

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

**Die ophthalmologische Untersuchung
des hinteren Augensegmentes beim Kleinsäuger**

Ein Online-Tutorial

von Kirstin Vollmer

aus Offenburg

München 2024

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

Lehrstuhl für aviäre Medizin und Chirurgie

Arbeit angefertigt unter Leitung von:

Univ.-Prof. Dr. Rüdiger T. Korb

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

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Reinhard K. Straubinger, Ph.D.

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

Korreferent: Univ.-Prof. Dr. Susanne K. Lauer

Tag der Promotion: 6. Juli 2024

Meiner lieben Familie

insbesondere meinem Vater gewidmet

INHALTSVERZEICHNIS

I.	EINLEITUNG	1
II.	LITERATURÜBERSICHT	5
1.	Anatomie des Kleinsäugetauges	5
1.1.	Augenhöhle – Orbita	5
1.2.	Augapfel – Bulbus oculi	7
1.2.1.	Äußere Augenhaut – Tunica fibrosa bulbi.....	8
1.2.1.1.	Lederhaut – Sklera	9
1.2.1.2.	Hornhaut – Kornea.....	9
1.2.2.	Mittlere Augenhaut – Tunica vasculosa bulbi – Uvea	11
1.2.2.1.	Aderhaut – Choroidea	11
1.2.2.2.	Strahlenkörper/Ziliarkörper – Corpus ciliare	11
1.2.2.3.	Regenbogenhaut – Iris	12
1.2.3.	Innere Augenhaut – Tunica interna bulbi.....	13
1.2.3.1.	Netzhaut – Retina.....	13
1.2.4.	Augeninnere	15
1.2.4.1.	Vordere und hintere Augenkammer – Camerae bulbi	16
1.2.4.2.	Linse – Lens	16
1.2.4.3.	Glaskörper – Corpus vitreum	17
1.3.	Sehnerv - Nervus opticus	18
1.4.	Adnexale Strukturen – Organa oculi accessoria	19
1.4.1.	Augenlider – Palpebrae	19
1.4.2.	Bindehaut – Tunica conjunctiva und Nickhaut – Palpebra tertia	20
1.4.3.	Tränenapparat - Apparatus lacrimalis	21
1.4.3.1.	Tränendrüsen – Gl. lacrimalis und Gll. lacrimales accessoriae	21
1.4.3.2.	Ableitende Tränenwege	22
1.5.	Muskeln des Augapfels - Musculi bulbi	23
2.	Anatomische Augenpräparate	24
2.1.	Enukleation, Fixation und Präparation	24
3.	Ophthalmologische Untersuchung des hinteren Augensegmentes	25
3.1.	Zwangmaßnahmen, Medikamente	29
3.2.	Untersuchungsinstrumente	31
3.3.	Untersuchung des Glaskörpers (mit einer Punktlichtquelle)	32

3.3.1. Tierartliche Besonderheiten beim Kleinsäuger (Glaskörper)	35
3.4. Untersuchung des Augenhintergrundes (mit dem Ophthalmoskop) ..36	
3.4.1. Direkte Ophthalmoskopie	38
3.4.2. Indirekte Ophthalmoskopie.....	40
3.4.3. Tierartliche Besonderheiten beim Kleinsäuger (Augenhintergrund)	42
3.4.3.1. Kaninchen.....	44
3.4.3.2. Meerschweinchen.....	46
3.4.3.3. Chinchilla und Degu	47
3.4.3.4. Kleinnager wie Mäuse, Ratten, Rennmäuse, Hamster und Zwerghamster.....	48
3.4.3.5. Frettchen	49
4. Fotografische Dokumentation	51
4.1. Anatomische Augenpräparate.....	53
4.2. Ophthalmologischer Untersuchungsgang.....	54
4.3. Fundusaufnahmen	54
5. E-Learning	55
5.1. Didaktische Konzepterstellung.....	55
5.2. Gestaltung von multimedialem Lernmaterial.....	57
5.3. E-Learning-Angebote an der Tierärztlichen Fakultät der LMU	60
6. Tiermedizinische Ausbildung unter Tierschutzgesichtspunkten.....	61
III. MATERIAL UND METHODEN	63
1. Anfertigung eines Storyboards.....	63
2. Anfertigung anatomischer Augenpräparate	65
3. Anfertigung des Bild- und Videomaterials.....	66
3.1. Anatomische Augenpräparate.....	66
3.2. Ophthalmologischer Untersuchungsgang.....	69
3.2.1. Bildmaterial.....	69
3.2.2. Videomaterial.....	70
4. Erstellung des Online-Tutorials	71
IV. ERGEBNISSE	75
1. Anatomische Augenpräparate.....	75

2.	Bild- und Videomaterial	77
2.1.	Dokumentation der anatomischen Augenpräparate.....	77
2.2.	Dokumentation des ophthalmologischen Untersuchungsganges	83
3.	Online-Tutorial	87
V.	DISKUSSION	95
1.	Anfertigung anatomischer Augenpräparate	95
2.	Makroaufnahmen der Augenpräparate – Focus Stacking	96
3.	Praktische tierärztliche Ausbildung unter Tierschutzgesichtspunkten..	99
4.	Interaktives, multimediales Lernprogramm.....	100
VI.	ZUSAMMENFASSUNG	109
VII.	SUMMARY	111
VIII.	LITERATURVERZEICHNIS	113
IX.	ANHANG	131
1.	Abbildungsverzeichnis	131
2.	Tabellenverzeichnis	131
X.	DANKSAGUNG.....	133

Bedienungshinweise

Das Online-Tutorial „Die ophthalmologische Untersuchung des hinteren Augensegmentes beim Kleinsäuger“ ist auf dem beigefügten USB-Stick abrufbar. Die Startseite des Lernprogramms lässt sich über die Datei **Index.html** aufrufen.

Die Suchfunktion über das Suchfeld in der Navigationsleiste ist erst nach Veröffentlichung des Tutorials auf der digitalen Lernplattform der Klinik für Vögel, Kleinsäuger, Reptilien und Zierfische der Tierärztlichen Fakultät der LMU München in der Online-Version aktiviert und nutzbar.

Zur vereinfachten Lesbarkeit wird in diesem Online-Tutorial sowie der Dissertationsschrift das generische Maskulinum verwendet. Sofern nicht anders angegeben, beziehen sich verwendete Personenbezeichnungen in dieser Arbeit auf alle Geschlechter.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AM	Abbildungsmaßstab
BfR	Bundesinstitut für Risikobewertung
Bf3R	Deutsches Zentrum zum Schutz von Versuchstieren
CSS	Cascading Style Sheets
DPI	Dots per inch - Maßeinheit für die Auflösung einer Bilddatei
E-Learning	Electronic Learning
Gl.	Glandula
Gll.	Glandulae
hgrd.	hochgradig
HTML	Hypertext Markup Language
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität München
M.	Musculus
MC	Multiple-Choice
Mm.	Musculi
Moodle	Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment
N.	Nervus
Nn.	Nervi
OD	Oculus dexter / rechtes Auge
OS	Oculus sinister / linkes Auge
RPE	Retinales Pigmentepithel
sog.	sogenannten
TAppV	Verordnung zur Approbation von Tierärztinnen und Tierärzten
WPF	Wahlpflichtfächer

I. EINLEITUNG

Online-Lernprogramme sind in der heutigen Zeit aufgrund neuer digitaler Technologien wie dem Internet und darauf aufbauenden Möglichkeiten in der Lehre unentbehrlich geworden. So zeigte unlängst die COVID-19-Pandemie zu Beginn des Sommersemesters 2020, dass zeit- und ortsunabhängiges Lernen immer mehr an Bedeutung gewinnt, ein einfaches Überführen von Inhalten der Präsenzlehre in die digitale Lehre ohne Neugestaltung jedoch nicht zielführend ist (Marchwacka, Kugler, Schaal & Tolks, 2023). TENHAVEN et al. (2013) stellten fest, dass sowohl Tiermedizinstudenten als auch die Tierärzteschaft das Internet täglich nutzen, das ordinäre Lernen und Fortbilden anhand von E-Learning Konzepten essenziell geworden ist und auch mit steigender Tendenz gefordert wird (Ehlers et al., 2008). Dies bekräftigten auch 94 % der insgesamt 514 Tiermedizinstudenten, die 2020 an einer hierzu fakultätsintern durchgeführten Umfrage der LMU teilnahmen (Friedrich, 2020). Fachspezifische Web 2.0 Tools sollten wie bereits 2007 als unerlässlich für Medizinstudenten angesehen (Sandars & Schroter, 2007), auch effektiv bei Veterinärmedizinern eingesetzt und weiterentwickelt werden.

Deren Einsatz bietet sich v. a. auch für Spezialbereiche wie der „Exotenmedizin“ (den sog. „Minor species“) an, die aufgrund des zeitlich eng getakteten Lehrplans der Universitäten in der Präsenzlehre wenig Eingang finden können. Speziell in der Augenheilkunde mangelte es bislang an interaktiven Online-Lernmedien, obgleich eine zur ophthalmologischen Fortbildung entwickelte Anwenderapp mit Darstellung praxisnaher Fallbeispiele in Hinblick auf viele Aspekte bereits positiv evaluiert wurde (Grabowski et al., 2020). Die Ergebnisse der von 2015 - 2017 durchgeführten EXOPET-Studie zeigen auf, dass neben Kaninchen und Meerschweinchen mittlerweile auch Frettchen, Degus, Mongolische Rennmäuse, Chinchillas, Goldhamster sowie Farbmäuse und -ratten zu den in Deutschland am häufigsten gehaltenen Kleinsäugerarten zählen (Wöhr, Heidrich & Erhard, 2022). Laut Dr. I. Schwarze wurden im Jahr 2023 in einer Kleintierpraxis in einer deutschen Kleinstadt pro Tag im Durchschnitt 18 Kleinsäugerpatienten vorgestellt, wovon 52 % Kaninchen, 31% Meerschweinchen, 8 % Ratten, 3 % Degus, 3% Chinchillas, 2 % Hamster und 1 % sonstige Arten wie Frettchen, Hörnchen und Mäuse waren (Schwarze I., Persönliche Mitteilung 2024: Marktanalyse zur Einschätzung der aktuellen Kleinsäuger-Situation). Dabei wird der Tierarzt auch immer wieder mit Augenveränderungen konfrontiert (Keeble & Meredith, 2009; Van der

Woerdt, 2021), insbesondere beim am häufigsten in Deutschland gehaltenen Kleinsäuger, dem Kaninchen (Eckert, Ferkau & Thöle, 2022; Wöhr et al., 2022). Besitzer von Kleinnagern sind mittlerweile auch immer häufiger dazu bereit, kostenintensive Diagnostik und Therapien für ihre Schützlinge in Anspruch zu nehmen (Ewringmann & Glöckner, 2014). Denn das Auge als Sinnesorgan deutet bei pathologischer Veränderung aufgrund verschiedenster anatomischer und physiologischer Gegebenheiten vielfach auf Erkrankungen anderer Organsysteme bzw. auf systemische Erkrankungen hin (Ewringmann, 2016). Um Befunde daher einordnen und Fehlinterpretationen vorbeugen zu können, sind Grundkenntnisse über physiologische bzw. der Tierart entsprechende Befunde am Auge und somit von anatomischen Besonderheiten bei den als Heimtier gehaltenen Kleinsäugetern umso wichtiger.

Die Augenheilkunde bei „Minor species“ mit Vögeln, Reptilien und Fischen ist an der Klinik für Vögel, Kleinsäuger, Reptilien und Zierfische der Tierärztlichen Fakultät der LMU München bereits seit weit mehr als 30 Jahren Gegenstand verschiedenster Grundlagen- und Spezialisierungsanwendungen vom allgemeinen ophthalmologischen Untersuchungsgang, über Untersuchungen zur visuellen Perzeption u. a. beim Wirtschaftsgeflügel bis hin zu hochspezialisierten Untersuchungstechniken wie der Optischen Kohärenztomographie (Korbel, 1994a, 2006, 2012; Korbel et al., 2013; Korbel & Gropp, 1999; Korbel et al., 1995; Korbel & Stein, 2013; Schulze, 2016). Innerhalb der Klinik wurden für die graduale und postgraduale Ausbildung, z. T. in Zusammenarbeit mit der virtuellen Hochschule Bayern bereits eine Reihe von E-Learning-Angeboten konzipiert. Da auch der Kleinsäugerbereich mit der „virtuellen Heimtierklinik“, einer Arbeit zum allgemeinen Untersuchungsgang (Imhof, 2020) repräsentiert ist, sollen ergänzend interaktive Lernprogramme speziell im Fachgebiet der Ophthalmologie entwickelt werden, in welchen von ZILLIG (2024) das vordere Augensegment und in der vorliegenden Arbeit die Anatomie und ophthalmologische Untersuchung des hinteren Augensegmentes multimedial dargestellt werden. Ziel ist es, den bereits etablierten aktuellen Wissensstand der Kleinsäuger-Ophthalmologie, der sich aus bereits in der Vogel-, Reptilien- und Fischophthalmoskopie bewährten Techniken weiterentwickelt hat (Korbel, 1994a, 1996b), zusammenzufassen und in einer dem aktuellen Zeitalter entsprechenden digitalen Form eines online verfügbaren Tutorials zur Anwendung in der Lehre aufzubereiten, um Studierenden und ophthalmologisch interessierten Tierärzten den Wissenserwerb und -zugang zu erleichtern. Ein besonderes Augenmerk wird hierbei auf die Visualisierung der spezifischen anatomischen Besonderheiten des Sehorgans

beim Kaninchen gelegt. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher ein didaktisches Konzept erarbeitet werden, nach welchem zur Detaildarstellung anatomischer Strukturen Makroaufnahmen von Augenpräparaten des Kaninchenauges sowie auch Bild- und Videoaufnahmen zur Demonstration des vollständigen Untersuchungsganges angefertigt werden. Das abgelichtete Material soll anschließend interaktiv aufbereitet und in einer nach evidenzbasierten Gestaltungsgrundsätzen konzipierten multimedialen Online-Lernplattform zur Veranschaulichung präsentiert werden. Durch eine selbstständige Erarbeitung theoretischer Kenntnisse vor der praktischen Anwendung am Tier wird durch eine daraus resultierende geringere Belastung auch dem Schutz des Einzeltieres Rechnung getragen. Der Einsatz lebender Tiere zu Ausbildungszwecken kann hierdurch verringert werden.

II. LITERATURÜBERSICHT

1. Anatomie des Kleinsäugetrauges

In den folgenden Abschnitten werden die anatomischen Gegebenheiten des Säugetierauges sowie die physiologischen anatomischen Besonderheiten verschiedener Kleinsäugetierarten (Kaninchen, Meerschweinchen, Degus, Chinchillas, Mäuse, Ratten, Rennmäuse/Gerbils, Hamster und Frettchen) dargestellt.

Zu den Kleinsäugetieren zählen die Hasenartigen (*Lagomorpha*) wie Hasen und Kaninchen, die Nagetiere (*Rodentia*) und auch das Frettchen (*Mustela putorius furo*). Das Meerschweinchen (*Cavia aperea porcellus*), der Degu (*Octodon degus*) und das Chinchilla stammen ursprünglich aus Südamerika oder dem Norden Chiles und gehören innerhalb der Ordnung der Nagetiere den eng miteinander verwandten Hystricomorpha oder Caviomorpha (Meerschweinchenartige) an (Ewringmann & Glöckner, 2012). Auch Kleinnagerarten wie die Mäuse (*Mus musculus*), Ratten (*Rattus norvegicus f. domestica*), Rennmäuse/Gerbils (*Meriones*), Hamster (*Mesocricetus*) und Zwerghamster (*Phodopus*) zählen innerhalb der Unterordnung der Mäuseverwandten (*Myomorpha*) zu den Nagetieren (Ewringmann & Glöckner, 2014). Das Frettchen (*Mustela putorius furo*) stammt als Carnivore am ehesten vom europäischen Iltis (*Mustela putorius*) ab und zählt somit zur Familie der Marder (Mustelidae). Diese wurden bereits sehr früh zur Kaninchenjagd sowie als Mäuse- und Rattenfänger eingesetzt, erlangten in den letzten Jahren jedoch auch immer mehr Bedeutung als beliebtes Heimtier (Fehr, Ewringmann & Warschau, 2015).

1.1. Augenhöhle – Orbita

Die Orbita wird durch die Ossa frontale, lacrimale und zygomaticum sowie medial zusätzlich durch das Os presphenoidale gebildet und bietet dem Auge einen ringförmigen knöchernen Schutzraum (Salomon, 2020; Walde & Nell, 2008). Beim Nager wird der Jochbogen von 3 Anteilen gebildet, wobei der Processus zygomaticus maxillae als kräftiger Knochenfortsatz der Maxilla besonders stark ausgeprägt ist und bei Hund und Katze beispielsweise gänzlich fehlt. Beim Meerschweinchen und dem Chinchilla ist der Jochbogen flach sowie weit rostral angeordnet, bei Ratte, Maus, Hamster und Gerbil eher lang gestreckt, feingliedrig und dünner ausgeprägt. Auch unterscheidet sich die Form innerhalb der Nagerarten – so ist der Jochbogen bei Meerschweinchen und Chinchillas

kreisförmig, bei Hamster, Maus und Ratte eher oval sowie tierartlich unterschiedlich konkav bis konvex (Montiani-Ferreira, 2009b). Das Orbitadach wird bei Meerschweinchen von dem kompakten Stirnbein gebildet und rostral vom markanten Tränenbein begrenzt (Holmberg, 2017, 2022). Von innen ist die Augenhöhle mit bindegewebiger Periorbita versehen, deren Fettpolster sowohl den Sehnerven als auch die weiteren Augennerven, Gefäße und Muskeln sichert (Liebich, Sótonyi & König, 2019).

Die geöffneten, kreisförmigen Orbitae der Kaninchen platzieren die Augäpfel nahe der Nasengänge und Oberkieferzahnwurzeln (Eaton, J. S., 2022a). Dabei sind die Orbitaringe des Kaninchens vollends knöchern und beide Orbitae über den 5 mm weiten Canalis opticus miteinander verbunden, dessen Öffnung (Foramen opticum) sich in der medialen knöchernen Orbitawand befindet (Eaton, J. S., 2022a; Eule, Nell & Wollanke, 2018; Prince & Ruskell, 1960). So können retrobulbäre Prozesse vereinfacht von einer auf die andere Orbita übergehen (Eule et al., 2018). Bei Enukleation ist im ventralen und medialen Bereich der Orbita auf den die Augenmuskeln sowie die Harder-Drüse umgebenden großen Sinus orbitalis, ein Venenplexus, in der Nähe der Basis des 3. Augenlids zu achten (Eaton, J. S., 2022a; Eaton, S., 2021; Eule et al., 2018; Van der Woerd, 2021). Aufgrund seiner Ausprägung kann dieser beim Kaninchen bei einem Rückstau durch Zusammendrücken der V. cava cranialis zu einem Exophthalmus führen (Eule et al., 2018). Ratten verfügen ebenso über einen orbitalen Venenplexus, wohingegen sich die Augenvenen bei Mäusen und Hamstern zu einem großen erweiterten Kanal bzw. Venensinus zusammengeschlossen haben (Beaumont, 2002; Holmberg, 2017; Montiani-Ferreira, 2009b; Timm, 1979). Frettchen haben eine tiefe Augenhöhle mit retrobulbärem Venenplexus, vergleichbar mit dem der Nagetiere (Good, 2002), auf den auch zur Blutentnahme zurückgegriffen werden kann (Fehr et al., 2015; Williams, 2021). Innerhalb der vollständig knöchernen Orbitae des Meerschweinchens umschließt der Sinus venosus sowohl den stark lateral platzierten Bulbus, Fettgewebe, als auch die kaudomedial liegende Glandula zygomatica, Harder- und ventrotemporal die Tränendrüse (Eule et al., 2018; Ewringmann & Glöckner, 2012; Sakai, 1981). Im Gegensatz zur lateral offenen Orbita der Fleischfresser, ist die Orbita der Meerschweinchen kaudoventral geöffnet (Eaton, S., 2021; Holmberg, 2017). Der Meerschweinchenbulbus füllt zudem nur die Hälfte der Orbita, sodass Fettgewebe überhandnehmen und zu einem sog. „Fettauge“ führen kann (Ewringmann & Glöckner, 2012). Im Vergleich hierzu ist die Orbita bei Chinchillas um einiges abgeflachter (Ewringmann & Glöckner, 2012; Van der Woerd, 2021), wodurch es bereits durch

bloßes Zurückziehen der Augenlider zu einem unbeabsichtigten Vorfall des Augapfels kommen kann (Fehr, 2014; Van der Woerd, 2021). Grundsätzlich sind die hervorstehenden Bulbi der Chinchillas auf die insgesamt bedingt durch einen reduzierten Jochbogen und ein großes Tränenbein flache Augenhöhle zurückzuführen (Holmberg, 2017). Hamster besitzen ebenso eine flache Augenhöhle (Holmberg, 2017).

1.2. Augapfel – *Bulbus oculi*

Der Augapfel ist über den Sehnerven mit den Gehirnarealen verbunden, die für die Verarbeitung visueller Reize zuständig sind. Er liegt in der Augenhöhle, *Orbita*. Sein dreischichtiger Wandaufbau umgibt das Innere des Augapfels: zwei Augenkammern sowie die lichtbrechenden Medien Linse und Glaskörper (Liebich et al., 2019; Salomon, Simoens & Gille, 2020). Der aus zwei Kugelhälften bestehende Augapfel ist durch eine sichtbare Furche (*Sulcus sclerae*) in einen kleineren Vorderanteil und hinteren größeren Abschnitt unterteilt (Liebich et al., 2019).

Beim Kaninchen ist der annähernd kugelförmige Bulbus nur geringgradig breiter (ca. 18 mm / Durchschnitt 17,85 mm in vitro äquatorial) als länger (ca. 17 mm / Durchschnitt 16,95 mm in vitro axial) gestaltet und weist innerhalb eines Kanincheninzuchtstammes der hier untersuchten Rasse Gelbsilber keine größeren Abweichungen auf (Uthoff, 1984). Auch bei den üblichen Laborkaninchen der Rasse New Zealand White wurde eine axiale Bulbuslänge von 16,83 mm gemessen (Eaton, J. S., 2022a). WALDE (2008) bestätigt mit Angabe eines sagittalen Bulbusdurchmessers von ungefähr 17,5 mm und einem horizontalen, von ungefähr 19 mm ähnliche Größenverhältnisse. EWRINGMANN (2016) beschreibt die Form des Kaninchenbulbus als asphärisch. Die Größe der Augenoberfläche entspricht dabei der Größe des Einzeltieres (Williams, 2021). Der Sklera anliegend und weit rostral inserierend, ist auf dem Augapfel des Kaninchens der dorsale M. rectus erkennbar (Ewringmann, 2016). Auch beim Meerschweinchen hat der Bulbus eine Kugelform mit einer Länge von ca. 10 mm, wovon die vordere Augenkammer bis zu 2 mm einnimmt und der Glaskörper weitere 4 bis 5 mm ausfüllt (Walde & Nell, 2008). Grundsätzlich haben nachtaktive Nagerarten, denen die meisten Nager angehören, größere Augen als Tagaktive (Montiani-Ferreira, 2009b). Ein erwachsener Chinchilla hat einen stark abgeflachten Augapfel (Ewringmann & Glöckner, 2012) mit einer ungefähren Bulbuslänge von 13,5 mm (Fehr, 2014). FEHR et al. (2015) haben beim Frettchen von der Kornea bis zur Retina einen Abstand von 6,4 bis 7,7 mm gemessen. Dies entspricht der Angabe einer Bulbuslänge von 7 mm als Mittelwert beim Frettchenaugenauge, wobei das Auge als solches dem eines typischen Fleischfressers ähnelt

(Montiani-Ferreira, 2009a; Williams, 2021).

Die stark seitliche Lage der beiden Augenhöhlen beim Kaninchen, ungefähr 85° von der Mittellinie aus entfernt, führt zu einem Sehfeld mit einer Ausdehnung von annähernd 360° (Eaton, J. S., 2022a; Eaton, S., 2021; Ewringmann, 2016; Harcourt-Brown, 2002; Holmberg, 2017), beim Meerschweinchen immerhin ungefähr 340° (Ewringmann & Glöckner, 2012; Holmberg, 2017, 2022). Demzufolge ist das Binokularsehen mit einer Überlappung der Gesichtsfelder von nur 10 bis 35 Grad beim Kaninchen, 20 bis 40 Grad beim Meerschweinchen und weniger als 30 Grad beim Chinchilla schlecht (Holmberg, 2017). EATON (2021) berichtet, dass bei Mäusen ungefähr 40 Grad der Gesichtsfelder überlappen, bei der Ratte 40 – 60 Grad (Eaton, J. S., 2022b). Im Gesichtsfeld des Kaninchens liegen die einzigen wahren „blinden Flecken“ dabei direkt unter sowie hinter dem Kopf und stehen mit dem blinden Fleck der Sehscheibe in Zusammenhang, können jedoch durch Änderung der Position von Kopf-, Augen- und Augenlidstellung abgeschwächt werden (Hughes, 1971). Das Gesichtsfeld der Kleinnager beträgt wie beim Kaninchen fast 360° , wobei sich ein durch den überragenden Geruchssinn und die vorhandenen Tasthaare ausgleichender „blinder Fleck“ unmittelbar vor der Nase befindet (Ewringmann & Glöckner, 2014). Die verhältnismäßig kleinen, weit hervorstehenden Bulbi der Frettchen liegen im Schädel ebenso stark seitlich (32° von der Mittellinie aus) und führen zu einem Gesichtsfeld von rund 270° (Good, 2002; Holmberg, 2017; Miller, 1997), wobei dieses bei Albinofrettchen beschränkt zu sein scheint (Fehr et al., 2015). Noch ist nicht erforscht worden, welche Bedeutsamkeit der Feststellung beizumessen ist, dass bei pigmentierten Frettchen 6000 Sehnervenfasern der temporalen Retinabereiche zur ipsilateralen Gehirnseite verlaufen, bei albinotischen Frettchen jedoch nur 1500 Nervenfasern (Van der Woerd, 2021). Der Visus der Kleinnager und Frettchen ist insgesamt nicht besonders gut entwickelt (Ewringmann & Glöckner, 2014; Fehr et al., 2015; Good, 2002; Sharma & Sur, 2014), weshalb insbesondere Frettchen demnach eher auf Bewegung reagieren (Roest, 2014). Das Sehvermögen von Degus ist hingegen besonders gut ausgeprägt, wobei sogar UV-Strahlen wahrgenommen werden können. Da Degus besonders viel markieren, können sie anhand der reflektierenden UV-Anteile im ausgeschiedenen Urin ihrer Artgenossen hierdurch deren Spur nachverfolgen (Sassenburg, 2014).

1.2.1. Äußere Augenhaut – Tunica fibrosa bulbi

Der Übergang der beiden Anteile der äußeren Augenhaut, bestehend aus einem vorderen transparenten Anteil (Hornhaut, *Kornea*) und einem hinteren größeren Abschnitt (weiße

Augenhaut, *Sklera*), ist äußerlich als Korneoskleralfalz (*Sulcus sclerae*) erkennbar. Als äußerste Schicht formt sie den Bulbus und sorgt für dessen Stabilität (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020).

1.2.1.1. Lederhaut – Sklera

Die insgesamt gefäßarme Lederhaut weist dennoch in der äußersten Schicht (*Lamina episcleralis*) Blutgefäße auf. Ihr weißes Erscheinungsbild erhält sie durch in ihrer Hauptschicht (*Substantia propria*) eingelagerte Kollagenfasern (Salomon et al., 2020). Mithilfe der hierdurch erhaltenen Festigkeit kann dem Augeninnendruck gegengesteuert werden und die Muskeln des Augapfels können an der großen, festen Fläche ansetzen (Liebich et al., 2019). Die Verbindungsschicht zur mittleren Augenhaut ist die *Lamina fusca sclerae* (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). An der *Lamina cribrosa sclerae*, einem siebförmigen Areal am hinteren Augenpol, tritt der Sehnerv aus dem Augapfel aus. Beim Kaninchen ist diese nicht ausgebildet (Holmberg, 2017). Am Korneaübergang ist die Sklera von einer Bindegewebsschicht (*Tunica conjunctiva bulbi*) überzogen (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Eine mit lockerem Binde- und Fettgewebe gefüllte Scheide (*Vagina bulbi*, TENON-Kapsel) füllt den Spaltraum zwischen Bulbus und der Augenhöhle aus, damit der Augapfel flexibel und beweglich bleibt (Salomon et al., 2020). An der Stelle mit dem größten Radius des Bulbus, dem Äquator, ist die Sklera nur bis zu 0,5 mm dick, erlangt jedoch zum hinteren Augenpol hin eine Dicke von bis zu 2 mm (Liebich et al., 2019).

1.2.1.2. Hornhaut – Kornea

Die transparente Hornhaut ist stark gekrümmt und mehrschichtig aufgebaut, wobei ihre Eigenschicht (*Substantia propria corneae*) überwiegend aus parallel zur Oberfläche angeordneten Kollagenfasern mit wenigen elastischen Fasern besteht und keine Blutgefäße führt. Ihre Ernährung erfolgt deshalb über am Skleraübergang (*Limbus corneae*) liegende Blutgefäße, die Tränenflüssigkeit und das Kammerwasser (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Von vorne betrachtet erscheint der *Limbus corneae* queroval (Salomon et al., 2020).

Über eine dünne, vordere Grenzmembran, *Lamina limitans anterior* (BOWMAN-Membran), ist das Stroma mit dem mehrschichtigen, unverhornten vorderen Hornhautepithel, dem *Epithelium anterius corneae*, verbunden. Dieses ist als Vorderfläche der Kornea von einem Tränenfilm überzogen und geht am *Anulus conjunctivae* weiter in das Bindehautepithel über (Liebich et al., 2019; Salomon et al.,

2020). Die der Grundsubstanz nach innen folgende elastische hintere Grenzmembran, *Lamina limitans posterior* (DESCEMET-Membran), wird von dem einschichtigen Vorderkammerendothel, dem *Epithelium posterius*, bedeckt und bildet zugleich den hinteren Abschluss der Kornea (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020).

Die große Kornea des Kaninchens ist, verglichen mit der ca. 0,9 mm bei der Katze und 0,7 mm dicken Kornea beim Hund, durchgehend nur ungefähr 0,4 mm dünn (Chan, Payor & Holden, 1983; Eaton, J. S., 2022a). Der waagerechte Hornhautdurchmesser beim Kaninchen beträgt ca. 14,75 mm, senkrecht sind es in vitro gemessen ca. 15 mm mit geringen Schwankungen (Uthoff, 1984). Sie bedeckt beim Kaninchen ungefähr 25 % - 30 % des Augapfels (Harcourt-Brown, 2002) und besitzt ein hohes Potenzial zur Regeneration des Hornhautendothels (Eaton, J. S., 2022a). Mehrere Studien haben beschrieben, dass beim Kaninchen keine Bowman-Membran ausgebildet sei, PRINCE und RUSKELL (1960) konnten eine solche bei eigenen Untersuchungen jedoch nachweisen, auch wenn diese im Vergleich zu anderen Tierarten sehr dünn ist.

Die grundsätzlich größeren Augäpfel der nachtaktiven Nagerspezies offenbaren auch eine für einen hohen Lichteinfall sorgende, entsprechend große Kornea (Montiani-Ferreira, 2009b). Dabei nimmt die Kornea der Meerschweinchen vom nasalen bis zum temporalen Augenwinkel rund 85 % – 90 % der Lidspaltenbreite ein (Eaton, S., 2021; Holmberg, 2017, 2022). Auch ist bei Meerschweinchen, anders als bei den meisten Säugetieren exklusive Primaten unter dem 0,23 mm dünnen Hornhautepithel zum Schutz des darunterliegenden Stromas, eine dünne Kollagenschicht (Bowman-Membran) vorhanden (Eaton, S., 2021; Holmberg, 2017, 2022). Meerschweinchen haben verglichen mit anderen Säugetierarten außerdem eine weniger sensitive Kornea (Eule et al., 2018; Holmberg, 2017), gleichwohl der Kornealreflex auslösbar ist. Bei Betrachtung der Kornea unter starker Vergrößerung sind am Übergang zur Sklera sogar zarte Gefäße auffindbar (Eule et al., 2018). Die große Kornea der Chinchillas nimmt 10 % – 40 % der gesamten Augapfeloberfläche ein (Holmberg, 2017). Die Hornhaut der Hamster ist mit etwa 0,1 mm recht dünn und damit fast nur halb so dick wie bei der Ratte, Maus und dem Chinchilla (Holmberg, 2017). Der Hornhautdurchmesser der Maus beträgt 2,5 mm, bei der Ratte 6,8 mm, wobei diese außen dünner ist als im Zentrum (Eaton, J. S., 2022b). Auch das Frettchen verfügt über eine relativ große Kornea (Good, 2002; Montiani-Ferreira, 2009a) mit einer zentralen Dicke von nur 0,34 mm (Fehr et al., 2015). Obwohl die Hornhaut der Frettchen die gleichen Schichten wie alle anderen Fleischfresser aufweist, ist sie nur halb so dick (Montiani-Ferreira, 2009a).

Die Innervation der Hornhaut erfolgt über sensible Äste des N. ophthalmicus (*Nn. ciliares longi*), deren Funktionalität über den Kornealreflex überprüft werden kann (Salomon et al., 2020).

1.2.2. Mittlere Augenhaut – Tunica vasculosa bulbi – Uvea

Im klinischen Sprachgebrauch gliedert sich die gut durchblutete mittlere Augenhaut in einen großflächigen hinteren Abschnitt (Aderhaut, *Choroidea*) sowie einen vorderen Abschnitt (Regenbogenhaut, *Iris* und Strahlen- oder Ziliarkörper, *Corpus ciliare*) (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Letzterer unterscheidet sich funktionell, da das embryonale Bindegewebe zusätzlich von Retina überzogen ist (Salomon et al., 2020).

1.2.2.1. Aderhaut – Choroidea

Aufgrund ihrer guten Durchblutung versorgt die Choroidea die angrenzende Retina. Ein beim Wiederkäuer, Pferd und Fleischfresser vorhandenes, zwischen zweier Gefäßschichten der Choroidea und dorsal des Sehnerven gelegenes Tapetum lucidum für ein gutes Sehen in der Dämmerung, fehlt dem Schwein (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020), dem Menschen als auch dem Kaninchen (Salomon et al., 2020). Auch beim Meerschweinchen ist kein Tapetum lucidum ausgebildet (Eule et al., 2018; Müller, K. & Wase, 2014). Beim Frettchen jedoch schon (Fehr et al., 2015). Das Tapetum lucidum verstärkt sowohl bei pigmentierten als auch bei unpigmentierten Tieren den Lichteinfall, ist 7 – 10 Zellschichten dick und führt beim Frettchen zu einer gleichguten, wenn nicht sogar besseren Lichtwahrnehmung als bei Katzen in der Dämmerung und bei Nacht (Miller, 1997).

1.2.2.2. Strahlenkörper/Ziliarkörper – Corpus ciliare

Die Hinterseite des in die Augenkammern ragenden Ziliarkörpers ist am Übergang von der Choroidea in dünne Ziliarfalten gelegt, die an dieser Stelle einen Ziliarring (*Orbiculus ciliaris*) ausbilden. Am anderen linsennahen Ende des Ziliarkörpers sind Ziliarfortsätze (*Processus ciliares*) ausgebildet, die in ihrer Gesamtheit den Ziliarkranz (*Corona ciliaris*) bilden, von welchem durch zahlreiche Kapillaren das gebildete Kammerwasser in die hintere Augenkammer abgegeben wird (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Dieses fließt durch die Pupille ebenso in die vordere Augenkammer, um schlussendlich über den Venenplexus (*Plexus venosus sclerae*) des Kammerwinkels abzufließen (Liebich et al., 2019). Beim Hauskaninchen beträgt die normale Flussrate des Kammerwassers 2,7 Mikroliter/Minute (Eaton, J. S., 2022a).

Hauchzarte, von den Ziliarfortsätzen ausgehende Zonulafasern (*Fibrae zonulares*) halten die Linse in Position (= Aufhängeapparat der Linse) (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Der bei Kleinsäugetern relativ schwach ausgebildete *M. ciliaris* ist für die Akkommodation (funktionelle Nah- und Ferneinstellung) der Linse verantwortlich, indem er durch Änderung seines Kontraktionszustandes die Spannung der an der Linse ansetzenden Zonulafasern anpassen kann (Harcourt-Brown, 2002; Salomon et al., 2020). Die winzige Ziliarmuskulatur entspricht der vermeintlich geringen Akkommodationsfähigkeit von ungefähr 1,5 beim Kaninchen (Eaton, J. S., 2022a), sodass die erzielbare Sehschärfe insgesamt gering ist (Ewringmann, 2016). Auch beim Chinchilla ist die schlechte Sehschärfe auf die damit verbundene geringe Akkommodationsfähigkeit aufgrund fehlender Ziliarkörpermuskulatur zurückzuführen (Holmberg, 2017).

1.2.2.3. Regenbogenhaut – Iris

Der Strahlenkörper setzt sich in die ringförmige Iris fort, die vor der Linse liegt (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Die Iris gliedert den Abschnitt von der Kornea bis zur Linse in eine vordere und den dahinterliegenden Abschnitt in die hintere Augenkammer (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Die Kanincheniris ist dünn und groß (Eaton, J. S., 2022a). Beim Hamster ist sie stark pigmentiert (Holmberg, 2017). An ihrem freien Ende umgibt die Iris mit ihrem Rand (*Margo pupillaris*) in der Mitte das gewebefreie Sehloch, die Pupille, durch welche der Lichteinfall erfolgt. Diese ist vom parasymphatisch innervierten *M. sphincter pupillae* umgeben, der bei Kontraktion eine Verengung der Pupille (Miosis) und bei Entspannung eine Erweiterung der Pupille (Mydriasis) bewirkt und somit pharmakologisch durch Miotika und Mydriatika beeinflussbar ist (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Die Pupille des Kaninchens bildet im Ruhezustand ein leicht vertikales Oval und ist im dilatierten Zustand kreisförmig (Eaton, J. S., 2022a), beim Frettchen präsentiert sie sich als horizontalen, elliptischen Spalt (Fehr et al., 2015; Holmberg, 2017; Sharma & Sur, 2014; Van der Woerd, 2021), der einem „Rugby“ ähnelt. Die meisten Nagetiere, wie auch der Hamster (Holmberg, 2017), haben eine kreisrunde Pupille (Montiani-Ferreira, 2009b), wovon sich Chinchillas und Degus mit ihrer vertikalen, elliptischen Pupille abheben, die sich zu engen vertikalen Schlitzen zusammenziehen können (Ewringmann & Glöckner, 2012; Holmberg, 2022; Montiani-Ferreira, 2009b; Van der Woerd, 2021; Williams, 2021). Diese Ausrichtung der meist stark pigmentierten Iris des Chinchillas ermöglicht eine nahezu vollständige Miosis, um das Auge vor hellem Sonnenlicht v. a. in großer Höhe zu

schützen. Sie ist für das Tier aufgrund der schlechten Akkommodationsfähigkeit auch die einzige Möglichkeit, seine Sehschärfe zu verbessern (Holmberg, 2017). Allerdings ist die Pupillenreaktion bei weniger stark pigmentierten Tieren schwächer ausgeprägt (Williams, 2021). Trotz der unterschiedlichen Pupillenformen im Ruhezustand zeigt sich die Pupille bei allen Haussäugetieren bei maximaler Weitstellung in runder Form (Salomon et al., 2020).

Die Iris- und somit auch die Augenfarbe variiert bei jedem Individuum, abhängig von der Anzahl und Größe der in den Pigmentzellen vorhandenen Zellorganellen zur Melaninbildung (Melanosomen), welche die Retina vor intensiven und gestreuten Lichtstrahlen schützen (Liebich et al., 2019). Bei Melaninmangel (Albinismus) wie Albinokaninchen ist sie durchgehend rot und bietet nahezu keinen Blendschutz (Magnussen, 1959). Die Iris-Hinterfläche ist von retinalem Pigmentepithel (Lamina epithelialis iridocytorum) bedeckt, enthält dunkle Pigmente sowie den sympathisch innervierten M. dilatator pupillae. Dessen Kontraktion kann zur Weitstellung der Pupille beispielsweise durch Phenylephrin, einem sympathomimetischen Mydriatikum, ausgelöst werden. Der Übergang zwischen dem äußeren, ziliaren und dem inneren, pupillären Anteil der Iris-Vorderseite wird Collarette („Iriskrause“) genannt (Salomon et al., 2020).

Bedingt durch den unterschiedlichen Gehalt an Melanin entsteht ein tierartlich großes Farbspektrum der Iris, das bei viel vorhandenem Pigment von dunkel bis bei albinotisch bedingtem Pigmentmangel hin zu Rot reicht, da dann vorhandene Blutgefäße durch die transparenten Irisschichten hindurchschimmern (Salomon et al., 2020). So ist die dünne Iris der Frettchen bräunlich, erscheint beim Albino-Frettchen jedoch pink bzw. rötlich (Montiani-Ferreira, 2009a).

1.2.3. Innere Augenhaut – Tunica interna bulbi

Im Bulbusinnern liegt der mittleren Augenhaut die innerste Schicht als Netzhaut, *Retina*, an. Über den Nervus opticus bleibt sie embryologisch gesehen als Ausstülpung des Gehirnes stets mit diesem in Verbindung und ist die einzige Struktur des zentralen Nervensystems, die direkt angesehen und untersucht werden kann (Liebich et al., 2019; Maggs, 2017; Salomon et al., 2020).

1.2.3.1. Netzhaut – Retina

Die Netzhaut besteht aus einem vorderen, blinden Abschnitt ohne Photorezeptoren (*Pars ceca retinae*), welcher der Kaudalfläche von Iris (*Pars iridica retinae*) und Ziliarkörper

(*Pars ciliaris retinae*) anliegt, sowie dem hinteren, der Aderhaut anliegenden Abschnitt (*Pars optica retinae*). Letzterer enthält die Sinneszellen in Form von Zapfen für das Sehen von Farben am Tag sowie Stäbchen für das Unterscheiden von Hell-dunkel- bzw. Sehen in der Dämmerung, zur Aufnahme des durch die Pupille einfallenden Lichts. Diese Photorezeptoren sind bei dem aus 2 Blättern bestehenden hinteren Retinaabschnitt in dem dickeren Nervenblatt, dem *Stratum nervosum*, eingebettet. Das retinale Pigmentepithel (RPE) bzw. Pigmentblatt, *Stratum pigmentosum*, ist als äußerste Schicht außer bei Albinos mit viel Melanin pigmentiert. Die beiden Blätter sind nur an der gewellten Ora serrata, welche die Grenze der beiden Retina-Abschnitte als auch der Aderhaut und des Ziliarkörpers darstellt, sowie am Discus nervi optici aneinander befestigt und lösen sich daher bei niedrigem Augeninnendruck oder bei Eröffnung des Bulbus auch leicht voneinander ab (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Die Netzhaut der Mäuse ist mit einer Dicke von 189 bis 230 μm und 200 μm bei den Ratten, verglichen mit deren geringen Bulbuslänge dick (Eaton, J. S., 2022b).

Beim Kaninchen dominieren Stäbchen, nur 5 % der Photorezeptorschicht besteht aus Zapfen (Eaton, J. S., 2022a; Eaton, S., 2021). Auch beim Meerschweinchen überwiegen die Stäbchen als Photorezeptoren (Eaton, S., 2021; Holmberg, 2017, 2022), es sind aber auch 2 unterschiedliche Zapfenarten vorhanden (Ewringmann & Glöckner, 2012). Kleinnager wie die nachtaktiven Hamster, aber auch Ratten und Mäuse kompensieren den geringen Lichteinfall durch ihre kleinen Augen mit einer zu 95 % – 98 % aus Stäbchen bestehenden Photorezeptorschicht (Beaumont, 2002; Eaton, J. S., 2022b; Ewringmann & Glöckner, 2014; Holmberg, 2017; Montiani-Ferreira, 2009b; Taradach, Greaves & Rubin, 1984). Chinchillas sind nacht- und dämmerungsaktiv (Williams, 2021), was für eine hohe Anzahl an Stäbchen in der Retina spricht (Holmberg, 2017). Die Netzhaut der Degus besteht überwiegend aus Stäbchen, ist aber auch reich an Zapfen (Holmberg, 2022). Bei Frettchen dominieren in der Netzhaut ebenso die Stäbchenzellen (Good, 2002).

An der ventral des hinteren Augenpols gelegenen rundovalen Sehscheibe, *Discus nervi optici* bzw. auch als *Papilla nervi optici* bezeichnet, treten die Axonbündel aus dem Nervenblatt der Pars optica retinae aus und gehen begleitet von retinalen Blutgefäßen in den Sehnerven, *N. opticus*, über. Dieser tritt an der siebartig durchlöcherten Stelle der Sklera (*Area cribrosa sclerae*) aus dem Augenhintergrund aus. Da in diesem Bereich Sinneszellen fehlen, wird er auch als blinder Fleck bezeichnet (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Klinisch wird die Sehscheibe beim Menschen häufig *Papilla optica*

genannt, bei den Haussäugetieren ist sie jedoch nicht vorgewölbt und der Ausdruck somit unpassend (Salomon et al., 2020). Auf ihre bei den einzelnen Kleinsäugerspezies unterschiedliche Ausprägung wird im Rahmen der Untersuchung des Augenhintergrundes bei den tierartlichen Besonderheiten detailliert eingegangen.

Wenige Millimeter oberhalb der Sehscheibe liegt die zentrale Macula. Als Bereich mit der größten Anzahl an Zapfen und somit der höchsten Sehschärfe ist sie für das beidäugige Sehen sehr bedeutsam und als *Area centralis retinae* benannt (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Dieser Retinabereich ist schwer abgrenzbar (Xian et al., 2023), hat jedoch entweder eine runde Form (*Area centralis rotunda*) oder bleiche Streifenform (*Area centralis striaeformis*). Große Blutgefäße fehlen an dieser Stelle (Salomon et al., 2020). Dem Kaninchen fehlt eine Macula bzw. Area centralis. Sie haben jedoch einen etwa 3 mm – 4 mm breiten Streifenbereich, in dem die Ganglienzelldichte am höchsten ist. Dieser verläuft parallel zur Sehscheibe, liegt ca. 3 mm ventral von dieser (Eaton, J. S., 2022a; Gelatt et al., 2021) und ermöglicht den Kaninchen als Beutetieren Fressfeinde zu entdecken (Maini & Hartley, 2019). Ventral davon existiert ein ebenso horizontal verlaufender „blauer Streifen“, der nahezu ausschließlich blauempfindliche Zapfen enthält, die der frühzeitigen Erkennung von Feinden aus der Luft dienen könnte (Maini & Hartley, 2019). Wie Katzen verfügen auch Frettchen über einen zapfenreichen Streifen, die Area centralis, um eine höhere Sehschärfe zu erreichen (Williams, 2021).

Retinale Blutgefäße kommen zur Ernährung und Sauerstoffzufuhr nur im Nervenblatt der Pars optica retinae vor, jedoch nicht im äußeren Pigmentblatt und auch nicht im Bereich der Photorezeptoren (Salomon et al., 2020). Beim Frettchen wird die Versorgung der äußeren Retinabereiche durch die anliegende Gefäßschicht der Choroidea sichergestellt (Montiani-Ferreira, 2009a). Bei Netzhautablösung bzw. Trennung der beiden Retinablätter wird stets auch die Versorgung der Photorezeptoren unterbrochen, da diese grundsätzlich über Diffusion aus der Choroidea ernährt werden (Liebich et al., 2019). Anhand der Retinagefäße können bei der ophthalmoskopischen Untersuchung Rückschlüsse auf beispielsweise Augen- oder auch eine Diabeteserkrankung gezogen werden. Insgesamt gibt es 4 unterschiedliche Gruppen von Retinagefäßbildern (Salomon et al., 2020), auf welche im Abschnitt der ophthalmologischen Untersuchung tierartspezifisch eingegangen wird.

1.2.4. Augeninnere

Das Augeninnere beherbergt die lichtbrechenden, transparenten Strukturen des Auges,

nach deren Durchtritt das Licht gebündelt wird und auf die Netzhaut fällt (Salomon et al., 2020).

1.2.4.1. Vordere und hintere Augenkammer – Camerae bulbi

Der Raum zwischen Hornhaut und Linse wird durch die Iris in eine vordere (*Camera anterior bulbi*) und hintere Augenkammer (*Camera posterior bulbi*) geteilt, die über die Pupille miteinander verbunden sind. Sie enthalten das mit verschiedenen Elektrolyten, Aminosäuren, Ascorbinsäure (Vitamin C) und Glucose angereicherte Kammerwasser, *Humor aquosus* (Liebich et al., 2019), das der Ernährung von Augenstrukturen ohne eigene Blutgefäßversorgung wie Linse und Kornea dient. Dieses wird im Bereich der Ziliarfortsätze an der Blut-Kammerwasser-Schranke gebildet und von diesen in die hintere Augenkammer abgegeben. Durch die Pupille gelangt es in die vordere Augenkammer, um im Iridokornealwinkel, *Angulus iridocornealis*, am Übergang von der Irisbasis in den Strahlenkörper im Plexus venosus sclerae wieder abzufließen (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Eine pathologische Blockade dieser Regulation kann zu einem Glaukom mit erhöhtem Augeninnendruck führen, im gegenteiligen Fall kann bei Druckabfall eine Netzhautablösung begünstigt werden. Der Iridokornealwinkel wird durch ringförmig angeordnete Irisfortsätze, die im Gesamten als *Ligamentum pectinatum* bezeichnet werden und sich mit dem äußeren Rand der Kornea verbinden, von der vorderen Augenkammer abtrennen und können bei der Augenuntersuchung gut beurteilt werden (Salomon et al., 2020).

Die Tiefe der Vorderkammer beträgt beim Kaninchen 2,08 mm und fasst ein Volumen von 0,2 ml (Eaton, J. S., 2022a).

1.2.4.2. Linse – Lens

Die Linse ist zwischen der hinteren Augenkammer und dem Glaskörper über die Zonulafasern am Strahlenkörper befestigt. Da ihr Nerven und Blutgefäße fehlen, erscheint sie kristallklar und hat als lichtbrechendes Medium durch ihre Akkommodationsfähigkeit die höchste Brechkraft. Sie ist vollständig von einer halbdurchlässigen, elastischen Linsenkapsel, *Capsula lentis*, umgeben. Ihre Ernährung erfolgt über die Linsenvorderseite, *Facies anterior lentis*, die der Iris anliegt und von Kammerwasser umspült wird. Beide Seiten der Linse sind nach außen gewölbt - die dem Glaskörper zugewandte Rückseite, *Facies posterior lentis*, jedoch etwas stärker (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Je jünger das Tier ist, umso schneller teilen sich die Epithelzellen und entwickeln sich zum kontinuierlichen Wachstum der Linse zu

Linsenfasern weiter, die sich vom äußeren Linsenrand nach innen hin verdichten und so den kompakten Linsenkern, *Nucleus lentis*, bilden (Liebich et al., 2019). Mit individuellen Abweichungen selbst zwischen dem rechten und dem linken Auge von bis zu 0,8 mm, ist die Linse beim Kaninchen im Mittel 4,85 mm dick (Uthoff, 1984). Der axiale Linsendurchmesser beträgt beim Kaninchen (New Zealand White) 6,77 mm (Eaton, J. S., 2022a). Bei Gelbsilber-Kaninchen konnte unter dem Mikroskop in vitro ein konstanter Linsendurchmesser von 11 mm gemessen werden (Uthoff, 1984), womit die Kaninchenlinse als sehr groß bezeichnet werden kann (Ewringmann, 2016). Sie hat eine sphärische Form und bündelt das durch die große Kornea einfallende Licht mit einer Brennweite von nur 8 mm (Williams, 2021). Linsenkern und -rinde sind beim Kaninchen nicht zu unterscheiden. Ein herausragendes physiologisches Merkmal der Kaninchenlinse stellt die Fähigkeit der Linsenepithelzellen zur Vermehrung dar, sodass sich die Linsenrinde nach chirurgischer Entfernung zu regenerieren vermag (Eaton, J. S., 2022a; Eaton, S., 2021). Beim Meerschweinchen beträgt der axiale Linsendurchmesser bzw. die Linsendicke 4 mm (Walde & Nell, 2008). Die Linse des Frettchens ist im Vergleich zu den anderen Haussäugetern weiter hinten platziert (Good, 2002), zwischen 3,2 bis 3,7 mm dick und hat die Form einer Kugel (Fehr et al., 2015; Williams, 2021). Die kugelförmige Linse der Kleinnager besitzt kein besonders großes Akkommodationsvermögen (Ewringmann & Glöckner, 2014), proportional gesehen ist sie im Verhältnis zum relativ kleinen Augapfel bei den meisten Nagern jedoch sehr groß (Montiani-Ferreira, 2009b). So hat der Hamster ähnlich den Ratten und Mäusen eine große sphärische Linse, was eine kleine vordere Augenkammer bedingt (Eaton, S., 2021; Holmberg, 2017). Auch lassen Linsenform und -größe bei der Ratte auf eine vorhandene Weitsichtigkeit schließen (Holmberg, 2017). Beim Chinchilla konnte eine Linsendicke von 8,5 mm gemessen werden (Fehr, 2014), wodurch diese riesig erscheint und bis zu 50 % der axialen Augapfellaenge einnimmt (Holmberg, 2017).

1.2.4.3. Glaskörper – Corpus vitreum

Der transparente Glaskörper, *Corpus vitreum*, füllt den gesamten Raum (*Camera vitrea bulbi*) zwischen der Retina, dem Strahlenkörper mit Zonulafasern und der Linse, an welcher er zu einer Grube, der *Fossa hyaloidea*, eingedrückt ist. Von den lichtbrechenden Medien ist er der massigste Anteil und von gallertartiger Konsistenz, da er aus Flüssigkeit, *Humor vitreus*, mit hohem Wassergehalt und Hyaluronsäure besteht. Der Glaskörper ist für den Stoffwechsel der Netzhaut von immenser Bedeutung, er hält diese durch Aufrechterhalten des Augeninnendrucks in Position und verhindert dadurch eine

Ablatio retinae (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020).

Die Tiefe der Glaskörperkammer des Kaninchens beträgt 8,18 mm und umfasst ein Volumen von 1,2 ml – 1,5 ml. Strukturell kann der Glaskörper bei Kaninchen in unterschiedliche Regionen unterteilt werden, die einen äußeren Kortex, ein gut definiertes und weniger gallertartiges, dafür flüssigeres Zentrum sowie eine dazwischen liegende Zone umfassen. Bei Hauskaninchen werden alle 10 – 15 Minuten etwa 50 % des Wassergehalts des Glaskörpers ersetzt (Eaton, J. S., 2022a).

1.3. Sehnerv - Nervus opticus

Über in der Retina liegende Photorezeptoren werden elektromagnetische Wellen des sichtbaren Lichts aufgenommen und als Nervenimpulse über weitere in den Schichten der Retina vorhandene bi- und multipolare Nervenzellen weitergegeben, deren Axone sich an der Sehscheibe (*Discus nervi optici*) zum Sehnerven vereinen. Gemeinsam mit Arteriolen und Venolen tritt dieser hier aus der Retina aus, um den Bulbus über die *Area cribrosa sclerae* zu verlassen. Beim Kaninchen ist diese siebförmige *Lamina cribrosa sclerae* nicht entwickelt, weshalb sich der Sehnervenkopf von der Retina aus zentral zu einer kelchförmigen Vertiefung ausdehnt (Holmberg, 2017). Als äußerer Anteil der Sehbahn, über welche die aufgenommenen Lichtreize weitergeleitet werden, verbindet der Nervus opticus als 2. Gehirnnerv die Retina mit dem Gehirn (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Er kann in 3 Abschnitte gegliedert werden: Den kurzen, intraokular verlaufenden Sehnervenkopf (intraokulär), den innerhalb der Augenhöhle zum Foramen opticum ziehenden Anteil im M. retractor bulbi und orbitalen Fettkörper (orbital) sowie den innerhalb der Schädelhöhle zum Chiasma opticum ziehenden Anteil (intrakraniell). Die beiden letztgenannten Abschnitte des Sehnervs sind von einer weichen Pia- und härteren Durascheide (*Vagina interna* und *externa nervi optici*) überzogen, die somit auch die Sklera mit den beiden Gehirnhäuten verbindet (Salomon et al., 2020).

Beim Kaninchen stellt sich der ophthalmoskopisch schwer abgrenzbare Sehnervenkopf in orangeroter Farbe und in der Transversalebene in ovaler Form dar. Der deutlich erkennbare runde Sehnervenkopf der Ratte ist von hellgelber Farbe. Bei der Maus ist der Sehnervenkopf wiederum schlecht abgrenzbar, jedoch kreisförmig und ebenso hellgelb (Xian et al., 2023). Beim Meerschweinchen liegt der runde Sehnervenkopf von weißer bis grauer Farbe (Van der Woerdt, 2021) in der Mitte des Fundus (Eule et al., 2018). 99 % der Sehnervenfaser kreuzen beim Meerschweinchen im Chiasma opticum und ziehen zur kontralateralen Seite, weshalb der ipsi- und kontralaterale Pupillenreflex geringer

ausgeprägt ist (Eule et al., 2018).

1.4. Adnexale Strukturen – Organa oculi accessoria

1.4.1. Augenlider – Palpebrae

Die Bulbusvorderfläche wird insbesondere durch den Lidschluss-/Hornhautreflex durch zwei Hautfalten - den Augenlidern, *Palpebrae* - geschützt. Durch ihre Beweglichkeit erhalten sie die Feuchtigkeit der Horn- und Bindehaut und entfernen Fremdkörper. Die Lidspalte, *Rima palpebrarum*, wird durch die freien Ränder der beiden Augenlider begrenzt, die an ihren ophthalmologisch als Canthus medialis bzw. lateralis bezeichneten Enden (Augenwinkeln) ineinander übergehen (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Der dreischichtige Aufbau der Augenlider setzt sich aus einem äußeren, an der Lidkante mit Wimpernhaaren (*Cilia*) versehenen Anteil, einer bindegewebig-muskulösen Schicht sowie einer von Bindehaut überzogenen Innenschicht zusammen. Das größere und motilere obere Augenlid, *Palpebra superior*, weist mehr und längere Wimpern als das untere Augenlid, *Palpebra inferior*, auf. Die Lidspalte beim Kaninchen ist ungefähr 10 mm – 16 mm lang, Flimmerhärchen sind sowohl am oberen als auch am unteren Augenlid vorhanden (Eaton, J. S., 2022a). Neben Talgdrüsen, *Gll. sebaceae* (ZEISS-Drüsen) und Schlauchdrüsen, *Gll. ciliares* (MOLL-Drüsen) finden sich außerdem Tarsaldrüsen, *Gll. Tarsales* (MEIBOM-Drüsen) an der Lidkante, welche als Lipidanteil der Tränenflüssigkeit die Augenbutter sezernieren und hierdurch u. a. ein Überlaufen des Lidrandes verhindern (Salomon et al., 2020).

Kaninchen werden mit einem physiologischen Ankyloblepharon (verwachsenen Augenlidern) geboren. Der Lidspalt öffnet sich ca. 10 Tage nach der Geburt (Eule et al., 2018; Walde & Nell, 2008). Auch Ratten, Mäuse, Rennmäuse, Gold- und Zwerghamster kommen nicht mit geöffneten Augen auf die Welt, sie sind Nesthocker und öffnen ihre Augen zwischen dem 10. – 16. Lebenstag (Ewringmann & Glöckner, 2014). Auch Frettchen zählen zu diesen, öffnen ihre Augen jedoch erst sehr spät zwischen dem 28. – 34. Lebenstag (Fehr et al., 2015). Dies unterscheidet sie von anderen Fleischfressern, deren Augenöffnungsalter ungefähr 2 Wochen beträgt (Montiani-Ferreira, 2009a). Im Gegensatz hierzu kommen die frühreifen Meerschweinchen, Chinchillas und Degus mit geöffneten Augenlidern auf die Welt (Eule et al., 2018; Ewringmann & Glöckner, 2012; Van der Woerd, 2021).

1.4.2. Bindehaut – Tunica conjunctiva und Nickhaut – Palpebra tertia

Die Bindehaut überzieht zunächst die Innenseite der Augenlider als Lidbindehaut, *Tunica conjunctiva palpebrarum*, um dann entlang der Sklera als Augapfelbindehaut, *Tunica conjunctiva bulbi*, bis zum Korneoskleralfalz zu ziehen. Physiologisch erscheint sie glatt, glänzend sowie durch vorhandene feine Blutgefäße blassrosa schimmernd, manchmal ist auch Pigment eingelagert (Salomon et al., 2020). Die Lidbindehaut der Meerschweinchen ist reich an lymphatischem Gewebe (Eule et al., 2018). Die Umschlagstelle in der Augenhöhle wird als Bindehautsack, *Saccus conjunctivae*, bezeichnet, in welchem auch die Ausführungsgänge des Tränenapparates enden. Dorsal und ventral wird dessen stärkste Wölbung als *Fornix conjunctivae superior* bzw. *inferior* bezeichnet, an dem jeweils kleine Bindehautdrüsen, *Gll. conjunctivales* (KRAUS-Drüsen), den mukösen Anteil des Tränenfilms sezernieren (Salomon et al., 2020).

Als Besonderheit der Haussäugetiere und somit auch der Kleinsäuger ist eine Bindehautfalte am medialen Augenwinkel als drittes Augenlid ausgebildet: die Nickhaut, *Palpebra tertia / Membrana nictitans*. Hier sind Lymphfollikel sowie die Nickhautdrüse, *Gl. palpebrae tertiae superficialis*, eingelagert (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Gestützt wird die Nickhaut durch den Blinzknorpel, *Cartilago palpebrae III*, und fällt bei Druck auf den Bulbus vor die Kornea (Salomon et al., 2020). Die nach außen gewölbte Nickhaut des Kaninchens ist verhältnismäßig groß und weist außer bei Albinokaninchen einen unebenen, pigmentierten Rand auf. Trotzdem kann sie maximal die Hälfte der vorderen Augapfel Fläche bedecken (Ewringmann, 2016). An der Nickhautbasis ist an der Innenfläche des Nickhautknorpels (Ewringmann, 2016) auch die unscheinbare Nickhautdrüse zu finden, die beim Kaninchen nur einige Millimeter groß ist (Eule et al., 2018). Dem Meerschweinchen fehlen Nickhautdrüse und Blinzknorpel gänzlich, das verkümmerte dritte Augenlid wird als *Plica semilunaris* bezeichnet (Eule et al., 2018; Holmberg, 2017; Müller, K. & Wase, 2014). Auch beim Chinchilla existiert die *Membrana nictitans* nur rudimentär, sodass die große Kornea weder von dieser bedeckt noch geschützt werden kann (Fehr, 2014; Holmberg, 2017; Montiani-Ferreira, 2009b; Van der Woerdt, 2021). Dagegen ist die Nickhaut der Frettchen mit einem T-förmigen (Stütz-)Knorpel hervorragend ausgebildet (Fehr et al., 2015; Montiani-Ferreira, 2009a) und ist bulbus- sowie lidseitig von fest anliegender Bindehaut umgeben. Sie ist meistens weißlich bzw. nicht pigmentiert und wenn doch, dann am äußeren Rand. Der Tränenfilm wird bei Frettchen von einer oberflächlichen Drüse an der Nickhautbasis produziert, da eine tiefe Nickhautdrüse fehlt (Montiani-Ferreira, 2009a).

1.4.3. Tränenapparat - *Apparatus lacrimalis*

Zum Tränenapparat zählen Tränendrüsen, welche die Tränenflüssigkeit produzieren, sowie deren ableitende Tränenwege. Die Tränenflüssigkeit bewahrt die Horn- und Bindehaut vor dem Austrocknen, sichert die Ernährung der Hornhaut und sorgt für deren Reinigung, wozu der Tränenfilm aus mehreren Schichten besteht. Die MEIBOM-Drüsen produzieren die äußerste fetthaltige Schicht, welche die Tränenflüssigkeit am Lidrand zurückhält. Die mittlere wässrige Schicht der *Gl. lacrimalis* stellt den größten Anteil des Tränenfilms dar und die *Gll. lacrimales accessoriae* sezernieren die innere muköse Flüssigkeitsschicht, welche der Kornea direkt aufliegt (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020).

1.4.3.1. Tränendrüsen – *Gl. lacrimalis* und *Gll. lacrimales accessoriae*

Die bedeutende, dem Bulbus dorsolateral aufliegende Tränendrüse, *Glandula lacrimalis*, gibt ihre Tränenflüssigkeit in den Fornix conjunctivae superior ab (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Im Bindehautsack vermischt sie sich mit sezernierter Flüssigkeit aus in der Bindehaut liegenden akzessorischen Tränendrüsen, *Gll. lacrimales accessoriae*. Zu diesen gehören die *Gll. palpebrae tertiae*, *Gll. conjunctivales* und *Gl. carunculae lacrimalis* (Salomon et al., 2020). Auch beim Kaninchen liegt die Tränendrüse dorsolateral (Van der Woerdt, 2021) und teilt sich in 3 Anteile auf (*Gl. lacrimalis inferior*, *superior* und *accessorius*). Flächenmäßig breitet sich die Tränendrüse beim Kaninchen temporal oben und unten weit aus, die in der unteren Orbita liegende Harder-Drüse dafür rostral (Eule et al., 2018). In der nasalen Orbita befindet sich zudem die *Glandula zygomatica*. Die farblich untergliederte Harder'sche Drüse ist beim Kaninchen von weißer (dorsal) und beige-rosa bzw. pinker Farbe (ventral) (Eaton, S., 2021; Ewringmann, 2016; Van der Woerdt, 2021), die zum Feuchthalten des Bulbus und zur Einflussnahme auf das Immunsystem ein Sekretgemisch aus Fetten, Eiweißen, Kohlenhydraten sowie Pheromonen sezerniert (Ewringmann, 2016). Dies garantiert dem Kaninchen einen gleichbleibenden Tränenfilm, obwohl es nur einmal alle 5 – 6 Minuten zu blinzeln scheint (Holmberg, 2017). Ähnlich beim Meerschweinchen, bei dem ein Blinzeln nur 2- bis 5-mal alle 20 Minuten beobachtet werden kann (Holmberg, 2017). Die Harder-Drüse erstreckt sich beim Meerschweinchen über den gesamten Orbitaboden und wird vom großen Sinus venosus umgeben (Eule et al., 2018). Kleinnager verfügen mit der u-förmigen Harder-Drüse, welche in der Orbita hinter dem Augapfel liegt, über 3 unterschiedliche Tränendrüsen mit einem gemeinsamen Ausführungsgang auf der Nickhautinnenseite im medialen Augenwinkel. Hinter dem Augapfel befindet sich bei

diesen zusätzlich eine Intraorbitaldrüse sowie eine Extraorbitaldrüse beim Musculus masseter, der nicht als Neoplasie fehlgedeutet werden sollte (Ewringmann & Glöckner, 2014; Holmberg, 2017; Montiani-Ferreira, 2009b; Van der Woerd, 2021). Das Sekret der Harder'schen Drüse wird von Kleinnagern auch zur Fellpflege genutzt (Ewringmann & Glöckner, 2014). Das bei Maus und Ratte rote, porphyrinreiche Sekret aus der in der Orbita platzierten Harder'schen Drüse, die einen großen Bereich der ventromedialen und hinteren Augenhöhle bedeckt (Eaton, J. S., 2022b), nimmt schützend Einfluss auf den Lichteinfall auf die Netzhaut (Visser, Wijnbergen & Bleich, 2014). Der Hamster hat 3 Drüsen, davon je eine intraorbital sowie extraorbital liegende Tränendrüse und die Harder-Drüse. Bei einer Blinzelfrequenz von etwa einmal pro Minute ermöglicht ihr Sekret einen beständigen Tränenfilm. Als eine der wenigen Säugetiere können Hamster auch mit jedem Auge unabhängig von dem anderen blinzeln (Holmberg, 2017). Beim Chinchilla befindet sich die Tränendrüse im temporalen Augenwinkel, im medialen Augenwinkel befinden sich zudem je Augenlid in der inneren Augenbindehaut 2 Tränenpunkte (Van der Woerd, 2021). Die Tränendrüse umgibt außerdem den Sehnerven sowie extraorbitale Muskulatur, ist von runder Form und lobuliert (Eaton, S., 2021). Auch Chinchillas haben eine Harder'sche Drüse, deren Sekret eine Blinzelfrequenz von nur 2- bis 4-mal alle 10 Minuten ermöglicht (Holmberg, 2022).

1.4.3.2. Ableitende Tränenwege

Nachdem die Tränenflüssigkeit mittels Lidschlag über die Kornea verteilt wurde, fließt sie in die zwischen Augenlidkante und Bulbus liegende Tränenrinne, *Rivus lacrimalis* ab, um sich am nasalen Augenwinkel in einer Vertiefung (Tränensee, *Lacus lacrimalis*) anzusammeln. Nahe der dort befindlichen Tränenkarunkel, *Caruncula lacrimalis*, führen an den Tränenpunkten der Lidkanteninnenseiten beginnende Tränenröhrchen die Tränenflüssigkeit in den Tränensack, *Saccus lacrimalis*, ab. Über den tierartlich unterschiedlich verlaufenden Tränennasengang, *Ductus nasolacrimalis*, wird die Flüssigkeit schließlich über das *Ostium nasolacrimale* in die Nasenhöhle bzw. den Nasenvorhof abgegeben (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Das Kaninchen besitzt im Vergleich zu den meisten anderen Säugetieren nur einen Tränenpunkt, der 3 mm – 4 mm vom Lidrand entfernt im nasalen Augenwinkel innerhalb der Lidbindehaut des unteren Augenlids liegt (Van der Woerd, 2021). Dessen Spaltöffnung wird häufig von einer kleinen Bindehautfalte bedeckt (Eaton, J. S., 2022a; Ewringmann, 2016). Der Tränennasengang des Kaninchens ist anatomisch besonders ausgeprägt und verläuft von der Augenhöhle bis zur Nasengrube (Van der Woerd, 2021). Durch das Tränenbein

hindurch folgt er einem bemerkenswert gewundenen anatomischen Weg mit abrupten Kursänderungen und Verengungen bis in den Oberkieferbereich. Dabei verläuft er auch entlang der Zahnwurzeln der Oberkieferbackenzähne sowie weit rostral an den Schneidezähnen vorbei (Eaton, J. S., 2022a). Zu Beginn endet der ungefähr 2 mm lange Kanal, der sich unmittelbar an die Eingangsöffnung des *Ductus nasolacrimalis* anschließt, nasoventral in einer Ausbuchtung als Tränensack. Durch das Foramen lacrimale, das den Tränenkanal an dieser Stelle stark einengt, verläuft er durch das Tränenbein in den Oberkieferknochen, hier an den Wurzelspitzen der ersten zwei vorderen Oberkiefer-Backenzähne vorbei in rostromediale Richtung zu der Wurzelspitze des Oberkieferschneidezahns (Ewringmann, 2016; Van der Woerd, 2021). Durch eine nach mediodorsal verlaufende Windung wird der Kanal zusätzlich zur Zahnschneidezahnspitze hier auch noch durch den Nasenknorpel eingeeengt und mündet letzten Endes dann unmittelbar vor dem Nasenvorhof auf dem Nasenboden (Ewringmann, 2016). Meerschweinchen haben nasal in beiden Augenlidern je einen Tränenpunkt (Müller, K. & Wase, 2014). Das Frettchen verfügt über einen ventralen und einen kleineren dorsalen Tränenpunkt (Fehr et al., 2015).

1.5. Muskeln des Augapfels - *Musculi bulbi*

Zu den Augapfelmuskeln, *Mm. bulbi*, welche den Bulbus wie eine Pyramide umgeben und dessen fein aufeinander abgestimmte Bewegung steuern, zählen 7 quer gestreifte Muskeln. Die geraden Augenmuskeln (*M. rectus dorsalis*, *M. rectus ventralis*, *M. rectus medialis* und *M. rectus lateralis*) entspringen im hinteren Bereich der Augenhöhle in der Nähe des Canalis opticus, ziehen am Sehnerven entlang und inserieren jeweils entsprechend ihrer Bezeichnung zwischen der Kornea und dem Augapfel-Äquator an der Sklera (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Beim Kaninchen haben die beiden medialen Augenmuskeln einen gemeinsamen Ursprung (Prince & Ruskell, 1960) und der *M. rectus dorsalis* ist oben auf dem Augapfel zu sehen (Ewringmann, 2016; Walde & Nell, 2008). Mit ihren Insertionspunkten rund um den Augapfel können sie diesen sowohl in horizontale als auch vertikale Richtung bewegen. Dem Meerschweinchen fehlt ein lateraler *M. rectus lateralis* und hat dafür 2 mediale, gerade Augenmuskeln (Holmberg, 2022). Inmitten dieser 4 Muskeln wird der Sehnerv vom *M. retractor bulbi* umschlossen, der an dessen Eintrittsstelle kaudal am Bulbus inseriert, um den Augapfel in die Augenhöhle zurückziehen zu können. Auch der zunächst dorsomedial entlang des Bulbus verlaufende *M. obliquus dorsalis* hat denselben Ursprungspunkt. Zur dorsolateralen Insertion an der Sklera zieht er, an dieser Stelle von einer Sehnenscheide umgeben, über

einen in der Periorbita eingelagerten Rollknorpel (*Trochlea*) dorsal über den Bulbus hinweg. Diese erlangte Hebelwirkung ermöglicht dem Muskel, den Augapfel zur Seite zu ziehen. Der *M. obliquus ventralis* entspringt als einziger Muskel ventromedial in der Augenhöhle, zieht ventral den Bulbus entlang, um ventrolateral an diesem zu inserieren (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020).

Ein weiterer Muskel der Augenhöhle ist der ebenso quer gestreifte *M. levator palpebrae superioris*, der dorsal über den Augapfel zum oberen Augenlid zieht und gemeinsam mit den Augapfelmuskeln vom *N. oculomotorius III*, *N. trochlearis IV* und *N. abducens VI* innerviert wird. Sympathisch innerviert sind hingegen die glatten, über den Bulbus zu den Augenlider ziehenden *Mm. tarsales* sowie der *M. orbitalis* (Salomon et al., 2020).

2. Anatomische Augenpräparate

Die Anfertigung anatomischer Augenpräparate ist in der Literatur für verschiedene Tierarten bereits mehrfach erforscht und beschrieben worden (Brandstetter, 2014; Dorobek, 2013; Liepert, 2013; Ravelhofer, 1996; Reimann, 2015) und soll daher an dieser Stelle bündig für das Kaninchenauge zusammengefasst werden. Die postmortale Dokumentation folgt einem vorgegebenen Schema, das aus einer umgehend postmortem erfolgreicher Enukleation, Fixation sowie Präparation des Augapfels besteht. Die anschließende Fotografie dient der bildlichen Darstellung zum Verständnis bereits wissenschaftlich erlangter Erkenntnisse und in der Literatur beschriebener Sachverhalte, sodass sie durch Dokumentation und Illustration die Wissenschaft mit der Praxis verbindet (Bengel, 1994; Korbel, 1990).

2.1. Enukleation, Fixation und Präparation

Eine Bulbusenukleation kann beim Kaninchen grundsätzlich nach erfolglosen Therapieversuchen verschiedener Augenerkrankungen wie fortschreitenden Entzündungen oder Ulzera im Rahmen einer Keratitis, einem vorangeschrittenen Exophthalmus oder Glaukom indiziert sein, da diese in der Regel zu anhaltenden hgrd. Schmerzen führen (Ewringmann, 2016; Holmberg, 2017). Hierzu sind in der Literatur bereits verschiedene Methoden, u. a. die transpalpebrale oder subkonjunktivale Enukleationstechnik zur chirurgischen Anwendung beim Säugetierauge beschrieben (Gelatt et al., 2021; Gelatt & Plummer, 2022; Miller, Ofri, Maggs & Slatter, 2017), als auch die Enukleation zu pathologischen Zwecken von SAUNDERS und RUBIN (1975), die von KORBEL (1994a) später zur Anwendung am Vogelauge angepasst wurde. Beim lebenden Kaninchen ist der Sehnerv vor der Durchtrennung nicht zwingend zu ligieren,

da dieser erst kurz vor Eintritt in den Augapfel von der Netzhautarterie umgeben wird. Die subkonjunktivale Technik ist jedoch, wie bei den meisten Säugetierarten, auch beim Kaninchen zur Schonung des großen Venenplexus (*Sinus orbitalis*) zu bevorzugen (Williams, 2021). Zur postmortalen Dokumentation sind die Augäpfel wie bereits in vorangegangenen Arbeiten dokumentiert, unmittelbar nach dem Tod des Tieres zu entnehmen und zur Fixation in 10%iges gepuffertes Formalin einzulegen. Zum Erhalt der vorderen Augenkammer, dem Entgegenwirken einer Volumenabnahme, infolge derer sich die Retina ablösen würde und um die Fixation zu beschleunigen, ist die Formalinlösung zusätzlich in die Camera anterior bulbi des Augapfels zu injizieren (Ravelhofer, 1996; Werther, K., Hufen, Strobel, Stein & Korbel, 2011). Die Bulbi bleiben somit monate- bis jahrelang in verwendbarem Zustand erhalten.

Das Diffundieren der Formalinlösung bis in das Innere des Glaskörpers dauert je nach Augengröße laut WERTHER et al. (2011, 2017) zwischen wenigen Stunden bis hin zu maximal 48 Stunden. Bereits 24 Stunden nach der Formalinfixierung kann eine Kallotierung der Augäpfel erfolgen, wofür RAVELHOVER (1996) zur Schonung des beim Vogel vorhandenen Augenfächers eine Schnittführung zur Unterteilung des Bulbus in eine größere ventronasale und kleinere dorsotemporale Augapfelhälfte für das Vogelauge beschreibt. Für das Fischeauge hat sich laut REIMANN (2015) eine horizontale Schnittebene in der Mitte des Augapfels bewährt, um den Processus falciformis (Pendant zum Augenfächer des Vogelauges) zu erhalten. Nach STROBEL (2010) sollte aus Gründen der Reproduzierbarkeit in jedem Fall eine einheitliche, dem angestrebten Darstellungsziel entsprechend gewählte Teilung der Augäpfel erfolgen.

3. Ophthalmologische Untersuchung des hinteren Augensegmentes

Zur Etablierung eines routinemäßigen Untersuchungsganges mit spezialisierten Untersuchungstechniken wurden in der Vogel- und Reptilienophthalmologie bereits verschiedene Studien durchgeführt (Kölle, Korbel, Bretzinger & Hoffmann, 1998; Korbel, 1994a, 1994b, 1996a, 1996b; Korbel et al., 1994; Korbel et al., 1995). Hieraus haben sich auch Möglichkeiten zur Fortentwicklung bzw. Anleihen für den ophthalmologischen Untersuchungsgang bei Kleinsäugetern ergeben, da sich auch bei diesen Spezies u. a. aufgrund der geringen Augengröße die Notwendigkeit zur Miniaturisierung und speziellen Handhabung ergeben haben. Bewährt hat sich die Verwendung von Ophthalmoskopierlupen mit +78 und/oder +90 Dioptrien und somit

hoher Brechkraft aus dem Pädiatriebereich, welche in der Säugetierophthalmologie (Hund, Katze, Pferd) nicht gebräuchlich sind, jedoch in der Vogel-, Reptilien- und Fischophthalmoskopie und auch der Kleinsäugerophthalmoskopie unabdingbar sind (Korbel, 1994a, 1996b). Im Laufe der Zeit haben sich auch anderweitige, „miniaturisierte“ ophthalmologische Techniken ergeben (Hagen, 2020; Korbel, 1994a; Korbel & Leitenstorfer, 1995).

Um nichts zu übersehen, sollte der Untersuchungsgang des hinteren Augensegmentes stets einem festen Schema folgen (Eule et al., 2018). Die Reihenfolge, in welcher die einzelnen Untersuchungsschritte durchgeführt werden, ist zwar nicht entscheidend, dennoch gibt es einige Tests, die darauffolgende Untersuchungsabschnitte beeinflussen oder die vor Ausschluss bestimmter Zustände nicht durchgeführt werden sollten. Auffälligkeiten sollten in einem standardisierten Untersuchungsbogen pro Auge festgehalten werden (Maggs, 2017). Zur Dokumentation des Schweregrads von Läsionen oder Anomalien ist die Verwendung eines standardisierten Bewertungssystems zu empfehlen, um eine objektive Vergleichbarkeit unabhängig vom Untersucher zu gewährleisten (Eaton, S., 2021). Die Augenuntersuchung findet idealerweise in einem abgedunkelten Raum bei gedimmtem Umgebungslicht statt, um störende Reflexionen auf ein Minimum zu reduzieren (Eule et al., 2018; Gelatt & Plummer, 2022; Maggs, 2017; Walde, 2008). Auch sollte wegen möglicher systemischer Nebenwirkungen auf eine Sedierung und Narkose als auch auf eine Oberflächenanästhesie des Patientenauges verzichtet werden, da u. a. die Sehfähigkeit, Reflexantwort, Größe der Pupillen sowie Bulbusstellung und -bewegung beeinflusst werden können (Walde, 2008). Durch Anästhetika kann es auch zu einem medikamenteninduzierten Enophthalmus kommen, der durch den nach ventromedial verlagerten Bulbus einen Vorfall des dritten Augenlides bedingen kann und eine Augenuntersuchung hierdurch erschwert bis unmöglich macht (Maggs, 2017).

Der Augenuntersuchungsgang mittels Punktlichtquelle, direktem und indirektem Ophthalmoskop folgt, um nichts zu übersehen, einem strikten Untersuchungsablauf. Begonnen wird mit dem gesund erscheinenden bzw. weniger veränderten Auge (Eule et al., 2018; Maggs, 2017). Sofern die Augen des Patiententieres nicht seitlich platziert sind und mit dem Untersuchungsinstrument beispielsweise beim Einsatz einer Punktlichtquelle oder dem direkten Ophthalmoskop nah an das Patientenauge heranzugehen ist, ist für den Untersucher empfehlenswert, sein rechtes Auge zur Untersuchung des rechten Patientenauges einzusetzen und das linke Auge wiederum zur

Begutachtung des linken Patientenauges zu nutzen. Im Idealfall hält der Untersucher dabei beide seiner Augen geöffnet und vermeidet ein Zukneifen des nicht zur Untersuchung eingesetzten Auges (Maggs, 2017).

Regelmäßige Übung und Beharrlichkeit machen jede ophthalmologische Untersuchungsmethode anwendbar. „Die Ophthalmologie stellt per se kein Buch mit sieben Siegeln dar“ (Korbel, 1994a). Die erfolgreiche Durchführung und Befundung hingegen sind unabdingbar und an die frequente Regelmäßigkeit der Durchführung sowie an eine hieraus resultierende Erfahrung in der Beurteilung der entsprechenden ophthalmologischen Strukturen gebunden. Während dies beim Haussäugetier sehr ausgeprägt z. B. für die Beurteilung von minimalen Abweichungen am Augenhintergrund bzgl. der „Collie Eye Anomalie“ (CEA) oder der „Progressiven Retinaatrophie“ (PRA) gegeben ist, ergibt sich diese Notwendigkeit aufgrund der großen artspezifischen anatomischen und morphologischen Variabilität auch am Auge der „Minor Species“. Aufgrund des größeren Sichtfeldes und um zu vermeiden, dass – bei beschränktem Bildwinkel und hierdurch notwendiger mäanderförmiger Durchmusterung des Augenhintergrundes - Details übersehen werden, bevorzugen Ophthalmologen den gesamten Augenfundus zunächst mit einer indirekten Lupe zur Übersichtsuntersuchung zu visualisieren, um anschließend alle interessanten Bereiche mit dem direkten oder monokularen indirekten Ophthalmoskop detaillierter bei höherer Vergrößerung zu untersuchen (Korbel, 1994a, 1994b, 2004, 2005; Korbel et al., 1995; Maggs, 2017).

Terminvereinbarungen mit Kleinsäuger-Besitzern, die von einer bereits seit längerem bestehenden Erkrankung berichten, sollten immer mindestens als dringlichen Fall eingestuft werden, da die kleinen Exoten als potenzielle Beutetiere ein ausgeprägt fehlendes subjektives Beschwerdeäußerungsvermögen bzw. Kaschierung von Krankheitssymptomen zeigen, um Beutegreifer nicht auf sich aufmerksam zu machen und daher klinische Symptome gar nicht oder erst sehr spät zeigen (König, Horst E., Korbel & Liebich, 2008; Korbel, 1994a; Montiani-Ferreira, 2009b). Bei bestehender Symptomatik kann eine kurze, dafür gründliche Anamneseerhebung hilfreiche Anhaltspunkte liefern (Walde, 2008). Daher sollte mindestens vom Besitzer erfragt werden, was seit welchem Zeitraum an einem oder beiden Auge aufgefallen sei, wie der bisherige Verlauf und eine eventuelle Therapie verliefen und ob weitere Erkrankungen aufgefallen oder behandelt worden sind (Miller et al., 2017). Denn die problemorientierte Annäherung an eine Diagnose erfordert zunächst die Erhebung einer gründlichen Anamnese mit Auflistung aller relevanten Informationen inklusive Angaben zu den

Haltungsbedingungen, den Fütterungsgewohnheiten, dem Impfstatus des Tieres, den aufgetretenen Symptomen sowie dem bisherigen Krankheitsverlauf (Ewringmann, 2016; Maggs, 2017). Der Kliniker bestimmt hieraus eine erste gewichtete Problemliste, an welcher sich die Untersuchung orientiert und eventuell weitergehende Fragen aufwirft (Miller et al., 2017).

Einer Augenuntersuchung sollte auch stets eine klinische Untersuchung des Tieres vorausgehen, insbesondere wenn sich bei der Anamnese keine augenspezifischen Hinweise ergeben haben (Eule et al., 2018). Denn zum einen treten Veränderungen an den Augen häufig infolge systemischer Erkrankungen auf, zum anderen beim Kleinsäuger des öfteren auch bei ursprünglichen Zahnerkrankungen, da Erreger der anatomisch nahe am Auge liegenden Zahnwurzeln leicht übergreifen können (Ewringmann, 2016). Zur Überprüfung sollte deshalb bei Kleinsäufern routinemäßig vor allem bei Meerschweinchen und Chinchillas (Montiani-Ferreira, 2009b), eine Überprüfung des Zahnstatus erfolgen (Gelatt & Plummer, 2022; Maini & Hartley, 2019).

Zu Beginn wird bei normal hellem Kunst- oder Tageslicht eine Übersichtsuntersuchung beider Augen zur Überprüfung der Sehfähigkeit, dem Vergleich beider Pupillenweiten, der Überprüfung der Tränenproduktion und auch verschiedener Reflexe durchgeführt (Eule et al., 2018). Im Seitenvergleich werden aus verschiedenen Richtungen beide Augäpfel sowie die Augenhöhlen im Abstand von ca. 66 cm bzw. einer Armlänge (Montiani-Ferreira, 2009b) auf Symmetrie, vorhandenem Ausfluss, der Blinzelrate der Augen sowie auf Abweichungen von der normalen Augapfel-Position (Exophthalmus, Enophthalmus, Nickhautvorfall, Strabismus, Entropium, Ektropium) untersucht (Gelatt & Plummer, 2022; Van der Woerd, 2021). Beim Kaninchen ist eine Augenuntersuchung problemlos möglich (Van der Woerd, 2021). Bei Frettchen birgt die direkte Ophthalmoskopie die Gefahr eines Bisses, da unmittelbar am Tierauge untersucht wird. Zur Durchführung eines vollständigen ophthalmoskopischen Untersuchungsganges, insbesondere bei Verdacht auf eine Augenerkrankung, ist das Frettchen daher eventuell in Narkose zu legen. Zwangsmaßnahmen sind aufgrund des naturgemäß quirligen Wesens bei Frettchen nahezu immer erforderlich. Die Untersuchung des Augenhintergrundes bei Mäusen, Ratten, Rennmäusen, Hamstern und Zwerghamstern ist aufgrund der kleinen Augengröße und dem erschwerten Handling der Kleinnager oft nicht möglich (Ewringmann & Glöckner, 2014).

Bei der Untersuchung des hinteren Augensegmentes wird der Glaskörper und der

Augenhintergrund (die neurosensorische Netzhaut, das retinale Pigmentepithel, falls vorhanden das Tapetum lucidum, Choroidea, Sklera und auch der Sehnervenkopf) genau untersucht. Im Anschluss an die Detailuntersuchung beider Augen können weitere Untersuchungen wie eine Spülung des Tränen-Nasen-Kanals, eine Fluoreszenzangiografie, Elektroretinographie, eine Punktion des Auges oder der Orbita, die Vermessung der Lidspalte und auch bildgebende Diagnostik durchgeführt werden (Eule et al., 2018). Eine Sonografie ist dabei insbesondere angeraten, wenn die Inspektion des Augenhintergrundes durch bestehende Beeinträchtigungen, wie z. B. Einblutung in die Augenkammer nicht möglich ist (Van der Woerdt, 2021). Abschließend werden die ermittelten Symptome und Befunde in einer Problemliste zusammengefasst, unter Beachtung potenzieller Differenzialdiagnosen eine Diagnose mit Prognose und Therapieempfehlung gestellt und dem Patientenbesitzer Maßnahmen zur Prophylaxe bzw. der Verhinderung eines Wiederauftretens der Augenerkrankung mitgeteilt (Eule et al., 2018; Maggs, 2017).

3.1. Zwangsmaßnahmen, Medikamente

Die wenigsten Kleinsäuger sind an ein regelmäßiges Handling, geschweige denn an eine Fixation gewöhnt. Zwangsmaßnahmen gewährleisten jedoch eine schnellere und somit stressärmere Untersuchung des Tieres. Folglich sind sie für eine gründliche Augenuntersuchung unerlässlich. Während daher mit einer Hand die Hinterbeine des Kaninchens fixiert werden, erfolgt mit der anderen Hand auch eine Fixation des Rückens bzw. Nacken des Tieres (Gelatt & Plummer, 2022; Holmberg, 2017). Der Körper von Mäusen und Ratten wird am besten von den Handflächen und -ballen einer Hilfsperson fixiert, während der Kopf von Daumen und Zeigefinger gestützt wird. Kleine Nagetiere können auch in einem Spritzenzylinder fixiert werden, wobei vorne der Kopf und hinten der Schwanz herausragen (Beaumont, 2002). Zwangsmaßnahmen beim Frettchen sind aufgrund des naturgemäß quirligen Wesens nahezu immer erforderlich. Hierzu hat sich neben einem Nackengriff bewährt, die Beine des Frettchens frei vom Untersuchungstisch herunterhängen zu lassen und den Rücken des Tieres von dem Unterarm einer Hilfsperson fixieren zu lassen. Dabei sind jedoch häufige Pausen zur Stressminimierung einzulegen (Montiani-Ferreira, 2009a). Der Patient sollte auf einem höhenverstellbaren Tisch auf einer rutschfesten Unterlage untersucht werden (Eule et al., 2018). Ein Helfer fixiert das Tier mit dem zu untersuchenden Auge in Richtung des Untersuchers. Da die Augen beim Kleinsäuger stark seitlich liegen, sitzt der Untersucher parallel der Tischkante. Mit einer Hand fixiert der Untersucher den Patientenkopf und spreizt mit zwei Fingern z. B.

Zeigefinger und Daumen derselben Hand die Lider des Auges (Eule et al., 2018).

Damit die Peripherie der Linse, der Glaskörper und der Augenhintergrund nicht von der Iris verdeckt werden, wird in jedes Auge ein Tropfen eines Mydriatikums, z. B. Tropicamid- oder Atropin-Augentropfen appliziert. Das Parasympatholytikum bewirkt eine Muskelentspannung des glatten M. sphincter pupillae und führt somit zur Weitstellung der Pupille, da Linse, Glaskörper und Augenhintergrund erst in Mydriase beurteilt werden können (Eule et al., 2018). Die 30-minütige Wirkdauer setzt nach ungefähr 20 Minuten ein. Das Tier sollte daher für diesen Zeitraum in einem dunklen Raum oder einer abgedunkelten Transportbox untergebracht werden, um eine Verzögerung des Wirkungseintritts z. B. durch Beleuchtung der Augen zu verhindern (Eule et al., 2018). Eine vollständige Weitstellung der Pupille erfordert bei pigmentierten Tieren stets eine längere Wartezeit als bei albinotischen Tieren. So dauert diese im Vergleich zur ca. 1-stündigen Wirkdauer bei Albinos bei pigmentierten Spezies mit insgesamt 3 – 5 Stunden jedoch auch länger an (Eaton, S., 2021). Bei oraler Aufnahme des Mydriatikums über den Tränen-Nasen-Kanal können ein starker Speichelfluss und eine erhöhte Herzfrequenz auftreten. (Eule et al., 2018; Walde & Nell, 2008). Frettchen sollte 1%iges Tropicamid appliziert werden, um den Augenhintergrund vollständig beurteilen zu können (Van der Woerdt, 2021). Bei manifestem Glaukom ist eine Mydriasis jedoch grundsätzlich kontraindiziert (Eule et al., 2018). Beim Kaninchen ist außerdem zu beachten, dass Tropicamid und Atropin bei stark pigmentierten Tieren und somit viel vorhandener Atropinase im Pigment durch dieses Enzym gespalten werden und aufgrund ihrer schnellen Verstoffwechslung nicht mehr wirken können. In diesem Fall ist zusätzlich ein Tropfen von 1%igen Atropin-Augentropfen oder 10%iges Phenylephrin-Hydrochlorid zu verabreichen (Eule et al., 2018; Van der Woerdt, 2021). Atropin steigert bei Kaninchen zudem die Lichtempfindlichkeit (Ewringmann, 2016). Zur Erzielung einer Mydriase bei Ratten und Mäusen wird 1%iges Tropicamid verwendet (Beaumont, 2002). Bei Nagern mit stark pigmentierter Iris kann die Wirkung von Mydriatika möglicherweise durch deren Bindung an vorhandenes Melanin auch bei diesen Tieren herabgesetzt sein (Beaumont, 2002; Eaton, S., 2021). In diesem Fall kann eine ausreichende Mydriasis durch drei- bis viermaliges Verabreichen von 1%igen Atropin-Augentropfen mit 10%igem Phenylephrin alle 5 Minuten erzielt werden (Beaumont, 2002; Montiani-Ferreira, 2009b).

3.2. Untersuchungsinstrumente

Je nach Untersuchungsziel und gewählter Untersuchungsmethode werden für die Untersuchung des hinteren Augensegmentes verschiedene Instrumente benötigt:

- Zur Routineuntersuchung wird eine fokale Lichtquelle (Otoskoplämpchen oder Diaskleralkegel bzw. Durchleuchter) mit regelbarer Beleuchtungsintensität eingesetzt, die eine Untersuchung der Augenumgebung und Adnexe, der Kornea, der vorderen Augenkammer, der Iris und Linsenvorderfläche sowie der Linse und des Glaskörpers ermöglicht (Eule et al., 2018; Kölle et al., 1998; Korbel, 1994a, 1994b; Reese, Korbel & Liebich, 2008). Bei Verwendung einer unmittelbar vor das Patientenaugenge gehaltenen Lupe ist durch indirekte Ophthalmoskopie die Untersuchung des Augenhintergrundes möglich (Maggs, 2017).
- Ein Handspaltlampen-Biomikroskop ermöglicht eine Untersuchung der transparenten Medien der Augen wie Kornea, Vorderkammer, Linse und auch des Glaskörpers. Die Verwendung dient der Vergrößerung und dem optischen Schnitt aller lichtbrechenden Flächen, wobei die flexibel schwenkbare Lichtquelle des Beobachtungsmikroskops mit Vergrößerungsoptik hierzu nicht in die Untersuchungsrichtung zeigen darf. Dabei dient der spaltförmige Lichtstrahl der Lagebestimmung von Auflagerungen, Trübungen oder Fremdinhalt. Bei Öffnung der Blende kann mit dem runden Lichtstrahl unter Vergrößerung untersucht werden und mit Blaulicht auch ein Fluoreszintest erfolgen (Eule et al., 2018; Kölle et al., 1998; Korbel, 1994a, 1994b).
- Das direkte Ophthalmoskop mit Rekoß-Scheibe ermöglicht eine Untersuchung des gesamten Auges (Eule et al., 2018), wobei die Lichtintensität sowie Form und Größe des Lichtstrahls (z. B. rund, spaltförmig) durch unterschiedliche Blenden angepasst werden kann. Es zählt daher zu den Standard- Untersuchungsinstrumenten einer Augenuntersuchung, das durch den Veterinär oft zusammen mit dem Otoskop als Kombinationsset erworben wird. Dabei wird ein Lichtstrahl durch einen Spiegel oder ein Prisma in das Patientenaugenge gelenkt und durch eine im Ophthalmoskop vorhandene Linse zum Untersucherauge reflektiert (Gelatt & Plummer, 2022). Zum Ausgleich von Fehlsichtigkeit beim Untersucher oder dem Patienten kann die Dioptrienzahl der Fokussierlinse eingestellt und am Ophthalmoskop angezeigt werden. Auch können mit Fluoreszin angefärbte Hornhautdefekte mittels Blaufilter sowie durch eine bessere Kontrastierung mit dem Grün- bzw. Rotfrei-Filter sogar Blutgefäße oder auch vorhandene Blutungen in der Netzhaut hervorgehoben werden. Eine eingebaute Rekoß-Scheibe dient der Messung festgestellter Niveauunterschiede am Augenhintergrund. Der

Papillenrand ist hierbei der Ausgangswert des Fundusniveaus (Eule et al., 2018; Kölle et al., 1998; Korbel, 1994a, 1994b; Maggs, 2017).

- In der Kleinsäugerophthalmoskopie hat sich analog der Vogel-, Reptilien- und Fischophthalmoskopie die Verwendung von Ophthalmoskopierlupen mit +78 und/oder +90 Dioptrien und somit hoher Brechkraft bewährt (Korbel, 1994a, 1996b). Lupen mit +30 und/oder +40 Dioptrien begünstigen beim Kleinsäuger bei gemeinsamer Verwendung mit dem indirekten Ophthalmoskop eine Untersuchung des Augenhintergrundes (Eule et al., 2018). Mit einer kleineren Dioptrienzahl kann ein kleinerer Fundusbereich eingesehen werden, der jedoch stärker vergrößert dargestellt wird. So sind Details besser erkennbar. Zur Übersichtsuntersuchung sollte eine größere Dioptrienzahl gewählt werden (Kölle et al., 1998; Korbel, 1994a, 1994b; Maggs, 2017; Maini & Hartley, 2019). EATON (2021) empfiehlt beim Kaninchen die Verwendung einer +28 Dioptrien-Linse, bei Maus und Ratte entsprechend eine +40 und +60 Dioptrien-Linse.
- Das binokulare indirekte (Kopfband-)Ophthalmoskop ermöglicht bei gemeinsamer Verwendung mit einer der genannten Lupen eine genaue Untersuchung des Augenhintergrundes. Die Lichtquelle ist hier zwischen beiden Augen im Kopfband integriert, was eine Tiefenwahrnehmung zur Unterscheidung von erhabenen und tieferliegenden Läsionen ermöglicht. Dabei können mit der freien Hand der Kopf des Patienten fixiert und dessen Augenlider gespreizt werden (Eule et al., 2018; Kölle et al., 1998; Korbel, 1994a, 1994b; Maggs, 2017).
- Der Augenhintergrund kann auch mit dem monokularen indirekten Ophthalmoskop untersucht werden. In diesem ist die Lupe bereits integriert, weshalb die Untersuchung mit einer Hand ausführbar ist. Es ist jedoch kein stereoskopisches bzw. räumlich erscheinendes Bild sichtbar, weshalb die Tiefenwahrnehmung gering ist (Eule et al., 2018).
- Eine Funduskamera dient der Fotografie des Augenhintergrundes (Eule et al., 2018; Kölle et al., 1998; Korbel, 1994a, 1994b). Beim Kleinsäuger können sowohl moderne digitale oder auch filmbasierte Handfunduskameras eingesetzt werden (McMullen, Millichamp & Pirie, 2021). Zur Fluoreszenzangiografie werden Filter eingesetzt (Eule et al., 2018).

3.3. Untersuchung des Glaskörpers (mit einer Punktlichtquelle)

Bei der Routine-Untersuchung mit einer fokalen Lichtquelle können nach Weitstellung der Pupille mit einem Mydriatikum die Augenumgebung und Adnexe, die Hornhaut, vordere Augenkammer, Iris und Linsenvorderfläche sowie die Linse und der Glaskörper

betrachtet werden (Eule et al., 2018; Kölle et al., 1998; Korbel, 1994a, 1994b; Reese et al., 2008; Walde, 2008). Ein Helfer fixiert das Tier mit dem zu untersuchenden Auge in Richtung des Untersuchers. Da beim Kaninchen die Augen stark seitlich liegen, sitzt der Untersucher parallel der Tischkante. Mit einer Hand fixiert der Untersucher den Kaninchenkopf und spreizt mit zwei Fingern, z. B. Zeigefinger und Daumen derselben Hand, die Lider des Kaninchenauges (Eule et al., 2018), ohne dabei Druck auf den Augapfel auszuüben (Walde, 2008). Mit der anderen Hand hält der Untersucher den Diaskleralkegel und blickt über diesen hinweg. In dieser Position nähert er sich dem Kaninchenaug und untersucht sowohl im auffallenden, seitlichen Licht (Auflicht) sowie im durchfallenden Licht (Durchlicht) (Eule et al., 2018).

Im Auflicht, bei welchem bis zum vorderen Glaskörper – bei linsenlosen Augen auch bis zum Augenhintergrund - untersucht werden kann, weicht der Blickwinkel des Untersuchers von der Beleuchtungsrichtung ab. Wird die Beleuchtungseinheit des Handspaltlampen-Biomikroskops zur Seite bewegt und ist somit unterschiedlich zur Blickrichtung des Untersuchers, können Fremdinhalt und Auflagerungen von der Kornea bis hin zum Glaskörper exakt lokalisiert werden. Bei Blick durch das Beobachtungsmikroskop mit Vergrößerungsoptik kann der Lichtstrahl spaltförmig eingestellt werden, um die Augenanteile im optischen Schnitt zu beurteilen, oder auch rund (Eule et al., 2018; Reese et al., 2008).

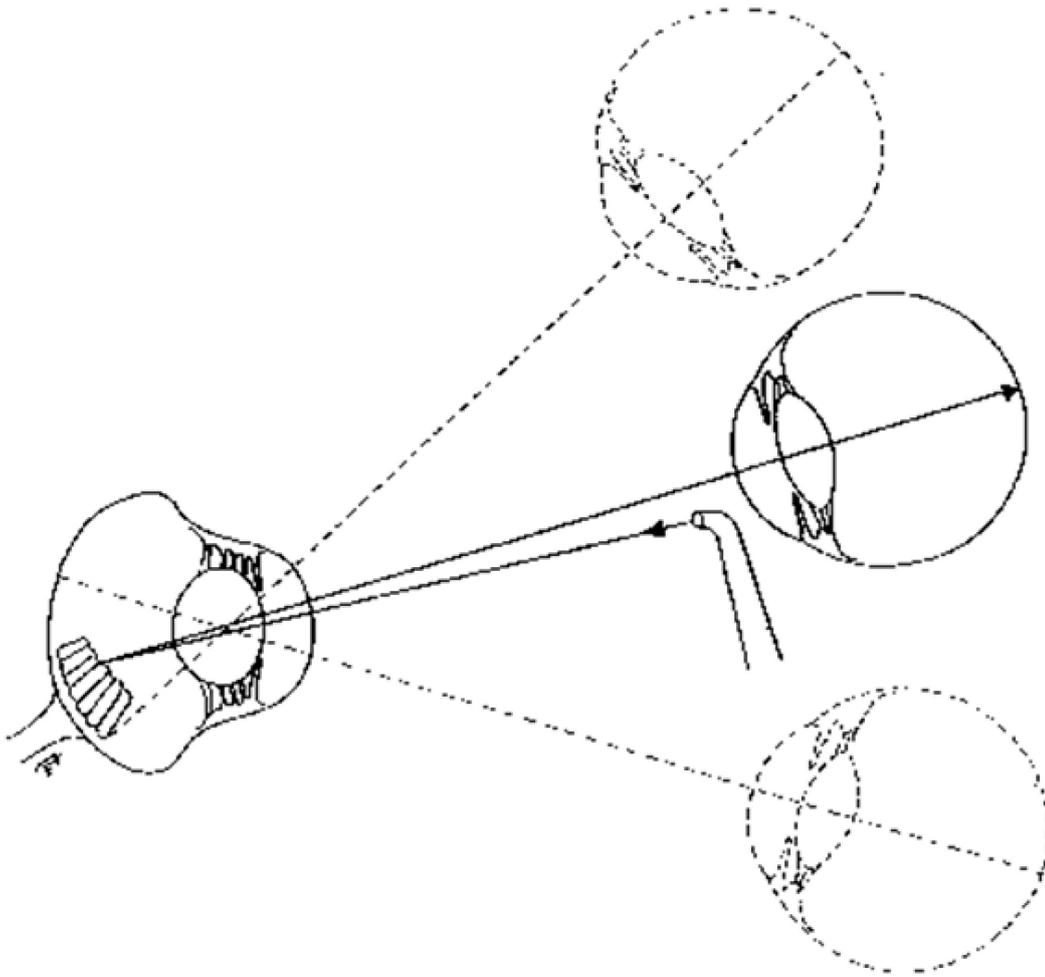


Abbildung 1: Schemazeichnung Monokulare Ophthalmoskopie (König, Horst E, Korbel & Liebich, 2016).

Zeigt der Lichtstrahl der unmittelbar vor das Auge gehaltenen Lichtquelle in Blickrichtung des Untersuchers, kann im durchfallenden Licht (Durchlicht) untersucht werden. Durch Änderung des Abstandes zum untersuchten Auge wird eine Fokussierung erreicht. Bei Nahbetrachtung direkt vor dem Auge unter Verwendung einer Lupe kann bei seitlicher Durchleuchtung die vordere Augenkammer und bei Durchleuchtung durch die Pupille der vordere sowie mittlere Anteil des Glaskörpers untersucht werden. Bei Durchleuchtung durch die Pupillenöffnung wird der Lichtstrahl von Iris und Augenhintergrund reflektiert, sodass im reflektierten Licht untersucht wird (Retroillumination, Fundusreflex) (Eule et al., 2018; Korbel, 1994a; Reese et al., 2008). Beim Kleinsäuger erscheint die Pupille durch das vom Fundus reflektierte Licht je nach beleuchtetem Fundusbereich und dort vorhandenem Pigment, braun bis rot (Eule et al., 2018; Walde & Nell, 2008). Ohne Lupe kann der Fundusbereich aus einem Abstand von einer Armlänge (Distanzuntersuchung) bis unmittelbar vor dem untersuchten Auge (Nahbetrachtung) unterschiedlich fokussiert und detailliert betrachtet werden. Aus dieser

Annäherung an das Patientenaugengeht auch die direkte Ophthalmoskopie hervor. Unter Verwendung einer Lupe kann dabei das Glaskörperriveau zur Untersuchung der vorderen bis mittleren Glaskörperabschnitte erreicht werden (Eule et al., 2018; Korbel, 1994a; Reese et al., 2008).

Pathologische Veränderungen stellen sich im Fundusreflex je nach ihrer Dichte unterschiedlich dar. Je dichter die Veränderung ist, desto mehr reflektiertes Licht wird absorbiert und umso dunkler erscheint die Veränderung. Weniger dichte Auffälligkeiten stellen sich aufgrund einer Lichtstreuung sogar heller als im Auflicht dar. Die Lokalisation der Auffälligkeit erfolgt durch Beurteilung ihrer Bewegungsrichtung im Vergleich zur Pupillenebene (parallaktische Verschiebung), sobald sich der Untersucher mit der Lichtquelle bewegt. Findet eine Verschiebung in entgegengesetzte Richtung des Untersuchers statt, liegt die Veränderung vor dem Pupillenrand in der Kornea oder der vorderen Augenkammer. Bei Mitbewegung in die gleiche Richtung liegt diese hinter der Pupillenebene und somit in der Linsensubstanz oder dem Glaskörper. Erfolgt trotz Verschiebung der Lichtquelle keine Bewegung, deutet dies auf eine Lage in Höhe des Pupillenrandes hin und die Veränderung ist somit der vorderen Linsenkapsel zuzuordnen (Eule et al., 2018; Korbel, 1994a).

3.3.1. Tierartige Besonderheiten beim Kleinsäuger (Glaskörper)

Nach Erweiterung der Pupillen ist eine Übersichtsuntersuchung des vorderen Glaskörperabschnittes zwar auch mit einer Punktlichtquelle möglich, sollte zur vollständigen bzw. Detailuntersuchung jedoch um eine Lupe oder besser noch der Handspaltlampe ergänzt werden (Korbel, 1994a; Maggs, 2017; Walde & Nell, 2008). Der Glaskörper wird im auffallenden und durchfallenden Licht auf Transparenz und Konsistenz hin untersucht. Physiologischerweise ist der Glaskörper beim Kleinsäuger glasklar durchscheinend (Eule et al., 2018; Walde & Nell, 2008). Wie das Kammerwasser ist auch der Glaskörper aufgrund seiner Transparenz bei der Augenspiegelung praktisch nicht sichtbar (Maggs, 2017).

Auffällige Befunde sind Trübungen wie Zubildungen und Einlagerungen, z. B. Blut, Parasiten oder Entzündungszellen. Letztere sind im reflektierten Licht als dunkle, wolkenartige Strukturen erkennbar (Eule et al., 2018). Gelegentlich fällt innerhalb des Glaskörpers eine Arteria hyaloidea persistens auf (Maggs, 2017), eine nach der Geburt als embryonales Überbleibsel fortbestehende Arterie. Häufig bei jungen Ratten zu finden, erstreckt sich diese von der Sehnervpapille bis zum hinteren Pol der Linse und verschließt

sich im Laufe der Zeit normalerweise automatisch. Gelegentlich kann ihr Fortbestehen jedoch auch zu vorübergehenden Glaskörperblutungen führen (Holmberg, 2017). Bei der degenerativen Erkrankung einer Asteroiden Hyalose werden kalzifizierte Strukturen in den Glaskörper eingelagert (Maggs, 2017). Im Gegensatz hierzu werden bei der Synchisis scintillans, einer seltenen degenerativen Erkrankung, Cholesterinkristalle in den Glaskörper eingelagert (Maggs, 2017). Auch Aderhaut- oder Netzhautzysten, Netzhautablösungen oder -risse können auftreten (Maggs, 2017). Verwirbelungen bzw. eine Verflüssigung des Glaskörpers sind mit dem direkten Ophthalmoskop bei Augenbewegung in Form von 2 klaren, sich gegeneinander verschiebende, flüssige Phasen zu erkennen (Eule et al., 2018; Maggs, 2017). Auch eine Aggregation der Kollagenfibrillen des Glaskörpers (Syneresis), die während des physiologischen Alterungsprozesses zur Verflüssigung des Glaskörpers führt, ist bei jungen Tieren als pathologischer Zustand zu werten (Eule et al., 2018).

Die Ursachen pathologischer Befunde sind vielfältig und können durch Traumata, Degeneration, Entzündungen, falsch verlaufende Larvenwanderung bei einer Parasitose, durch fortbestehendes embryonales Gewebe, Neoplasien oder auch durch Enzymdefekte bei Stoffwechselstörungen bedingt werden (Eule et al., 2018).

3.4. Untersuchung des Augenhintergrundes (mit dem Ophthalmoskop)

Nach Untersuchung des Glaskörpers werden die sichtbaren Strukturen des Augenhintergrundes untersucht, zu denen die neurosensorische Netzhaut, das retinale Pigmentepithel, falls vorhanden das Tapetum lucidum, die Choroidea, die Sklera und auch der Sehnervenkopf zählen. Deren Untersuchung wird bei Kenntnissen und dem Verständnis ihrer anatomischen Zusammenhänge zueinander erheblich erleichtert. Dabei stellt die Beurteilung des Augenhintergrundes den anspruchsvollsten Part einer vollständigen Augenuntersuchung dar und ist auch der häufigste Grund zur Überweisung an einen Ophthalmologen. Der Lichtstrahl trifft bei der Ophthalmoskopie, aufgelistet in der Reihenfolge von den oberflächlichen zu den tiefer liegenden Strukturen des Augenfundus auf folgende sichtbare Komponenten (Korbel, 1994a; Maggs, 2017):

- Retina/Netzhaut (transparent):
 - Gefäße und Nerven der neurosensorischen Retina (wachsartig und mehrschichtig),
 - das retinale Pigmentepithel (RPE): als einzelne Zellschicht nur sichtbar,

wenn sie Melaninpigment enthält und somit nicht bei albinotischen Tieren (beim Frettchen nur in der ventralen Fundushälfte außerhalb des Tapetum lucidums) (Maggs, 2017).

- Tapetum lucidum (meistens im dorsalen Fundusbereich): Sorgt in der Aderhaut von Fleischfressern, Wiederkäuern und Pferden für eine optimale Verwertung des Lichtes bei Dämmerung (Maggs, 2017). Es ist somit nur beim Frettchen vorhanden (Miller, 1997) und fehlt den übrigen Kleinsäugetern (Ewringmann, 2016; Ewringmann & Glöckner, 2012, 2014; Fehr et al., 2015; Fehr, Sassenburg & Zwart, 2014; Holmberg, 2017; Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020).
- Choroidea/Aderhaut: Bei fehlendem Tapetum lucidum im subalbinotischen oder albinotischen Fundus zwischen RPE und Sklera sichtbar, meistens pigmentiert und reich an Blutgefäßen (Maggs, 2017).
- Sklera: Ihre innere, hellbraune Oberfläche ist bei fehlendem Tapetum lucidum im subalbinotischen bzw. schwach pigmentierten oder albinotischen Fundus sichtbar (Maggs, 2017).
- Sehnervenkopf (Papilla nervi optici, Papille, Sehscheibe): Bei allen Haussäugetieren in tierartlich unterschiedlicher Ausprägung am hinteren Augenpol sichtbar (Maggs, 2017).

Folgende 4 Strukturen sollten bei der Untersuchung daher systematisch beurteilt werden: die Blutgefäße der Netzhaut, die Papille, der tapetumfreie Augenhintergrund und beim Frettchen auch das Tapetum. Dabei weisen nachfolgende Auffälligkeiten auf eine Erkrankung hin (Maggs, 2017):

- Veränderungen der Retinagefäße: Blasse Erscheinung (bei Anämie oder Netzhautdegeneration) oder vergrößerte bzw. gewundene Blutgefäße (bei Chorioretinitis, systemischer Hypertonie) (Maggs, 2017).
- Probleme die gesamte Netzhaut einsehen zu können: Netzhautödem oder -ablösung, im Sichtfeld vorhandene Glaskörpertrümmer oder auch eine Spaltbildung der Sklera (Kolobom) (Maggs, 2017).
- Veränderter Sehnervenkopf: Vergrößerung oder Hervortreten (Entzündung des Sehnervs, Papillenödem), Verkleinerung oder Vorwölbung (Mikropapille, Kolobom, Hypoplasie, glaukomatöse Schädigung des Sehnervenkopf, Atrophie)

oder vaskuläre Veränderungen (Anämie, Blutungen) (Maggs, 2017).

- Punktförmige Farbveränderungen: Melanin (schwarz), Ödeme (grau), Ansammlung von Entzündungszellen (cremeweiß bis grau), Lipidansammlung (cremeweiß), Blutungen (rot bis violett), Netzhautfalten (grau), Fibrose oder Gliose (grau) oder Neoplasien (typischerweise rosa bis schwarz) (Maggs, 2017).
- Veränderte Reflexion des Tapetums (beim Frettchen): Hyperreflexion (bei chronischen und inaktiven Prozessen) oder Hyporeflexion (bei akuten und aktiven Prozessen) (Maggs, 2017).

3.4.1. Direkte Ophthalmoskopie

Der Augenhintergrund wird nach Weitstellung der Pupille mit einem unmittelbar vor das eigene und nahe am Patientenauge gehaltenen direkten Ophthalmoskop betrachtet (Eule et al., 2018; Korbel, 1994a; Maggs, 2017; Walde, 2008). Ein runder Lichtstrahl, der im Optimalfall der Pupillengröße angepasst wird, verhindert störende Reflexionen der Kornea. Das Fokussierlinsenrad des direkten Ophthalmoskops wird zur Fokussierung des Augenfundus auf 0 Dioptrien eingestellt und das Ophthalmoskop nah am dominanten Auge auf der Stirn des Untersuchers aufgelegt. Mit der anderen Hand werden die Lider des Patientenauges gespreizt (Maggs, 2017). Mit einer Armlänge Abstand wird beim Frettchen zunächst der Tapetum- bzw. bei den anderen Kleinsäugerarten der Fundusreflex aufgesucht, um sich dann dem Patientenauge mit vorgehaltenem direkten Ophthalmoskop bis auf 2 – 3 cm Abstand anzunähern. Falls erforderlich kann die Dioptrienzahl am Ophthalmoskop angepasst werden. Das Auge wird in Quadranten untersucht, wobei der Sehnervenkopf als Referenzpunkt dient (Maggs, 2017). Der sichtbare Bildbereich ist minimal und durch das direkte Ophthalmoskop, abhängig von der Größe des Patientenauges, ungefähr um das 17- bis 19-fache vergrößert, so dass beispielsweise um die Papille herum nur ca. der halbe Papillendurchmesser zu sehen ist (Walde, 2008). Der Untersucher sieht ein aufrecht stehendes und seitenrichtig, ausgeprägt vergrößertes Abbild des Fundus (Maggs, 2017; Walde, 2008). Eine vollständige Untersuchung des Augenhintergrundes mittels direkter Ophthalmoskopie ist zum einen daher sehr zeitaufwendig, zum anderen durch permanente Augenbewegungen des Patiententieres erschwert, was einen Vergleich der kleinen Ausschnitte fast unmöglich macht. Diese Technik eignet sich daher am ehesten, um bei der indirekten Ophthalmoskopie gefundene Auffälligkeiten gezielt und im Detail mittels direkter Ophthalmoskopie zu untersuchen (Korbel, 1994a; Maggs, 2017).

Beim Kaninchen erfolgt bei Blick durch die Linse des Patientenauges eine 25,3-fache Vergrößerung des Sichtfeldes, sodass nur ein kleiner Fundusbereich detailliert betrachtet werden kann (Eule et al., 2018). Zur Auffindung der Papille des Kaninchens hat der Untersucher nach dorsal und nasal zu sehen (Eule et al., 2018; Maini & Hartley, 2019), da sich der Sehnervenkopf bei Kaninchen und Meerschweinchen in der oberen Fundushälfte befindet (Holmberg, 2017; Walde & Nell, 2008). Bei Frettchen birgt die direkte Ophthalmoskopie das Risiko eines Tierbisses, da unmittelbar am Tierauge untersucht wird. Zur Durchführung eines vollständigen ophthalmoskopischen Untersuchungsganges, besonders bei Verdacht auf eine Augenerkrankung ist das Frettchen daher eventuell in Narkose zu legen. Zur klaren Betrachtung des Augenfundus der Ratte ist am direkten Ophthalmoskop eine Dioptrienzahl von +8 einzustellen, was auf eine Hyperopie (Weitsichtigkeit) schließen lässt (Beaumont, 2002).

Die für das Menschaugen entwickelten und am Ophthalmoskop vorschaltbaren Farbfilter sind beim Frettchen aufgrund des stark reflektierenden Tapetums und auch bei den anderen Haussäugetieren nur von begrenztem Nutzen, können aber um die Ausdehnung einer Läsion abschätzen zu können, herangezogen werden. Dabei ist zu beachten, dass das RPE das rotfreie Licht absorbiert und Läsionen in der darunter liegenden Choroidea abgeschwächt bzw. vor dem RPE liegende Auffälligkeiten besonders hervorgehoben werden können (Maggs, 2017).

Die Ausmessung erkannter Niveauunterschiede erfolgt mit der am Ophthalmoskop eingebauten Rekoß-Scheibe, dem Korrekturlinsenrad mit verschiedenen Einzellinsen. Der Papillenrand ist hierbei der Ausgangswert des Fundusniveaus (Eule et al., 2018) und wird bei einer am Ophthalmoskop gewählten Linse von 0 Dioptrien erreicht. Im Vergleich hierzu rückt die Hinterseite der Patientenlinse mit einer ausgewählten Ophthalmoskop-Linse von +8 Dioptrien in den Fokus des Sichtfeldes (Maggs, 2017). Ausbuchtungen und Vorwölbungen können den Prinzipien der parallaktischen Verschiebung folgend bei der Ophthalmoskopie mittels perspektivischer Verschiebung beurteilt werden: Bei Bewegung des Untersuchers mit der Lichtquelle bewegt sich ein vorhandener Niveauunterschied, wie z.B. einer Papillenschwellung, die vor der Ebene des Papillenrandes (Fundusniveau) liegt, rascher und in die entgegengesetzte Richtung des Untersuchers. Eine Papillenausbuchtung, die tiefer zum Fundusniveau liegt, bewegt sich hingegen scheinbar in die Bewegungsrichtung des Untersuchers (Eule et al., 2018). Durch eine Verlagerung des Fokus von der Läsion hin zum Augenfundus, kann bei einem füsamen Patienten eventuell auch der dioptrische Unterschied zum Retinaniveau

ermittelt werden (Maggs, 2017).

Da mit handelsüblichen direkten Ophthalmoskopen grundsätzlich nur ein Teil des einsehbaren Augenhintergrundes ausgeleuchtet werden kann, stößt diese Untersuchungsmethode schnell an ihre Grenzen (Eule et al., 2018; Korbel, 1994a). Der beste Überblick über den gesamten Fundusbereich kann mit einem indirekten Ophthalmoskop und +30- oder +40-Dioptrien Sammellinsen erzielt werden (Walde & Nell, 2008).

3.4.2. Indirekte Ophthalmoskopie

Zur indirekten Ophthalmoskopie (Untersuchung des Augenfundus) hält der Untersucher eine Sammellinse zwischen seines und das Patientenaug. Bei Verwendung eines monokularen oder binokularen indirekten Ophthalmoskops werden mit der anderen, freien Hand die Augenlider gespreizt und der Kopf fixiert (Eule et al., 2018; Korbel, 1994a). Erfolgt zur Einsicht eines größeren Gesichtsfeldes zunächst eine Übersichtsuntersuchung mit einer auf Höhe des dominanten Untersucherauges gehaltenen Punktlichtquelle (Durchleuchter), während mit dem anderen, ausgestreckten Arm die Sammellinse unmittelbar vor das Patientenaug gehalten wird, erfolgt das Spreizen der Lider durch eine Hilfsperson (Maggs, 2017). Aus der Distanz wird unter Vorhaltung einer Lupe der Augenhintergrund des Patiententieres bei weitgestellten Pupillen im durchfallenden Licht betrachtet (Eule et al., 2018; Korbel, 1994a).

Im Gegensatz zur direkten Ophthalmoskopie kann hierbei ein größeres Gesichtsfeld eingesehen werden – je größer die Dioptrienzahl der Sammellinse, desto größer ist der einsehbare Fundusbereich, umso ungenauer sind wiederum Details erkennbar. So kann fast der gesamte Augenfundus anhand 2 – 3 Sichtfelder begutachtet werden, was sowohl den Vergleich unterschiedlicher Fundusbereiche, aber auch innerhalb eines Sichtfeldes, erleichtert (Maggs, 2017). Die binokulare, also stereoskopische Untersuchung ermöglicht außerdem eine dreidimensionale Darstellung des Fundus (Eule et al., 2018; Korbel, 1994a; Walde, 2008). So können erhabene und tieferliegende Läsionen besser erkannt werden (Maggs, 2017). Das vom Untersucher wahrgenommene, wenig vergrößerte Bild ist dabei seitenverkehrt und auf dem Kopf stehend (Eule et al., 2018; Korbel, 1994a; Maggs, 2017; Walde, 2008), da das von der Netzhaut des Patiententieres reflektierte Licht durch die Sammellinse zu einem umgekehrten reellen Bild vereinigt und zwischen der Bildebene der Linse und dem Beobachter abgebildet wird. Man spricht von einer „Untersuchung im umgekehrten Bild“ (Neumann, 1987). Die perspektivische

Verschiebung erfolgt daher in umgekehrte Richtung, wobei Vorwölbungen der Bewegungsrichtung des Untersuchers folgen und Ausbuchtungen tiefer dem Fundusniveau, sich in die entgegengesetzte Richtung der Bewegung des Untersuchers verschieben (Walde, 2008). Die Wiedergabe der Untersuchung ist auf einem Monitor möglich, sofern im Okular des Kopfbandophthalmoskops eine Videokamera integriert ist. Die Untersuchung kann unabhängig davon auch rechts und links vom Untersucher von 2 Personen direkt über seitlich am Kopfband vorhandene Spiegel verfolgt werden (Walde, 2008). Der Brechwert der Linsen wird in der Maßeinheit Dioptrie (dpt) angegeben. Sie gibt an, in welche Richtung und mit welcher Intensität eine Linse das durchfallende Licht bricht. Der Wert bei Sammellinsen ist im Gegensatz zu Zerstreuungslinsen immer positiv (Eule et al., 2018; Korbel, 1994a).

Eine indirekte monokulare Ophthalmoskopie ist selbst mit einem in ca. 30 – 45 cm vom Tierauge entfernt gehaltenen Oskoplämpchen oder Diaskleralkegel, ähnlich der Untersuchung im reflektierten Licht, durchführbar. Dabei wird in einem Abstand von ca. 4 cm eine Sammellinse vor das weitgestellte Patientenaugengehalten und das Tier von einer weiteren Person fixiert, die auch die Lider geöffnet hält. Hierbei entsteht eine seitenverkehrte, umgekehrte und durch die Lupe vergrößerte Abbildung eines relativ großen Fundusbereiches (Korbel, 1994a; Walde, 2008). Diese herkömmliche Ophthalmoskopiermethode wurde zum monokularen indirekten Ophthalmoskop weiterentwickelt. Dessen Verwendung ist zur Betrachtung des Fundus bei kleinen Augen zu empfehlen, da die Lupe bereits integriert ist. Allerdings ist bei der monokularen Untersuchung kein stereoskopisches bzw. räumlich erscheinendes Bild sichtbar (Eule et al., 2018; Korbel, 1994a), sondern erscheint als dürftiges, zweidimensionales Sichtfeld bei mittelmäßiger Vergrößerung aufrecht und seitenrichtig (Maggs, 2017). Die monokulare indirekte Ophthalmoskopie ist mit einer Hand ausführbar, sodass die andere Hand zum Spreizen der Augenlider des Patientenauges frei bleibt. Daher bietet diese Technik, trotz geringer Tiefenwahrnehmung den Vorteil, auch von ungetübten Untersuchern durchgeführt werden zu können. Je nach Hersteller kann ein aufsteckbarer Monokular-Aufsatz auf demselben Standard-Ladegriff wie der Binokular-Aufsatz oder auch des direkten Ophthalmoskops verwendet werden (Maggs, 2017).

Dennoch ist das binokulare indirekte Ophthalmoskop bei den meisten Haussäugetieren mit einer Sammellinse optimal zur Funduskopie (Maggs, 2017).

3.4.3. Tierartige Besonderheiten beim Kleinsäuger (Augenhintergrund)

Als Besonderheit bei allen Haussäugetieren offenbart das Auge die einzige Struktur des zentralen Nervensystems, die direkt angesehen und untersucht werden kann: die Retina (Montiani-Ferreira, 2009a). Im durchfallenden Licht werden der Sehnervenkopf (Papilla nervi optici), die Gefäße und Nerven der ansonsten transparenten Netzhaut (Retina), das Pigmentepithel sowie, falls einsehbar, Choroidea und Sklera untersucht (Eule et al., 2018; Walde, 2008). Ein Tapetum lucidum, das bei Fleischfressern, Wiederkäuern und Pferden für eine optimale Verwertung des Lichtes bei Dämmerung sorgt, ist nur beim Frettchen vorhanden (Miller, 1997) und fehlt den übrigen Kleinsäugetieren (Ewringmann, 2016; Ewringmann & Glöckner, 2012, 2014; Fehr et al., 2015; Fehr et al., 2014; Holmberg, 2017; Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Die große Linse der Nagetiere kann zu einem verzerrt wiedergegebenen Abbild des Augenfundus führen und lässt diesen optisch im Glaskörperraum schweben (Montiani-Ferreira, 2009b).

Auffällige Befunde können sich wie folgt darstellen (Eule et al., 2018):

- Stark gewundene, wenig gefüllte oder gestaute, mit lipidhaltigem Blut gefüllte Netzhautgefäße,
- eine faltige, abgelöste, pathologisch depigmentierte Netzhaut (Differenzialdiagnose: primäre multifokale Retinadysplasie),
- eine depigmentierte Aderhaut / Choroidea,
- eine Entzündung des Sehnerven (Papillitis),
- ein unterentwickelter Sehnerv (Optikushypoplasie),
- ein kleiner Sehnervenkopf (Mikropapille),
- Blutungen,
- Staphylom (Vorwölbung der mittleren Augenhaut / Uvea),
- Papillenkolobom, das nicht mit einer Papille mit tiefer physiologischer Exkavation (Aushöhlung) verwechselt werden sollte. Das abrupte Abknicken der retinalen Gefäße am unteren Exkavationsrand spricht für ein Kolobom (Differenzialdiagnose: glaukomatöse Papillenexkavation).

Beim Meerschweinchen finden sich in der Literatur trotz der häufigen Haltung als Labortier keinerlei Befunde zu relevanten Veränderungen des Augenhintergrundes

(Williams, 2021).

Die Ursachen pathologischer Befunde sind vielfältig und reichen von einem Glaukom (Grüner Star) über Entzündungen, Verletzungen / Traumata, Tumoren, angeborenen Erkrankungen und Fehlbildungen (Dysplasie) bis hin zu Veränderungen (Dystrophie oder Degeneration) der Netzhaut (Eule et al., 2018).

Wegen der deutlich hervortretenden Augäpfel mancher Nager können Traumata jeglicher Art sekundär auch immer zu Augenerkrankungen führen, genauso wie Zahnerkrankungen im Oberkieferbereich bei Chinchillas, Degus und Meerschweinchen (Keeble & Meredith, 2009). Eine erhebliche Lichteinwirkung konnte als häufige Ursache von degenerativen Netzhauterkrankungen zumindest unter Laborbedingungen bei Nagern, festgestellt werden (Montiani-Ferreira, 2009b).

Bei Ratten und Mäusen kommen Netzhaut-Degenerationen öfter vor. Bei einer ophthalmoskopischen Untersuchung von 6000 Sprague-Dawley Ratten konnten im Fundusbereich bei 0,5 % der untersuchten Tiere ein Kolobom sowie bei 3 % eine herdförmig pathologische Veränderung der Netzhaut festgestellt werden (Van der Woerd, 2021). Da Ratten und Mäuse häufig zur Erforschung von Retinaerkrankungen beim Menschen zum Einsatz kommen, konnten bei diesen Kleinsäugerarten eine erblich bedingte Variation verschiedener Netzhauterkrankungen nachgewiesen werden (Montiani-Ferreira, 2009b). Bei jungen Mäusen treten in der Netzhautperipherie auch des öfteren Falten auf, da sich die Retina während der Wachstumsphase im Vergleich zu anderen okularen Strukturen schneller entwickelt (Gelatt et al., 2021).

Zahnerkrankungen, die beim Hamster zu retrobulbären Abszessen und infolgedessen zu einem vorgetriebenen Augapfel (Proptosis) führen können, sind mit systemischen Antibiotika zwar behandelbar, führen dennoch oft zum Tod des Tieres (Van der Woerd, 2021). Beim Chinchilla und Meerschweinchen kann das lebenslange Wachstum der Schneidezähne, der Prämolaren und Molaren bei unzureichender Abnutzung zu einer Verlängerung der Zahnwurzeln führen, was wiederum eine Propulsion (verminderte Retropulsion) und somit einen Vorfall des Augapfels bedingen kann (Van der Woerd, 2021).

Beim Frettchen zeigt sich eine Netzhautdegeneration durch einen in Mydriase schwach ausgeprägten Pupillarreflex sowie ein schwach gezeichnetes Retinagesäßbild mit hyperreflektiver tapetaler Auffälligkeit. Ohne Augenuntersuchung wird diese Erkrankung, die mit einem fortschreitenden Verlust der Sehfähigkeit einhergeht, meistens

erst in einem fortgeschrittenen Stadium festgestellt. Bislang gibt es keinen Therapieansatz (Van der Woerdt, 2021).

Eine degenerative asteroide Hyalose, bei der sich kalzifizierende Strukturen in den Glaskörper einlagern, kann bei älteren Chinchillas beobachtet werden (Van der Woerdt, 2021).

Bei Kaninchen, insbesondere bei Zwergrassen mit kurzem Gesichtsschädel wie z. B. Löwenkopfkkaninchen mit häufigen Zahnanomalien, treten aufgrund der anatomisch benachbarten Lage der Zahnwurzeln der Oberkieferbackenzähne des öfteren retrobulbäre Abszesse auf (Baumgärtner & Gruber, 2020; Eaton, J. S., 2022a). Diese bakteriellen Infektionen dehnen sich über das beide Augenhöhle miteinander verbindende Kommunikationstor (Foramen opticum) dann auch leicht auf die jeweils andere Orbita aus (Eule et al., 2018; Prince & Ruskell, 1960).

3.4.3.1. Kaninchen

Bei weitgestellten Pupillen kann die Untersuchung des Augenhintergrundes mit einem direkten Ophthalmoskop erfolgen, das indirekte Ophthalmoskop bietet bei Verwendung einer +30- oder +40-Dioptrien-Lupe aber einen besseren Überblick (Walde & Nell, 2008). EATON (2021) empfiehlt beim Kaninchen die Verwendung einer +28 Dioptrien-Linse. Um die querovale Papille bzw. den Sehnervenkopf einsehen zu können, ist eine Blickrichtung nach nasal und oben erforderlich (Eule et al., 2018; Holmberg, 2017; Maini & Hartley, 2019), da sie ungefähr einen Papillendurchmesser oberhalb des horizontalen Medians in der dorsalen Fundushälfte zu finden ist. Das Kaninchen ist dafür erhöht zu positionieren bzw. blickt der Untersucher dabei von unterhalb des Tieres in das zu untersuchende Auge. Ein höhenverstellbarer Tisch ist von Vorteil (Eule et al., 2018; Walde, 2008).

Papille:

Der Durchmesser der großen, horizontal eiförmigen Sehscheibe beim Kaninchen beträgt ca. 1,5 mm und ist normalerweise als tief gewölbte, weiße bis weiß-rosa farbene Struktur zentral im oberen Fundusbereich (Eaton, J. S., 2022a), dorsal der Sehachse sichtbar (Eaton, S., 2021; Van der Woerdt, 2021). Die Papille hat eine ausgeprägte physiologische, kelchförmige Vertiefung (Holmberg, 2017; Maini & Hartley, 2019; Van der Woerdt, 2021), deren Cup-Disc-Ratio beim gesunden Kaninchen ungefähr 0,4 - 0,5 beträgt. Hiermit wird das Verhältnis der Vertiefung der Sehscheibe (Cup) zu deren Gesamtfläche

(Disc) beschrieben (Xian et al., 2023). Diese rührt allem Anschein nach daher, dass beim Kaninchen an der Austrittsstelle des Sehnervs aus dem Augapfel keine Lamina cribrosa sclerae, ein siebförmiges Areal am hinteren Augenpol, ausgebildet ist und die Axone des Sehnervs in diesem Bereich auch stark myelinisiert sind. Für unerfahrene Untersucher kann die Unterscheidung von einer glaukomatösen Schwellung schwierig sein (Holmberg, 2017). Bei Fundusaufnahmen des Kaninchenauges zeigt sich der schwer abgrenzbare Sehnervenkopf in der Transversalebene oval in orangefarbenem Rot (Xian et al., 2023).

Netzhautgefäße:

Es gibt 4 unterschiedliche Gruppen von Retinagefäßbildern, wobei die Retina der Kaninchen zum merangiotischen oder angiotischen Typ zählt, da sie insgesamt nur in einem beschränkten Bereich partiell durchblutet ist (Eaton, S., 2021; Eule et al., 2018; Salomon et al., 2020). Der merangiotische Fundus der Lagomorpha bzw. Hasenartigen wie Kaninchen und Hase ist einzigartig (Holmberg, 2017). Wenige bis zu 100 µm große Arteriolen und Venolen verlaufen in einem begrenzten Bereich von der Sehscheibe aus nach nasal und lateral, um sich zwischen den weißen, von Myelinscheiden umgebenen Nervenfasern zu verzweigen (Eaton, S., 2021; Eule et al., 2018; Maini & Hartley, 2019; Salomon et al., 2020; Van der Woerd, 2021; Walde & Nell, 2008). Dabei entspringt je Seite eine sich horizontal teilende Arteriole aus der Tiefe der Papille, in welcher wiederum 1 - 2 hierzu parallel verlaufende Venolen münden (Wagner, Heider, Görig & Fehr, 1998; Walde & Nell, 2008). Ein weiteres großes Gefäß zieht in den oberen Fundusbereich (Eule et al., 2018). Um die Papille herum ist ein Gefäßnetzwerk aus multiplen kleinen Gefäßen erkennbar, die in der naturgemäß großen Papillenausbuchtung in die Tiefe ziehen. Die restliche Netzhaut ist avaskulär und vergleichsweise dünner als bei anderen Arten (Eaton, S., 2021; Eule et al., 2018; Salomon et al., 2020). So beträgt die Netzhautdicke zentral nur ca. 120 µm, peripher an der Ora serrata sogar nur noch ungefähr 90 µm (Eaton, S., 2021).

Bei Inspektion des Augenhintergrundes sind auch die elfenbeinfarbenen, myelinisierten Nervenfasern zwischen den roten Blutgefäßen der Retina sichtbar, wobei die retinalen Arterien, verglichen mit den retinalen Venen, dünner und heller erscheinen (Xian et al., 2023).

Augenhintergrund:

Beim Albinokaninchen fehlt Pigment in der Retina, weshalb unter der ebenso

pigmentfreien Choroidea die weiße Sklera hindurchschimmert (Xian et al., 2023). Hierdurch erscheint der Augenhintergrund rot-weiß (Eule et al., 2018; Walde & Nell, 2008). Bei pigmenthaltiger Choroidea hat der Augenhintergrund eine rot-braune Farbe (Eule et al., 2018; Walde & Nell, 2008). Das Kaninchen hat kein Tapetum lucidum (Eule et al., 2018; Walde & Nell, 2008).

Sinnesepithel:

An Photorezeptoren dominieren beim Kaninchen Stäbchen. Nur 5 % der Photorezeptorschicht besteht aus Zapfen (Eaton, J. S., 2022a). Das Kaninchen verfügt dennoch über eine gute Dunkelorientierung (Ewringmann, 2016). Der schärfste Sehpunkt der Retina, die Macula, lässt sich nicht von der insgesamt ebenförmigen Retina abgrenzen und ist somit nicht ophthalmoskopisch darstellbar (Xian et al., 2023).

3.4.3.2. Meerschweinchen

Papille:

Die runde Papille bzw. der Sehnervenkopf liegt in der Mitte des Fundus (Eule et al., 2018) und ist von weißer bis grauer Farbe (Van der Woerd, 2021).

Netzhautgefäße:

Das Netzhautgefäßbild ist umstritten (Holmberg, 2017), da die Retina des Meerschweinchens wie beim Chinchilla und auch den Vögeln klinisch zwar avaskulär erscheint, jedoch nicht wie bei vielen Tieren beobachtet und von EWRINGMANN (2012), WILLIAMS (2021) sowie MÜLLER und WASE (2014) beschrieben, tatsächlich anangiotisch bzw. gefäßfrei ist. Vielmehr enthält die Netzhaut um die Papille herum zarte Kapillaren, die histologisch auffindbar sind (Eaton, S., 2021; Holmberg, 2017). Man spricht daher von einer blutgefäßarmen bzw. paurangiotischen Retina (Eaton, S., 2021; Eule et al., 2018; Holmberg, 2017, 2022; Montiani-Ferreira, 2009b; Van der Woerd, 2021; Walde & Nell, 2008). Die zusätzliche Versorgung der Netzhaut wird über Diffusion aus der Choroidea gewährleistet (Walde & Nell, 2008).

Augenhintergrund:

Der Augenhintergrund pigmentierter Tiere ist rotbraun meliert. Bei pigmentfreien Meerschweinchen erscheint er diffus rot (Van der Woerd, 2021), auch da das Meerschweinchen kein Tapetum lucidum besitzt (Eaton, S., 2021; Eule et al., 2018; Montiani-Ferreira, 2009b; Walde & Nell, 2008). Bei Albino-Meerschweinchen leuchtet

im Fundusreflex selbst die Iris rötlich, wodurch der Pupillenrand schwer abgrenzbar ist (Montiani-Ferreira, 2009b).

Sinnesepithel:

Durch 2 unterschiedliche Zapfenarten wird dem Meerschweinchen sowohl ein Farbsehen als auch das Sehen in der Dämmerung ermöglicht (Ewringmann & Glöckner, 2012), wobei demgegenüber die Anzahl an Stäbchen in der Retina überwiegt (Eaton, S., 2021; Holmberg, 2017, 2022). Unterhalb der Papille ist außerdem ein markanter Sehstreifen vorhanden, der für ein klares Sichtfeld sorgt und im temporalen Bereich am dichtesten ist (Holmberg, 2017).

3.4.3.3. Chinchilla und Degu

Beim Chinchilla kann die ophthalmoskopische Untersuchung des Auges aufgrund einer generell schlechten Ansprechbarkeit der Pupille auf eine pharmakologische Erweiterung erschwert sein (Holmberg, 2022).

Papille:

Je nach Individuum ist die Papille beim Chinchilla entweder myelinisiert oder auch nicht. Eine fokale Ausbuchtung der Papille ist immer als Normalbefund zu werten (Van der Woerdt, 2021). Beim Degu ist die Papille zentral korbartig ausgestülpt (Holmberg, 2022).

Netzhautgefäße:

Chinchillas und Degus haben eine anangiotische Netzhaut, die wie bei den Vögeln völlig avaskulär ist (Ewringmann & Glöckner, 2012; Holmberg, 2017; Montiani-Ferreira, 2009b; Van der Woerdt, 2021; Williams, 2021). Die Ernährung der Netzhaut erfolgt daher über die darunterliegende Choroidea (Holmberg, 2017). Beim Chinchilla ist jedoch die Papille unterschiedlich stark vaskularisiert (Williams, 2021).

Augenhintergrund:

Weder das Chinchilla noch der Degu besitzen ein Tapetum lucidum (Montiani-Ferreira, 2009b).

Sinnesepithel:

Chinchillas sind nacht- und dämmerungsaktiv (Williams, 2021), was für eine hohe Anzahl an Stäbchen in der Retina spricht. Ein über 144 Grad einnehmender Sehstreifen sorgt für ein großes Gesichtsfeld und ermöglicht ein ausgeprägtes monokulares Sehen

(Holmberg, 2017). Die Netzhaut des Degus besteht überwiegend aus Stäbchen, ist aber auch reich an Zapfen (Holmberg, 2022).

3.4.3.4. Kleinnager wie Mäuse, Ratten, Rennmäuse, Hamster und Zwerghamster

Bei Mäusen und Ratten sind Sammellinsen mit +30 oder +40 Dioptrien zur Untersuchung des Augenhintergrundes geeignet (Beaumont, 2002; Eule et al., 2018; Montiani-Ferreira, 2009b). EATON (2021) empfiehlt zusätzlich die Verwendung einer +60 Dioptrien-Linse bei Maus und Ratte. Auch liefert ein Stereomikroskop bei der Maus durch dreidimensionale Darstellung und Vergrößerung des Augenfundus meistens ein besseres Bild (Montiani-Ferreira, 2009b).

Wegen der großen, sphärischen Linse der Mäuse und Ratten erscheint der Augenhintergrund bei indirekter Ophthalmoskopie etwas verzerrt. Auch entsteht das täuschende Bild einer vom Fundus losgelösten Retina (Holmberg, 2017). Bei ophthalmoskopischer Betrachtung ist auch stets die laterale und axiale Vergrößerung des Augenhintergrunds zu bedenken, da die kleinen Augäpfel der Nagetiere durch ihre kurze optische Brennweite eine beträchtliche Vergrößerung herbeiführen. So scheinen die Netzhautgefäße förmlich im Glaskörperraum zu schweben. Auch Läsionen werden bei diesen kleinen Tieren stärker vergrößert dargestellt, als sie in Wirklichkeit sind (Eaton, S., 2021).

Papille:

Bei den Kleinnagern befindet sich der Sehnervenkopf als Ursprungspunkt der von hier radiär ausstrahlenden Blutgefäße im Zentrum der Retina (Ewringmann & Glöckner, 2014). Der Augenfundus der Ratte offenbart einen klar erkennbaren, runden Sehnervenkopf von hellgelber Farbe. Im Gegensatz zu dessen klarer Abgrenzbarkeit ist bei der Ratte keine sichtbare Vertiefung der Sehscheibe erkennbar (Xian et al., 2023). Die Papille ist bei Maus und Ratte eher klein, kelchförmig und kann aufgrund der bis zur Lamina cribrosa markscheidenlosen Nervenfasern kolobomatös erscheinen (Montiani-Ferreira, 2009b). Der schlecht abgrenzbare Sehnervenkopf der Maus stellt sich kreisförmig in hellgelber Farbe dar (Xian et al., 2023).

Netzhautgefäße:

Kleinnager wie Mäuse, Ratten und Hamster weisen ein holangiotisches Netzhautbild auf. Große sichtbare Arteriolen und Venolen strahlen hier von der zentralen Sehscheibe radspeichenartig in die Peripherie der Retina aus (Beaumont, 2002; Eaton, J. S., 2022b;

Ewringmann & Glöckner, 2014; Holmberg, 2017; Montiani-Ferreira, 2009b; Taradach et al., 1984; Van der Woerd, 2021). Bei Pigmentfreiheit der Retina können die Blutgefäße der darunterliegenden Choroidea betrachtet werden (Xian et al., 2023). Auch bei der Maus sind die Retinagefäße radiär von der Sehscheibe ausgehend verteilt. Die Feinstruktur der Choroidea ist ophthalmoskopisch nicht einsehbar, dennoch sind choroidale Gefäße erkennbar (Xian et al., 2023).

Augenhintergrund:

Bei Pigmentfreiheit erscheint der Augenhintergrund bei Ausleuchtung halbtransparent und hellrot (Montiani-Ferreira, 2009b). Ratten, Mäuse und andere Mäuseartigen haben kein Tapetum lucidum (Eaton, J. S., 2022b). MONTIANI-FERREIRA (2009b) berichtet jedoch davon, dass manche Nagetiere ein Tapetum lucidum haben. Bei Betrachtung des Augenhintergrunds fällt bei jungen Ratten innerhalb des Glaskörpers gelegentlich eine Arteria hyaloidea persistens auf, die sich von der Papille bis zum hinteren Linsenpol erstreckt (Holmberg, 2017). Der Augenhintergrund der Maus ähnelt dem der Ratte (Xian et al., 2023).

Sinnesepithel:

Bei den Kleinnagern, insbesondere den nachtaktiven Hamstern, aber auch bei Ratten und Mäusen dominieren mit 95–98 % Stäbchen als Photorezeptoren (Beaumont, 2002; Eaton, J. S., 2022b; Ewringmann & Glöckner, 2014; Holmberg, 2017; Montiani-Ferreira, 2009b; Taradach et al., 1984). Auch um den geringeren Lichteinfall durch die kleinen Augen zu kompensieren (Ewringmann & Glöckner, 2014). Eine Macula oder Fovea centralis als Stelle des schärfsten Sehens ist bei Kleinnagern nicht vorhanden (Eaton, J. S., 2022b), ca. 0,3 mm nasal der Papille gibt es jedoch eine Area centralis mit einer höheren Zapfendichte (Holmberg, 2017). Bei der Ratte und auch der Maus ist keine Macula erkennbar (Xian et al., 2023). Bei beiden gibt es jedoch Hinweise auf einen Sehstreifen im dorsalen Fundusbereich, der eine hohe Dichte an Ganglienzellen aufweist (Eaton, J. S., 2022b).

3.4.3.5. Frettchen

Frettchen sollte 1%iges Tropicamid appliziert werden, um den Augenhintergrund vollständig beurteilen zu können (Van der Woerd, 2021). Die Augenuntersuchung kann analog der Untersuchung von Hund und Katze erfolgen, wobei es aufgrund der geringeren Augengröße jedoch sinnvoll ist, zur Vergrößerung Lupen mit +30 oder +40 Dioptrien bzw. im besten Fall eine Spaltlampe zu Hilfe zu nehmen (Miller, 1997; Montiani-Ferreira,

2009a). Die Retina der Frettchen ähnelt der von Hund und Katze, sie ist jedoch dicker und kann bei Blick durch das Frettchenauge zur Ophthalmoskopie durch die optische Verstärkung vom Bulbus losgelöst oder insgesamt verdickt wirken (Miller, 1997). Auch ist beim Frettchen ein Tapetum lucidum mit Ähnlichkeit zu dem des Hundes vorhanden, das reich an Cystein und Zink ist (Fehr et al., 2015; Miller, 1997; Montiani-Ferreira, 2009a). Individuale Variationen des Frettchenfundus sowie die Ophthalmoskopie durch das kleine Tierauge können unerfahrenen Untersuchern die Interpretation erhobener Befunde erschweren (Miller, 1997).

Papille:

Die kleine, zentral liegende Papille des Frettchens ist grau und scheint je nach Individuum schwach bis besonders ausgeprägt myelinisiert zu sein (Holmberg, 2017; Miller, 1997; Montiani-Ferreira, 2009a).

Netzhautgefäße:

Der euangiotische bzw. holangiotische Retinatyp der Fleischfresser und somit neben Hund und Katze auch des Frettchens, verfügt über viele, sehr große Gefäße (Holmberg, 2017; Montiani-Ferreira, 2009a; Sharma & Sur, 2014; Van der Woerd, 2021; Williams, 2021). Dabei strahlen die größeren Blutgefäße kreisförmig von der zentralen Sehscheibe in die Randbezirke der Netzhaut aus. Unter den einzelnen Arteriolen und Venolen gibt es keine Verbindungen, lediglich zu der größten Venole im Zentrum des Discus nervi optici (Salomon et al., 2020). Daher erfolgt die Nährstoff- und Sauerstoffversorgung des zentralen Anteils der Retina durch die eigenen Netzhautgefäße, der äußere Anteil der Retina wird durch angrenzende Blutgefäße der Choroidea versorgt (Montiani-Ferreira, 2009a).

Augenhintergrund:

Die Retina der Frettchen ähnelt der des Hundes, sodass auch ein hervorragend ausgebildetes Tapetum lucidum mit einer Dicke von 7 – 10 Zellschichten vorhanden und bei der Ophthalmoskopie sowohl bei pigmentierten als auch bei Albino-Tieren auffindbar ist (Fehr et al., 2015; Holmberg, 2017; Miller, 1997; Montiani-Ferreira, 2009a; Williams, 2021). Das Tapetum lucidum ist mit Ähnlichkeit zum Hund als farblich abgesetzter, dreieckiger Bereich mit unterer, horizontaler Grenze auf Höhe der Papille, manchmal auch unterhalb oder oberhalb dieser erkennbar (Walde, 2008). In diesem tapetalen Bereich enthält die Pigmentschicht der Retina entweder wenig oder gar kein Pigment

(Salomon et al., 2020), weshalb das einfallende Licht meistens in grün-gelber Farbe vom Tapetum reflektiert wird (Walde, 2008). Der ventrale tapetumfreie Fundusbereich erscheint dunkel (Walde, 2008).

Sinnesepithel:

Die Retina des Frettchens wird von Stäbchenzellen dominiert (Good, 2002), ein begrenztes Farbsehen scheint vorhanden zu sein und ähnelt dem der Katze (Fehr et al., 2015; Miller, 1997). Es ist auch ein markanter Sehstreifen vorhanden (Sharma & Sur, 2014).

4. Fotografische Dokumentation

Trotz der großen Bedeutung einer einheitlichen fotografischen Dokumentation physiologischer und pathologischer Zustände mangelt es nach wie vor an fachspezifischen Vorgaben zur praxistauglichen Durchführung einer passenden digitalen Dokumentationstechnik im Kleinsäugerbereich. Für Vogelaugen wurde ein standardisierter fotografischer Untersuchungsgang von KORBEL (1994a) erarbeitet (Korbel, 1990; Korbel, 2024; Korbel et al., 2013), wonach aufgrund der kleinen Objektgrößen die Grundlagen der Makrofotografie große Beachtung finden sollten. Demzufolge ist insbesondere zu berücksichtigen, dass die fotografische Dokumentation unter standardisierten Bedingungen erfolgt, um replizierbare Aufnahmen zu erhalten. Auch sollte ein möglichst neutraler Hintergrund Verwendung finden, um eine allumfassende Wahrnehmung des zu fotografierenden Gegenstandes zu erzielen (Bengel, 1994; Korbel, 1994a).

Für die Fotografie im Nahbereich (AM von 1:10 bis 1:1) eignet sich am besten eine Kleinbild-Spiegelreflexkamera mit Makroobjektiv, um im Abbildungsmaßstab 1:1 mit hoher Qualität so zu fotografieren, dass der dargestellte Gegenstand das Bild weitgehend ausfüllt (Bengel, 1984b; Korbel, 1990). An der Spiegelreflexkamera sollte die Zeitautomatik ausgewählt werden, um mit der Blendenöffnung variieren zu können (McMullen et al., 2021). Makroobjektive bieten den Vorteil, dass sie für Aufnahmen im Nahbereich konzipiert sind und somit durch ihre klare Farbtrennung und ihr hohes Auflösungsvermögen auch kleinste Details festhalten können (Bengel, 1984b). Der Bereich, in welchem das Objekt scharf dargestellt wird, wird als Schärfentiefebereich bezeichnet und ist u. a. von der Blendenöffnung, der Objektivbrennweite sowie dem Abstand zum Objekt abhängig (Bengel, 1984b; Gockel, 2012b; Korbel, 1990). Da die

beiden Letztgenannten den Abbildungsmaßstab bestimmen, ist die erzielte Schärfentiefe bei Beibehaltung des Abbildungsmaßstabs von 1:1, bei welchem sich der scharf dargestellte Bildbereich je zur Hälfte hinter und vor dem Fokuspunkt befindet, lediglich von der Blende abhängig. Dabei gilt der Leitsatz, dass mit einer kleinen Blendenzahl (große Blendenöffnung) eine geringere Schärfentiefe erzielt wird als mit einer großen Blendenzahl (kleine Blendenöffnung), welche wiederum die Bildhelligkeit verringert (Bengel, 1984b; Korbel, 1990).

Um beim Abblenden daher eine ideale Beleuchtung des Aufnahmegegenstandes beizubehalten, werden Ring- sowie Servoblitzgerät miteinander kombiniert. Gegenüber Konstantlicht, das aufgrund der Wärmeentwicklung nur bei hitzestabilen Objekten geeignet ist, bieten diese Elektronenblitze zusätzlich den Vorteil, dass ihr kurz andauernder Lichtblitz selbst bei Bewegung von Objekt oder Kamera für scharfe Aufnahmen sorgt (Bengel, 1984a; Korbel, 1990; Korbel, 2024; Korbel et al., 2013).

Der Ringblitz sorgt durch Frontlicht für eine schattenfreie Ausleuchtung (Bengel, 1984a; McMullen et al., 2021), sofern das zu fotografierende Objekt kleiner ist als dessen Durchmesser (Bengel, 1984a). Ein entstehender, kreisförmiger Halbschatten um den Gegenstand herum kann durch ausreichend Abstand zwischen Objekt und Hintergrund umgangen werden (Bengel, 1984a). Von großer Bedeutung ist auch die Verwendung von sog. Segmental-Ringblitzen (einzeln zu- und abschaltbare Segmente der Ringblitzröhre/der LED – Beleuchtungsmodule), um die durch die Beleuchtungsquelle erzeugten Reflexbildchen auf der Kornea so klein wie möglich zu halten (Korbel, 1994a). Somit können Aufnahmen mit hohem Informationsgehalt und einer guten Farbwiedergabe erzielt werden (Bengel, 1984a). Nachteilig bei der Verwendung eines Ringblitzes ist jedoch, dass durch die gleichmäßige Ausleuchtung des Motivs das Bild an räumlicher Tiefe einbüßt (McMullen et al., 2021). Um zur wissenschaftlichen Dokumentation eine detailgetreue, schattenarme Aufnahme auch kleinster Strukturen zu erhalten, ist daher der Einsatz zweier Blitzgeräte als Zangenblitz mit einem Servoblitzauslöser ratsam, bei welchem 2 Elektroblickgeräte rechts und links im gleichen Abstand zum Motiv angeordnet werden (Bengel, 1984a). Die von der Kamera separierten, sogenannten entfesselten Blitze bieten die Möglichkeit, die Belichtungsrichtung zu steuern (Gockel, 2012a). Dank dieser Flexibilität können durch Positionsänderung auch durch das Blitzlicht erzeugte Spiegelreflexionen verschoben werden (McMullen et al., 2021). Werden die beiden Blitzgeräte in unterschiedlichem Abstand zum Objekt angeordnet bzw. mit unterschiedlicher Blitzintensität verwendet, können sie als Haupt-

und Aufhelllicht angewendet werden (Bengel, 1984a). Die Anordnung der Blitzlichter bzw. deren Beleuchtungsrichtung ist insofern relevant, da das erhaltene Bild hierdurch drastisch verändert werden kann, wobei einerseits die Ausleuchtung interessanter Strukturen beeinflusst, aber auch unerwünschte Spiegelreflexionen erzeugt werden können (McMullen et al., 2021). Bei Blitzsystemen mit TTL-Blitzmesssteuerung, die bei Nikon-Kameras und deren hausinternen Blitzgeräten meistens bereits für eine kabellose Verbindung integriert ist (Gockel, 2012a), entfallen aufwendige Berechnungen (Korbel, 1994a) sowie endlose Versuchsreihen zur idealen Belichtung, da diese die Blitzlichtdauer und somit -intensität unabhängig von verwendeten Zwischenringen oder beispielsweise einem Polfilter durch integrierte Sensoren zur Messung der reflektierten Lichtmenge vollautomatisch steuern (Bengel, 1984a). Das kabellose Makro-Blitzkit R1C1 von Nikon ermöglicht über TTL eine variable Steuerung der Lichtleistung jeder einzelnen Blitzeinheit, die alle auch ohne Objektivring variabel zum fotografierenden Objekt angeordnet werden können. Im Gegensatz zur frontalen Beleuchtung wie durch einen Ringblitz kann durch die individuelle Positionierung und unterschiedlich einstellbare Blitzintensität der einzelnen Blitzeinheiten zum einen eine flache Beleuchtung ausgeglichen werden, zum anderen einfallendes Licht auch so gestreut werden, dass Blitzreflexe an spiegelnden Oberflächen wie der Hornhaut vermindert werden können (McMullen et al., 2021). Wird der Abstand der Blitzeinheit zum Objekt vergrößert, reduziert dies störende Lichtreflexe, verleiht dem Bild mehr Tiefe und betont verschiedene Bildkonturen (McMullen et al., 2021).

4.1. Anatomische Augenpräparate

Zur Anfertigung von Makroaufnahmen des kallotierten Augapfels ist dieser zum Erhalt einer konvexen Objektoberfläche vollständig mit Wasser zu befüllen, um störende Blitzreflexionen auf ein Minimum zu begrenzen (Korbel, 1990; Ravelhofer, 1996). Die wesentlichen Details sollten bei der Fotoaufnahme in einer Ebene liegen und die Aufnahme senkrecht von oben erfolgen, um die Problematik einer zu geringen Schärfentiefe zu umgehen (Bengel, 1984d; Korbel, 1990). Das Objekt ist ungefähr 10 cm – 15 cm erhöht vor einem unifarbenen Hintergrund zu positionieren, um den Fokus auf das Bild zu lenken und sich durch den eingeschränkten Schärfentiefenbereich den hierdurch erzielten Freistellungseffekt zunutze zu machen. Der optimale Objektabstand der Kamera sowie die Positionierung des Zangenblitzes ist anhand einer zusammengehörigen Folge wissenschaftlicher Versuche zu ermitteln (Korbel, 1990; Ravelhofer, 1996).

4.2. Ophthalmologischer Untersuchungsgang

Die fotografische Dokumentation des ophthalmologischen Untersuchungsganges erfolgt am lebenden Patienten. Zur Schonung des Patienten ist die Untersuchungsdauer möglichst kurz zu halten und Zwangsmaßnahmen sind so weit wie möglich zu vermeiden. Ein standardisiertes Vorgehen birgt dabei neben der grundsätzlichen Rücksichtnahme auf das untersuchte Tier weitere Vorteile, wie reproduzierbare Bildergebnisse, ein Vermeiden störender Ablenkungen wie Hände einer Hilfsperson auf Bildern und in Videos sowie bei ausreichender Schärfentiefe auch die Freistellung vom Hintergrund (Korbel, 1990). Ist der Hintergrund sichtbar, sollte dieser generell nicht vom aufzunehmenden Objekt ablenken und durch Wahl eines unifarbenen Grau, Blau oder Grüntons zu keinen wahrnehmbaren Farbveränderungen führen (Nester & Arnold, 1979).

4.3. Fundusaufnahmen

Im Jahre 1897 wurde erstmals eine Anleitung zum Aufbau einer selbst gebauten Fotokamera beschrieben, um durch das von Helmholtz im Jahre 1851 entwickelte Ophthalmoskop (Nester & Arnold, 1979) Bildaufnahmen der Retina anzufertigen (Guinkoff, 1897). Durch Modifikation dieses Leitfadens ist es NIKOLAEW und DOGIEL (1900) daraufhin gelungen, einen Fotoapparat zu entwickeln, mit welchem seitenverkehrte und auf dem Kopf stehende Bilder der Retina verschiedener Tierarten angefertigt werden konnten (Korbel, 1990).

Die Techniken und Methoden zur Darstellung des Augenhintergrundes wurden über die Jahre hinweg, beginnend mit durch Beobachtung angefertigten Zeichnungen und Illustrationen, später der Schwarz-Weiß-Fotografie bis hin zur Farbfotografie weiterentwickelt und werden beim Kleintier u. a. von LUGINBÜHL (1958) sowie BARNETT und KEELER (1968) umschrieben. Bereits damals war um die Bedeutsamkeit der Fotografie zur Darstellung von anatomischen Gegebenheiten sowohl zu Lehrzwecken als auch zur Dokumentation von Krankheitsverläufen und auch zu Forschungszwecken bewusst.

KORBEL (1994a) erarbeitete Techniken zur Fotografie des Augenhintergrundes beim teilweise winzigen Vogelauge, wofür sich wie auch bereits im Jahre 1968 eine gebräuchliche Kowa Handfunduskamera für Tiere besonders eignete (Barnett & Keeler, 1968). Mit den heutzutage gängigen Funduskameras lässt sich beim Menschen ein aufrechtes, hochauflösendes Netzhautbild aufnehmen, das 30° des gesamten Augenfundus wiedergibt. Neben einem hohen Auflösungsvermögen tragen

Kleinbildfilme zu einer Farbtreue und einem Kontrasterhalt der Aufnahmen bei. Eine starke Pupillenerweiterung der Patientenaugen wirkt sich durch eine hierdurch ermöglichte gleichmäßige Ausleuchtung des Fundus und somit einer vereinfachten Schärfereinstellung immens auf die Qualität der Aufnahmen aus (Nester & Arnold, 1979). Trotz maximaler Mydriasis kann der Lichteinfall zur Fundusfotografie durch die kleine Pupille der Mäuse und Ratten nicht ausreichend sein, sodass eine zusätzliche Beleuchtung erforderlich werden kann. Je nach verwendetem Modell ermöglichen manche Funduskameras sogar ein höheres Auflösungsvermögen als bei der indirekten Ophthalmoskopie erzielt werden kann, wodurch im Nachgang weitergehende Details in Ergänzung zur Untersuchung auf Fundusaufnahmen auffallen oder abschließend besser beurteilt werden können (Eaton, S., 2021). Trotz, dass der Anschaffungspreis moderner digitaler Handfunduskameras wie Smartscope oder ClearView erschwinglich ist, ist die erzielbare Bildqualität nicht mit der von früher verwendeten filmbasierten Handfunduskameras vergleichbar, was den aktuellen Mangel an publizierbaren digitalen Fundusaufnahmen sowie den fehlenden Routineeinsatz in der Veterinär-Ophthalmologie erklärt. Auch werden heutzutage in der klinischen Ophthalmoskopie vermehrt Bildaufnahmen mit Smartphones angefertigt, wobei verschiedene Studien in Fachbereichen fernab der Veterinär-Ophthalmologie unterschiedliche Ergebnisse bezüglich der Praktikabilität der Smartphone-Technik ergeben. So sollen Smartphones im Vergleich zu einer Standard-Funduskamera Bilder von geringerer Qualität erzeugen, bei anderen Untersuchungen konnte wiederum kein signifikanter Qualitätsunterschied zu Funduskameras festgestellt werden (McMullen et al., 2021).

5. E-Learning

E-Learning beschreibt Unterricht zur Förderung des Lernprozesses über ein elektronisches oder digitales Medium wie Computer, Laptop, Smartphone, Spielekonsole, Tablet oder auch andere tragbare Geräte und spielt sowohl in der Ausbildung, Lehre und auch bei der Weiterbildung eine zunehmend bedeutsame Rolle (Clark & Mayer, 2016a; Mayer, 2017).

5.1. Didaktische Konzepterstellung

In der Designphase werden Lehrziele und -inhalte sowie eine strukturierte Vorgehensweise zur Umsetzung festgelegt, weshalb sie eine der bedeutenden Entwicklungsphasen während der Erstellung eines Online-Lernangebots darstellt. Einordnen lässt sich diese Phase im Rahmen des ADDIE-Modells (Analyze-Design-

Develop-Implement und Evaluate) nach der zu Beginn erfolgten Analysephase an 2. Stelle vor der darauffolgenden Entwicklungs-, Implementierungs- und Evaluationsphase (Niegemann, H., 2020).

Bei Konzeption eines E-Learning-Angebots ist für eine erfolgreiche Lernerfahrung und zur Motivationssteigerung der Studierenden ein didaktisch klug aufgebautes Design zu wählen (Zander & Heidig, 2020). Hierfür haben sich besonders die Inhalte des ARCS-Modells nach KELLER (1983) bewährt, auf dessen Grundlagen basierend das Online-Tutorial wie folgt konzipiert werden sollte (Zander & Heidig, 2020):

A - Aufmerksamkeit:

Zur Vermeidung von Ablenkungen und zur Steigerung der Aufmerksamkeit sollte auf überflüssige Lerninhalte oder textschmückende Bilder verzichtet werden. Durch "Frage- und-Antwort-Spiele" können die Lernenden zu Reaktionen bewegt werden, die die Auseinandersetzung mit den Lerninhalten anregen und generell das Interesse an den vermittelten Inhalten steigern. Inhaltspräsentationen sollen sich mit Interaktionen abwechseln, zeitweise kann die Aufmerksamkeit der Lernenden auch durch Wechseln des Bildschirmformates erhöht werden (Zander & Heidig, 2020).

R - Relevanz:

Auf der Einstiegsseite des Online-Lernangebots und bei jedem neuen Themenabschnitt sollten die jeweiligen Lehrziele klar definiert präsentiert werden, um das Erfassen der wichtigen Lerninhalte wegweisend zu unterstützen. Durch das Anbieten von Lerninhalten verschiedener Schwierigkeitsgrade kann die Eigenleistung der Studierenden angespornt werden, da sie ihrem eigenen Wissensstand entsprechend selbst wählen können. So sollen auch Quizaufgaben mit unterschiedlichem Anforderungsniveau ein individuelles Lernen unterstützen, wobei dabei das Bewertungssystem transparent zu halten ist (Zander & Heidig, 2020).

C - Erfolgszuversicht:

Stets klar strukturierte und kommunizierte Lehrziele sollen den Gesamtüberblick wahren und das persönliche Vertrauen der Lernenden stärken, die Themenkomplexe erfolgreich abschließen zu können. Bei einem Fragenquiz zur Überprüfung des eigenen Kenntnisstandes sollte zur Einschätzung der Leistungserwartung im Vorfeld beispielsweise die Aufgabenanzahl genannt oder eine Fortschrittsanzeige eingeblendet

werden, um die Erfolgsszuversicht zu stärken. Durch Nennung der zu erwartenden Bearbeitungsdauer des gewählten Themas sowie auch der Möglichkeit zur Wiederholung eines Teilbereichs wird den Lernenden ein hohes Maß an Selbstkontrolle ermöglicht. Erfolgt ein Feedback über den Erfolg bzw. Misserfolg der erzielten Leistung, sollte die Lernanstrengung der Studierenden ebenso in die Beurteilung miteinfließen (Zander & Heidig, 2020).

S - Zufriedenheit

Zur Motivation und Umsetzung des neu erlernten Wissens sollten Übungsaufgaben angeboten werden, die zusätzlich dazu beitragen, bei den Studierenden Unzufriedenheit aufgrund einer nicht erfüllten Selbsterwartung zu vermeiden. Grundsätzlich ist es ratsam, in den weiterführenden Kapiteln auf zuvor Erlerntes zurückzugreifen. Bei Fragenquiz in Einführungskapiteln, in denen beispielsweise zunächst Vorkenntnisse der Anatomie vermittelt werden, sollte nach jeder Frage zur positiven Verstärkung angemessenes, motivierendes Feedback gegeben werden. In darauf aufbauenden, interaktiv gestalteten Lernspielen zur Anwendung des erworbenen Lernwissens sollte generell weniger häufig Feedback zum Einsatz kommen (z. B. bei Befundbeurteilung während der ophthalmologischen Untersuchung). Um den Studierenden das Erreichen der genannten Lehrziele zu ermöglichen, sollte die eingangs gewählte Strukturierung der Lerninhalte bei der Gestaltung des Online-Tutorials durchgehend beibehalten werden (Zander & Heidig, 2020).

5.2. Gestaltung von multimedialem Lernmaterial

Die kombinierte Präsentation verschiedener Multimediainhalte wie Text, Bilder, Videos, Audios, Tabellen, Animationen oder auch dynamischen Simulationen ist mit heutzutage geläufigen Technologien einfacher denn je umzusetzen und verspricht zugleich ein tiefer gehendes Verständnis von Lerninhalten, da unterschiedliche Sinnesempfindungen angeregt werden (Ainsworth, 2006).

Die Forschung beschäftigt sich aktuell überwiegend mit verschiedenen Maßnahmen zur Designoptimierung von Multimediainhalten, aber auch damit, Lernstrategien zu fördern, die beim Lernen mit Multimedia zu einer effektiveren kognitiven Verarbeitung der Lern-Darbietungen von den Studierenden beitragen können (Scheiter, Richter & Renkl, 2020). Für einen gezielten Einsatz von multimedialem Lehrmaterial sollten daher auf unnötige Informationen und auch textschmückende Bilder verzichtet werden, um nicht von den

lernwichtigen Inhalten abzulenken (Niegemann, H. M. & Weinberger, 2020). Auch sollte ein räumlich-visueller Zusammenhang vorzugsweise anhand von Bildern statt in geschriebener Textform erklärt werden (Schmidt-Weigand & Scheiter, 2011). Sind ergänzende Beschreibungen der visuellen Darstellungen nötig, so sollten diese nach dem sog. Modalitätsprinzip anstelle von geschriebenem Text eher in sprachlicher Form vorgetragen werden (Low & Sweller, 2014). Wird demzufolge somit Lernstoff anhand von Bildmaterial und gesprochenem Text vermittelt, sollte dieser Text nicht auch noch zusätzlich in Schriftform auf dem Bildschirm angezeigt werden, da das Lesen des Textes vom Bildinhalt ablenken kann. Auch können durch das Mitlesen des gesprochenen Textes unnötig kognitive Ressourcen verbraucht werden, wodurch keine Konzentration mehr auf den Bildinhalt erfolgt (Mayer, 2017; Niegemann, H. M. & Weinberger, 2020). Sollte dennoch geschriebener Text verwendet werden, ist dieser möglichst nahe am oder sogar im präsentierten Bild zu platzieren, um Ablenkung durch häufige Blickwechsel zwischen Text- und Bildinformation weitestgehend zu vermeiden bzw. um eine erfolgreiche Verknüpfung zum Verständnis der Bildinhalte zu gewährleisten (Johnson & Mayer, 2012). Ein weiteres Tool zur Förderung der Text-Bild-Integration stellt die gleichfarbige Markierung von korrespondierenden Text- und Bildinformationen (sog. Signaling) dar, welche Studierenden durch die hervorgehobenen Textinformationen zudem bei der Auswahl und Erfassung wichtiger Informationen helfen (Mayer, 2017). Zusammenfassend ist jedoch festzuhalten, dass sich die zuvor beschriebenen Optimierungsvorschläge insbesondere für Lernende mit geringen Vorkenntnissen zur Einführung in ein neues Themengebiet eignen. Studierende mit gutem Vorwissen könnten durch den Einsatz der genannten Designmaßnahmen eher am Lernen gehindert werden, da das Lernmaterial oberflächlicher begutachtet werden würde und sich somit keine Zusammenhänge erschließen lassen (Scheiter et al., 2020). Statt Änderung der Gestaltungsart der Lerninhalte empfiehlt sich demnach das Wissen und Verstehen der Lernenden durch instruktionale Erklärungen zu fördern, indem sie zur Verwendung bereits vorhandener Lernstrategien im Umgang mit Multimedia aufgefordert werden. Dies kann beispielsweise durch den Einsatz von Arbeitsblättern mit Handlungsanweisungen erfolgen. Auch Prompts, die als Impuls oder Frage im Lernmaterial auftauchen, können in den Lernenden bereits schlummernde Lösungsstrategien zur Anwendung bringen (Scheiter et al., 2020). In der Studie von BODEMER (2004) wurden die Lernenden beispielsweise durch Prompts dazu angeregt, tätig zu werden und Begriffe zu markieren. Allerdings konnte der erfolgreiche Einsatz sog. Prompts wissenschaftlich noch nicht ausreichend belegt werden (Scheiter et al.,

2020).

Summa summarum sollten multimediale Lehrmaterialien demzufolge den folgenden evidenzbasierten Gestaltungsgrundsätzen nach Mayer (2017) folgen:

1. Kohärenz: Der Lerneffekt wird erhöht, wenn keine überflüssigen Inhalte vorhanden sind.
2. Signaling: Der Lerneffekt wird erhöht, wenn wichtige Informationen hervorgehoben werden.
3. Redundanz: Der Lerneffekt bei Bildern mit eingesprochenen Beschreibungen ist höher ohne zusätzliche Darstellung des Gesprochenen in geschriebener Textform.
4. Räumliche Kontiguität: Der Lerneffekt wird erhöht, wenn zugehörige Wörter in der Nähe des korrespondierenden Abschnittes der Grafik abgebildet werden.
5. Zeitliche Kontiguität: Der Lerneffekt wird erhöht, wenn gesprochene Beschreibungen und korrespondierende Bilder zeitgleich präsentiert werden.
6. Segmentieren: Der Lerneffekt wird erhöht, wenn Lerninhalte in Abschnitte unterteilt werden.
7. Vorbildung: Der Lerneffekt wird erhöht, wenn die wichtigsten Fachbegriffe im Vorfeld erlernt werden.
8. Modalität: Der Lerneffekt wird erhöht, wenn Wörter in gesprochener Form präsentiert werden (Audio).
9. Personalisierung: Der Lerneffekt wird erhöht, wenn die Wörter im Konversationsstil und nicht im formalen Stil präsentiert werden.
10. Stimme: Der Lerneffekt wird bei Einsatz einer menschlichen anstelle einer maschinenähnlichen Stimme erhöht.
11. Darstellung: Der Lerneffekt wird erhöht, wenn der Repräsentant auf dem Bildschirm menschenähnliche Gesten und Bewegungen einsetzt (Mayer, 2017).

Auch videobasiertes Lehren hält zunehmend auch im Hochschulbereich Einzug. Allerdings ist insgesamt noch wenig erforscht, wie tiefgreifend die Lerninhalte aus diesen erfasst werden können. Lernvideos bieten die Möglichkeit zu vermittelnde Informationen nachvollziehbar zu präsentieren und hierdurch das Erlernen von Fertigkeiten, Kenntnissen und Kompetenzen zu fördern. Selbst komplizierte Sachverhalte können einer zuvor definierten Zielgruppe in kurzer Zeit nähergebracht werden, sodass die Videolänge meistens auf 1 bis 3 Minuten begrenzt werden kann (Persike, 2020).

In der Medizin als auch der Tiermedizin sind klassische Multiple-Choice-Fragen (MC-

Fragen) noch immer eine gängige Prüfungsform in der Ausbildung. Indem Studierende ihren Kenntnisstand selbstständig überprüfen können, bieten MC-Fragen neben der automatisierten Auswertbarkeit die Möglichkeit, vorhandene Wissenslücken ohne externe Beurteilung aufzudecken. Dank der häufigen Verwendung zur Abfrage von Faktenwissen sehen Studierende demzufolge den größtmöglichen Vorteil dieser Prüfungsform in der Aneignung von theoretischem Wissen, jedoch nicht in der Erlangung kognitiver Fähigkeiten. Um diese zu fördern und beispielsweise Strategien zur Lösungsfindung zu entwickeln, wäre die MC-Frage durch ein klinisches Fallbeispiel einzuleiten (Müller, S., Settmacher, Koch & Dahmen, 2018).

5.3. E-Learning-Angebote an der Tierärztlichen Fakultät der LMU

Zur Verknüpfung der wissenschaftlich-theoretischen und klinischen Praxis können Lehrveranstaltungen in der tiermedizinischen Ausbildung gemäß § 2 Absatz 1 der TAppV (2006) auch als E-Learning angeboten werden. Spätestens durch den Digitalisierungsschub aufgrund der Corona-Pandemie wird diese Möglichkeit verstärkt genutzt und die virtuellen Möglichkeiten vermehrt ausgeschöpft. An der Tierärztlichen Fakultät der LMU wurden bereits fachspezifische Online-Lernangebote wie beispielsweise zur Radiologischen Diagnostik beim Hund von SCHILLER (2015) oder auch im Bereich der Schweinemedizin (Wernecke, 2022) entwickelt. Neuartige E-Learningformen hat FRIEDRICH (2020) anhand 3 Handwritten Tutorials (Whiteboard Animationen) im Fachbereich der Immunologie eingeführt und von Tiermedizinstudenten verschiedener Semester an der LMU bewerten lassen. Im letzten Jahr wurde für die veterinärmedizinische Lehre von BÖHMER (2023) außerdem eine Quiz-App zur Nutzung auf Mobilgeräten erstellt und zur Verwendung in verschiedenen Fachbereichen erfolgsversprechend evaluiert.

Zur Lehre in der Exotenmedizin wurden auch an der Klinik für Vögel, Kleinsäuger, Reptilien und Zierfische der LMU mehrere E-Learning-Angebote konzipiert. So wurde von BOHNET (2007) ein Lernprogramm zur interaktiven Darstellung des ophthalmologischen Untersuchungsganges beim Vogelauge auf CD-ROM erarbeitet und von AMMON (2013) durch Darstellung der Augenerkrankungen bei Ziervögeln in Form eines Online-Tutorials ergänzt. Neben diesem finden sich auf der digitalen Lernplattform der Klinik (<https://virtuelle.exotenklinik.vetmed.uni-muenchen.de>) zum Selbststudium ebenso eine Anleitung zur Präparation und fotografischen Dokumentation von Fischeugen von REIMANN (2015) sowie ein Online-Tutorial zur virtuellen Geflügelklinik von BAAS (2019) und auch zur Bestandsbetreuung von Reptilien (Roth,

2022). Zur Vermittlung klinisch-praktischer Fertigkeiten auch im Kleinsäugerbereich wurde von IMHOF (2020) die virtuelle Heimtierklinik entwickelt. Zuletzt ist das klinikeigene digitale Lehrangebot um ein Online-Tutorial zum pathologisch-anatomischen Untersuchungsgang beim Vogel von DITTMAYER (2023) erweitert worden. Eine der Zugangsvoraussetzungen zum Absolvieren von Wahlpflichtfächern, Praktika oder auch der Schwerpunktrotation im 9. und 10. Fachsemester an der Klinik für Vögel, Kleinsäuger, Reptilien und Zierfische ist zunächst erfolgreich das multimediale Online-Lehrangebot, die "Virtuelle Vogel-, Reptilien- und Exotenklinik" mit Bestehen einer Abschlussprüfung in Form eines Onlinetestats zu durchlaufen. Dieses wurde von der virtuellen Hochschule Bayern gefördert im Rahmen von 3 Dissertationen (Budde, 2017; Niehues, 2018; Wahle, 2016) entwickelt. Hierdurch sollen sich die Studierenden im Vorfeld theoretische Kenntnisse im Bereich der Exotenmedizin aneignen, um diese während der praktischen Hospitation in der Klinik bestmöglich anwenden und vertiefen zu können.

6. Tiermedizinische Ausbildung unter Tierschutzgesichtspunkten

Das „Deutsche Zentrum zum Schutz von Versuchstieren“ (Bf3R) des Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR) wirkt deutschlandweit auf die Ziele hin, den bestmöglichen Schutz für Versuchstiere zu gewährleisten und Tierversuche grundsätzlich auf ein unerlässliches Minimum zu begrenzen. Zur Erhebung aktueller Zahlen und deren Meldung an die Europäische Kommission erfragt das BfR jedes Jahr und in allen Bundesländern relevanten Daten zum Einsatz von Versuchstieren (Bf3R, 2022). Zusammenfassend ist in der letzten Datenabfrage im Jahr 2022 wie auch bereits in den Vorjahren ein Abwärtstrend der eingesetzten Versuchstiere zu beobachten, bei denen es sich am häufigsten um Nagetiere wie Mäuse (72 %) und Ratten (6 %), aber auch um Fische (12 %) und an dritthäufigster Stelle Kaninchen (ca. 4 %) handelt. Überwiegend werden Versuchstiere für wissenschaftliche Zwecke zur Grundlagenforschung (55 %) eingesetzt, der Anteil eingesetzter Versuchstiere zur Aus- oder Weiterbildung in der Hochschullehre beträgt mit insgesamt 9.233 Tieren immerhin 0,5 % aller Versuchstiere (Bf3R, 2022). Das Bf3R strebt im Auftrag für Deutschland u. a. an, im Rahmen des 3R-Prinzips (replacement, reduction, refinement) Tierversuche durch Alternativmethoden zu ersetzen (Bf3R, 2022). So kann zur Vermittlung von Lerninhalten auch E-Learning zur Reduktion der eingesetzten Versuchstiere beitragen. In naturwissenschaftlichen Fächern an Hochschulen gibt es zur Tierzahlreduktion mithilfe digitaler Methoden bereits den Ansatz, virtuelle Patienten anstelle realer Untersuchungstiere einzusetzen oder Tierkörper

erst postmortem zu verwenden. So kann beispielsweise in der App „Virtual Frog“ (Emantras, 2011) eine pathologische Untersuchung mittlerweile am virtuellen Frosch durchgeführt werden oder die pathologisch-anatomische Untersuchung beim Vogel auch in einem Online-Tutorial erlernt werden (Dittmayer, 2023).

Da auf den Einsatz von Versuchstieren zum Zwecke der Lehre nicht gänzlich verzichtet werden kann, dienen Online-Lernangebote zusätzlich dem Schutz des lebend eingesetzten Einzeltieres, in denen sich Studierende vorab theoretische Vorkenntnisse zur unmittelbaren Anwendung in Ausbildungskursen am Tier - an der LMU beispielsweise im Rahmen von Propädeutik-Kursen - aneignen können. Im fakultätseigenen SkillsLab der LMU können an verschiedenen Stationen tiermedizinische Fertigkeiten an Tiermodellen und Simulatoren erlernt und eingeübt werden. So kann durch die Etablierung weiterer digitaler Lernangebote das unerlässliche Maß der Anzahl an lebenden Tieren, die zu Aus-, Fort- oder Weiterbildungszwecken in der tiermedizinischen Lehre gemäß § 7 Abs. 1 Nr. 1 Buchstabe b) des Tierschutzgesetzes (TierSchG, 1972) eingesetzt werden, weitergehend reduziert werden.

III. MATERIAL UND METHODEN

1. Anfertigung eines Storyboards

Vor Erstellung des interaktiven Lernprogrammes wurde zunächst in Form eines Storyboards anhand der definierten Lehrziele der Aufbau und die Lerninhalte des Tutorials erarbeitet und festgelegt. Passend zu den Inhalten wurde anschließend erörtert, welches Bild- und Videomaterial mediendidaktisch zur sinnvollen Darstellung der anatomischen Gegebenheiten sowie des ophthalmoskopischen Untersuchungsganges benötigt wird und wie dieses anzufertigen ist.

Lehrziele dieses E-Learning-Angebots sind die Vermittlung folgender theoretischer Kenntnisse der genannten Kleinsäugerarten:

- Die anatomischen Besonderheiten des Kleinsäugetieres,
- die Durchführung des allgemeinen ophthalmologischen Untersuchungsganges,
- die speziellen ophthalmoskopischen Untersuchungstechniken,
- die hierfür benötigten Materialien und Instrumente.

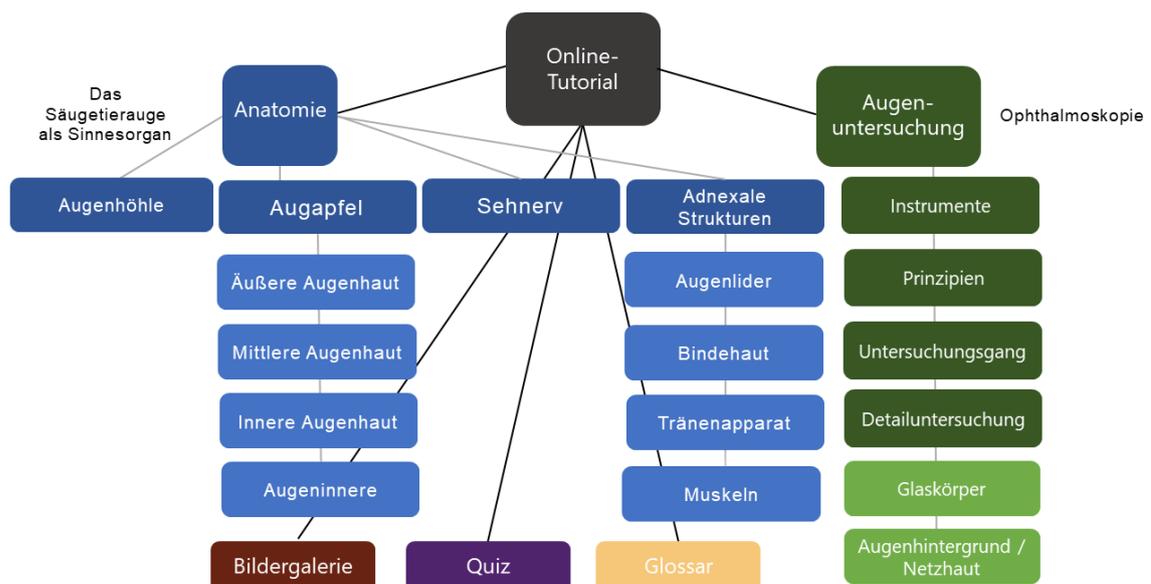


Abbildung 2: Didaktischer Aufbau und Lerninhalte des Online-Tutorials.

Durch Verlagerung der theoretischen Vorbildung auf den Bildschirm zuhause soll die Lehrtätigkeit der Lehrenden durch die hierdurch erzielte Zeitersparnis vollends auf die praktische Durchführung der ophthalmologischen Untersuchung am lebenden Kaninchen, z. B. in angebotenen Propädeutik-Kursen verlagert werden können. Die Gesamtbelastung des eingesetzten Einzeltieres wird aufgrund der studentischen Vorkenntnisse zum einen durch eine kürzere Untersuchungsdauer reduziert. Zum anderen entfällt eine Demonstration durch den Lehrenden, wie auch mehrfache Wiederholungen am Tier durch die Studierenden, da die ophthalmologische Untersuchung und ihre Techniken bereits in Lernvideos ausführlich dargestellt wurden. Insgesamt nimmt infolge des Einsatzes von Online-Tutorials auch die Anzahl eingesetzter Lebewesen ab, da ein Kaninchen durch die minimierte Untersuchungszeit bei mehreren Studenten eingesetzt werden kann.

Nach ausführlicher Recherche des aktuellen Forschungsstandes zu den Besonderheiten von Kaninchen, Meerschweinchen, Degus, Chinchillas, Mongolischen Rennmäusen/Gerbils, Hamster, Farbmäusen und -ratten sowie Frettchen hinsichtlich der Anatomie der verschiedenen Kleinsäugetiere sowie den tierartspezifischen ophthalmologischen Untersuchungstechniken und deren physiologischen Befunde wurden die Rechercheergebnisse zunächst zu thematisch aufgearbeiteten Inhaltstexten zusammengefasst. Abschließend wurde anhand des Storyboards festgelegt, an welcher Stelle im Online-Tutorial und in welcher Form die Inhaltstexte multimedial darzustellen oder zu ergänzen sind. So wurden zu den beiden großen Themenblöcken der Anatomie und des ophthalmologischen Untersuchungsganges sowohl statische und dynamisch-interaktive Bilder als auch Bewegtbilder erstellt und eingefügt. Die Inhaltstexte wurden ebenso wie die Lehrvideos teilweise mit einer Audiospur hinterlegt, sodass die Inhalte nicht nur gelesen, sondern auch angehört werden können. Dies birgt den Vorteil, dass das Gehörte durch gleichzeitige Manipulation eines interaktiven Anatomiebildes bereits während des Zuhörens praktisch nachvollzogen werden kann. Auch wurden die Textinhalte mit einer Downloadfunktion versehen, um den Lernenden Markierungen und Notizen in Print- oder digitaler Form zu ermöglichen, damit die Aufzeichnungen in einer darauffolgenden praktischen Durchführung auch als Hilfestellung genutzt werden können.

Durch Einsatz der Lehrvideos zum ophthalmologischen Untersuchungsgang sollen klinische Fertigkeiten visuell dargestellt werden, damit diese durch beliebige Wiederholung erlernt werden können. Enthaltene interaktive Elemente sollen dabei die

Aufmerksamkeit der Studierenden auf das Lehrobjekt lenken, das Gesehene durch spielerische Auseinandersetzung mit der Thematik positiv mit erworbenen Theoriekenntnissen verknüpfen lassen und hierdurch am lebenden Tier anwendbar machen.

Die Multiple-Choice-Fragen und weitere interaktive Frageformen wurden mit Adobe Captivate (Adobe Systems Inc., San José CA/USA, Version 12.2.0.19) erstellt.

2. Anfertigung anatomischer Augenpräparate

Die Augäpfel zur fotografischen Dokumentation der anatomischen Strukturen entstammen von reinweißen Albino-Kaninchen der Rasse New Zealand White (Weiße Neuseeländer) und ZIKA-Kaninchen aus einer privat genehmigten Versuchstierhaltung, die am Versuchsende im Alter von 5 – 6 Monaten euthanasiert wurden.

Die Enukleation beider Augäpfel beim Kaninchen erfolgte unmittelbar nach Feststellung des Herztodes des Kaninchens durch Auskultation mit dem Stethoskop. Hierzu wurde die Bindehaut zur Schonung des zarten Gewebes mit einer anatomischen Pinzette angehoben, um entlang des oberen Lidrandes mit einer gebogenen Schere zunächst einen Entlastungsschnitt durchzuführen. Mit dieser wurde der Bulbus anschließend ringsum von allen anhaftenden Strukturen wie den Augapfelmuskeln, Gefäßen und Drüsengewebe befreit, um zuletzt unter Beachtung des großen Venenplexus den Sehnerven zu durchtrennen. In die vordere Augenkammer des aus der Orbita sodann entnommenen Augapfels wurde zur Aufrechterhaltung des Augeninnendrucks und einer zusätzlich von innen erfolgenden Fixation mittels einer hauchdünnen Insulinkanüle 10%iges Formalin injiziert. Zur späteren Identifizierung wurde mit einem schwarzen Edding sowohl die Dorsalseite jedes Bulbus mit einem Punkt als auch die Lateralseite des rechten Auges mit einem „d“ für dexter permanent markiert. Das Augenpaar je eines Kaninchens wurde standardmäßig in 10%igem Formalin fixiert, vereinzelte Augenpaare versuchsweise auch in Davidson-Lösung. Nach einer unterschiedlich langen Fixationsdauer bei einer durchgehenden Temperatur von 7 Grad Celsius zwischen 48 Stunden bis hin zu mehreren Monaten bzw. Jahren wurden die Augäpfel entsprechend der beabsichtigten Fotoaufnahme mit einer scharfen Skalpellklinge horizontal unter Beachtung des relativ zentral in der dorsalen Fundushälfte liegenden Sehnerven bzw. vertikal kalottiert. Indem das Präparat während der Kalottierung mit einer anatomischen Pinzette fixiert wurde, sollten Schäden am Augapfel durch zu viel Druck vermieden werden.

Zur Gegenüberstellung eines weiteren pigmentierten Säugerauges wurden umgehend nach der Schlachtung die Augapfelpaare von 6 Kälbern am Schlachthof entnommen, deren Augen im Alter von unter 12 Monaten in Deutschland aufgrund des vernachlässigbaren BSE-Risikos noch kein spezifisches Risikomaterial darstellen. Nach Freipräparation noch anhaftender Gewebe und Instillation in die vordere Augenkammer wurden auch diese Augäpfel zunächst in 10%igem Formalin fixiert.

3. Anfertigung des Bild- und Videomaterials

3.1. Anatomische Augenpräparate

Die Bildaufnahmen der Augenhälften wurden mit der digitalen Spiegelreflexkamera „Nikon D750“ des Unternehmens Nikon Corporation (Tokio, Japan) mit dem aufgesetzten Makroobjektiv „Nikon AF-S Micro-NIKKOR 60 mm 1:2,8G ED“ des gleichnamigen Unternehmens angefertigt.

Da es bei den Makroaufnahmen der Augenpräparate insbesondere auf einen exakt ausgewählten Schärfentiefebereich ankommt, wurde die Verschlusszeit der Nikon D750 durch Auswahl der Zeitautomatik selbstständig von der Belichtungsautomatik berechnet, sodass nur die Blendenzahl manuell einzustellen war (Bengel, 1984b). Für verwacklungsfreie Aufnahmen wurde an der Kamera zusätzlich die Spiegelvorauslösung aktiviert. An der Kamera wurde ein ISO-Wert von 100 gewählt.

Um möglichst reflexionsfreies, scharfes Bildmaterial zur Darstellung der anatomischen Details anzufertigen, wurde in mehreren Versuchsreihen der optimale Arbeitsabstand – sowohl zwischen Frontlinse der Kamera und dem Objekt als auch zwischen dem Objekt und Hintergrund – ermittelt.

In einer ersten Versuchsreihe wurde das Nikon R1C1 Makroblitz Kit der Nikon Corporation (Tokio, Japan), bestehend aus einer Blitzfernsteuerungseinheit SU-800 sowie zwei externen Blitzgeräten (Typ SB-R200), die an einem Anschlussring auf dem Objektiv befestigt wurden, verwendet. Die Kommunikation zwischen der Kamera und der Blitzfernsteuerungseinheit erfolgte mittels i-TTL-Blitzsteuerung, die beiden Slave-Blitzgeräte wurden ebenso vollautomatisch über eine Infrarotverbindung ausgelöst. Zur symmetrischen Ausleuchtung wurden die Blitzgeräte zangenförmig zu jeder Seite des Präparates zueinander positioniert, zur Erzielung einer frontalen Beleuchtung wurden sie auch in unterschiedlichen Winkeln zueinander angeordnet. Versuchsweise wurden auch insgesamt 3 oder 4 Slave-Blitzgeräte gleichzeitig miteinander kombiniert. Weitere

Aufnahmen wurden im Auflicht mit dem alternativen Blitzgerät, einem auf dem Objektiv angebrachten Ringblitz EM-140 DG der Sigma Corporation (Kawasaki, Japan) mit Servoblitzauslöser angefertigt.

Nach Befestigung der für den Versuch jeweils ausgewählten Blitzgeräte wurde die Spiegelreflexkamera auf einem in der Höhe variablen Stativ befestigt. Der kallotierte Bulbus wurde zur Fotografie auf dem schalenförmigen Ende einer aus Knetmasse geformten 10 cm hohen Säule, später auf einem mit 2 Nylonfäden befestigten Ring aus ausgehärteter FIMO-Modelliermasse zur Erzielung des Freistellungseffektes erhöht zum Hintergrund positioniert. Nach Ermittlung des erforderlichen Objektabstandes zum Hintergrund wurde das Präparat auf einer mit Standfuß versehenen 38 cm hohen und innen hohlen Eisenstange, deren Durchmesser geringer als derjenige der Augapfelhälfte war, gelegt. Als Hintergrund diente ein schwarzes, starkes und somit knitterfreies Tonpapier. Der halbierte Augapfel wurde bis zum Rand mit steriler, blasenfreier Kochsalzlösung gefüllt, um Reflexionen der feucht-spiegelnden Oberfläche zu vermeiden.

In einem weiteren Versuch wurden die Bulbi an einer mit Bleikügelchen beschwerten Angelschnur befestigt und in eine mit Kochsalzlösung gefüllte Glasschale gelegt. So wurden sie mit einem vor dem Objektiv angebrachten Kreuzpolfilter unter der Wasseroberfläche mit beiden Blitzvarianten fotografiert.

Um eine höhere Schärfentiefe zu erzielen, wurde in einer abschließenden Versuchsreihe zwischen der Kamera und dem Objektiv der Zwischenring Helicon FB Tube (Helicon Soft Ltd., Kharkiv, Ukraine) angebracht und der Schrittmotor-gesteuerte Makroschlitten Novoflex CASTEL-MICRO (NOVOFLEX Präzisionstechnik GmbH, Memmingen, Deutschland) verwendet. In den Kameraeinstellungen der Nikon D750 wurde bei einer vorgegebenen Blende von 20 abermals der Einstellmodus M (Zeitautomatik) ausgewählt und der ISO-Wert der Kamera auf 200 erhöht, um Verwacklungen durch Bewegung auf dem Einstellschlitten zusätzlich entgegenzuwirken. Als Lichtquelle diente erneut der auf dem Objektiv montierte Sigma Ringblitz EM-140 DG. Die so vorbereitete Kamera wurde auf dem Einstellschlitten befestigt.

Der Gesamtaufbau des hier verwendeten Reprorandes setzte sich aus folgendem weiteren Zubehör des Novoflex MagicStudios des Unternehmens NOVOFLEX Präzisionstechnik GmbH, Memmingen, Deutschland zusammen:

- Einer Grundplatte MS-REPRO-PL aus Acrylglas (40 cm x 50 cm x 1,2 cm),

- einer an der Grundplatte über eine Klemmkonstruktion befestigte Reprosäule MS-REPRO, an welcher der Makroschlitten in der obersten Stellung in einer Höhe von 49,5 cm befestigt wurde,
- Positionierung der Kamera auf dem an der Reprosäule befestigten Einstellschlitten Novoflex CASTEL-MICRO,
- zusätzliche Ausleuchtung durch 2 Repro-Beleuchtungseinheiten MS-REPRO-LIGHT: LED-Tageslicht Dauerlichtquellen, die zur gleichmäßigen Flächenausleuchtung über flexible Arme (Länge 45 cm) und Kugelneiger ungefähr im 45 Grad Winkel beiderseits zum Aufnahmeobjekt, zur Optimierung der Fokussierung und als Hilfslicht im abgedunkelten Raum positioniert wurden.
- Positionierung der Bulbushälfte auf einer 4,5 cm hohen Knetsäule.

Der Kameraabstand vom Objektivende bis zur Grundplatte betrug abzüglich der Kameraeigenlänge mit FB-Tube-Aufsatz und Objektiv in der Endposition des Einstellschlittens somit 26,5 cm, der Abstand zwischen dem Objektivende der Kamera bis zur Bulbushälfte 22 cm. Dies entspricht auch der kürzesten Aufnahmedistanz des verwendeten Makoobjektivs bei einem AM von 1:1. Als Hintergrund wurde zur Überdeckung der Acrylplatte ein schwarzes, faltenfreies und nicht glänzendes Samttuch ausgebreitet.

Mithilfe des Novoflex-Makroschlittens wurden je Augenpräparat und darzustellendem anatomischen Detail jeweils 30 Einzelbilder angefertigt, wofür sich dieser elektronisch gesteuert vom oberen gewählten Startpunkt bei 90 mm schrittweise zum maximalen Einstellweg von 100 mm als unteren Endpunkt bewegte. Die Schrittweite und damit Annäherung an das zu fotografierende Objekt wurde im gewählten Picture-Modus dabei durch die vorgegebene Einzelbildanzahl von 30 Bildern bestimmt. In einem weiteren Schritt wurden von der genannten Startposition aus (bei 90 mm) die Anzahl von 10 Bildern voreingestellt und die Kamera zusätzlich am Endpunkt (bei 100 mm) für 6 Bilder mit automatischer Fokusänderung durch den Helicon FB Tube manuell ausgelöst. Von den hierdurch erhaltenen 30 bzw. 16 Bildern wurden unscharfe oder über-/unterbelichtete Bilder manuell von einer weiteren Bearbeitung ausgeschlossen. Die ausgewählten 8 – 30 Einzelbilder mit unterschiedlichen Fokuspunkten wurden zunächst mit der Software Helicon Focus Pro (Helicon Soft Ltd., Kharkiv, Ukraine, Version 8.2.2), einem Programm für Focus Stacking, zu einem einzigen von vorne bis hinten durchgehend scharfen Bild vereint. Die fertig gestackte Aufnahme wurde abschließend in der Bildbearbeitungssoftware Adobe Photoshop (Adobe Systems Inc., San José CA/USA,

Version 25.3.1) bearbeitet und vom Hintergrund freigestellt, um einen einheitlichen schwarzen Hintergrund hinzuzufügen.

Im Anschluss an die Fotografie wurden zusätzlich mit einem Lineal teilweise die Größenverhältnisse der Rinder- und Kaninchenaugen bemessen. In Adobe Dreamweaver (Adobe Systems Software Ireland Limited, San José, CA/USA, Version 21.3) wurden Roll-Over-Bilder erstellt, die bei Berührung mit dem Mauszeiger ihre Ansicht wechseln und so dynamisch die jeweilige Beschriftung angezeigt wird.

3.2. Ophthalmologischer Untersuchungsgang

Die ophthalmologische Untersuchung wurde bei New Zealand White Kaninchen aus einer Versuchstierhaltung der Chirurgischen und gynäkologischen Kleintierklinik der LMU München sowie bei weißen ZIKA-Kaninchen aus der privaten Versuchstierhaltung, aus der auch die Augäpfel der anatomischen Präparate stammten, durchgeführt. Bei der Untersuchung des hinteren Augensegmentes wurden sowohl Bilder und Videos mit der Spiegelreflexkamera „Nikon D750“ des Unternehmens Nikon Corporation (Tokio, Japan) als auch Bilder des Augenhintergrundes mit der Funduskamera Genesis Kowa Handheld (Eickemeyer, Tuttlingen, Deutschland) unter Verwendung von Farbdiafilmen Provia 100F (Tageslicht-Umkehrfilm) von Fujifilm angefertigt. Zur Beurteilung des Glaskörpers und des Augenhintergrundes wurden die Augen mit je einem Tropfen des 1%igen Parasympatholytikums Tropicamid (Pharma Stulln GmbH, Stulln, Deutschland) weitgestellt. Bis zum Wirkungseintritt und ausreichender Weitstellung der Pupille wurde das Tier für ca. 15 - 20 Minuten im abgedunkelten Untersuchungsraum in seiner Transportbox belassen. Zu den benötigten Instrumenten der Augenuntersuchung im auffallenden und durchfallenden Licht zählte ein Diaskleralkegel (HEINE Optotechnik GmbH & Co. KG, Gilching, Deutschland), die tragbare Hand-Spaltlampe SL-15 (Kowa Company, Ltd., Tokio, Japan) sowie ein direktes Ophthalmoskop (Welch Allyn Inc, New York, USA).

Zur binokularen indirekten Ophthalmoskopie wurde das Kopfbandophthalmoskop HEINE VIDEO OMEGA® 2C (HEINE Optotechnik GmbH & Co. KG, Gilching, Deutschland) zusammen mit Ophthalmoskopierlupen mit doppelt-asphärischer Linsenoptik (Volk Optical Inc., USA) und einer Brechkraft von +30 oder +40 Dioptrien eingesetzt.

3.2.1. Bildmaterial

Ebenso wie das Bildmaterial der anatomischen Augenpräparate wurden auch die

Aufnahmen des Untersuchungsganges mit der digitalen Spiegelreflexkamera „Nikon D750“ sowie dem Makroobjektiv „Nikon AF-S Micro-NIKKOR 60 mm 1:2,8G ED“ mit Festbrennweite, die beide von der Nikon Corporation (Tokio, Japan) stammen, angefertigt. Für Distanz- bzw. Übersichtsaufnahmen wurde zusätzlich das Objektiv „Nikon ED AF-S NIKKOR 24-85 mm 1:3,5-4,5G“ mit variabler Brennweite des Unternehmens Nikon Corporation (Tokio, Japan) verwendet. Als Lichtquelle diente das Ringblitzgerät EM-140 DG der Sigma Corporation (Kawasaki, Japan).

Die Bearbeitung des Bildmaterials erfolgte mit Adobe Photoshop (Adobe Systems Inc., San José CA/USA, Version 25.3.1), das auf dem Notebook Acer Aspire A517-52G (Intel® Core™ i5-Prozessor mit 2.40 GHz, 8 GB installierter RAM, Grafikkarte NVIDIA GeForce MX450, 64-Bit-Betriebssystem, Windows 11 Home) über die Adobe Creative Cloud installiert wurde. Mithilfe des umfangreichen Bildbearbeitungsprogramms konnten nachträglich Anpassungen wie die Freistellung des Hintergrundes, ein Weißabgleich, das Schärfen und Ändern der Belichtungseinstellungen sowie Anpassungen von Farben und dem Kontrast vorgenommen werden.

3.2.2. Videomaterial

Die Lernvideos wurden nach einem zuvor schriftlich entworfenen Konzept in Form eines Storyboards mit dem Programm Adobe Premiere Pro (Adobe Systems Inc., San José CA/USA, Version 24.1.0) in Eigenproduktion erstellt und bearbeitet. So wurde das Videomaterial gekürzt, aufgrund des benötigten Kunstlichtes ein nachträglicher Weißabgleich durchgeführt sowie die relevanten Inhalte im Bewegtbild (Untersucher, Hilfsperson, Kaninchen auf dem Untersuchungstisch) transparent vom Hintergrund freigestellt. Hierzu wurden mittels der programmeigenen Effekteinstellung „Ultra Key“ verschiedene Masken definiert, um die jeweilige ophthalmologische Untersuchungstechnik hervorzuheben und mit einem einheitlichen, durchgehend schwarzen Videohintergrund zu versehen. Anschließend wurde die bearbeitete Videosequenz um eine Titelfolie und angefertigtes, zum entsprechenden Abschnitt des Untersuchungsganges passendes Bildmaterial ergänzt. Nach Herstellung einer einwandfreien Akustik konnte die Aufnahme des Sprechertextes über die Programmfunktion „Audio“ mit einem Headset (Jabra Evolve 40 MS) erfolgen. Die Aufnahmen wurden in mehrere Einzelsequenzen unterteilt, um eine zeitliche Zuordnung zum entsprechenden visuellen Abbild herstellen und auf wiederholtes Ansetzen zur fehlerfreien und flüssigen Aufnahme verzichten zu können. Die eingesprochenen Audiosequenzen wurden dem Videoprojekt dann als Audiospur an der entsprechenden

Stelle hinzugefügt. Das fertiggestellte Gesamtvideo wurde im MP4-Dateiformat exportiert und abschließend in Adobe Captivate (Adobe Systems Inc., San José CA/USA, Version 12.2.0.19) mit hier erstellten interaktiven Elementen (Animationen, Quizze) angereichert. Anhand von sog. Bookmarks pausiert das Video bis zu deren erfolgreichen Erledigung an entsprechender Stelle. Das interaktive Video wurde über Adobe Dreamweaver (Adobe Systems Software Ireland Limited, San José, CA/USA, Version 21.3) als Plug-in in das Online-Tutorial eingebettet.

4. Erstellung des Online-Tutorials

Zur Erstellung des interaktiven Lernprogrammes wurden die vorab in einem Storyboard didaktisch erarbeiteten Lerninhalte anhand des darin festgelegten Schemas mithilfe verschiedener Software-Anwendungen umgesetzt.

Das zuvor didaktisch entwickelte Konzept wurde mithilfe von Bootstrap, einem HTML- und CSS- Framework in Adobe Dreamweaver (Adobe Systems Software Ireland Limited, San José, CA/USA, Version 21.3) als Online-Tutorial realisiert. Die Benutzeroberfläche des Programms gliedert sich neben einer Anwendungsleiste, einem Dokumentenfenster und weiteren zuschaltbaren Bedienfeldern bzw. Werkzeugen in der geteilten Standardansicht in die beiden Arbeitsbereiche mit Code- und Live-Ansicht zur Inhaltsvorschau. Über eine zusätzliche Funktion lässt sich die im computerbasierten Programm (Backend) erstellte Seite ebenso in unterstützten Internetbrowsern oder auch auf verschiedenen Mobilgeräten zur Ansicht aufrufen.

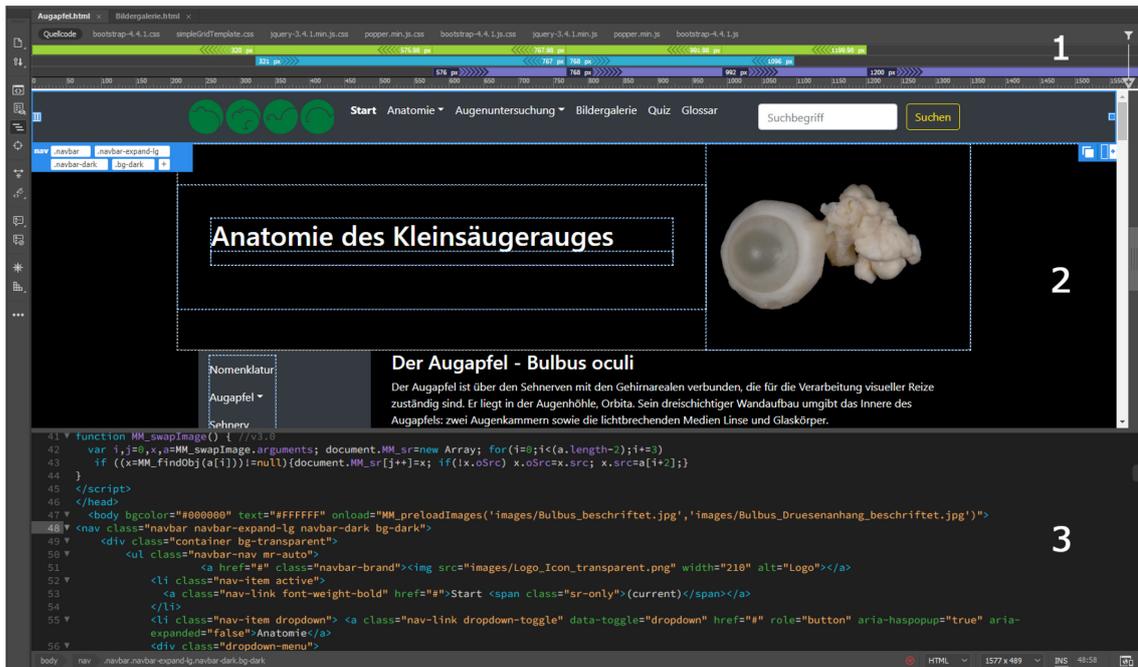


Abbildung 3: Benutzeroberfläche Adobe Dreamweaver (Software für Webdesign).

1 = Auswahlmöglichkeit zur Ansicht auf verschiedenen Bildschirmgrößen; 2 = Live-Ansicht; 3 = Bearbeitungsmaske HTML-Code.

Zunächst erfolgte die Auswahl eines von Adobe angebotenen Templates als Grundgerüst, das bereits Inhalte wie eine Navigationsleiste sowie Platzhalter für Bilder enthielt und am ehesten dem von der Verfasserin vorgefertigten Layout auf Papier entsprach. Ein wichtiges Auswahlkriterium war die Tatsache, dass es sich um eine responsive Designvorlage handeln musste, die unabhängig des verwendeten Endgeräts eine automatische Anpassung der Inhalte des Online-Tutorials an die vorhandene Bildschirmgröße gewährleistet. Im nächsten Schritt wurde die ausgewählte, responsive Layoutvorlage von der Verfasserin dem vorab didaktisch entwickelten Layout angeglichen: Als erstes wurde zentral für die gesamte Webseite ein individuelles Farbschema festgelegt, das zwar den unverwechselbaren Bezug zum Design bereits an der Klinik erstellter Online-Tutorials herstellt, sich aber dennoch zur Individualisierung und Umsetzung der didaktischen Konzeption dieser Lernumgebung entsprechend von den anderen abhebt. Die vorhandene Navigationsleiste wurde individualisiert und zur Wahrung der Übersichtlichkeit auf die wesentlichen Hauptpunkte der Lehrinhalte reduziert. Dem einheitlichen Layout der Unterseiten wurde zusätzlich zu der am oberen Bildschirmrand platzierten Menüleiste mit den Oberpunkten ein zusätzliches Navigationsmenü zu den korrespondierenden Unterthemen im linken Seitenbereich hinzugefügt.

Nach Fertigstellung des Layouts konnten entsprechende Unterseiten angelegt, miteinander verlinkt und die vorbereiteten Textinhalte eingefügt werden. Zur Förderung des Lernverständnisses wurde der Text dahingehend formatiert (Überschriften, Fettdruck, Unterstreichungen, Aufzählungen) und in Absätze untergliedert. Zur einfachen Lesbarkeit wurde der Menü- und Inhaltstext in der Schriftart Aptos und Segoe UI in einer Schriftgröße von 11 Punkt verfasst. Das statische Bildmaterial wurde über den programmeigenen Dateimanager auf den entsprechenden Unterseiten eingefügt, wobei die Anatomiebilder als Roll-Over-Bilder konfiguriert wurden, indem diesen nochmals dasselbe beschriftete Bild hinzugefügt wurde. Fährt der Benutzer mit dem Mauszeiger über eines der Bilder, ändert sich das dynamische Erscheinungsbild, indem entweder die Beschriftungen der Bilder oder ein vergrößerter Bildausschnitt eingeblendet werden.

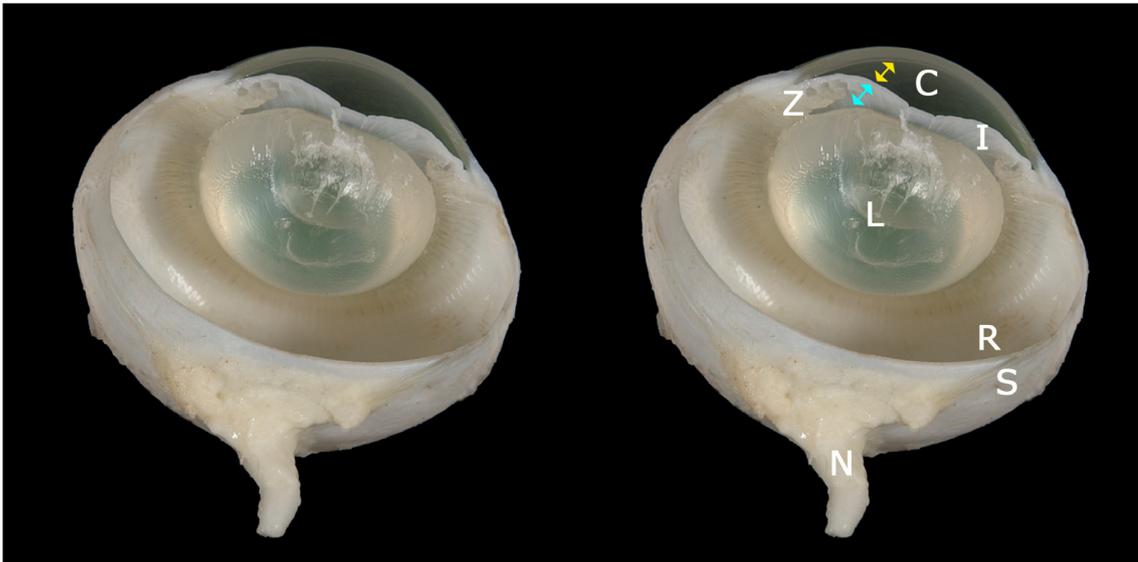


Abbildung 4: Interaktive Anatomiebilder, deren Aussehen sich ändert, wenn mit der Maus darauf gezeigt wird. Links = vor Auswahl; Rechts = aktiviert durch den Mauszeiger.

C = Kornea; → = vordere Augenkammer; → = hintere Augenkammer; I = Iris;
L = Linse; Z = Ziliarkörper; R = Retina; S = Sklera; N = N. opticus.

Die Lernvideos und das Bildmaterial, das mit interaktiven Elementen angereichert wurde, wurden der Lernumgebung an passender Stelle als Plug-in hinzugefügt.

IV. ERGEBNISSE

1. Anatomische Augenpräparate

Zur visuellen Darstellung anatomischer Details wurden die Bulbi der Kaninchen und auch Rinder bis zur fotografischen Dokumentation in Formalin fixiert, wodurch unabhängig von der teilweise langen Fixationsdauer über Wochen, Monate oder auch Jahren fast keine störenden Artefakte auftraten. Selbst der zusätzliche Einstich zur Instillation der Fixierlösung in die vordere Augenkammer war weder ersichtlich, noch wurden hierdurch Strukturen im Auginneren verletzt bzw. waren solche zumindest mit dem bloßen Auge nicht erkennbar. Eher noch konnte bei zunehmender Verwendungsdauer nach Entnahme der Augäpfel aus der Formalinlösung und nach deren Kalottierung eine Netzhautablösung beobachtet werden. Diese konnte auch nicht durch ein kontinuierliches Feuchthalten der Augäpfelhälften während der mehrstündigen Fotografie verhindert werden. Insbesondere bei den Rinderaugen, die bis zur fotografischen Dokumentation allesamt kürzer als die Kaninchenaugen für maximal wenige Wochen in Formalin fixiert wurden, zeigten sich teilweise Artefakte wie eine Faltenbildung und Ablösung der Retina. Ob diese jedoch durch die verwendete Fixierlösung, Fixationsdauer oder aber auch durch übermäßige Manipulation bei der Entnahme aus dem Rinderschädel entstanden sind, bleibt aufgrund der geringen Anzahl verwendeter Augäpfel von Rindern unklar.

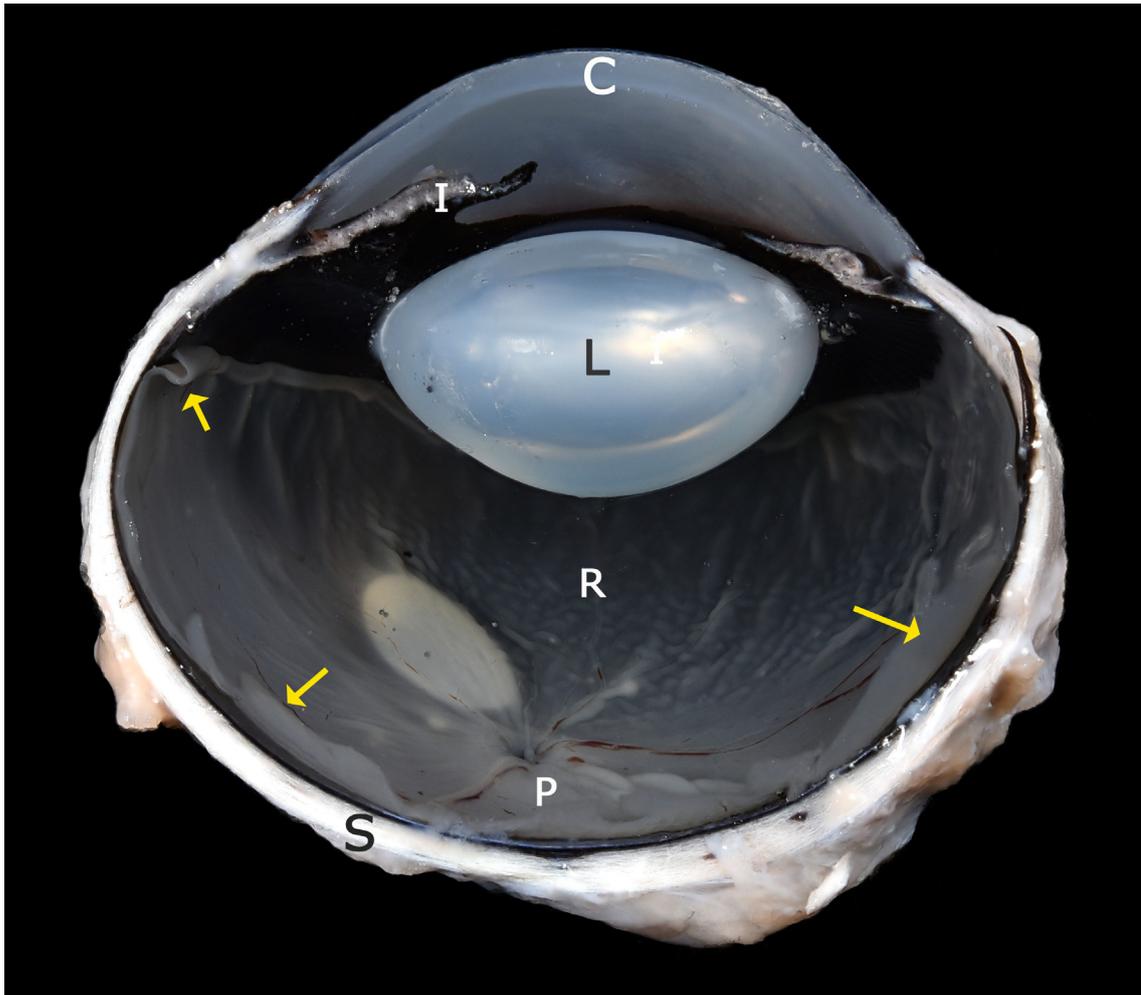


Abbildung 5: Rinderauge mit sich in Falten legender und ablösender Retina direkt nach der Kallotierung. OD, horizontaler Querschnitt.

C = Kornea; I = Iris; L = Linse; R = Retina; P = Papilla optica; S = Sklera; → faltige und abgelöste Retina.

Die versuchsweise Verwendung der Davidson-Lösung zur Fixation der Augäpfel führte zu einer raschen Trübung der Linse, brachte sonst jedoch keine nennenswerten Vorteile gegenüber der Formalinfixierung.

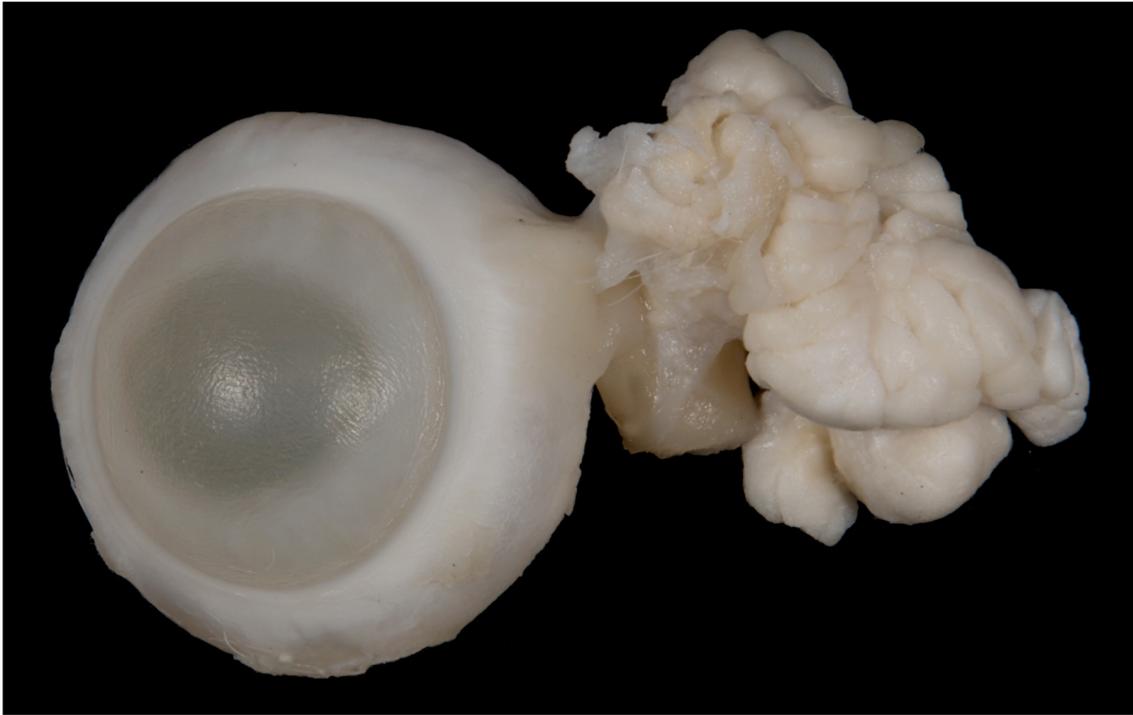


Abbildung 6: Kaninchenauge OS mit anhängendem Drüsen- und Muskelgewebe, Entnahme nach 12 Monaten Fixationsdauer in Formalin.

2. Bild- und Videomaterial

Die Erarbeitung eines einheitlichen Aufnahmevorgangs von Bild- und Videoaufnahmen resultiert in einer Schonung des lebenden Patienten, da der Aufnahmeprozess beschleunigt durchgeführt werden kann und aufwendige sowie länger andauernde Zwangsmaßnahmen, die schnell zu einer Überlastung des Einzeltieres führen können, unterbleiben (Korbel, 1990). Die heutzutage zur Verfügung stehende Bearbeitungssoftware ermöglicht das nachträgliche Retuschieren und somit die Verwendung von Aufnahmematerial, das nicht unter optimalen Bedingungen (u. a. monotoner Hintergrund, Beleuchtung) aufgenommen werden konnte.

2.1. Dokumentation der anatomischen Augenpräparate

Zur Anfertigung von Makroaufnahmen der anatomischen Augenpräparate wurden verschiedene Aufnahmetechniken angewandt, wobei das Hauptaugenmerk auf der Vermeidung von Blitzreflexionen sowie einer durchgehenden Schärfentiefe lag.

Die fotografische Dokumentation erfolgte zunächst anhand der beschriebenen Vorgehensweise nach BENGEL (1984d, 1994), KORBEL (1990, 1994a) und SNOW (2009). Zur Objektfotografie wurden verschiedene Arbeitstechniken ausprobiert, wobei sich das Makroblitz Kit mit Slave-Blitzen für diese Art der Objektfotografie als völlig

ungeeignet herausstellte. Auf der spiegelnden Präparat-Oberfläche zeigten sich starke Lichtreflexionen und die angefertigten Aufnahmen waren durch die erzielbare Helligkeit stets über- oder unterbelichtet. Die versuchsweise Verwendung zusätzlicher Slave-Blitzgeräte führte stets zu einer Überbelichtung des Objektes. Auch führten frontal unterschiedlich ausgerichtete Blitzlichter zu ungewünschter Schattenbildung innerhalb des auszuleuchtenden Präparates.

Es wurden Blendenreihen aller mit dem Stativ möglichen Abstände zum Objekt, die über der minimalen Objektdistanz des Objektivs von 18,5 cm lagen (in cm: 18,5; 28,5; 33,5; 46,5; 62,5), erstellt und anschließend bewertet. Die schärfsten Bilder wurden mit einer Blende von 20 im abgedunkelten Raum bei einer Objektdistanz von 28,5 cm erzielt.

Um eine Freistellung zu erzielen, musste das Objekt außerdem mindestens 38 cm vom Hintergrund entfernt positioniert werden. Mithilfe der Spiegelvorauslösung konnten Auslöseverwacklungen auf 0 reduziert werden. Trotz Auswahl unterschiedlicher Fokuspunkte konnte die gewünschte Schärfentiefe über die gesamte Ausdehnung der Bulbushälfte jedoch mit keinem der Abstände und Einstellungen erreicht werden.

Auch der Versuch einer Unterwasser-Fotografie der Bulbushälften erwies sich zur fotografischen Dokumentation nicht als zweckdienlich. Zwar sank die Bulbushälfte selbst ohne Befestigung an einer Angelschnur mit daran angebrachten Bleikügelchen zur Beschwerung direkt auf den Grund der Wasserschale, sodass sie zur Fotografie zentral platziert werden konnte. Jedoch traten auch bei dieser Fotografiertechnik bedingt durch die Verwendung von Blitzgeräten, starke Reflexionen um den Bulbus herum auf, die auch durch Verwendung eines Polfilters nicht vermindert werden konnten. Als zusätzliche Störfaktoren auf den unter Wasser angefertigten Fotoaufnahmen erwiesen sich durch die Blitzlichtfotografie sichtbar werdende Schwebeteilchen und kleine Luftbläschen, welche die freie Sicht zusätzlich beeinträchtigten. Abhilfe könnte eventuell eine ungefähr 5-minütige Beschallung der verwendeten Kochsalzlösung zur Entgasung in einem Ultraschallreinigungsbecken schaffen.

Laut Schärfentiefen-Tabelle des Herstellers ist mit der verwendeten Kamera bzw. deren Sensorgröße bei Blende 20 eine maximale Schärfentiefe von 2,3 mm erzielbar, wobei auch durch einen größeren Abstand und Zoom bzw. Bildausschnitt nicht erreicht werden kann, dass die 9 mm tiefe Bulbushälfte des Kaninchens durchgehend scharf abgelichtet werden kann.

Nachdem mit den in der Literatur zuvor beschriebenen Methoden keine ausreichende

Schärfentiefe der dreidimensionalen, voluminösen albinotischen Augenpräparate von Kaninchen erzielt werden konnte, obgleich die Darstellung der anatomischen Details jedoch von großer Bedeutung war, wurde nach zahlreichen Versuchsreihen das sowohl in der Ophthalmologie als auch in anderen Disziplinen bereits bewährte Focus Stacking zur Erweiterung des Schärfentiefebereichs angewandt (Jütte, Yang, Sharma & Roth, 2022; Knop, 2019; McMullen et al., 2021; Volz, Graeff & Durante, 2024). Der hierzu zwischen der Kamera und dem Objektiv angebrachte Zwischenring Helicon FB Tube sendet nach Registrierung einer Bildaufnahme eine Aufforderung zur Änderung des Fokuspunktes an das Objektiv. Bei den hier angefertigten Aufnahmen konnten bei Betätigung und Halten des Kameraauslösers in einer Serienbildaufnahme 3 Bilder pro Sekunde aufgenommen werden. Bei Verwendung des iTTL-gesteuerten Blitzlichtes war nur eine einmalige Auslösung erforderlich, um die weiteren Bilder selbstgesteuert aufnehmen zu lassen. Bei Auswahl der Zeitautomatik an der Nikon-Kamera wurde bei einer vorgegebenen Blende von 20 durch die Kamera überwiegend eine Belichtungszeit von 1/60 gewählt. Die Positionierung der Kamera auf dem Schrittmotor-gesteuerten Einstellschlitten führte zur selbstständigen Anfertigung von Bildaufnahmen, wobei die Bildanzahl entweder anhand des zuvor definierten Abstands zum fotografierenden Objekt oder bei Vorgabe der gewünschten Bildanzahl anhand der automatisch berechneten Schrittweite bestimmt wurde. So konnten durch eine gleichzeitige Verwendung des Makroschlittens mit dem FB-Tube-Aufsatz je Augenpräparat zwischen 16 und 30 Einzelbilder aufgenommen werden, deren Anzahl sich für das Software-gestützte Focus Stacking als ausreichend erwies. Einzelne ungeeignete Bilder wurden aus Gründen einer durch Verwacklung bedingten Unschärfe oder einer bei der automatisch angefertigten Bilderserie entstandenen Unter-/Überbelichtung nicht in die Software transferiert. Denn für ein gutes Ergebnis hat sich bewährt, bei der Bildaufnahme darauf zu achten, den gewählten Bildausschnitt trotz Veränderung der Entfernung zum Objekt beizubehalten und die Bilder unter möglichst gleichbleibenden Bedingungen (Beleuchtung und Belichtung, ISO-Empfindlichkeit bei einer konstanten Blende und bei konstantem Weißabgleich) aufzunehmen, wofür das beschriebene Zubehör zum Aufbau eines Reprostandes verwendet wurde. Von den drei möglichen Stacking-Algorithmen des Programms wurden je nach erzieltm Ergebnis entweder die Tiefenkarte (Methode B), meistens aber die Pyramide (Methode C) genutzt. Durch die programmunterstützte Beurteilung des am Ende des Stacking-Prozesses entstandenen Gesamtbildes wurde die getroffene Vorauswahl der Bilder anschließend nochmals von der Erstellerin manuell auf starke Abweichungen bei der Bildbelichtung hin überprüft und bezüglich Bildhelligkeit

aussortiert bzw. in einem separaten Stacking-Prozess erneut vereint. Unter Verwendung der benannten Focus Stacking Ausrüstung und der entsprechenden Software konnten zahlreiche qualitativ hochwertige Aufnahmen zur Detaildarstellung anatomischer Strukturen am pigmentfreien Kaninchen- und pigmentreichen Rinderauge sowie vergleichende Aufnahmen beider Bulbi mit durchgehend hoher Schärfentiefe angefertigt werden.



Abbildung 7: Kälber- (links) und Kaninchenauge (rechts) OS, horizontaler Querschnitt.

Durch die erhöhte Positionierung des Objekts konnte zum einen, wie von KORBEL (1990) beschrieben die gewünschte Freistellung vom Hintergrund erzielt werden, als auch eine Ringblitz-typische Schattenbildung sowie störende Flüssigkeitsränder auf der Papierunterlage durch die feuchten Augäpfel vermieden werden. Zur Vereinheitlichung wurde das Bildmaterial dennoch nachträglich am Computer mit einer Software freigestellt und mit einem einheitlichen schwarzen Hintergrund versehen. Hierdurch konnte hochwertiges Bildmaterial von sehr guter Qualität mit guten Druckeigenschaften entwickelt werden.

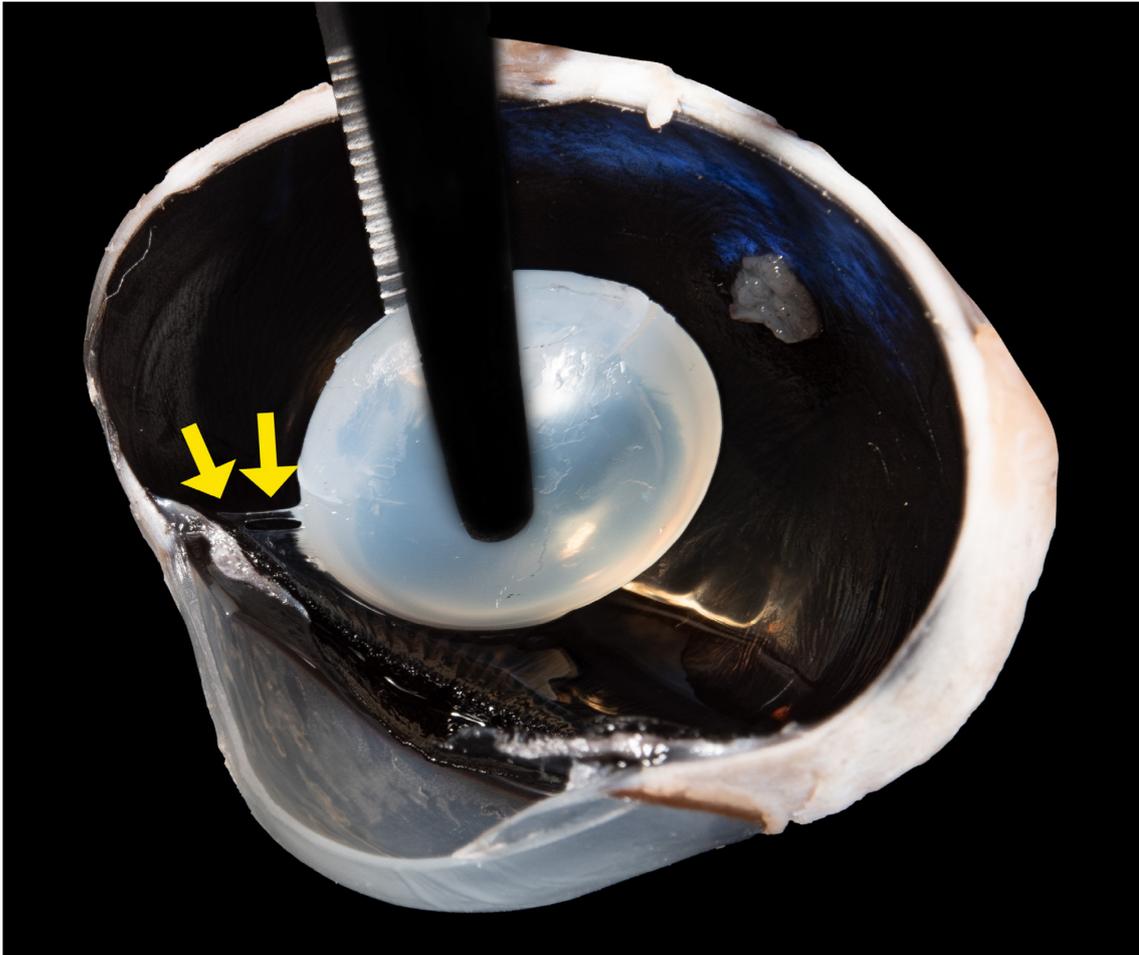


Abbildung 8: Horizontaler Querschnitt, Kälberauge OD; Aufhängeapparat der Linse (→ Zonulafasern).

Der Ringblitz zeigte sich bei den Aufnahmen als Blitzgerät der Wahl, da dessen Verwendung - im Gegensatz zu den Servoblitzgeräten - keine starken Lichtreflexionen auf den spiegelnden, feuchten Oberflächen bewirkte. Insbesondere aufgrund der Vertiefung der Bulbushöhle war es wichtig, diese hauptsächlich mit einer von oben kommenden Lichtquelle auszuleuchten, damit sich diese optisch auch als solche zeigt und nicht fälschlicherweise als Erhebung wahrgenommen wird (Bengel, 1984d). Ebenfalls konnte eine Schattenbildung durch Ausleuchtung mittels Ringblitz vermieden werden. Der hierdurch laut BENGEL (1984a) und KORBEL (1990) hinzunehmende Kontrastverlust durch Nutzung dieser einzigen Lichtquelle kam bei den in diesem Versuch verwendeten, relativ farblosen Präparaten kaum zur Geltung.

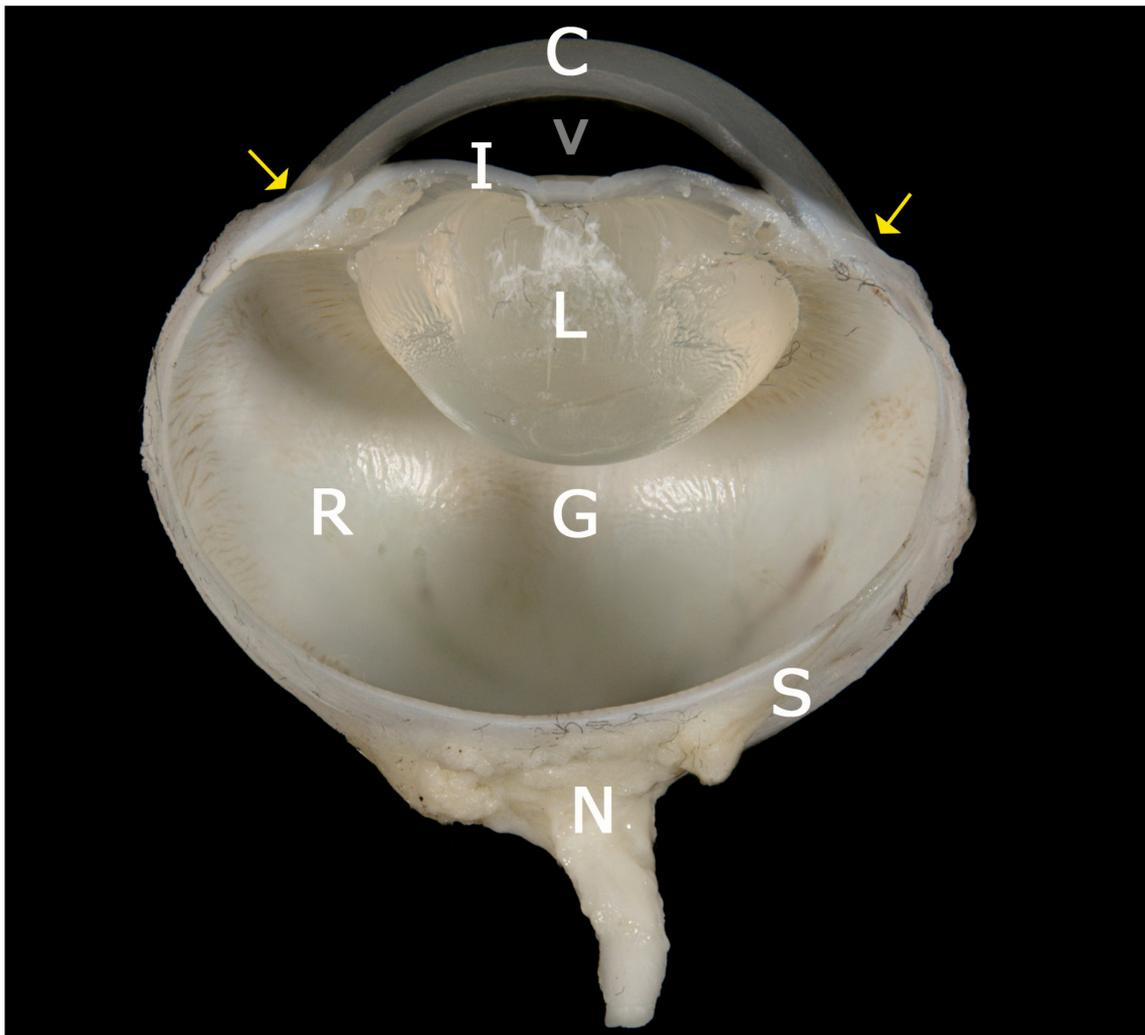


Abbildung 9: Kaninchenauge OD, horizontaler Querschnitt.

C = Kornea; v = vordere Augenkammer; I = Iris; L = Linse; G = Glaskörperraum (Glaskörper entfernt); R = Retina; S = Sklera; N = N. opticus; → Limbus.

Folgende Größenangaben konnten im Mittel an jeweils 3 in Formalin fixierten und kalottierten Augapfelhälften mit einem Lineal gemessen und dokumentiert werden:

	Kaninchenauge	Kälberauge
Vordere Augenkammer	0,3 cm	0,6 cm
Hintere Augenkammer	1,3 cm	2,5 cm
Linsendurchmesser	1,1 cm	1,6 cm
Bulbusbreite	1,8 cm	3,5 cm
Bulbuslänge	1,6 cm	3,1 cm

Tabelle 1: Gemessene Größen (Mittelwert) am Bulbus von Kaninchen und Kalb nach Fixation.



Abbildung 10: Größenverhältnisse Kälber- (links) und Kaninchenauge (rechts) OS.

2.2. Dokumentation des ophthalmologischen Untersuchungsganges

Zur Dokumentation des Augenuntersuchungsganges beim Kleinsäuger wurden die einzelnen Untersuchungstechniken zur Anfertigung von Bild- und Videoaufnahmen durchgeführt und demonstriert. Neben dem Untersucher hat sich eine Hilfsperson zur Fixation des Untersuchungstieres als hilfreich erwiesen, damit der Verfasserin das Fotografieren vorbehalten blieb und umgehend auf Bewegungen des Tieres reagiert werden konnte. Diese Flexibilität der Fotografin ermöglichte auch spontane Perspektivwechsel bei alleiniger Konzentration auf die anzufertigenden Bildern und das jeweilige Darstellungsziel, ohne parallel das Kaninchen zu fixieren. Verglichen mit dem Einsatz eines Selbstauslösers und möglicherweise der kamerainternen Zoom-Funktion führte die Fotografie ohne Verwendung eines Stativs zu qualitativ hochwertigen Aufnahmen und auch zu einer beträchtlichen Zeitersparnis, da die Bilder nachträglich in der Bildbearbeitungssoftware nicht mehr allzu stark nachgebessert werden mussten. Nach der Erarbeitung eines Standardaufnahme-Settings mit Anpassung an die gegebenen Lichtverhältnisse konnte auch hierbei ausreichend Rohmaterial zur visuellen Veranschaulichung der einzelnen Untersuchungsschritte für das Online-Tutorial erstellt werden.



Abbildung 11: Routine-Untersuchung mit einer Punktlichtquelle.

Zusätzlich konnten mit der Handfunduskamera Aufnahmen des Augenfundus angefertigt werden, welche die physiologischen Besonderheiten beim Kaninchen zeigen. Darauf sind der ovale Sehnervenkopf sowie das merangiotische Gefäßbild mit Verlauf der retinalen Gefäße und der myelinisierten Nervenfasern sichtbar.

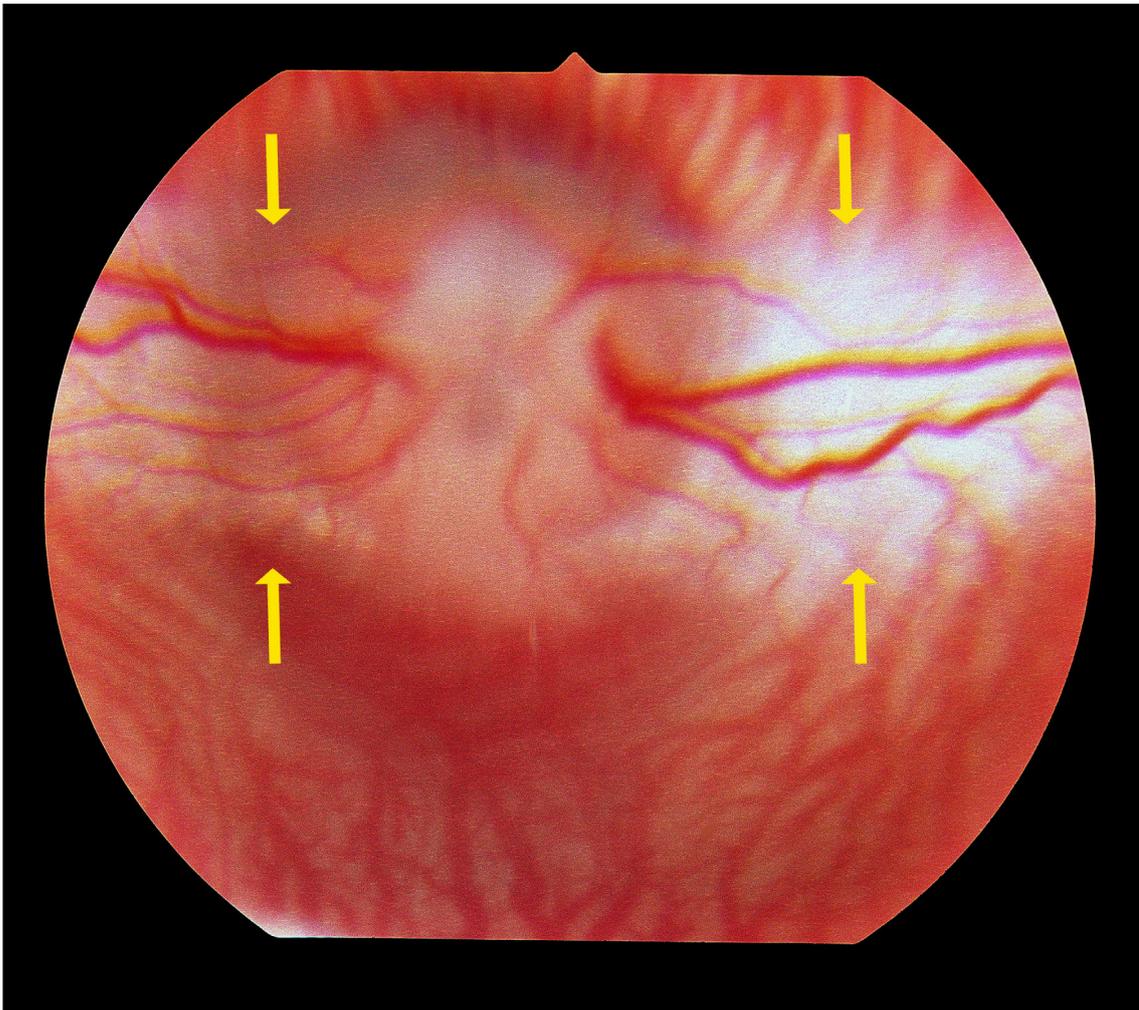


Abbildung 12: Merangioider Fundus Albinokaninchen OD.

→ Myelinisierter Gefäßbereich (Arteriolen, Venolen, Nervenfasern), ausgehend von der Papille in der Bildmitte.

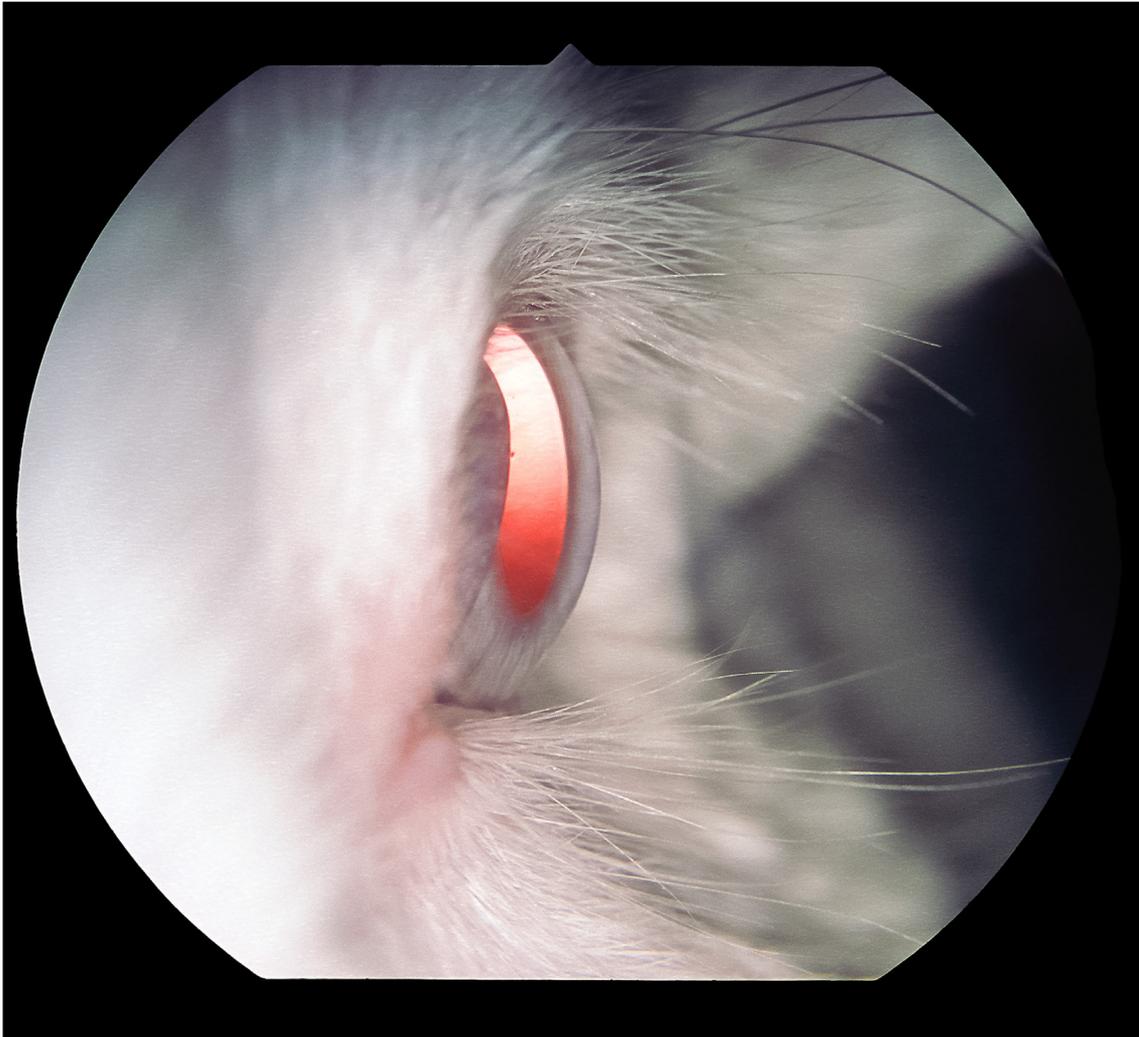


Abbildung 13: Kaninchenauge OS, Fundusreflex, aufgenommen mit der Handfunduskamera.

Das abschließend bearbeitete Bildmaterial wurde für das Online-Tutorial im JPEG-Format, das sich bei sehr guter Bildqualität auch einwandfrei komprimieren lässt, mit einer Bildbreite von 400 Pixel und einer Web-Auflösung von 72 DPI gespeichert. Wie auch das Kliniklogo wurde Bildmaterial mit transparentem Hintergrund für ein müheloses Einfügen ohne sichtbare Bildränder im PNG-Format gesichert, woraus eine Farbreduktion resultierte.

Videobasiertes Lernen hat in der medizinischen Ausbildung bereits Einzug gehalten und wurde auch in diesem Online-Lernprogramm zur visuellen Demonstration des Augenuntersuchungsganges als zielführend und daher als erforderlich angesehen. Es wurden Videos zu den speziellen ophthalmoskopischen Untersuchungstechniken wie der Untersuchung mit einer Punktlichtquelle, der direkten und indirekten Ophthalmoskopie angefertigt und mit interaktiven Elementen angereichert.

3. Online-Tutorial

Ein wichtiges Qualitätskriterium zur Bewertung eines E-Learning-Angebots ist dessen didaktisch wertvoll aufbereiteter sowie multimedial dargestellter Inhalt, der die Lernenden zur Interaktion einlädt (Handke & Schäfer, 2012). Für eine lernförderliche Darstellung zur erleichterten Informationsaufnahme und deren Verarbeitung wurde daher bei Auswahl des Grafikdesigns besonderen Wert auf eine klare Strukturierung, eine qualitativ hochwertige Darstellung der Multimediainhalte und auf eine einfache Lesbarkeit der Textinhalte gelegt. Von zentraler Bedeutung war auch die Auswahl einer responsiven Designvorlage, um das Online-Tutorial durch automatische Anpassung an die Bildschirmgrößen unabhängig vom verwendeten Endgerät aufrufen und bedienen zu können.

Im Gegensatz zu Content-Management-Systemen (CMS) bzw. Drag-and-Drop-Software zur einfachen Erstellung von Webseiten nach einem Baukastenprinzip ohne Programmierkenntnisse, die jedoch nur begrenzt Anpassungsoptionen ermöglichen, bietet ein Website-Editor wie Dreamweaver durch seine vollständige Unterstützung von Web- und Programmiersprachen wie HTML-, CSS- und auch JavaScript nach Einarbeitung in das anspruchsvolle Coden viel Flexibilität zur Individualisierung und den Vorteil, großen Einfluss auf das Design, die Gestaltungsanordnung und auch der Inhaltsmöglichkeiten nehmen zu können. Weitere Vorteile ergeben sich hinsichtlich der „Cross-platform“ (Windows & Macintosh) – Nutzbarkeit und der Vermeidung diesbezüglicher Probleme.

Bei Aufruf des Online-Tutorials gelangt der Nutzer zunächst auf die Startseite, auf der zur Einführung die Lernziele des Lernprogramms definiert werden. Die am oberen Bildschirmrand platzierte, auf jeder Seite präsente Menüleiste ist für einen übersichtlichen Einstieg auf die beiden wesentlichen Themenblöcke - der Anatomie und des Augenuntersuchungsganges – reduziert. Weitere Menüpunkte sind ein Aufruf des „Quiz“ und des „Glossars“ sowie der „Bildergalerie“.



Start Anatomie - Augenuntersuchung - Bildergalerie Quiz Glossar

Suchbegriff

Die ophthalmologische Untersuchung des hinteren Augensegmentes beim Kleinsäuger

Herzlich Willkommen!

Das Auge als Sinnesorgan deutet bei pathologischer Veränderung aufgrund der besonderen anatomischen Lage oftmals auf Erkrankungen anderer Organsysteme bzw. auf systemische Erkrankungen hin. Um Befunde daher einordnen und Fehlinterpretationen vorbeugen zu können, sind Grundkenntnisse über physiologische bzw. der Tierart entsprechende Befunde am Auge und somit von anatomischen Besonderheiten bei den häufig als Heimtier gehaltenen Kleinsäufern umso wichtiger.

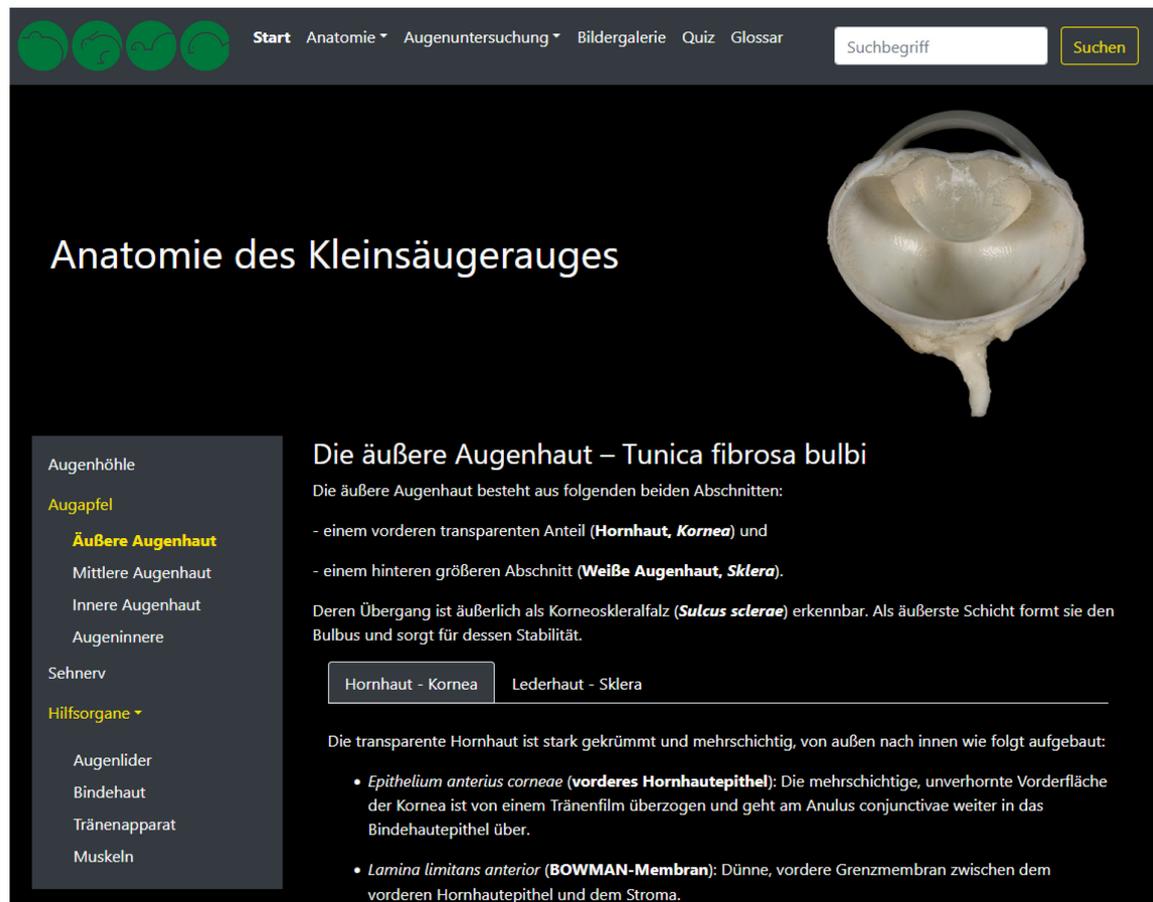
In diesem Online-Tutorial zur ophthalmologischen Untersuchung des hinteren Augensegmentes beim Kleinsäuger wird neben den hierfür erforderlichen anatomischen Grundkenntnissen sowie den tierartlichen Besonderheiten der einzelnen Kleinsäuerspezies, auch die Durchführung der ophthalmologischen Untersuchung mit visueller Darstellung spezieller Untersuchungstechniken demonstriert und Grundlegendes zur Erkennung von Augenerkrankungen vermittelt. Bedeutender sind jedoch die physiologischen Befunde des hinteren Augensegmentes, die sich je nach Kleinsäuerspezies deutlich voneinander unterscheiden.

Zur Anatomie

Zur Augenuntersuchung

Abbildung 14: Die Startseite des Tutorials in der Live-Browser-Ansicht (Frontend).

Die Einstiegsseite weicht dahingehend von dem darauffolgenden einheitlichen Layout der Unterseiten mit zusätzlich vorhandenem Navigationsmenü zu den korrespondierenden Unterthemen im linken Seitenbereich ab. Dieses ist zusätzlich in jeweils 4 Abschnitte mit insgesamt zusätzlichen 9 Unterseiten unterteilt. Durch Verwendung einer Toggle-Navigation, die aufgrund ihrer Übersichtlichkeit v. a. bei wenig Platz auf kleinen Bildschirmen von Vorteil ist, öffnen sich bei Anklicken eines Menüpunktes weitere Unterthemen.



Start Anatomie ▾ Augenuntersuchung ▾ Bildergalerie Quiz Glossar

Suchbegriff

Anatomie des Kleinsäugeterauges

Augenhöhle

Augapfel

Äußere Augenhaut

Mittlere Augenhaut

Innere Augenhaut

Augeninnere

Sehnerv

Hilfsorgane ▾

Augenlider

Bindehaut

Tränenapparat

Muskeln

Die äußere Augenhaut – Tunica fibrosa bulbi

Die äußere Augenhaut besteht aus folgenden beiden Abschnitten:

- einem vorderen transparenten Anteil (**Hornhaut, Kornea**) und
- einem hinteren größeren Abschnitt (**Weißer Augenhaut, Sklera**).

Deren Übergang ist äußerlich als Korneoskleralfalz (**Sulcus sclerae**) erkennbar. Als äußerste Schicht formt sie den Bulbus und sorgt für dessen Stabilität.

Hornhaut - Kornea Lederhaut - Sklera

Die transparente Hornhaut ist stark gekrümmt und mehrschichtig, von außen nach innen wie folgt aufgebaut:

- *Epithelium anterius corneae* (**vorderes Hornhautepithel**): Die mehrschichtige, unverhornte Vorderfläche der Kornea ist von einem Tränenfilm überzogen und geht am Anulus conjunctivae weiter in das Bindehautepithel über.
- *Lamina limitans anterior* (**BOWMAN-Membran**): Dünne, vordere Grenzmembran zwischen dem vorderen Hornhautepithel und dem Stroma.

Abbildung 15: Die obere und seitliche Menüleiste der Unterseite zur äußeren Augenhaut in der Live-Browser-Ansicht (Frontend).

Über den Menüpunkt „Start“ sowie über das Klinik-Logo gelangt man von jeder Seite aus stets wieder zur Startseite zurück.

Über CSS-Regeln wurden weitere individuelle Komponenten wie Navigationen, Buttons oder Bilderkarusselle hinzugefügt und deren Anordnung im Layout bestimmt. Der Vorteil dieses variablen Frameworks ist, dass sich der Inhalt auf unterschiedlichen Geräten wie Smartphone, Tablet oder großzügigen Bildschirmmonitoren dynamisch der jeweiligen Bildschirmgröße anpassen kann, sozusagen responsiv ist.



Start

Anatomie ▾

Augenuntersuchung ▾

Bildergalerie

Quiz

Glossar

Die ophthalmologische Untersuchung des hinteren Augensegmentes beim Kleinsäuger



Herzlich Willkommen!

Das Auge als Sinnesorgan deutet bei pathologischer Veränderung aufgrund der besonderen anatomischen Lage oftmals auf Erkrankungen anderer Organsysteme bzw. auf systemische Erkrankungen hin. Um Befunde daher einordnen und Fehlinterpretationen vorbeugen zu können, sind Grundkenntnisse über physiologische bzw. der Tierart entsprechende Befunde am Auge und somit von anatomischen Besonderheiten bei den häufig als Heimtier gehaltenen Kleinsäufern umso wichtiger.

Abbildung 16: Die Startseite in der responsiven Mobilansicht.

Im ersten Themenblock - der Anatomie - wird zunächst anatomisches Vorwissen der verschiedenen Kleinsäugerarten vermittelt, welches für die praktische Durchführung der Augenuntersuchung und zur Interpretation der erhobenen Befunde relevant ist. Zur Visualisierung wurde hierfür das zuvor angefertigte Bildmaterial der kalottierten Kaninchenaugen eingesetzt. Die Darstellung anatomischer Details erfolgt sowohl mit statischen als auch dynamisch- bzw. interaktiv-gestalteten Bildern der aufgenommenen Augäpfel.

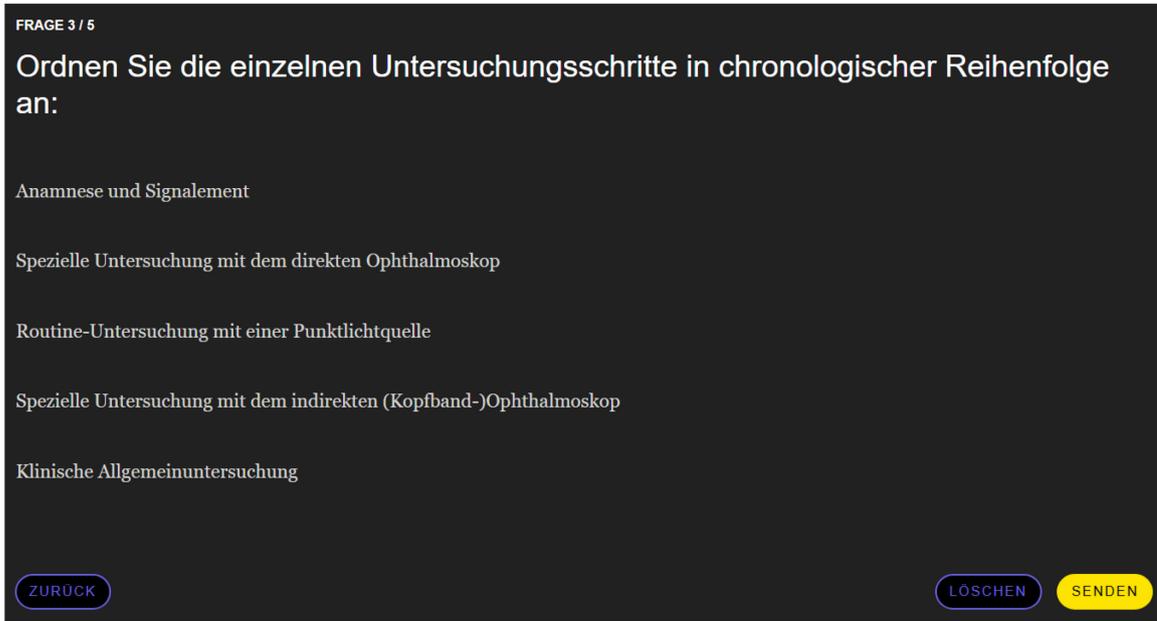
Bei Verwendung von grafischem Material mit eingesprochenen Erklärungen wurde auf den Einsatz von redundantem Text, der das Gesprochene nochmals in abgebildeter Textform darstellt, verzichtet.

Unterteilt in mehrere Unterkapitel werden im zweiten Themenblock des Online-Tutorials die Grundlagen des ophthalmologischen Untersuchungsganges vermittelt, aber auch die speziellen Untersuchungsmethoden zur Beurteilung des hinteren Augensegmentes des Kleinsäugetieres dargestellt.

Zur Demonstration der praktischen Durchführung werden die zuvor angefertigten interaktiven Lehrvideos als Plug-in eingebunden.

Interaktionen

Das Online-Tutorial wurde mit interaktiven Elementen unterschiedlicher Formate angereichert. Diese reichen von der standardisierten Multiple-Choice-Aufgabe mit jeweils 5 Antwortmöglichkeiten bis hin zur Frageform mit Freitexteingabe aber auch mit Drag-and-drop-Funktionalität. Auch wurden interaktive Lernkärtchen erstellt, bei deren Auswahl durch einen Mausklick weitere Zusatzinformationen erscheinen.



FRAGE 3 / 5

Ordnen Sie die einzelnen Untersuchungsschritte in chronologischer Reihenfolge an:

Anamnese und Signalement

Spezielle Untersuchung mit dem direkten Ophthalmoskop

Routine-Untersuchung mit einer Punktlichtquelle

Spezielle Untersuchung mit dem indirekten (Kopfband-)Ophthalmoskop

Klinische Allgemeinuntersuchung

ZURÜCK LÖSCHEN SENDEN

Abbildung 17: Quizfragen mit Drag-and-drop-Funktionalität.

Zur Überprüfung des eigenen Lernerfolges kann am Ende des jeweiligen Kapitels zu den beiden Lernblöcken der Anatomie und des ophthalmologischen Untersuchungsganges jeweils ein Fragen-Quiz absolviert werden. Mehrfachversuche sollen dabei die Aufmerksamkeit und den Entschlossenheitswillen der Studierenden erhöhen. Nach Erhalt des prozentualen Endergebnisses und Nennung der benötigten Anzahl an Lösungsversuchen können die Aufgaben mit ihren Lösungen erneut einzeln abgerufen werden. Dies soll den Lernerfolg steigern und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei Wiederholung des Tests gewährleisten.



QUIZERGEBNISSE

IHRE PUNKTZAHL:	30
HÖCHSTPUNKTZAHL:	50
RICHTIGE ANTWORTEN:	3
FRAGEN INSGESAMT:	5
GENAUIGKEIT:	60%
ANZAHL DER VERSUCHE:	1

[QUIZ ÜBERPRÜFEN](#) [WEITER](#)

Abbildung 18: Überblick über das Feedback zum Quiz.

In einer Bildergalerie werden zudem alle im Tutorial verwendeten Bilddateien übersichtlich dargestellt. Auch wurde dem Lernprogramm ein alphabetisch sortiertes Glossar mit ophthalmologischen Fachbegriffen, welche über die Grundkenntnisse der Studierenden und Tierärzte hinausgehen, hinzugefügt. Relevante Begrifflichkeiten wurden im Lerntext farblich markiert, sodass diese durch einen Mausklick direkt zur Erklärungsseite überleiten.

V. DISKUSSION

1. Anfertigung anatomischer Augenpräparate

Die Entnahme und Vorbereitung der Augäpfel erfolgte nach den Vorgaben und Methoden von SAUNDERS und RUBIN (1975), RAVELHOFER (1996), WERTHER et al. (2011), MILLER et al. (2017) und GELATT et al. (2021), nach denen sich zur fotografischen Dokumentation eignende Augenpräparate anfertigen ließen.

Im Gegensatz zur bewährten Schnittführung bei Vogelaugen (Ravelhofer, 1996) orientierten sich die für die Kaninchen- und Rinderaugen gewählten Schnittebenen an dem jeweiligen Darstellungsziel und somit daran, welche anatomischen Strukturen fotografisch dokumentiert werden sollten. Dabei wurde in den meisten Fällen wie von REIMANN (2015) die bei Fischeaugen gewählte, fast mittig entlang der Sehachse unterhalb des Sehnerven erfolgende waagerechte Halbierung der Bulbi angewandt.

Abweichend der Ergebnisse von DOROBEK (2013) konnte weder bei den Kaninchen- noch den Rinderaugen ein Einsinken der vorderen Augenkammer beobachtet werden. Die Augäpfel waren unabhängig der Fixationsdauer ab dem Zeitpunkt der Instillation von Fixierlösung in die vordere Augenkammer prall gefüllt und die Kornea blieb auch nach Kallotierung der Augäpfel in physiologischer Form erhalten. Eine Zunahme oder Abnahme des Augäpfelumfanges wie beim Vogelauge (Werther, K. et al., 2011) konnte weder bei den Kaninchen- noch den Rinderaugen beim Belassen der Augäpfel in der Fixierlösung beobachtet werden. Infolgedessen waren in der vorliegenden Studie in diesem Zusammenhang auch keine Netzhautablösungen erkennbar, die von WERTHER et al. (2011) bei in Formalin fixierten Vogelaugen häufig beobachtet wurden, sondern traten eher erst bei andauernder Manipulation der Präparate bei zunehmender Verwendungsdauer auf. Da eine Ablösung der Netzhaut im vorliegenden Fall, wenn überhaupt, jedoch erst nach Eröffnung des Bulbus feststellbar war, ist eine Überschreitung der von WERTHER et al. (2011) ermittelten maximal benötigten Fixationsdauer von 48 h als Ursache nicht gänzlich auszuschließen (Werther, Karin, Candioto & Korbel, 2017). Nach erfolgreicher Fixierung der Augenpräparate ist demnach eine zügige Kallotierung sowie eine kurzgehaltene Fotografiedauer vonnöten, die durch Einhaltung gleichgehaltener Aufnahmebedingungen und Anwendung eines standardisierten Dokumentationsablaufs erzielbar sind, um reproduzierbare Ergebnisse

zu liefern (Bengel, 1994). Auch ist zu bedenken, dass die beiden Blätter der *Pars optica retinae* nur an ausgewählten Punkten (Ora serrata und Discus nervi optici) miteinander verbunden sind und sich daher bei Eröffnung des Augapfels leicht voneinander ablösen (Liebich et al., 2019; Salomon et al., 2020). Dies ist mitunter auch ein Grund, wieso ein starkes Hervorziehen des Augapfels aus der Augenhöhle vor Durchtrennung des Sehnervs bei der E nukleation unterbleiben sollte.

Um die Stabilität der Kornea aufrechtzuhalten und einer Abnahme des Augapfelvolumens mit nachfolgender Netzhautablösung und Faltenbildung entgegenzuwirken, bestätigt sich auch hier die Feststellung von STROBEL (2010), dass der Fixationsprozess durch zusätzliches Einbringen von Fixationslösung auch in die vordere Augenkammer von immenser Bedeutung ist und in jedem Fall erfolgen sollte.

2. Makroaufnahmen der Augenpräparate – Focus Stacking

Die erzielbare Schärfentiefe ist bei Bildaufnahmen dreidimensionaler Objekte im Makrobereich der wesentliche Faktor zum Erhalt eines scharfen Abbildes (Knop, 2019). Infolge der geringen Objektgröße bei gleichzeitig großer Tiefenausdehnung der kolloidierten Bulbi ist die fotografische Dokumentation zur Detaildarstellung bei einem zusätzlich geringen Objektabstand an gewisse Herausforderungen gebunden.

Zur Erzielung einer möglichst großen Schärfentiefe ist so weit wie möglich abzublenden, wohingegen die hierdurch verminderte Bildhelligkeit mittels Blitzlicht zu kompensieren ist (Bengel, 1984b; Gockel, 2012c; Korbelt, 1990; McMullen et al., 2021). Dies wiederum führt zu Farbverschiebungen, Schattenbildung und ggf. sichtbaren Lichtreflexionen und Spiegelungen, insbesondere bei Objekten mit einer feuchten, glänzenden und somit stark reflektierenden Oberfläche (Bengel, 1984c; Korbelt, 1994a) bzw. auch bei Auftreffen auf die mit Wasser gefüllte Bulbusinnenfläche. Bei einer stark geschlossenen Blende ist zudem mit einer zunehmenden Beugungsunschärfe zu rechnen (McMullen et al., 2021), da auf die Lamellen der weitgehend geschlossenen Blende auftreffende Lichtstrahlen abgelenkt werden und daher nicht die Sensorebene der Kamera erreichen (Knop, 2019; Korbelt, 1994a). Ein anderer Lösungsansatz, das Präparat möglichst gleichgerichtet zur Sensorebene der Kamera aufzunehmen (Gockel, 2012c) und den Fokuspunkt entsprechend der zur Hälfte vor und hinter dieser Auswahlebene zu erwartenden Bildschärfe mittig zu wählen (Bengel, 1984d), brachte bei den hier vorliegenden Präparaten mit starker Tiefenausdehnung keinen nennenswerten Effekt.

Entsprechend der Tabelle zu den Schärfentiefebereichen nach BENGEL (1984d) kann die größtmögliche Schärfentiefe von 6,0 mm bei einem Abbildungsmaßstab von 1:1 bei Einstellung der Objektivblende auf 45 erzielt werden. Im vorliegenden Fall war die größtmögliche Schärfenzone der anatomischen Augenpräparate bei einer Objektdistanz von 28,5 cm mit einer Blende von 20 im abgedunkelten Raum bei Verwendung eines Ringblitzes erzielbar. Dieses Ergebnis deckt sich mit der Schärfentiefe-Tabelle der verwendeten Nikon-Kamera, in der festgehalten ist, dass mit deren Sensorgröße bei Blende 20 eine maximale Schärfentiefe von nur 2,3 mm erzielbar sei. Wie unschwer zu erkennen war die 9 mm tiefe Bulbushälfte somit unabhängig von der gewählten Aufnahmetechnik nicht durchgehend scharf abzulichten.

Lösbar wurden die zuvor beschriebenen Herausforderungen im Besonderen die Erzielung einer durchgehenden Schärfentiefe bei Fotografie der Bulbuspräparate durch Anwendung des seit mehreren Jahren in der Fotodokumentation kleiner Objekte bereits eingesetzte Focus Stackings (Knop, 2019; McMullen et al., 2021), wofür Geräte- und Softwaregestützt Serienbildaufnahmen bzw. mehrere Einzelbilder mit variierenden Fokuspunkten in unterschiedlichen Tiefenebenen des Aufnahmeobjekts angefertigt werden, um die Ursprungsbilder mit unterschiedlichen Schärfenlagen anschließend zu einem durchgehend scharfen Gesamtbild, in dem alle Ebenen scharf erscheinen, zu vereinen (Gockel, 2012c; McMullen et al., 2021). Dies gelang durch den Einsatz eines Makroschlittens, auf dem die Kamera mit auf dem Objektiv angebrachten Ringblitz befestigt wurde. Nach Voreinstellung der gewünschten Parameter (Einzelbildanzahl, Schrittweite, Entfernungstrecke) fertigte diese über den zwischen Kamera und Objektiv angebrachten Ring vollautomatisch eine Serie von Einzelbildern in unterschiedlicher Entfernung zum Objekt an. Durch die hierdurch erzielten unterschiedlich gelagerten Fokuspunkte konnte der gewünschte Schärfentiefebereich vollständig ausgeschöpft werden. Die mit verändertem Fokus in einer Serie fotografierten Einzelaufnahmen konnten anschließend mithilfe einer Software durch komplexes Focus Stacking zu einem ausnahmslos tiefenscharfen Gesamtbild vereint werden. Da sich das zu fotografierende Objekt zur Anwendung des Focus Stacking nicht verändern darf, da sowohl die gleiche Perspektive und auch derselbe Bildausschnitt beizubehalten sind, ist die Anwendung am sich bewegenden, lebenden Tier nicht zielführend. Für die klinische Fotografie wäre in der Ophthalmologie jedoch denkbar, Bildaufnahmen bei anästhesierten Tieren anzufertigen, da hierbei die Position des Auges als auch der Kamera konstant gehalten werden kann (McMullen et al., 2021).

Das in der vorliegenden Arbeit aufwendige, manuell angewandte Verfahren des Focus Stacking zur Bildaufnahme anatomischer Augenpräparate wurde mittlerweile vom rasanten technischen Fortschritt des digitalen Zeitalters überholt. Die hohe Bedeutsamkeit qualitativ hochwertiger Aufnahmen mit großem Schärfentiefebereich, die in der Medizin beispielsweise zur Dokumentation von erhobenen Befunden, zur Nachverfolgung von Krankheitsverläufen, zur Präsentation und auch zur Illustration benötigt werden, hat zur Weiterentwicklung der Focus Stacking Technik beigetragen. Der bislang kostspielige und zeitaufwendige Prozess zur Anfertigung vieler Einzelaufnahmen unter Einsatz des hier verwendeten Makroschlittens und der anschließenden Kombination dieser Serienbilder unter Verwendung einer Stacking-Software wird durch jüngste Entwicklungen in der Kameratechnologie vereinfacht und macht die hier verwendete Ausrüstung mittlerweile entbehrlich. So weisen moderne Kameragenerationen ausgewählter Hersteller zwischenzeitlich sowohl eine kamerainterne Focus Bracketing Funktion zur automatischen Anfertigung präziser Serienaufnahmen aus unterschiedlichen, zuvor definierten Entfernungen als auch eine integrierte Focus Stacking Funktion auf, durch welche nach automatischer Verarbeitung der Einzelaufnahmen ein final vereintes Gesamtbild mit hoher Auflösung und definierter Schärfentiefe präsentiert wird. Hierfür benötigt wird ein kompatibles Objektiv, das auch bei Entfernungsänderung den gewählten Bildausschnitt beibehält, sowie die automatische Steuerung einer durch die Kamera bestimmten Fokussierung zulässt. Auch gibt es in weiteren medizinischen Fachdisziplinen, beispielsweise auf dem Gebiet der Dermatoskopie Bestrebungen, das nicht invasive Untersuchungsverfahren zur Früherkennung von Hautkrebs und zur Langzeitbeobachtung von Hautveränderungen mittels Focus Stacking Technik so zu optimieren, dass alle Regionen der Haut auch außerhalb des Fokusbereichs von Dermatoskopen mit geringer Schärfentiefe in einer Aufnahme erfasst werden können (Jütte et al., 2022). Weitere Einsatzmöglichkeiten der Focus Stacking Fotografiertechnik auf dem Gebiet der Medizin und Biologie wurden jüngst erfolgreich im Bereich der Protonenradiografie erforscht, in welchem die Technik dazu beiträgt, Bilder mit hohem räumlichem Auflösungsvermögen zu erhalten und durch Bestimmung der radiologischen Tiefe erfasster Teilchen sogar darüber vermögt, das Potenzial zur Erkennung von 3D-Merkmalen auszuschöpfen (Volz et al., 2024).

3. Praktische tierärztliche Ausbildung unter Tierschutzgesichtspunkten

Die klinische Untersuchung zur Erkennung von Krankheiten bei Vögeln, Fischen, Reptilien und nicht zuletzt auch bei Kleinsäugetern erfordern in der Praxis, insbesondere zur sachkundigen Behandlung dieser Tierarten ein hohes Maß an Fachwissen. Gemäß Verordnung zur Approbation von Tierärztinnen und Tierärzten (TAppV) ist die Vermittlung wissenschaftlich-theoretischer Kenntnisse in Form von verpflichtenden Lehr- und frei wählbaren Wahlpflichtveranstaltungen während der tierärztlichen Ausbildung mit einer Regelstudienzeit von 11 Fachsemestern jedoch auf eine Maximalstundenanzahl von insgesamt 3.850 Stunden begrenzt. Stand 2020 entfallen an der tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München hiervon im Rahmen der Propädeutik im 3. Semester eine Pflicht-Doppelvorlesung sowie das Angebot von insgesamt 8 WPF, die zu unterschiedlichen Semestern angeboten werden auf den Bereich der Kleinsäugeterausbildung (Imhof, 2020). Zusätzlich können Studierende im „Skills Lab“, das der praktischen Anwendung von zuvor in der Theorie angeeignetem Wissen dient, an einer Station Kenntnisse und Fertigkeiten zur Propädeutik kleiner Heimtiere, u. a. zum Training der Blutentnahme an der Ohrvene beim Kaninchen erwerben. Die Kleinsäugermedizin ist in der zuletzt am 15.08.2019 geänderten Fassung der TAppV (TAppV, 2006) nicht explizit genannt und kann vermutlich deshalb bislang nicht über das zuvor genannte Maß an der LMU im Lehrplan verankert werden. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Studierenden während der zeitintensiven Regelstudienzeit des Tiermedizinstudiums eher auf prüfungsrelevante Inhalte konzentrieren (Friedrich, 2020; Imhof, 2020). Gleichwohl zeigt die zunehmende Anzahl an Kleinsäugerpatienten in der Tierarztpraxis das weiter steigende Erfordernis von Kenntnissen und Fähigkeiten im Heimtierbereich auf (Keeble & Meredith, 2009; Van der Woerd, 2021; Wöhr et al., 2022). Die Aneignung von weiterem Fachwissen durch Tiermedizinstudenten in diesem Bereich hat aufgrund des aktuellen Curriculums daher auf freiwilliger Basis oder gar postgradual zu erfolgen, ist dabei jedoch vom individuellen Interesse der Lernenden sowie der Bereitschaft zur Aufwendung von Freizeit abhängig. Das in dieser Arbeit multimedial erstellte E-Learning-Angebot umfasst den aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand der Kleinsäugeterophthalmologie des hinteren Augensegmentes, der kompakt und interaktiv aufbereitet wurde, um sowohl Tiermedizinstudenten als auch Tierärzten ein effektives Lernmedium bei freier Zeiteinteilung zur Verfügung zu stellen. Ein hoher Nutzungsgrad durch Tierärzte soll

dabei durch anschauliche Vorbereitung und Auffrischung von ggf. bereits vorhandenem, jedoch in Vergessenheit geratenem Vorwissen des Untersuchers den Stressfaktor der Augenuntersuchung beim einzelnen, in der Tierarztpraxis vorgestellten Kleinsäugerpatienten minimieren. Kaninchen und Kleinnager sind als Flucht- und Beutetiere dabei besonders stressanfällig, weshalb eine stressarme und zügige Untersuchung erforderlich ist (Ewringmann, 2016; Ewringmann & Glöckner, 2012, 2014; Keeble & Meredith, 2009; Van der Woerdt, 2021).

Der Grundsatz zur Vermeidung von länger andauernden oder sich wiederholenden Belastungen des Kleinsäugerpatienten bei der ophthalmologischen Untersuchung sowie bei Filmaufnahmen zur Verwendung in der Lehre ergibt sich aus dem Tierschutzgesetz (vgl. Grundsatz in § 1 sowie Verbot gemäß § 3 Nummer 6). Durch das Absolvieren des hierzu entwickelten Online-Tutorials ist zum einen eine theoretische Vorbildung der Studenten zum Einstudieren des ophthalmologischen Untersuchungsganges vor dem Handling des Kleinsäugerpatienten gegeben. Zum anderen sollen unter Beachtung von Tierschutzaspekten angefertigte professionelle Bild- und Videoaufnahmen eine mehrfache Demonstration des Untersuchungsganges vor immer neu gebildeten Studentengruppen entbehrlich machen und insgesamt dazu beitragen, die benötigte Anzahl an Tieren zu Ausbildungszwecken zu reduzieren. Hierfür wurde von der Autorin die gemäß Tierschutz-Versuchstierverordnung (TierSchVersV, 2013) erforderliche Sachkunde durch Teilnahme an einem fachspezifischen Kurs zur Erlangung der notwendigen theoretischen Kenntnisse und Fähigkeiten bei LAS interactive (LAS interactive GmbH, Marburg) durch erfolgreichen Abschluss einer Online-Prüfung erworben.

4. Interaktives, multimediales Lernprogramm

Bereits 1986 ermittelten REID & BEVERIDGE (1986), dass der Lerneffekt bei dargebotenen Informationen im Text- und ergänzend im Bildformat bei fehlendem Vorwissen der Schüler zumindest im naturwissenschaftlichen Bereich geringer als für Lernende mit Vorbildung ausfällt, sodass bei fehlendem Vorwissen mit dem ergänzten Bildmaterial kein zusätzlicher Nutzen erzielt werden kann. Diesen frühen Erkenntnissen wurde im Rahmen dieser Arbeit Rechnung getragen, indem in einem ersten Abschnitt zunächst anhand Beschreibungen in Textform und statischem sowie dynamisch-interaktiv aufbereitetem Bildmaterial in Form realer Repräsentation von Kaninchenaugen für die Augenuntersuchung relevantes anatomisches Vorwissen vermittelt wird. Im

zweiten Themenabschnitt des Online-Tutorials folgen sowohl die Grundlagen sowie die speziellen Untersuchungsmethoden zum ophthalmologischen Untersuchungsgang des hinteren Augensegmentes. Am Beispiel des Kaninchenauges werden diese sowohl in Bildern als zusätzlich auch in interaktiv aufbereiteten Lernvideos demonstriert. Werden die fertiggestellten Videos als Medienelement in ein Lernmanagementsystem wie beispielsweise Moodle eingebunden, ergibt sich hierdurch die Möglichkeit, Nutzungsdaten wie die Anzahl der Aufrufe oder die Dauer der Videoabrufe erfassen zu können und anhand einer Auswertung zu analysieren. Das Konzept dieses Online-Lernangebots wurde in Hinblick auf die sowohl Studierende der Tiermedizin als auch postgradual interessierte Tierärzte umfassende Zielgruppe, die sich im Fachbereich der Ophthalmologie bzw. speziell im Kleinsäugersegment entsprechend aus- oder fortbilden möchte, aufgebaut. Ein entsprechendes Vorwissen, womöglich zur ophthalmologischen Untersuchung anderer Tierarten, zumindest jedoch in Bezug auf geläufige, in der Tiermedizin angewandte Fachbegriffe sind somit anzunehmen und wurden beispielsweise auch bei der Glossar-Erstellung insofern berücksichtigt, dass lediglich neue ophthalmologisch eingeführte Begrifflichkeiten nachgeschlagen werden können.

In einer Studie von SCHÜLER, SCHEITER & GERJETS (2012) wurde ermittelt, dass das gleichzeitige Angebot zu vermittelnder Lerninhalte in Text- und Bildform hinderlich für den Erwerb von Wissen sein kann. Um den erzielbaren Multimediaeffekt in seiner Gänze ausschöpfen zu können, ist beim Einsatz von Multimedia daher darauf zu achten, die Erklärung des visuell-räumlichen Kontext anstatt dem geschriebenen Text dem Bildmaterial zuzugestehen (Schmidt-Weigand & Scheiter, 2011). Die räumliche Einordnung anatomischer Strukturen blieb in dieser Arbeit daher den Bildern vorbehalten. Im einführenden, beschreibenden Text wurde sogleich zusätzliches Detailwissen vermittelt und auf die tierartlichen Unterschiede der einzelnen Kleinsäugerspezies eingegangen. Auch CLARK und MAYER (2016b; 2017) bekräftigen dieses Vorgehen und nehmen Bezug auf das Redundanzprinzip, nach welchem überflüssige Informationen, zu welchen auch die gleichzeitige Darstellung derselben Aussage in Bild-, Text- und Tonform zählt, hinderlich für das Lernen sind. Dies bekräftigen sie anhand mehrerer Studien, die z. B. aufzeigen, dass die Vermittlung von Lernstoff durch Bilder mit gesprochenem Text erfolgreicher ist, wenn der Sprechertext nicht auch noch zusätzlich auf dem Bildschirm angezeigt wird. In anderen Fällen wie bei bilderlosen Texten, bei Beschränkung des redundanten Textes auf Stichworte oder auch beim Einsatz relevanter Handlungsanweisungen kann Redundanz jedoch auch das Lernen

fördern. So wurden in diesem Online-Tutorial zum Teil Audiodateien anstelle von geschriebenem Text zur Erläuterung anatomischer Zusammenhänge verwendet.

Bei einem an der Freien Universität Berlin von KRAUSS (2013) erstellten Online-Lernprogramm, das der Ergänzung des Präsenz-Wahlpflichtkurses "Spezielle Augenheilkunde" diene, gaben hierzu im Rahmen einer erfolgreichen Evaluation im Mittel 83,04 % von insgesamt 106 teilnehmenden Studenten an, das Internet täglich sowohl privat als auch zu studentischen Zwecken zu nutzen. Im Vergleich zur überaus häufigen Nutzung von Büchern und anderen Printmedien zur Vorbereitung auf Vorlesungen und Prüfungen werden Lernmedien online oder auf CD-ROM demnach seltener bzw. nie genutzt (Friedrich, 2020; Krauß, 2013). Als Teilnahmegrund an dem Wahlpflichtfach zur speziellen Veterinärophthalmologie wurde überwiegend angegeben, dass das Thema interessant sei und sich die Studierenden hierdurch besser auf Prüfungen und den Praxisalltag vorbereiten wollten. Für den Lernprozess seien ihnen Bilder bzw. Grafiken, gefolgt von Lesen und auch dem aktiven Handeln am wichtigsten (Krauß, 2013). Im vorliegenden Online-Tutorial wurden diese Medien, hierunter visuell anschauliches Bild- und Videomaterial, leicht lesbare Textinhalte sowie auch Interaktionsmöglichkeiten zur Anwendung des Gelesenen eingefügt und angewandt. Von den Studierenden wird zudem mehrheitlich auf eine Möglichkeit zum Printausdruck der Lerninhalte Wert gelegt (Krauß, 2013), sodass ein Mitführen der Inhalte zur Ergänzung an den Präsenzterminen möglich ist (Friedrich, 2020). Denn einen vollständigen Ersatz von Präsenzveranstaltungen auf dem Spezialgebiet der Ophthalmologie durch ein Online-Lernmedium sieht die überwiegende Mehrheit der befragten Studenten trotz erarbeiteten Video-Podcast, Wiki und E-Book bei diesem Angebot nicht (Krauß, 2013). Eine Umfrage unter Tiermedizinstudenten im Jahr 2018 an der LMU ergab, dass eine umfassende Auswahl an E-Learning-Angeboten in allen Fachbereichen der Tiermedizin gewünscht sei, obwohl die Studierenden in der gleichen Befragung angaben, zu diesem Zeitpunkt noch am wenigsten mit diesen zu lernen. Knapp ein Drittel der Befragten gab sogar an, noch nie ein E-Learning-Programm genutzt zu haben, weshalb in dieser Studie zusammenfassend festgestellt werden konnte, dass Online-Lernprogramme die Lehre begleiten und zur freiwilligen Vertiefung der Vorlesungsinhalte vor allem zur Prüfungsvorbereitung begrüßt werden. Zur Erfüllung dieser Anforderungen werden von den Studenten verstärkt Quizfragen zur Überprüfung des eigenen Wissensstands gefordert (Friedrich, 2020). Diese fanden auch Eingang in das hier entwickelte Online-Tutorial, und zwar in verschiedenen interaktiven Formaten, von der standardisierten Multiple-

Choice-Aufgabe bis hin zur Freitexteingabe oder auch mit Drag-and-drop-Funktionalität. Zur Überprüfung des eigenen Lernerfolges kann am Ende des jeweiligen Kapitels zu den beiden Lernblöcken der Anatomie und des ophthalmologischen Untersuchungsganges jeweils ein Fragen-Quiz absolviert werden. Mehrfachversuche sollen dabei die Aufmerksamkeit und den Entschlossenheitswillen der Studierenden erhöhen. Nach Erhalt des prozentualen Endergebnisses und Nennung der benötigten Anzahl an Lösungsversuchen können die Aufgaben mit ihren Lösungen erneut einzeln abgerufen werden. Dies soll den Lernerfolg steigern und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei Wiederholung des Tests gewährleisten. Denn Lernen mithilfe digitaler Medienangebote stößt bei den Lernenden aufgrund der selbst regulierbaren Lernintensität meistens auf eine hohe Akzeptanz, steigert gleichwohl aber auch das Ablenkungspotenzial der Studierenden. Das Einbinden verschiedener Interaktionsmöglichkeiten, verbunden mit einem kontinuierlich erfolgenden automatischen Feedback zum bereits erzielten Wissenszuwachs wie z. B. an passender Stelle in das Online-Lernmedium eingefügter Frage-und-Antwort-Spiele, sollen die Lernenden bei Interesse halten. So wird nicht nur die Lernmotivation erhöht, sondern es werden auch Prozesse des Selbststudiums angeregt (Garrison & Cleveland-Innes, 2005), die durch Anwendung interaktiver Feedbackmöglichkeiten die Überprüfung der eigenen Selbsteinschätzung erleichtern und eine Aussage treffen, ob sich die Studierenden für die praktische Anwendung ausreichend vorbereitet fühlen können (Handke, 2014). Im Rahmen des Flipped-Classroom-Konzepts, bei dem sich die Lernenden anhand multimedialer Elemente zunächst im Online-Selbststudium theoretisches Wissen aneignen sollen, das dann in einer darauffolgenden Präsenzphase unmittelbar in Anwendung gebracht wird, soll angeeignetes Wissen verinnerlicht und gefestigt werden können (Persike, 2020). Ziel ist ein wertvoller Zeitgewinn für die Präsenzphase, in der bei diesem Vorgehen bereits eigenständig erarbeiteter Lernstoff unmittelbar angewendet werden kann. Die gewonnene Zeit kann zum Ausräumen von Verständnisproblemen genutzt werden, anstatt sich zunächst der Theorie widmen zu müssen (Persike, 2020). Das hier vorliegende Online-Tutorial zur ophthalmologischen Untersuchung des hinteren Augensegmentes ist zur Aneignung von theoretischem Wissen konzipiert und könnte daher unmittelbar zur Vorbereitung auf eine Präsenzveranstaltung, beispielsweise im Rahmen eines Wahlpflichtfaches oder auch innerhalb der an der Klinik für Vögel, Kleinsäuger, Reptilien und Zierfische stattfindenden Schwerpunktrotation im 9. und 10. Fachsemester Anwendung finden.

Insgesamt ist an den bisher erzielten Erkenntnissen zu Online-Lernangeboten ersichtlich,

dass eine Digitalisierung der Lehre Studierende und Lehrkräfte gleichermaßen vor neue Herausforderungen stellt. Das online Lernen anhand von Text- und Bildmaterial sowie weiteren multimedialen Inhalten wird mehr denn je gefordert, andererseits ist ein zielgerichtetes Lehren mit Multimediainhalten bislang nur wenig wissenschaftlich erprobt worden (Scheiter et al., 2020). Das vorliegende Online-Tutorial wurde anhand der 12 evidenzbasierten Prinzipien zur Entwicklung computergestützter Lehrmaterialien zur Förderung des akademischen Lernens nach MAYER (2017) erstellt, wodurch einer Übertragung von Forschungswissen in die Lehrpraxis Rechnung getragen wird. Weitere Autoren geben anhand praxisnaher Beispiele Hinweise darauf, welche Design- und Layoutoptionen sich in der Umsetzung bislang bewährt haben. So ist wie in diesem Lernprogramm zur Wahrung des Überblicks umgesetzt, eine grobe Menüstruktur unter dem Header gepaart mit einem zusätzlichen, detaillierten Seitenmenü am besten geeignet und wird oft in der Praxis angewandt (Gutheim, 2008). Inwieweit das Lernen und der Wissenserwerb der Studierenden durch das entwickelte Konzept und die unterschiedlichen Multimediaangebote gefördert werden können und sich als sinnvoll erweisen, hätte den bereits umfassenden Rahmen dieser Arbeit übertroffen und konnte somit nicht zusätzlich untersucht werden. Es ist jedoch bekannt, dass ein Mehrwert zu klassischen Lern- und Lehrangeboten durch E-Learning nur erzielt werden kann, sofern die gestalterischen und multimedialen Möglichkeiten durch Erarbeitung interaktiver Inhalte vollends ausgereizt werden. Das Einbinden qualitativ hochwertiger multimedialer Elemente fördert das selbstgesteuerte Lernen und erhöht die Lernmotivation sowie Aufmerksamkeit der Lernenden (Handke & Schäfer, 2012). Auch das für die vorliegende Arbeit angefertigte Bildmaterial der anatomischen Augenpräparate wurde vor dem Einfügen in das Tutorial interaktiv aufbereitet, es wurden Beschriftungen und farbliche Codierung hinzugefügt, um das Erlernen der anatomischen Details zu vereinfachen und eine räumliche Zuordnung zu ermöglichen. Denn der Lernerfolg soll nach BODEMER (2004) durch eine Kombination aus Text und dynamisch-interaktiv gestalteten Bildern gesteigert werden können, sofern deren Inhalt aktiv von den Lernenden durch Zuordnung integriert werden kann. Neben statischen Bildaufnahmen wurden als weiteres Medium zur Darstellung der speziellen Techniken des ophthalmologischen Untersuchungsganges Bewegtbilder eingesetzt. Zur Förderung des Lernverständnisses und Anwendung des Erlernenen wurden den Videosequenzen interaktive Elemente mit Handlungsanweisung hinzugefügt, nach deren korrekten Ausführung die Videosequenz weiter abgespielt wird. Die Arbeit von BODEMER (2004) zeigt auch auf, dass abhängig vom Vorwissen der

Lernenden, der Vielfältigkeit und Anspruch des Lernmaterials sowie auch von der Gestaltungsart effektive Unterstützungsmaßnahmen zum Verständnis dynamisch-interaktiver Bilder erforderlich sein können. Denn es konnte gezeigt werden, dass multimediale Lernangebote nicht zwangsläufig zu einem Wissenszuwachs führen, sondern die Lernenden mittels Handlungsanweisung zum klugen Umgang mit dynamisch-interaktiven Darstellungen angeleitet werden sollten. Dabei reicht es nicht aus, die Komplexität deren Interaktionsmöglichkeiten zu verringern. Vielmehr sind die mentalen Aktivitäten der Studierenden zum Verständnis und Integrieren verschiedener Darstellungsformen zu fördern. So wurden bei einer Untersuchung u. a. erfolgreich Prompts eingesetzt, welche die Lernenden zu einer Handlung, in diesem Fall Hervorhebungen im Text vorzunehmen, aufforderten (Bodemer, 2004). In dem hier erarbeiteten Online-Tutorial wurden keine multimedialen Anweisungen z. B. in Form von Arbeitsblättern oder Prompts angeboten, um den Einsatz bereits vorhandener Lernstrategien bei den Lernenden zu fördern. Vielmehr wurden Handlungsanweisungen direkt bei der jeweils erwarteten Interaktion angezeigt, nach deren Ausführung das nächste Element eingeblendet wird.

Nicht zu unterschätzen ist der immense Zeitaufwand zur Erstellung eines didaktisch aufbereiteten Online-Lernangebots sowie die Erstellung dessen graphisch und interaktiv aufbereiteter Inhalte, obgleich der erzielbare Nutzen für die Lernenden vorab nicht immer einschätzbar ist (Stahl, Boeker, Ehlken, Agostini & Reinhard, 2009). Dieses multimediale Tutorial mit interaktiven Komponenten wurde durch Einarbeitung der Autorin in zahlreiche Software-Anwendungen erstellt. Überwiegend wurden hierfür die neuesten Versionen der Adobe Systems Incorporated (u. a. Dreamweaver, Photoshop, Premiere Pro, After Effects, Captivate) verwendet. Die Erarbeitung, Nutzung sowie Zurverfügungstellung einer standardisierten Vorlage mit klinikintern festgelegtem Aufbau und Design zur Verwendung mit einer Software für Webdesign wie dem HTML-Editor Dreamweaver von Adobe Inc., könnte das Aneignen von HTML- und CSS-Kenntnissen durch den Ersteller auf das Notwendigste reduzieren. Außerdem trägt eine solche zu einem einheitlichen, fakultätseigenen Erscheinungsbild mit Wiedererkennungswert bei, weshalb ein Klinik-Template für die Erstellung weiterer E-Learning-Angebote zur Zeitersparnis anzustreben wäre.

Neben der zeit- und arbeitsintensiven Erstellung eines Online-Tutorials und Anfertigung dessen Inhalte durch den Lehrenden bietet eine solche digitale Lernumgebung jedoch zahlreiche Chancen für den Lernenden. Die Vorteile eines Online-Lernangebots, das die

Wissensvermittlung und den -erwerb zum Ziel hat, liegen auf der Hand: Zeit- und ortsungebunden kann in kurzer Zeit anschaulich und kompakt zusammengefasstes Wissen nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft selbstgesteuert und somit dem eigenen Auffassungsvermögen nachempfunden, im eigenen Lerntempo angeeignet werden (Niegemann, H. M. & Weinberger, 2020). Im vorliegenden Online-Tutorial kann Wissen zu den anatomischen Strukturen des Augeninneren somit nicht nur in Textform zum Durchlesen abgerufen werden, sondern beispielsweise zusätzlich als Audiodatei abgespielt werden, um während dem Hören das vermittelte Wissen anhand eines selbst zu manipulierenden, interaktiv beschrifteten Augenpräparates abgleichen und hierdurch das eigene Verständnis fördern sowie überprüfen zu können. Im heutigen digitalen Zeitalter kann dank fortschreitender Internettechnologie von jedem Ort und zu jeder Zeit auf dieses Lernangebot zugegriffen werden. Das verwendete responsive Design mit automatischer Anpassung an die Bildschirmgröße des genutzten Endgerätes wie Notebook, Tablet oder Smartphone ermöglicht zusätzlich die flexible Nutzung auch unterwegs. Es ist jedoch festzuhalten, dass die heutzutage für die digitale Lehre zur Verfügung stehenden Technologien zum kommunikativen Austausch sowie der kollaborativen Zusammenarbeit in der (Tier-)Medizin bei Weitem noch nicht vollends ausgeschöpft werden. Denn zum einen erlaubt die Videotechnologie den hier in diesem multimedialen Lernprogramm gewählten Einsatz von angefertigten Lehrvideos zur Vermittlung und Aneignung von Wissen. Zum anderen bietet sie jedoch auch bislang noch nicht von den Lernenden genutzte Möglichkeiten zum Austausch und zur Unterhaltung untereinander oder sogar deren Einsatz zur gemeinsamen Wissensreflexion (Marchwacka et al., 2023).

Das hier im Bereich der Kleinsäuger-Ophthalmologie entwickelte interaktive Lernmedium wird neben dem Einsatz auf der digitalen Lernplattform der Klinik für Vögel, Kleinsäuger, Reptilien und Zierfische der Tierärztlichen Fakultät der LMU München seinen Eingang in die Lehre finden. Als Grundlage zur Erstellung weiterer effizienter E-Learning-Angebote in der Tiermedizin als auch zur Überprüfung des wirksamen Kompetenzerwerbs anhand interaktiv aufbereiteter Multimedialinhalte sollte eine auf das hier erarbeitete Online-Tutorial aufbauende Evaluation erfolgen. Die Untersuchung sollte zum einen den erzielten Wissenszuwachs durch interaktive Demonstration des etablierten ophthalmoskopischen Standard-Untersuchungsganges des Kleinsäugerauges als auch die Eruierung der Vor- und Nachteile dieser multimedialen Lernplattform im Vergleich zu traditionellem Lehren und Lernen beinhalten und den

erforderlichen Zeit- und Arbeitsaufwand zur Erstellung des E-Learning-Angebots dem damit erzielten Nutzen gegenüberstellen.

VI. ZUSAMMENFASSUNG

Die Anzahl an vorgestellten Kleinsäugerpatienten in der Tierarztpraxis steigt kontinuierlich und somit auch die Anforderung an eine sachkundige tierärztliche Behandlung dieser Exoten, was beim European College for Zoological Medicine (ECZM) durch eine mögliche Spezialisierung als Diplomate für Kleinsäuger deutlich zum Ausdruck kommt. Dies stellt Studierende wie auch Tierärzte gleichermaßen vor eine Herausforderung, da die Vermittlung von hierzu erforderlichem Fachwissen einschließlich Kenntnissen in der Ophthalmologie aufgrund des überfrachteten Curriculums in der veterinärmedizinischen Ausbildung noch immer nicht vollumfänglich berücksichtigt werden kann. Dabei führen Erkrankungen der Oberkieferzähne insbesondere bei Meerschweinchen, Chinchillas und Degus ebenso wie häufig aufgrund der hervorstehenden Augäpfel auftretende Traumata bei Kleinnagern nicht selten sekundär zu Augenerkrankungen.

Das Ziel dieser Arbeit ist demnach die Erarbeitung eines didaktischen Konzeptes zur Entwicklung eines strukturierten Leitfadens zur kompakten und interaktiv-multimedialen Darstellung des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes der Kleinsäugerophthalmologie des hinteren Augensegmentes, um ein effektives Online-Lernmedium zur selbstständigen Erarbeitung von Wissen während der studentischen Ausbildung oder postgradualen Weiterbildung bei freier Zeiteinteilung zur Verfügung zu stellen.

Nach Anmeldung bei der Virtuellen Hochschule Bayern kann auf das multimediale Lernprogramm, das zur Vermittlung von umfassendem Wissen und Können der Ophthalmologie in die „Virtuelle Exotenklinik“ der Klinik für Vögel, Kleinsäuger, Reptilien und Zierfische integriert werden soll, zugegriffen werden. Neben den hierfür erforderlichen anatomischen Grundkenntnissen sowie den tierartlichen Besonderheiten der einzelnen Kleinsäugerspezies wird die Durchführung der ophthalmologischen Untersuchung mit visueller Darstellung spezieller Untersuchungstechniken in hierfür angefertigten Lehrvideos demonstriert und Grundlegendes zur Erkennung von Augenerkrankungen vermittelt. Bedeutender sind jedoch die physiologischen Befunde des hinteren Augensegmentes, die sich je nach Kleinsäugerspezies deutlich voneinander unterscheiden. Der erzielte Lernerfolg kann durch die Studierenden anhand automatisch auswertbarer Übungsaufgaben mit verschiedenen Interaktionsmöglichkeiten überprüft

werden. Diese reichen von standardisierten Multiple-Choice-Aufgaben mit jeweils 5 Antwortmöglichkeiten bis hin zu Frageformen zur Beantwortung mit Freitexteingaben, aber auch mit Drag-and-drop-Funktionalität. Zur Erhöhung der Aufmerksamkeit wurden darüber hinaus bei geeigneten Lerninhalten weitere interaktive Elemente verwendet, um z. B. per Mausklick auf Lernkärtchen Zusatzinformationen einzublenden. So sollen das Lernverstehen der Studierenden gefördert und geeignete Lernstrategien zur effektiveren Aneignung von Wissen eingesetzt werden können. Inwiefern dies durch die erfolgte Umsetzung erreichbar ist und welche Lehrstrategien in der Tiermedizin weiterverfolgt werden sollen, ist ggf. in einer auf diese Arbeit aufbauenden Evaluation zu ergründen.

Zum besseren Verständnis und räumlicher Veranschaulichung wurden neben Bild- und Videomaterial auch anatomische Augenpräparate angefertigt und fotografisch dokumentiert. Die digitale, dreidimensionale Ablichtung der pigmentfreien und verhältnismäßig tiefen Augapfelhälften des Kaninchens stellte im Makrobereich mit den bisher beschriebenen Methoden, insbesondere aufgrund spiegelnder Blitzreflexionen und einer nicht durchgehend erzielbaren Schärfentiefe des Präparats zunächst eine Herausforderung dar. Das in dieser Arbeit in mehreren Versuchsreihen mit unterschiedlichen Aufnahmetechniken erarbeitete Standardprozedere, für welches schlussendlich Aufnahmeserien mit variierenden Fokuspunkten erzeugt und anschließend Software-gestützt zu einem durchgehend scharfen Gesamtbild vereint wurden (sog. Focus Stacking), kann auch bei anderen Tierarten und Disziplinen zur Anfertigung von Aufnahmen Anwendung finden.

Zur didaktischen Konzeption, der Web-Programmierung und Multimediaentwicklung hat sich die Kombination verschiedener Software bewährt. Zur Umsetzung des didaktischen Konzepts in ein interaktives Lernangebot wurde Adobe Dreamweaver verwendet. Durch Verlinkung aller Lerninhalte können diese entweder systematisch der Reihe nach bearbeitet oder abhängig vom Vorwissen, auch nur einzelne Themenbereiche gezielt aufgerufen werden. Die beiden großen Themenblöcke zur Anatomie des Kleinsäugerauges und der ophthalmoskopischen Untersuchung mit eigens dafür angefertigten und interaktiv aufbereiteten Multimediainhalten können zur Aneignung von Wissen im Selbststudium auf einem PC oder Mobilgerät aufgerufen und somit an jedem Ort angewandt werden.

VII. SUMMARY

The number of small mammal patients presented to the small animal veterinary practice is continually rising, and therefore, the demand for specialized veterinary treatment of these exotic animals is also increasing, which is well expressed in the European College for Zoological Medicine (ECZM) and – regarding to small mammals – the subdivision and specialization as a diplomat for Small Mammals. Students and veterinarians alike are confronted with this challenge, since the extensive, specialized curriculum, including knowledge of ophthalmology is not currently taken into account during veterinary training. Diseases of the upper jaw and teeth, especially in guinea pigs, chinchillas and degus, as well as trauma that often occurs in small rodents due to protruding eyeballs, often lead to secondary eye diseases.

Therefore, this thesis aims to develop a didactic concept to develop a structured guide for a dense and interactive multimedia representation of the current scientific knowledge of small mammal ophthalmology of the posterior eye segment in order to create an effective online learning medium and provide further training with free scheduling for independently developing knowledge during student training or postgraduate studies.

After registering at the Virtuelle Hochschule Bayern (VHB) it is possible to access the multimedia learning program, which should be integrated as an integral part of the “Virtual Exotic Clinic” of the clinic for birds, small mammals, reptiles and ornamental fish and is intended to impart comprehensive knowledge and skills in ophthalmology in a modern, interactive medium. In addition to the required basic anatomical knowledge and the animal characteristics of the individual small mammal species, the ophthalmological examination process and special exam techniques, as well as basics of recognizing eye diseases are taught using educational videos specifically made for this purpose. However, more important are the physiological findings of the posterior eye segment, which differ significantly depending on the small mammal species. Students can assess their learning success using automatically evaluated exercises with various interaction options. These include standardized multiple-choice tasks with five answer options, free text answers and drag-and-drop functionality. To increase attentiveness, additional interactive elements are used suitable to the learning content. For example, to display additional information by clicking on learning cards. The aim is to promote students understanding and to provide suitable strategies to acquire knowledge more

effectively. The most effective teaching strategies for veterinary medicine may need to be explored in an evaluation based on this work.

In addition to the use of images and videos, anatomical eye specimens were prepared and pictures were taken. Using the methods described the digital, three-dimensional imaging in the macro range of the pigment-free and relatively deep halves of the rabbit's eyeball initially posed a challenge, especially due to specular flash reflections and a depth of field that could not be consistently achieved on the specimen preparations. Therefore, several experiments using different recording techniques lead to a standard procedure developed in this work, in which a series of images with varying focus points were taken and combined supported by a software to create a consistently sharp overall image (so-called focus stacking). The standard procedure, developed in the course of this work, can also be used to take images for other animal species and disciplines.

The combination of different software has been successfully applied for developing didactic conception, web programming and multimedia development. Adobe Dreamweaver® as a quasi industrial standard was used to implement the didactic concept and set up the interactive Online-Tutorial. By linking all learning content it can either be processed systematically, sequentially or, depending on previous knowledge, for referencing specific subject area. To acquire on-demand knowledge, the two main topics on small mammal eye anatomy and the ophthalmoscopic examination with interactive prepared multimedia content can be accessed on a computer or mobile device and can for this reason be used anywhere.

VIII. LITERATURVERZEICHNIS

Ainsworth, S. (2006). DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16(3), 183-198.

Ammon, J. A. (2013). *Augenerkrankungen bei Ziervögeln*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Baas, N. (2019). *Die virtuelle Geflügelklinik*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Barnett, K. C. & Keeler, C. R. (1968). Retinal photography in animals. *British Journal of Ophthalmology*, 52(2), 200-201.

Baumgärtner, W. & Gruber, A. (2020). *Spezielle Pathologie für die Tiermedizin* (2. aktualisierte Auflage). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

Beaumont, S. L. (2002). Ocular disorders of pet mice and rats. *The veterinary clinics of North America. Exotic animal practice*, 5(2), 311-324.

Bengel, W. (1984a). Blitzlichtphotographie. In W. Bengel (Hrsg.), *Photographie für Mediziner* (S. 123-138). Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH.

Bengel, W. (1984b). Handhabung der Kamera. In W. Bengel (Hrsg.), *Photographie für Mediziner* (S. 24-46). Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH.

Bengel, W. (1984c). *Photographie für Mediziner*. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH.

Bengel, W. (1984d). Photographie im Nahbereich. In W. Bengel (Hrsg.), *Photographie für Mediziner* (S. 141-180). Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH.

Bengel, W. (1994). Fotografieren im Mund leicht gemacht. *Zahnärztliche Mitteilungen*, 84(15), 16-22.

Bf3R. (2022). *Verwendung von Versuchstieren im Berichtsjahr 2022* Verfügbar unter: www.bf3r.de/de/verwendung_von_versuchstieren_im_jahr_2022-313306.html [04.01.2024]

Bodemer, D. (2004). *Unterstützung multimedialen Lernens : Instruktionsdesign zur Förderung der Kohärenzbildung beim Wissenserwerb mit Texten und dynamisch-interaktiven Bildern*. Diss., Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Böhmer, H. (2023). *Auswahl und Erprobung einer Quiz-App als zukunftssträchtige E-Learning-Komponente*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Bohnet, N. (2007). *Augenuntersuchung beim Vogel: Eine interaktive CD-ROM zum Erlernen des ophthalmologischen Untersuchungsganges*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Brandstetter, P. (2014). *Okulare Sonographie am Fischauge - Das hintere Augensegment am Beispiel des Koi (Cyprinus carpio)*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Budde, S. (2017). *Die virtuelle Reptilienklinik - Ein interaktives eLearning-Tutorial*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Chan, T., Payor, S. & Holden, B. A. (1983). Corneal thickness profiles in rabbits using an ultrasonic pachometer. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 24(10), 1408-1410.

Clark, R. C. & Mayer, R. E. (2016a). e-Learning: Promise and Pitfalls. In *e-Learning and the Science of Instruction* (4. ed., S. 7-28). Hoboken, New Jersey: Wiley.

Clark, R. C. & Mayer, R. E. (2016b). *e-Learning and the Science of Instruction* (4.). Hoboken, New Jersey: Wiley.

Dittmayer, C. L. (2023). *Online-Tutorial zum pathologisch-anatomischen Untersuchungsgang beim Vogel*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Dorobek, K. (2013). *Dreidimensionale Sonographie am Vogelauge - das vordere Augensegment*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Eaton, J. S. (2022a). Ophthalmology of Lagomorpha: Rabbits, Hares, and Pikas. In F. Montiani-Ferreira, B. A. Moore & G. Ben-Shlomo (Hrsg.), *Wild and Exotic Animal Ophthalmology* (1 ed., Bd. 2: Mammals, S. 367-402). Cham: Springer International.

Eaton, J. S. (2022b). Ophthalmology of Myodonta: Mice, Rats, Hamsters, Gerbils and Relatives. In F. Montiani-Ferreira, B. A. Moore & G. Ben-Shlomo (Hrsg.), *Wild and Exotic Animal Ophthalmology* (1 ed., Bd. 2: Mammals, S. 449-482). Cham: Springer International.

Eaton, S. (2021). Laboratory Animal Ophthalmology. In K. N. Gelatt, G. Ben-Shlomo, B. C. Gilger, D. V. H. Hendrix, T. J. Kern & C. E. Plummer (Hrsg.), *Veterinary ophthalmology* (6. ed., S. 2109-2178). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Incorporated.

Eckert, Y., Ferkau, A. & Thöle, M. (2022). Augenerkrankungen beim Kaninchen. *Der Praktische Tierarzt*, 103, 352–372.

Ehlers, J. P., Ehlers, S., Behr, M., Kähn, W., Bollwein, H. & Leidl, W. (2008). OnLineLectures - eLearning als Ergänzung der tierärztlichen Fortbildung. *GMS Zeitschrift für Medizinische Ausbildung*, 25(4), Doc101.

Emantras, m. (2011). *Virtual Frog Dissection Educational App* Verfügbar unter: www.frogvirtualdissection.com [04.01.2024]

Eule, C., Nell, B. & Wollanke, B. (2018). Untersuchung des Auges und seiner Adnexe. In W. Baumgartner & T. Wittek (Hrsg.), *Klinische Propädeutik der Haus- und Heimtiere* (9. aktualisierte und erweiterte Auflage ed., S. 315–335). Stuttgart: Enke Verlag.

Ewringmann, A. (2016). *Leitsymptome beim Kaninchen* (3. überarbeitete und erweiterte Auflage). Stuttgart: Enke Verlag.

Ewringmann, A. & Glöckner, B. (2012). *Leitsymptome bei Meerschweinchen, Chinchilla und Degu* (2. überarbeitete Auflage). Stuttgart: Enke Verlag.

Ewringmann, A. & Glöckner, B. (2014). *Leitsymptome bei Hamster, Ratte, Maus und Rennmaus* (2. überarbeitete Auflage). Stuttgart: Enke Verlag.

Fehr, M. (2014). Chinchilla. In M. Fehr, L. Sassenburg & P. Zwart (Hrsg.), *Krankheiten der Heimtiere* (S. 207-238). Hannover: Schlütersche.

Fehr, M., Ewringmann, A. & Warschau, M. (2015). *Frettchen* (1. Auflage). Stuttgart: Enke Verlag.

Fehr, M., Sassenburg, L. & Zwart, P. (2014). *Krankheiten der Heimtiere*. Hannover: Schlütersche.

Friedrich, D. (2020). *E-Learning an der Tierärztlichen Fakultät der LMU München mit Erprobung von Handwritten Tutorials (Whiteboard Animation) im Themengebiet der Immunologie*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Garrison, D. R. & Cleveland-Innes, M. (2005). Facilitating Cognitive Presence in Online Learning: Interaction Is Not Enough. *The American Journal of Distance Education*, 19(3), 133-148.

Gelatt, K. N., Ben-Shlomo, G., Gilger, B. C., Hendrix, D. V. H., Kern, T. J. & Plummer, C. E. (2021). *Veterinary ophthalmology* (6.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Incorporated.

Gelatt, K. N. & Plummer, C. E. (2022). *Essentials of Veterinary Ophthalmology* (4.). Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.

Gockel, T. (2012a). Blitz gekauft, was nun? In *Kompendium digitale Fotografie* (S. 39-46). Berlin ; Heidelberg: Springer-Verlag.

Gockel, T. (2012b). Kameratechnik. In *Kompendium digitale Fotografie* (S. 19-30). Berlin ; Heidelberg: Springer-Verlag.

Gockel, T. (2012c). Makrofotografie. In *Kompendium digitale Fotografie* (S. 47-56). Berlin ; Heidelberg: Springer-Verlag.

Good, K. L. (2002). Ocular disorders of pet ferrets. *The veterinary clinics of North America. Exotic animal practice*, 5(2), 325–339

Grabowski, E., Alten, F., Termühlen, J., Heiduschka, P., Brücher, V., Eter, N. et al. (2020). Analyse des Stellenwertes von „eLearning“ in der Augenheilkunde und Evaluierung einer „eLearning-App“. *Der Ophthalmologe: Zeitschrift der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft*, 117(12), 1218–1224.

Guinkoff, V. (1897). *La Photographie de la rétine*. Montpellier.

Gutheim, P. (2008). *Der Webdesign-Praxisguide: professionelle Konzeption von der Planung bis zur Promotion* Berlin: Springer.

Hagen, E. (2020). *Validierung von OCT-Befunden am hinteren Augensegment von Greifvögeln mittels Konfokalmikroskopie*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Handke, J. (2014). The Inverted Classroom Mastery Model – A Diary Study. In E.-M. Großkurth & J. Handke (Hrsg.), *The Inverted Classroom Model* (S. 15-34). Berlin, München, Boston: De Gruyter Oldenbourg.

Handke, J. & Schäfer, A. M. (2012). *E-Learning, E-Teaching und E-Assessment in der Hochschullehre*. München: Oldenbourg.

- Harcourt-Brown, F. M. (2002). *Textbook of rabbit medicine*. Oxford [u.a.]: Butterworth-Heinemann, Elsevier.
- Holmberg, B. J. (2017). Exotic Pet and Avian Ophthalmology. In P. E. Miller, R. Ofri, D. J. Maggs & D. H. Slatter (Hrsg.), *Slatter's Fundamentals of Veterinary Ophthalmology* (6. ed., S. 496-522). St. Louis: Elsevier Inc.
- Holmberg, B. J. (2022). Ophthalmology of Hystricomorpha: Porcupines, Guinea Pigs, Degus, Chinchillas, and Relatives. In F. Montiani-Ferreira, B. A. Moore & G. Ben-Shlomo (Hrsg.), *Wild and Exotic Animal Ophthalmology* (1 ed., Bd. 2: Mammals, S. 403-436). Cham: Springer International.
- Hughes, A. (1971). Topographical relationships between the anatomy and physiology of the rabbit visual system. *Documenta Ophthalmologica*, 30(1), 33-159.
- Imhof, L. (2020). *Die virtuelle Heimtierklinik*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.
- Johnson, C. I. & Mayer, R. E. (2012). An eye movement analysis of the spatial contiguity effect in multimedia learning. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 18(2), 178-191.
- Jütte, L., Yang, Z., Sharma, G. & Roth, B. (2022). Focus stacking in non-contact dermoscopy. *Biomedical Physics & Engineering Express*, 8(6), 065022.
- Keeble, E. & Meredith, A. (2009). *BSAVA Manual of Rodents and Ferrets*: British Small Animal Veterinary Association.
- Keller, J. M. (1983). Motivational design of instruction. In C. M. Reigeluth (Hrsg.), *Instructional-design theories and models: An overview of their current status* (S. 383-436). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Knop, D. (2019). Schärfentiefe nach Maß: "Focus Stacking" in der Biologie. *Biologie in*

unserer Zeit, 49(1), 48-57.

Kölle, P., Korbel, R., Bretzinger, S. & Hoffmann, R. (1998). Augenheilkunde bei Reptilien - Teil 1: Ophthalmologische Untersuchung und physiologische Befunde, 39. *Internationales Symposium über die Erkrankungen der Zoo- und Wildtiere* (S. 343-346). Wien.

König, H. E., Korbel, R. & Liebich, H.-G. (2008). *Anatomie der Vögel: Klinische Aspekte und Propädeutik. Zier-, Greif-, Zoo-, Wildvögel und Wirtschaftsgeflügel* (2.): Schattauer Verlag.

König, H. E., Korbel, R. & Liebich, H.-G. (2016). *Avian Anatomy 2nd Edition: Textbook and Colour Atlas* (2.): 5M Books Ltd.

Korbel, R. (1990). Photographie in der Vogelmedizin. In J. Kösters (Hrsg.), *DVG VII. Tagung über Vogelkrankheiten*. München, DVG.

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

Korbel, R. (1994b). Die ophthalmoskopische Untersuchung bei Vögeln – Untersuchungstechniken und Befunde, 40. *DVG-Jahrestagung FG Kleintiere*. Dresden.

Korbel, R. (1996a). Klinischer Untersuchungsgang und Untersuchungstechniken beim Ziervogelpatienten. Ansbach.

Korbel, R. (1996b). Ophthalmologischer Untersuchungsgang bei Vögeln und Reptilien, II. *DVG-Grundlagenseminar Ophthalmologie Vögel Reptilien*. München, DVG.

Korbel, R. (2004). Leitsymptom Augenerkrankungen beim Vogel - Untersuchungstechniken, *Seminarreihe „Vogelmedizin“ der Bayerischen*

Landestierärztekammer, Modul 4. Oberschleißheim.

Korbel, R. (2005). Basisseminar Ophthalmologie bei Vögeln und Reptilien, 51. Jahreskongress der Deutschen Gesellschaft für Kleintiermedizin. Berlin.

Korbel, R. (2006). Ophthalmologischer Untersuchungsgang. In *Seminarreihe Vogelmedizin* (Bd. 2, S. 57-81). Oberschleißheim: Institut für Geflügelkrankheiten.

Korbel, R. (2012). Avian and reptile ophthalmology, including important aspects of small mammal ophthalmology: a practical approach, *Proceedings of the Annual Conference Australian Committee* (S. 171-178). Melbourne: Association of Avian Veterinarians and Unusual Exotic Pet Veterinarians.

Korbel, R. (2024). Ophthalmologische Photographie, *Tagungsber. JHV Dortmunder Ophthalmologischer Kreis (DOK)*. München.

Korbel, R., Dorobek, K., Liepert, A., Hufen, H., Velasco Gallego, M., Schulze, C. et al. (2013). Comparative aspects of ophthalmological imaging techniques in pet birds, poultry, reptiles and fish using optical coherence tomography (OCT), fundus photography, scanning digital ophthalmoscopy (SDO) and 2D- & 3D-ultrasonography, *Proceedings of the 8th Joint Scientific Symposium of the Veterinary Faculties of T.C. Istanbul Üniversitesi and Ludwig-Maximilians-Universität München* (Bd. 26). München.

Korbel, R., Erhardt, W., Burike, S., Milovanovic, A., Henke, J. & Petrowicz, O. (1994). Augenkrankheiten bei Vögeln – Teil II: Die optimierte Luftsack-Perfusionsanästhesie – ein Verfahren zur ophthalmoskopischen Untersuchung von Vögeln, *IX. DVG-Tagung Vogelkrankheiten*. München, DVG.

Korbel, R. & Gropp, U. (1999). Clinical investigations on ultraviolet perception in birds, *Proceedings of the 20th Annual Conference Association of Avian Veterinarians* (S. 77-85). New Orleans.

Korbel, R., Kölle, P., Göbel, T., Ravelhofer, K., Stütz, S., Spemann, B. et al. (1995). Praktische Übungen zur ophthalmologischen Untersuchung von Vogel- und Reptilienaugen unter besonderer Berücksichtigung des hinteren Augensegmentes: Allgemeiner ophthalmologischer Untersuchungsgang. Tonometrie und Schirmer Tränentest, direkte und indirekte Ophthalmoskopiertechniken, ophthalmologische Untersuchung von Reptilien, *I. DVG-Grundlagenseminar Augenkrankheiten Vögel Reptilien*. München.

Korbel, R. & Leitenstorfer, P. (1995). Die Bestimmung der Tränendrüsenfunktion bei Vögeln unter Verwendung des Schirmer-Tränentests, *V. DVG-Tagung Labordiagnostik* (S. 97-100). München, DVG.

Korbel, R. & Stein, K. (2013). Visuelle Perzeption beim Wirtschaftsgeflügel: Grundlagen und Ergebnisse einer Haltungstudie bei Legehennen, *4. Osnabrücker Geflügelsymposium*. Osnabrück.

Krauß, E. (2013). *Akzeptanz, Nutzen und Grenzen verschiedener Gestaltungsaspekte des multimedialen, kollaborativen e-teachings am Beispiel der Veterinärophthalmologie*. Diss. med. vet., Freie Universität Berlin, Berlin.

Liebich, H.-G., Sótonyi, P. & König, H. E. (2019). Sehorgan (Organum visus). In H. E. König & H.-G. Liebich (Hrsg.), *Anatomie der Haustiere* (7. aktualisierte und erweiterte Auflage ed., S. 593–613). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

Liepert, A. (2013). *Dreidimensionale Sonographie am gesunden und erkrankten Vogelauge: das hintere Augensegment*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Low, R. & Sweller, J. (2014). The modality principle in multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2. ed., S. 227-246). Cambridge: Cambridge University Press.

Luginbühl, H. (1958). Die farbphotographische Darstellung des Augenhintergrundes bei verschiedenen Haustieren. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde*, 100(4), 187-200.

Maggs, D. J. (2017). The Ophthalmic Examination and Diagnostic Testing. In P. E. Miller, R. Ofri, D. J. Maggs & D. H. Slatter (Hrsg.), *Slatter's Fundamentals of Veterinary Ophthalmology* (6. ed., S. 18-50). St. Louis: Elsevier Inc.

Magnussen, K. (1959). Beitrag zur Genetik und Histologie eines isolierten Augenalbinismus beim Kaninchen IV: Die Auswirkung des Gens ra auf die Farbe der Iris im Vergleich und im Zusammenwirken mit anderen Pigmentgenen und mit Pigmentverteilungsfaktoren. *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie*, 50(1), 103-120.

Maini, S. & Hartley, C. (2019). Guide to ophthalmology in rabbits. *In Practice*, 41(7), 310-320.

Marchwacka, M. A., Kugler, J., Schaal, T. & Tolks, D. (2023). Digitale Hochschullehre im ersten COVID-19-Semester. Ergebnisse einer Befragung von Lehrenden in Public Health, Medizin und Pflege. *Prävention und Gesundheitsförderung*, 18(1), 22-29.

Mayer, R. E. (2017). Using multimedia for e-learning. *Journal of Computer Assisted Learning*, 33(5), 403-423.

McMullen, R. J., Jr., Millichamp, N. J. & Pirie, C. G. (2021). Digital Ophthalmic Photography. In K. N. Gelatt, G. Ben-Shlomo, B. C. Gilger, D. V. H. Hendrix, T. J. Kern & C. E. Plummer (Hrsg.), *Veterinary ophthalmology* (6. ed., Bd. 1, S. 815-875). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Incorporated.

Miller, P. E. (1997). Ferret ophthalmology. *Seminars in avian and exotic pet medicine*, 6(3), 146–151.

Miller, P. E., Ofri, R., Maggs, D. J. & Slatter, D. H. (2017). *Slatter's Fundamentals of Veterinary Ophthalmology* (6.). St. Louis: Elsevier Inc.

Montiani-Ferreira, F. (2009a). Ferrets: ophthalmology. In E. Keeble & A. Meredith (Hrsg.), *BSAVA Manual of Rodents and Ferrets* (S. 311-319): British Small Animal

Veterinary Association.

Montiani-Ferreira, F. (2009b). Rodents: ophthalmology. In E. Keeble & A. Meredith (Hrsg.), *BSAVA Manual of Rodents and Ferrets* (S. 169-180): British Small Animal Veterinary Association.

Müller, K. & Wase, E. (2014). Meerschweinchen. In M. Fehr, L. Sassenburg & P. Zwart (Hrsg.), *Krankheiten der Heimtiere* (S. 57-102). Hannover: Schlütersche.

Müller, S., Settmacher, U., Koch, I. & Dahmen, U. (2018). A pilot survey of student perceptions on the benefit of the OSCE and MCQ modalities. *GMS Journal for Medical Education*, 35(4), 13.

Nester, M. P. & Arnold, B. (1979). *Photographie in der Medizin*. Basel: ROCOM, Ed. Roche.

Neumann, W. (1987). Die monokulare und binokulare Ophthalmoskopie. *Der Praktische Tierarzt*, 69, 18-25.

Niegemann, H. (2020). Instructional Design. In H. M. Niegemann & A. Weinberger (Hrsg.), *Handbuch Bildungstechnologie* (S. 95-151). Berlin: Springer.

Niegemann, H. M. & Weinberger, A. (2020). *Handbuch Bildungstechnologie*. Berlin: Springer.

Niehues, A. (2018). *Die virtuelle Vogelklinik*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Nikolaew, W. & Dogiel, J. (1900). Die Photographie der Retina. *Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, 80(3), 236-237.

Persike, M. (2020). Videos in der Lehre: Wirkungen und Nebenwirkungen. In H. M. Niegemann & A. Weinberger (Hrsg.), *Handbuch Bildungstechnologie* (S. 271-301).

Berlin: Springer.

Prince, J. H. & Ruskell, G. L. (1960). The use of Domestic Animals for Experimental Ophthalmology. *American Journal of Ophthalmology*, 49(5, Part 2), 1202/1116-1207/1121.

Ravelhofer, K. (1996). *Pathologisch-anatomische Untersuchungen an Augen verschiedener Vogelspezies*. Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Reese, S., Korbel, R. & Liebich, H.-G. (2008). Sehorgan (Organum visus). In H. E. König, R. Korbel & H.-G. Liebich (Hrsg.), *Anatomie der Vögel: Klinische Aspekte und Propädeutik. Zier-, Greif-, Zoo-, Wildvögel und Wirtschaftsgeflügel* (2. ed., S. 229-256): Schattauer Verlag.

Reid, D. J. & Beveridge, M. (1986). Effects of text illustration on children's learning of a school science topic. *British Journal of Educational Psychology*, 56(3), 294-303.

Reimann, A. S. (2015). *Anatomisch-makroskopische Untersuchungen von Fischeaugen*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Roest, H. (2014). Frettchen. In M. Fehr, L. Sassenburg & P. Zwart (Hrsg.), *Krankheiten der Heimtiere* (S. 293-342). Hannover: Schlütersche.

Roth, I. M. H. (2022). *Bestandsbetreuung Reptilien: Terraristik und Artenportraits*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Sakai, T. (1981). The Mammalian Harderian Gland: Morphology, Biochemistry, Function and Phylogeny. *Arch. histol. jap.*, 44(4), 299–333.

Salomon, F.-V. (2020). 2.6 Knöchernes Skelett. In F.-V. Salomon, H. Geyer & U. Gille (Hrsg.), *Anatomie für die Tiermedizin* (4. aktualisierte Auflage ed., S. 50–120). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

Salomon, F.-V., Simoens, P. & Gille, U. (2020). 8.1 Sehorgan, Organum visus. In F.-V. Salomon, H. Geyer & U. Gille (Hrsg.), *Anatomie für die Tiermedizin* (4. aktualisierte Auflage ed., S. 599–630). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

Sandars, J. & Schroter, S. (2007). Web 2.0 technologies for undergraduate and postgraduate medical education: an online survey. *Postgraduate Medical Journal*, 83(986), 759-762.

Sassenburg, L. (2014). Degu. In M. Fehr, L. Sassenburg & P. Zwart (Hrsg.), *Krankheiten der Heimtiere* (S. 239-270). Hannover: Schlütersche.

Saunders, L. Z. & Rubin, L. F. (1975). Postmortem Technique. In L. Z. Saunders & L. F. Rubin (Hrsg.), *Ophthalmic Pathology of Animals: An Atlas and Reference Book* (S. 244-253). Basel, Switzerland: S. Karger AG.

Scheiter, K., Richter, J. & Renkl, A. (2020). Multimediales Lernen: Lehren und Lernen mit Texten und Bildern. In H. M. Niegemann & A. Weinberger (Hrsg.), *Handbuch Bildungstechnologie* (S. 31-56). Berlin: Springer.

Schiller, N. (2015). *Radiologische Diagnostik von abdominalen Erkrankungen beim Hund: ein interaktives Lernprogramm*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Schmidt-Weigand, F. & Scheiter, K. (2011). The role of spatial descriptions in learning from multimedia. *Computers in Human Behavior*, 27(1), 22-28.

Schüler, A., Scheiter, K. & Gerjets, P. (2012). Verbal descriptions of spatial information can interfere with picture processing. *Memory*, 20(7), 682-699.

Schulze, C. (2016). *Zur Morphologie der physiologischen Foveae am Augenhintergrund von Greifvögeln und Eulen mittels Optischer Kohärenztomografie (OCT)*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Sharma, J. & Sur, M. (2014). The Ferret as a Model for Visual System Development and Plasticity. In J. G. Fox & R. P. Marini (Hrsg.), *Biology and Diseases of the Ferret* (S. 711-734). Ames, USA: John Wiley & Sons, Inc.

Snow, S. R. (2009). Assessing and achieving accuracy in digital dental photography. *Journal of the California Dental Association*, 37(3), 185-191.

Stahl, A., Boeker, M., Ehlken, C., Agostini, H. & Reinhard, T. (2009). Evaluation eines internetbasierten E-Learnings für den Studentenunterricht im Fach Augenheilkunde. *Der Ophthalmologe: Zeitschrift der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft*, 106(11), 999-1005

Strobel, B. K. (2010). *Okulare Sonografie des gesunden und erkrankten Auges bei Wildgreifvögeln*. Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

TAppV. (2006). *Verordnung zur Approbation von Tierärztinnen und Tierärzten*. BGBl. I S. 1827, zuletzt geändert durch Artikel 7 G v. 15.8.2019.

Taradach, C., Greaves, P. & Rubin, L. F. (1984). Spontaneous Eye Lesions in Laboratory Animals: Incidence in Relation to Age. *CRC Critical Reviews in Toxicology*, 12(2), 121-147.

Tenhaven, C., Tipold, A., Fischer, M. R. & Ehlers, J. P. (2013). Is there a “net generation” in veterinary medicine? A comparative study on the use of the Internet and Web 2.0 by students and the veterinary profession [Gibt es eine „net-Generation“ in der Tiermedizin? Eine Vergleichende Untersuchung zur Nutzung von Internet und Web 2.0 bei Studierenden und der Tierärzteschaft]. *GMS Zeitschrift für Medizinische Ausbildung*, 30(1), Doc7.

TierSchG. (1972). *Tierschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. Mai 2006*. BGBl. I S. 1206, 1313, zuletzt geändert durch Artikel 2 Abs. 20 G v. 20.12.2022.

TierSchVersV. (2013). *Verordnung zum Schutz von zu Versuchszwecken oder zu anderen*

wissenschaftlichen Zwecken verwendeten Tieren. BGBl. I S. 3570, zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 11. August 2021.

Timm, K. (1979). Orbital venous anatomy of the rat. *Laboratory animal science*, 29(5), 636-638.

Uthoff, D. (1984). Biometrische Untersuchungen des Kaninchenauges. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* 185(09), 189–192.

Van der Woerdt, A. (2021). Ophthalmologic Diseases of Small Mammals. In K. E. Quesenberry, C. J. Orcutt, C. Mans & J. W. Carpenter (Hrsg.), *Ferrets, rabbits, and rodents* (4. ed., S. 583–594). St. Louis, Missouri: Elsevier.

Visser, C. J. M., Wijnbergen, A. & Bleich, A. (2014). Mäuse und Ratten. In M. Fehr, L. Sassenburg & P. Zwart (Hrsg.), *Krankheiten der Heimtiere* (S. 129-182). Hannover: Schlütersche.

Volz, L., Graeff, C. & Durante, M. (2024). Focus stacking single-event particle radiography for high spatial resolution images and 3D feature localization. *Physics in medicine & biology*, 69(2), 024001.

Wagner, F., Heider, H. J., Görig, C. & Fehr, M. (1998). Augenkrankheiten beim Zwergkaninchen. Teil 1: Anatomie, Untersuchungsgang, Erkrankungen der Augenlider, der Konjunktiva und des Tränenassengangs. *Tierärztliche Praxis*, K:26(3), 205-210.

Wahle, J. (2016). *Die virtuelle Zierfischklinik*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Walde, I. (2008). *Augenheilkunde* (3. aktualisierte und erweiterte Auflage). Stuttgart: Schattauer Verlag.

Walde, I. & Nell, B. (2008). Augenerkrankungen des Kaninchens und des Meerschweinchens. In I. Walde (Hrsg.), *Augenheilkunde* (3. aktualisierte und erweiterte

Auflage ed., S. 709–766). Stuttgart: Schattauer Verlag.

Wernecke, A. (2022). *E-Learning: Das Schwein in Tiermedizin und Landwirtschaft - Patient und Schnittstelle zwischen tierärztlicher Praxis und landwirtschaftlichem Betrieb - Erstellung und Evaluation eines Lernprogramms zur Überprüfung des Lernverhaltens in der Schweinemedizin*. Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Werther, K., Candioto, C. G. & Korbel, R. (2017). Ocular Histomorphometry of Free-Living Common Kestrels (*Falco tinnunculus*). *Journal of avian medicine and surgery*, 31(4), 319-326.

Werther, K., Hufen, H., Strobel, B. K., Stein, K. & Korbel, R. (2011). Effects of formalin fixation on avian eye. In A. o. A. V. E. c. o. z. m. (EAAV) (Hrsg.), *11th European AAV Conference*. Madrid, Spain.

Williams, D. L. (2021). Small Mammal Ophthalmology. In K. N. Gelatt, G. Ben-Shlomo, B. C. Gilger, D. V. H. Hendrix, T. J. Kern & C. E. Plummer (Hrsg.), *Veterinary ophthalmology* (6. ed., S. 2179-2199). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Incorporated.

Wöhr, A.-C., Heidrich, S. & Erhard, M. (2022). Ein Plädoyer für die (Klein-)Säugerhaltung in Deutschland - Tierschutzrechtliche Stellungnahme und Maßnahmenkatalog. *Deutsches Tierärzteblatt*, 70(8), 1024-1031.

Xian, B., Zhao, M., Peng, Y., Wang, W., Li, Z., Zhang, H. et al. (2023). Fundus photography, fundus fluorescein angiography, and optical coherence tomography of healthy cynomolgus monkey, New Zealand rabbit, Sprague Dawley rat, and BALB/c mouse retinas. *Annals of Eye Science*, 8, 10.

Zander, S. & Heidig, S. (2020). Motivationsdesign bei der Konzeption multimedialer Lernumgebungen. In H. M. Niegemann & A. Weinberger (Hrsg.), *Handbuch Bildungstechnologie* (S. 393-415). Berlin: Springer.

Zillig, S. (2024). *Die ophthalmologische Untersuchung des vorderen Augensegmentes beim Kleinsäuger, unv. Diss.* Diss. med. vet., Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

IX. ANHANG

1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schemazeichnung Monokulare Ophthalmoskopie (König, Horst E, Korbelt & Liebich, 2016).	34
Abbildung 2: Didaktischer Aufbau und Lerninhalte des Online-Tutorials.	63
Abbildung 3: Benutzeroberfläche Adobe Dreamweaver (Software für Webdesign).	72
Abbildung 4: Interaktive Anatomiebilder, deren Aussehen sich ändert, wenn mit der Maus darauf gezeigt wird.	73
Abbildung 5: Rinderauge mit sich in Falten legender und ablösender Retina direkt nach der Kallotierung. OD, horizontaler Querschnitt.	76
Abbildung 6: Kaninchenauge OS mit anhängendem Drüsen- und Muskelgewebe.	77
Abbildung 7: Kälber- (links) und Kaninchenauge (rechts) OS, horizontaler Querschnitt.	80
Abbildung 8: Horizontaler Querschnitt, Kälberauge OD; Aufhängeapparat der Linse.	81
Abbildung 9: Kaninchenauge OD, horizontaler Querschnitt.	82
Abbildung 10: Größenverhältnisse Kälber- (links) und Kaninchenauge (rechts) OS.	83
Abbildung 11: Routine-Untersuchung mit einer Punktlichtquelle.	84
Abbildung 12: Merangiotischer Fundus Albinokaninchen OD.	85
Abbildung 13: Kaninchenauge OS, Fundusreflex, aufgenommen mit der Handfunduskamera.	86
Abbildung 14: Die Startseite des Tutorials in der Live-Browser-Ansicht (Frontend).	88
Abbildung 15: Die obere und seitliche Menüleiste der Unterseite zur äußeren Augenhaut in der Live-Browser-Ansicht (Frontend).	89
Abbildung 16: Die Startseite in der responsiven Mobilansicht.	90
Abbildung 17: Quizfragen mit Drag-and-drop-Funktionalität.	92
Abbildung 18: Überblick über das Feedback zum Quiz.	93

2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2: Gemessene Größen am Bulbus von Kaninchen und Kalb nach Fixation.	82
--	-----------

X. DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen, die mich bei der erfolgreichen Anfertigung meiner Dissertation unterstützt haben, meinen großen Dank aussprechen.

Zuallererst möchte ich meinem Doktorvater Herrn Professor Korbel für die Überlassung des überaus interessanten Themas im Kleinsäugerbereich danken. Ein besonderer Dank gilt auch der stets fachkundigen und kompetenten Unterstützung aufgrund seiner langjährigen Kenntnisse zu allen Fragen rund um die Ophthalmologie und auch der Fotografie. Durch die Ermöglichung der Anwendung neuer Fotografie-Techniken wie dem Focus Stacking konnte hochwertiges, schlussendlich durchgehend scharfes Bildmaterial gewonnen werden.

Bei Herrn Professor Ammer möchte ich mich herzlichst für die Bereitstellung des Patientenguts, der Unterstützung bei der Planung sowie der reibungslosen Durchführung zur Gewinnung des Untersuchungsmaterials bedanken. Mit welchem die Erstellung des hochwertigen Bildmaterials der anatomischen Augenpräparate überhaupt erst ermöglicht wurde.

Frau Professorin Monika Rinder verdanke ich Unterstützung bei allen organisatorischen und universitären Angelegenheiten und möchte hierfür herzlichst danken.

Auch Katharina Breuninger und Sophie Rechenbach gilt mein Dank für die kollegiale Unterstützung beim Handling der Kaninchen zur Aufnahme des Bild- und Videomaterials.

In besonderer Weise möchte ich mich herzlichst bei meinen Eltern Thomas und Liane Vollmer sowie meinen beiden mit immerwährender Zuversicht an meiner Seite stehenden Schwestern Nadine und Christina und von Herzen auch bei meinen Freunden bedanken - für die kurz- oder auch langfristige Unterstützung in jeglicher Hinsicht, für die zahlreichen Motivationsschübe und die Organisationshilfe, damit mir mein Studium und die Erarbeitung dieses Dissertationsthemas möglich wurden.

Lieben Dank!