stark unterschiedlich (Koppang & Bjerkås, 2006). Der Augapfel bei Fischen vermag mit zunehmendem Lebensalter in seiner Größe zu wachsen. Zwischen dem Hornhautepithel und der Haut umläuft ein zirkulärer Sulcus den Augapfel, dessen äußerer Rand rudimentäre Lidfalten darstellt (Duke-Elder, 1958; Demoll et al., 1964).

1.3 Augenanhangsgebilde – Adnexe

1.3.1 Muskeln des Augapfels – Musculi bulbi

Die Augenmuskulatur bei Fischen ist lediglich rudimentär ausgeprägt (Millichamp, 1991). Duke-Elder (1958) beschreibt die Augenbewegungen von Fischen als hauptsächlich reflexhaft oder als eher schwach willkürlich. Bei Knochenfischen findet man drei Paare von Augenmuskeln, welche direkt am Augapfel angreifen und ihn mehr oder minder direkt, jedoch auch unabhängig voneinander bewegen können (Demoll et al., 1964; Hargis Jr, 1991; Stoskopf, 1993). Sie bestehen aus jeweils vier geraden (Musculi recti superior, anterior, inferior und posterior) und zwei schrägen Augenmuskeln (Musculi obliqui superior und inferior), welche ihre

Ursprungsstellen an den jeweiligen Knochen der Orbitalregion haben. Sie werden durch den dritten Gehirnnerv innerviert (Nervus oculomotorius) und laufen divergierend zu den Insertionsstellen am Augapfel. Die Zusammensetzung der Augenmuskelfasern ist uneinheitlich, es liegen dabei Bündel von dünnen und dicken Fasern nebeneinander (Demoll et al., 1964).

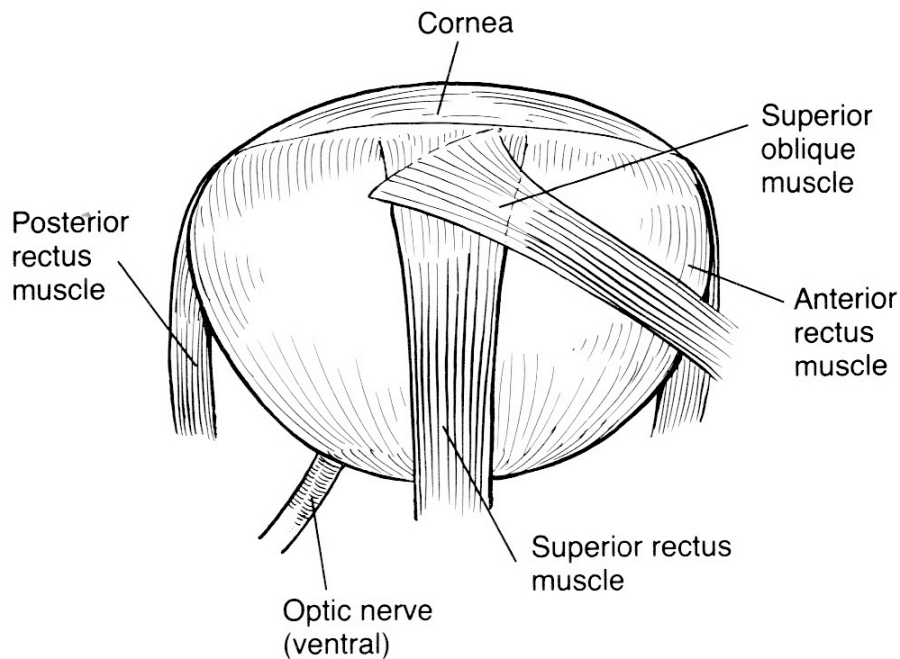


Abbildung 3: Schematische Darstellung retrobulbärer Strukturen des Auges einer Forelle (Stoskopf, 1993); (mit freundlicher Genehmigung von Michael K. Stoskopf)

1.3.2 Augenlider – Palpebrae

Knochenfische besitzen keine echten, sondern allenfalls rudimentäre Augenlider, sie sind nur bei manchen Knorpelfischarten (Elasmonbranchii) vorzufinden (Millichamp, 1991; Kern & Colitz, 2013). Die Funktion, das Augeninnere vor Lichteinfall zu schützen, übernimmt bei Knochenfischen die Retina, indem sie die Fotorezeptoren (Stäbchen und Zapfen) in die schützende Epithelschicht der Retina zurückzieht (Williams & Whitaker, 1997). Auch eine Tränendrüse (Glandula lacrimalis) findet man bei Knochenfischen nicht vor (Millichamp, 1991; Roberts & Ellis, 2001).

1.4 Äußere Augenhaut – Tunica fibrosa bulbi

Die äußere Augenhaut (Tunica externa bulbi, Tunica fibrosa bulbi) wird im Wesentlichen von der Lederhaut (Sklera) und der Hornhaut (Kornea) gebildet.

1.4.1 Lederhaut – Sklera

Die undurchsichtige und gefäßarme Sklera bildet den größten Teil der äußeren Augenhaut und umhüllt beinahe fast den gesamten Augapfel (Nickel et al., 1992). Sie ist von fester, bindegewebiger Konsistenz und wird im vorderen Teil bei den meisten Knochenfischen durch ein ringförmiges Knorpelgewebe gestützt (Duke-Elder, 1958; Dukes, 1975; Jurk, 2002; Koppang & Bjerkås, 2006; Kern & Colitz, 2013). Bei einigen Teleostei findet man auch Strukturen aus Knochenmaterial. Die Festigkeit kleinerer Augen wird durch den Augeninnendruck oder Turgor des Organs aufrechterhalten (Demoll et al., 1964). Die Sklera vereint sich im Bereich des Limbus mit dem Stroma der Hornhaut (Kornea).

1.4.2 Hornhaut – Kornea

Um auch unter Wasser eine hohe Lichtausbeute zu erhalten, ist die Kornea bei Knochenfischen im Vergleich zum Menschen und zu anderen Tierarten besonders durchsichtig und nahezu flach (Nicol & Somiya, 1989; Koppang & Bjerkås, 2006). Im Unterschied zu Vertebraten ist ihre Oberflächenbeschaffenheit zudem relativ dick (Millichamp, 1991). Zentral bis in die äußeren Bereiche nimmt die Stärke der Kornea zu, somit wird das Licht ungebrochen ins Auge geleitet. Die Kornea von Süßwasserarten weist eine größere Dicke auf als die von Salzwasserarten (Kern & Colitz, 2013). Beim Menschen dient die Kornea vor allem der Lichtbrechung, wohingegen bei Fischen ausschließlich die Linse diese Funktion übernimmt. Die Gestalt der Kornea und das Kammerwasser weisen den gleichen Brechungsindex wie das umgebende Wasser auf (Nicol & Somiya, 1989; Willeke, 2008; Schartau et al., 2009). Ihr mehrschichtiger Aufbau ist dem von landlebenden Wirbeltieren weitgehend ähnlich. Hierbei bildet die epidermale Konjunktiva, welche durch ein mehrschichtiges,

unverhorntes Epithel aufgebaut ist, die äußerste Schicht. Als tieferliegender Bestandteil folgt die Bowman'sche Kapsel als dickere Basalmembran, gefolgt von der aus über Kreuz verlaufenden Kollagenfasern bestehenden Substantia propria. Dieses Bindegewebe – in ein tiefes und oberflächliches Stroma eingeteilt – wird von einer dünnen Endothelschicht, der Descemet'schen Membran, als letzte Schicht umschlossen (Duke-Elder, 1958; Demoll et al., 1964; Nicol & Somiya, 1989; Roberts & Ellis, 2001; Williams, 2012).

1.5 Mittlere Augenhaut – Tunica vasculosa bulbi

Die mittlere Augenhaut (Tunica vasculosa bulbi), auch als Uvea bezeichnet, stellt den mittleren Bereich innerhalb des Augapfels dar, sie wird von der Choroidea, dem Corpus ciliare und der Iris gebildet (Genten et al., 2009).

1.5.1 Regenbogenhaut – Iris

Die Irisöffnung (Pupille) ist bei Fischen meist rund bzw. oval bis ellipsenförmig und bis auf wenige Ausnahmen nahezu starr (Jurk, 2002); sie reagiert daher nicht auf einfallendes Licht wie die Pupillen von landlebenden Wirbeltieren (Nicol & Somiya, 1989; Gelatt et al., 2013). Über das Ligamentum annulare ist die Iris mit der Kornea verbunden. Wie bei den meisten Knochenfischen besitzt sie nur einen geringen Anteil an Muskelfasern (Nicol & Somiya, 1989). Die Iris bei Fischen ist dreischichtig aufgebaut. Sie besteht aus einer vorderen, stark pigmentierten Ektodermissschicht, einer dünnen mittleren Schicht, dem Stroma – mit Blutgefäßen und Nervenfasern – und einer hinteren, oft unpigmentierten Schicht (Jurk, 2002).

1.5.2 Strahlenkörper – Corpus ciliare

Der Strahlenkörper (Corpus ciliare) ist bei Knochenfischen nur rudimentär angelegt. Ebenso finden sich auch keine Ziliarfortsätze und keine Ziliarmuskeln (Nicol & Somiya, 1989).

1.5.3 Aderhaut – Choroidea

Aufgaben der Aderhaut (Choroidea) sind die Ernährung und Sauerstoffversorgung der Netzhaut (Retina) (Demoll et al., 1964). Bei Knochenfischen ist die Choroidea mehrschichtig aufgebaut, die pigmentreiche SupraChoroidea – bei Teleostei wegen ihres Gehalts an silberglänzendem Guanin auch Argentea genannt – bildet die äußere Schicht. Es folgt die Lamina vasculosa, in der sich größere Blutgefäße befinden, welche weiter in die Lamina choriocapillaris verlaufen (Genten et al., 2009). An dieser Stelle befindet sich das bei Knochenfischen als Corpus choroidalis ausgeprägte Gefäßgeflecht. Es besteht aus einem arterielles und venöses Gefäßnetz, welches bei Knochenfischen einzigartig (Bellhorn, 1997) und in seiner Gestalt stark unterschiedlich ist. Das Corpus choroidalis ist somit ein durch die Arteria und Vena ophthalmica entstandener bipolarer Komplex. Diese Art von Gefäßgeflecht bezeichnet man auch als Wundernetz (Rete mirabile) (Hargis Jr, 1991).

1.6 Innere Augenhaut – Tunica interna bulbi – Netzhaut – Retina

Die innere Augenhaut (Tunica interna bulbi) stellt die Netzhaut (Retina) im Bereich der hinteren Augenhaut dar. Mit ihren Sinnesrezeptoren repräsentiert sie den für das Sehen entscheidenden Bestandteil. Die innerste Schicht des Augapfels bildet die Netzhaut (Retina), sie dient der Wahrnehmung und Verarbeitung der optischen Reize, die in Form von Lichtstrahlen durch die Pupillenöffnung in das Auge eintreten. Im Verlauf der embryonalen Entwicklung von Wirbeltieren wird die Retina aus einer blasenförmigen Ausstülpung des Frontalhirns gebildet, welche sich wiederum einstülpt und so zu einer Art doppelwandigem Becher wird (Franck, 1883; Duke-Elder, 1958).

Die Retina bei Fischen weist den typischen Schichtaufbau auf, der dem der meisten Vertebraten ähnlich ist. Die Stärke dieser Schichten geht von 100 bis über 500 µm je nach Fischart und in Abhängigkeit von der Größe der Sehzellen (Harder, 1975). Es besteht die Möglichkeit die Schichtung der Netzhaut mit Hilfe der optischen Kohärenztomographie (OCT) darzustellen. Dieses moderne nicht-invasive Bildgebungsverfahren

wird bereits in der Humanmedizin erfolgreich zur Diagnose von Retinopathien eingesetzt. Verschiedene Arbeitsgruppen konnten die Technik bereits erfolgreich bei Vögeln anwenden (Korbel et al., 2012; Rauscher et al., 2013).

Die Netzhaut beinhaltet die Sehzellen, die Stäbchen und Zapfen (Schultze, 1867; Wunder, 1925; Duke-Elder, 1958) und darunter bzw. dazwischen eine Pigmentschicht, das grün bis gelblich leuchtende Tapetum lucidum und das sich in der Peripherie befindliche schwarze Tapetum nigrum. Das Tapetum lucidum funktioniert als eine Art Reflektorschicht und spiegelt einfallendes schwaches Licht, somit verbessert sich das Sehen während der Dämmerungsphase erheblich. Ähnlich wie bei Katzen entsteht bei Anleuchten ein erkennbares Augenleuchten. Es wird zwischen verschiedenen Formen unterschieden, dem retinalen und chorioidalen Tapetum lucidum (Somiya, 1980).

Die Verteilung der Sehzellen und deren Anzahl variieren stark innerhalb der einzelnen Fischarten (Walls, 1963). So haben beispielsweise Tiefseefische oder auch Fische aus lichtärmeren Gewässern eine höhere Anzahl an Stäbchen (Wunder, 1926; Duke-Elder, 1958), wohingegen tagaktive Fische mehr Zapfen haben (Kern & Colitz, 2013). Als Besonderheit weisen einige Fischarten doppelte Zapfen auf (Stoskopf, 1993). Anders als bei Säugetieren und dem Menschen erfüllt die Retina noch eine weitere wichtige Funktion, um einfallendes Licht außer an der dafür vorgesehenen Stelle abzuschirmen. Sie besitzt die Eigenschaft, die Stäbchen und Zapfen in die schützende Epithelschicht – zwischen den Sehzellen – zurückzuziehen, um sie vor Streulicht zu schützen (Demoll et al., 1964; Wagner & Douglas, 1983; Williams & Whitaker, 1997). Des Weiteren ermöglicht die Funktion der Retinomotorik die Verlagerung der Fotorezeptoren selbst (Douglas, 1982; Burnside & Basinger, 1983; Schartau et al., 2009), um den bei Fischen fehlenden Pupillarreflex auszugleichen. Während der Hellstellung sind die lichtempfindlichen und farbentüchtigen Zapfen dem Licht zugewandt, wohingegen sich in der Dunkelstellung die farbenblinden Stäbchen dem Licht entgegenstrecken (Pfeiffer, 1968). Bei Teleostei tritt der Unterschied zwischen Hell- und Dunkelstellung sehr deutlich auf (Nicol, 1965; Wagner, 1970), wohingegen

bei Vertebraten und dem Menschen keine Unterschiede in der Stellung der Sehelemente und des Pigments zwischen belichtetem und unbelichtetem Auge zu erkennen sind (Wunder, 1936; Duke-Elder, 1958). Analog zum lebenslangen Größenwachstum des Augapfels nimmt auch die Retina in ihrer Ausdehnung kontinuierlich zu, indem sie in den Randbereichen weitere Stammzellen anlagert (Walls, 1942; Otteson & Hitchcock, 2003; Stenkamp, 2011).

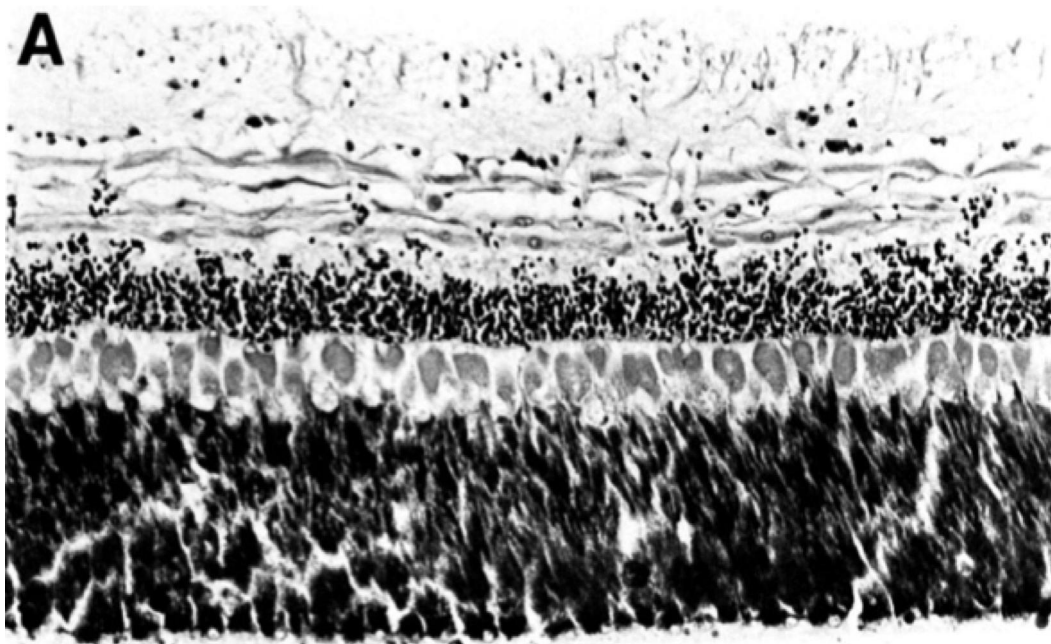


Abbildung 4: Mikroaufnahme der Retina eines Bunkers (Nasissse et al., 1989); (mit freundlicher Genehmigung von John Wiley and Sons)

1.7 Augenkammer – Camera bulbi

Wie bei den Vertebraten ist das Auge auch bei Fischen räumlich durch die Iris begrenzt, sie wird dadurch in eine vordere (Camera anterior bulbi) und hintere Augenkammer (Camera posterior bulbi) unterteilt (Nickel et al., 1992). Beide Augenkammern sind mit dem Kammerwasser (Humor aquosus) gefüllt, welches der Nährstoffversorgung der Hornhaut und der Linse dient. Über die Kammerwasserproduktion und -drainage ist noch wenig bekannt. Man vermutet, dass es im Bereich des Irisursprungs gebildet wird, an dieser Stelle befinden sich zahlreiche mesenchymale Zellen (Nicol & Somiya, 1989; Whitaker, 2001).

1.8 Linse – Lens

Bei Fischen ist die Linse meist klar, kugelförmig (sphärisch) und im Verhältnis zu anderen Tierarten relativ groß, sie ragt weit in die vordere Augenkammer hinein (Walls, 1963; Hargis Jr, 1991; Jurk, 2002; Genten et al., 2009). Im Vergleich zur ellipsenförmigen Linse des Säugetierauges dient sie allein der Brechung der einfallenden Lichtstrahlen. Der grundlegende Aufbau ist dem der Säugetiere nahezu identisch (Bloemendal, 1981); die Linse besteht aus einer Linsenkapsel (Capsula lentis), dem Linsenepithel (Epithelium lentis) und den Linsenfasern (Fibrae lentis). Die Linsensubstanz (Substantia lentis) selbst ist radiär aufgebaut und besteht aus einem zentralen Kern (Nucleus lentis) und der ihn umgebenden Rinde (Cortex lentis) (Nicol & Somiya, 1989).

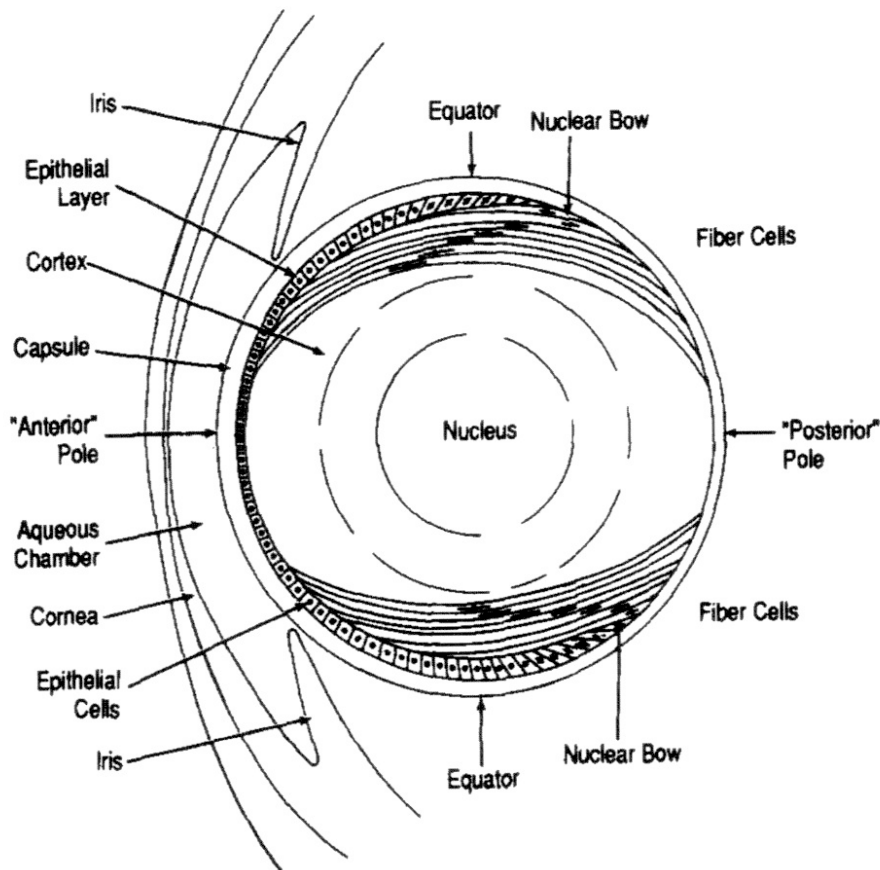


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Linse eines Knochenfisches (Hargis Jr, 1991) (mit freundlicher Genehmigung von Elsevier Verlag)

Die Linse ist aus kristallinem Material und enthält daher keine Blut- und Nervengefäße und wird ausschließlich durch Diffusion über das

Kammerwasser (Humor aquosus) mit Nährstoffen versorgt (Augustin & Collins, 2001). Da die oberen Schichten der Linsenfasern permanent neue Faserzellen anlagern, wächst die Linse lebenslang weiter, diese Eigenschaft macht sie daher im Organismus einzigartig (Wilcock & Dukes, 1989; Hargis Jr, 1991; Willeke, 2008). Die chemischen Bestandteile der Linse sind Wasser, Proteine, Elektrolyte, Lipide, Nucleinsäuren, Kohlenhydrate und Ascorbinsäuren (Bloemendal et al., 1985). Verglichen mit dem Menschen und anderen Tierarten weist die Linse bei Fischen den höchsten Proteingehalt auf, diese Eigenschaft ermöglicht eine hohe Härte und damit verbunden den höchsten Brechungsindex im Tierreich (Duke-Elder, 1958; Walls, 1963; De Jong, 1981; Ulrich, 1990; Kröger, 2013), welcher besonders beim Sehen unter Wasser erforderlich ist (Clayton, 1974). Die Kugellinse bei Fischen erlaubt eine kurze Brennweite, diese ist als das 2,5-Fache des Linsenradius optimiert. Um sphärische Aberrationen zu verhindern, haben Fische eine Gleitindex-Linse entwickelt, sie weist zentral einen hohen und peripher einen geringen Brechungsindex auf. Um chromatische Aberrationen zu verringern und somit ein hohes Farberkennungsvermögen zu erhalten, haben tropische Fische Linsen mit bis zu vier Fotopigmenten entwickelt, diese werden durch die entsprechenden Wellenlängen aktiviert (Gustafsson et al., 2008; Kröger, 2013).

Im Gegensatz zu landlebenden Wirbeltieren wird die Linse bei Fischen von zwei kleinen Muskeln asymmetrisch dorsal und ventral gehalten (Wilcock & Dukes, 1989). Wie bereits unter Punkt 1 erwähnt, müssen Fische ihre Linse für die Akkommodation entlang der optischen Achse verschieben. Dies geschieht mit Hilfe eines komplexen Halteapparats aus Bändern und dem Linsenmuskel (*Musculus retractor lentis*) (Khorramshahi et al., 2008; Genten et al., 2009). Dieser ist bei Ruhestellung relaxiert, somit ist das Auge in dieser Position auf Nahsicht eingestellt, erst die Kontraktion des Linsenmuskels ermöglicht die Akkommodation auf Weitsicht (Beer, 1894; Duke-Elder, 1958; Walls, 1963; Willeke, 2008).

Lebendgebärende Zahnkarpfen der Gattung *Anableps*, sogenannte Vieraugen, besitzen eine oval geformte Linse mit einer schwach

gekrümmten oberen und einer stark gekrümmten unteren Hälfte. Dies ermöglicht ihnen ein scharfes Sehen sowohl über als auch unter der Wasseroberfläche (Klinckowström, 1894; Faschinger, 2010; Glaeser & Paulus, 2014).

Gelbe Linsen kommen bei einer Art von Tiefseefischen (*Malaosteus niger*) vor, die Linse dieser Gattung weist ein besonderes Absorptionsspektrum auf (Somiya, 1982).

1.9 Glaskörper – Corpus vitreum

Der Glaskörper (*Corpus vitreum*) füllt die hintere Bulbushälfte vollständig aus und besteht – bis auf ca. 2% an Hyaluronsäuren – fast vollständig aus Wasser (Fuchs, 1884; Greeff, 1928; Schuchardt & Knoch, 1950). Er ist von einer dünnen Haut (*Membrana vitrea*) umgeben (Virchow, 1882). Im Glaskörper sind teilweise Glaskörpergefäße angelegt, die sich je nach Fischart stark unterscheiden, sie dienen unter anderem der Ernährung der Retina (Walls, 1942).

1.10 Processus falciformis

Als Gegenstück zur Sehnervenpapille des Menschen (auch als „Blinder Fleck“ bezeichnet), auch zu dem *Pecten oculi* der Vögel (Reese et al., 2009) und dem *Conus papillaris* bei Reptilien, besteht bei Fischen eine Ausbuchtung der *Choroidea*, dem sogenannten *Processus falciformis* (Dukes, 1975; Bellhorn, 1997; Jurk, 2002; Willeke, 2008). Dieser ist nicht bei allen Knochenfischarten angelegt, nach Bellhorn (1997) besitzen Knochenfische entweder einen *Processus falciformis* oder eine *Membrana vasculosa retinae*. Er ist von vielfältiger Gestalt und variiert daher stark im Vergleich der einzelnen Fischarten (Reckel, 2001; Reckel & Melzer, 2004). In der Regel ist er sichelförmig, entspringt zentral am Augenhintergrund (*Fundus oculi*) und zieht dann weiter kranial bis zur Linse.

1.11 Blutversorgung und Innervation des Fischauges

1.11.1 Blutversorgung

Die Blutversorgung des inneren Auges, insbesondere der Retina, wird durch eine Zentralarterie (*Arteria centralis retinae*) und eine Zentralvene (*Vena centralis retinae*) sichergestellt. Innerhalb der Netzhaut teilen sich diese Gefäße in zahlreiche Äste auf, welche die Durchblutung bis in die Randbereiche gewährleisten. Die *Arteria ophthalmica* tritt caudo-dorsal des Sehnervs in das Auge ein und verläuft hier auf der Innenseite des *Corpus choroidalis*, im Inneren eines von der *Vena ophthalmica* gebildeten Blutsinus. An dieser Stelle verzweigt sich die *Arteria ophthalmica* in das sogenannte Wundernetz (*Rete mirabile*), bestehend aus venösen und arteriellen Kapillaren; das dortige einzellige Endothel ermöglicht so den Stoffaustausch zwischen arteriellem und venösem Blut (Duke-Elder, 1958; Demoll et al., 1964; Wittenberg & Wittenberg, 1974; Dukes, 1975; Bellhorn, 1997). Diese arteriellen Kapillaren formen nach dem Austritt aus dem *Rete mirabile* das Kapillargeflecht der *Choroidea*. Auch in das Zentrum der Retina ziehen weitere Kapillaren der *Arteria ophthalmica* und bilden einen Ring um den Sehnerv (Allen, 1949). Das venöse Blut sammelt sich im *Sinus venosus* der *Vena ophthalmica*. Die bereits oben erwähnte *Arteria retinalis*, welche der *Arteria carotis interna* entspringt, versorgt außerhalb des Auges den Sehnerv, die Augenmuskulatur und das umliegende Gewebe. Danach tritt sie ventral des Sehnervs in – soweit vorhanden – das *Corpus lentiforme* des *Bulbus* ein (Barnett, 1951). An dieser Stelle bildet sich ein weiteres, jedoch kleineres Wundernetz, dessen Kapillaren in die *Choroidea* ziehen und sich mit den Kapillaren der *Arteria ophthalmica* vereinen. Ein Ast der *Arteria retinalis* zweigt am *Corpus lentiforme* ab und tritt in den *Processus falciformis* ein, um diesen und den Linsenmuskel zu versorgen. Über die *Vena choroidalis ventralis* wird das Blut aus dem *Processus falciformis* zur *Vena retinalis* zurückgeführt (Demoll et al., 1964).

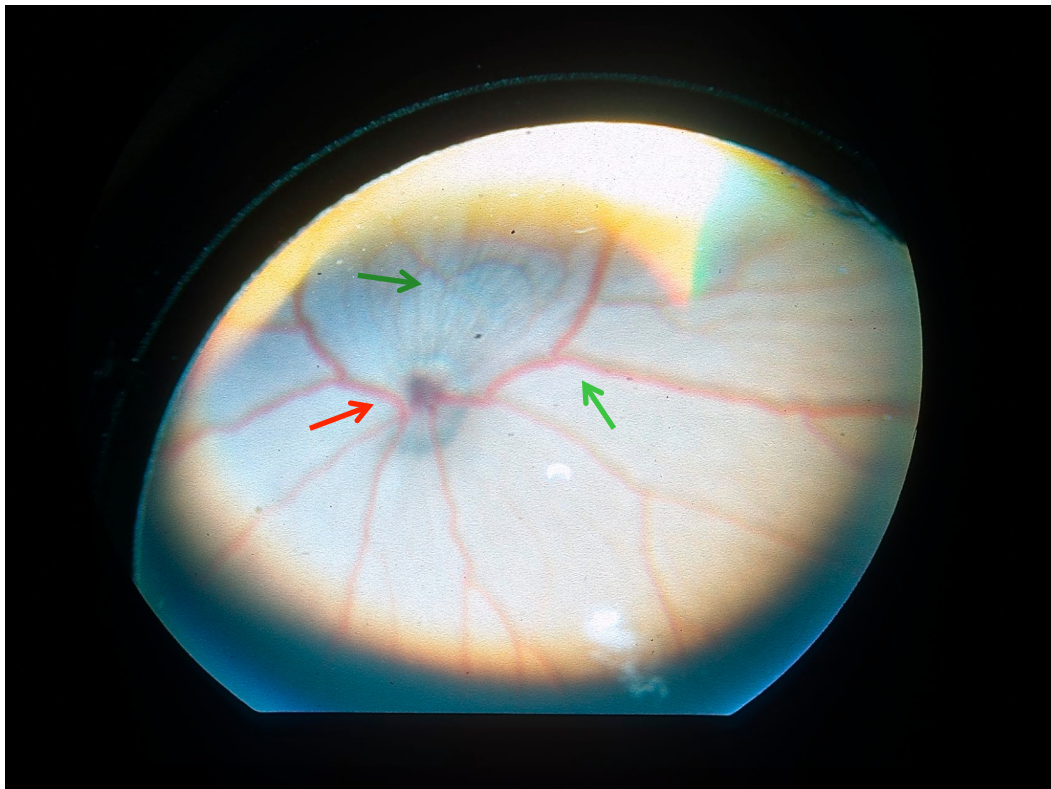


Abbildung 6: Fundus eines Koi (*Cyprinus carpio*), OD, 29 cm, 3,5 Jahre, Sehnervenpapille (Papilla nervi optici) mit Austritt der Glaskörpergefäße (roter Pfeil), Aufzweigungen und Kapillarnetz (grüne Pfeile); (Aufnahme: R. Korbel)

1.11.2 Innervation

Die Innervation des Augapfels ist mit derjenigen der Säugetiere vergleichbar. Der Sehnerv tritt rückseitig aus dem Augapfel aus der Lederhaut hervor. Dabei sind die Nervenfasern von den Hirnhäuten umgeben. Der Sehnerv ist vom Corpus chorioidealis hufeisenförmig umgeben (Walls, 1942; Allen, 1949; Duke-Elder, 1958; Hargis Jr, 1991) und hat seine Eintrittsstelle an der Papilla nervi optici (Gelatt et al., 2013).

1.12 Augenerkrankungen bei Fischen

Bei Fischen kommen Augenerkrankungen sehr häufig vor und sind bereits umfangreich in der Literatur beschrieben (Stoskopf, 1993; Millichamp, 1997; Williams & Whitaker, 1997; Jurk, 2002; Koppang & Bjerkås, 2006). Dabei gilt es systemische, das heißt ursächlich sekundäre, Augenerkrankungen, bei denen häufig beide Augen und auch die Hautoberfläche betroffen sein können, von den primären

Augenerkrankungen, bei denen meist nur ein Auge beteiligt ist, voneinander zu unterscheiden (Williams & Whitaker, 1997). Besonders systemische Erkrankungen gehen bei Fischen mit Veränderungen der Konjunktiva, Kornea, Iris und der Linse einher (Williams & Whitaker, 1997). Oft ist gerade die Haltung unter schlechten Umweltbedingungen, wie beispielsweise der Wasserqualität, Wegbereiter für Erkrankungen bakterieller (Wildgoose, 2006), viraler und parasitärer (Karvonen & Seppala, 2008) Ursachen.

Somit stellen Augenerkrankungen einen erkennbaren Indikator für umweltbedingten Stress, Intoxikationen (Ravneet et al., 2009) oder Infektionen dar (Hargis Jr, 1991; Carrillo et al., 1999). Weitere Faktoren, welche zu vorübergehenden oder bleibenden Augenveränderungen führen können, sind Transportstress, Mangelernährung und die Haltung bei falscher Wassertemperatur (Carrillo et al., 1999).

Diese Arbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit normal-anatomischen Augenpräparaten, daher soll im Folgenden nur kurz auf die wichtigsten pathologischen Augenveränderungen eingegangen werden.

1.12.1 Bulbus

Ein ein- oder beidseitiges Hervortreten des Augapfels aus der Augenhöhle wird als Exophthalmus bezeichnet und stellt unter anderem einen der häufigsten Befunde bei Augenveränderungen bei Fischen dar (Hargis Jr, 1991; Koppang & Bjerkås, 2006). Die oft markante Ausprägung dieser Veränderung macht sie zu einem leicht erkennbaren, wenn auch unspezifischen Symptom am Auge und fällt besonders dem Fischhalter deutlich auf. Diese im Sprachgebrauch auch als „Glotzauge“ bezeichnete Veränderung wird durch Gas- und Flüssigkeitsansammlung im retrobulbären Raum verursacht (Todaro et al., 1983). Dieses Syndrom kann durch eine bakterielle, virale, parasitäre oder mykotische Infektion sowie umwelt- oder hormonell (Dukes, 1975) bedingt wie auch durch Neoplasien (Schubert, 1969) und Traumata auftreten (Dehadrai, 1966; Hargis Jr, 1991; Williams & Whitaker, 1997; Koppang & Bjerkås, 2006).

Das periorbitale Ödem weist jedoch beinahe immer auf eine hochgradige systemische Erkrankung hin und bedarf einer sofortigen Intervention.

1.12.2 Kornea

Veränderungen der Kornea gehören bei Fischen zu den häufigen Augenerkrankungen. Ähnlich wie bei Vertebraten sind auch bei Fischen dieselben veränderlichen Prozesse zu beobachten. So entsteht oft ein Korneaödem nach erfolgter Verletzung des Hornhautendo- und epithels. Jurk (2002) konnte bei chronischer Reizung der äußeren Korneaschichten die Einsprossung von Gefäßen, Pigmentbildung und eine vermehrte Mitoserate feststellen. Oft sind diese Veränderungen entzündlicher Natur. Selbst geringe oberflächliche Läsionen der Hornhaut können zu schweren Hornhautproblematiken führen (Whitaker, 2001). In der Regel sind diese Keratitiden infektiös bedingt, hierbei hat die normale bakterielle Keimflora – Aeromonaden, Pseudomonaden und Staphylokokken (Koppang & Bjerkås, 2006) – innerhalb der Haltungsumgebung den größten Einfluss auf eine sich bildende entzündliche Veränderung der Kornea. Ebenso sind virale, mykotische und parasitäre Erreger weitere Auslöser einer Keratitis (Williams & Whitaker, 1997; Whitaker, 2001; Jurk, 2002). Hierbei gilt es ulzerative von nicht-ulzerativen Keratitiden zu differenzieren. Die Unterscheidung lässt sich sehr leicht, ebenso wie beim Säugetierauge, mit einem Fluoreszintest durchführen (Williams & Whitaker, 1997). Ulzerative Keratitiden sind bei Fischen häufig anzutreffen, ihnen liegt meist eine traumatische Ursache zugrunde (Williams & Whitaker, 1997), oft ist sie eine Verletzung beim Transport oder durch unsachgemäßes Handling der Tiere (Koppang & Bjerkås, 2006).

1.12.3 Linse

Katarakt

Die milchige Trübung der Linse und deren Bestandteile – Katarakt genannt – ist die häufigste Erkrankung der Linse bei Fischen (Hargis Jr, 1991). Sie wird sowohl bei Zucht- als auch bei Zierfischen beschrieben und ist nach dem Exophthalmus die zweithäufigste Augenerkrankung. In

der Zierfischhaltung stellt der Katarakt vor allem eine Minderung der Attraktivität eines wertvollen Tieres dar. Durch die Beeinträchtigung der Sehfähigkeit (Visus) durch den reduzierten Lichteinfall (Ravneet et al., 2009) kommt es jedoch auch zu einer reduzierten Futteraufnahme und sinkenden Überlebensfähigkeit bei Wild- und Zuchtfischen, dies führt zu ökonomischen Auswirkungen (Hargis Jr, 1991; Bjerkås et al., 2001; Jurk, 2002; Karvonen & Seppala, 2008). Ein vorhandener Katarakt wird durch Lokalisation – totaler oder partieller Katarakt – sowie nach Schweregrad seiner Ausprägung und seiner Ursache klassifiziert (Wegener et al., 2001; Jurk, 2002). Unterschiedliche Kataraktformen beim atlantischen Lachs sind bereits näher untersucht und beschrieben worden (Bjerkås et al., 1995; Bjerkås et al., 2001), hier trat eine besondere Häufung von Katarakten bei Farmfischen auf (Wall, 1998). Willeke (2008) untersuchte in diesem Zusammenhang den Linsenstoffwechsel beim Lachskatarakt und stellte eine gestörte Enzymaktivität fest. Häufige Ursache scheint dabei eine Mangelernährung zu sein, so konnte auch ein Mangel an Zink (Ketola, 1979) bei Regenbogenforellen (*Salmo gairdneri*) für die Trübung der Linse verantwortlich gemacht werden. Karvonen und Seppälä (2008) konnten reduzierte Linsengrößen im Zusammenhang mit der Kataraktbildung bei Trematodeninfektionen nachweisen.

Bei einer Studie zur Sonographie bei Augen von Koi (*Cyprinus carpio*) zeigte sich die Linse als deutlich schallabsorbierend (Brandstetter, 2014; Pohl, 2014).

Linsenluxation

Neben dem Katarakt ist die Luxation der Linse (*Luxatio lentis*) eine weitere Erkrankungsform. So wurde eine vordere Linsenluxation ausgelöst durch ein iridociliares Melanom beim Kuhfisch (*Lactoria cornuta*) beschrieben (Da Silva et al., 2010).

1.12.4 Retina

Besonders Infektionen (Koppang & Bjerkås, 2006) und systemische Ursachen haben eine Erkrankung der Retina (Retinopathie) zur Folge und

häufig zu einer Netzhautablösung (Ablatio retinae) führen. Neben bakteriellen und viralen Erregern spielen auch ernährungsbedingte Störungen (Mangel an Vitamin A und C), toxische Reaktionen (Hargis Jr & Zwerner, 1988), Stoffwechselerkrankungen (Yokote, 1974) und Lichtmangel eine wichtige Rolle. Koppang und Bjerkås (2006) beschreiben einen Virus im Zusammenhang mit auftretenden Enzephalo- und Retinopathien. Ebenfalls gilt ein Nodavirus als Auslöser einer subklinischen Enzephalitis und Retinochorioiditis beim Kabeljau (*Gadus morhua*) (Gjessing et al., 2009). Jurk (2002) weist jedoch darauf hin, Post-mortem-Befunde der Retina aufgrund von Artefaktbildung vorsichtig zu interpretieren.

2. Pathologisch-anatomische Untersuchungen des Auges

Zur Post-mortem-Dokumentation im Rahmen von pathologisch-anatomischen Untersuchungen ist bereits umfangreiche Literatur vorhanden. Im Folgenden soll daher nur kurz auf bestehende Arbeiten eingegangen werden.

2.1 Enukleation von Augen

Mittlerweile wurde die Entnahme von Augen, bei verschiedenen Tierarten, durch zahlreiche Autoren beschrieben. Neben Hunden (Saunders & Rubin, 1975), Vögeln (Murphy et al., 1983; Korbelt, 1991; Ravelhofer, 1996; Dorobek, 2013; Kern & Colitz, 2013; Liepert, 2013) und Reptilien (Bretzinger, 1998; Korbelt et al., 2000) zeigte Stoskopf (1993) die Vorgehensweise zur Enukleation von Fischeaugen. Hierbei wird zur Entnahme des Bulbus die Konjunktiva mit Hilfe einer Pinzette vorsichtig gefasst und das Auge mit einer gebogenen Schere von den extraokularen Strukturen getrennt.

In der Augenheilkunde werden ebenfalls verschiedene Methoden zur Bulbusentnahme angewendet. Dabei gilt es zum einen den Zustand des Bulbus für die spätere pathologische Untersuchung zu sichern und zum anderen die verbleibenden extraokularen Strukturen zu schonen. Slatter (2001) stellt hier die Methoden der lateralen subkonjunktivalen und transpalpebralen Enukleation dar.

2.2 Fixation von Augenpräparaten

In der Literatur wird allgemein die Verwendung einer Standardfixierung (10%ig gepuffertes Formalin) für die Fixierung von Augen empfohlen (Saunders & Rubin, 1975; Hargis Jr & Zwerner, 1988; Vetter, 1992; Ravelhofer, 1996; Slatter, 2008; Da Silva et al., 2010; Werther et al., 2011). Die Dauer der Fixation ist von der Größe der Bulbi abhängig, nach Werther et al. (2011) sind die Präparate nach maximal 48 Stunden vollständig fixiert, wohingegen Ravelhofer (1996) und Bretzinger (1998) das Durchfixieren der Präparate erst nach einer Dauer von vierzehn

Tagen angeben. Die Präparate sollten allerdings nicht länger als sechs Monate gelagert werden, da ansonsten mit zunehmendem Auftreten einer Netzhautablösung gerechnet werden muss. Werther et al. (2011) beschreiben die 100%ige Ablösung der Retina bei Vogelaugen nach einer Dauer von sechs Monaten. Ravelhofer (1996) beobachtete bei Vogelaugen zudem, dass es nach Anwendung von Formalin zu kataraktähnlichen Linsenveränderungen kommen kann. Unerlässlich bei der Fixierung ist auch das Auffüllen der vorderen Augenkammer mittels Parazentese, da es ansonsten unweigerlich zum Einsinken der Kornea und zu Faltenbildungen in der Retina mit einer nachfolgenden Schrumpfung des Bulbus kommen kann. Insbesondere beim Vogelauge beschreibt Ravelhofer (1996) eine fixationsbedingte Verdickung bzw. Verkürzung der Augenmuskeln und eine daraus resultierende Schrumpfung des Bulbus, welcher hier somit vorgebeugt werden kann.

2.3 Kalottierung von Augenpräparaten

Abhängig von den untersuchten Präparaten verschiedener Tierarten finden sich in der Literatur unterschiedliche Methoden zur Kalottierung von Augen. Bei Vogelaugen empfiehlt sich eine nahezu vertikale Schnittführung, dabei werden die Augen von kaudal nach kranial in zwei verschieden große Hälften geteilt. Das Schneiden beginnend vom Augenhintergrund hat den Vorteil, dass mitgeführte Ablagerungen nicht den Glaskörper verunreinigen können (Korbel, 1994; Ravelhofer, 1996). Die Schnittführung sollte sich auch immer an der jeweiligen Zielsetzung orientieren, Ravelhofer (1996) modifizierte die Schnittführung nach Slonaker (1918), um okulare Strukturen zu erhalten. Zum Zweck der Überprüfung von sonographischen Befunden sollte die Schnittführung nach Möglichkeit entsprechend der Untersuchungsebene gewählt werden (Strobel, 2010).

3. Ophthalmologische Fotografie und Präparatfotografie

„Der Photograph kann erst dann den Auslöser seiner Kamera betätigen, wenn er weiß, was er will und wie er seine Absichten erreicht. Aus eventuellen Fehlschlägen muss der Photograph stets bereit sein zu lernen“ (Popper, 1974; Endner & Podda, 2013). Die Kamera stellt für den Fotografen ein Handwerkszeug dar und sollte daher weder Geist noch handwerkliches Können ersetzen (Endner & Podda, 2013). Zur Umsetzung der Ideen des Fotografen bildet sie das Mittel zum Zweck.

Um insbesondere die anatomischen Verhältnisse am gesunden wie auch am erkrankten Auge aufzuzeigen, bedient sich sowohl die human- als auch die veterinärmedizinische Ophthalmologie bereits seit Langem der fotografischen Technik. Sie dient unter anderem der Darstellung der häufig sehr komplizierten Verhältnisse am Auge und hat daher bereits einen hohen Entwicklungsstand erreicht (Korbel, 1994). Man unterscheidet zwischen fünf verschiedenen Techniken: Fotografie des äußeren Auges, Spaltlampenmikrografie, Goniografie, Fundusfotografie und Fluoreszenzangiografie (Merin, 1992).

Um fotografische Befunde zu dokumentieren, sollte die Dokumentation unter reproduzierbaren und standardisierten Bedingungen stattfinden. Dabei sollten die Objekte immer ganzheitlich wahrgenommen werden und sollte der Bildinhalt weitgehend reduziert sein (Bengel, 1994).

Die Methodik zur fotografischen Dokumentation von pathologisch-makroskopischen Präparaten von Vogelaugen wurde von Ravelhofer (1996) erarbeitet.

3.1 Ophthalmologische Präparatfotografie bei Fischen

Fotografische Dokumentationen von Augenerkrankungen bei Fischen sind vermehrt in der Literatur zu finden, jedoch sind hierbei Aufnahmen des äußeren Auges am lebenden Tier am häufigsten. Daher ist davon auszugehen, dass die Fotografie im Bereich der Fischophthalmologie schon breite Verwendung zur Beschreibung von Augenveränderungen

gefunden hat. Makroskopische Präparate des Augeninneren wurden im Zusammenhang mit Ultraschalluntersuchungen von Augenveränderungen bereits beim Heilbutt (*Hippoglossus hippoglossus*) untersucht und beschrieben (Williams & Brancker, 2004; Williams et al., 2007).

3.2 Grundlagen zur Optik und Begriffsdefinitionen

„Photographie in der Augenheilkunde bedeutet Photographie im Nahbereich. In diesem Grenzbereich der Photographie wirken sich Einschränkungen, die durch eine Vielzahl von Gesetzmäßigkeiten aus der geometrischen Optik, Mechanik, Lichttechnik und Photochemie gegeben sind, besonders deutlich aus. Obwohl oder gerade weil heute eine Vielzahl von kameratechnischen Abläufen automatisiert sind, können aufnahmetechnisch hochwertige Abbildungsergebnisse ohne Kenntnisse von Grundgesetzmäßigkeiten aus diesen Bereichen nicht erzielt werden“ (Korbel, 1994).

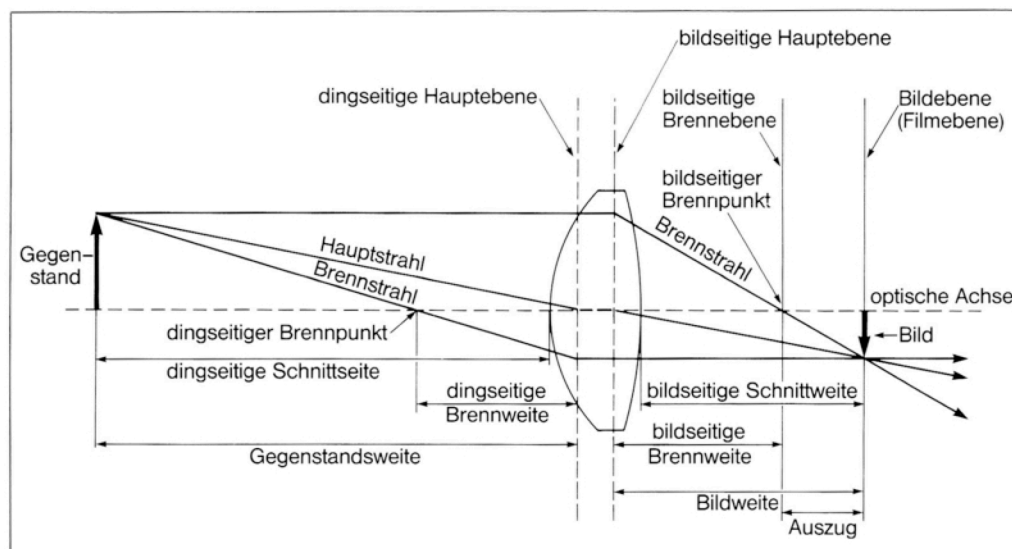


Abbildung 7: Wichtige optische Begriffe der Abbildung (Bengel, 1984) (mit freundlicher Genehmigung von Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin)

3.2.1 Nah- und Makrofotografie

Korbel (1994) stellt fest, dass es durch den Gebrauch der nicht präzise definierten Synonyme Makro-, Lupen- und Mikrofotografie zu einem

Durcheinander für die Umschreibung des Begriffs Nahaufnahme in der deutschsprachigen Literatur gekommen ist. Die Technik zur Abbildung von Objekten aus nächster Nähe bezeichnet man in der Regel als Nah- oder Makrofotografie. Die tatsächliche Nahfotografie beginnt bei einem Abbildungsverhältnis von 1:20 (Abbildung 1/20 der Originalgröße) und geht bis 1:1 (Abbildung in natürlicher Größe) auf dem Film. Als Makrofotografie bezeichnet man ausschließlich den Bereich der Abbildung des Motivs in natürlicher Größe (Abbildung 1:1), bis hin zu 25-facher Vergrößerung (Davies, 2000). Die Begriffe sind unter anderem auch durch DIN-Normen definiert. In der heutigen Zeit ermöglichen handelsübliche Consumer-Objektive bereits Abbildungen in natürlicher Größe.

3.2.2 Abbildungsmaßstab und Schärfentiefe

„Der Abbildungsmaßstab ist die entscheidende Größe der Photographie im Nahbereich“ (Bengel, 1984), er definiert das Größenverhältnis zwischen der Abbildung auf dem Negativ und dem Motiv. Das heißt, dass eine Abbildung im Maßstab 1:2 beinhaltet, dass das Motiv in Wirklichkeit zweimal größer ist als seine Abbildung auf dem Film (Bengel, 1984). Demnach ergibt sich der erforderliche Arbeitsabstand somit in Abhängigkeit von Brennweite und Abbildungsmaßstab.

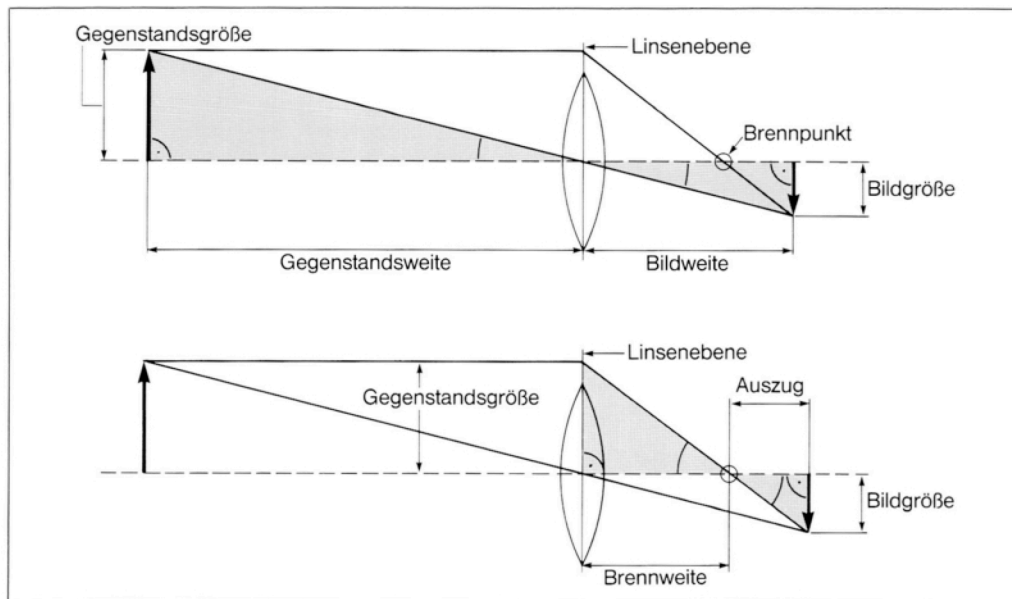


Abbildung 8: Berechnungsmöglichkeiten des Abbildungsmaßstabes (Bengel, 1984) (mit freundlicher Genehmigung von Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin)

Der Abbildungsmaßstab wird als Bruch oder als Vergrößerungsfaktor angegeben, eine Aufnahme im Maßstab 1:5 gibt somit das Objekt in 1/5 seiner natürlichen Größe bzw. in 0,2-facher Vergrößerung wieder.

„Gerade im medizinisch-dokumentarischen Bereich ist die Kenntnis des Abbildungsmaßstabes in vielen Fällen unerlässlich, will man Rückschlüsse auf die natürliche Größe des aufgenommenen Objekts ziehen. Die Bestimmung des AM ist auf einfachem Wege mit hinreichender Genauigkeit möglich“ (Bengel, 1984). Üblicherweise ist der Abbildungsmaßstab auf dem Distanzring des verwendeten Makro-Objektivs eingraviert und braucht nur abgelesen zu werden. Um einen bestimmten Abbildungsmaßstab zu erzielen, wird er vorher manuell eingestellt und man nähert sich anschließend dem Objekt, bis es scharfgestellt ist (Bengel, 1984).

3.2.3 Schärfentiefe und effektive Blende

„Die Veränderung der Blendenöffnung beeinflusst nicht nur die Bildhelligkeit, sondern auch die Ausdehnung des Bereichs, in dem ein Objekt scharf abgebildet wird“ (Bengel, 1984). Der scharfe Bereich innerhalb der Fokussierebene bis zum Erreichen der Unschärfe wird als

Schärfentiefe bezeichnet. Um dreidimensionale Gegenstände scharf abzubilden, gewinnt die Schärfentiefe an Bedeutung. Je kleiner die Blende, desto größer ist die Schärfentiefe, dazu ist sie abhängig vom Abbildungsmaßstab, das heißt, je näher man an ein Objekt herangeht (Verringerung des Arbeitsabstands), desto geringer wird die Schärfentiefe (Bengel, 1984). Für ein maximales Erreichen der Schärfentiefe – bei gegebener Blende – ist es wichtig zu wissen, dass sich der scharf dargestellte Bildanteil bei einem Abbildungsmaßstab von 1:1 etwa je zur Hälfte vor und hinter der Einstellebene verteilt (Bengel, 1984).

Bei größerer Blendenzahl bzw. kleiner gewählter Blendenöffnung eines Objektivs werden einfallende Lichtstrahlen an den Blendenlamellen gestreut. Dieser als Beugung bezeichnete Effekt geht mit einem Lichtverlust einher.

3.2.4 Schärfenkreis und Streukreisdurchmesser

Objektive werfen ein rundes Bild, in ihm nimmt die Bildqualität vom Zentrum zum Rand hin ab (Bengel, 1984). Beim Betrachten von fotografischen Abbildungen wird die sichtbare Schärfe vor allem durch das Kontrastverhältnis und die Auflösung beeinflusst. Objektpunkte außerhalb eines scharf sichtbaren Bereichs werden durch den sogenannten Zerstreungskreis abgebildet, sie erscheinen daher als unscharf, da der Durchmesser dieses Kreises eine bestimmte Größe überschritten hat. Bei einem durchschnittlichen Auge ist dies vom Auflösungsvermögen abhängig (Ray, 1992). Übertragen auf das Kleinbildformat von 24 x 36 mm bedeutet das einen maximal 0,03 mm großen Streukreisdurchmesser (Bengel, 1984; Ray, 1992).

3.3 Makrofotografie

Im Nahbereich ergeben sich ganz spezielle Probleme, die sich von denen der allgemeinen Fotografie grundlegend unterscheiden (Bengel, 1984). Bei der Makrofotografie werden Gegenstände aus einem sehr geringen Abstand fotografiert; um diese Technik anzuwenden, gilt es traditionelle

Techniken zu vernachlässigen. Zuallererst ist der passende Abbildungsmaßstab zu ermitteln (Peres, 1992). Insbesondere bestimmt das Erreichen der gewünschten Schärfentiefe das weitere Vorgehen, welche Blende und welcher Arbeitsabstand gewählt werden müssen. Um die Naheinstellgrenze zu verbessern, gibt es zahlreiche technische Komponenten, wie z.B. Nahlinsen, Zwischenringe, Telekonverter und Makrovorsatzlinsen. Moderne Makro-Objektive sind in diesem Fall das Mittel der Wahl, da sie aufgrund der einfachen Handhabung und des breitgefächerten Angebots im Gegensatz zu umständlicherem Nahaufnahmezubehör zeitsparender eingesetzt werden können. Sie sind besonders für den Nahbereich geeignet und ermöglichen eine saubere Farbtrennung, hohes Auflösungsvermögen, Verzeichnungsfreiheit, gute Bildfeldebahnung und keine extrem große Lichtintensität (Bengel, 1984).

3.3.1 Abbildungsmaßstab und Schärfentiefe

Im Nahbereich bei Abbildungsmaßstäben bis 1:1 erstreckt sich die Schärfentiefe jeweils zu einem Drittel vor und zu zwei Dritteln hinter die Einstellebene. Bei kleineren Abbildungsmaßstäben ändert sich die Schärfentiefe und erstreckt sich jeweils zur Hälfte vor und hinter die Fokussierebene. Es erweist sich daher als dienlich, den schärfsten Punkt im vorderen Bereich des Objekts einzustellen (Stüper, 1962; Bengel, 1984).

Um den Abbildungsmaßstab zu verbessern bzw. zu vergrößern, muss die Brennweite des Objektivs verkürzt oder die Bildweite mit Hilfe einer Auszugsvergrößerung verlängert werden. Bengel (1984) gibt einen Überblick zu abbildungsmaßstabsteigernder Fotoausrüstung. In den Arbeiten von Korbel (1994) und Ravelhofer (1996) zeigte sich die Verwendung von Makro-Objektiven in Kombination mit Balgengeräten als besonders geeignet. Mit den verwendeten Systemen konnten die erforderlichen Abbildungsmaßstäbe bei der Fotografie von Präparaten optimal erreicht werden.

3.3.2 Beleuchtung

Die Beleuchtung im Nahbereich stellt sich nach Bengel (1984) als erswert dar. Bei geringem Arbeitsabstand zwischen Objektiv und Objekt ist eine Beleuchtung sehr schwierig und verlangt eine besondere Art der Beleuchtung, zudem nimmt die Helligkeit des Objekts mit dem Quadrat der Bildweite ab. Wegen der notwendigen Schärfentiefe im Nahbereich sollte die Blende so klein wie möglich gehalten werden, dies bedingt auch eine Anpassung der Belichtungszeit oder Lichtintensität. Dies ist jedoch nur bei unbewegten Objekten möglich. Vor allem bei freihändig geschossenen Aufnahmen ist daher eine größere Lichtintensität mit Hilfe von Elektronenblitzgeräten unerlässlich (Bengel, 1984). Am besten lassen sich Objekte im Nahbereich mit Hilfe von zwei Blitzgeräten ausleuchten, diese können als Zangenbeleuchtung, gleichwertig, oder in Form eines Haupt- und eines Aufhelllichtes, ausgelöst über ein Synchronisationskabel oder einen Servoblitzauslöser, eingesetzt werden (Bengel, 1984). Dabei lässt sich eine schattenarme Aufnahme mit genau dargestellten Details erzeugen. Eine zu starke Ausleuchtung lässt sich mit Hilfe von Streuscheiben abschwächen.

Im Nahbereich ist die Ermittlung der korrekten Belichtung bei der Verwendung von Elektronenblitzgeräten ohne Computersteuerung schwierig. Bei nicht selbsttätiger Lichtdosierung kann sie mit Hilfe der Lichtzahlformel errechnet werden (Bengel, 1984).

3.3.3 Hintergrund und Freistellung

„Ein richtig gewählter Hintergrund isoliert das Aufnahmeobjekt, damit die Aufmerksamkeit des Betrachters nicht durch Nebensächlichkeiten abgelenkt wird. Er betont die äußere Form, die sich klar von ihm abheben soll“ (Bengel, 1984). Einfarbige, matte und strukturlose Hintergründe eignen sich daher am besten. Vorteilhaft ist es, aus flexiblem Material – Karton, Velourstoff oder Samt – einen gebogenen Hintergrund zu schaffen, da so der scharfe Übergang nicht zum Tragen kommt (Bengel, 1984).

„Die Freistellung hat den Sinn, das Aufnahmeobjekt optisch vollkommen zu isolieren. Es wird der Eindruck erweckt, dass der Gegenstand frei im Raum schwebt“ (Bengel, 1984). Eine optimale Freistellung wird durch die Kombination aus Beleuchtung und Hintergrundanordnung erreicht. Bengel (1984) arbeitet mit Kristall- oder Opalglasplatten, welche über dem eigentlichen Untergrund platziert werden. Auch matte Folien und Polfilter können zum Einsatz kommen, um Reflexionen des Hintergrunds zu beseitigen.

Die Farbwahl des Hintergrunds trifft Bengel (1984) in Abhängigkeit von der Farbe des Aufnahmegegenstands und empfiehlt eine Beschränkung auf möglichst wenige Hintergrundfarben, um die Aufnahmen gleichförmig zu gestalten.

Um Schattenbildung zu verhindern, kann eine diffuse Beleuchtung in Form eines „Lichtzelt“ gewählt werden, oder indem man den Untergrund des Objekts selbst ausleuchtet. Als weitere Methode nennt Bengel (1984) die Anwendung eines Leuchtkastens, „mit dessen Hilfe jeder Schatten ‚ausgebrannt‘ wird“.

3.3.4 Digitale Fotografie

Die fortgeschrittene Entwicklung moderner Bildsensoren ermöglicht heutzutage einen breit gefächerten Einsatz von digitalen Kameras in der Medizin. Dabei stellt die Anwendung dieser Kamerasysteme mittlerweile den Standard bei der Dokumentation innerhalb verschiedenster Fachgebiete dar. Auch günstige Kameramodelle ermöglichen ein akzeptables Ergebnis, zur Makrofotografie empfiehlt sich jedoch die Verwendung einer möglichst hochwertigen Ausstattung, um den gehobenen Anforderungen zu genügen. Vereinfacht gesagt bestimmt auch der Preis über die technische Qualität, langfristig lohnt sich daher meist die Anschaffung einer teureren Ausrüstung. In Abhängigkeit von Bauart und Preisklasse weisen digitale Kameras unterschiedliche Sensorgrößen auf, dabei ist ein hoher Megapixelwert nicht automatisch mit einer hohen Bildqualität gleichzusetzen. Vielmehr ist die Größe des eingesetzten Sensors für die erreichbare Auflösung entscheidend, hier

weisen digitale Spiegelreflexkameras größere Sensoren als Kompaktkameras auf (Grassberger & Verhoff, 2013). Befinden sich jedoch zu viele Pixel auf einem Sensor, führt dies zu Bildrauschen und Farbartefakten. Vollformatsensoren in Spiegelreflexkameras entsprechen dem klassischen Kleinbildformat (36 x 24 mm). Als technisch sinnvoll erweisen sich Auflösungen bis etwa 24 Megapixel, wobei die meisten Spiegelreflexkameras über kleinere Sensoren im APS-C-Format (22 x 15 mm) verfügen. Bei diesen Sensoren sind 12 bis maximal 16 Megapixel vertretbar. Da die Sensoren von Kompaktkameras nur eine Größe von 5,40 x 4,05 bis 8,44 x 6,33 mm haben, ist somit ersichtlich, dass eine Anzahl von Bildpunkten jenseits der 10 Megapixel wenig sinnvoll sein kann (Grassberger & Verhoff, 2013).

Der ISO-Wert stellt die Angabe der Sensorempfindlichkeit bei Digitalkameras dar. Ein niedriger ISO-Wert steht für eine Sensoreinstellung für das Fotografieren bei ausreichenden Lichtverhältnissen, bei gleichzeitig optimaler Schärfe und Auflösung des jeweiligen Sensors. Ein höherer ISO-Wert ermöglicht bei schlechten Lichtverhältnissen ein freihändiges Fotografieren bzw. kürzere Belichtungszeiten und jede Verdoppelung des ISO-Werts bringt den Gewinn einer Stufe in der Belichtungszeit oder einer Blendenstufe (Grassberger & Verhoff, 2013). Dabei nimmt allerdings auch das Bildrauschen bei steigender Empfindlichkeit des Sensors zu. Große Sensoren ermöglichen jedoch eine gute Schärfeleistung bei hohen ISO-Werten.

3.4 Digitale Bildbearbeitung

Im Zeitalter der digitalen Bildbearbeitung sind im grafischen Bereich nahezu keine Grenzen mehr vorhanden. In Bezug auf die Nachbearbeitung von Bildmaterial, welches der Dokumentation von anatomischen Strukturen und vorhandenen pathologischen Zuständen dient, bedeutet dies jedoch weitgehend eine Einschränkung der Anwendung dieser Technik. Lediglich auf eine Verbesserung der Parameter des digitalen Bildes sollte hingewirkt werden, da ansonsten

eine Verfälschung der natürlichen Verhältnisse erzeugt wird. Im besten Fall sollte zuallererst versucht werden ein möglichst optimales Bildergebnis zu erlangen, die digitale Nachbearbeitung sollte daher als zweitrangig betrachtet werden. Nur ein handwerklich sauber erzeugtes Bild bietet die Grundlage für geeignetes Material zur Dokumentation. Das Foto entsteht im Moment der Aufnahme und nicht erst später durch aufwendige digitale Nachbearbeitung (Adobe, 2009).

4. Interaktive Lernprogramme

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts galt die Einführung des multimedialen Lernens als Lernen der Zukunft, dabei wurde spekuliert, ob es in diesem Zusammenhang überhaupt noch Vorlesungen mit Anwesenheit der Studierenden geben wird. Mittlerweile weiß man, dass das computerbasierte Lernen eher als Ergänzung und Sonderform der gesamten universitären Lehre betrachtet werden kann. Jedoch verbreiten sich Lernprogramme zunehmend, da sie durch fortgeschrittene Informationstechnologien und Computerhard- und -software kostengünstig und von einer breiten Masse erstellt bzw. programmiert werden können. Daher wird sich der Bereich des Multimedialernens sicherlich auch in Zukunft noch weiter vergrößern.

Lernen mit Verwendung neuer Medien und computerbasierender Lernkontrolle wird seit Langem unter dem Begriff E-Learning zusammengefasst (Breitwieser, 2002; Kerres, 2007). Gegenüber herkömmlichem Lernen ist E-Learning in der Lage, den Lernprozess zu verbessern, und bietet viele Vorteile. Computerversierte jüngere Menschen haben eine höhere Motivation, am PC zu lernen, als Fachbücher durcharbeiten, zudem sprechen sie mit hohem Interesse auf Bild-, Video- und Multimediainhalte an. Ein weiterer Vorteil bietet die individuelle Zeiteinteilung, wann, wo und wie lange das Lernen stattfinden soll. Nachteile beim E-Learning bestehen für Menschen mit geringer oder unzureichender praktischer Erfahrung mit dem Umgang von Computern, dies beeinflusst die Bereitschaft zum Lernen und mindert den Lernerfolg (Kubicek et al., 2004).

Über die Gründe für den Einsatz und die Erstellung von Lernprogrammen ist bereits eine Vielzahl von Arbeiten zu finden. Im Folgenden soll daher nur einer kurzer Überblick über die wichtigsten Punkte gegeben werden.

4.1 Computerbasiertes Lernen in der Tiermedizin

Üblicherweise erfolgt die Vermittlung von theoretischem Wissen in der Tiermedizin im Rahmen von Vorlesungen, Seminaren und Vorträgen.

Neben der klassischen Fachliteratur erfreuen sich interaktive Lernprogramme zur didaktischen Wissensvermittlung seit den vergangenen zehn Jahren zunehmender Beliebtheit. Dies liegt nicht nur daran, dass die Verwendung elektronischer Medien Einzug in den Lernalltag gehalten hat, sondern vor allem daran, dass Studierende diese bevorzugt und mit hoher Akzeptanz nutzen. An deutschen Universitätseinrichtungen gilt der Zugang zu einem Computer und dem Internet als gesichertes und gängiges Arbeits- und Lernmittel (Middendorf, 2003). Ein Internetzugang für die Organisation eines Studiums ist unverzichtbar geworden. Alle technischen Voraussetzungen für computerbasiertes Lernen sind daher vorhanden. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die Verbreitung von Computern und die private Nutzung weiter zunehmen werden (Ehlers et al., 2002).

4.2 Didaktische Anforderungen

Die Systematik von Lehren und Lernen in Theorie und Praxis bezeichnet man als Didaktik (Brockhaus, 2000). Die Methodik in der Lehre gilt als ein Teilbereich der Didaktik. Ein Lernprogramm sollte besonders drei Kriterien erfüllen. Diese sind: eine einfache Handhabung ohne Einlernen, eine hohe Anschaulichkeit mit der Möglichkeit zu individuellem Lerntempo sowie die softwareunabhängige und kostengünstige Nutzung (Ehlers & Friker, 2003).

4.3 Gestaltung von Lernprogrammen

Die optische und strukturelle Gestaltung der Inhalte eines Lernprogramms hat eine emotionale und deshalb auch motivierende Wirkung auf den Lernenden und beeinflusst daher bedeutend den Lernerfolg (Deimann, 2002; Strzebkowski & Kleeberg, 2002). Besonders das Bildschirmdesign sollte einen ersten positiven Eindruck der Lernsoftware gegenüber dem Nutzer vermitteln, da sie im negativen Falle keine Akzeptanz findet (Kerkau, 2002). Dabei schafft die Benutzeroberfläche die Verbindung zwischen Technik und Mensch und ermöglicht, in Kombination mit den Inhalten, die Bedienung (Thissen, 2003).

4.4 Gliederung und Navigation

Die Gliederung der präsentierten Inhalte sollte dem Benutzer einen guten Überblick verschaffen und nicht zur Desorientierung beitragen, da dies die Bedienung unmöglich macht (Klimsa & Issing, 2002). In der Literatur sind unterschiedliche Formen zur Realisierung einer Navigationsstruktur beschrieben (Rietsch, 2003). Die Navigationsstruktur einer Anwendung sollte leicht und intuitiv erfassbar sein, um ein zügiges Auffinden des gesuchten Inhalts zu ermöglichen (Strzebkowski & Kleeberg, 2002).

III. MATERIAL UND METHODEN

1. Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, um die normal-anatomischen und physiologischen Verhältnisse am Auge verschiedener Fischarten darzustellen. Durch die angewandte Präparation und fotografische Dokumentation soll die Grundlage für weitere ophthalmologische Untersuchungsmethoden sowie zur Beurteilung von klinischen Befunden geschaffen werden. Gleichzeitig sollen bereits existierende Methoden zur Eukleation und Präparation von ophthalmologischen Präparaten evaluiert und ihre Eignung bei Fischaugen überprüft werden.

Um die Arbeitsschritte der Methodik sowie die Ergebnisse in Form von Bildmaterial sowohl für die graduelle- als auch postgraduelle Lehre bereitzustellen, bedarf es neben der gedruckten Ausgabe der Arbeit jedoch auch einer zeitgemäßen Anwendungsform. Da in der heutigen Zeit moderne Informationstechnologien unumgänglich geworden sind und zudem einen echten Mehrwert innerhalb der traditionellen Lehre bieten, soll dies mit Hilfe eines computergestützten, online Lernprogramms realisiert werden.

2. Problematik

Eine Anleitung zur Präparation und Herstellung ophthalmologischer Präparate von Fischaugen ist in der Literatur bisher nicht zu finden. Aufgrund der unterschiedlichen strukturellen Beschaffenheit von Fischaugen, insbesondere der empfindlichen Strukturen im Augeninneren, sowie der engen knöchernen Orbita und des kurzen Sehnerven, schränkt sich die Vorgehensweise, die man aus der Säugetierophthalmologie kennt, teilweise ein. Um Präparate akzeptabler Qualität mit möglichst geringem Zeitaufwand zu produzieren und zu dokumentieren, bedarf es des Wissens der detaillierten Technik bei der praktischen Vorgehensweise. Eine seitenstarke Dissertation in Form eines gedruckten

Dokuments oder als elektronisches Abbild bietet nicht die ideale Form der Übermittlung aller Feinheiten der Methodik. Daher ist die Erstellung eines Lernprogramms die optimale Möglichkeit zur Veranschaulichung der praktischen Arbeitsschritte. Dabei sind besonders eine leichte Bedienbarkeit und der Zugang über das Internet entscheidend. Das Internet bietet hierbei gleichzeitig die größtmögliche Verfügbarkeit, da von jedem Computer mit Internetanschluss zugegriffen werden kann.

3. Untersuchungsmaterial

Im Zeitraum von März 2012 bis Mai 2014 wurden insgesamt 115 Augenpräparate untersucht, es handelte sich dabei um Bulbi von neun Fischarten aus den Familien der Lachsfische (Salmonidae) und Karpfenfische (Cyprinidae) (Tab. 1).

Die Mehrzahl der Präparate stammt aus der Fischwirtschaft. Die Augen wurden mehrheitlich von frisch geschlachteten Fischen nach Betäubung und anschließender Tötung entnommen. Als Material standen nur die Köpfe der Tiere zur Verfügung. Die Bulbi wurden soweit möglich immer paarig entnommen und fixiert. Die Augen wurden anschließend präpariert und fotografisch dokumentiert. Drei Augenpräparate entstammen aus der Klinik für Vögel, Reptilien, Amphibien und Zierfische, teilweise aus zur Sektion bestimmten Einsendungen oder von euthanasierten Tieren.

Tabelle 1: Auflistung untersuchter Fischaugen (März 2012 bis Mai 2014)

Lateinische Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung	n
Salmoniformes (Lachsartige), Salmonidae (Lachsfische)		
Salmo salar, L. 1758	Atlantischer Lachs	19
Salmo trutta fario, L. 1758	Bachforelle	22
Oncorhynchus mykiss, W. 1792	Regenbogenforelle (Lachsforelle)	17
Hucho hucho, L. 1758	Huchen	2
Coregonus, L. 1758	Renke	15
Salvelinus, R. 1836	Saibling	31
Cypriniformes (Karpfenartige), Cyprinidae (Karpfenfische)		
Cyprinus carpio, L. 1758	Karpfen	9

4. Präparationstechnik

4.1 E nukleation

Oberste Priorität bei der E nukleation hat der Erhalt des vorhandenen Zustandes der Augen. Sowohl der normal-anatomische als auch der pathologische Zustand kann durch Wahl der richtigen Vorgehensweise weitgehend erhalten bleiben, obwohl die Struktur bzw. der Aufbau des Bulbus relativ empfindlich ist.

Dabei ist der zeitliche Ablauf entscheidend, um autolytische Veränderungen zu vermeiden. Deshalb erfolgte die Bulbusentnahme meist unmittelbar bzw. innerhalb einer Stunde nach dem Tod des Tieres. Transport und Lagerung des Untersuchungsmaterials geschahen stets gekühlt.

Bei den meisten Fischarten ist das Auge eng von der knöchernen Augenhöhle umschlossen, bekannte Methoden zur Kanthotomie sind daher schwer durchzuführen, da dadurch der Bulbus nicht schonend entnommen werden kann.

Es wurde die Methode wie durch Stoskopf (1993) beschrieben gewählt. Beginnend an den Augenwinkeln wurde die Conjunctiva palpebrae mit einer feinen, stumpfen Pinzette gefasst und vorsichtig kreisförmig zwischen knöcherner Augenhöhle und Augapfel durchtrennt. Anschließend wurde durch stumpfes Trennen das Binde- und Fettgewebe gelöst und so der Bulbus langsam aus der Orbita vorgelagert. Mit einer feinen gebogenen Präparationsschere wurden Augenmuskeln und Sehnerv abpräpariert. Als ideal erwies sich dabei ein leichter Zug der durch die Pinzette gefassten Conjunctiva palpebrae, da so einem eventuell entstehenden Druck gegen den Bulbus entgegengewirkt werden kann.

Bei Fischarten mit massivem retrobulbärem Fettgewebe lässt sich der Bulbus nur sehr schwer freipräparieren, allzu hartnäckiges Entfernen führt zur Schädigung der Struktur des noch frischen und unfixierten Auges. Es empfiehlt sich lediglich das Abtrennen der Ansätze der Augenmuskeln, um dem Gesamtbild des Präparates eine saubere Optik zu verleihen.

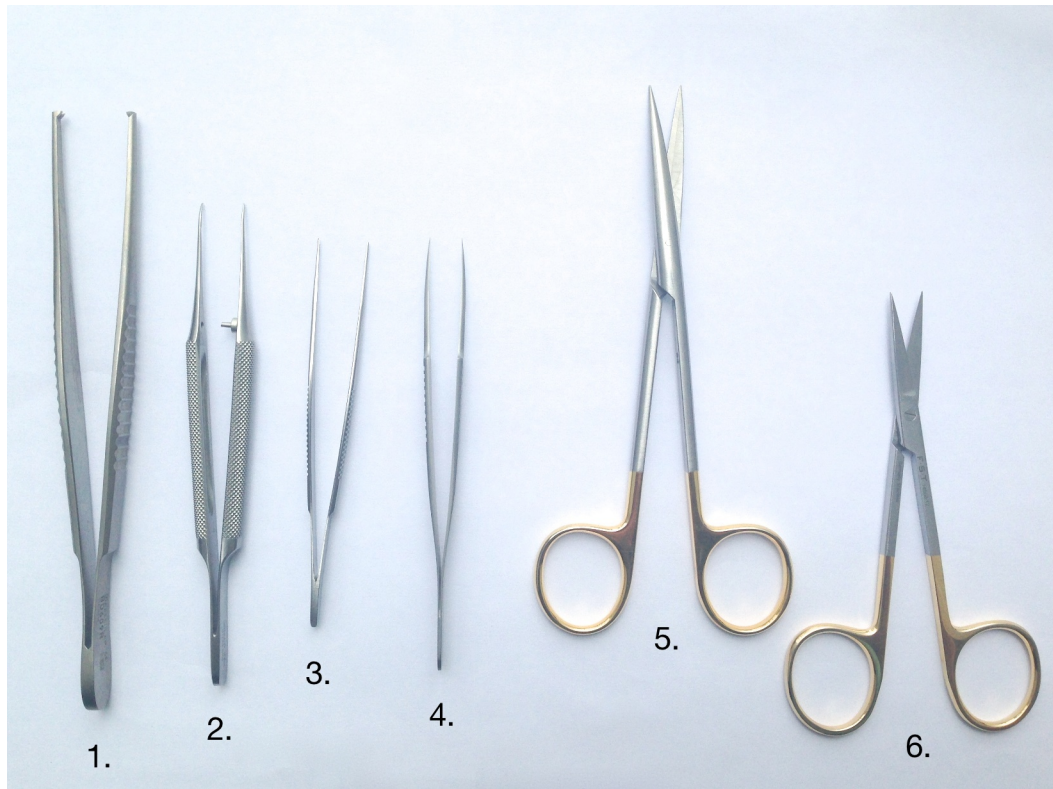


Abbildung 9: Geeignetes Besteck zur Enukleation und Präparation: 1. chirurgische Pinzette, 2. Anatomische Pinzette (gewinkelt), 3. Anatomische Pinzette (gezahnt), 4. Anatomische Pinzette (fein), 5. Präparierschere (nach Metzenbaum), 6. Präparierschere (Aufnahme: A. Reimann)

4.2 Fixationsmedium

Die sorgfältig entnommenen Bulbi wurden mittels Standardfixierung (Saunders & Rubin, 1975; Slatter, 2008) in 10%igem Formalin fixiert. Die Formalinlösung wurde durch folgendes Mischungsverhältnis gepuffert:

Formalin abs. (37%)	100 ml
Aqua dest.	675 ml
PBS Puffer 0,4 M; pH 7,3	225 ml

4.3 Präparation der vorderen Augenkammer

Mittels einer herkömmlichen Insulinspritze wurde die jeweils erforderliche Menge Fixativ in die vordere Augenkammer injiziert, um den Erhalt der physiologischen Krümmung der Kornea zu gewährleisten. Bei der als Parazentese bezeichneten Technik wurde am Rand der Kornea im Übergangsbereich zur Sklera eingestochen und das Volumen eingebracht. Dabei wird die Kanüle zentral – ohne dabei die Iris zu verletzen – bis zur

Mitte der Kornea geführt. Ohne diese Maßnahme kommt es bereits nach wenigen Stunden im Verlauf der Fixation zum Einsinken der Hornhautoberfläche.



Abbildung 10: Parazentese mit Hilfe einer Insulinspritze, Inzision im Bereich des Limbus, Fixation des Bulbus mittels einer Pinzette

4.4 Fixationsdauer und Lagerung der Präparate

Um die optimale Fixationsdauer zu ermitteln und gleichzeitig den zeitlichen Einfluss der Lagerung zu untersuchen, wurden anfangs je sechs Bulbi unterschiedlicher Größe zeitgleich in angegebener Standardfixierung angesetzt. Es folgten eine Fixationsdauer von drei, sieben und vierzehn Tagen sowie eine Lagerung über einen, drei und sechs Monate. Als Letztes wurde ein Teil der Augen nach einer einjährigen Lagerung untersucht. Nach erreichter Lagerungsdauer wurden die Bulbi wie angegeben kalottiert und hinsichtlich ihrer Qualität begutachtet.

Die Aufbewahrung der Präparate erfolgte dabei im Kühlschrank bei einer durchschnittlichen Temperatur von ca. drei bis sechs Grad Celsius in der angegebenen Standardfixierung.

4.5 Kalottierung

Um eine optimale und zudem einheitliche Darstellung der beiden Hemisphären zu erreichen, ist eine exakte und soweit möglich standardisierte Schnitfführung zur Kalottierung des Bulbus notwendig. Dabei gilt es möglichst alle anatomisch relevanten Strukturen im Augeninneren zu schonen und zu erhalten. Bei Knochenfischen sind die Lage der Linse und die Position des Processus falciformis zu berücksichtigen, es wurde daher eine mediane horizontale Schnittebene gewählt (Abb. 12).

Die Bulbi wurden von der Augentrückseite ausgehend mit einem scharfen Mikrotommesser (Abb. 11) langsam und mit konstantem Druck, auf horizontaler Ebene, in einem Stück kalottiert. Dabei ist der Vorgang auf wenige Schneidebewegungen zu reduzieren, da ansonsten kein ausreichend sauberes Schnittbild, insbesondere an den Präparatkanten, erreicht werden kann.

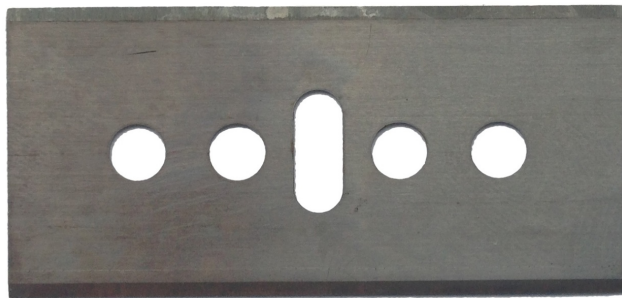
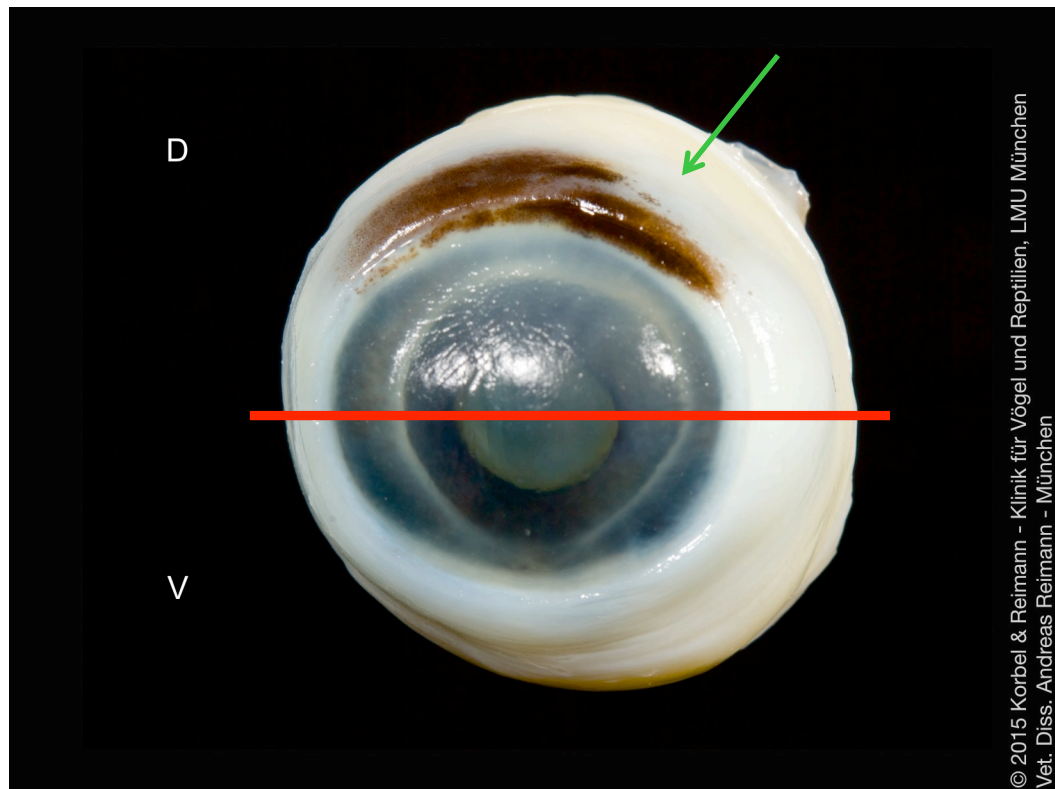


Abbildung 11: Mikrotommesser zur Kalottierung (vergrößerte Abbildung); (Aufnahme: A. Reimann)



© 2015 Korbel & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 12: Bulbus eines Koi (*Cyprinus carpio*), OS, rote Linie: horizontale Schnittebene, grüner Pfeil: Pigmentierung dorsaler Bereich der Sklera, D: dorsal, V: ventral

5. Histologie

5.1 Anfertigung der Schnittpräparate

Um auch eine mikroskopische Übersicht der anatomischen Verhältnisse darzustellen, wurden histologische Schnittpräparate angefertigt. Die Entnahme, Präparation und Fixation erfolgten in gleicher Weise wie bei den makroskopischen Präparaten. Die in Formalin fixierten Augen wurden nach einer Dauer von drei Tagen wie folgt erläutert für das Anfertigen von Mikrotomschnitten vorbereitet.

- Fixierung des frisch enukleierten Bulbus in Formalin (Standardfixierung) für drei Tage
- Entfernung des extraokularen Fettgewebes
- Lagerung in 30%iger Sucroslösung für 24 Stunden
- zweimaliger Wechsel in frische Sucroslösung
- Einbettung des Bulbus in OCT (Tissue-Tec O.C.T. Compound, Firma SAKURA)

- Snap-Freezing des eingebetteten Bulbus bei -20 °C
- Schneiden des Präparates bei -20 °C im Mikrotom

Die Schnitte wurden mit einem Mikrotom LEICA 1850 Cryostat in unterschiedlichen Schnittstärken (8, 10 und 12 µm) angefertigt. Die Wahl der Schnittebene erfolgte im Hinblick auf die Vergleichbarkeit mit den makroskopischen Präparaten. Daher wurde eine horizontale Ebene durch den Sehnerv und den Linsenkörper gewählt. Nach einer qualitativen Auswahl wurden die Präparate mittels Standard-HE-Färbung für die Mikroskopie eingefärbt. Die HE-Färbung wurde wie folgt ausgeführt:

- Trocknen der Schnittpräparate bei Raumtemperatur für 30 Minuten
- Dehydratation in Ethanol 100% für zwei Minuten
- Rehydratation in Aqua dest. für zwei Minuten
- Inkubation in Harris' Hematoxylinlösung (Sigma-Aldrich, Cat. No. HHS) für fünf Minuten, Abtropfen und Spülen in Aqua dest.
- Zügiges Eintauchen in wässriger Salzsäurelösung 0,5%, Abspülen unter Leitungswasser, Eintauchen in Aqua dest.
- Inkubation in wässriger Ammoniaklösung (3,0 ml 28% Ammoniak in 1000 ml Aqua dest.) für eine Minute, Abwaschen unter Leitungswasser, Aqua dest., Spülen in 95% Alkohol
- Mehrmaliges Ein- und Austauchen in Eosinlösung (Sigma-Aldrich, Cat. No. HT110-1) für zehn Sekunden, Abtropfen für fünf Sekunden
- Inkubation in Alkohol aufsteigender Konzentration, danach Inkubation in Xylol für zwei Minuten
- Luftblasenfreies Aufbringen des Deckglases, Lufttrocknen über Nacht

5.2 Fotografie

Die histologischen Präparate wurden makroskopisch mit Hilfe des unter Punkt 6 beschriebenen Makrostativs und der angegebenen Kamera abgelichtet. Als Hintergrund für die Ausleuchtung des Präparates diente ein Tischröntgenschild.

Die mikroskopischen Aufnahmen der Retina wurden mit einem ZEISS Axioscope A1 und einer ZEISS AxioCam ERc5S erstellt und mit der Software AxioVision weiter verarbeitet. Dabei entstanden Aufnahmen in 2,5- und 10,0-facher Vergrößerung.

6. Fotografische Dokumentation

6.1 Technische Ausstattung

Für die fotografische Dokumentation wurde die Digitalkamera Nikon D80 kombiniert mit einem Nikon AF-S Micro Nikkor 60 mm 1:2.8 G ED Makro-Objektiv gewählt. Das verwendete Makro-Objektiv entspricht mit seiner Brennweite von 60 mm an einer Kleinbildkamera in etwa dem Bildwinkel des menschlichen Auges (Langlotz, 2011). Die Kamera wurde auf einem Makrostativ der Firma Novoflex fixiert. Dies ermöglicht einen maximalen Abbildungsmaßstab von 1:1 und eine Lichtstärke von 1:2,8.

Zwei Satellitenblitze der Firma Novoflex Makroblitz und Makroblitz Servo, montiert auf zwei beweglichen Armen, verbunden mit dem Makrostativ, dienten zur besseren Ausleuchtung der Präparate. Ein Blitz wurde direkt per Synchronkabel mit der Kamera geschaltet, wobei der zweite Blitz über einen Lichtsensor nachgeschaltet war. Somit wurde der erste Blitz automatisch beim Auslösen der Kamera aktiviert und der zweite Blitz kurz danach.

6.2 Objekt- und Kameraanordnung, Beleuchtung

Mit Hilfe einer schwarzen formbaren Knetmasse (Fimo der Firma Staedler) wurde ein kleiner Ring in passender Größe als stabile Unterlage der Bulbi geformt. Die Knetmasse wurde gemeinsam mit dem Bulbus auf einem

schwarz eingefärbten Holzstab (Durchmesser 1,0 cm) mit hölzernem Standfuß mit einer Höhe von ca. 13 cm angebracht. Die Oberseite des Standfußes wurde mit Molton Stoff B1 abgedeckt, um einen neutralen, dunklen und lichtabsorbierenden Hintergrund zu erhalten.

Beide Blitzeinheiten wurden u-förmig und hauptsächlich gegenüber liegend des Objekts in einem gleichbleibenden Abstand von ca. 15 cm platziert. Dabei galt es den optimalen Winkel zur Ausleuchtung des Objekts bei gleichzeitiger Reduzierung von Reflexionen zu ermitteln und einzustellen. Für die manuelle Schärfeneinstellung wurde eine schwenkbare Halogenlampe zur besseren Ausleuchtung eingesetzt. Störendem Lichteinfall aus umgebenden Fenstern wurde mittels Abdunkelung entgegengewirkt.

Die Kamera wurde am oberen Ende des Stativs befestigt, um einen gleichbleibenden Abstand zum Objekt zu gewährleisten. Der Abstand zum Objekt betrug dabei ca. 24 cm zur Sensorebene.



Abbildung 13: Kameraaufbau, C: Kamera, O: Makro-Objektiv, B: Blitz mit Drahtauslöser, Bs: Servoblitz, S: Makrostativ mit Blitzauslegern, M: Molton, H: Holzstab, Halterung für Objekt, roter Pfeil: Position des Objekts (Aufnahme: A. Reimann)

6.3 Kameraeinstellungen

Die Kamera wurde auf die maximal mögliche Pixelgröße 3872 x 2592 (10,2 Megapixel) im Bildseitenverhältnis 3:2 (Breite : Höhe) eingestellt. Die Bildqualität wurde auf duales Dateiformat *NEF (RAW) + JPEG Fine* eingestellt. Der Fokussiermodus wurde ebenso wie der Belichtungsmodus manuell gewählt. Die Lichtempfindlichkeit des Sensors wurde auf den ISO-Wert 100 bis 250 eingestellt.

Die Präparate wurden mit einer Blendeneinstellung von $f/16$ bis 25 und einer Verschlusszeit von $1/160$ – $1/200$ abgelichtet.

6.4 Abbildungsmaßstab und Schärfentiefe

In der Fotografie ist der Abbildungsmaßstab definiert als das Verhältnis der Abbildungsgröße eines Objekts auf der Filmebene zur Größe des Originalobjekts selbst. Der Abbildungsmaßstab nimmt mit größer werdendem Abstand zum Objekt ab, umgekehrt nimmt der Abbildungsmaßstab mit kleiner werdendem Abstand und Verlängerung der Objektivbrennweite zu. Hierdurch ist der maximale Abbildungsmaßstab eines Objekts begrenzt. Die besonderen Eigenschaften von Makro-Objektiven ermöglichen einen relativ geringen Abstand zum Objekt, beispielsweise entspricht der Abbildungsmaßstab 1:1 der Abbildung des Objekts in Originalgröße auf dem Filmmaterial. Mit dem verwendeten Objektiv Nikon AF-S Micro Nikkor 60 mm 1:2.8 G ED konnte ein Abbildungsmaßstab von 1:1 erreicht werden, jedoch musste der Arbeitsabstand im Einklang mit der nötigen Schärfentiefe gewählt werden. Um den förderlichen Abbildungsmaßstab zu ermitteln, wurden praktische Versuche mit verschiedenen Einstellungen durchgeführt.

6.5 Fokussierebene

Bei den untersuchten Präparaten handelte es sich um dreidimensionale Strukturen, die Vertiefung der Augenhöhle stellt besondere Anforderungen an die Fokussierebene. Die Fokussierebene wurde daher auf die mittlere Höhe bzw. Tiefe der Objekte eingestellt – die sogenannte „hyperfokale Distanz“ (Stüper, 1962). Als Einstellhilfe dienten dabei die Spitze des Processus falciformis oder der hintere Rand der Iris.

6.6 Digitale Fotografie

6.6.1 Bearbeitungssoftware und Bildkomposition

Das digitale Bildmaterial wurde mit der Software Aperture Version 3.5.1 der Firma Apple und der Software Pixelmator Version 1.6.2 der Firma Pixelmator Team Ltd. digital weiterverarbeitet. Um eine möglichst große Ansicht der Augenaufnahmen zu erhalten, wurden die Bilder nachträglich beschnitten. Um dem Betrachter eine Darstellung der natürlichen Größenverhältnisse der unterschiedlichen Präparate zu ermöglichen, wurde das Beschneiden daran angepasst. Für eine einheitliche Darstellung wurde ein Bildseitenverhältnis von 4:3 (Breite : Höhe) gewählt. Für die gedruckte Version der Arbeit wurde eine Druckauflösung von 300 dpi genommen.

6.6.2 Darstellung der Größenverhältnisse

Um während der Navigation durch die Bildergalerie keine störenden Effekte zu erleiden, wurde die mitabgelichtete Millimeterskala entfernt und als einheitliche Fadenskala (5 mm) in das beschnittene Bild übertragen.

6.6.3 Copyrightschutz

Um die Aufmerksamkeit des Betrachters auf das abgelichtete Präparat und dessen Details zu lenken, wurden alle Angaben im Bild in einem zurückhaltenden Grauton realisiert.

Um den Schutz der Urheberrechte der Bilder in Form eines Copyrightschutzes umzusetzen, wurde die Bildqualität der Originaldateien in ihrer Auflösung auf 72 dpi reduziert und ein diagonales Wasserzeichen integriert. Die reduzierte dpi-Zahl wirkt sich nur auf die Druckqualität aus, jedoch nicht auf die Ansicht innerhalb des Lernprogramms. Die Bilder können ohne Minderung der optischen Qualität betrachtet werden.

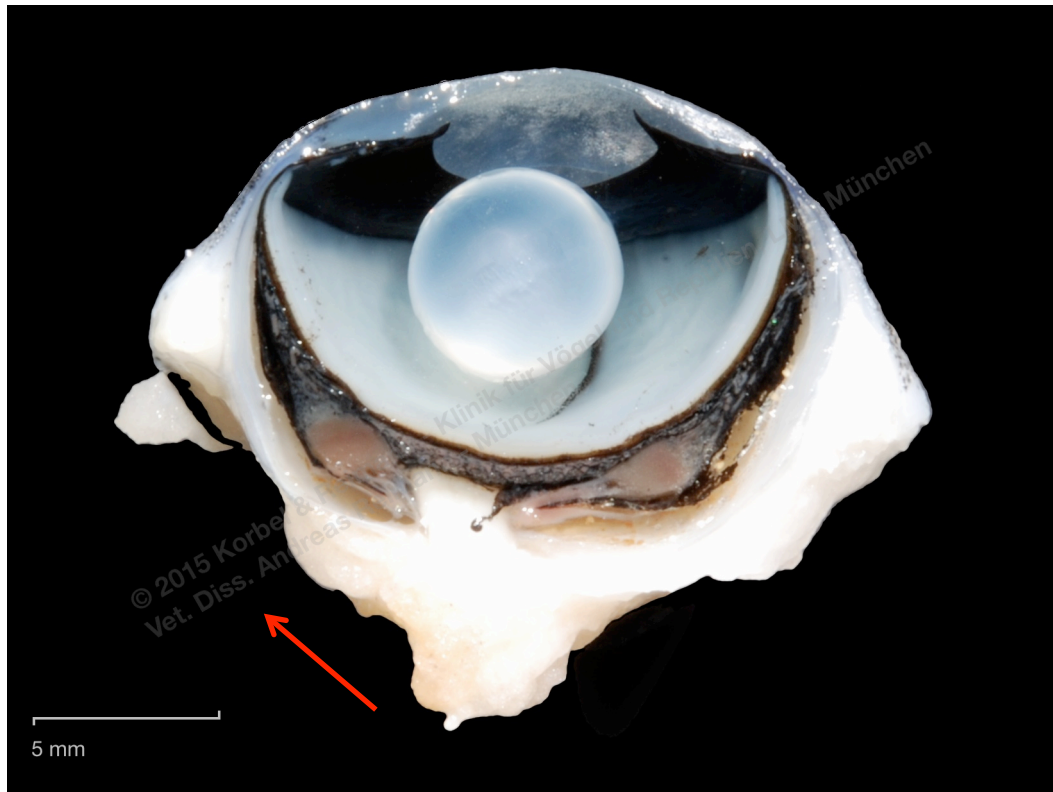


Abbildung 14: Umsetzung des Copyrightschutzes der Bilddateien für das Lernprogramm, roter Pfeil: diagonales Wasserzeichen (transparent)

7. Erstellung des Lernprogramms

7.1 Programmierung

Die browserbasierte Anwendung wurde mit Hilfe der Software Freeway Express der Firma Softpress Systems Ltd. zur Erstellung von Internetseiten (Website-Editor) programmiert. Um die Anzeige mit gängigen Internetbrowsern zu ermöglichen, wurde hierfür die klassische HTML-Programmiersprache gewählt. Zur Erstellung der Arbeit diente ein Laptop-PC der Firma Apple (MacBook) mit dem Betriebssystem Mac OSX Mavericks. Zur Realisierung einer strukturierten und optisch ansprechenden Bildergalerie wurde die Software Showcase (ebenfalls von Softpress Systems Ltd.) verwendet und die Galerie in Form eines Plug-ins in die Websiteprogrammierung integriert.

Nach Planung und Entwurf der Struktur durch den Verfasser konnte mit der Erstellung des endgültigen Layouts begonnen werden. Hierbei erwiesen sich die im Programm gegebenen Vorlagen als besonders

hilfreich und konnten nach Modifikation genutzt werden. Die Einteilung der Navigation folgte im Wesentlichen der Struktur der Arbeit, jedoch ausschließlich bestückt mit den praktisch relevanten Inhalten. Durch die reduzierte Navigationsstruktur soll eine gute Orientierung des Nutzers erreicht werden.

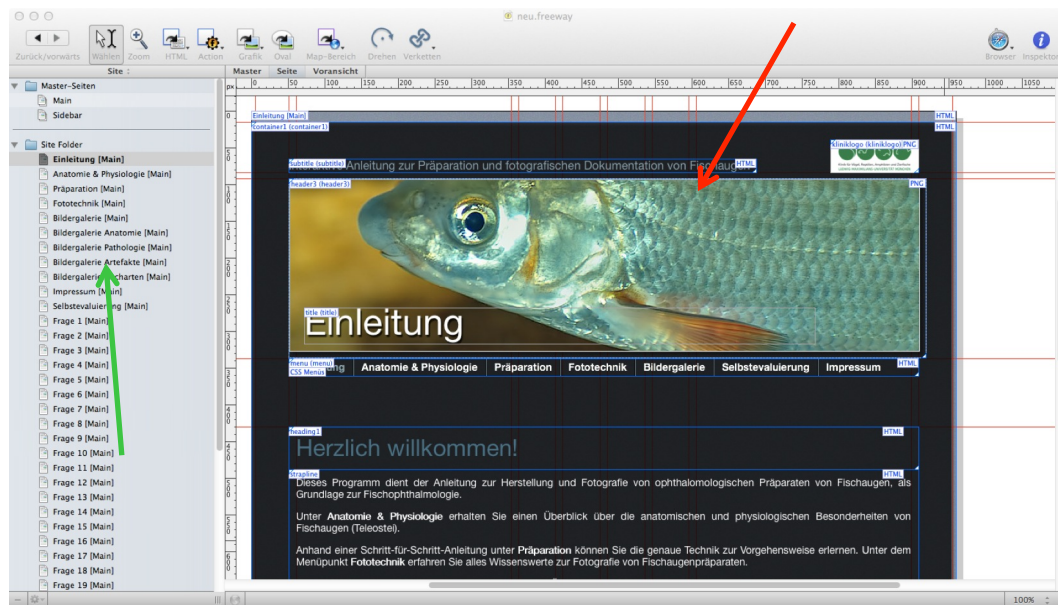


Abbildung 15: Programmoberfläche von Freeway Express, roter Pfeil: Ansicht des Layouts, grüner Pfeil: Seitenstruktur

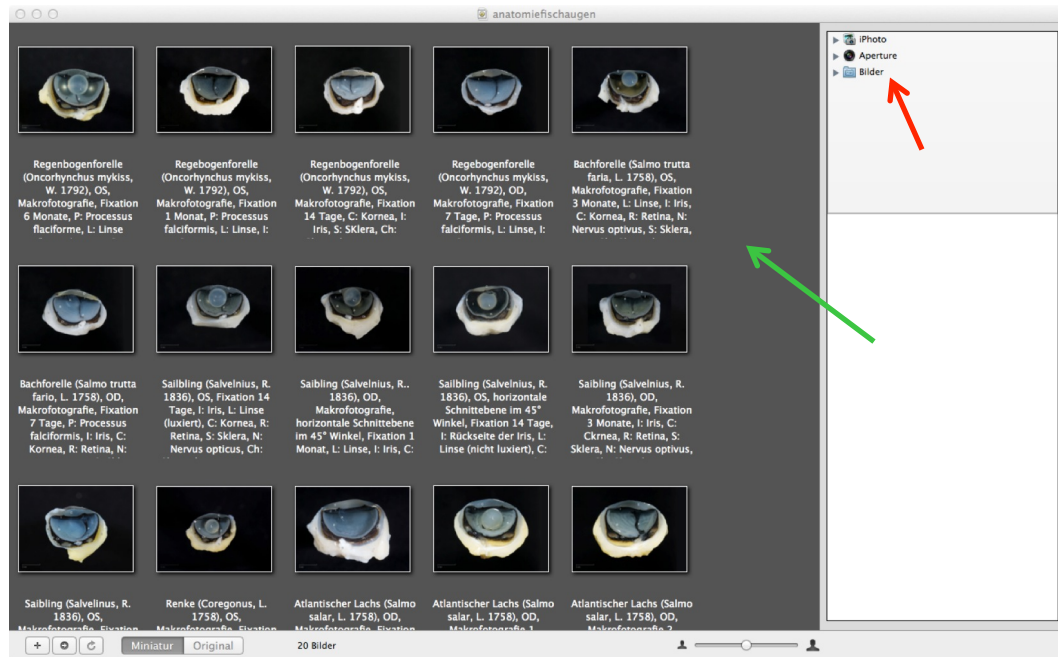


Abbildung 16: Programmoberfläche von Showcase, roter Pfeil: Zugriff auf Ressourcen, grüner Pfeil: Konfiguration der Bildergalerien

7.2 Bereitstellung zur Nutzung

Das erstellte Lernprogramm mit allen Inhalten und integrierten Bildmaterialien wurde in einen separaten Bereich auf den Server der Klinik für Vögel, Reptilien, Amphibien und Zierfische der Ludwig-Maximilians-Universität geladen. Über den Login gelangt der Benutzer in einen zugangsbeschränkten Bereich, dieser kann nur mit einem Benutzernamen und Kennwort betreten werden. Nach erfolgreichem Login hat der User Einsicht in alle Untermenüs und kann die Website in vollem Umfang nutzen.

IV. ERGEBNISSE

1. Enukleations- und Präparationstechnik

Oberste Priorität bei der Enukleation hat der Erhalt des vorliegenden Zustandes der Augen. Sowohl der normal-anatomische als auch der pathologische Zustand kann durch Wahl der richtigen Vorgehensweise weitgehend erhalten bleiben, obwohl die Struktur bzw. der Aufbau des Bulbus relativ empfindlich ist.

Um autolytische Veränderungen zu vermeiden, erfolgte die Bulbusentnahme meist unmittelbar bzw. innerhalb einer Stunde nach dem Tod des Tieres. Transport und Lagerung des Untersuchungsmaterials fanden stets gekühlt statt.

Bei den meisten Fischarten ist das Auge eng von der knöchernen Augenhöhle umschlossen, Methoden zur Kanthotomie sind daher schwer durchzuführen, da dadurch der Bulbus nicht schonend entnommen werden kann.

Es wurde die Methode wie bei Stoskopf (1993) beschrieben gewählt. Beginnend an den Augenwinkeln wird die Konjunktiva mit einer feinen, stumpfen Pinzette gefasst und vorsichtig kreisförmig zwischen knöcherner Augenhöhle und Augapfel durchtrennt. Anschließend wird durch stumpfes Trennen das Binde- und Fettgewebe gelöst und so der Bulbus langsam aus der Orbita vorgelagert. Mit einer feinen gebogenen Präparationsschere wurden Augenmuskeln und Sehnerv abpräpariert. Als ideal erweist sich dabei ein leichter Zug der durch die Pinzette gefassten Conjunctiva palpebrae, da so einem eventuell entstehenden Druck gegen den Bulbus entgegengewirkt werden kann.

Bei Fischarten mit massivem retrobulbärem Fettgewebe lässt sich der Bulbus nur sehr schwer freipräparieren, allzu hartnäckiges Entfernen führt zur Schädigung der Struktur des noch frischen und unfixierten Auges. Es empfiehlt sich lediglich das Abtrennen der Ansätze der Augenmuskeln, um dem Gesamtbild des Präparates eine saubere Optik zu verleihen.

2. Fixation und Kalottierung

Um die optimale Fixationsdauer zu ermitteln, wurden anfangs je sechs Bulbi verschiedener Größe zeitgleich in angegebener Formalinmischung zur Fixierung angesetzt. Die Bulbi wurden nach einer Dauer von 48 Stunden und 72 Stunden sowie nach sieben und vierzehn Tagen kalottiert und hinsichtlich der Fixation und Qualität begutachtet. Es zeigte sich, dass Augen bis zu einer Größe von zwei Zentimetern Durchmesser bereits nach 72 Stunden ausreichend fixiert waren. Lediglich größere Augen benötigten zur optimalen Fixation mindestens fünf bis sieben Tage.

Mit fortschreitender Fixationsdauer kam es zur vermehrten Bildung einer Netzhautablösung (*Ablatio retinae*), welche jedoch auch bei zu starkem Druck während der Kalottierung ausgelöst werden kann. Um weitere Erkenntnisse zur Fixations- und Lagerungsdauer von Fischaugen zu gewinnen, wurden Präparate mit einer Fixations- bzw. Lagerungsdauer von einem, drei und sechs Monaten sowie vollen zwölf Monaten ausgewertet. Ab einer Fixationsdauer von über drei Monaten kam es zur Farbveränderung der Präparate. So konnte eine zunehmende Graufärbung an der Netzhaut festgestellt werden. Das retrobulbäre Fettgewebe reagierte mit einer zunehmenden Gelbfärbung. Bei einem Teil der Präparate konnte eine deutliche Schrumpfung des Bulbus beobachtet werden, dies war leicht an einem sich bildenden Spalt zwischen der Sklera und Uvea zu erkennen.

Aufgrund der anatomischen Strukturen im Augeninneren kann die Schnittführung bei Fischaugen nicht schräg zur horizontalen Ebene wie bei Vogelaugen erfolgen, sondern sollte möglichst exakt horizontal geschehen. Besonders die Position des *Processus falciformis* gilt es zu berücksichtigen. Zur Orientierung am Augapfel kann die Pigmentierung am Übergang zwischen dem hellen und dunkel pigmentierten Bereich der Konjunktiva bzw. Sklera herangezogen werden. Die Pigmentierung – sofern vorhanden – teilt den Bulbus in zwei gleichgroße horizontale Hälften.

3. Fotografie

3.1 Kameratechnik

Mit dem Einsatz der Kamera Nikon D80 in Kombination mit dem Nikon Nikkor Micro 60 mm 1:2.8 G ED Makro-Objektiv konnte ein Abbildungsmaßstab von maximal 1:1 erreicht werden. Mit Hilfe der Satellitenblitze Novoflex Makroblitz und Makroblitz Servo wurden die Präparate optimal hell ausgeleuchtet, dabei zeigte sich das unterschiedlich starke Auffüllen der Bulbushälfte mit Wasser als hilfreich. Um letztlich Aufnahmen ohne störende Reflexionen zu erzeugen, mussten bei jedem Präparat einige praktische Versuche mit mehreren Aufnahmen durchgeführt werden.

Die Kamera wurde auf die maximal mögliche Pixelgröße 3872 x 2592 (10,0 Megapixel) eingestellt. Für die Aufnahmen wurde der manuelle Aufnahmemodus mit manueller Fokussierung und Blenden- sowie Belichtungseinstellung gewählt.

3.2 Hintergrund und Freistellung

Mit der Verwendung des Novoflex-Makrostativs und des schwarzen Moltonstoffs konnte eine einheitliche Freistellung der Präparate realisiert werden. Auf allen Aufnahmen sind die Objekte optimal auf schwarzem Hintergrund freigestellt (Abb. 13). Die verwendete Objekthaltung ermöglichte ein stabiles Platzieren der Objekte. Durch den Einsatz der Knetmasse konnte die Unterlage an das Präparat individuell angepasst werden und dies ermöglichte dadurch eine waagerechte Ausrichtung.

3.3 Blende, Abbildungsmaßstab und Schärfentiefe

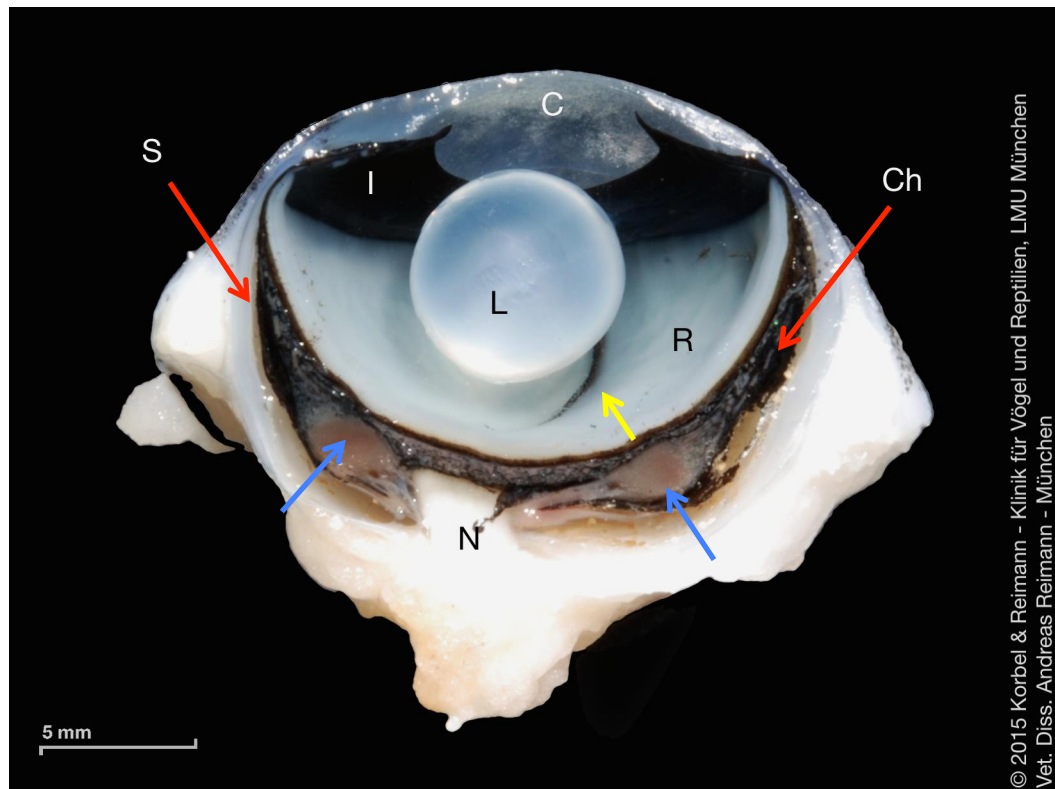
Die Präparate wurden mit einer Blendeneinstellung von $f/16$ bis 25 und einer Verschlusszeit von $1/160$ bis $1/200$ abgelichtet. Das Erarbeiten einer Blendenreihe war nicht notwendig, da bei der digitalen Technik viele praktische Versuche möglich sind, um sich der korrekten Blendeneinstellung zu nähern.

Um die untersuchten Präparate in ihrer vollen Größe scharf abzubilden, war ein Schärfebereich von durchschnittlich 1,5 cm notwendig. Durch die technische Ausstattung war der Abbildungsmaßstab auf maximal 1:1 (1,0) begrenzt. Demzufolge musste der Arbeitsabstand entsprechend gewählt werden, um den erforderlichen Schärfebereich zu erreichen. Bei allen Aufnahmen wurde der Arbeitsabstand auf ca. 24 cm eingestellt.

3.4 Makroskopische Darstellung des Fischauges – Bildteil

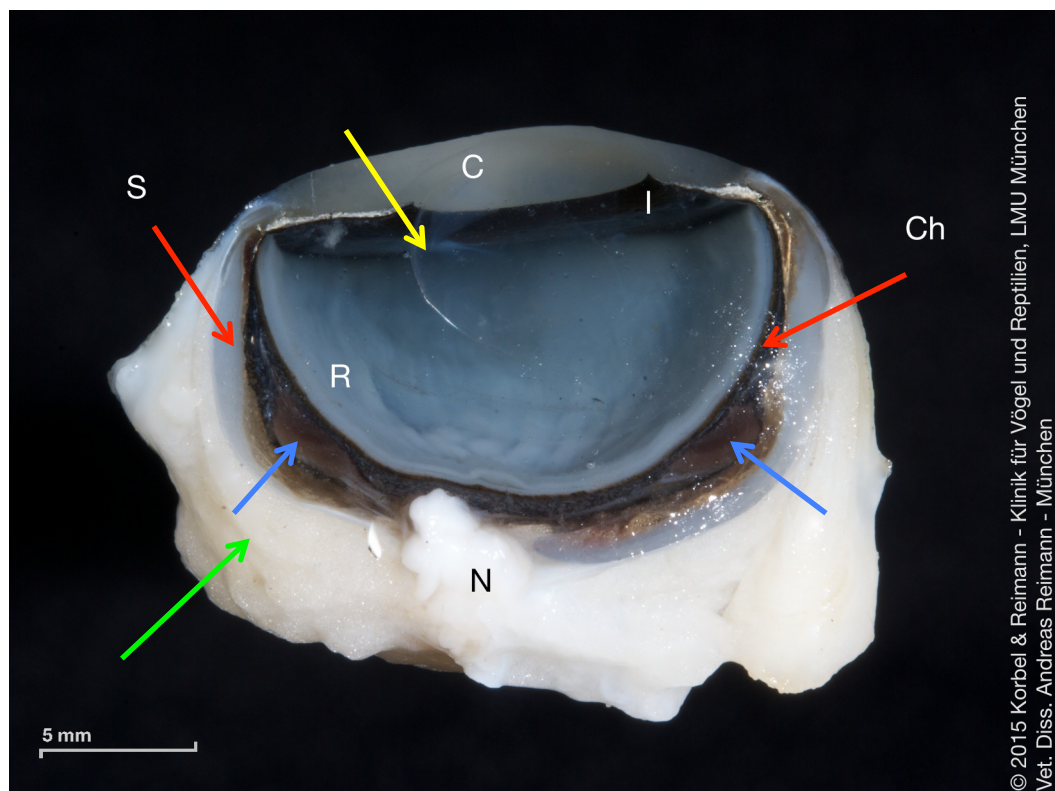
Alle Aufnahmen wurden mit dem unter Punkt 3.1 angegebenen Kamerasystem erstellt. Angaben zu den Blendenwerten und Belichtungseinstellungen sind in den Bildergalerien des Lernprogramms einsehbar.

3.4.1 Anatomie des Fischauges



© 2015 Korbelt & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 17: Atlantischer Lachs (*Salmo salar*, L. 1758), OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 14 Tage, L: Linse (luxiert), I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blaue Pfeile: Corpus chorioideale, gelber Pfeil: Processus falciformis



© 2015 Korbelt & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 18: Atlantischer Lachs (*Salmo salar*, L. 1758), OD, Makrofotografie, Fixationsdauer 14 Tage, grüner Pfeil: massives retrobulbäres Fettgewebe, gelber Pfeil: Linsenkapsel, L: Linse, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blaue Pfeile: Corpus chorioideale

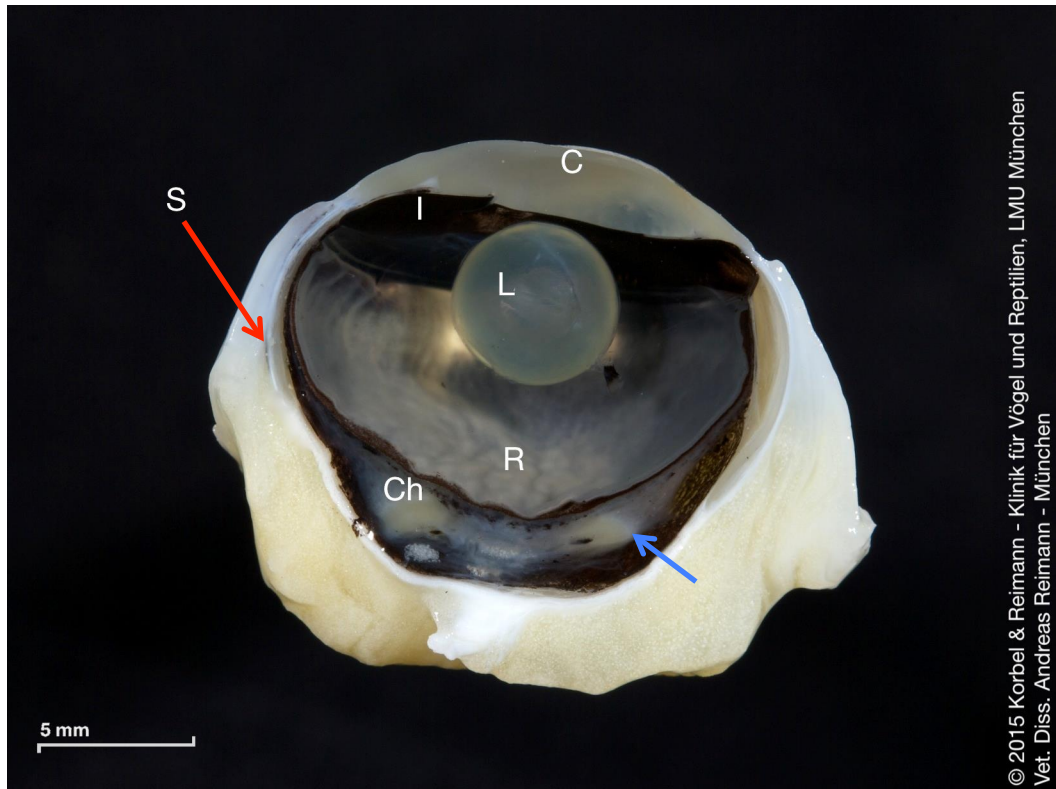


Abbildung 19: Koi (*Cyprinus carpio*, L. 1758), OD, Makrofotografie, 1. Bulbushemisphäre, Fixationsdauer 12 Monate, L: Linse (luxiert), I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus choroidalis

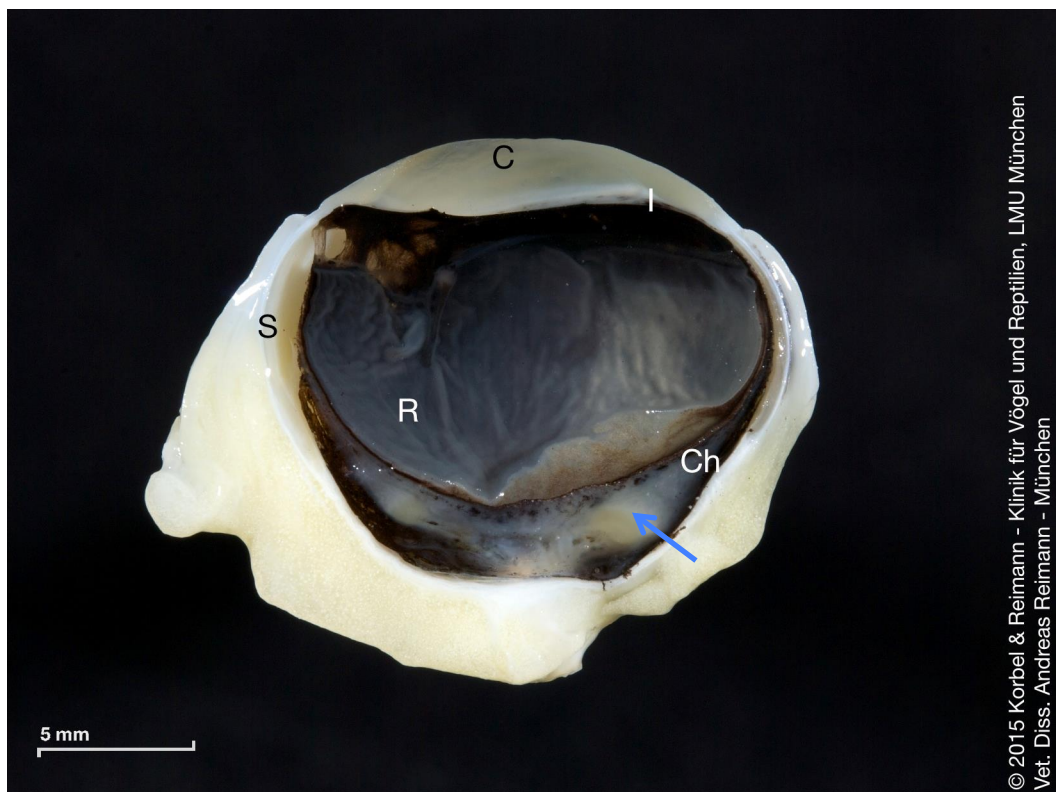
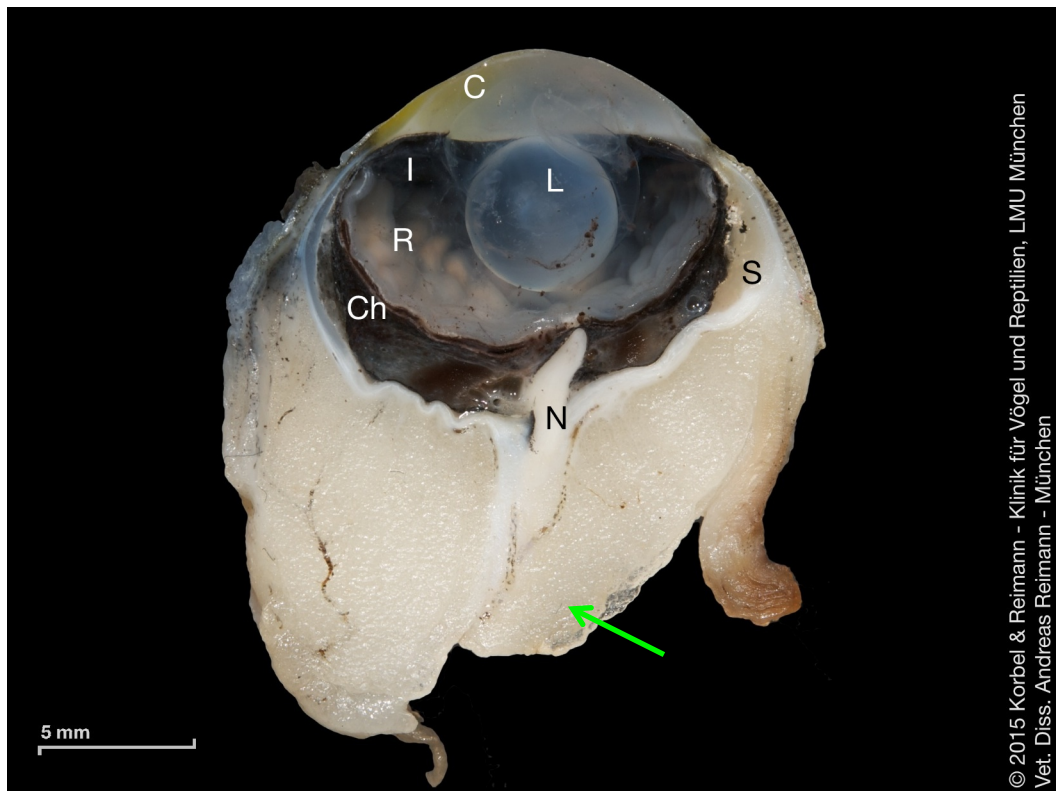
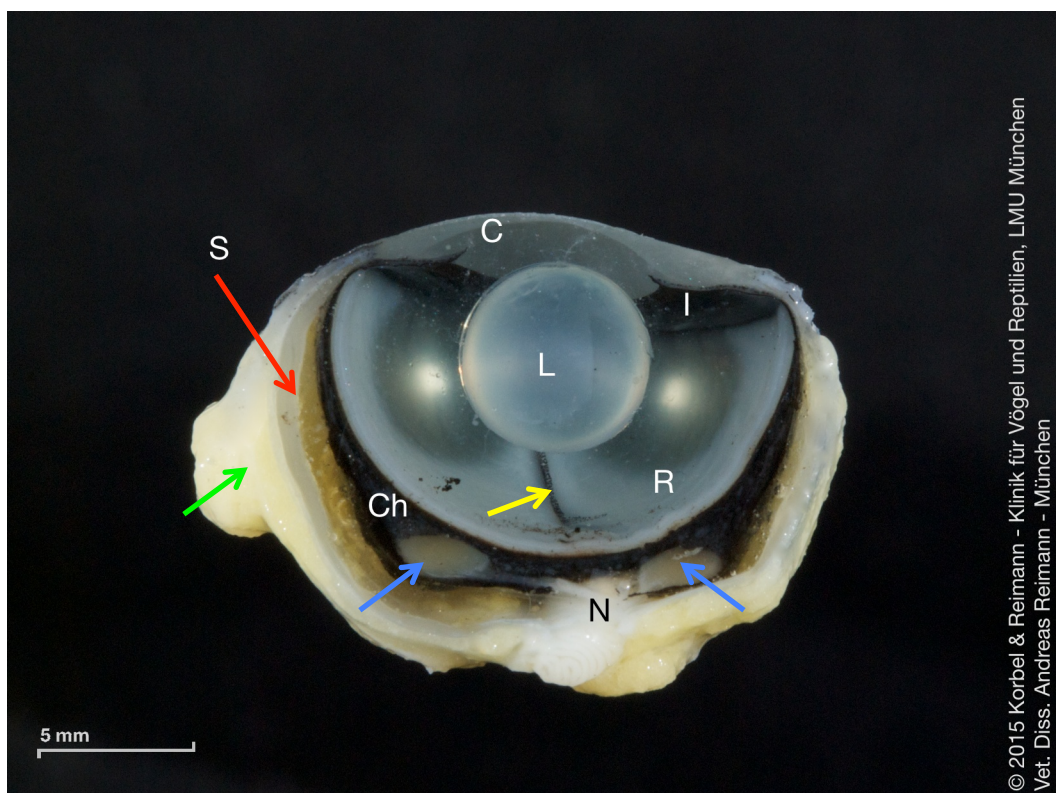


Abbildung 20: Koi (*Cyprinus carpio*, L. 1758), OD, Makrofotografie, 2. Bulbushemisphäre, Fixationsdauer 12 Monate, I: Iris, C: Kornea, R: Retina (Netzhautablösung), S: Sklera, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus choroidalis



© 2015 Korbelt & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 21: Koi (*Cyprinus carpio*, L. 1758), OS, Makrofotografie, Fixationsdauer ca. 7 Tage, L: Linse (luxiert), I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, grüner Pfeil: massives retrobulbäres Fettgewebe



© 2015 Korbelt & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 22: Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 6 Monate, grüner Pfeil: Gelbfärbung des Fettgewebes, gelber Pfeil: Processus falciformis, L: Linse (luxiert), I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus choroideale

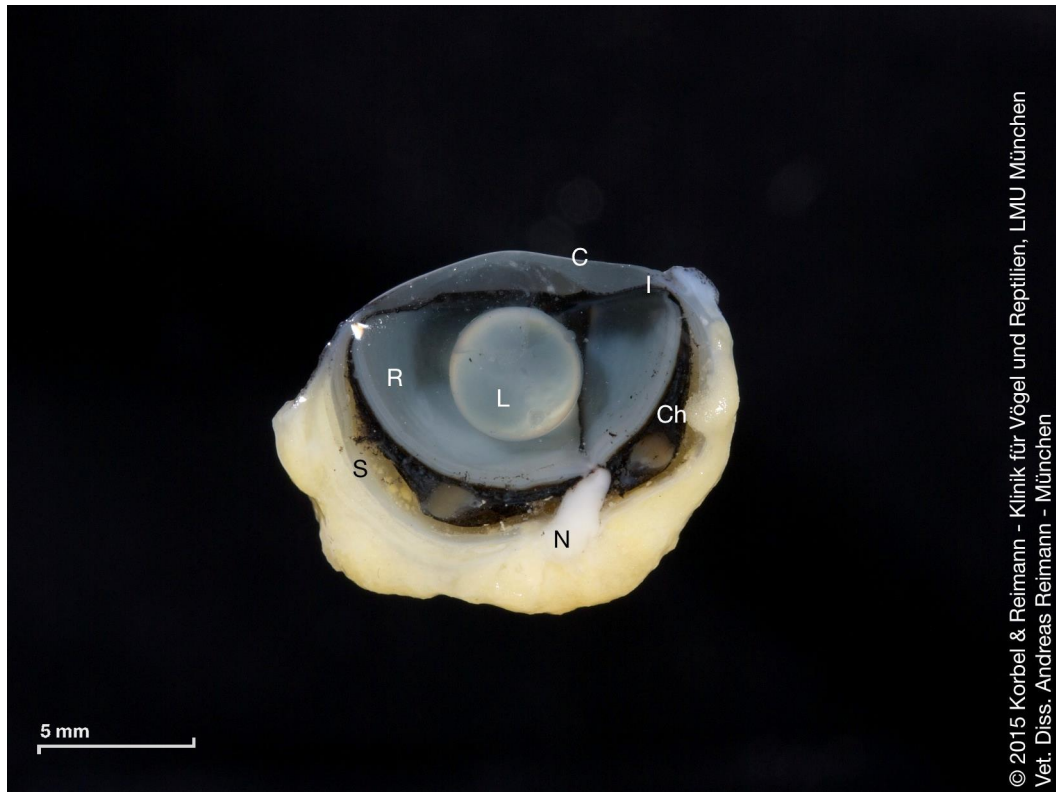


Abbildung 23: Renke (*Coregonus*, L. 1758), OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 3 Monate, L: Linse (luxiert), I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea

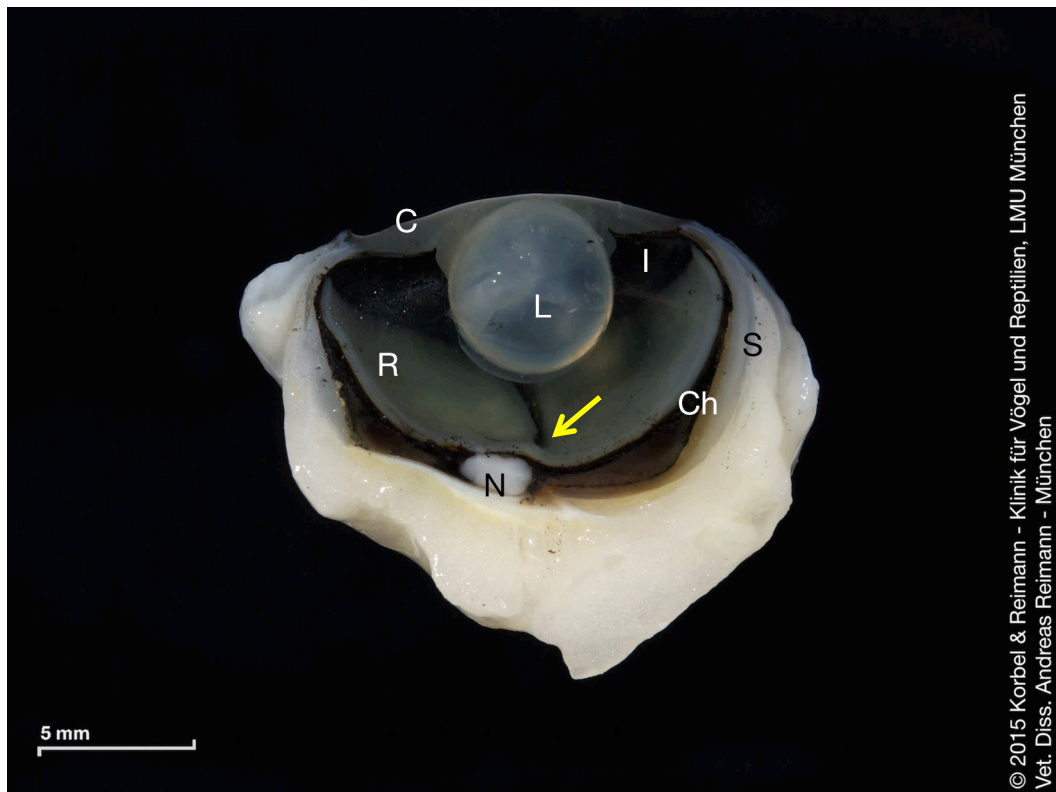


Abbildung 24: Saibling (*Salvelinus*, R. 1836), OD, Makrofotografie, horizontale Schnittbene im 45°-Winkel, Fixationsdauer 1 Monat, L: Linse, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, gelber Pfeil: Processus falciformis

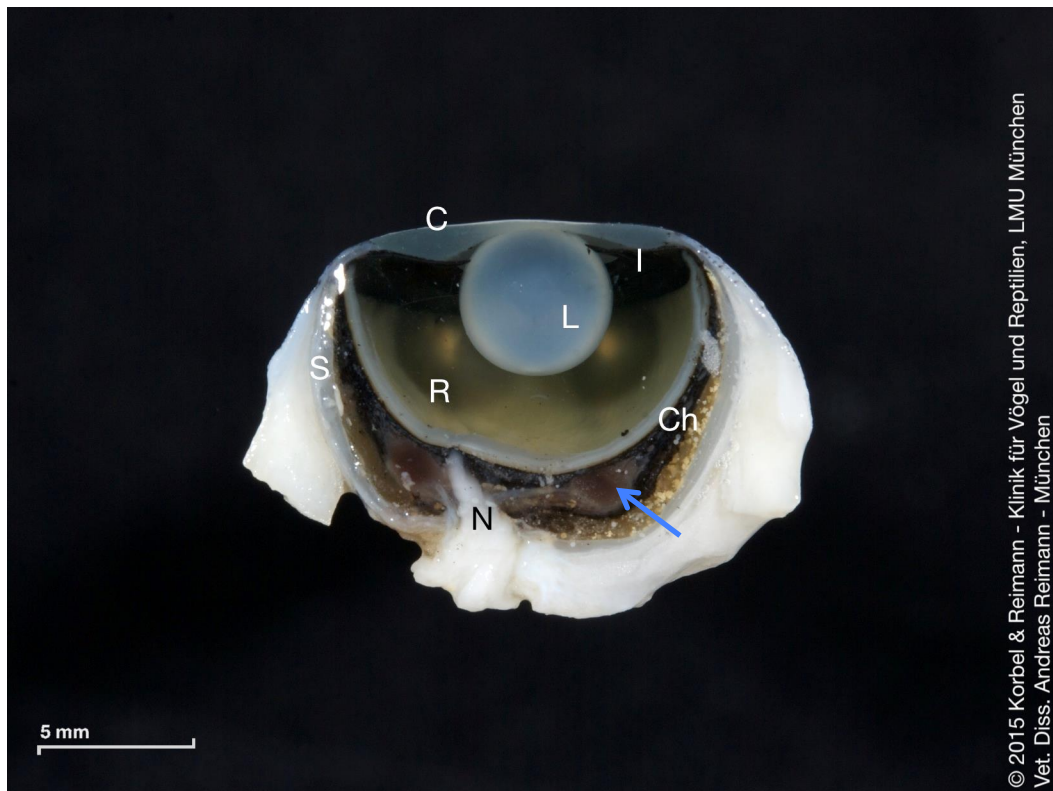


Abbildung 25: Bachforelle (*Salmo trutta fario*, L. 1758), OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 3 Monate, L: Linse, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus choroidealis

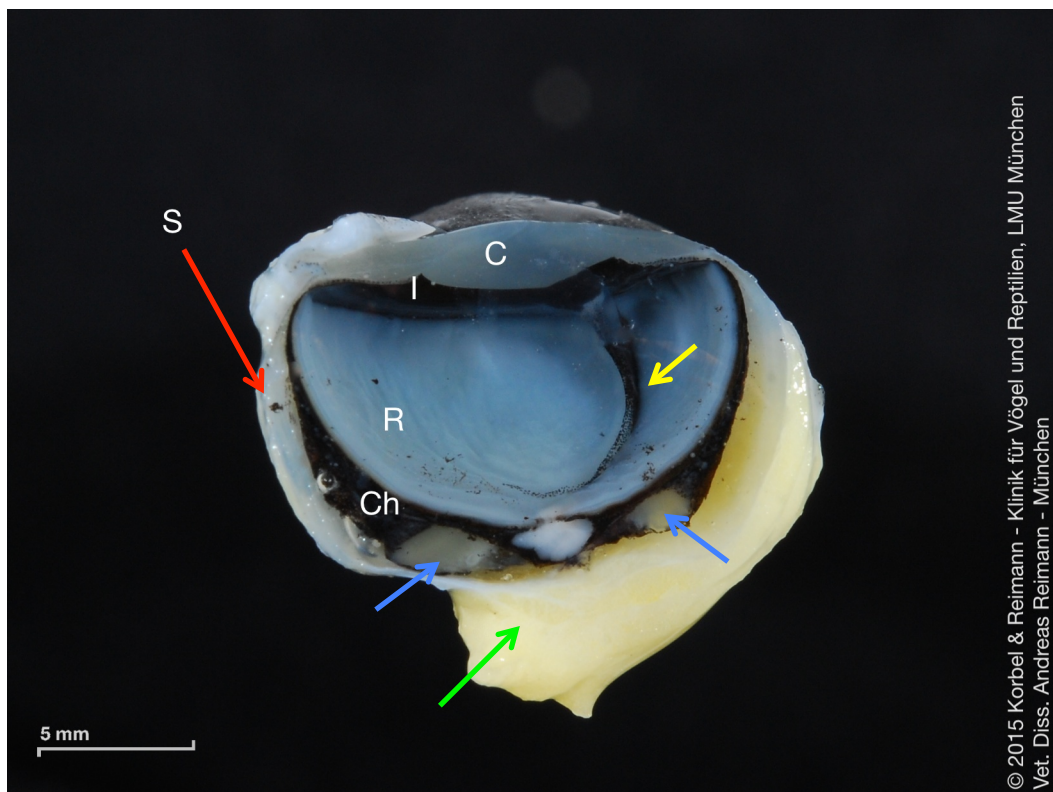
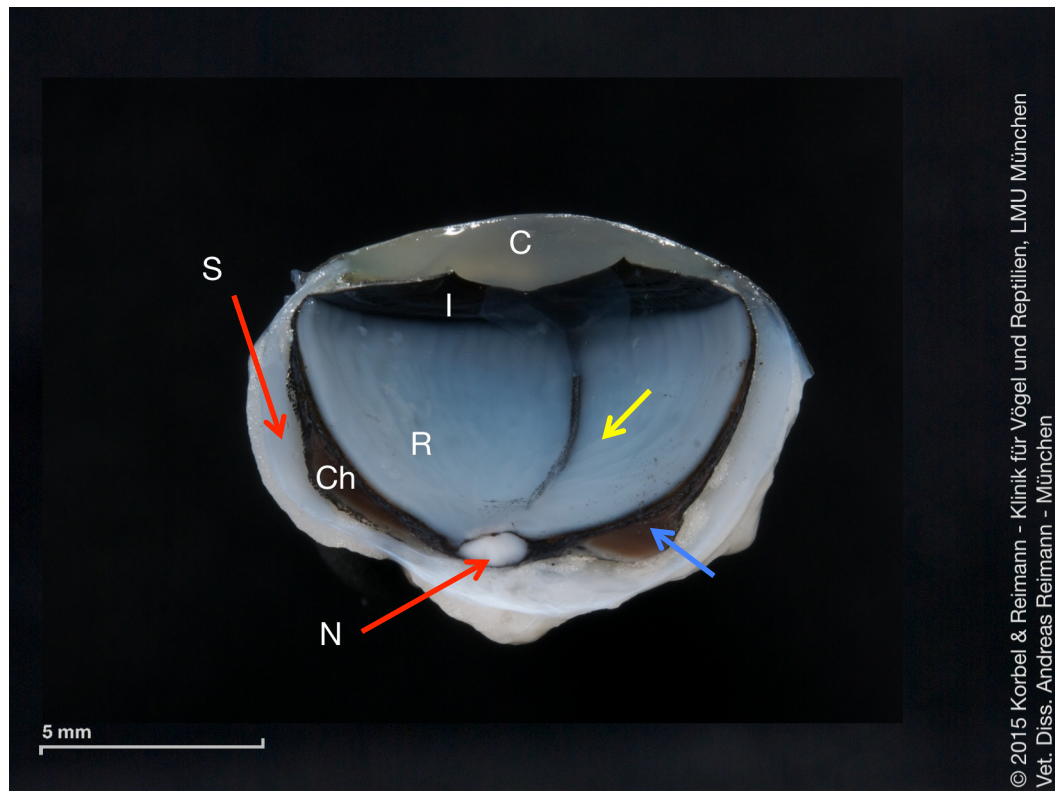
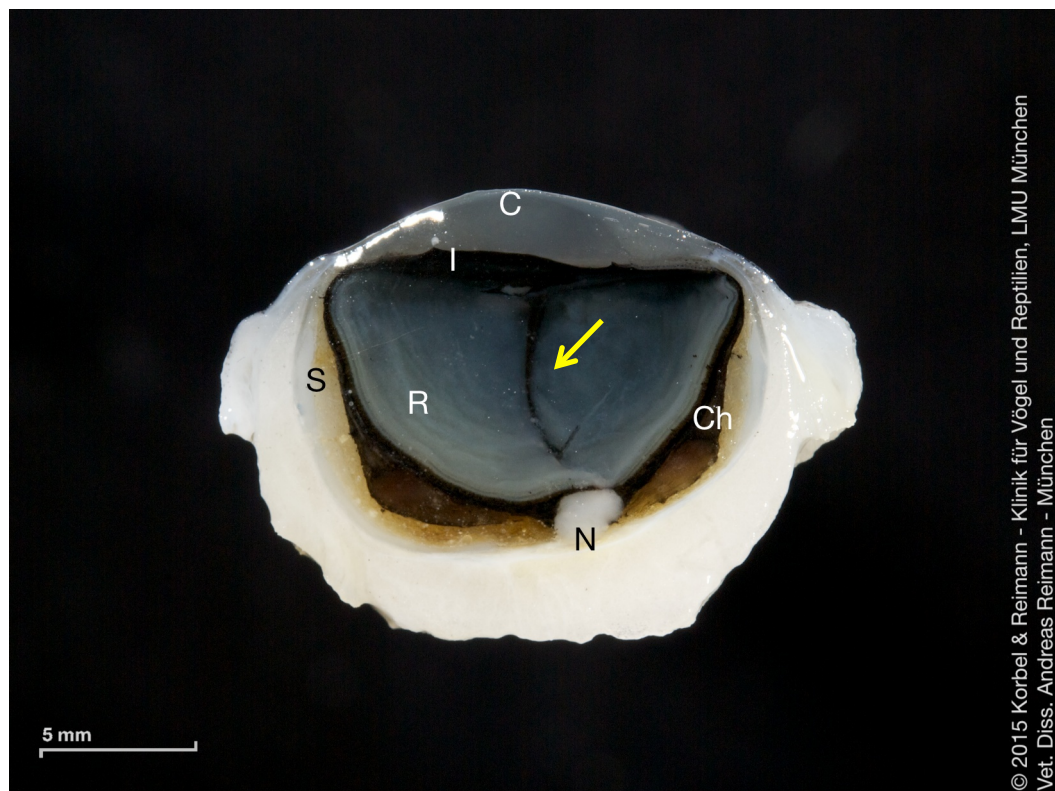


Abbildung 26: Saibling (*Salvelinus*, R. 1836), OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 6 Monate, grüner Pfeil: Gelbfärbung des Fettgewebes, gelber Pfeil: Processus falciformis, L: Linse, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blaue Pfeile: Corpus choroidealis



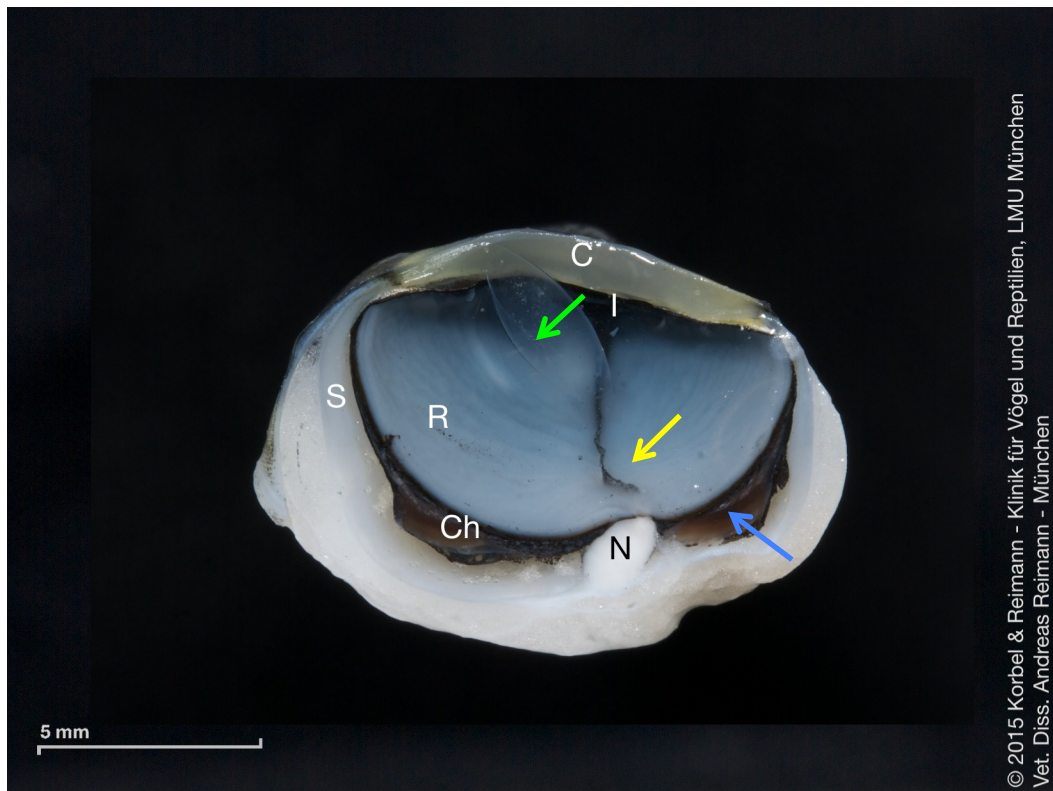
© 2015 Korbelt & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 27: Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OD, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, gelber Pfeil: Processus falciformis, L: Linse, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus choroidalis



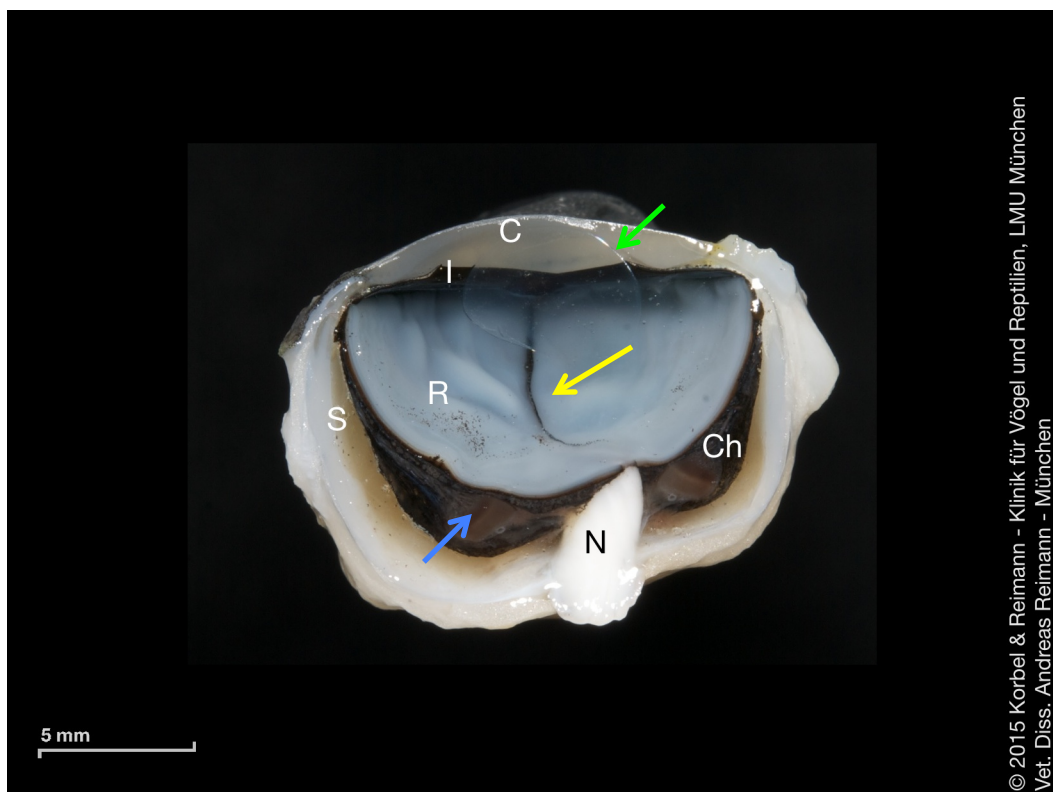
© 2015 Korbelt & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 28: Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 1 Monat, gelber Pfeil: Processus falciformis, L: Linse, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea



© 2015 Korbelt & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 29: Bachforelle (*Salmo trutta fario*, L. 1758), OD, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, gelber Pfeil: P. falciformis, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: C. choroidalis, grüner Pfeil: LinsenkapSEL



© 2015 Korbelt & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 30: Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 14 Tage, C: Kornea, I: Iris, S: Sklera, Ch: Choroidea, N: Nervus opticus, gelber Pfeil: Processus falciformis, blauer Pfeil: C. choroidalis, grüner Pfeil: LinsenkapSEL

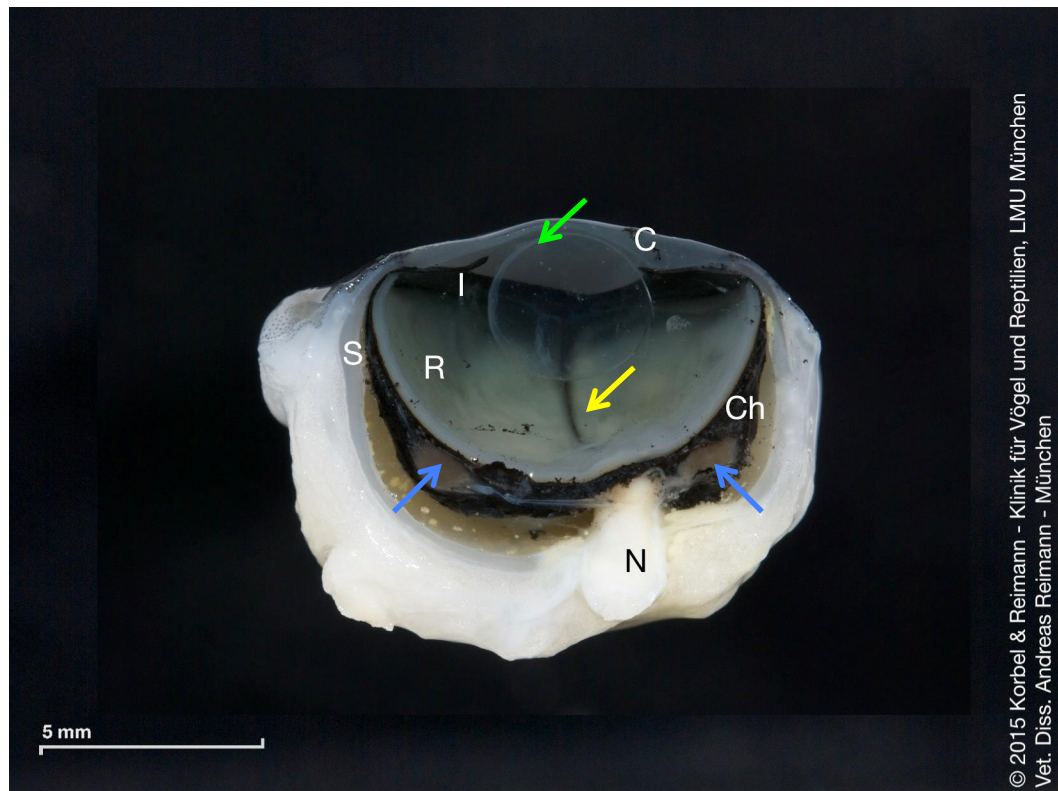


Abbildung 31: Saibling (*Salvelinus*, R. 1836), OD, Makrofotografie, Fixationsdauer 3 Monate, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, N: Nervus opticus, Ch: Choroidea, gelber Pfeil: Processus falciformis, blaue Pfeile: Corpus choroidealis, grüner Pfeil: LinsenkapSEL

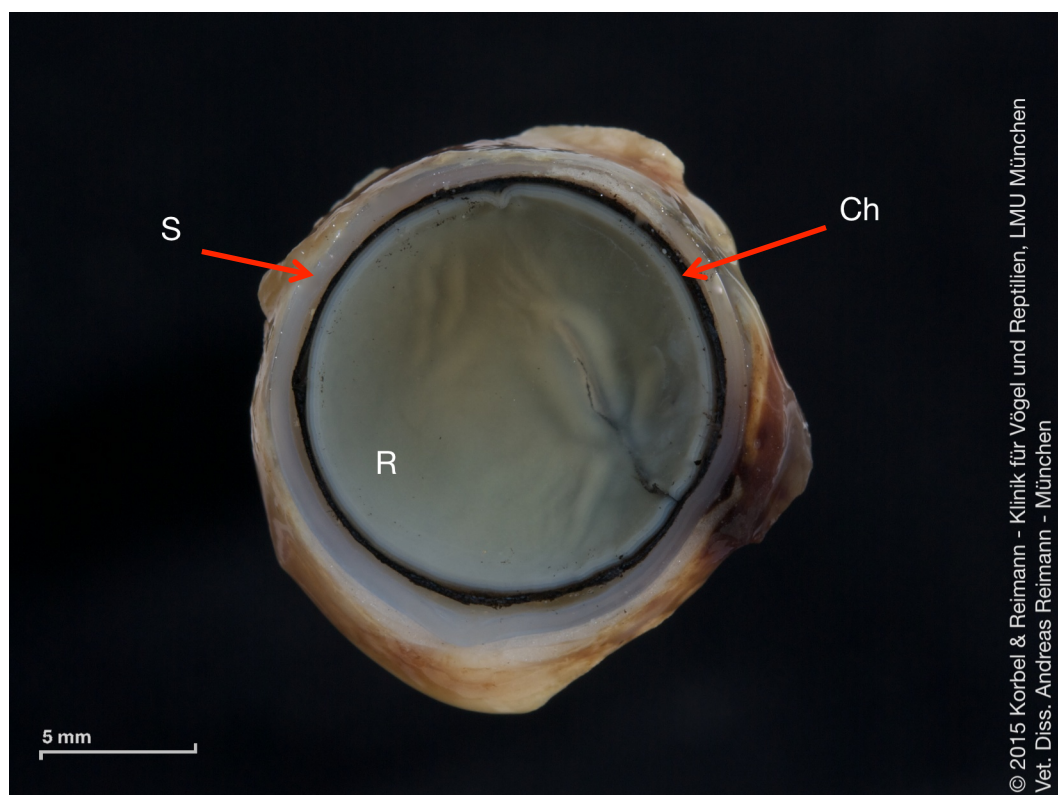
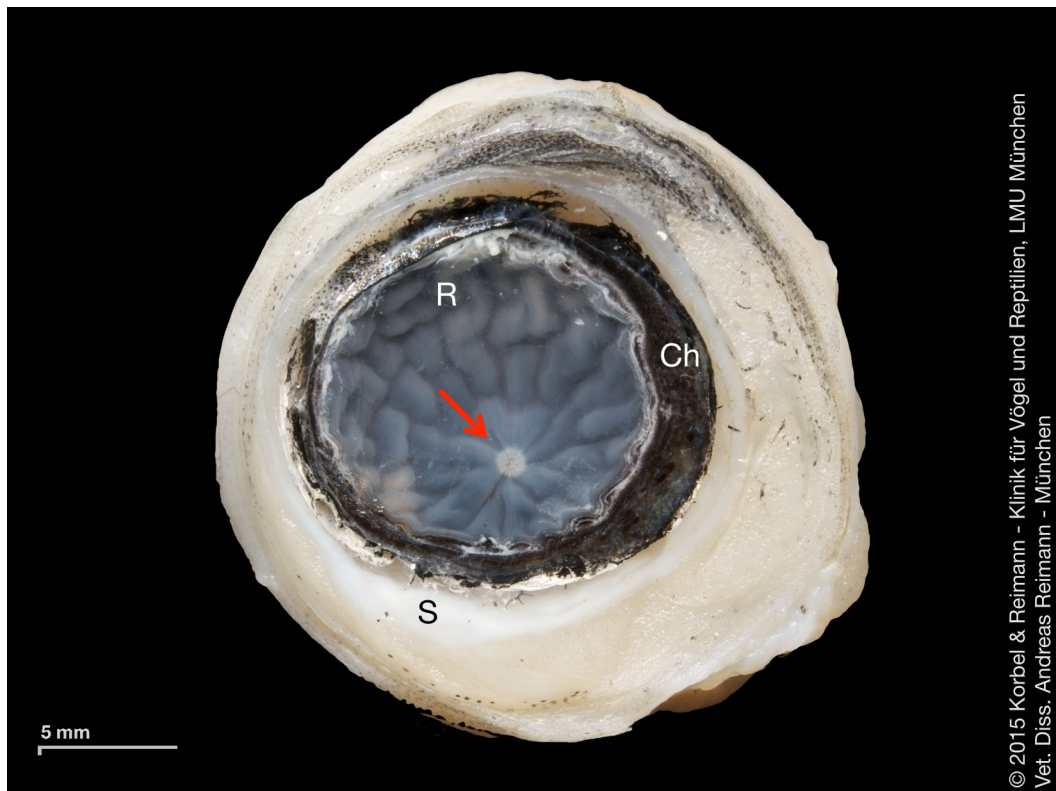
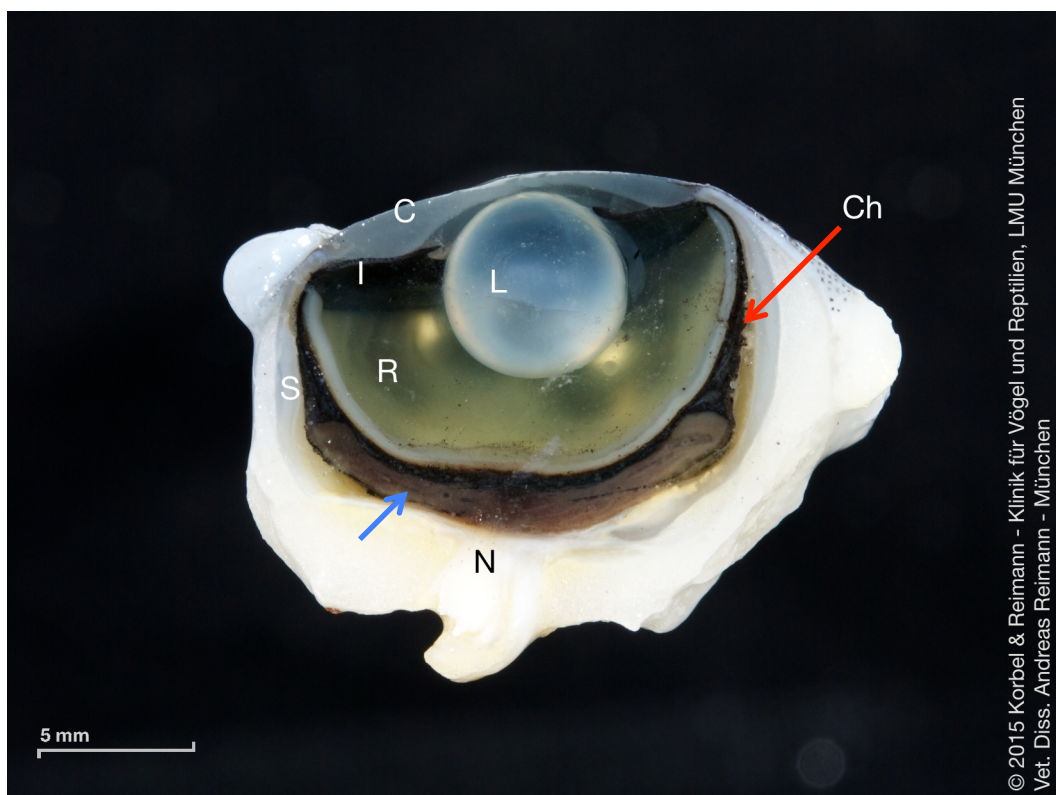


Abbildung 32: Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Makrofotografie, des Fundus, Fixationsdauer 1 Monat, R: Retina, S: Sklera, Ch: Choroidea, gelber Pfeil: Processus falciformis



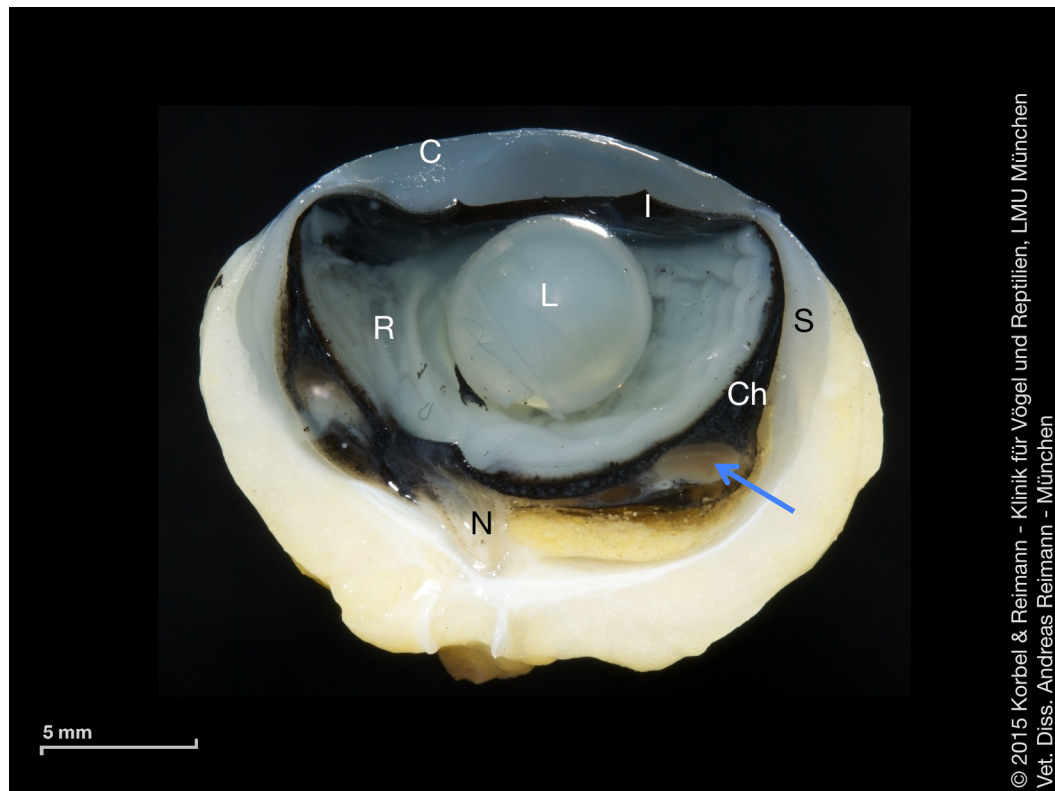
© 2015 Korbelt & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 33: Koi (*Cyprinus carpio*, L. 1758), OD, Makrofotografie des Fundus, Fixationsdauer ca. 7 Tage, R: Retina (massive Netzhautablösung), S: Sklera, Ch: Choroidea, roter Pfeil: Eintritt des Sehnervs an der Papilla nervi optici



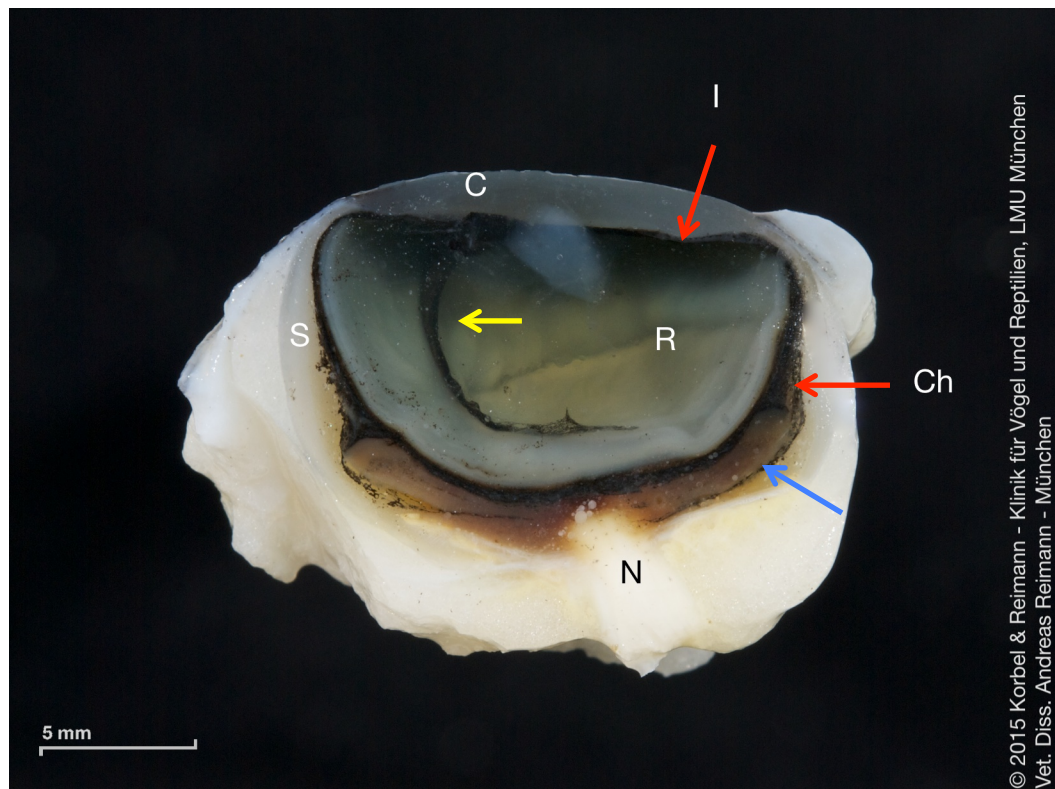
© 2015 Korbelt & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 34: Huchen (*Hucho hucho*, L. 1758), OD, Makrofotografie 1. Bulbushemisphäre, Fixationsdauer 1 Monat, L: Linse (geringe Luxation), I: Iris, C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, N: Nervus opticus, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus choroidalis



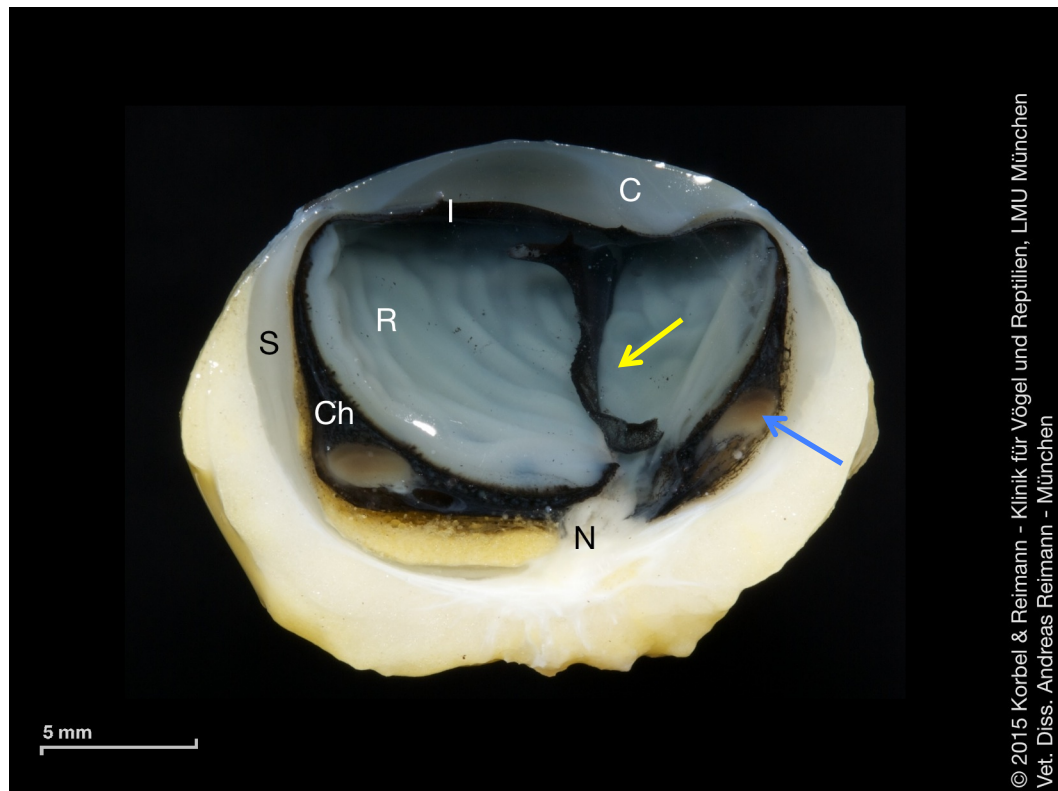
© 2015 Korbelt & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 35: Atlantischer Lachs (*Salmo salar*, L. 1758), OD, Makrofotografie 1. Bulbushemisphäre, Fixationsdauer 6 Monate, L: Linse (luxiert, massive Trübung), C: Kornea, I: Iris, R: Retina (Netzhautablösung), N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus choroidealis



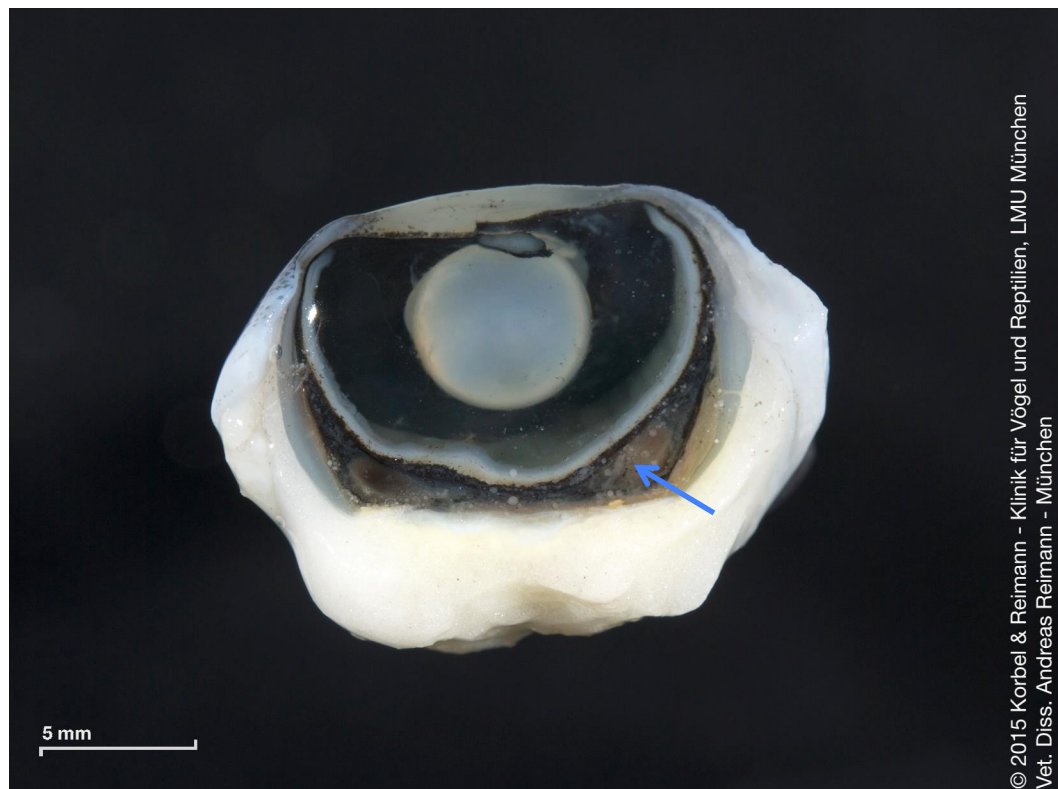
© 2015 Korbelt & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 36: Huchen (*Hucho hucho*, L. 1758), OD, Makrofotografie 2. Bulbushemisphäre, Fixationsdauer 1 Monat, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, N: Nervus opticus, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus choroidealis, gelber Pfeil: Processus falciformis



© 2015 Korbelt & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 37: Atlantischer Lachs (*Salmo salar*, L. 1758), OD, Makrofotografie 2. Bulbushemisphäre, Fixationsdauer 6 Monate, C: Kornea, I: Iris, R: Retina (Netzhautablösung), N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, gelber Pfeil: Processus falciformis, blauer Pfeil: Corpus choroidalis



© 2015 Korbelt & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 38: Saibling (*Salvelinus*, R. 1836), OS, horizontale Schnittebene im 45°-Winkel, Fixationsdauer 14 Tage, I: Rückseite der Iris, L: Linse (nicht luxiert), C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus choroidalis

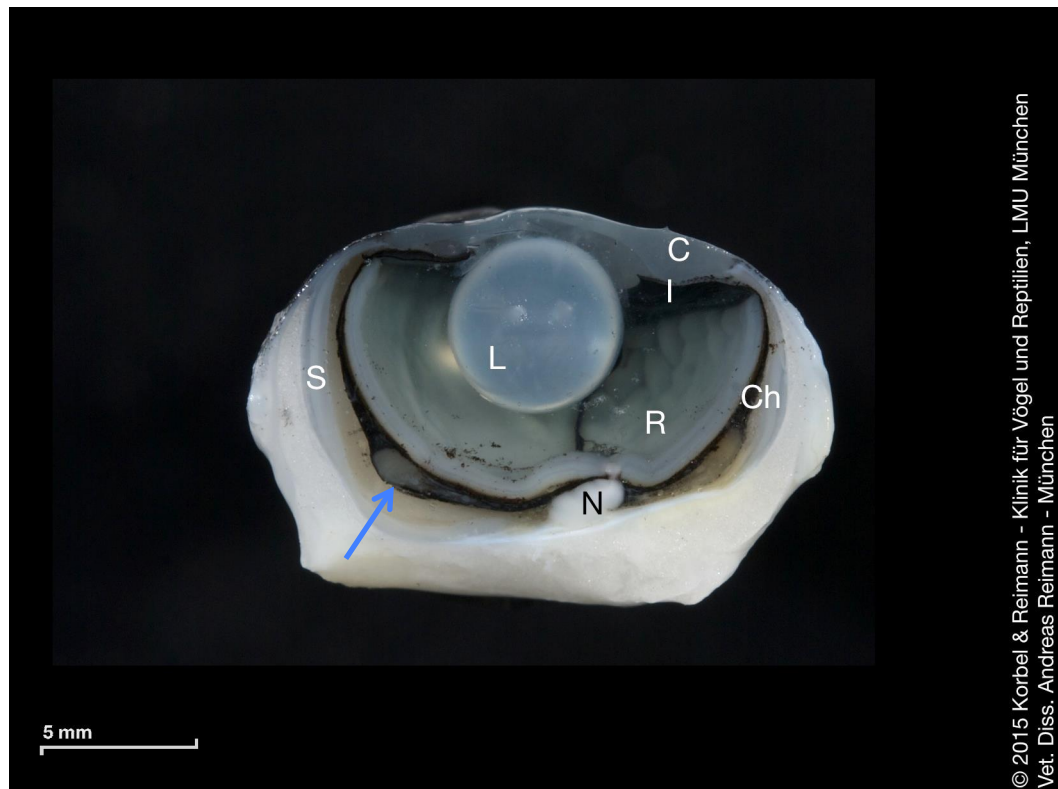


Abbildung 39: Saibling (*Salvelinus*, R. 1836), OS, Fixationsdauer 14 Tage, I: Iris, L: Linse (luxiert), C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, N: Nervus opticus, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus choroidealis

3.4.2 Pathologie des Fischauges

Die Darstellung pathologischer Augenveränderungen war nicht primäres Ziel dieser Arbeit. Nachfolgend sollen jedoch einige Beispiele von pathologischen Veränderungen gezeigt werden. Dabei handelt es sich häufig um Veränderungen traumatischer Ursache, da es sich bei dem Ausgangsmaterial um Fische aus gesunden Fischbeständen handelte.

Eine klare Abgrenzung zu In-vivo-Befunden kann nicht getroffen werden, da es post mortem fixationsbedingt zu einer Bandbreite von verschiedenen Artefakten kommen kann (Punkt 3.4.3.).

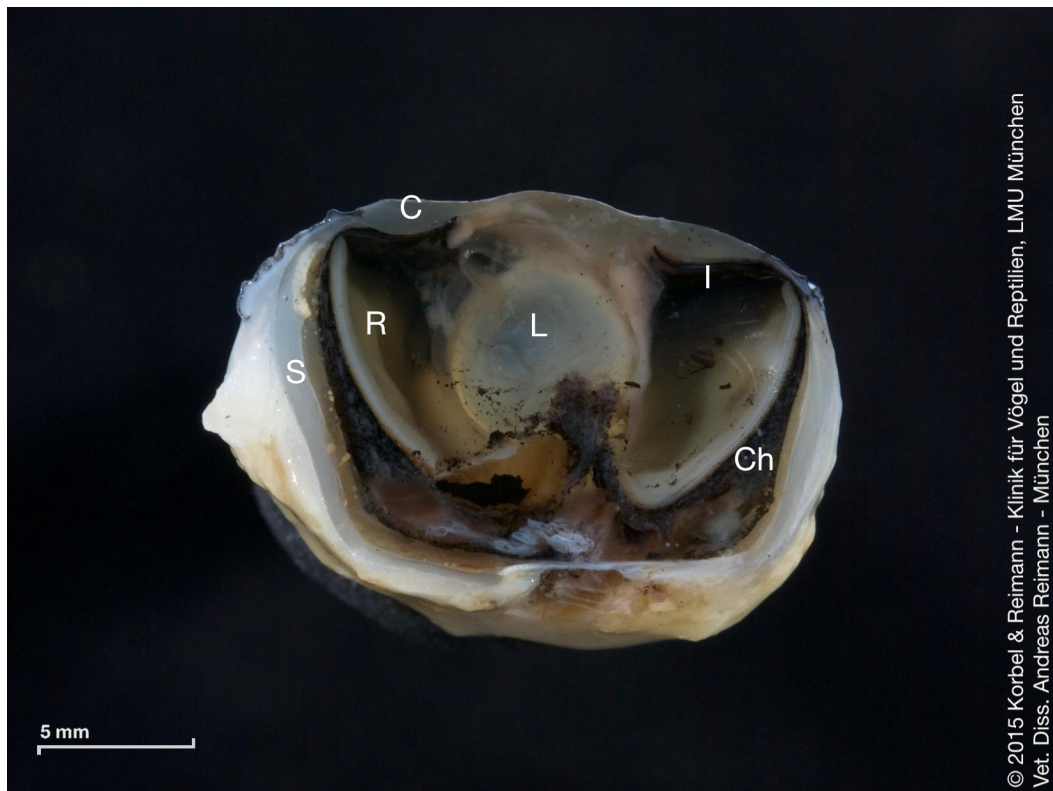


Abbildung 40: Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), 1. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, OD, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, C: Kornea, L: Linse (luxiert), I: Iris, S: Sklera, Ch: Choroidea, R: Retina

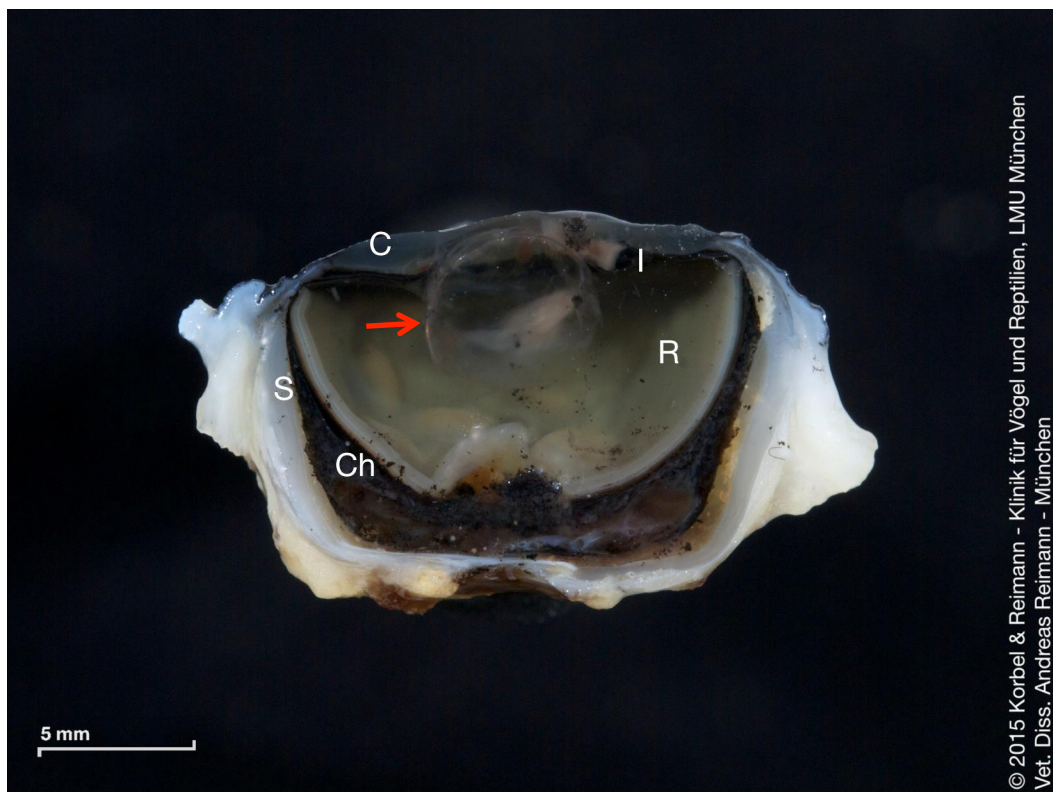


Abbildung 41: Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), 2. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, OD, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, C: Kornea, L: Linse (luxiert), I: Iris, S: Sklera, Ch: Choroidea, R: Retina, roter Pfeil: Linsenkapsel

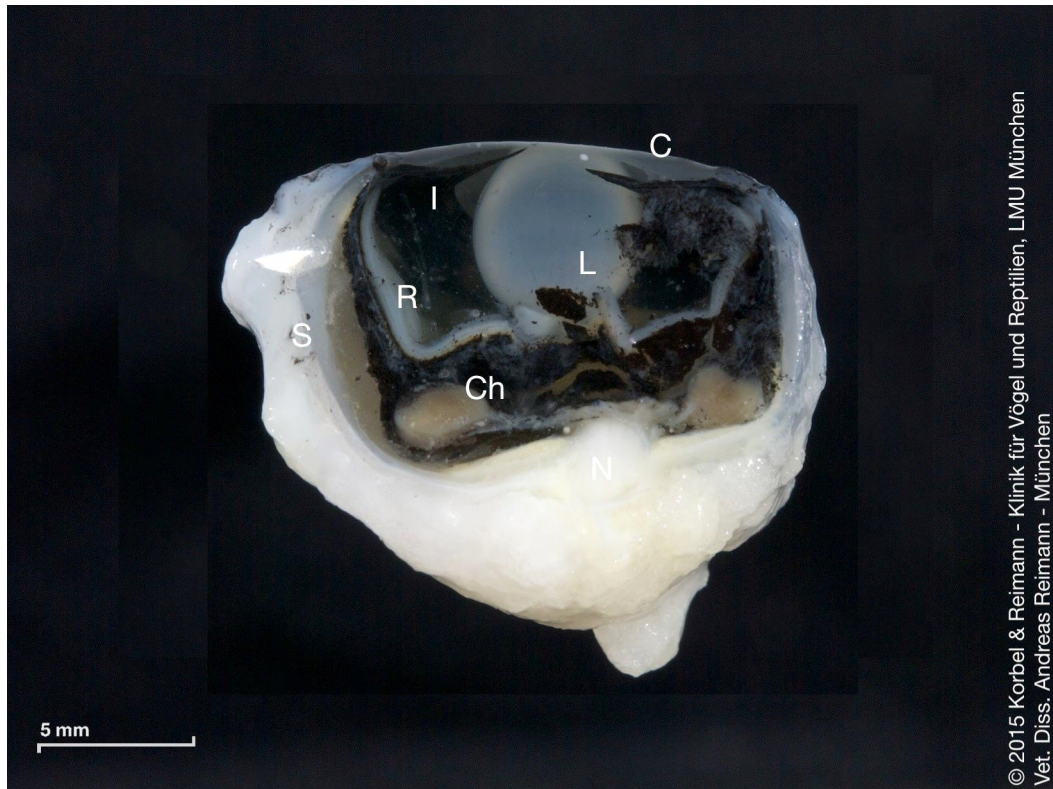


Abbildung 42: Bachforelle (*Salmo trutta fario*, L. 1758), OS, 1. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, L: Linse (luxiert), I: Iris, R: Retina (Netzhautablösung), C: Kornea, S: Sklera, N: Nervus opticus, Ch: Choroidea

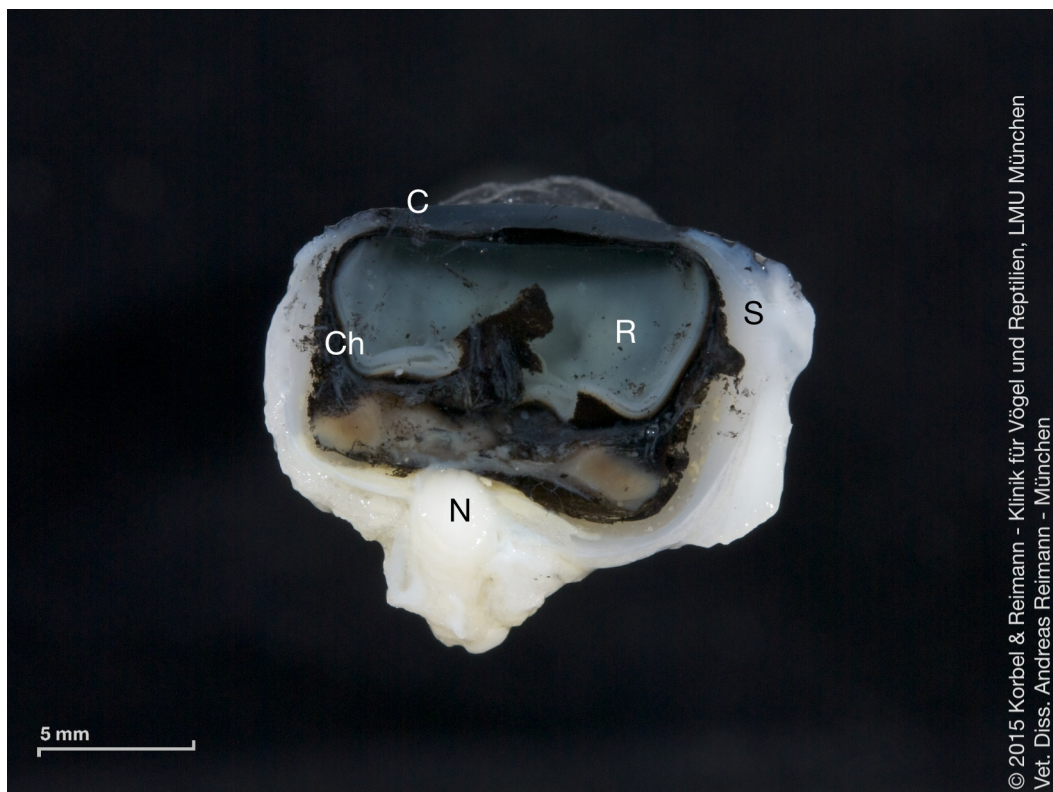


Abbildung 43: Bachforelle (*Salmo trutta fario*, L. 1758), OS, 2. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, Einblutungen, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, C: Kornea, Retina (Netzhautablösung), Ch: Choroidea, S: Sklera, N: Nervus opticus

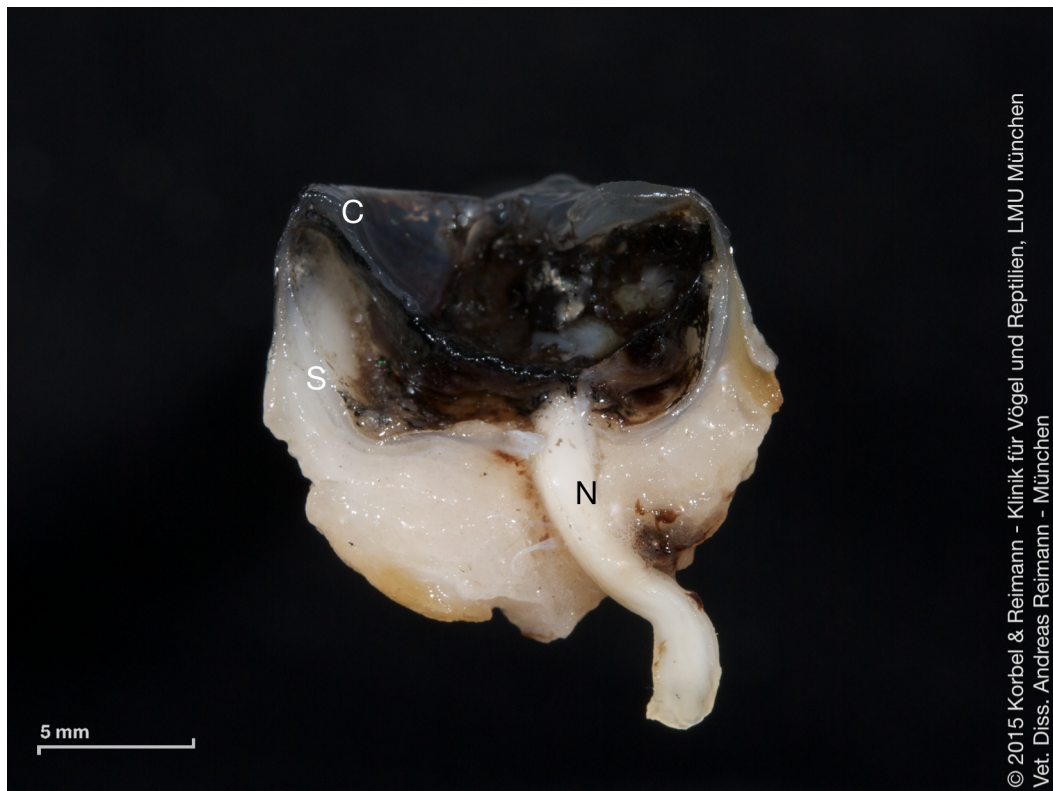


Abbildung 44: Bachforelle (*Salmo trutta fario*, L. 1758), OD, Bulbus kollabiert / Vernarbung, 1. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, C: Kornea, S: Sklera, N: Nervus opticus

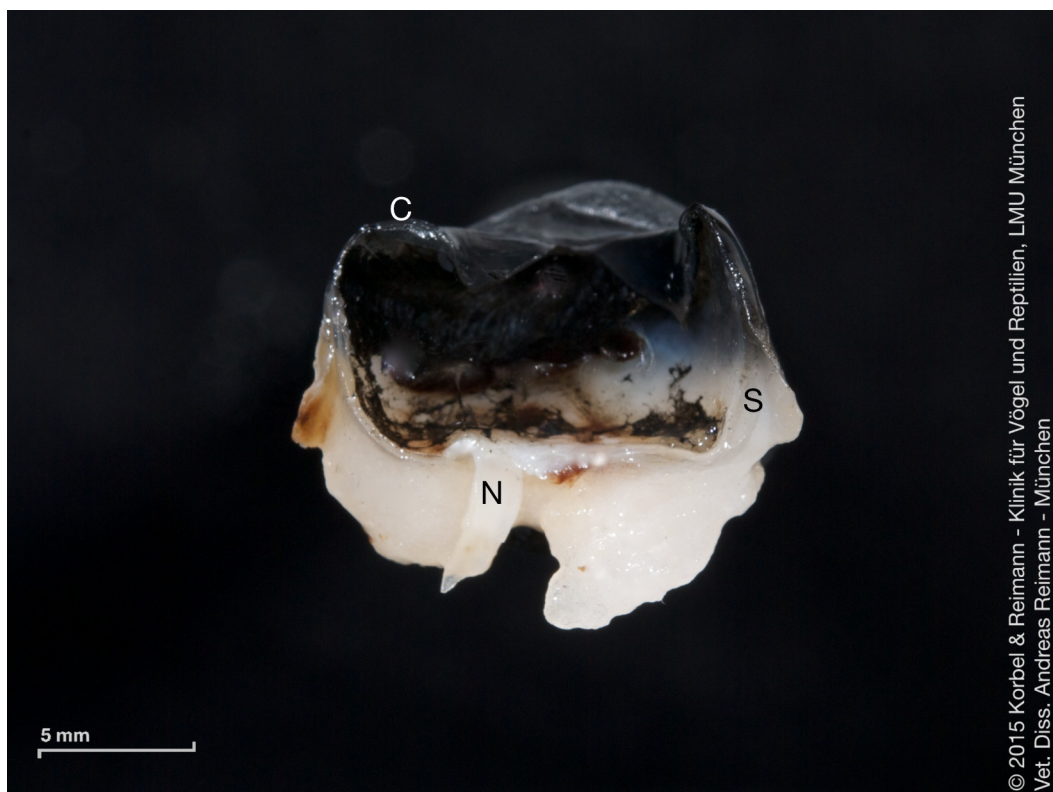


Abbildung 45: Bachforelle (*Salmo trutta fario*, L. 1758), OD, Bulbus kollabiert / Vernarbung, 2. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, C: Kornea, S: Sklera, N: Nervus opticus

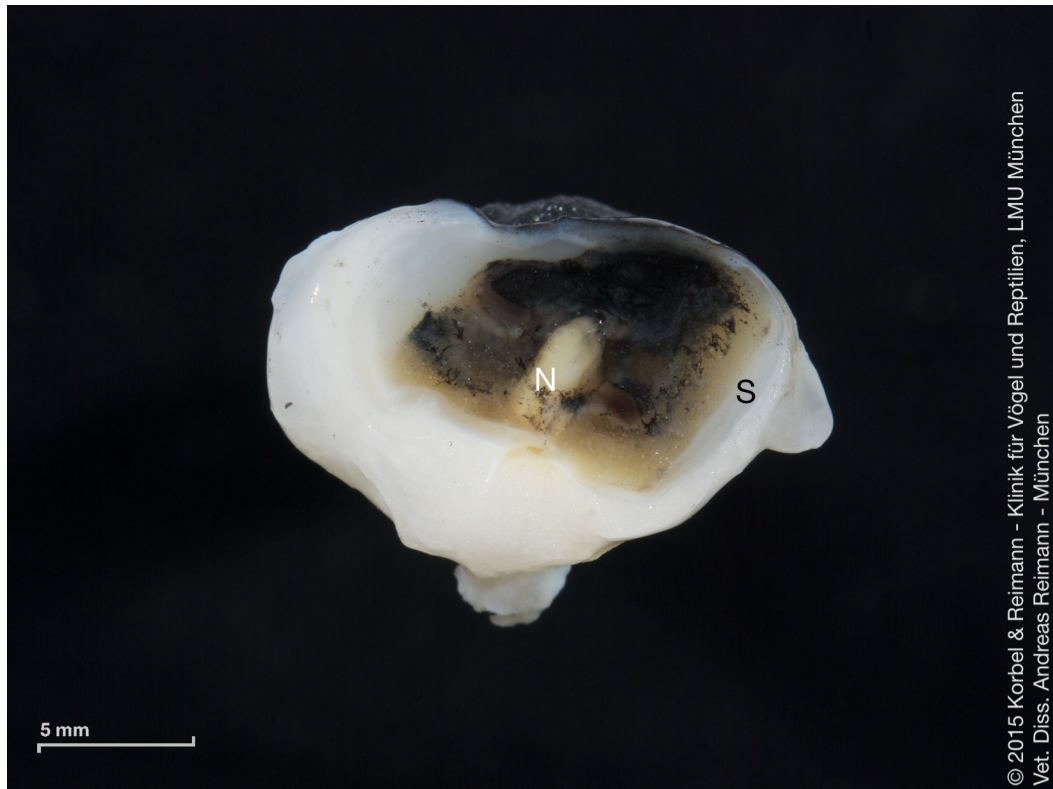


Abbildung 46: Bachforelle (*Salmo trutta fario*, L. 1758), Bulbus kollabiert / Vernarbung, 1. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, S: Sklera, N: Nervus opticus



Abbildung 47: Bachforelle (*Salmo trutta fario*, L. 1758), Bulbus kollabiert / Vernarbung, 2. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, S: Sklera

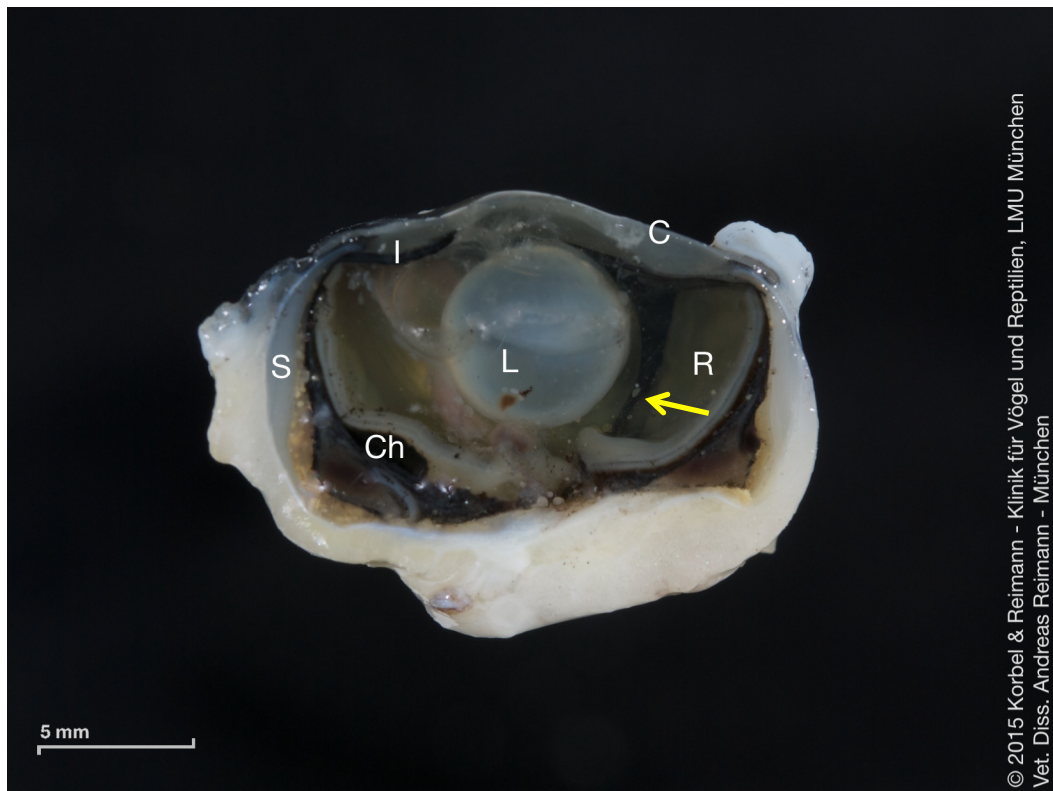


Abbildung 48: Saibling (*Salvelinus*, R. 1836), OD, Fixationsdauer 7 Tage, 1. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, I: Iris, L: Linse (luxiert), C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, Ch: Choroidea, gelber Pfeil: Processus falciformis

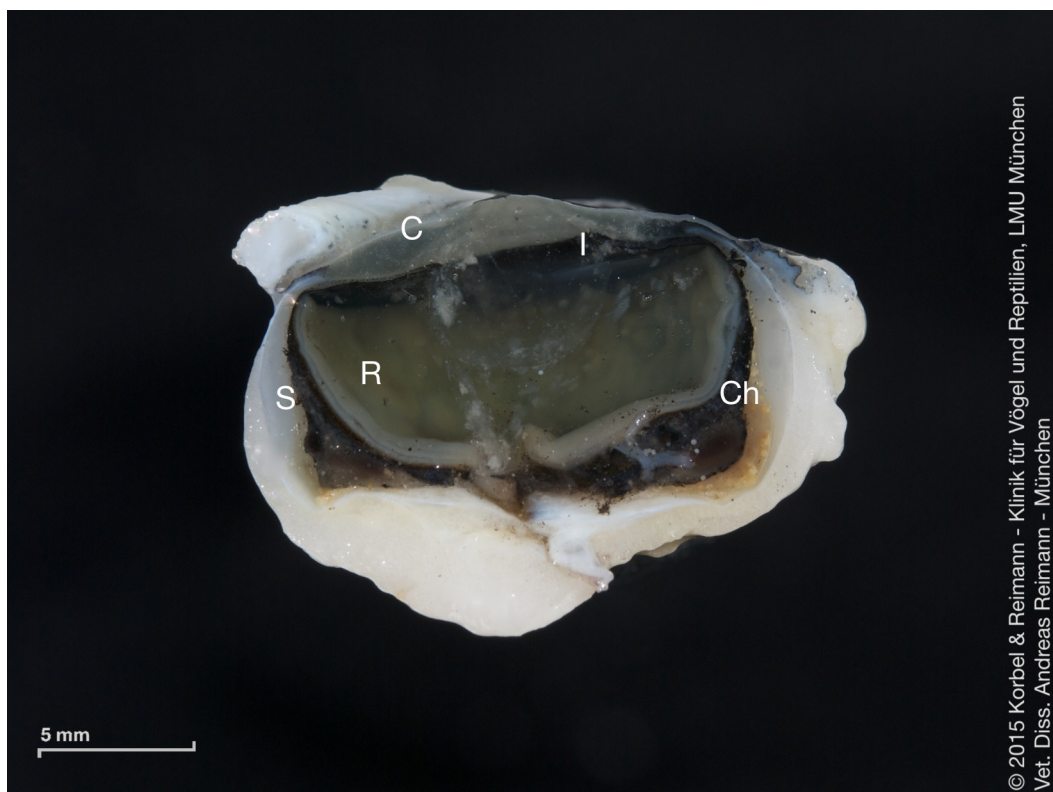


Abbildung 49: Saibling (*Salvelinus*, R. 1836), OD, Fixationsdauer 7 Tage, 2. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, Ch: Choroidea

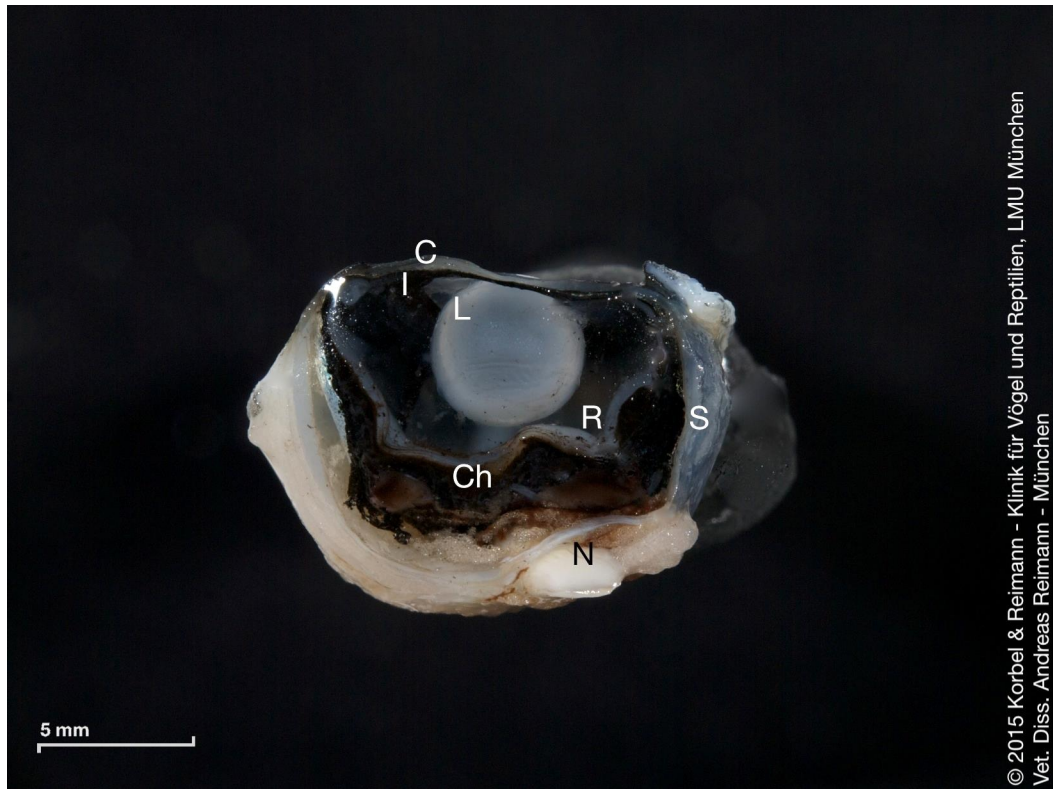


Abbildung 50: Bachforelle (*Salmo trutta fario*, L. 1758), 1. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, OD, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, C: Kornea, L: Linse, I: Iris, R: Retina, Ch: Choroidea, S: Sklera, N: Nervus opticus

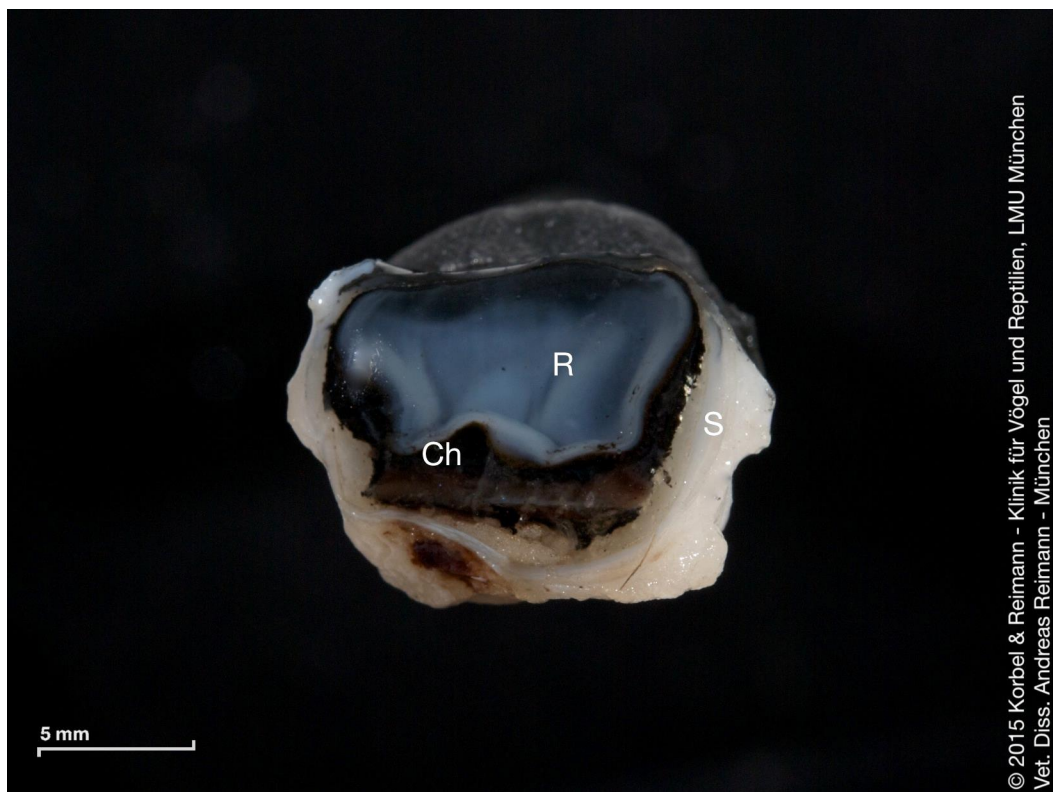


Abbildung 51: Bachforelle (*Salmo trutta fario*, L. 1758), 2. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, OD, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, C: Kornea, L: Linse, I: Iris, R: Retina, Ch: Choroidea, S: Sklera, N: Nervus opticus

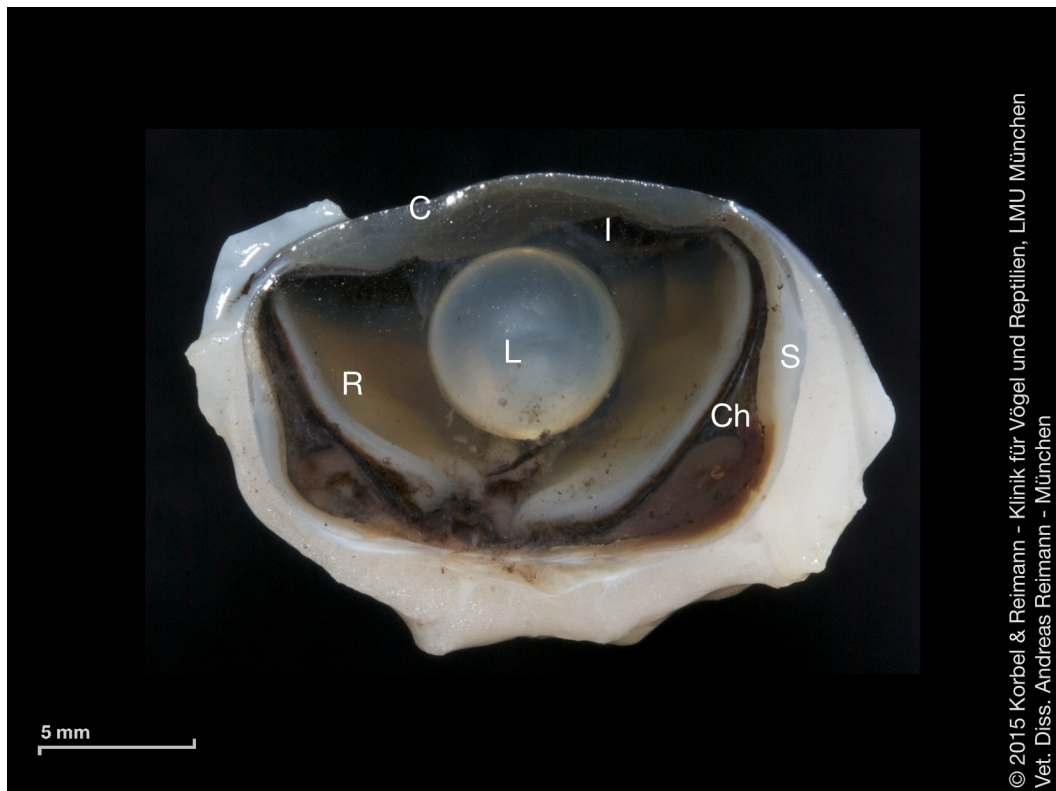


Abbildung 52: Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OD, Makrofotografie, 1. Bulbus hemisphaera, traumatische Ätiologie, Fixationsdauer 1 Monat, L: Linse (luxiert), C: Kornea, I: Iris, R: Retina, Ch: Choroidea, S: Sklera

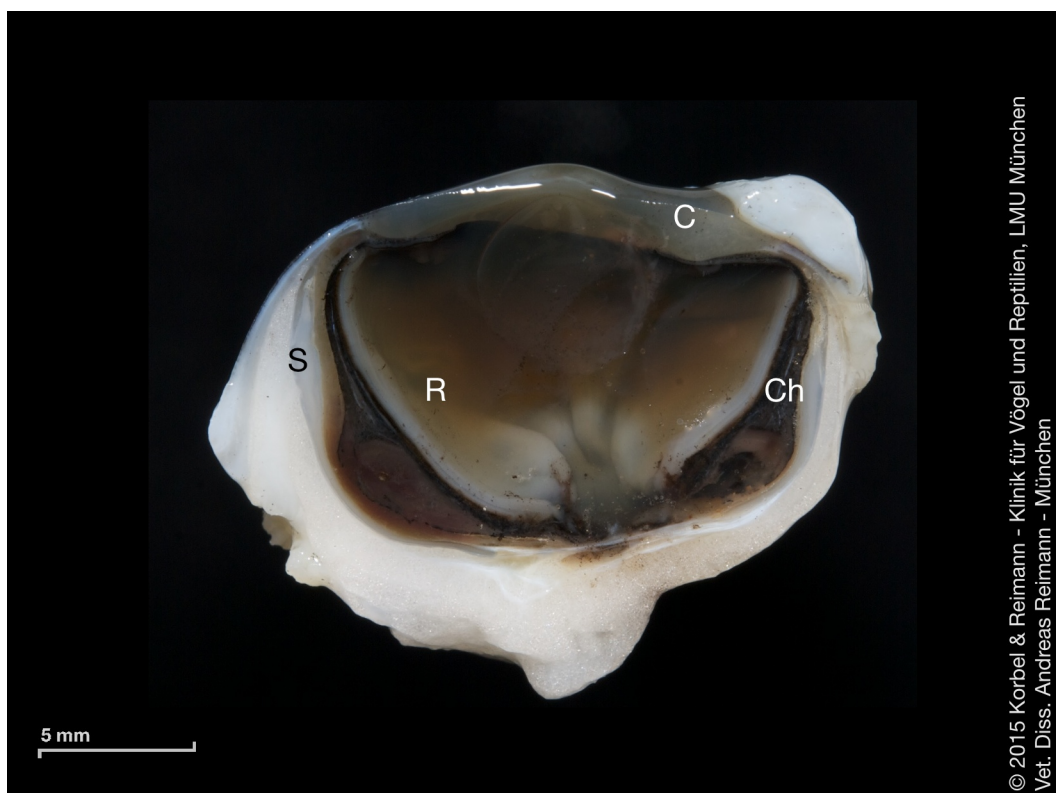


Abbildung 53: Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OD, Makrofotografie, 2. Bulbus hemisphaera, traumatische Ätiologie, Fixationsdauer 1 Monat, C: Kornea, I: Iris, R: Retina, Ch: Choroidea, S: Sklera

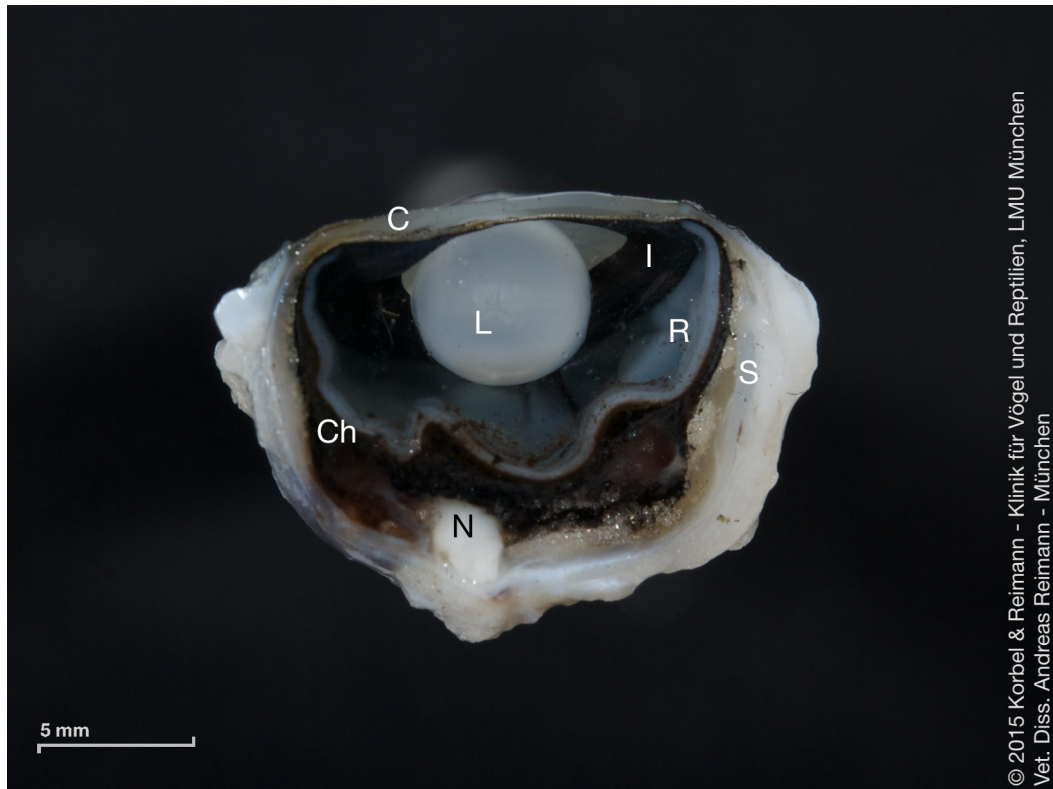


Abbildung 54: Saibling (*Salvelinus*, R. 1836), OS, Fixationsdauer 7 Tage, 1. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, I: Iris, L: Linse (luxiert), C: Kornea, R: Retina (Netzhautablösung), S: Sklera, Ch: Choroidea

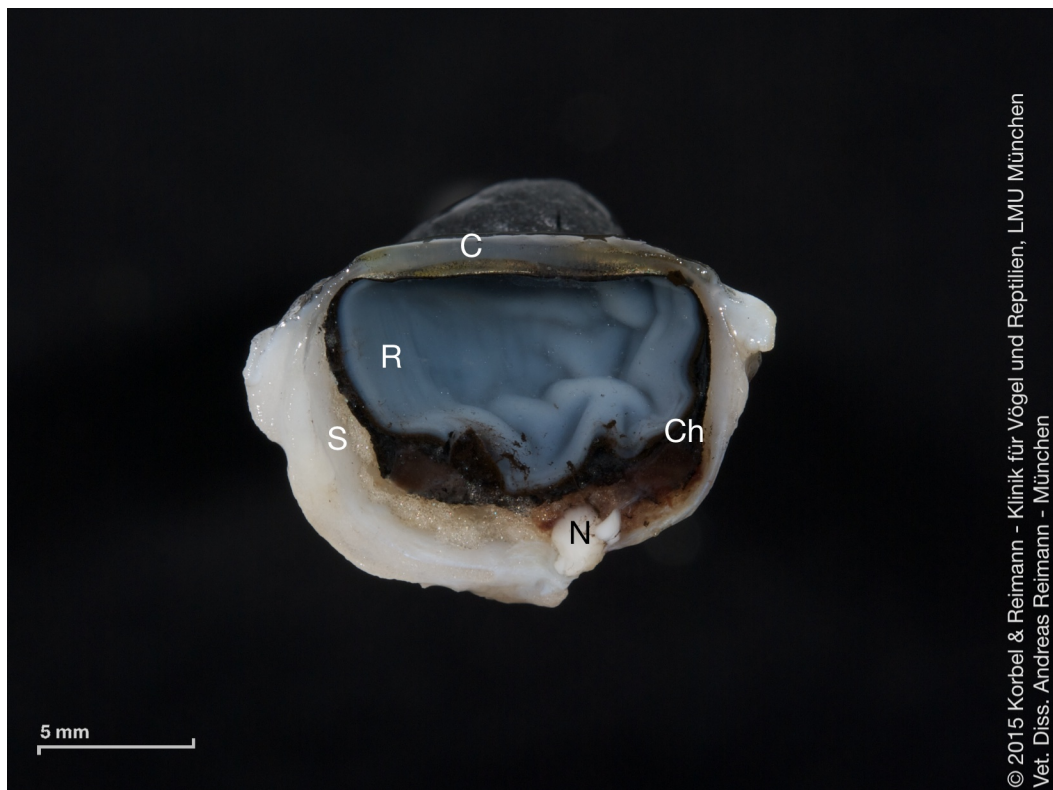


Abbildung 55: Saibling (*Salvelinus*, R. 1836), OS, Fixationsdauer 7 Tage, 2. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, C: Kornea, R: Retina (Netzhautablösung), S: Sklera, Ch: Choroidea



Abbildung 56: Bachforelle (*Salmo trutta fario*, L. 1758), OS, Fixationsdauer 1 Monat, traumatische Ätiologie, roter Pfeil: Einblutungen, L: Linse, C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, Ch: Choroidea



Abbildung 57: Saibling (*Salvelinus*, R. 1836), OS, Fixationsdauer 1 Monat, traumatische Ätiologie, Fibrin, L: Linse, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, Ch: Choroidea

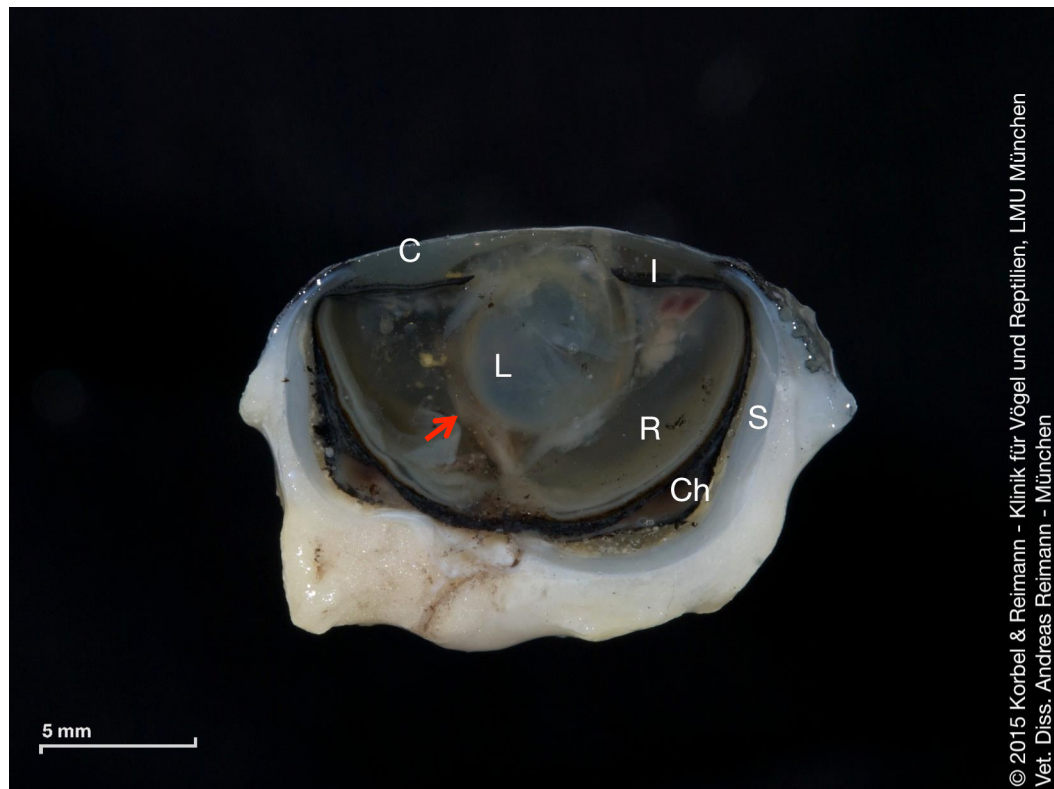


Abbildung 58: Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Fixationsdauer 1 Monat, traumatische Ätiologie, roter Pfeil: Fibrin, L: Linse, I: Iris, S: Sklera, C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, Ch: Choroidea

3.4.3 Artefakte

Bei einer Vielzahl der Präparate kam es zur Bildung von unterschiedlichen Artefakten. Bei allen Präparaten war eine Eintrübung der Linse zu vermerken. Häufig kam es auch zum Einsinken der vorderen Augenkammer und zur Ablösung der Netzhaut. Ein Zusammenhang mit der Fixationsdauer konnte nicht gezeigt werden.

Artefakte des Bildmaterials bestanden häufig in der Bildung von Reflexionen an der Präparatoberfläche (Abb. 59). Dort konnte auch die Ansammlung von Lipidtröpfchen festgestellt werden (Abb. 61).

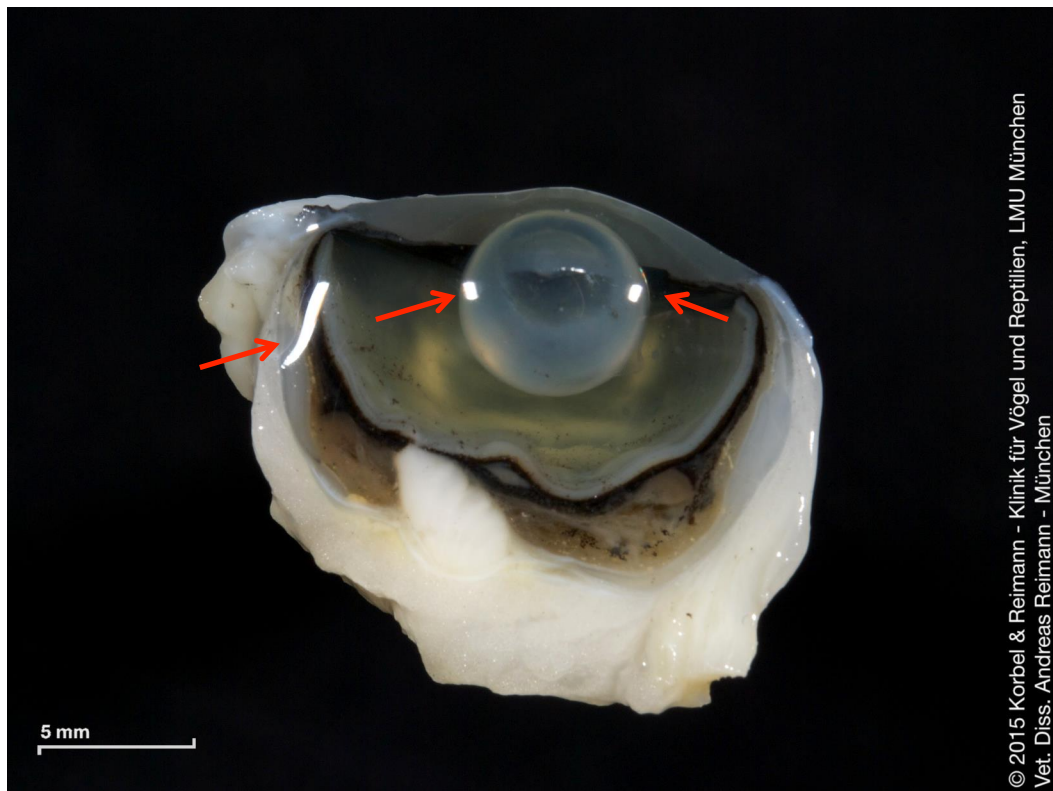


Abbildung 59: Atlantischer Lachs (*Salmo salar*, L. 1758), OS, Fixationsdauer 3 Monate, rote Pfeile: Reflexionen der Blitzbeleuchtung an Linse und Objektrand

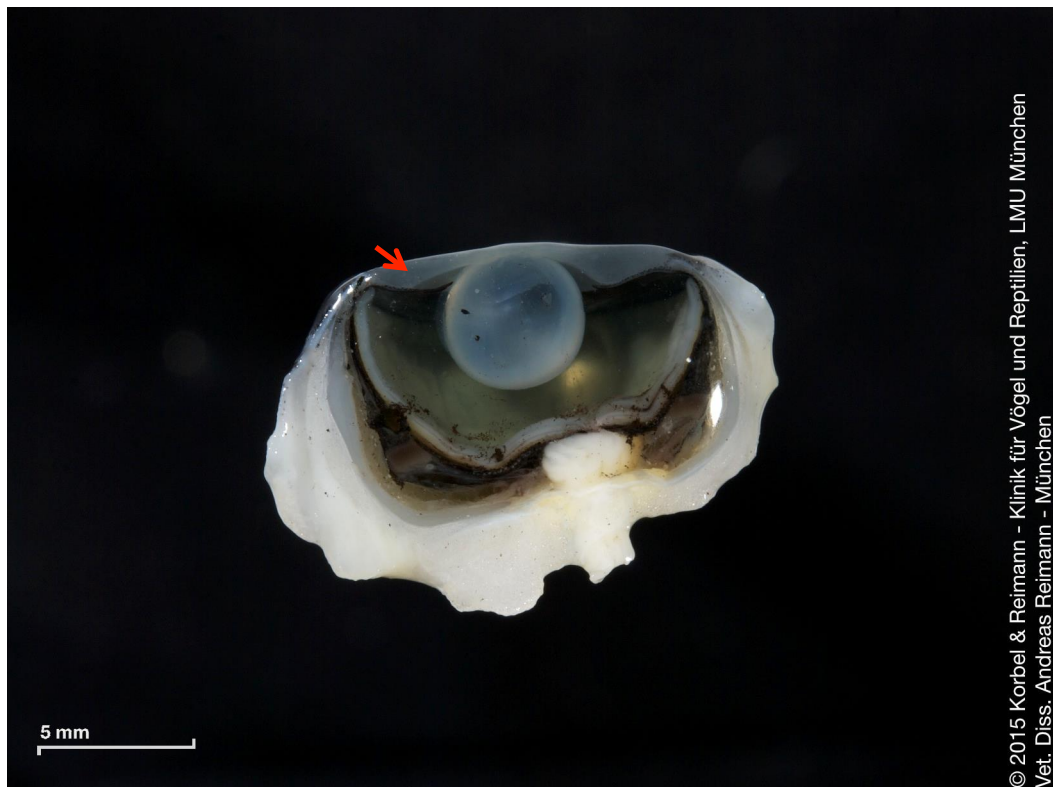
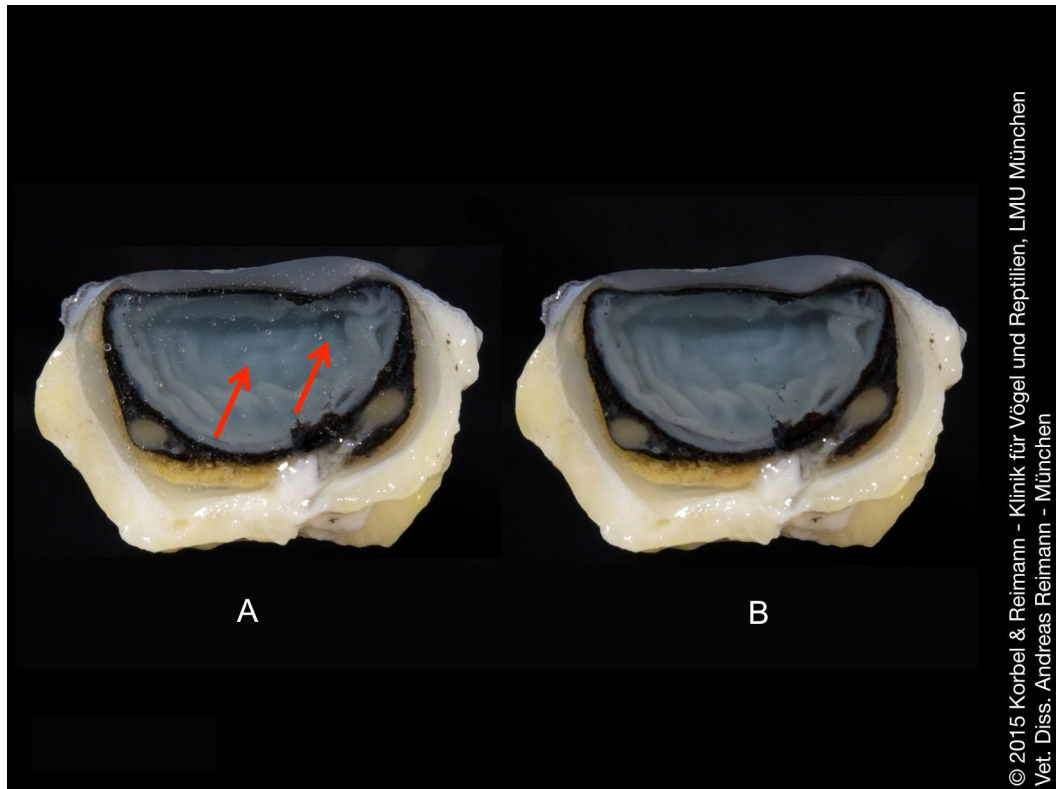
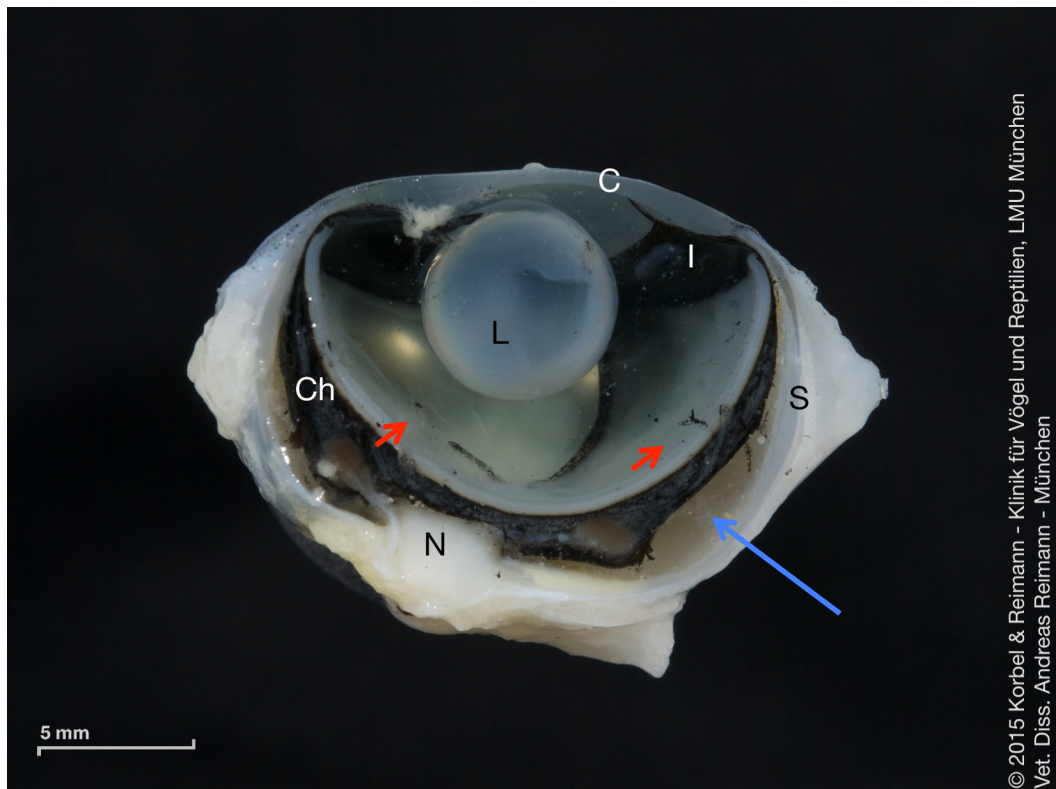


Abbildung 60: Saibling (*Salvelinus*, R. 1836), OD, roter Pfeil: vordere Augenkammer eingesunken



© 2015 Korbelt & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 61: Saibling (*Salvelinus*, R. 1836), OD, rote Pfeile: Lipidtröpfchen, A: Bulbus vor Spülen mit Wasser, B: Bulbus nach Spülen mit Wasser



© 2015 Korbelt & Reimann - Klinik für Vögel und Reptilien, LMU München
 Vet. Diss. Andreas Reimann - München

Abbildung 62: Atlantischer Lachs (*Salmo salar*, L. 1758), OD, Fixationsdauer 1 Monat, rote Pfeile: Gewebereste der Choroidea, blauer Pfeil: Präparatschrumpfung, L: Lens, C: Kornea, I: Iris, S: Sklera, N: Nervus opticus

4. Digitale Fotografie

Die verwendete digitale Spiegelreflexkamera erwies sich in ihrer Handhabung als äußerst vorteilhaft. Im Vergleich zur analogen Fotografie bietet die digitale Technik dem Fotografen die Möglichkeit, an Ort und Stelle die Qualität der Aufnahmen zu begutachten und bei Bedarf seine Kameraeinstellungen anzupassen. Im Zusammenspiel mit der Anwendung digitaler Bildbearbeitung entstanden Aufnahmen von guter Qualität.

5. Histologische Untersuchung

Die okularen Strukturen konnten mit den angefertigten Gefrierschnitten dargestellt und somit für eine histologische Untersuchung herangezogen werden. Dabei zeigten sich Präparate mit einer Schnittbreite von 8 µm als am besten geeignet. Nach durchgeführter HE-Färbung konnten die Präparate histologisch beurteilt werden. Da es sich beim Auge um ein Hohlorgan handelt, ist das Schneiden am Mikrotom nur mit einem hohen Maß an Fingerfertigkeit durchführbar. Häufig kommt es dabei zum Einrollen und somit zum Verwerfen des Präparates.

Folgende Strukturen konnten erfolgreich untersucht und dargestellt werden:

- Bulbus als Gesamtübersicht
- Linse und Pupillenöffnung
- Retina und Sklera, Kammerwinkel
- Kornea und Iris
- Nervus opticus

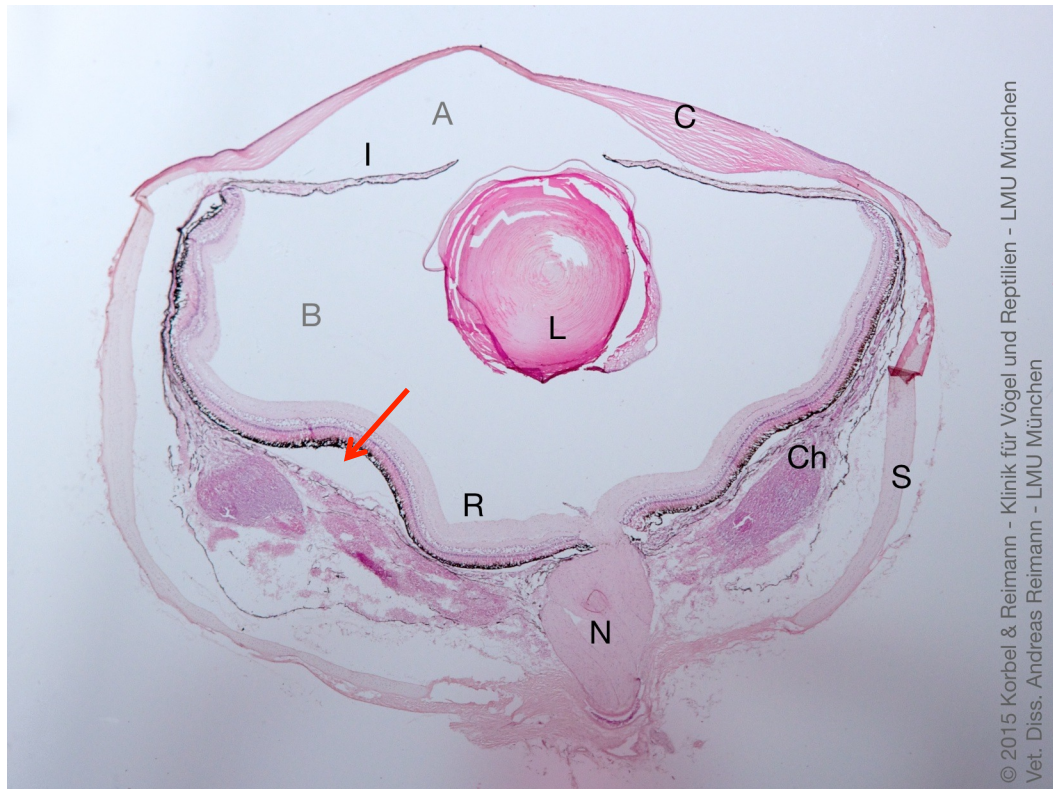


Abbildung 63: Histologisches Schnittpräparat 8 μ m, Makrofotografie, HE-Färbung, Auge einer Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Fixationsdauer 3 Tage, A: vordere Augenkammer, B: hintere Augenkammer, C: Kornea, I: Iris, S: Sklera, L: Linse, R: Retina, N: Nervus opticus, Ch: Choroidea, roter Pfeil: Ablösung der Netzhaut (Ablatio retinae)

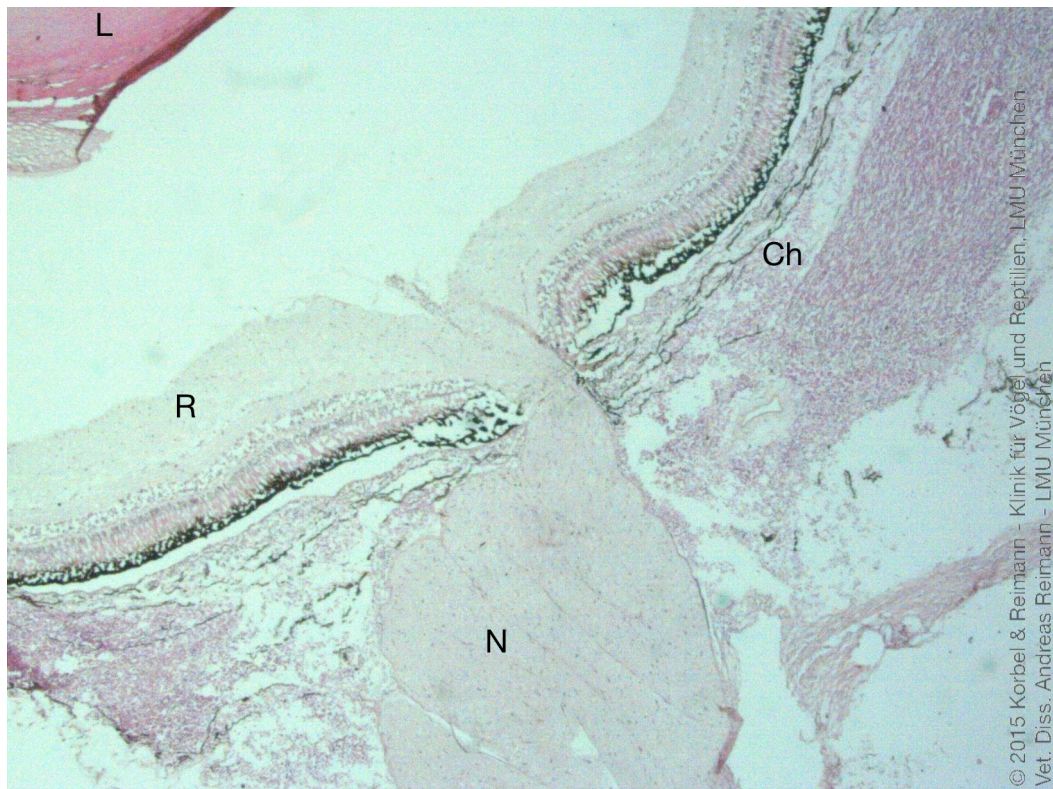


Abbildung 64: Histologisches Schnittpräparat 8 μ m, 2,5-fache Vergrößerung, HE-Färbung, Auge einer Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Fixationsdauer 3 Tage, L: Linse, R: Retina, N: Nervus opticus, Ch: Choroidea

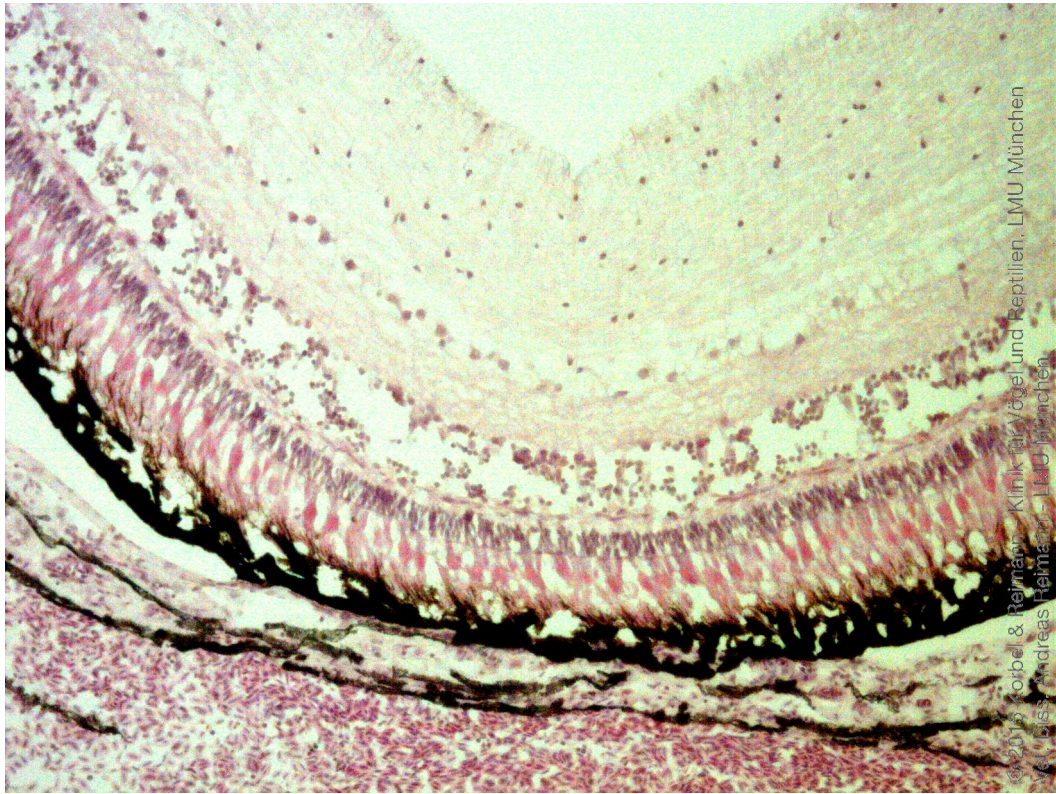


Abbildung 65: Histologisches Schnittpräparat 8 μ m, 10,0-fache Vergrößerung, HE-Färbung, Auge einer Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Fixationsdauer 3 Tage, mikroskopische Darstellung retinaler Strukturen

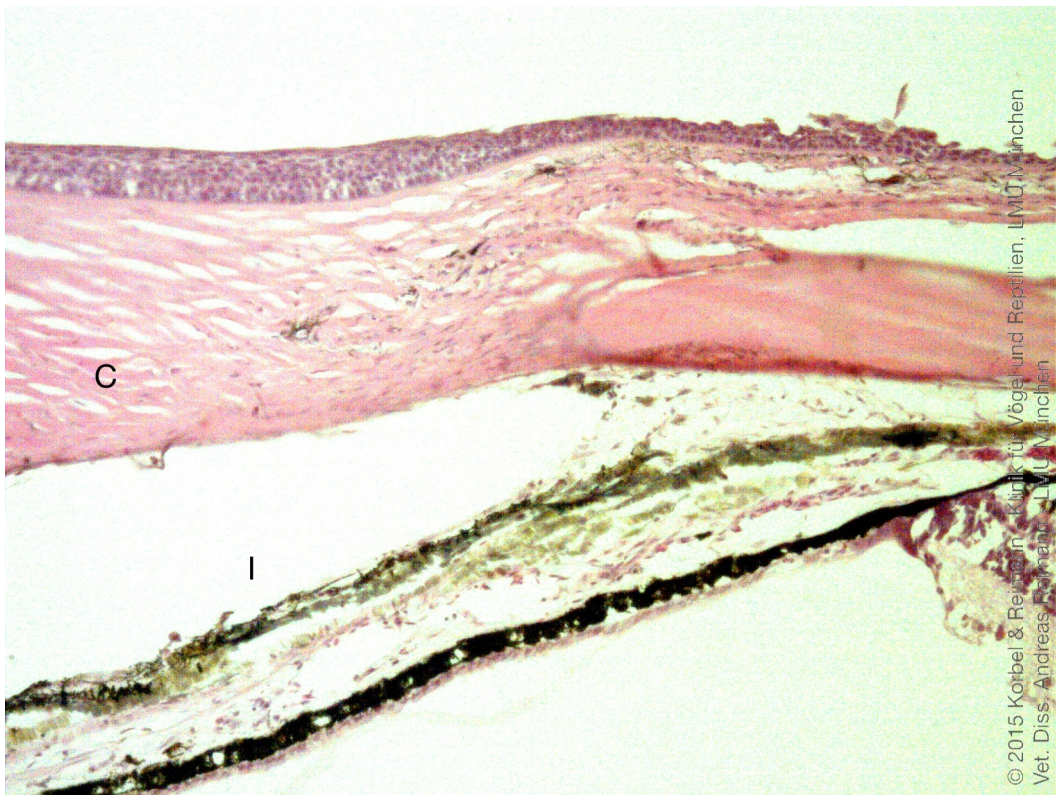


Abbildung 66: Histologisches Schnittpräparat 8 μ m, 10,0-fache Vergrößerung, HE-Färbung, Auge einer Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Fixationsdauer 3 Tage, mikroskopische Darstellung des Kammerwinkels, vordere und hintere Augenkammer, C: Kornea, I: Iris

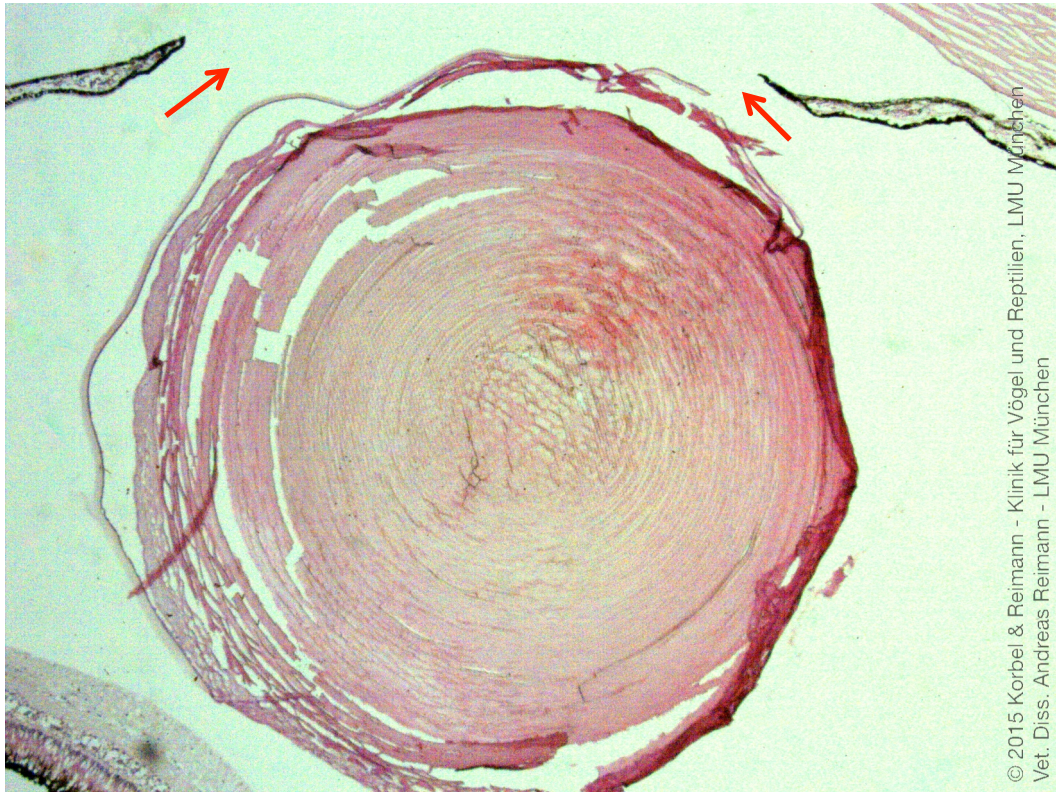


Abbildung 67: Histologisches Schnittpräparat 8 μm , 2,5-fache Vergrößerung, HE-Färbung, Auge einer Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Fixationsdauer 3 Tage, mikroskopische Darstellung der Linse, radiäre Struktur, rote Pfeile: Pupillenöffnung (Irisränder)

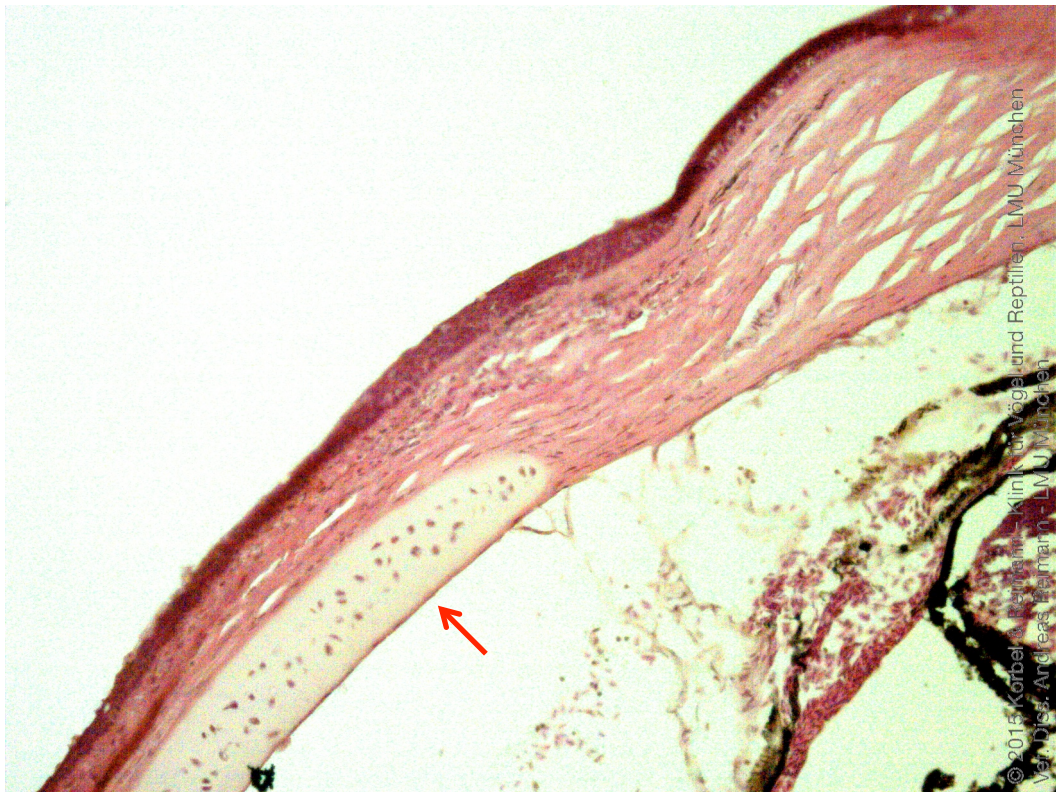


Abbildung 68: Histologisches Schnittpräparat 8 μm , 10,0-fache Vergrößerung, HE-Färbung, Auge einer Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Fixationsdauer 3 Tage, mikroskopische Darstellung der Kornea, roter Pfeil: Skleralknorpel

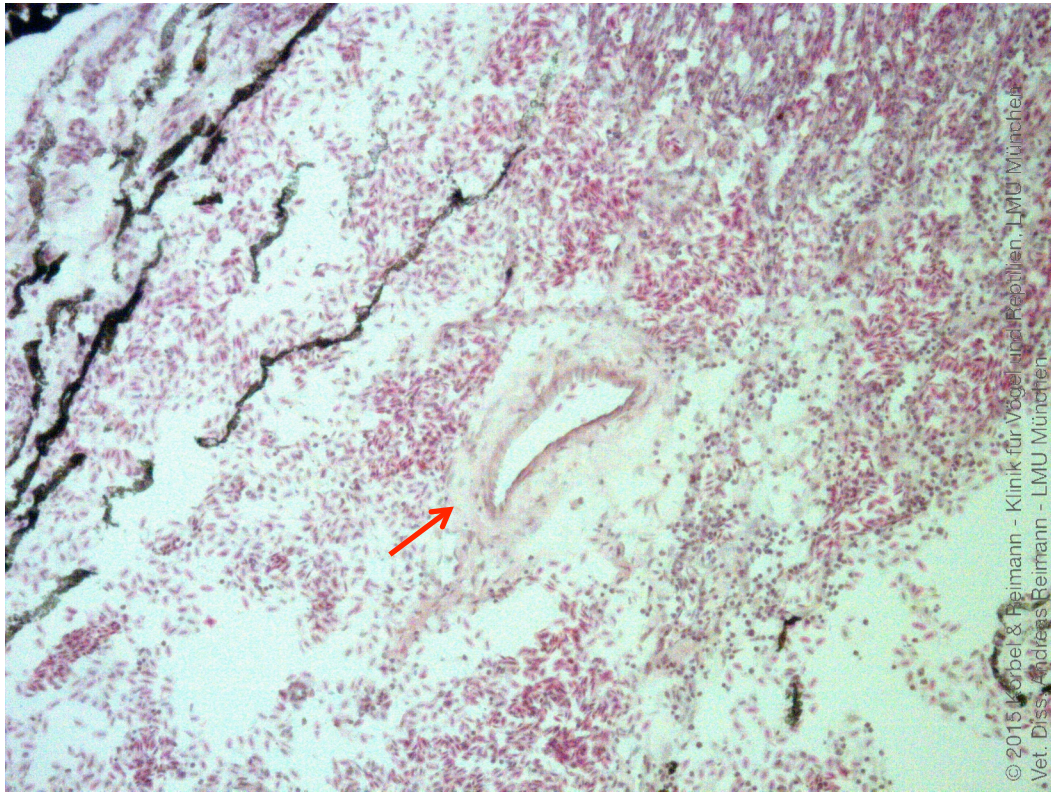


Abbildung 69: Histologisches Schnittpräparat 8 μ m, 10,0-fache Vergrößerung, HE-Färbung, Auge einer Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Fixationsdauer 3 Tage, mikroskopische Darstellung der Choroidea, roter Pfeil: Blutgefäß

6. Internetbrowserbasiertes Lernprogramm

Alle Arbeitsschritte zur Programmierung des Lernprogramms konnten vom Verfasser selbst durchgeführt werden.

6.1 Gestaltung und Struktur des Lernprogramms

Mit zunehmender Komplexität von Websiteinhalten, die sich in der Praxis durch langes Klicken zu den Inhalten zeigt, nimmt die Bedienbarkeit rapide ab. Um die Navigation durch das Tutorial zu erleichtern, wurde die Anzahl der Punkte im Navigationsmenü deshalb so gering wie möglich gehalten.

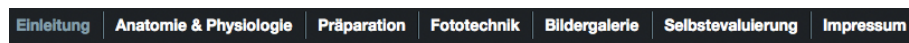


Abbildung 70: Navigationsmenü des Lernprogramms

Nach Zugang zum Lernprogramm gelangt der Besucher auf die Startseite mit der klar gegliederten Menüleiste, welche sich von jeder Seite aus ansteuern lässt. Sie beinhaltet die Bereiche „Einleitung“, „Anatomie & Physiologie“, „Präparationstechnik“, „Fototechnik“, „Bildergalerie“ und „Impressum“. Durch Klicken des Buttons „Einleitung“ gelangt der Benutzer jederzeit zurück auf die Startseite.

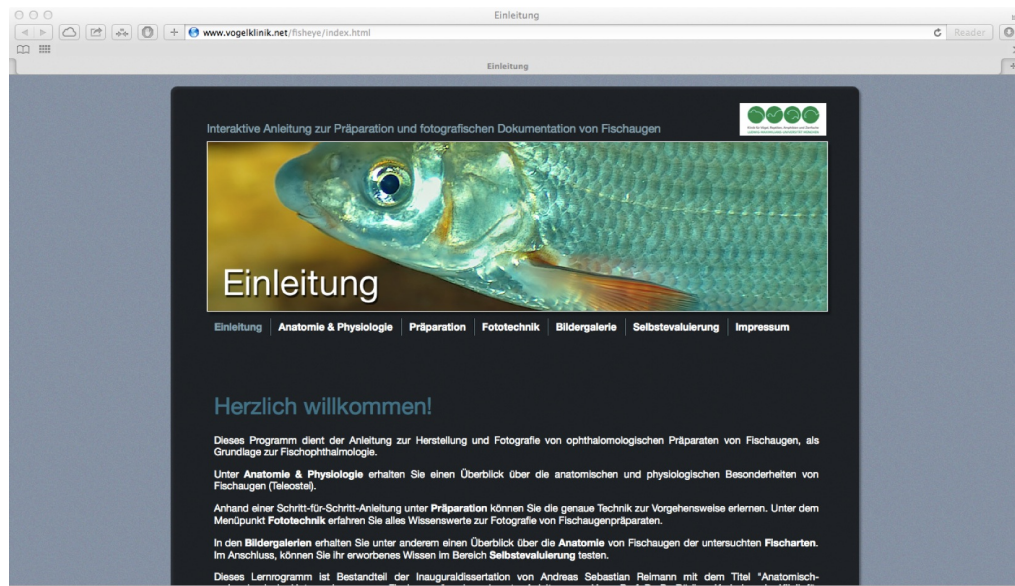


Abbildung 71: Browserdarstellung der Startseite des Lernprogramms

Unter dem Menüpunkt „Anatomie & Physiologie“ erhält der Anwender die wichtigsten Informationen aus den Themengebieten Anatomie und Physiologie von Knochenfischaugen in Form von anschaulichem Bildmaterial nebst beschreibenden Texten. Neben einer schematischen Darstellung des Fischauges finden sich histologische Schnittpräparate als Übersicht und Detailansicht.

Der Bereich „Präparationstechnik“ stellt alle relevanten Arbeitsschritte, die zur Herstellung von Augenpräparaten notwendig sind, Schritt für Schritt dar. Besonderes Augenmerk wurde hierbei auf die praktische Durchführung gelegt, sodass dieses Kapitel als eine direkte Anleitung zur Präparation verwendet werden kann. Mit Hilfe der Bildanleitung und eines Videos werden die Bulbusentnahme und die Kalottierung so genau wie möglich aufgezeigt.

Zur angewandten Fotografie von ophthalmologischen Präparaten gibt der Menüpunkt „Fototechnik“ ausführliche Anweisungen. So sind hier die Wahl der richtigen Kamera und des Objektivs sowie die Anordnung und Einstellung der Kamera, der Blitze und des Objekts veranschaulicht.

Alle erarbeiteten Ergebnisse sind im Bereich „Bildergalerie“ untergebracht. Zugunsten der Übersichtlichkeit wurde die Zahl der Galerien bewusst gering gehalten.

Unter dem Punkt „Selbstevaluierung“ kann der Nutzer seine erworbenen Kenntnisse aus dem Tutorial überprüfen. Die Fragen sind im Multiple-Choice-Verfahren gestaltet. Zu jeder Frage stehen fünf Antwortmöglichkeiten zur Auswahl von denen nur eine Antwort richtig ist. Insgesamt müssen 30 Fragen aus dem Gebiet Anatomie und Physiologie richtig beantwortet werden. Bei einer falschen Antwort muss die Frage erneut beantwortet werden, erst dann gelangt der Nutzer zur nächsten Frage.

Unter dem Menüpunkt „Impressum“ sind alle relevanten Informationen zum Urheberschutz bzw. Copyright der Inhalte einsehbar. Im Rahmen von Onlineinhalten stellt dieser Punkt die Erfüllung der allgemeinen Informationspflichten dar.



Abbildung 72: Schrittweise Darstellung der Enukleation eines Fischeauges

6.2 Bildergalerien

Zur anschaulichen Darstellung des umfangreichen Bildmaterials wurden mehrere nach Themengebiet eingeteilte Bildergalerien (Abb. 73) erstellt. Einen Vergleich der Anatomie der untersuchten Fischarten findet der Benutzer in der Galerie „Anatomie“. Innerhalb der Galerie „Fischarten“ sind alle Präparate nach ihrer Artzugehörigkeit geordnet.

Durch Anklicken der Miniaturansicht eines Bildes (Thumbnail) in der Übersicht öffnet sich die jeweilige Bildergalerie durch einen Überblendungseffekt, der Hintergrund wird dabei abgedunkelt. Die Bilder

werden im klassischen Polaroid-Stil vergrößert (700 Pixel) angezeigt (Abb. 74) und der Nutzer kann nun durch die Galerie vor- und zurückblättern. Durch Anklicken des X schließt sich die geöffnete Bildergalerie wieder.

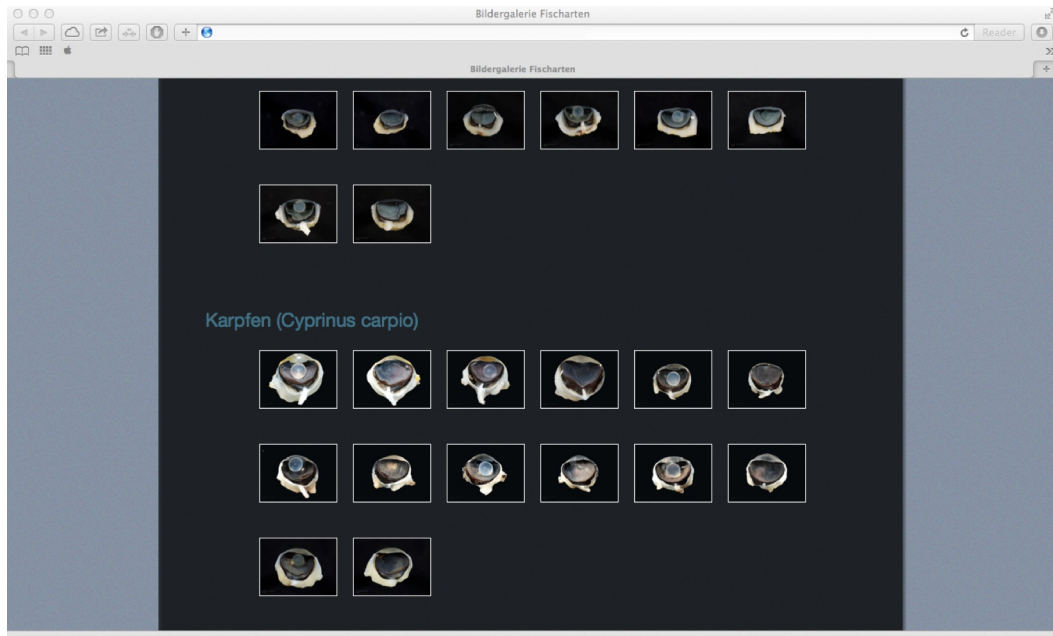


Abbildung 73: Browserdarstellung der Bildergalerien mit Miniaturansichten (Thumbnails)

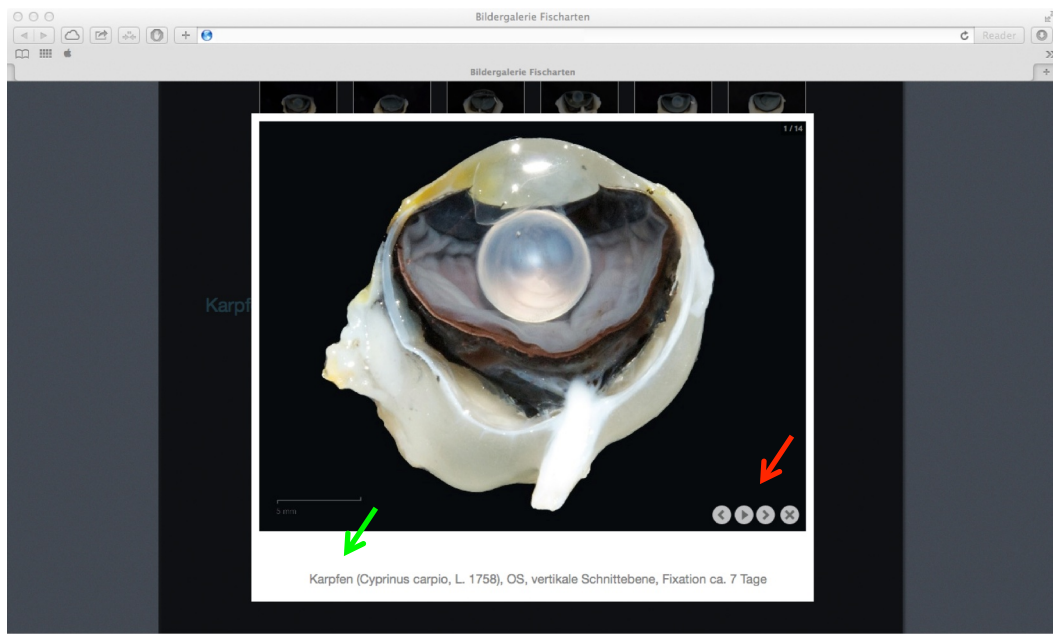


Abbildung 74: Browserdarstellung der Bildergalerie in vergrößerter Ansicht, roter Pfeil: Steuerelemente der Navigation durch die Bildergalerie, grüner Pfeil: Beschreibung des dargestellten Präparates

V. DISKUSSION

1. Methodik

1.1 Enukleations- und Präparationstechnik

Die von Stoskopf (1993) gewählte Vorgehensweise zur Bulbusentnahme bei Fischen erwies sich bei vorsichtiger Anwendung als sehr geeignet. Obwohl die Augen von Knochenfischen von einer relativ engen knöchernen Augenhöhle umgeben sind, konnte die Enukleation meist ohne Schädigung des Organs durchgeführt werden. Lediglich bei zu schneller Arbeitsweise traten Artefakte auf, teilweise kam es dabei auch zu Läsionen am Augapfel.

Allerdings verbleiben bei Fischen anders als bei Vögeln und Säugetieren häufig große Mengen an retrobulbärem Fettgewebe am Augapfel. Anfänglich wurde dieses Fettgewebe direkt im Anschluss an die Enukleation entfernt, was zu einer erhöhten Anzahl an Artefakten bei den Präparaten führte. Um Schäden an okularen Strukturen durch vorzeitiges Abpräparieren zu vermeiden, wurde übermäßiges oder aus optischen Gründen störendes Fettgewebe erst nach vollzogener Fixation entfernt.

Die wie bei Ravelhofer (1996) und Bretzinger (1998) durchgeführte Parazentese zur Verhinderung des Einsinkens der Kornea führte nicht bei jeder Präparation zum Erfolg. Bei zu starkem Auffüllen der vorderen Augenkammer kam es im seltenen Falle zum Platzen des Bulbus im Bereich des Sehnerveneintritts. Bei einigen Präparaten konnte trotz mehrmaliger Parazentese das Stellen der vorderen Augenkammer zum Ende der Fixationsdauer nicht erreicht werden. Ein zweimaliges Auffüllen innerhalb der ersten 24 Stunden nach Enukleation, mit Wiederholung innerhalb der ersten 48 Stunden, erwies sich bei der Mehrzahl der Präparate als wirksam, eine weitere Anwendung zeigte jedoch keine Verbesserung. Auf

Die hergestellten Präparate waren nach einer Dauer von fünf Tagen ausreichend fixiert, kleinere Präparate bereits nach 48 Stunden. Es konnte festgestellt werden, dass einige Präparate nach einer Fixations- bzw.

Lagerungsdauer von drei bis sechs Monaten weitgehend unverändert waren. Dem gegenüber stehen Präparate, die trotz kurzer oder langer Fixations- bzw. Lagerungsdauer die beschriebenen Artefakte zeigen. Eine genaue Aussage zu den Gründen dieser Veränderungen kann nicht getroffen werden. Die unterschiedlichen Befunde lassen nur Interpretationen zu. Die von Ravelhofer (1996) beschriebenen kataraktähnlichen Linsentrübungen kamen bei allen Präparaten vor und sind daher auf die Fixierung mittels Formalin zurückzuführen. Netzhautablösungen traten verteilt bei einer Vielzahl von Präparaten auf, Werther et al. (2011) und Ravelhofer (1996) deuten auf einen Zusammenhang mit der Dauer der Fixation hin. Jedoch zeigte ein Teil der Präparate auch nach mehrmonatiger Lagerungsdauer keine Ablösungen der Netzhaut; da alle Präparate in gleicher Weise fixiert wurden, kann über die Ursache nur gemutmaßt werden. Es empfiehlt sich in jedem Fall darauf hinzuwirken, möglichst frischtotes Material zu erhalten, unerlässlich erscheint auch eine schnelle Kühlung der Tierkörper.

Anders als bei Vogelaugen (Ravelhofer, 1996) erfolgte die Schnittführung in Anpassung an intraokulare Strukturen. Somit wurde eine mittige horizontale Schnittebene gewählt, durch diese Vorgehensweise konnte der Processus falciformis vollständig in jeweils einer Hemisphäre erhalten werden. Im Gegensatz zur Linse bei Vögeln konnten die Linsen bei den untersuchten Fischaugen nicht kalottiert werden. Bei der gewählten Schnittebene kam es somit automatisch zur Luxation der Linse nach posterior, mit Abriss der Linsenkapsel. Aufgrund der Größe und Beschaffenheit der Linse bei Knochenfischen war die Luxation nicht vermeidbar.

1.2 Fotografische Dokumentation

Um die komplizierten Verhältnisse am Auge darzustellen, nimmt die Fotografie bereits seit Langem einen hohen Stellenwert innerhalb der Veterinärmedizin ein (Korbel, 1994). Der besondere Nutzen der Anwendung digitaler Fotografie zum Zwecke der Dokumentation ophthalmologischer Befunde ist daher unumstritten. Zur Erlangung einer

gewissen Vergleichbarkeit besteht bei der analogen wie auch bei der digitalen Technik die Notwendigkeit, alle Arbeitsschritte unter reproduzierbaren und standardisierten Bedingungen durchzuführen (Bengel, 1984). Die durch Ravelhofer (1996) angewandte und modifizierte Arbeitsweise zur Dokumentation konnte auch bei Fischaugen hervorragend angewendet werden. Der Vorteil von digital erzeugten Bildern ist die Möglichkeit, eine Vielzahl von Aufnahmen zu erzeugen, ohne dass dabei hohe Kosten entstehen. Überflüssiges Bildmaterial kann leicht gelöscht werden, zudem ermöglicht es einen direkten qualitativen Vergleich an einer Auswahl von Aufnahmen desselben Objekts. Auch ein Herantasten an die optimalen Kameraeinstellungen ist ohne Zeitverlust möglich.

1.2.1 Makrofotografie – technische Ausrüstung

Die technische Ausstattung erfüllte die geforderten Ansprüche weitgehend und lieferte Bildmaterial guter Qualität. Die verwendete Makrofotografie repräsentierte dabei eine Technik aus dem unteren bis mittleren Preissegment, so konnte gezeigt werden, dass es keiner professionellen Fotoausrüstung bedarf, um die vorliegenden Ergebnisse zu erzielen. Die Wahl dieser eher gängigen Ausrüstung ist daher ein weiterer Schritt in Richtung einer reproduzier- und vergleichbaren Arbeitsweise zur Etablierung einer Standardmethode in der Fischophthalmologie.

Wie von Bengel (1984) erwähnt, bilden Makro-Objektive durch ihre Einsatzmöglichkeiten das Mittel der Wahl. Das gewählte Makro-Objektiv war durch seine leichte Handhabung und die mögliche Brennweite von 60 mm für das Abbilden der Präparate im gewünschten Abbildungsmaßstab von bis zu 1:1 sehr gut geeignet. Um höhere Abbildungsmaßstäbe zu erreichen, kann alternativ ein besseres Makro-Objektiv genutzt oder ein Balgengerät zwischen Kamera und Objektiv eingesetzt werden. Auf die Verwendung eines Balgengeräts empfohlen von Bengel (1984) und angewendet durch Korbel (1994) und Ravelhofer (1996) wurde verzichtet,

um zu zeigen, dass auch mit einer relativ schlichten technischen Ausrüstung das gewünschte Versuchsziel erreicht werden kann.

Die Verwendung des Makrostativs im Zusammenhang mit der selbst hergestellten Objekthalterung ermöglichte das Fotografieren der Augenpräparate bei gleichbleibender, optimaler Schärfentiefe. Durch die fest montierte Kamera kam es auch im Moment des Auslösens zu keinen Einflüssen auf die Fokussierebene. Durch die hohe Standfestigkeit des Novoflex-Makrostativs konnte das Entstehen von Bewegungsunschärfe beim Auslösen weitgehend vermieden werden. Durch das verwendete Hilfslicht wurde das Objekt zur einfacheren Schärfeeinstellung gut ausgeleuchtet, dadurch konnte die manuelle Fokussierung über den Sucher wesentlich erleichtert werden.

Die verwendeten Makroblitze ermöglichten mit ihrer zangenförmigen Ausrichtung wie bei der Arbeit von Ravelhofer (1996) eine individuelle und leicht anpassbare Ausleuchtung der Objekte. Um Aufnahmen ohne störende Reflexe zu erreichen, mussten im Normalfall allerdings mehrere Aufnahmen erfolgen. Jedoch konnte mit zunehmender Erfahrung bei der Durchführung rasch die beste Methode erlernt werden. Alternativ wäre auch der Einsatz von Kaltlichtquellen denkbar, indes muss auch hier eine Möglichkeit zur schatten- und reflexionsfreien Aufnahme gegeben sein.

Die Freistellung der Präparate konnte mit Hilfe der Objekthalterung und des Moltonstoffs als Hintergrund nahezu perfekt umgesetzt werden. Die abgelichteten Präparate scheinen wie von Bengel (1984) gefordert im Raum zu „schweben“, der tiefschwarze Hintergrund lenkt zudem die Aufmerksamkeit des Betrachters nicht ab und isoliert das Aufnahmeobjekt vollkommen. Wie auch bei Bengel (1984) konnte das Freistellen nur durch die entsprechende Beleuchtung und Hintergrundanordnung erreicht werden.

1.2.2 Kameraeinstellungen

Die gewählten Kameraeinstellungen ermöglichten Bilder guter Qualität. Unverzichtbar war dabei die Option, die Objekte manuell zu fokussieren sowie die Blitzbeleuchtung über die Satellitenblitze zu steuern.

Wie von Stüper (1962) und Bengel (1984) erläutert, erwies es sich als dienlich bei den abgelichteten Präparaten den schärfsten Punkt im vorderen Bereich der Objekte einzustellen. Dadurch konnte der Schärfentiefebereich optimal genutzt werden. Dies ist bei dreidimensionalen Objekten – wie den hier untersuchten Augen – besonders sinnvoll.

1.2.3 Digitale Fotografie und Bildbearbeitung

Mit der Verwendung des digitalen Spiegelreflexkamarasystems in Kombination mit dem gewählten Makro-Objektiv konnte die fotografische Dokumentation der hergestellten Präparate in ihren verschiedenen Größen optimal erreicht werden. Dabei entstanden Bilder hoher Qualität. Durch den Einsatz der digitalen Aufnahmetechnik konnten schlechte Aufnahmen an Ort und Stelle verworfen werden, was zu einer enormen Zeit- und Kostenersparnis im Vergleich zu analogen Kamerasystemen führt. Auch der Transfer des Bildmaterials mittels eines SD-Speichermediums konnte zeitsparend erfolgen.

Digital erzeugte Bilder bieten den Vorteil eines leicht zu handhabenden Mediums. Somit kann das Bildmaterial problemlos auf verschiedenen Wegen, bei gleichzeitig kostenschonendem Aufwand, übermittelt und vervielfältigt werden. Zudem werden zu jeder Aufnahme alle wichtigen Bilddaten (EXIF-Daten), wie z.B. Brennweite, Belichtungsdauer, Blendeneinstellung, ISO-Wert und Datum und Uhrzeit, in die Aufnahme integriert. Dadurch ist es zu jeder Zeit möglich diese Daten abzurufen, ohne bei jedem Bild diese Informationen von Hand dokumentieren zu müssen.

Die Verwendung der Aperture-Fotosoftware der Firma Apple ermöglichte eine geordnete Handhabung der Aufnahmen, mit der vergrößerten Ansicht konnte die Qualität der Bilder am PC besonders gut beurteilt werden. Des Weiteren bot die Nutzung der Arbeitskopie-Funktion ein mehrfaches Exportieren der Bilder in verschiedenen Größen und Bildqualitäten. Kameradisplays können diese Form der Kontrolle über die Qualität der Aufnahme nur sehr begrenzt bieten, da sie meist relativ kleinformatig sind

und häufig eine nur geringe Auflösung haben. Die Schärfeneinstellung bzw. Kontrolle der Fokussierebene erfolgte somit in doppelter Weise.

Durch die Bearbeitung am PC findet eine praktische Kontrolle der Bildqualität statt, die ein rasches Anpassen der Einstellungen ermöglicht. Durch den Einsatz moderner Bildbearbeitungssoftware können einzelne Parameter einer Aufnahme nachbearbeitet werden. Bei moderatem Einsatz der Optimierung kann das Bildmaterial erheblich verbessert werden. Die häufigste Anpassung bei den vorliegenden Bildern wurde bei der Belichtung vorgenommen, da es teilweise bei der Blitzbeleuchtung gezwungenermaßen zu einer leichten Über- oder Unterbelichtung kam. Durch Retuschieren einzelner Reflexionen an den Präparaträndern oder in Bereichen mit einer unregelmäßigen Oberfläche konnte ein ruhigeres Erscheinungsbild erzeugt werden, welches dem Betrachter zugutekommt. Im Rahmen der Dokumentation von anatomischen bzw. klinischen Befunden sollte die digitale Nachbearbeitung trotz aller sich bietender Vorteile kritisch betrachtet werden. Der Übergang von einer sinnvollen qualitativen Verbesserung hin zu einer den optischen Eindruck verändernden bzw. verfälschenden Nachbearbeitung ist fließend.

2. Erstellen des internetbrowserbasierten Lernprogramms

Das online Lernprogramm konnte mit der verwendeten Software Freeway Express (Softpress Ltd.) anschaulich und strukturiert programmiert werden. Die relativ einfache Bedienung ermöglicht auch Anwendern ohne professionelle Programmierkenntnisse ein rasches Erstellen von ansprechenden Webinhalten. Jedoch muss hierbei betont werden, dass das Erstellen eines Lernprogramms nur mit einem erheblichen Zeitaufwand zu bewerkstelligen ist. Zu Beginn müssen das Design und die Struktur so genau wie möglich festgelegt werden. Alle verwendeten Inhalte müssen in der Regel für das Internet bearbeitet werden. Bei Bilddateien muss die Dateigröße entsprechend gewählt werden, sodass die Bilddarstellung schnell geladen werden kann, ohne qualitative Einbußen mit sich zu bringen.

Durch die gewählte HTML-Programmiersprache ist das Lernprogramm mit Hilfe aller gängigen Internetbrowser nutzbar, das heißt, der Nutzer kann ohne vorherige Installation von Browser-Plug-ins (z.B. Flash) die Seite betrachten. Die Inhalte des Lernprogramms wurden durch die passwortgeschützte Zugriffsbeschränkung vor der Nutzung durch einen unerwünschten Personenkreis geschützt.

Die Verwendung der Bildergalerie-Software Showcase (Freeway-Plug-in) ermöglichte eine optimale Realisierung der Bildergalerien. Durch die einfach erstellte Navigation, durch die vor- und zurückgeblättert werden kann, gelingt die Bedienung der Galerien auf Anhieb. Alle bildrelevanten Angaben konnten zurückhaltend und einheitlich in den Abbildungshinweis übertragen werden, somit hat der Betrachter alle Informationen bei Bedarf verfügbar.

Die bewusst reduzierte Navigationsstruktur wird den Anforderungen nach einer einfachen und gut überschaubaren Gliederung, wie von Strzebkowski & Kleeberg (2002) beschrieben, gerecht und beugt somit einer Desorientierung des Anwenders vor (Klimsa & Issing, 2002).

3. Abschließende Betrachtung

Durch die Erarbeitung einer Methodik zur einfachen Präparation und fotografischen Dokumentation konnte im Rahmen dieser Abhandlung eine Grundlage zur Darstellung anatomischer und pathologischer Verhältnisse an Fischaugen geschaffen werden. Der Einsatz des verwendeten Kamerasystems ermöglicht durch die einfache Handhabung eine routinemäßige Durchführung der Dokumentation unter standardisierten Bedingungen. Mit dem erstellten Lernprogramm kann die Technik zur Herstellung ophthalmologischer Präparate von Fischaugen innerhalb der graduellen und postgradueller Ausbildung detailliert und einfach erlernt werden. Neben der praktischen Anleitung gibt das Lernprogramm einen Überblick zur Anatomie, Histologie und Physiologie von Fischaugen und rundet somit das Themengebiet ab.

VI. ZUSAMMENFASSUNG

In den letzten Jahren hat die medizinische Behandlung von Fischen nicht nur innerhalb der Fischereiwirtschaft an Bedeutung gewonnen. Im Rahmen von Bestandsbetreuung zählen in der Regel rein ökonomische Aspekte, wohingegen es im Zierfischbereich besonders um den emotionalen Wert und die Gesundheit des Einzeltieres geht. Die klinische Ophthalmologie, bildgebende diagnostische Methoden sowie postklinische pathologische-makroskopische Untersuchungsverfahren spielen am Auge von Wirtschafts- und Zierfischen nicht nur klinisch aufgrund der Bedeutung eines voll funktionsfähigen Visus sondern auch aufgrund der Tatsache, dass Augenerkrankungen bei dieser Tiergruppe häufig Ausdruck von Systemerkrankungen darstellen, eine bedeutende Rolle als „diagnostisches Fenster“ (Korbel et al., 2014). Vor diesem Hintergrund sind Grundlagenkenntnisse zur Ophthalmologie bei Fischen sowohl im Wirtschaftsfisch- als auch Aquaristikbereich und den unterschiedlichen Anforderungen mit Bestands- und Individualbehandlung von Interesse.

Ziel dieser Arbeit war es, eine geeignete Technik zur Präparation und fotografischen Dokumentation zu entwickeln, um diese im Zusammenspiel mit bereits bestehenden und künftigen bildgebenden ophthalmologischen Untersuchungsmethoden als Grundlage für die klinische Ophthalmologie bei Fischen zu verwenden. Mit der angewandten Makrofotografie konnten physiologische sowie pathologische Zustände an Augen verschiedener Wirtschafts- und Zierfischarten einfach und reproduzierbar dargestellt werden. Der Schwerpunkt lag dabei auf einer leicht zu handhabenden und routinemäßig durchführbaren Technik, um die Vorgehensweise leicht erlernbar zu gestalten. Die entwickelte Technik eignet sich gut zur Anwendung im klinischen Bereich und ist daher auch für die Dokumentation von pathologischen Befunden tauglich.

Das in dieser Arbeit entwickelte Lernprogramm vermittelt detaillierte Kenntnisse zur Präparation von Fischaugen, physiologischen und pathologischen Zuständen und dient als Beurteilungsreferenz für die Ergebnisse diagnostischer bildgebender Techniken. Neben der Anleitung

bietet das Lernprogramm auch eine Übersicht zu den Augen verschiedener Fischarten und stellt darüber hinaus auch zusammenhängende Informationen aus den Themengebieten Anatomie, Histologie und Physiologie zur Verfügung. Die auf diese Weise multimedial präsentierten Inhalte können einen wesentlichen Beitrag in der graduellen, wie auch postgraduelle Lehre leisten.

VII. SUMMARY

In recent years, the medical treatment of fish has become more important, not only in fisheries management but also in the treatment of aquatic pets. While economic factors play a substantial role in fisheries, emotional and animal care factors play a more important role for aquatic pets. The fact that ocular disorders in fish are manifestations of systemic diseases, visual techniques and pathologic macroscopy have become essential and can be seen as a “diagnostic window” for ocular diseases (Korbel et al., 2014). Against this background, fundamental ophthalmologic skills have drawn special interest for the treatment and management of diseases in fish farming and aquatic pets.

This study aimed to develop an appropriate technique for the preparation and photographic documentation of fish eyes and to interact with common and future visual ophthalmological methods as a basis of clinical ophthalmology in fish. With the help of macro-photography, physiological and pathological conditions of fish eyes within different species can be shown in a simple and reproducible ways. The focus of the present work was on a routine workflow in order to establish an easy-to-learn process for treatment. The developed technique is suitable for clinical use as well as for documentation of pathological results.

The online tutorial provides detailed knowledge about the preparation of fish eyes as well as physiological and pathological conditions. This work can be used as a reference to evaluate imaging techniques. The online tutorial further provides an overview of different breed of fish and combines information of anatomy, histology, and physiology. With its multimedia content, the tutorial additionally provides a valuable source for graduate and postgraduate teaching.

VIII. LITERATURVERZEICHNIS

ADOBE (2009) Classroom In A Book – Adobe Photoshop CS4. Das offizielle Trainingsbuch von Adobe Systems. Addison-Wesley-Verlag, München. 432

ALLEN, W.F. (1949): Blood vascular system of the eye of a deep water fish (*Ophiodon elongatus*) considered as a pressure mechanism. *The Anatomical Record*; 103: 205-211.

AUGUSTIN, A.J., COLLINS, J.F. (2001): *Augenheilkunde*. Springer Verlag.

BARNETT, C. (1951): The structure and function of the choroidal gland of teleostean fish. *J Anat*; 85: 113-119.

BEER, T. (1894): Die Accommodation des Fischeauges. *Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*; 58: 523-650.

BELLHORN, R.W. (1997): Retinal nutritive systems in vertebrates. *Seminars in Avian and Exotic Pet Medicine*. 108-118.

BENGEL, W. (1984): *Photographie für Mediziner*. Quintessenz Verlags-GmbH 422.

BENGEL, W. (1994): Fotografieren im Mund leicht gemacht. *Zahnärztliche Mitteilungen*; 84: 16-22.

BJERKÅS, E., WAAGBØ, R., SVEIER, H., BRECK, O., BJERKÅS, I., BJØRNESTAD, E., MAAGE, A. (1995): Cataract development in Atlantic salmon (*Salmo salar* L) in fresh water. *Acta Veterinaria Scandinavica*; 37: 351-360.

BJERKÅS, E., BJØRNESTAD, E., BRECK, O., WAAGBØ, R. (2001): Water temperature regimes affect cataract development in smolting Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Journal of Fish Diseases*; 24: 281-291.

BLOEMENDAL, H. (1981): *Molecular and cellular biology of the eye lens*. John Wiley & Sons 49-84.

BLOEMENDAL, H., HOCKWIN, O., HOENDERS, H., OHRLOFF, C., RINK, H. (1985): *Linse. Biochemie des Auges*. F. Enke Verlag, Stuttgart: 82-109.

BONE, Q., MARSHALL, N.B. (1997): *Biologie der Fische*. Jena. Verlag Gustav Fischer 168-171.

BRANDSTETTER, P. (2014) *Okulare Sonographie am Fischauge - Das hintere Augensegment am Beispiel des Kois (Cyprinus carpio)*. Diss. Vet. Med., LMU München

BREITWIESER, A. (2002): *Akzeptanz von E-Learning. Studie von Cognos und Innotec*.

BRETZINGER, S. (1998) *Augenerkrankungen bei Reptilien*. LMU München.

BROCKHAUS (2000): *Der Brockhaus von A-Z: in drei Bänden*. Weltbild Verlag.

BURNSIDE, B., BASINGER, S. (1983): Retinomotor pigment migration in the teleost retinal pigment epithelium. II. Cyclic-3', 5'-adenosine monophosphate induction of dark-adaptive movement in vitro. *Investigative ophthalmology & visual science*; 24: 16-23.

CARRILLO, J., MARTINEZ, J., DIVANACH, P., KENTOURI, M. (1999):

Unilateral eye abnormalities in reared Mediterranean gilthead sea bream. *Veterinary Record-English Edition*; 145: 494-496.

CLAYTON, R. (1974): Comparative aspects of lens proteins. In: H. Davson *The eye*; 5: 399-494.

DA SILVA, E.G., GIONFRIDDO, J.R., POWELL, C.C., CAMPBELL, T.W., EHRHART, E.J. (2010): CASE REPORT: Iridociliary melanoma with secondary lens luxation: distinctive findings in a long-horned cowfish (*Lactoria cornuta*). *Veterinary Ophthalmology*; 13: 123-127.

DARWIN, C. (1859): *On the origins of species by means of natural selection*. Murray: London.

DAVIES, P.H. (2000): *Nah-und Makrofotografie*. Christian Verlag

DE JONG, W. (1981): Evolution of lens and crystallins. *Molecular and cellular biology of the eye lens*: 221-278.

DEHADRAI, P.V. (1966): Mechanism of Gaseous Exophthalmia in the Atlantic Cod, *Gadus morhua* L. *Journal of the Fisheries Board of Canada*; 23: 909-914.

DEIMANN, M. (2002): Motivationale Bedingungen beim Lernen mit Neuen Medien. *Medienunterstütztes Lernen: Beiträge von der WissPro-Wintertagung*: 61-70.

DEMOLL, R., MAIER, H.N., WUNDSCH, H.H. (1964): *Handbuch der Binnenfischerei Mitteleuropas, Band II A. E.* Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 195-206.

DOROBK, K. (2013) *Dreidimensionale Sonographie am Vogelauge - Das vordere Augensegment*. LMU München.

DOUGLAS, R. (1982): The function of photomechanical movements in the retina of the rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Journal of Experimental Biology*; 96: 389-403.

DOUGLAS, R., PARTRIDGE, J., MARSHALL, N. (1998): The eyes of deep-sea fish I: lens pigmentation, tapeta and visual pigments. *Progress in retinal and eye research*; 17: 597-636.

DUKE-ELDER, S. (1958): The Eyes of Fishes. In *System of Ophthalmology*, Vol. 1: The Eye in Evolution. London, Publishers Kimpton 274-331.

DUKES, T.W. (1975): Ophthalmic pathology of fishes. *The Pathology of Fishes*. University of Wisconsin Press, Wisconsin: 383-398.

EHLERS, J., FRIKER, J., LIEBICH, H., STOLLA, R. (2002): PC-Ausstattung und-nutzung von Studierenden der Tiermedizin im Vergleich zu Schülern der 12. Klasse. *Med. Ausbildung*; 19: 124-126.

EHLERS, J., FRIKER, J. (2003): Erstellung von computerassistierten Lernprogrammen Erfahrungen aus einem Kooperationsmodell an der Tierärztlichen Fakultät der Universität München. *Tierärztl Prax*; 31: 74-80.

ENDNER, D., PODDA, M. (2013): Photodokumentation von Behandlungsergebnissen. In: *Lasertherapie der Haut*: Springer; 419-427.

FASCHINGER, C. (2010): Zur Evolution der Linse in verschiedenen Augen: Erstaunliches. *Spektrum der Augenheilkunde*; 24: 174-180.

FRANCK, L. (1883): *Kleine vergleichende Anatomie der Haustiere*. Schickhardt & Ebner.

FUCHS, E. (1884): *Beiträge zur normalen Anatomie des Augapfels*.

Albrecht von Graefes Archiv für Ophthalmologie; 30: 1-60.

GELATT, K.N., GILGER, B.C., KERN, T.J. (2013): Veterinary Ophthalmology: Two Volume Set. John Wiley & Sons 1750-1756.

GENTEN, F., TERWINGHE, E., DANGUY, A. (2009): Atlas of fish histology.

GJESSING, M.C., KVELLESTAD, A., OTTESEN, K., FALK, K. (2009): Nodavirus provokes subclinical encephalitis and retinochoroiditis in adult farmed Atlantic cod, *Gadus morhua* L. Journal of Fish Diseases; 32: 421-431.

GLAESER, G., PAULUS, H. (2014): Über und unter Wasser sehen. In: Die Evolution des Auges - Ein Fotoshooting: Springer Berlin Heidelberg; 124-143.

GRASSBERGER, M., VERHOFF, M.A. (2013): Klinisch-forensische Fotodokumentation. In: Klinisch-forensische Medizin: Springer; 127-138.

GREEFF, R. (1928): Glaskörper (Corpus vitreum). In: AugeEds ABELSDORFF, G., ELSCHNIG, A., GINSBERG, S., GREEFF, R., HERTEL, E., HIPPEL, E., KÜMMELL, R., LÖHLEIN, W., PETERS, A., SCHIECK, F., SEIDEL, E., SZILY, A., WESSELY, K.: Springer Berlin Heidelberg; 819-872.

GUSTAFSSON, O., COLLIN, S., KRÖGER, R. (2008): Early evolution of multifocal optics for well-focused colour vision in vertebrates. Journal of Experimental Biology; 211: 1559-1564.

HARDER, W. (1975): Anatomy of fishes, part I: text. E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

HARGIS JR, W.J., ZWERNER, D.E. (1988): Effects of certain contaminants on eyes of several estuarine fishes. *Marine Environmental Research*; 24: 265-270.

HARGIS JR, W.J. (1991): Disorders of the eye in finfish. *Annual Review of Fish Diseases*; 1: 95-117.

HILDEBRAND, M., GOSLOW, G., DISTLER, C. (2003): Vergleichende und funktionelle Anatomie der Wirbeltiere. Springer Verlag.

HOFFMANN, R.W. (2005): Fischkrankheiten. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

JURK, I. (2002): Ophthalmic disease of fish. *Veterinary Clinics of North America: Exotic Animal Practice*; 5: 243-260.

KARVONEN, A., SEPPALA, O. (2008): Eye fluke infection and lens size reduction in fish: a quantitative analysis. *Diseases of aquatic organisms*; 80: 21.

KERKAU, F. (2002): Werkzeuge zur Entwicklung von Multimedia–Teil 2: Autorenwerkzeuge für Online-Lernangebote. *Information und Lernen mit Multimedia und Internet. Lehrbuch für Studium und Praxis*; 3: 218-226.

KERN, T.J., COLITZ, C.M.H. (2013): Exotic Animal Ophthalmology, In: GELATT, K N, *Veterinary Ophthalmology: Two Volume Set*. John Wiley & Sons 1750-1756.

KERRES, M. (2007): Strategische Kompetenzentwicklung und E-Learning an Hochschulen. *Chancen für die Hochschulentwicklung*.

KETOLA, H.G. (1979): Influence of dietary zinc on cataracts in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *The Journal of nutrition*; 109: 965.

KHORRAMSHAHI, O., SCHARTAU, J.M., KRÖGER, R.H.H. (2008): A complex system of ligaments and a muscle keep the crystalline lens in place in the eyes of bony fishes (teleosts). *Vision Research*; 48: 1503-1508.

KLIMSA, P., ISSING, L.J. (2002): Multimediane Nutzung aus psychologischer und didaktischer Sicht. In: *Information und Lernen mit Multimedia und Internet: Lehrbuch für Studium und Praxis* Eds ISSING, L.J. Weinheim: Verlagsgruppe Beltz, Psychologieverlagsunion. 5-17.

KLINCKOWSTRÖM, A. (1894): Beiträge zur Kenntniss der Augen von *Anableps tetrophthalmus* 1. *Skandinavisches Archiv Für Physiologie*; 5: 67-70.

KOPPANG, E., BJERKÅS, E. (2006): The eye. In: *Systemic Pathology of Fish*, 2. Ed. Eds FERGUSON, H.W.: Scotian Press; 245-265.

KORBEL, R. (1991): Zum derzeitigen Stand der Ornitho-Ophthalmologie. *Tierärztliche Prax.* 19, 497; 507

KORBEL, R. (1994): *Augenheilkunde bei Vögeln: Ätiologie und Klinik von Augenkrankheiten, Luftsack-Perfusionsanästhesie, ophthalmologische Photographie und Bildatlas der Augenerkrankungen bei Vögeln.* Vet Habil, München: 289-314.

KORBEL, R., KÖLLE, P., BRETZINGER, S., HOFFMANN, R. (2000): Eye diseases in reptiles. *Tierärztliche Praxis. Ausgabe K, Kleintiere/Heimtiere*; 28: 263-271.

KORBEL, R., BARWIG, S., RINDER, M. (2012) Vergleichende Untersuchungen zur Ophthalmoskopie, Digitalen Scanning Ophthalmoskopie (SDO) und Optischen Kohärenztomographie (OCT) unter besonderer Berücksichtigung Bronavirus-assoziiertes ophthalmologischer Befunde am Vogelauge. In: 17. DVG-Tagung über

Vogelkrankheiten der DVG-Fachgruppe "Geflügelkrankheiten", München. 43-46.

KORBEL, R., DOROBK, K., LIEPERT, A., POHL, R., BRANDSTETTER, P., SCHULZE, C., VELASCO, M., REIMANN, A., RINDER, M. (2014) Untersuchungen zur Darstellung von physiologischen und pathologischen Befunden am Fischauge mittels Makroskopie, 2D und 3D-Sonographie, optischer Kohärenztomographie (OCT) sowie digitaler Scanner Ophthalmoskopie (SDO). In: XV. Gemeinschaftstagung der Deutschen, Österreichischen und Schweizer Sektion der EAFP.

KRÖGER, R.H.H. (2013): Optical plasticity in fish lenses. Progress in retinal and eye research; 34: 78-88.

KUBICEK, H., BREITER, A., FISCHER, A., WIEDWALD, C., FALLTURM, A. (2004): Organisatorische Einbettung von e-Learning an deutschen Hochschulen. Institut für Informationsmanagement.

LANGLOTZ, B.K. (2011): Digitale Fotopraxis-Makrofotografie: das umfassende Handbuch; [zahlreiche Praxisworkshops zu Motiven und Techniken; mit vielen Ausrüstungstipps auch für das Ministudio zu Hause; inkl. Nachbearbeitung mit Lightroom und Photoshop]. Galileo Press.

LIEPERT, A. (2013) Dreidimensionale Sonographie am Vogelauge - Das hintere Augensegment. LMU München.

LÜLING, K. (1953): Über die fortschreitende Augendegeneration des Anoptichthys jordani. Zool. Anz; 151: 289-299.

LYTHGOE, J.N. (1975): Problems of Seeing Colours under Water. In: Vision in Fishes Eds ALI, M.A.: Springer US; 619-634.

LYTHGOE, J.N. (1980): Vision in Fishes: Ecological Adaptations. In:

Environmental Physiology of Fishes Eds ALLI, M.A.: Springer US; 431-445.

MERIN, L. (1992): Ophthalmologic Photography. In: Biomedical Photography Eds VETTER, J.P. Boston, London, Oxford, Singapore, Sidney, Toronto, Wellington: Butterworth-Heinemann; 333-358.

MIDDENDORF, E. (2003) Computernutzung und Neue Medien im Studium, 2002.

MILLICHAMP, N.J. (1991): Exotic Animal Ophthalmology, In: GELATT, K N, Veterinary Ophthalmology, 2nd Ed. Lea und Febiger, Philadelphia 680-685.

MILLICHAMP, N.J. (1997): Management of ocular disease in exotic species. Seminars in Avian and Exotic Pet Medicine; 6: 152-159.

MURPHY, C.J., BROOKS, D.E., KERN, T.J., QUESENBERRY, K.E., RIIS, R.C. (1983): Enucleation in birds of prey. Journal of the American Veterinary Medical Association; 183: 1234-1237.

NASISSE, M.P., NOGA, E.J., DAVIDSON, M.G. (1989): Degenerative retinopathy in captive Atlantic menhaden, *Brevoortia tyrannus* (L.). Journal of Fish Diseases; 12: 37-44.

NICKEL, R., SCHUMMER, A., SEIFERLE, E. (1992): Lehrbuch der Anatomie der Haustiere, 3. Auflage, Band IV: Nervensystem, Sinnesorgane, Endokrine Drüsen. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg: 405-428.

NICOL, J. (1965): Retinomotor changes in flatfishes. Journal of the Fisheries Board of Canada; 22: 513-520.

NICOL, J.A.C., SOMIYA, H. (1989): The eyes of fishes. Clarendon Press

Oxford.

OTTESON, D.C., HITCHCOCK, P.F. (2003): Stem cells in the teleost retina: persistent neurogenesis and injury-induced regeneration. *Vision Research*; 43: 927-936.

PERES, M. (1992): Close-up Photography and Photomacrography. *Biomedical Photography*. Boston, MA: Butterworth-Heinemann: 171-199.

PETERS, N., PETERS, G. (1966): Das Auge zweier Höhlenformen von *Astyanax mexicanus* (Philippi) (Characinidae, Pisces). *Wilhelm Roux' Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen*; 157: 393-414.

PFEIFFER, W. (1968): Retina und Retinomotorik der Dipnoi und Brachiopterygii. *Zeitschrift für Zellforschung und Mikroskopische Anatomie*; 89: 62-72.

POHL, R. (2014) Okulare Sonographie am Fischauge - Eine Studie zur Sonoanatomie des vorderen Augensegmentes am Beispiel eines Koikarpfens (*Cyprinus carpio*), Diss. Vet. Med., LMU München

POINTER, M.A., CARVALHO, L.S., COWING, J.A., BOWMAKER, J.K., HUNT, D.M. (2007): The visual pigments of a deep-sea teleost, the pearl eye *Scopelarchus analis*. *Journal of Experimental Biology*; 210: 2829-2835.

POPPER, K.R. (1974): *Autobiography of Karl Popper*.

RAUSCHER, F.G., AZMANIS, P., KÖRBER, N., KOCH, C., HÜBEL, J., VETTERLEIN, W., WERNER, B., THIELEBEIN, J., DAWCZYNSKI, J., WIEDEMANN, P. (2013): Optical coherence tomography as a diagnostic tool for retinal pathologies in avian ophthalmology. *Investigative ophthalmology & visual science*; 54: 8259-8269.

RAVELHOFER, K. (1996) Pathologisch-anatomische Untersuchungen an Augen verschiedener Vogelspezies. Diss. Vet. Med., LMU München.

RAVNEET, JOHAL, M.S., SHARMA, M.L. (2009): Three-dimensional study on the effect of organophosphate pesticide 'monocrotophos' on lens of fish and its recovery. *Veterinary Ophthalmology*; 12: 152-157.

RAY, S.F. (1992): Optics for the Biomedical Photographer. In: *Biomedical Photography* Eds VETTER, J.P. Boston, London, Oxford, Singapore, Sidney, Toronto, Wellington: Butterworth-Heinemann; 25-48.

RECKEL, F. (2001) Vergleichende Untersuchungen an der Netzhaut von Atheriniformes (Teleostei). LMU München.

RECKEL, F., MELZER, R.R. (2004): Modifications of the falciform process in the eye of beloniformes (Teleostei: Atherinomorpha): Evolution of a curtain-like septum in the eye. *Journal of Morphology*; 260: 13-20.

REESE, S., KORBEL, R., LIEBICH, H. (2009): Sehorgan (Organum visus). In: König, HE, Korbelt, R. & Liebich, H.-G. Stuttgart: Schattauer GmbH; 370: 229-251.

RIETSCH, P. (2003): Erfolgsfaktor Multimedia-Didaktik–Drei Beispiele. *E-Learning: Einsatzkonzepte und Erfolgsfaktoren des Lernens mit interaktiven Medien*, S: 75-96.

ROBERTS, R.J., ELLIS, A.E. (2001): The Anatomy and Physiology of Teleosts. In: *Fish Pathology* London: W.B. Saunders; 12-54.

SAUNDERS, L.Z., RUBIN, L.F. (1975): *Ophthalmic pathology of animals*. S. Karger New York.

SCHARTAU, J.M., SJÖGREEN, B., GAGNON, Y.L., KRÖGER, R.H.H.

(2009): Optical Plasticity in the Crystalline Lenses of the Cichlid Fish *Aequidens pulcher*. *Current Biology*; 19: 122-126.

SCHLEGEL, T., SCHMID, C.J., SCHUSTER, S. (2006): Archerfish shots are evolutionarily matched to prey adhesion. *Current Biology*; 16: R836-R837.

SCHUBERT, G. (1969): Exophthalmus caudus by thyroid tissue in the choroid layer of the eye in *Coris gaimard*. *Journal of Wildlife Diseases*; 5: 113-113.

SCHUCHARDT, E., KNOCH, M. (1950): Elektronenmikroskopische Befunde am Glaskörper des Auges. *Naturwissenschaften*; 37: 426-426.

SCHULTZE, M. (1867): Ueber Stäbchen und Zapfen der Retina. *Archiv für mikroskopische Anatomie*; 3: 215-247.

SCHWARTZ, E. (1971): Ein septum papillaris im auge von *Pantodon buchholzi* pet. (Teleostei, Osteoglossiformes). *Zeitschrift für Morphologie der Tiere*; 70: 119-127.

SLATTER, D.H. (2008): Surgical Procedures: Eucleation. In: *Slatter's Fundamentals of veterinary ophthalmology*, 4th ed. Eds MAGGS, D.J., MILLER, P.E., OFRI, R. St. Louis: Saunders; 496-530.

SOMIYA, H. (1980): Fishes with eye shine : Functional morphology of guanine type tapetum lucidum. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*; 2: 9-26.

SOMIYA, H. (1982): Yellow lens' eyes of a stomiatoid deep-sea fish, *Malacosteus niger*. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*; 215: 481-489.

STENKAMP, D.L. (2011): The rod photoreceptor lineage of teleost fish.

Progress in retinal and eye research; 30: 395-404.

STOSKOPF, M. (1993): Fish medicine. Philadelphia. WB Saunders Company.

STROBEL, B.K. (2010) Okulare Sonografie des gesunden und erkrankten Auges bei Wildgreifvögeln. LMU München.

STRZEBKOWSKI, R., KLEEBERG, N. (2002): Interaktivität und Präsentation als Komponenten multimedialer Lernanwendungen. Issing, LJ, Klimsa, P.: Information und Lernen mit Multimedia und Internet; 3: 229-245.

STÜPER, J. (1962): Die wissenschaftliche und angewandte Photographie, BD 2: die photographische Kamera. Springer Verlag.

THISSEN, F. (2003): Kompendium Screen-Design: effektiv informieren und kommunizieren mit Multimedia. Springer Verlag.

TODARO, F., BERDAR, A., CAVALIERE, A., CRISEO, G., PERNICE, L. (1983): Gasophthalmus in black sea bream (*Spondylisoma cantharus*) caused by *Sarcinomyces crustaceus* lindner. Mycopathologia; 81: 95-97.

ULRICH, K. (1990): Linsenproteine (Kristalline) In: Vergleichende Biochemie der Tiere. Jena. Verlag Fischer 322-332:

VETTER, J.P. (1992): Gross Specimen Photography. In: Biomedical Photography Eds VETTER, J.P. Boston, London, Oxford, Singapore, Sidney, Toronto, Wellington: Butterworth-Heinemann; 359-386.

VIRCHOW, H. (1882): Beiträge zur vergleichenden Anatomie des Auges. Verlag August Hirschwald 99: 1-99.

WAGNER, H.-J. (1970): Der Bau der Retina und der multiplen optischen Papille bei zwei Synodontis-Arten (Teleostei, Siluroidea). Zeitschrift für Morphologie der Tiere; 68: 69-82.

WAGNER, H.-J., DOUGLAS, R. (1983): Morphologic changes in teleost primary and secondary retinal cells following brief exposure to light. Investigative ophthalmology & visual science; 24: 24-29.

WAGNER, H.-J., DOUGLAS, R.H., FRANK, T.M., ROBERTS, N.W., PARTRIDGE, J.C. (2009): A Novel Vertebrate Eye Using Both Refractive and Reflective Optics. Current Biology; 19: 108-114.

WALL, A.E. (1998): Cataracts in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Ireland, Norway and Scotland from 1995 to 1997. Veterinary Record; 142: 626-631.

WALLS, G. (1963): The vertebrate eye and its adaptive radiation. New York and London: Hafner Publ. Co.

WALLS, G.L. (1942): The vertebrate eye and its adaptive radiation.

WEGENER, A., LASER, H., AHREND, M.H.J., BRECK, O., BJERKÅS, E., GLÖCKNER, C., MIDTLYNG, P.J., BREIPOHL, W. (2001): Light Scattering in Normal and Cataractous Lenses of Farmed Atlantic Salmon (*Salmo salar*): A Slit Lamp and Scheimpflug Photographic Study. Ophthalmic Research; 33: 264-270.

WERTHER, H, H., B, S., K, S., R, K. (2011): Effects of formalin fixation on avian eye. In 11th European AAV Conference, 1st ECZM Meeting. Ed EAAV. Madrid, Spain

WHITAKER, B.R. (2001): Ocular Disorders. In: BSAVA Manual of ornamental fish Eds WILDGOOSE, W.H.: British Small Animal Veterinary

Association Gloucester.

WILCOCK, B., DUKES, T. (1989): The eye. Systematic pathology of fish: A text and atlas of comparative tissue responses in diseases of teleosts, HW Ferguson (ed.). Iowa State University Press, Ames, Iowa: 168-194.

WILDGOOSE, W. (2006): Ornamental fish in veterinary practice. Bulletin-European Association Of Fish Pathologists; 26: 21.

WILLEKE, K. (2008): Morphologische und physiologische Untersuchungen an transparenten und kataraktösen Linsen von Farm-und Wildlachsen. Freie Universität Berlin.

WILLIAMS, C.R., WHITAKER, B.R. (1997): The evaluation and treatment of common ocular disorders in teleosts. Seminars in Avian and Exotic Pet Medicine; 6: 160-169.

WILLIAMS, D.L., BRANCKER, W.M. (2004): Intraocular oxygen tensions in normal and diseased eyes of farmed halibut. The Veterinary Journal; 167: 81-86.

WILLIAMS, D.L., GODDARD, P.J., BRANCKER, W.M. (2007): Ultrasonographic examination of ocular lesions in farmed halibut. The Veterinary Journal; 173: 456-458.

WILLIAMS, D.L. (2012): Ophthalmology of Exotic Pets. John Wiley & Sons.

WITTENBERG, J.B., WITTENBERG, B.A. (1974): The choroid rete mirabile of the fish eye. I. Oxygen secretion and structure: comparison with the swimbladder rete mirabile. The Biological Bulletin; 146: 116-136.

WUNDER, W. (1925): Physiologische und vergleichend-anatomische

Untersuchungen an der Knochenfischnetzhaut. Zeitschrift für vergleichende Physiologie; 3: 1-61.

WUNDER, W. (1926): Über den Bau der Netzhaut bei Süßwasserfischen, die in grosser Tiefe leben (Coregonen, Tiefseesaibling). Zeitschrift für vergleichende Physiologie; 4: 22-36.

WUNDER, W. (1936): Physiologie der Süßwasserfische Mitteleuropas. In: Handbuch der Binnenfischerei Mitteleuropas., Stuttgart. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (E. Nägele) GmbH.

YOKOTE, M. (1974): Spontaneous diabetes in carp (*Cyprinus carpio*). Spec. Publ. Japan sea fish. Lab: 67-74.

IX. ANHANG

1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Knochenfischauges (Hargis Jr, 1991); (mit freundlicher Genehmigung von Elsevier Verlag)	5
Abbildung 2: Innere Struktur des Auges eines atlantischen Lachses (Koppang & Bjerkås, 2006) gestrichelte Linie: optische Achse, SC: Skleralknorpel, Li: Limbus, C: Kornea, CR: Gefäße der Choroidea, C: Choroidea, IR: Iris, R: Retina, L: Linse, AC: hintere Augenkammer, V: vordere Ziliarspalte, M: Augenmuskulatur, N: Sehnerv, VB: Glaskörper (mit freundlicher Genehmigung von Scotian Press)	6
Abbildung 3: Schematische Darstellung retrobulbärer Strukturen des Auges einer Forelle (Stoskopf, 1993); (mit freundlicher Genehmigung von Michael K. Stoskopf)	8
Abbildung 4: Mikraufnahme der Retina eines Bunkers (Nasisse et al., 1989); (mit freundlicher Genehmigung von John Wiley and Sons).....	13
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Linse eines Knochenfischs (Hargis Jr, 1991) (mit freundlicher Genehmigung von Elsevier Verlag)....	14
Abbildung 6: Fundus eines Koi (Cyprinus carpio), OD, 29 cm, 3,5 Jahre, Sehnervenpapille (Papilla nervi optici) mit Austritt der Glaskörpergefäße (roter Pfeil), Aufzweigungen und Kapillarnetz (grüne Pfeile); (Aufnahme: R. Korbel).....	18
Abbildung 7: Wichtige optische Begriffe der Abbildung (Bengel, 1984) (mit freundlicher Genehmigung von Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin).....	26
Abbildung 8: Berechnungsmöglichkeiten des Abbildungsmaßstabes (Bengel, 1984) (mit freundlicher Genehmigung von Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin)	28
Abbildung 9: Geeignetes Besteck zur Eukleation und Präparation: 1. chirurgische Pinzette, 2. Anatomische Pinzette (gewinkelt), 3. Anatomische Pinzette (gezahnt), 4. Anatomische Pinzette (fein), 5. Präparierschere (nach Metzenbaum), 6. Präparierschere (Aufnahme: A. Reimann).....	42
Abbildung 10: Parazentese mit Hilfe einer Insulinspritze, Inzision im Bereich des Limbus, Fixation des Bulbus mittels einer Pinzette.....	43

Abbildung 11: Mikrotommesser zur Kalottierung (vergrößerte Abbildung); (Aufnahme: A. Reimann).....	44
Abbildung 12: Bulbus eines Koi (<i>Cyprinus carpio</i>), OS, rote Linie: horizontale Schnittebene, grüner Pfeil: Pigmentierung dorsaler Bereich der Sklera, D: dorsal, V: ventral	45
Abbildung 13: Kameraaufbau, C: Kamera, O: Makro-Objektiv, B: Blitz mit Drahtauslöser, Bs: Servoblitz, S: Makrostativ mit Blitzauslegern, M: Molton, H: Holzstab, Halterung für Objekt, roter Pfeil: Position des Objekts (Aufnahme: A. Reimann).....	49
Abbildung 14: Umsetzung des Copyrightschutzes der Bilddateien für das Lernprogramm, roter Pfeil: diagonales Wasserzeichen (transparent)	52
Abbildung 15: Programmoberfläche von Freeway Express, roter Pfeil: Ansicht des Layouts, grüner Pfeil: Seitenstruktur	53
Abbildung 16: Programmoberfläche von Showcase, roter Pfeil: Zugriff auf Ressourcen, grüner Pfeil: Konfiguration der Bildergalerien	54
Abbildung 17: Atlantischer Lachs (<i>Salmo salar</i> , L. 1758), OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 14 Tage, L: Linse (luxiert), I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blaue Pfeile: Corpus chorioideale, gelber Pfeil: Processus falciformis	59
Abbildung 18: Atlantischer Lachs (<i>Salmo salar</i> , L. 1758), OD, Makrofotografie, Fixationsdauer 14 Tage, grüner Pfeil: massives retrobulbäres Fettgewebe, gelber Pfeil: Linsenkapsel, L: Linse, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blaue Pfeile: Corpus chorioideale	59
Abbildung 19: Koi (<i>Cyprinus carpio</i> , L. 1758), OD, Makrofotografie, 1. Bulbushemisphäre, Fixationsdauer 12 Monate, L: Linse (luxiert), I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus chorioideale	60
Abbildung 20: Koi (<i>Cyprinus carpio</i> , L. 1758), OD, Makrofotografie, 2. Bulbushemisphäre, Fixationsdauer 12 Monate, I: Iris, C: Kornea, R: Retina (Netzhautablösung), S: Sklera, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus chorioideale.....	60
Abbildung 21: Koi (<i>Cyprinus carpio</i> , L. 1758), OS, Makrofotografie, Fixationsdauer ca. 7 Tage, L: Linse (luxiert), I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, grüner Pfeil: massives	

retrobulbäres Fettgewebe	61
Abbildung 22: Regenbogenforelle (<i>Oncorhynchus mykiss</i> , W. 1792), OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 6 Monate, grüner Pfeil: Gelbfärbung des Fettgewebes, gelber Pfeil: Processus falciformis, L: Linse (luxiert), I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus choroidealis	61
Abbildung 23: Renke (<i>Coregonus</i> , L. 1758), OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 3 Monate, L: Linse (luxiert), I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea.....	62
Abbildung 24: Saibling (<i>Salvelinus</i> , R. 1836), OD, Makrofotografie, horizontale Schnittebene im 45°-Winkel, Fixationsdauer 1 Monat, L: Linse, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, gelber Pfeil: Processus falciformis	62
Abbildung 25: Bachforelle (<i>Salmo trutta fario</i> , L. 1758), OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 3 Monate, L: Linse, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus choroidealis	63
Abbildung 26: Saibling (<i>Salvelinus</i> , R. 1836), OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 6 Monate, grüner Pfeil: Gelbfärbung des Fettgewebes, gelber Pfeil: Processus falciformis, L: Linse, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blaue Pfeile: Corpus choroidealis	63
Abbildung 27: Regenbogenforelle (<i>Oncorhynchus mykiss</i> , W. 1792), OD, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, gelber Pfeil: Processus falciformis, L: Linse, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus choroidealis	64
Abbildung 28: Regenbogenforelle (<i>Oncorhynchus mykiss</i> , W. 1792), OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 1 Monat, gelber Pfeil: Processus falciformis, L: Linse, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea.....	64
Abbildung 29: Bachforelle (<i>Salmo trutta fario</i> , L. 1758), OD, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, gelber Pfeil: P. falciformis, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: C. choroidalis, grüner Pfeil: Linsenkapsel	65
Abbildung 30: Regenbogenforelle (<i>Oncorhynchus mykiss</i> , W. 1792), OS,	

- Makrofotografie, Fixationsdauer 14 Tage, C: Kornea, I: Iris, S: Sklera, Ch: Choroidea, N: Nervus opticus, gelber Pfeil: Processus falciformis, blauer Pfeil: C. choroidalis, grüner Pfeil: Linsenkapsel 65
- Abbildung 31: Saibling (*Salvelinus*, R. 1836), OD, Makrofotografie, Fixationsdauer 3 Monate, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, N: Nervus opticus, Ch: Choroidea, gelber Pfeil: Processus falciformis, blaue Pfeile: Corpus choroidalis, grüner Pfeil: Linsenkapsel 66
- Abbildung 32: Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Makrofotografie, des Fundus, Fixationsdauer 1 Monat, R: Retina, S: Sklera, Ch: Choroidea, gelber Pfeil: Processus falciformis 66
- Abbildung 33: Koi (*Cyprinus carpio*, L. 1758), OD, Makrofotografie des Fundus, Fixationsdauer ca. 7 Tage, R: Retina (massive Netzhautablösung), S: Sklera, Ch: Choroidea, roter Pfeil: Eintritt des Sehnervs an der Papilla nervi optici 67
- Abbildung 34: Huchen (*Hucho hucho*, L. 1758), OD, Makrofotografie 1. Bulbushemisphäre, Fixationsdauer 1 Monat, L: Linse (geringe Luxation), I: Iris, C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, N: Nervus opticus, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus choroidalis 67
- Abbildung 35: Atlantischer Lachs (*Salmo salar*, L. 1758), OD, Makrofotografie 1. Bulbushemisphäre, Fixationsdauer 6 Monate, L: Linse (luxiert, massive Trübung), C: Kornea, I: Iris, R: Retina (Netzhautablösung), N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus choroidalis 68
- Abbildung 36: Huchen (*Hucho hucho*, L. 1758), OD, Makrofotografie 2. Bulbushemisphäre, Fixationsdauer 1 Monat, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, N: Nervus opticus, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus choroidalis, gelber Pfeil: Processus falciformis 68
- Abbildung 37: Atlantischer Lachs (*Salmo salar*, L. 1758), OD, Makrofotografie 2. Bulbushemisphäre, Fixationsdauer 6 Monate, C: Kornea, I: Iris, R: Retina (Netzhautablösung), N: Nervus opticus, S: Sklera, Ch: Choroidea, gelber Pfeil: Processus falciformis, blauer Pfeil: Corpus choroidalis 69
- Abbildung 38: Saibling (*Salvelinus*, R. 1836), OS, horizontale Schnittebene im 45°-Winkel, Fixationsdauer 14 Tage, I: Rückseite der Iris, L: Linse (nicht luxiert), C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, Ch: Choroidea,

blauer Pfeil: Corpus chorioidealis	69
Abbildung 39: Saibling (<i>Salvelinus</i> , R. 1836), OS, Fixationsdauer 14 Tage, I: Iris, L: Linse (luxiert), C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, N: Nervus opticus, Ch: Choroidea, blauer Pfeil: Corpus chorioidealis	70
Abbildung 40: Regenbogenforelle (<i>Oncorhynchus mykiss</i> , W. 1792), 1. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, OD, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, C: Kornea, L: Linse (luxiert), I: Iris, S: Sklera, Ch: Choroidea, R: Retina.....	71
Abbildung 41: Regenbogenforelle (<i>Oncorhynchus mykiss</i> , W. 1792), 2. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, OD, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, C: Kornea, L: Linse (luxiert), I: Iris, S: Sklera, Ch: Choroidea, R: Retina, roter Pfeil: Linsenkapsel	71
Abbildung 42: Bachforelle (<i>Salmo trutta fario</i> , L. 1758), OS, 1. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, L: Linse (luxiert), I: Iris, R: Retina (Netzhautablösung), C: Kornea, S: Sklera, N: Nervus opticus, Ch: Choroidea.....	72
Abbildung 43: Bachforelle (<i>Salmo trutta fario</i> , L. 1758), OS, 2. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, Einblutungen, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, C: Kornea, Retina (Netzhautablösung), Ch: Choroidea, S: Sklera, N: Nervus opticus.....	72
Abbildung 44: Bachforelle (<i>Salmo trutta fario</i> , L. 1758), OD, Bulbus kollabiert / Vernarbung, 1. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, C: Kornea, S: Sklera, N: Nervus opticus.....	73
Abbildung 45: Bachforelle (<i>Salmo trutta fario</i> , L. 1758), OD, Bulbus kollabiert / Vernarbung, 2. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, C: Kornea, S: Sklera, N: Nervus opticus.....	73
Abbildung 46: Bachforelle (<i>Salmo trutta fario</i> , L. 1758), Bulbus kollabiert / Vernarbung, 1. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, S: Sklera, N: Nervus opticus	74
Abbildung 47: Bachforelle (<i>Salmo trutta fario</i> , L. 1758), Bulbus kollabiert / Vernarbung, 2. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, OS, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, S: Sklera.....	74

Abbildung 48: Saibling (<i>Salvelinus</i> , R. 1836), OD, Fixationsdauer 7 Tage, 1. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, I: Iris, L: Linse (luxiert), C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, Ch: Choroidea, gelber Pfeil: Processus falciformis	75
Abbildung 49: Saibling (<i>Salvelinus</i> , R. 1836), OD, Fixationsdauer 7 Tage, 2. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, Ch: Choroidea	75
Abbildung 50: Bachforelle (<i>Salmo trutta fario</i> , L. 1758), 1. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, OD, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, C: Kornea, L: Linse, I: Iris, R: Retina, Ch: Choroidea, S: Sklera, N: Nervus opticus.....	76
Abbildung 51: Bachforelle (<i>Salmo trutta fario</i> , L. 1758), 2. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, OD, Makrofotografie, Fixationsdauer 7 Tage, C: Kornea, L: Linse, I: Iris, R: Retina, Ch: Choroidea, S: Sklera, N: Nervus opticus.....	76
Abbildung 52: Regenbogenforelle (<i>Oncorhynchus mykiss</i> , W. 1792), OD, Makrofotografie, 1. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, Fixationsdauer 1 Monat, L: Linse (luxiert), C: Kornea, I: Iris, R: Retina, Ch: Choroidea, S: Sklera	77
Abbildung 53: Regenbogenforelle (<i>Oncorhynchus mykiss</i> , W. 1792), OD, Makrofotografie, 2. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, Fixationsdauer 1 Monat, C: Kornea, I: Iris, R: Retina, Ch: Choroidea, S: Sklera	77
Abbildung 54: Saibling (<i>Salvelinus</i> , R. 1836), OS, Fixationsdauer 7 Tage, 1. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, I: Iris, L: Linse (luxiert), C: Kornea, R: Retina (Netzhautablösung), S: Sklera, Ch: Choroidea	78
Abbildung 55: Saibling (<i>Salvelinus</i> , R. 1836), OS, Fixationsdauer 7 Tage, 2. Bulbushemisphäre, traumatische Ätiologie, C: Kornea, R: Retina (Netzhautablösung), S: Sklera, Ch: Choroidea	78
Abbildung 56: Bachforelle (<i>Salmo trutta fario</i> , L. 1758), OS, Fixationsdauer 1 Monat, traumatische Ätiologie, roter Pfeil: Einblutungen, L: Linse, C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, Ch: Choroidea	79
Abbildung 57: Saibling (<i>Salvelinus</i> , R. 1836), OS, Fixationsdauer 1 Monat, traumatische Ätiologie, Fibrin, L: Linse, I: Iris, C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, Ch: Choroidea.....	79

- Abbildung 58: Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Fixationsdauer 1 Monat, traumatische Ätiologie, roter Pfeil: Fibrin, L: Linse, I: Iris, S: Sklera, C: Kornea, R: Retina, S: Sklera, Ch: Choroidea ..80
- Abbildung 59: Atlantischer Lachs (*Salmo salar*, L. 1758), OS, Fixationsdauer 3 Monate, rote Pfeile: Reflexionen der Blitzbeleuchtung an Linse und Objektrand 81
- Abbildung 60: Saibling (*Salvelinus*, R. 1836), OD, roter Pfeil: vordere Augenkammer eingesunken 81
- Abbildung 61: Saibling (*Salvelinus*, R. 1836), OD, rote Pfeile: Lipidtröpfchen, A: Bulbus vor Spülen mit Wasser, B: Bulbus nach Spülen mit Wasser 82
- Abbildung 62: Atlantischer Lachs (*Salmo salar*, L. 1758), OD, Fixationsdauer 1 Monat, rote Pfeile: Gewebereste der Choroidea, blauer Pfeil: Präparatschrumpfung, L: Lens, C: Kornea, I: Iris, S: Sklera, N: Nervus opticus..... 82
- Abbildung 63: Histologisches Schnittpräparat 8 µm, Makrofotografie, HE-Färbung, Auge einer Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Fixationsdauer 3 Tage, A: vordere Augenkammer, B: hintere Augenkammer, C: Kornea, I: Iris, S: Sklera, L: Linse, R: Retina, N: Nervus opticus, Ch: Choroidea, roter Pfeil: Ablösung der Netzhaut (Ablatio retinae)..... 84
- Abbildung 64: Histologisches Schnittpräparat 8 µm, 2,5-fache Vergrößerung, HE-Färbung, Auge einer Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Fixationsdauer 3 Tage, L: Linse, R: Retina, N: Nervus opticus, Ch: Choroidea 84
- Abbildung 65: Histologisches Schnittpräparat 8 µm, 10,0-fache Vergrößerung, HE-Färbung, Auge einer Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Fixationsdauer 3 Tage, mikroskopische Darstellung retinaler Strukturen..... 85
- Abbildung 66: Histologisches Schnittpräparat 8 µm, 10,0-fache Vergrößerung, HE-Färbung, Auge einer Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*, W. 1792), OS, Fixationsdauer 3 Tage, mikroskopische Darstellung des Kammerwinkels, vordere und hintere Augenkammer, C: Kornea, I: Iris..... 85
- Abbildung 67: Histologisches Schnittpräparat 8 µm, 2,5-fache

Vergrößerung, HE-Färbung, Auge einer Regenbogenforelle (<i>Oncorhynchus mykiss</i> , W. 1792), OS, Fixationsdauer 3 Tage, mikroskopische Darstellung der Linse, radiäre Struktur, rote Pfeile: Pupillenöffnung (Irisränder).....	86
Abbildung 68: Histologisches Schnittpräparat 8 µm, 10,0-fache Vergrößerung, HE-Färbung, Auge einer Regenbogenforelle (<i>Oncorhynchus mykiss</i> , W. 1792), OS, Fixationsdauer 3 Tage, mikroskopische Darstellung der Kornea, roter Pfeil: Skleralknorpel	86
Abbildung 69: Histologisches Schnittpräparat 8 µm, 10,0-fache Vergrößerung, HE-Färbung, Auge einer Regenbogenforelle (<i>Oncorhynchus mykiss</i> , W. 1792), OS, Fixationsdauer 3 Tage, mikroskopische Darstellung der Choroidea, roter Pfeil: Blutgefäß	87
Abbildung 70: Navigationsmenü des Lernprogramms	88
Abbildung 71: Browserdarstellung der Startseite des Lernprogramms.....	89
Abbildung 72: Schrittweise Darstellung der Eukleation eines Fischauges	91
Abbildung 73: Browserdarstellung der Bildergalerien mit Miniaturansichten (Thumbnails)	92
Abbildung 74: Browserdarstellung der Bildergalerie in vergrößerter Ansicht, roter Pfeil: Steuerelemente der Navigation durch die Bildergalerie, grüner Pfeil: Beschreibung des dargestellten Präparates.....	92

2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auflistung untersuchter Fischaugen (März 2012 bis Mai 2014)	40
---	----

3. Copyrightgeschützte Inhalte

Die dargestellte Abbildung aus dem Lernprogramm beinhaltet urheberrechtlich geschütztes Bildmaterial. Die Titelgrafik ist eine veränderte Version des Bildes mit dem Titel „Chondrostoma nasus (aka)“ von André Karwath aka Aka - Eigenes Werk. Lizenziert unter Creative Commons Attribution-Share Alike 2.5 über Wikimedia Commons - [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chondrostoma_nasus_\(aka\).jpg#mediaviewer/Datei:Chondrostoma_nasus_\(aka\).jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chondrostoma_nasus_(aka).jpg#mediaviewer/Datei:Chondrostoma_nasus_(aka).jpg).

4. Danksagung

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Dr. Rüdiger Korbelt möchte ich sehr herzlich für die Überlassung dieses besonderen Themas und seiner großen Hilfe während der Erstellung dieser Arbeit danken.

Danken möchte ich meinen Eltern Gabriele und Günter Reimann, die mir mein Studium und viele andere großartige im Leben ermöglicht haben. Für ihr Verständnis und all die Liebe in jeder, noch so schwierigen Lebenslage und ihren verständnisvollen Umgang mit mir. Meinem Bruder Martin Reimann danke ich für die große Inspiration und Motivation, die mir immer wieder Ansporn war.

Mein großer Dank gilt ganz besonders den Mitarbeitern der Fischzucht Aumühle GbR und der Familie Dechant in Starnberg, ohne deren hervorragende Unterstützung und Versorgung mit Untersuchungsmaterial, ich diese Arbeit nicht hätte durchführen können.

Herrn Dr. Zhongmin Li möchte ich ganz herzlich für die fachliche Hilfe zur Erstellung der histologischen Präparate und meinem Arbeitgeber für die Nutzung der technischen Anlagen danken.

Den Mitarbeitern der Klinik für Vögel, Reptilien, Amphibien und Zierfische danke ich für die stets freundliche und angenehme Hilfe. Frau Dr. Katrin Stein und Frau Dr. Kristina Dorobek gilt an dieser Stelle mein besonderer Dank für die wertvollen Ratschläge und die engagierte Betreuung. Frau Dr. Petra Brandstetter und Frau Dr. Rahnild Pohl möchte ich für die vielen Anregungen danken, die zum Entstehen dieser Arbeit wesentlich beigetragen haben.

Nicht zuletzt sei allen meinen guten Freunden gedankt, die mir Geduld und Augenblicke der Ablenkung geschenkt haben.

Ganz besonders möchte ich meinem Freund Michael danken, mit dem ich all die schönen Momente im Leben teilen darf.