

Zur Morphologie der physiologischen Foveae am  
Augenhintergrund von Greifvögeln und Eulen  
mittels Optischer Kohärenztomografie (OCT)

von Céline Maria Schulze



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

Zur Morphologie der physiologischen Foveae am  
Augenhintergrund von Greifvögeln und Eulen  
mittels Optischer Kohärenztomografie (OCT)

von Céline Maria Schulze

aus Lörrach

München 2016





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

Lehrstuhl der Klinik für Vögel, Reptilien, Amphibien und Zierfische

Arbeit angefertigt unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr. med. vet. R. Korbel

Mitbetreuung durch: Priv.-Doz. Dr. med. vet. M. Rinder

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

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Joachim Braun

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. Rüdiger Korbelt

Korreferent: Univ.-Prof. Dr. Roberto Köstlin

Tag der Promotion: 06. Februar 2016

Für meine Familie und Freunde



**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>I. EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>II. LITERATURÜBERSICHT.....</b>	<b>3</b>
1. DAS VOGELAUGE - ANATOMIE UND PHYSIOLOGIE .....	3
1.1. <i>Orbita - Augenhöhle</i> .....	3
1.2. <i>Bulbus oculi – Augapfel</i> .....	4
1.3. <i>Lens - Linse</i> .....	6
1.4. <i>Die Augenhüllen</i> .....	7
1.4.1. <i>Tunica fibrosa bulbi seu externa bulbi – äußere Augenhaut</i> .....	7
1.4.2. <i>Tunica vasculosa seu media bulbi, Uvea – mittlere Augenhaut</i> .....	9
1.4.3. <i>Tunica interna bulbi – Innere Augenhaut</i> .....	12
1.5. <i>Corpus vitreum – Glaskörper</i> .....	18
1.6. <i>Topografie der Retina</i> .....	18
1.6.1. <i>Areae und Foveae</i> .....	19
1.6.2. <i>Fundus – Augenhintergrund</i> .....	25
1.6.3. <i>Nervus opticus – Sehnerv</i> .....	25
1.6.4. <i>Pecten oculi – Augenfächer</i> .....	26
1.7. <i>Augenachsen</i> .....	28
2. PATHOLOGISCHE VERÄNDERUNGEN DES FUNDUS .....	28
3. OPTISCHE KOHÄRENZTOMOGRAFIE.....	34
3.1. <i>Optische Kohärenztomografie (OCT) - eine Einführung</i> .....	34
3.2. <i>Geschichte und Entwicklung der OCT</i> .....	34
3.3. <i>Technische Grundlagen der OCT</i> .....	36
3.4. <i>OCT-Bildgebungsverfahren</i> .....	38
3.4.1. <i>Time Domain-OCT (TD-OCT)</i> .....	38
3.4.2. <i>Fourier Domain- OCT (FD-OCT)</i> .....	38
3.4.2.1. <i>Spektral Domain-OCT (SD-OCT)</i> .....	39
3.4.2.2. <i>Swept Source-OCT (SS-OCT)</i> .....	39
3.4.3. <i>Ultrahigh Resolution-OCT (UHR-OCT)</i> .....	40
3.4.4. <i>Dreidimensionale OCT (3D-OCT)</i> .....	41
3.4.5. <i>Eye Tracking</i> .....	43
3.4.6. <i>Adaptive Optiken</i> .....	43
3.4.7. <i>Anterior segment - OCT (AS-OCT)</i> .....	43
3.5. <i>Einsatz der Optischen Kohärenztomografie</i> .....	44
3.5.1. <i>Einsatz der OCT in der Grundlagenforschung und an Tiermodellen</i> 44	

3.5.2. Einsatz der OCT in der Humanmedizin .....	47
3.5.3. Einsatz der OCT in der Veterinärmedizin .....	50
3.5.4. OCT beim Vogel .....	51
3.6. <i>Physiologische Darstellung okularer Strukturen und Interpretation der OCT-Tomogramme</i> .....	56
3.6.1. Darstellung bei Mensch und Säugetier .....	56
3.6.2. Darstellung beim Vogel .....	59
4. WEITERE UNTERSUCHUNGSVERFAHREN IN DER ORNITHOOPHTHALMOLOGIE ....	61
<b>III. MATERIAL UND METHODEN.....</b>	<b>64</b>
1. ZIEL .....	64
2. MATERIALBESCHREIBUNG.....	65
2.1. <i>Probanden</i> .....	65
2.2. <i>Material für die ophthalmoskopische Untersuchung</i> .....	67
2.2.1. Spaltlampe.....	67
2.2.2. Diaskleralkegel .....	67
2.2.3. Kopfbandophthalmoskop .....	67
2.2.4. Tonometrie .....	67
2.2.5. Fluoreszeintest .....	68
2.3. <i>Material für die Untersuchung mittels OCT</i> .....	68
2.3.1. Optische Kohärenztomografie.....	68
2.3.2. Weitere Materialien .....	70
3. UNTERSUCHUNGSMETHODIK .....	71
3.1. <i>Die klinische Untersuchung</i> .....	71
3.2. <i>Die ophthalmologische Untersuchung</i> .....	73
3.3. <i>Die Untersuchung mittels OCT</i> .....	76
3.3.1. Vorbereitung des Patienten und des Systems .....	76
3.3.2. Ablauf der Aufnahmen .....	78
3.3.3. Aufnahmen der Foveae und des Zwischenbereichs.....	79
3.3.4. Bildbearbeitung und Vermessung.....	80
3.3.5. Speicherung der Messdaten.....	83
3.3.6. Auswertung der Messungen .....	83
3.3.6.1. Fovea centralis und Fovea temporalis .....	83
3.3.6.2. Retinaler Zwischenbereich.....	85
<b>IV. ERGEBNISSE .....</b>	<b>86</b>
1. ERGEBNISSE DER OPHTHALMOSKOPIE.....	86

2.	ERGEBNISSE AUS ANDEREN OPHTHALMOLOGISCHEN	
	UNTERSUCHUNGSVERFAHREN.....	86
3.	UNTERSUCHUNG MITTELS OPTISCHER KOHÄRENZ TOMOGRAFIE.....	88
3.1.	<i>Toleranz und Verträglichkeit der Untersuchung</i> .....	88
3.2.	<i>Untersuchungsdauer:</i> .....	89
4.	DARSTELLUNG DER PHYSIOLOGISCHEN STRUKTUREN MITTELS OCT .....	90
4.1.	<i>Ein- und Ausschlusskriterien</i> .....	90
4.2.	<i>Darstellung und Messungen der Foveae</i> .....	90
4.3.	<i>Ergebnisse der Retina-Messungen</i> .....	91
4.4.	<i>Tagaktive Greifvögel: Accipitriformes&amp;Falconiformes im Vergleich</i> .....	95
4.4.1.	Fovea centralis im Vergleich .....	99
4.4.2.	F. temporalis im Vergleich .....	109
4.4.3.	F. centralis und F. temporalis im Vergleich .....	111
4.4.4.	Retinaler Zwischenbereich im Vergleich .....	114
4.5.	<i>Nachtaktive Greifvögel: Strigiformes im Vergleich</i> .....	117
4.5.1.	F. temporalis im Vergleich .....	121
4.5.2.	Retinaler Zwischenbereich im Vergleich .....	128
4.6.	<i>Vergleich tagaktive und nachtaktive Greifvögel</i> .....	130
4.6.1.	Vergleich der F. centralis tagaktiver Greifvögel und der F. temporalis nachtaktiver Greifvögel.....	130
4.6.2.	Vergleich der F. temporalis tagaktiver&nachtaktiver Greifvögel .....	131
4.6.3.	Vergleich des retinalen Zwischenbereiches tagaktiver und nachtaktiver Greifvögel.....	133
<b>V.</b>	<b>DISKUSSION</b> .....	<b>134</b>
1.	MATERIAL UND METHODIK DER OCT .....	134
1.1.	<i>Probanden</i> .....	134
1.2.	<i>Verwendete Technik</i> .....	134
1.3.	<i>Durchführung der Aufnahmen</i> .....	137
1.3.1.	Prozedere .....	137
1.3.2.	Verträglichkeit .....	138
1.4.	<i>Auswahl und Vermessung der Aufnahmen</i> .....	139
1.5.	<i>Auswertung der Messdaten</i> .....	145
2.	ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNG MITTELS OCT .....	146
2.1.	<i>Darstellung der physiologischen Fovea&amp;des Zwischenbereiches</i> .....	146
2.2.	<i>Vergleich: Foveae der tagaktiven Greifvögel</i> .....	149

---

2.3.	<i>Foveae der nachtaktiven Eulen.....</i>	<i>157</i>
2.4.	<i>Zwischenbereich der tagaktiven und nachtaktiven Greifvogelarten im Vergleich.....</i>	<i>160</i>
2.5.	<i>Foveae der tagaktiven und nachtaktiven Greifvogelarten im Vergleich ... ..</i>	<i>161</i>
3	MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN DER OCT BEIM VOGEL - SCHLUSSFOLGERUNG ... ..	166
<b>VI.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>169</b>
<b>VII.</b>	<b>SUMMARY .....</b>	<b>171</b>
<b>VIII.</b>	<b>RESUMEN.....</b>	<b>173</b>
<b>IX.</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>175</b>
<b>X.</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>192</b>
<b>XI.</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>212</b>
<b>XII.</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>214</b>
<b>XIII.</b>	<b>DANKSAGUNG .....</b>	<b>215</b>



## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

.jpg / JPEG	Joint Photographic Experts Group
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
Abb.	Abbildung
AMD	altersabhängige Makuladegeneration
AO	adaptive optics / adaptive Optiken
A-Scan	Axialer-Scan; Tiefen-Scan
AS-OCT	anterior segment Optische Kohärenztomografie
BM	Basalmembran
B-Mode	B-Modus ( <i>brightness modulation</i> ) beim Ultraschall
B-Scan	Querschnitt-Scan
C	Choroidea
CA	California / Kalifornien
CCD	charge-coupled device
CFT	central foveal thickness / zentrale Foveadicke
CMT	central macula thickness / zentrale Makuladicke
CSC	chorioretinopathia centralis serosa
C-Scan	C-Modus, coronaler Scan oder dreidimensionaler Scan
cSLO	konfokales Scanning Laser Ophthalmoskop
CT	Computertomografie
dB	Dezibel
DNA	Desoxyribonukleinsäure
dPMT	distance of parafoveal maximal thickness points / Abstand der parafovealen, maximal dicksten Stellen der Retina
ELM	external limiting membrane / externe Grenzmembran
ERG	Elektroretinografie
ERM	epiretinale Membranen
F	Fovea
F. centralis	Fovea centralis
F. temporalis	Fovea temporalis
F. tinnunculus	Falco tinnunculus; Turmfalke
Fa.	Firma
FAG	Fluoreszenzangiografie
FAZ	foveale avaskuläre Zone
Fc	Fovea centralis
FD-OCT	Fourier Domain Optische Kohärenztomografie
foCT	funktionelle optische Kohärenztomografie
Ft	Fovea temporalis
FV	foveales Volumen
GB	Gigabyte
GCL	Ganglion cell layer / Ganglienzellenschicht
GE	General Electrics
H	Habicht
HEYEX®	Heidelberg Eye Explorer
ICG-OCT	Indocyanin-Grün Optische Kohärenztomografie
ILM	internal limiting membrane / innere Grenzmembran
INL	internal nuclear layer / innere Körnerschicht
IOD	Intraokulärer Druck
IPL	innere plexiforme Schicht
IR-Laser	Infrarot-Laser
IS/OS-Komplex	Innensegment / Außensegment-Komplex
Kap.	Kapitel
kl.	klein / kleine

L	large / groß
lat.	lateinisch
LIU	linseninduzierte Uveitis
m	männlich
M	medium / mittel
M.	Musculus / Muskel
Mm.	musculi / Muskeln
M-Modus	motion mode
max.	maximal
MB	Mäusebussard
MC-OCT	molekulare Bildgebung mittels optischer Koheränztomographie
MHz	Megahertz
mmHg	Millimeter Quecksilbersäule
M-Mode/M-Modus	Motion Modus / Bewegungsmodus
MRT	Magnetresonanztomografie
n	number / Anzahl
n A	Anzahl der einbezogenen untersuchten Augen
n M	Anzahl der einbezogenen Messungen insgesamt
n T	Anzahl der einbezogenen untersuchten Tiere
N.	Nervus / Nerv
n.b.	nicht bestimmt
n.d.	nicht durchgeführt
NA	Numerische Apertur
nAMD	neovaskuläre altersabhängige Makuladegeneration
NFL	nerve fiber layer / Nervenfaserschicht
nm	Nanometer
N-T / N/T	nasal-temporal
obB	ohne besonderen Befund
OCT	optische Kohärenztomografie
OD	Oculus dexter
ONH	optic nerve head / Sehnervenkopf
ONL	Outer nuclear layer / äußere Körnerschicht
OPL	äußere plexiforme Schicht
OS	Oculus sinister
PCV	polypoidale chorioidale Vaskulopathie
PDD	proventricular dilatation disease / Drüsenmagendilatation
PMT / MRT	parafoveal maximal thickness = Parafoveale maximale Dicke / maximum retinal thickness = maximale Retinadicke
PS-OCT	Polarisations-sensitive optische Kohärenztomografie
PVD	Partial vitreous detachment / partielles Glaskörper- detachment
Rfk	Raufußkauz
RNFL	retinal nerve fiber layer / retinale Nervenfaserschicht
RPE	retinales Pigmentepithel
RW	Rohrweihe
S	small / klein
s	Sekunde
S-I / S/I	superior-inferior
SD	standard deviation / Standardabweichung
SDO	digitale Scanner-Ophthalmoskopie
SD-OCT	Spektral Domain Optische Kohärenztomografie
SLD	Superlumineszenzdiode
SP	Sperber
Spp.	Spezies

---

SS-OCT	Swept Source Optische Kohärenztomografie
Stk	Steinkauz
Tab.	Tabelle
TD-OCT	Time Domain Optische Kohärenztomografie
TF	Turmfalke
TM	Trade Mark
TRT	total retinal thickness / Gesamtretinadicke
U	Uhu
u.a.	unter anderem
u.v.m.	und vieles mehr
UHR-OCT	Ultrahigh Resolution Optische Kohärenztomografie
V	Volt
Var.	Variante
VHK	Vogt-Koyanagi-Harada
Vol %	Volumen-Prozent
w	weiblich
WB	Wespenbussard
WF	Wanderfalke
XL	extra large / sehr groß
µm	Mikrometer



## I. EINLEITUNG

Die visuelle Perzeption ist der wichtigste Sinn bei Vögeln. Die uneingeschränkte Sehfähigkeit ist für das Überleben von Wildgreifvögeln in freier Natur hinsichtlich Flugvermögen, Orientierung, Futtersuche und Gefahrenvermeidung unabdingbar (KORBEL 1991). Eine Reihe von Studien konnte bereits aufzeigen, dass pathologische Veränderungen des Auges bei Wildgreifvögeln zu diagnostizieren sind, insbesondere bei Vögeln mit einem vorberichtlichen Trauma. Diese treten besonders häufig posterior im Auge auf (BUYUKMIHCI 1985, COUSQUER 2005, KORBEL 1994, KORBEL 2000, MURPHY et al. 1982, WILLIAMS et al. 2006). Im vorderen Augensegment sind gleichzeitig oftmals nur sehr geringe Veränderungen vorhanden. Einer vollständigen ophthalmoskopischen Untersuchung kommt daher eine große Bedeutung zu (KORBEL 1994). KORBEL (1999) beschreibt darüber hinaus das Auge eines Vogels als ein „diagnostisches Fenster“, da sich viele systemische Krankheiten im Auge manifestieren. Somit ist bei Traumata und bei vielen systemischen Erkrankungen eine ophthalmologische Untersuchung indiziert. Bei Wildgreifvögeln, die als „Augentiere“ (KORBEL 1991) ganz entscheidend im Überleben von einem voll funktionsfähigen Auge abhängig sind, verbessert eine exaktere Diagnosestellung bei okulären Erkrankungen die Chancen für die richtige Behandlung und damit ihre Prognose (SCOTT 2015).

Veränderungen der *Retina* sind ein häufiger Befund in der Ophthalmoskopie (BUYUKMIHCI 1985, COUSQUER 2005, KORBEL 1994, KORBEL 1999, KORBEL 2000, KORBEL et al. 1997 a, MURPHY 1982, RAVELHOFER 1996, WILLIAMS et al. 2006). Aussagen darüber, welche *Schichten* betroffen sind, lassen sich jedoch bei Vögeln mit den bislang angewandten Untersuchungstechniken *in vivo* nicht treffen. Eine Rehabilitation eines Wildgreifvogels ist jedoch an einen uneingeschränkten Visus gebunden, und der vollen Funktionsfähigkeit des Ortes des schärfsten Sehens, der Fovea, kommt dabei sehr große Bedeutung zu.

Die optische Kohärenztomografie (OCT) ist eine neue Möglichkeit der Bilddarstellung. Basierend auf der Messung der von den Schichten der Netzhaut unterschiedlich reflektierten Lichtstrahlen niedriger Kohärenzlänge mittels eines Interferometers kann die Retina in hochauflösenden zwei- und dreidimensionalen Schnittbildern histologischer Qualität dargestellt werden (HUANG et al. 1991, DREXLER&FUJIMOTO 2008). Die OCT wird in der Humanmedizin bereits routinemäßig eingesetzt, um Erkrankungen der Makula (AHLERS et al. 2010, BARAK et al. 2011, DUBIS et al. 2009, KO et al. 2004, STEINBERG 2011), wie z. B. die Makuladegeneration (AHLERS&SCHMIDT-ERFURTH 2009, REGATIERI et al.

2012, VAN VELTHOVEN et al. 2007), frühzeitig zu diagnostizieren und den Therapieverlauf zu überwachen.

In der aviären Ophthalmologie wurde die OCT beim Greifvogel bisher vergleichsweise wenig angewendet. Zwei Studien, bei denen jedoch nur einzelne Individuen und eine begrenzte Zahl von Wildgreifvogelarten einbezogen wurden (RAUSCHER et al. 2013, RUGGERI et al. 2010), beschrieben die Darstellbarkeit der Retina und pathologischer Veränderungen. Ergebnisse zum physiologischen Aufbau der Retina bei verschiedenen Greifvogelarten lieferte erstmals VELASCO GALLEGO (2015). Systematische Untersuchungen zum physiologischen Zustand der Foveae mittels OCT fehlten aber bislang völlig.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, die Einsatzmöglichkeit und den klinischen Nutzen der OCT für die Untersuchung der Foveae beim Greifvogel aufzuzeigen, mit Fokus auf die Darstellung des physiologischen Aufbaus der Foveae. Dabei sollte untersucht werden, ob Variationen in der Morphologie der Foveae centralis und temporalis innerhalb tagaktiver und nachtaktiver Spezies existieren und ob Unterschiede innerhalb der Gruppe der einbezogenen tagaktiven und der nachtaktiver Spezies und zwischen den beiden Gruppen feststellbar sind.

## II. LITERATURÜBERSICHT

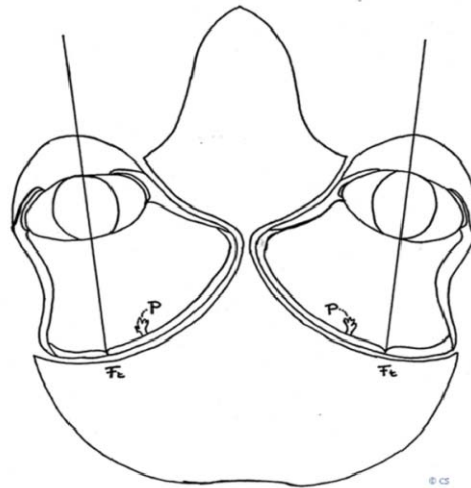
### 1. Das Vogelauge - Anatomie und Physiologie

Das wichtigste Sinnesorgan für Vögel ist das Auge (KORBEL 1994). Im Vergleich zum Säuger ist es zwar ähnlich aufgebaut, weist jedoch einige Besonderheiten hinsichtlich der Spezialisierung und Anpassung an die Lebensgewohnheiten und -bedingungen auf (KORBEL 2014, PUMPHREY 1948). Genaue Kenntnisse über die Anatomie sind daher für eine Beurteilung der Untersuchungen mittels Optischer Kohärenztomografie unabdingbar.

#### 1.1. Orbita - Augenhöhle

Die Ossa frontale, squamosum, laterosphenoidale, lacrimale und ectethmoidale formen die knöcherne Augenhöhle. Sie begrenzen den Augapfel dorsal, kaudal und lateral. Ventral schließt sich das faszienartig ausgebildete Ligamentum suborbitale an. Bei vielen Papageienvögeln liegt eine knöcherne Begrenzung vor (KERN&COLITZ 2013, REESE et al. 2009). Medial werden die beiden Orbitae nur durch das dünne Septum interorbitale voneinander getrennt, welches bei jungen Greifvögeln mittig häutig sein kann (FRANZ-ODENDAAL und VICKARYOUS 2006, MARTIN 1985, REESE et al 2009). Tagaktive Greife haben einen langgezogenen Fortsatz am Os lacrimale. Dieser Processus supraorbitalis überragt dorsal den Augapfel (FRANZ-ODENDAAL&VICKARYOUS 2006, REESE et al. 2009). Die knöchernen Strukturen der Augenhöhle dienen dem Schutz der Bulbi und umschließen diese fast vollständig. Eine Ausnahme stellen die Eulenvögel sowie die dämmerungsaktiven Vögel dar. Bei ihnen ist die Orbita sehr flach ausgeprägt (Abb. 1). Eine zusätzliche Schutzfunktion übernimmt hier der knöcherne Skleralring, Anulus ossicularis orbitae (DUKE-ELDER 1958 a, REESE et al. 2009). Im Unterschied zum Säuger liegt hinter dem Bulbus oculi nicht ein Fettkörper, sondern ein häutiger Sack, der Sinus infraorbitalis (REESE et al 2009).

Der Augapfel ist eng in die Orbita eingelagert und der Platz für die Muskulatur in der Orbita gleichzeitig stark reduziert, so fehlt z. B. der M. retractor bulbi. Die Augenbewegungen sind sehr stark eingeschränkt, sie werden jedoch durch eine erhöhte Beweglichkeit der Halswirbelsäule kompensiert (DUKE-ELDER 1958 a).



**Abbildung 1:** Orbitae der Eule modifiziert nach WOOD 1917. Zu erkennen ist die bei den Eulen sehr flach ausgeprägte Orbita, die F. temporalis (Ft) und der in den Glaskörperraum hineinragende Pecten oculi (P). Die Augen sind frontal ausgerichtet, erkennbar an der Axis visualis, welche durch die F. temporalis und das Zentrum der Linse verläuft

## 1.2. Bulbus oculi – Augapfel

Die Bulbi des Vogels sind sowohl relativ als auch absolut sehr groß (DUKE ELDER 1958 a, MARTIN 1985). Bei Greifvögeln beträgt der Anteil der Augen am Kopfgewicht 22-32 % und beim afrikanischen Strauß (*Struthio camelus*) 21 %. Beim Menschen ist dies im Vergleich nur ein Prozent (KORBEL 1994, PEARSON 1972, REESE et al. 2009). Mit einer axialen Länge von 50 mm hat der Strauß, *Struthio camelus*, das größte Auge unter den Landwirbeltieren (MARTIN 1985, WALLS 1963 a), das am stärksten zurückgebildete, einfache Auge besitzt der Kiwi (*Apteryx sp.*) (DUKE-ELDER 1958 a).

Bei Vögeln ist die Form des Bulbus nicht kugelförmig wie bei Säugetieren, sondern setzt sich aus mehreren, unterschiedlich geformten Bulbusabschnitten zusammen (MARTIN 1985, REESE et al 2009). Er besteht aus dem kugelförmigen Bulbus oculi anterior mit einer relativ kleinen Kornea und dem größeren, schalenförmigen Bulbus oculi posterior mit dem Fundus oculi. Der Vorderteil mit der Kornea ist im Vergleich zum hinteren Teil stärker gekrümmt (DUKE-ELDER 1958 a, KERN&COLITZ 2013, REESE et al.). Das hyalinknorpelig gestützte Hintersegment der Sklera reicht anterior bis zum knöchernen Skleralring. Extern schließt sich eine fibröse Schicht an.

Beide Abschnitte des Bulbus werden über ein Zwischensegment verbunden, welches speziesabhängig variiert. Dieser Bereich wird durch den knöchernen Skleralring, Anulus ossicularis sclerae, gestützt (DUKE-ELDER 1958 a, PEARSON



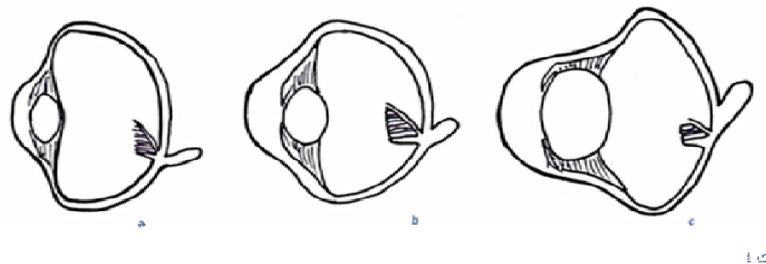
1972, REESE et al. 2009, WALLS 1963 a). Der Skleralring weist eine schmale vordere Öffnung für die Kornea und eine größere hintere Öffnung auf und wird durch die Sklera fortgesetzt. Abhängig von diesen beiden Öffnungen und dem Neigungswinkel der Sklera ergibt sich die jeweilige Bulbusform (PEARSON 1972). Es lassen sich im Wesentlichen drei Formen unterscheiden: flach, globulär und tubulär (Abb. 2). Darüber hinaus ist auch noch ein flachglobulärer Mischtyp zu finden, wie z. B. bei den Entenvögeln (KORBEL 1994, KERN&COLITZ 2013, MARTIN 1985, REESE et al. 2009). Die unterschiedlichen Formen können, die aerodynamischen Bedingungen berücksichtigend, dazu dienen, den sehr großen Vogelaugen Platz zu schaffen und, bei Erhalt eines hohen Auflösungsvermögens der Augen, Gewicht einzusparen (MARTIN 1985, MEYER 1986, PEARSON 1972, PUMPHREY 1961, WALLS 1963 a).

Die flache Form des Bulbus kommt vor allem bei tagaktiven Vögeln mit schmalen Kopf vor, z. B. bei Tauben, Hühnervögeln (DUKE-ELDER 1958 a, REESE et al. 2009) und Papageien (KORBEL 1994). Der globuläre Typ ist bei tagaktiven Vögeln mit etwas breiterem Kopf vorhanden, wie Sperlingsvögeln, aber auch bei Vögeln, die ein hochauflösendes Sehen aus großer Entfernung benötigen, wie beispielsweise Greifvögel (DUKE-ELDER 1958 a, REESE et al. 2009, WALLS 1963 a). Beim tubulären Augentyp ist das Zwischensegment verlängert und der Skleralring weist konkave Knochenblättchen auf. Dieser Typ findet sich bei dämmerungsaktiven Vögeln, wie z. B. Eulenvögeln. (KORBEL 1994, MARTIN 1985, PEARSON 1972, WALLS 1963 a).

Bei den meisten Vogelarten sind die Bulbi lateral angeordnet. Dies dient dem monokularen Sehen und gleichzeitig der Vergrößerung des Gesichtsfeldes (PEARSON 1972, REESE et al. 2009). Die Position der Augen lässt sich mit dem Winkel der beiden optischen Achsen beschreiben. Vögel mit lateral ausgerichteten Augen haben einen großen Winkel. Vögel mit einem rundlichen Kopf und eher frontal ausgerichteten Augen haben einen geringeren Winkel, so sind es beim Turmfalken, *Falco tinnunculus*, nur 90°. Augen mit starker frontaler Ausrichtung (s. Abb. 1) sind nahezu immobil. Eulenvögeln müssen daher den Kopf weit drehen um das Gesichtsfeld zu erweitern. Die Halswirbelsäule ist hierfür extrem beweglich und weist eine Rotation von 270° und mehr auf (REESE et al. 2009, WALLS 1963 a).

Der Bulbus und der Skleralring sind bei allen Formen leicht asymmetrisch geformt. So sind nicht nur die Linse und Kornea nasal zentriert und verschoben, sondern auch die nasale Seite des Zwischensegments ist kürzer als die temporale Seite. Die Axis bulbi wird dadurch nasal geneigt und konvergiert zur Medianen hin.

Auch die Retina ist asymmetrisch angeordnet. Dieser Effekt dient dem maximalen Überlappen des monokularen Sehfeldes – binokuläres Sehen wird möglich. Dies ist bei Eulenvögeln mit elongierten, tubulären Bulbi stärker ausgeprägt als bei anderen Vogelarten und kompensiert die durch die spezielle Bulbusform und Anordnung der Retina entstehende Einschränkung der Sehfelder (DUKE-ELDER 1958 a, KORBEL 1994, MARTIN 1985, PEARSON 1972, WALLS 1963 a). Zusätzlich wird im tubulären Bulbus die Streustrahlung absorbiert (REESE et al. 2009).



**Abbildung 2:** Bulbusformen beim Vogel a) flach, b) globulär, c) tubulär, modifiziert nach WALLS 1942.

### 1.3. Lens - Linse

Die Linse wird durch die Zonulafasern des Ziliarkörpers aufgehängt und über die Ziliarfortsätze stabilisiert. Sie trennt den gelatineartigen Glaskörperraum von den beiden mit Kammerwasser gefüllten Augenkammern ab (MEYER 1986, REESE et al. 2009). Im Aufbau gleicht sie dem der Säugetiere: sie ist transparent, avaskulär und kristallin (HARMENING&WAGNER 2011). Nur bei Nesthockern ist sie physiologischerweise opak. Dieser Zustand entspricht einer „juvenilen Katarakt“ (REESE et al. 2009, KORBEL 2002).

Ihr Corpus lentis ist aus konzentrisch geschichteten Linsenfasern aufgebaut. Die Dichte lässt jedoch vom Kern ausgehend nach außen nach, so dass ein Gradient des Refraktionsindex in der Linse entsteht (MARTIN 1985). Der Linsenkern enthält Glykogen (MARTIN 1985). Umgeben wird der Linsenkörper vom unterschiedlich ausgeprägten Ringwulst, Pulvinus annularis lentis, der nur bei Reptilien und Vögeln ausgebildet ist (MARTIN 1985). Er besteht aus modifizierten, radiär angeordneten Linsenfasern (KERN&COLITZ 2013). Zwischen Linsenkörper und Ringwulst ist ein Spalt, in den die Fasern des Ringwulstes eine Flüssigkeit sezernieren. Diese dient während der Akkomodation dem einfacheren Gleiten zwischen den beiden Bestandteilen der Linse (KERN&COLITZ 2013, WALLS 1963 a). Beide Teile werden nach außen von einer Linsenkapsel ummantelt (KERN&COLITZ 2013). Die Linse ist einerseits mit den Ziliarfortsätzen des

Strahlenkörpers verbunden, andererseits wird sie über das Strahlenbändchen, Zonula ciliaris, bestehend aus den Zonulafasern, Fibrae zonulares, zwischen Ringwulst und Pars ciliaris aufgehängt (KORBEL 1994).

Die Linse ist, trotz eines harten Kerns, insgesamt weich und sehr biegsam, so dass eine lebenslange Akkomodation möglich wird (DUKE-ELDER 1958 a, MARTIN 1985, PEARSON 1972). Die Form der Linse ist im Grunde bikonvex (MEYER 1986), sie variiert jedoch je nach Vogelart. Bei Eulen und Wasservögeln ist sie rund und stark konvex auf beiden Seiten (DUKE-ELDER 1958 a, KERN&COLITZ 2013, PEARSON 1972, WALLS 1963 a). Vorne stärker konvex als auf der Hinterseite ist sie bei Falkenartigen und Singvögeln (PEARSON 1972). Die Linsengröße wird maßgeblich durch die Ausprägung des Ringwulstes bestimmt. Der Ringwulst dient vermutlich einerseits der Akkommodation, ihm wird aber andererseits auch eine nutritive Funktion zugesprochen (MARTIN 1985, KERN&COLITZ 2013).

Obwohl bereits an der Außenfläche der Kornea eine große Lichtbrechung geschieht, gilt auch die Linse als ein stark refraktives Organ. Neben der Kornea ist sie aufgrund ihrer Vorwärtsbewegungen und Gestaltsveränderungen ein wichtiger Bestandteil der Akkommodation. Verstärkt wird die Linsenbrechkraft durch die Kontraktionen der Ziliarmuskeln (KERN&COLITZ 2013, MEYER 1986, WALLS 1963 a).

#### **1.4. Die Augenhüllen**

Die Augenhüllen des Bulbus bestehen aus den folgenden Schichten (MEYER 1986, REESE et al 2009):

- der äußeren Tunica fibrosa bulbi, die sich aus transparenter Kornea und knorpeliger Sklera zusammensetzt,
- der mittleren vaskulären Tunica vasculosa bulbi oder Uvea mit Iris, Ziliarkörper und Choroidea
- und der inneren sensorischen Tunica interna bulbi, der Netzhaut.

##### **1.4.1. Tunica fibrosa bulbi seu externa bulbi – äußere Augenhaut**

###### **Sklera – weiße Augenhaut**

Die weißliche, aus Bindegewebe bestehende Sklera umgibt das hintere Augensegment. Sie dient durch ihren hyalinknorpeligen Anteil als formgebende und den Augendruck stabilisierende Schicht. Am Übergang zum Augenvordersegment eingelagert ist der knöcherne Skleralring, Anulus ossicularis sclerae. (DUKE-ELDER 1958 a, REESE et al. 2009). Er besteht aus fischschuppenartig angeordneten, membranösen Knöchelchen, welche bei großen Augen pneumatisiert sind (DUKE-

ELDER 1958 a, MARTIN 1985, REESE et al. 2009). Der Ring dehnt sich, Anteile der Knorpelschale überlappend, anterior bis zum Limbus aus. Er dient einerseits der Festigkeit des Auges und andererseits dem Ursprung der gestreiften, schnell arbeitenden Muskeln der Akkomodation (PEARSON 1972, WALLS 1963 a). Die Anzahl der Knochenblättchen variiert von 10 bis 18, durchschnittlich sind 15 pro Auge zu finden (DUKE-ELDER 1958 a, MARTIN 1985, PEARSON 1972, REESE et al. 2009).

Ebenfalls im Knorpelanteil der Sklera findet sich, rund um den Sehnerveneintritt, das flache, ring- oder hufeisenförmige Os nervi optici, eine eingelagerte Knorpelplatte. Sie kann aus einem Stück oder aus mehreren Teilen bestehen. Ihre Funktion ist unklar (DUKE-ELDER 1958 a, FRANZ-ODENDAAL&VICKARYOUS 2006, MARTIN 1985, WALLS 1963 a). Bei Raben, Finken und Spechten kann sie verknöchert sein, sie kann jedoch auch nicht vorhanden oder nur geringgradig ausgebildet sein (KERN&COLITZ 2013, PEARSON 1972, REESE et al. 2009).

### **Kornea – Hornhaut**

Das Augenvordersegment wird von der transparenten, sensibel innervierten Kornea umgeben. Der Übergang zur Sklera (Limbus corneae) ist durch Pigmenteinlagerungen in ein äußeres und inneres Pigmentband gekennzeichnet (KORBEL 1994, REESE et al. 2009).

Die Kornea ist wie die Hornhaut der Säugetiere aus fünf Schichten aufgebaut. Sie besteht aus

- dem vorderen Hornhautepithel, *Epithelium corneae externum*,
- der *Lamina limitans superficialis*, die sogenannte Bowman-Membran,
- der *Substantia propria corneae*
- der *Lamina limitans profunda* (Descemet-Membran), welche bei einigen Vogelarten gar nicht ausgeprägt ist
- und dem hinteren Hornhautepithel, das *Epithelium corneae internum*, das den Abschluss nach innen zur Augenkammer bildet.

Die Bowman-Membran ist im Vergleich zu jener der Mammalia dicker und dient der Stabilität. Sie ist jedoch nicht immer ausgebildet (KERN&COLITZ 2013, MARTIN 1985, REESE et al. 2009). Die Dicke der Hornhaut variiert speziesspezifisch und nimmt zu, je größer die Vogelart ist. Die Eulenvögel haben zudem eine stärker gekrümmte Oberfläche und einen größeren Radius, so dass die Kornea schon nahezu globulär wird und daher eine tiefe vordere Augenkammer vorhanden ist. An ihre Umgebung und Lebensweise angepasst, weisen tauchende Arten und

Wasservogel eine dicke und flache Hornhaut auf (DUKE-ELDER 1958 a, KORBEL 1994, REESE et al 2009, WALLS 1963 a).

Durch ihre konvex-konkave Gestalt trägt die Kornea maßgebend zur Akkomodation bei (MARTIN 1985). Ihre Oberfläche ist durchgehend glatt, so dass kaum ein kornealer Astigmatismus auftritt (PEARSON 1972). Die Nickhaut reinigt beim Lidschlag die Augenlider von innen, so dass eine Verunreinigung und Schmierartefakte der Hornhautoberfläche verhindert werden (WALLS 1963 a). Durch die mit Kammerwasser gefüllte vordere Augenkammer sinkt die Refraktionskraft der nach innen weisenden Korneafläche. Das Kammerwasser und der präkorneale Tränenfilm versorgen die Hornhaut gemeinsam mit Nährstoffen. Durch einen hochviskösen, mukösen Zusatz im Kammerwasser ist bei einigen Eulenarten, wie z. B. beim Waldkauz, vermutlich der Stoffwechselumsatz der Vorderkammer herabgesetzt (DUKE-ELDER 1958 a, MARTIN 1985).

#### **1.4.2. Tunica vasculosa seu media bulbi, Uvea – mittlere Augenhaut**

Die Tunica vasculosa seu medica bulbi, auch Uvea genannt, untergliedert sich in die folgenden Abschnitte: anterior in die Regenbogenhaut, Iris, dem mittigen, an die Iris ansetzenden Strahlenkörper, Corpus ciliare, und posterior in die Aderhaut, Choroidea (REESE et al. 2009).

##### **Iris – Regenbogenhaut**

Die Iris umschließt die zumeist runde Pupille und unterteilt den Raum zwischen Kornea und Linse in die vordere und hintere Augenkammer. Für die Pupillenmotorik sind bei den Vögeln die im Wesentlichen quergestreiften Mm. Sphincter pupillae und dilatator pupillae zuständig. Durch die Querstreifung können sie, ebenso wie die Ziliarmuskeln, schnell und willkürlich reagieren. Eine prompte Pupillenantwort für die Hell-Dunkel-Adaption ist möglich. Um eine genaue Augenuntersuchung auch des Fundus zu ermöglichen sind deshalb die in der Säugetierophthalmologie Anwendung findenden Parasympatholytica unwirksam (KORBEL 2000, MARTIN 1985, REESE et al. 2009, WALLS 1963 a). Für das Erlangen einer Mydriasis wird daher d-Tubocurarin mittels Parazentese angewendet (KORBEL 2000, REESE et al. 2009). Erfolgreich ist auch die rein topische Anwendung von Rocuronium Bromid, unter anderem beim Mäusebussard, Steinkauz, Waldkauz und Turmfalken. Das Medikament verursacht die Entstehung einer neuromuskulären Blockade (BARSOTTI et al. 2012, KERN&COLITZ 2013).

Neben der quergestreiften Muskulatur enthält die Iris Kapillaren und Venen, Myoepithel und glatte Muskulatur, Kollagenfibrillen und Nerven. Sie beginnt dünn an

der ziliären Grenze, verdickt sich mittig und dünnt pupillenwärts wieder aus.

In das Irisstroma eingelagerte Pigmente sind für die Irisfärbung zuständig, die speziesspezifisch variiert. Greifvögel können eine braune oder gelbliche Iris haben bis hin zu orange bei der Waldohreule oder beim Uhu (KERN&COLITZ 2013, MARTIN 1985, PEARSON 1972, WALLS 1963 a). Sie kann beim Greifvogel auch altersbedingt unterschiedlich gefärbt sein (MURPHY 1984). Darüber hinaus kann die Pigmentation ein Ausdruck des Sexualdimorphismus sein, so haben die männlichen Tiere der Kakadu-Spezies (*Cacatua spp.*) eine schwarze, weibliche Tiere hingegen eine braun bis rot gefärbte Iris (KORBEL et al. 2009). Der bei der Taube vorkommende „Wertring“ ist eine dunkle Zone in der Iris rund um die Pupille, deren Ausprägung keinerlei Bedeutung für die Leistungsfähigkeit der Taube besitzt (KORBEL 1994). Er entsteht durch eine Zone, in der Pigmente fehlen, sowohl Fett als auch Gefäße kaum vorhanden sind und die dunkel pigmentierte Irishinterfläche durchscheint (REESE Et al. 2009).

### **Pupille – Sehloch**

Die Pupille des Vogels ist in kontrahiertem Zustand fast immer rund. Andere, seltener auftretende Formen wie ellipsoid (*Rhynchops niger*, Schwarzmantel-Scherenschnabel) (MARTIN 1985), oval (*Columba livia*, Haustaube) und diamantförmig (*Aptenodytes forsteri*, Kaiser-Pinguin) (Lind et al 2008) sind beschrieben. Die Pupille ist sehr beweglich. Die Pupillengrenze steht in Kontakt mit der Linsenvorderfläche. Ihre Form hängt unter anderem von der retinalen Stimulation ab. Neben der Anpassung an dunkle Verhältnisse nimmt sie aktiv teil an der Akkomodation und verbessert die Bildqualität. Sie schützt das Auge vor thermischen und photischen Schäden und unterliegt, anders als beim Säuger, der willentlichen Kontrolle (DUKE-ELDER 1958 a, KERN&COLITZ 2013, MARTIN 1985, PEARSON 1972).

Beim Menschen verschlechtert sich die Bildqualität durch abweichende Strahlen bei einem Pupillendurchmesser ab 2,4 mm. MILLER beschrieb 1979 die Pupillengröße von 8 tagaktiven Falkenarten. Bei allen beginnt eine Verschlechterung der Bildqualität erst bei einem Pupillendurchmesser, der den des Menschen übersteigt (MARTIN 1985). Die durchschnittliche Größe der Pupille der Eulenvögel liegt zwischen 12 und 15 mm. Der Rotschulterbussard (*Buteo lineatus*), erreicht 8 mm und der Weißkopfseeadler (*Haliaeetus leucocephalus*), 9 mm (LIND et al. 2008). Bei der Schleiereule (*Tyto alba*) liegt der Durchmesser bei 6 mm (HARMENING&WAGNER 2011). Blaustirnamazonen (*Amazona aestiva*) und Graupapageien (*Psittacus erithacus*) weisen einen durchschnittlichen Wert

von ca. 5 mm auf (KALLÄHN 2014).

### **Corpus ciliare – Strahlenkörper**

Das ringförmige Corpus ciliare hat mehrere Funktionen im Auge. Es verankert die Linse im Bulbus, kann sowohl die Linse als auch die Kornea durch seinen Muskelanteil verformen und dient der Akkomodation.

Es liegt zwischen Iris und Choroidea und ist nach außen mit dem Anulus ossicularis sclerae verbunden. Die zahlreichen Fortsätze des Ziliarkörpers sind eng mit der äquatorialen Linsenkapsel verschmolzen (KERN&COLITZ 2013, REESE et al. 2009).

In das Stroma des Ziliarkörpers ist der zweiteilige, quergestreifte M. ciliaris eingegliedert. Den vorderen Anteil bildet der Crampton-Muskel (M. ciliaris anterior), er dient der kornealen Akkomodation. Den hinteren Anteil stellt der Brücke-Muskel (M. ciliaris posterior) dar, er dient der lentikulären Akkomodation. Durch Kontraktion wird der Strahlenkörper verkleinert und die Linse dadurch konvex verformt (MARTIN 1985, KERN&COLITZ 2013, KORBEL 2001). Eulen weisen überwiegend eine korneale Akkomodation auf. Daher ist der Crampton-Muskel bei ihnen gut entwickelt, der Brücke-Muskel jedoch klein und fast nicht vorhanden (DUKE-ELDER 1958 a, REESE et al. 2009, WALLS 1963 a).

### **Choroidea, Uvea – Aderhaut**

Der Aufbau der Aderhaut entspricht im Wesentlichen dem der Säugetiere, weist aber weniger Kollagenfibrillen und Pigmenteinlagerungen auf. Durch das besonders gut ausgeprägte Gefäßsystem ist sie insgesamt sehr dick und vor allem bei tauchenden Vogelarten sehr prominent (PEARSON 1972). Sie besteht aus zwei Schichten. Die äußere *Lamina vasculosa* beherbergt Arteriolen. Sie versorgt die innere, Kapillaren enthaltende *Lamina choriocapillaris* (REESE et al. 2009). Bei Hühnern sind außerdem auffällig viele dünnwandige Hohlräume ausgebildet, die vermutlich mit Lymphe ausgefüllt sind (KERN&COLITZ 2013). Spechte dagegen haben eine gänzlich eigene Schicht, angefüllt mit mukösem Gewebe. Dies verhindert eine Ablösung der Netzhaut, die andernfalls, so wird angenommen, bedingt durch Erschütterungen des Kopfes und der Augen, durch das Klopfen bei der Nahrungssuche entstehen würde (WALLS 1963 a).

Die Aderhaut ist über die dünne, pigmentierte *Lamina suprachoroidea fusca* locker mit der Sklera und über die *Basalmembran* eng mit dem retinalen Pigmentepithel verbunden (REESE et al. 2009, WALLS 1963 a).

Eine Pigmentierung tritt vor allem bei tagaktiven Vogelarten auf und verhindert

Reflexionen im Auge (MARTIN 1985, REESE et al. 2009). Bei dämmerungsaktiven Spezies ist die Choroidea entweder nur schwach oder überhaupt nicht pigmentiert.

Ein Tapetum lucidum choroideae, wie es beim Säugetier vorkommt, ist beim Vogel nicht ausgebildet (KORBEL 1994, WALLS 1963 a). Beim dämmerungsaktiven Ziegenmelker gibt es dorsal im Fundus einen weiß reflektierenden Bereich (Tapetum lucidum retinae), der aus dicht gepackten Lipiden besteht, die die Fortsätze der Pigmentzellen besetzen. Diese Art von Tapetum lucidum kann also nicht mit dem choroidalen Tapetum der Säuger gleichgesetzt werden.

Durch ihr starkes Gefäßsystem dient die Aderhaut vorrangig der Nährstoffversorgung der avaskulären Retina (REESE et al. 2009). Sie geht im Bereich der Ora serrata aus der Basalplatte des Ziliarkörpers hervor und wird posterior den Fundus umgebend sehr dick, besonders im Bereich der Area (DUKE-ELDER 1958 a, WALLS 1963 a). Enthaltene Muskelfasern treten ebenfalls besonders stark im Bereich der Fovea auf. Vermutlich dienen sie der Regulierung der Blutversorgung der Choroidea oder auch der Ausrichtung der Fovea während der Akkomodation (DUKE-ELDER 1958 a).

#### **1.4.3. Tunica interna bulbi – Innere Augenhaut**

##### **Die Retina – Netzhaut**

Die Retina kleidet das Augenhintersegment aus. Sie wird in einen sogenannten blinden Teil, die Pars caeca retinae, und in einen lichtempfindlichen Teil, die Pars optica retinae, aufgeteilt. Der blinde Teil der Retina bedeckt die Rückseiten des Ziliarkörpers und die Irishinterfläche. Der Übergang zum lichtempfindlichen Teil ist durch die Ora serrata gekennzeichnet. Im selben Bereich liegt auch der Übergang von Choroidea zum Ziliarkörper. Die beiden Teile der Retina sind entwicklungsgeschichtlich gesehen eine Ausstülpung des Gehirns. Durch mittige Einsenkung der blasenartigen Vorverlagerung entsteht der doppelwandige Augenbecher. Die beiden Blätter des Augenbechers schieben sich im Laufe der Entwicklung weiter über die entstehende Linse aufeinander zu. Der Umschlagrand begrenzt die Pupille. Das Außenblatt des Augenbechers ist die Grundlage für das einschichtige Pigmentepithel, Stratum pigmentosum retinae, welches mit der Choroidea eng verbunden ist (REESE et al. 2009, SINOWATZ 1998).

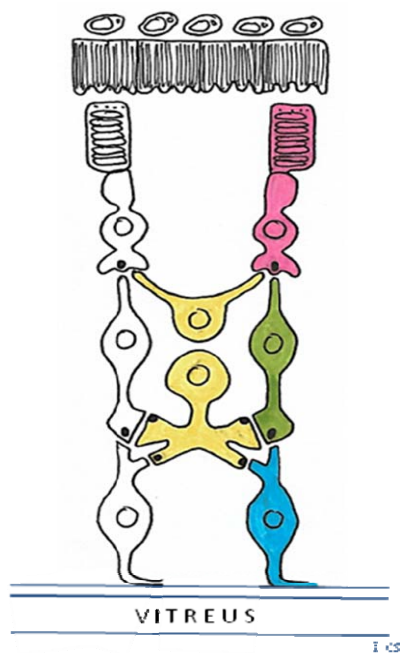
Das Innenblatt entwickelt sich zum lichtempfindlichen Stratum nervosum retinae und enthält verschiedene Arten an Neuronen und Gliazellen (MEYER 1986). Es sitzt dem Pigmentepithel nur locker auf. Das Stratum nervosum und das Stratum pigmentosum retinae sind nur durch Mikrovilli verzahnt. Sie werden allein durch den



Druck des Glaskörpers zusammengehalten (REESE et al. 2009, SINOWATZ 1998).

Die Pars optica der Vogelretina ist sehr klar organisiert und weist sehr viele vogelspezifische, strukturelle Besonderheiten auf. Die drei Hauptschichten sind klar differenziert. Innerhalb dieser Hauptschichten ist eine Unterteilung in weitere Unterschichten erkennbar. Durch den speziellen Aufbau der Retina ergeben sich die besonderen Leistungsfähigkeiten der Vogelaugen (MARTIN 1985, REESE et al. 2009).

Drei dicht vernetzte Ebenen von Neuronen sind für die Reizweiterleitung zuständig (Abb. 3): Da die Retina transparent ist, kann das Licht direkt durch alle Schichten hindurch auf die Rezeptoren des Sinnesepithels fallen. Das erste Neuron der Kette ist eine Rezeptorzelle (Stäbchen oder Zapfen), das zweite eine bipolare Zelle und das dritte Neuron ist eine Ganglienzelle. Zwischengeschaltete Interneurone, die Horizontal- und amakrinen Zellen, nehmen eine regulatorische Funktion ein (MEYER 1986, REESE et al. 2009).



**Abbildung 3:** Neuronen der Reizweiterleitung, modifiziert nach MEYER 1986.

1. Neuron: Fotorezeptor (rosa), 2. Neuron: bipolare Zelle (grün), 3. Neuron: Ganglienzelle (blau). Zwischengeschaltet sind Interneurone (gelb), wie z. B. amakrine Zellen und Horizontalzellen.

Die Retina setzt sich aus zehn Schichten zusammen, von denen neun zum Innenblatt der Retina gezählt werden. Die zehnte Schicht, das Pigmentepithel, stellt das Außenblatt der Retina dar (MARTIN 1985, MURPHY 1984).

1. **Stratum pigmentosum:** retinales Pigmentepithel.
2. **Stratum neuroepitheliale:** Das Neuroepithel enthält die Außensegmente des Sinnesepithels.
3. **Stratum limitans externum:** Auch Membrana limitans externa, äußere

Grenzmembran.

4. **Stratum nucleare externum:** Die äußere Körnerschicht enthält die Zellkerne der Fotorezeptoren.
5. **Stratum plexiforme externum:** äußere plexiforme Schicht. Hier liegen die Synapsen von Rezeptorzellen und bipolaren Zellen.
6. **Stratum nucleare internum:** innere Körnerschicht. Hier sind die Kerne der bipolaren Zellen, der Horizontal-, der amakrinen und der Müller-Zellen vorhanden.
7. **Stratum plexiforme internum:** Die innere plexiforme Schicht wird von den Synapsen der bipolaren Zellen, der Ganglienzellen und der amakrinen Zellen gebildet.
8. **Stratum ganglionare:** Die Ganglienzellschicht enthält die Kerne der Ganglienzellen.
9. **Stratum neurofibrarum:** Die Nervenfaserschicht setzt sich aus den Axonen der Ganglienzellen zusammen.
10. **Stratum limitans internum:** innere Grenzmembran.

### **Stratum pigmentosum – retinales Pigmentepithel**

Das retinale Pigmentepithel enthält viele Melaningranula, die das Streulicht absorbieren und dadurch einer verminderten Sehschärfe entgegenwirken (KORBEL 1994). Der Grad der Pigmentation kann je nach Spezies, Individuum und Gefiederfärbung variieren (REESE et al. 2009). Besonders stark pigmentiert ist diese Schicht bei tagaktiven Spezies, wie Papageien, Tauben und tagaktiven Greifvögeln. Diese Arten haben einen sehr dunklen Fundus. Eine Ausnahme bilden viele Zoovogelspezies, bei Pinguinen z. B. ist der Augenhintergrund vergleichsweise schwach pigmentiert. Bei dämmerungs- und nachtaktiven Vögeln ist der Pigmentierungsgrad geringer ausgeprägt. Der Fundus erscheint heller, die choroidalen Blutgefäße scheinen durch und geben dem Fundus ein gestreiftes, rötliches, „tigroides“ Aussehen (KORBEL 1994, KORBEL et al. 1997 a, PEARSON 1972, REESE et al. 2009). Eine weitere Funktion der Schicht ist die Regeneration der Sehpigmente und zerstörter Membranteile der Fortsätze der Fotorezeptoren. Die Fortsätze des Pigmentepithels greifen zwischen diese Außenglieder der Fotorezeptoren (MEYER 1986).

Da das Pigmentepithel nur leicht mit dem Stratum nervosum retinae verbunden ist (REESE et al. 2009, SINOWATZ 1998), treten großflächige Ablösungen der Retina besonders in diesem Bereich auf. Die Netzhaut ist dann meist nur noch an der Ora serrata oder dem Sehnervenkopf fixiert (KORBEL 1994).

### **Stratum neuroepitheliale – Neuroepithel**

Im Stratum neuroepitheliale befinden sich die Außensegmente der Fotorezeptoren. Die Rezeptorzellen sind schlank und dicht gepackt. Da Vögel Stäbchen und Zapfen in ihrer Retina haben, spricht man auch hier, wie beim Säuger, von einer Retina duplex (DUKE-ELDER 1958 a). Es gibt bestimmte Bereiche in der Retina, in denen die Rezeptoranzahl besonders hoch ist. Diese Zonen stellen die Areae dar. Sie liegen nahe der optischen Achse (BEZZEL&PRINZINGER 1990). In den Außengliedern der Fotorezeptoren sind Sehpigmente vorhanden. Durch Lichteinfall kommt es zu einer chemischen Kettenreaktion des Pigments, so dass die visuelle Zelle erregt wird (MEYER 1986). Für das Sehen in der Dämmerung enthalten die lichtempfindlichen Stäbchen das Sehpurpur Rhodopsin, das ein Absorptionsmaximum im Bereich zwischen 490 und 506 nm aufweist. In den Zapfen wurden bisher bis zu drei verschiedene Sehpigmente gefunden mit einem Absorptionsmaximum von 380 bis 410 nm (REESE et al. 2009, MARTIN 1985).

Die **Zapfen** dienen sowohl dem Sehen bei Tageslicht (photopisches Sehen), dem Farbsehen als auch einer hohen visuellen Schärfe. Sie haben ein kurzes, konisches Außenglied. Neben einfachen Zapfen gibt es auch Zwillingszapfen. Letztere kommen bei allen Vertebraten vor, mit Ausnahme der Plazentatiere. Es handelt sich hierbei um eng verbundene, aber unabhängige Rezeptorzellen, bestehend aus einem Hauptzapfen und einem kleineren Nebenzapfen, deren Bedeutung unklar ist (MEYER 1986).

Im Übergang von innerem Segment zum Außenglied der Zapfen von Vögeln, Amphibien, Reptilien und Säugetieren (außer Plazentatieren) kommen Öltropfen vor. Sie enthalten karotinoide Pigmente, die mit der Nahrung aufgenommen und in einer Mischung aus Lipiden aufgelöst werden (MARTIN 1985, MEYER 1986). Es existieren fünf Arten an farbigen Öltropfen mit unterschiedlichen Absorptionsmaxima. Sie scheinen eine chromatische Filterfunktion zu haben. Sie absorbieren eine hohe Menge einfallenden Lichtes kurzer Wellenlänge, noch bevor es die Außenglieder der Rezeptorzellen samt Sehpigmenten erreicht (MARTIN 1985, PEARSON 1972, REESE et al. 2009). Sie erhöhen vermutlich den Farbkontrast und dienen daher einer verbesserten Farbwahrnehmung (BEZZEL&PRINZINGER 1990). Durchsichtige Öltropfen dienen der Wahrnehmung

von ultraviolettem Licht. Bei tagaktiven Vogelarten sind die Tröpfchen von kräftiger Farbe, bei nachtaktiven und sehr kleinen Vogelarten eher blassgelb bis farblos oder kaum vorhanden. Die Retina hat durch diese besonderen Strukturen eine spektrale Perzeptionsbreite von 320 bis 680 nm (MARTIN 1985, PEARSON 1972, REESE et al. 2009).

Die **Stäbchen** dienen dem Sehen bei Dämmerung und Nacht (skotopisches Sehen) und sind daher sehr lichtempfindlich. Man findet sie hauptsächlich bei nachtaktiven Vogelarten. Die Retina bei Eulen weist beispielsweise bis zu 90 % Stäbchen auf. Sie sind durch große, schlanke Außenglieder charakterisiert. (DUKE-ELDER 1958 a, MEYER 1986, REESE et al. 2009, WALLS 1963 a).

#### **Stratum limitans externum – äußere Gliagrenzmembran**

Die äußere Grenzmembran ist nur sehr dünn. Sie grenzt die Kerne der Stäbchen und Zapfen von ihren Fortsätzen ab (SEVERIN 1995).

#### **Stratum nucleare externum – äußere Körnerschicht**

In der äußeren Körnerschicht liegen die Zellkerne der Fotorezeptoren (Stäbchen und Zapfen). Die Kerne der Zapfen liegen in der äußeren Hälfte der Schicht, die Kerne der Stäbchen in der inneren Hälfte. Das Stratum nucleare externum wirkt dadurch dreischichtig (WOOD 1917).

#### **Stratum plexiforme externum – äußere plexiforme Schicht**

In der äußeren plexiformen Schicht bilden die Axone der Fotorezeptoren Synapsen mit den Dendriten der Bipolarzellen aus. GALLEGO (1983, zitiert nach MARTIN 1985) beschreibt eine unterschiedliche Organisation der Schicht bei tagaktiven und nachtaktiven Vogelarten. Bei tagaktiven Vögeln ist sie durch eine dreischichtige Verteilung der Synapsen der unterschiedlichen Arten der Fotorezeptoren (Stäbchen und Zwillingszapfen, gerade Zapfen, schräge Zapfen) mit drei unterschiedlichen Arten Horizontalzellen und mehreren verschiedenartigen Bipolarzellen charakterisiert. Bei nachtaktiven Vögeln liegen die synaptischen Körper in nur einem Bereich.

#### **Stratum nucleare internum – innere Körnerschicht**

Die Zellkörper der Bipolarzellen, Horizontalzellen, amakrinen Zellen und der Müller-Stützzellen finden sich in der inneren Körnerschicht.

Die bipolaren Zellen verknüpfen die Fotorezeptoren und Ganglienzellen. Die Horizontalzellen verbinden die Fotorezeptoren untereinander und kommunizieren mit den Dendriten der bipolaren Zellen. Die verschiedenen Arten der

amakrinen Zellen stehen mit den Ganglienzellen als auch den Bipolarzellen in Verbindung. Die Müller-Stützzellen sind große, verzweigte Gliazellen, die durch das gesamte Stratum nervosum ziehen. Sie bilden die äußere und die innere Grenzmembran aus und umschließen alle anderen Zellen (MARTIN 1985, MEYER 1986).

### **Stratum plexiforme internum – innere plexiforme Schicht**

Hier liegen die Synapsen von Ganglienzellen, amakrinen Zellen und bipolaren Zellen. Eine Vielzahl schwacher Bänder wird ausgebildet durch die verschiedenen Ebenen der Endaufzweigungen der amakrinen Zellen. Im selben Bereich sind auch die verzweigten Filamente der Müllerfasern zu finden.

### **Stratum ganglionare – Ganglienzellschicht**

Die Ganglienzellschicht ist gekennzeichnet durch die Kerne der Ganglienzellen. Es gibt unterschiedliche (einschichtige und mehrschichtige, multipolare) Arten an Ganglienzellen (MARTIN 1985, WOOD 1917).

### **Stratum neurofibrarum – Nervenfaserschicht**

Die Nervenfaserschicht wird aus den nicht-myelinisierten Axonen der Ganglienzellen gebildet. Diese verlaufen parallel zu den Retinaschichten und verlassen das Auge als Nervus opticus (MARTIN 1985, SEVERIN 1995).

### **Stratum limitans internum – Membrana limitans interna, innere Grenzmembran**

Sowohl die äußere als auch die innere Grenzmembran werden von den Müller-Stützzellen gebildet. Sie sind große, verzweigte Gliazellen, die sich durch die gesamte Retinadicke ziehen und die meisten Neuronen umgeben. Die Müller-Stützzellen dienen hauptsächlich der mechanischen Unterstützung der Retina (MARTIN 1985).

Durch ein hohes Verhältnis leitender Zellen zu sensorischen Zellen sind alle drei Zellkerne enthaltenden Retinaschichten (und die innere plexiforme Schicht) bei Vögeln sehr dick und deutlicher in Unterschichten differenziert als bei anderen Vertebraten (MARTIN 1985, WALLS 1963 a, DUKE-ELDER 1958 a). Die Querverbindungen von bipolaren, amakrinen und Horizontalzellen sind im Vergleich zum Menschen oder Primaten sehr viel deutlicher ausgebildet (OEHME 1964). Insgesamt ist die Retina beinahe 1,5 bis 2 Mal dicker als die Retina von anderen Vertebraten (DUKE-ELDER 1958 a, SLONAKER 1918, WALLS 1963 a).

### 1.5. Corpus vitreum – Glaskörper

Der Glaskörper des Vogels ist eine durchsichtige, avaskuläre, gelartige Masse, die zu 99 % aus Wasser besteht. Das Stroma wird aus Glykosaminglykanen, vor allem Hyaluronsäure, und Kollagenfibrillen gebildet (REESE et al. 2009, SINOWATZ 1998). Letztere können kondensieren und sind dann zwischen Pektenspitze und Linsenhinterkapsel erkennbar (KORBEL 1994). Das Corpus vitreum füllt die Camera vitrea bulbi aus, beginnend hinter der Linse und dem Ziliarkörper, und beugt durch Aufrechterhaltung der Druckverhältnisse einer Ablösung der Retina vor. Da die Konsistenz wesentlich flüssiger ist als bei Säugetieren, können durch Schwingungen des Augenfächers die Nährstoffe besser zur gefäßlosen Retina diffundieren. In ihrem Grenzbereich sind die Kollagenfibrillen zur Glaskörpergrenzmembran (Membrana vitrea) verflochten, über die auch enge Kontakte zur Pektenbasis und -brücke sowie zum Ziliarkörper bestehen (KORBEL 1994, REESE et al. 2009).

### 1.6. Topografie der Retina

Die relative Retinadicke korreliert nicht mit der Größe des Augapfels. ROCHON-DUVIGNEAUD (1943, zitiert nach PEARSON 1972) hat in histologischen Untersuchungen die Retinadicke verschiedener Vogelarten vermessen. Passeriformes und Falconiformes weisen hierbei die dicksten Retinae auf. Die Retina der Eulen ist dagegen recht dünn. Bei der Waldohreule (*Asio otus*) beträgt die Dicke z. B. 252 µm, beim Waldkauz (*Strix aluco*) 306 µm und beim Uhu (*Bubo bubo*) 360 µm. Wesentlich dicker sind die Retinae des Sperbers (*Accipiter nisus*) mit 400 µm, des Mäusebussardes (*Buteo buteo*) mit 480 µm und des Turmfalkens (*Falco tinnunculus*) mit 450 µm. Die dickste Retina weist der Schlangenadler (*Circaetus gallicus*) mit 630 µm auf. Weitere histologische Untersuchungen, z. B. beim Haussperling (SLONAKER 1918) und bei tag- und nachtaktiven Eulen (LISNEY et al. 2012) oder mittels optischer Kohärenztomografie bei verschiedenen Greifvogelspezies (VELASCO GALLEGO 2015) beschreiben ebenfalls interspeziespezifische Unterschiede in der Dicke der Retinaschichten und der Gesamtretina sowie eine intraspezifische Variation der Retinadicke in Abhängigkeit von der Lokalisation im Auge.

Die hohe Auflösungskraft des Vogelauges basiert auf dem im großen Vogelauge relativ großen Bild, das auf der Retina abgebildet wird, auf der Dichte der Zapfen und auf dem hohen Verhältnis von optischen Nervenfasern zu visuellen Zellen (FRANZ 1934). Die insgesamt sehr hohe **Sehschärfe** der Vögel entsteht durch eine beinahe 1:1-Verschaltung der Neuronen. Fast jeder einzelne Zapfen ist demnach

mit einer bipolaren Zellen und einer Ganglienzelle verknüpft (geringe Konvergenz). In der Peripherie der Retina liegt hingegen eine hohe Konvergenz vor, das heißt, mehrere Zapfen konvergieren mit nur einer Ganglienzelle. (DUKE-ELDER 1958 a, MEYER 1986, REESE et al. 2009, WALLS 1963 a). Eine hohe **Sensitivität** ergibt sich durch die Verschaltung vieler Stäbchen mit einer einzelnen Ganglienzelle (DUKE-ELDER 1958 a, REESE et al. 2009).

Bei tagaktiven Vogelarten sind die Stäbchen peripher angeordnet (MARTIN 1985, MEYER 1986; OEHME 1964). In der Retina dieser Spezies dominieren die Zapfen, sie haben deshalb auch mehr bipolare Zellen. Die innere Körnerschicht ist daher stärker ausgeprägt. Nachtaktive Arten haben mehr Stäbchen, die äußere Körnerschicht ist daher prägnanter ausgebildet als die innere (SILMAN 1973, zitiert nach KIAMA et al. 2001).

### 1.6.1. Areae und Foveae

#### Areae

Eine **Area retina** ist ein leicht erhabener retinaler Bereich, in dem durch einen speziellen Aufbau der Netzhaut das lokale Auflösungsvermögen ansteigt (MEYER 1986). Im Bereich der Area entsteht bei Vertebraten eine Verdickung der äußeren Körnerschicht (Stratum nucleare externum), der inneren Körnerschicht (Stratum nucleare internum), der Ganglienzellschicht (Stratum ganglionare) und der Nervenfaserschicht (Stratum neurofibrarum) (WALLS 1963 a). Infolge einer Erhöhung der Dichte an Rezeptorzellen liegen im Bereich der Area schlankere, dicht angeordnete Zapfen. Verbunden mit der Dichtezunahme ist ein Anstieg sowohl der bipolaren Zellen als auch der Ganglienzellen, so dass hier eine besonders geringe Summation vorliegt. Im Optimum kann das Verhältnis von Rezeptor- zu Ganglienzelle bis zu 1:1 vorliegen. Das bedeutet, dass jede Rezeptorzelle, verschaltet mit einer einzelnen ableitenden Nervenzelle im N. opticus, über eine direkte Verbindung in das Gehirn verfügt (DUKE-ELDER 1958 a, PUMPHREY 1948, REESE et al. 2009, WALLS 1963 a).

Eine Area entspricht daher dem sogenannten „gelben Fleck“, Macula lutea, beim Menschen. Aber nur wenn eine Area vollständig pigmentiert und die sie umgebende Retina farblos ist, kann sie als „gelber Fleck“ bezeichnet werden (PUMPHREY 1948, WALLS 1963 b, WOOD 1917). Dieser Begriff stammt aus der menschlichen Anatomie und kann aufgrund der fehlenden, gelben Pigmentierung als solcher nicht in der Ornithoophthalmologie verwendet werden.

## Foveae

Bedingt durch die zunehmende Verdickung der Schichten und Erhöhung der Rezeptorzahl im Bereich der Area wölbt sich die äußere Grenzmembran zunehmend konvexer in den Glaskörper und verursacht dadurch eine Lichtkonvergenz an der inneren Grenzmembran. Als Ausgleich der Konvexität der Retina entsteht die Fovea. Areae existieren auch ohne Foveae, eine Fovea wird jedoch immer von einer Area umgeben (WALLS 1963 b).

Die Fovea ist also eine Einsenkung innerhalb einer Area und entsteht durch die seitliche Verdrängung aller Schichten mit Ausnahme der Rezeptorzellen enthaltenden Schicht und des retinalen Pigmentepithels (PUMPHREY 1948, SLONAKER 1918). SLONAKER (1918) beschreibt bei seinen Untersuchungen zur Anatomie des Vogelauges beim Haussperling (*Passer domesticus*) darüber hinaus eine sich verdickende Fotorezeptorschicht im Zentrum der Fovea, welche vermutlich durch eine Verlängerung und schräge Anordnung der Zapfen bedingt ist. Innerhalb der Fovea kann die Zapfendichte diejenige der Area sogar noch überschreiten (PUMPHREY 1948), so dass die Sehschärfe bei einigen Habichtartigen und beim Adler ca. 8 Mal stärker ist als die des Menschen. Beim Mäusebussard (*Buteo buteo*) liegen in der Fovea beispielsweise eine Million Zapfen pro Quadrat-Millimeter (DUKE-ELDER 1958 b, PUMPHREY 1948).

Stäbchen sind im Bereich der Area kaum und in der Fovea gar nicht vorhanden. Die Ausnahme hiervon bilden die nachtaktiven Eulenvögel (PUMPHREY 1948). Nicht selten ist am tiefsten Punkt der Fovea eine noch kleinere Einsenkung ausgebildet, die **Foveola** (WOOD 1917).

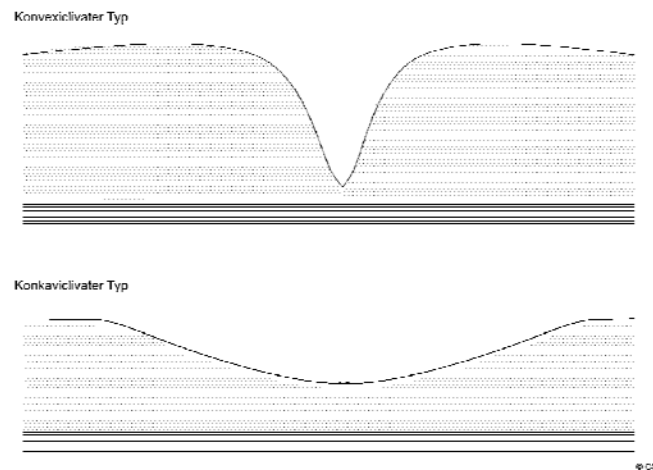
## Gestalt der Fovea

Je tiefer die Einsenkung im Vergleich zur normalen Höhe der Retina ist, umso höher ist der „Hügel“, der durch die Verdrängung rund um die Fovea entstanden ist und den man als die **circumfoveale Eminenz** bezeichnet. Es entsteht eine kontinuierliche Krümmung des höchsten Punktes der Eminenz bis hinab zum tiefsten Punkt in der Fovea. Da diese Wölbung an einen Abhang erinnert, wird sie **Clivus** genannt (clivus, lat. = Hügel, Abhang).

Je nach Gestalt der Fovea kann man einen **konvexiclivaten Typ** (tiefe Einsenkung, konvexe Krümmung, trichter- bzw. kraterförmig) und **einen konkaviclivaten Typ** (flache Einsenkung, eher konkav, teller- bzw. grubenförmig) unterscheiden (Abb. 4). Diverse Variationen dieser beiden Typen kommen vor (PUMPHREY 1948, WALLS 1963 b), die Formen unterscheiden sich zwischen den Spezies



(FITE&ROSENFELD-WESSELS 1975).



**Abbildung 4:** Foveatypen, konvexicliver Typ und konkavicliver Typ, modifiziert nach PUMPHREY 1948.

### Einteilung der Areae in Klassen

Anhand Lage und Form lassen sich die Areae in mindestens 6 Gruppen klassifizieren (DUKE-ELDER 1958 a, WOOD 1917). Es kommen Variationen der verschiedenen Klassen vor (WOOD 1917). Die unterschiedlichen Ausprägungen der Areae scheinen in Beziehung zu den Lebensumständen der Vögel zu stehen:

#### Die afoveale Area

Diese Form wurde als eine rundliche Area centralis rotunda bei domestizierten Vögeln nachgewiesen, z. B. beim Haushuhn (*Gallus gallus*), und bei Vogelarten, die sich ihre Nahrung auf dem Boden suchen. Sie liegt annähernd zentral, manchmal auch leicht temporal oder nasal. Meist ist die Area nur schwach angelegt, kann aber auch nicht vorhanden sein. Bei einigen Seevögeln ist sie gut ausgeprägt. Eine Fovea wird innerhalb der Area nicht ausgebildet.

#### Die zentrale, monofoveale Area

Bei den meisten Vogelarten liegt eine große, einzelne Area vor, die eine gut ausgeprägte, zentral situierte Fovea umgibt. Sie liegt nahe der optischen Achse (DUKE-ELDER 1958 a, PUMPHREY 1948, REESE et al. 2009, WOOD 1917).

#### Die temporale, monofoveale Area

Diese unter anderem bei Eulenvögeln vorkommende runde Area liegt im temporalen Quadranten des Fundus. In ihr kann eine flache Fovea ausgebildet sein.

Der Mauersegler (*Apus apus*) weist zusätzlich eine leicht angedeutete zentrale Area auf.

### **Die streifenförmige, monofoveale Area (Infula-monofoveale Area)**

Einige Wasser- und Ufervögeln und Vogelarten, die sich ihre Nahrung auf dem Boden suchen, wie z. B. Gänse, Flamingos und Strauße, weisen eine horizontale, streifenförmige Area centralis horizontalis (Infula) auf, mit einer runden oder ovalen Fovea centralis (REESE et al. 2009, WOOD 1917). Vermutlich verringert die Infula die Notwendigkeit von Augenbewegungen (WALLS 1963 b) und der Vogel kann effektiv den Horizont fixieren. Die Sensitivität für sich vertikale bewegende Objekte ist dadurch gesteigert (PUMPHREY 1948).

### **Bifoveale Areae**

Vögel, die ihre Nahrung hauptsächlich im Flug erlangen, wie z. B. Kolibris, sind mit zwei Areae und Foveae ausgestattet, die beide ungefähr gleich weit vom Eintritt des Sehnervenkopfes entfernt liegen. Die tief eingesenkte Hauptfovea ist zentral gelegen und wird von einer temporal liegenden, flacheren Fovea ergänzt (Abb. 5).

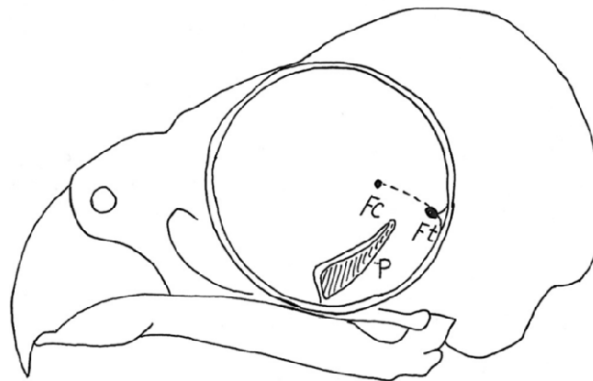
### **Streifenförmige, bifoveale Areae**

Diese Form der Area kommt vor allem bei Beutegreifern wie Adlern, Falken und Schwalben vor. Zwei runde Areae enthalten je eine Fovea und sind über eine Infula verbunden. Die zentrale Fovea ist tiefer und deutlicher ausgeprägt als die etwas flachere temporale Fovea. Eine Ausnahme sind Adler, bei denen die Fovea temporalis stärker ausgebildet ist. Als Variante kommen bei der Fluss-Seeschwalbe (*Sterna hirundo*) auch zwei Areae mit jeweils einer Fovea vor, jedoch liegt nur die Fovea centralis innerhalb der Infula. Die Fovea temporalis liegt separiert ein kleines Stück oberhalb davon (DUKE-ELDER 1958 a). WOOD (1917) beschreibt sogar bis zu drei angelegte Foveae bei Seeschwalben- und Schwalbenarten.

### **Aufbau und Maße der Foveae**

Kraterförmige, tiefe Foveae finden sich vor allem bei Vogelspezies, die schnelle Bewegungen erfassen müssen (Greifvögel, Schwalben, etc.) (BEZZEL&PRINZINGER 1990). Bei bifovealen Vogelarten ist die zentrale Fovea meistens besser differenziert (sie ist tiefer und breiter ausgeprägt). Sie ist erhaben und hat eine höhere Dichte an Fotorezeptorkernen und Ganglienzellen als die F. temporalis (FITE&ROSENFELD-WESSELS 1975) und weist somit die höhere Auflösung auf. Dennoch kann ihre Gestalt speziesabhängig variieren, so ist der „Trichter“ beim Turmfalken (*Falco tinnunculus*) im Vergleich zum Mäusebussard (*Buteo buteo*) steiler und spitzer ausgebildet (s. u.: Funktionsweise und Aufgaben

der Foveae.) (OEHME 1964). Die temporale Fovea ist meistens flacher, aber dennoch oft vom konvexiclivaten Typ (FITE&ROSENFELD-WESSELS 1975). Der Clivus ist meist weniger steil (PUMPHREY 1961).



**Abbildung 5:** Anordnung der Foveae im Auge eines Greifvogels, modifiziert nach OEHME 1964: F. centralis (Fc), Pecten oculi (P) und F. temporalis (Ft).

Die Weite der Fovea scheint negativ mit der Augengröße zu korrelieren: Histologische Untersuchungen (FITE&ROSENFELD-WESSELS 1975) an verschiedenen Wildvögeln zeigte, dass Spezies mit kleiner retinaler Ausdehnung eine im Verhältnis zur totalen Länge der Retina weitere Fovea aufwiesen als z. B. Beutegreifer. Diese wiesen die größte retinale Ausdehnung auf und eine proportional kleinere foveale Weite in beiden Foveae. Die Weite der Fovea beim Greifvogel betrug beim Sperber 540  $\mu\text{m}$  in der F. centralis und 402  $\mu\text{m}$  in der F. temporalis, beim Rotschwanzbussard 660  $\mu\text{m}$  und 402  $\mu\text{m}$ . Beim Virginia-Uhu, der nur eine F. temporalis besitzt, betrug die Weite 750  $\mu\text{m}$ . Die Tiefe der F. centralis und F. temporalis im Verhältnis zur parafovealen Eminenz betrug beim Sperber 70 % bzw. 52 %, beim Rotschwanzbussard 56 % und 30 % und beim Virginia-Uhu 48 %. Eine Abhängigkeit der Tiefe von der Augengröße schien nicht vorzuliegen (FITE&ROSENFELD-WESSELS 1975).

### **Funktionsweise und Aufgaben der Foveae**

Zur Funktionsweise der Fovea gibt es verschiedene Theorien (HARKNESS 1978, LOCKET 1992). Sowohl über einen erleichterten Einfall des Lichtes auf die Fotorezeptoren und damit einhergehend eine bessere Bilddarstellung auf der Retina (PUMPHREY 1948, WALLS 1963 b), als auch über einen Bildvergrößerungseffekt durch Refraktion des Lichtes am Clivus der Fovea (WALLS 1963 b) wurde diskutiert. PUMPHREY (1948) schlug eine weitere interessante Theorie vor: Eine tiefe, konvexe Fovea verursacht durch ihre Form und Anordnung der Rezeptoren eine

abrupte Verzerrung eines über die „normale“ Retina wandernden Lichtstrahles. Die trichterartige Form könnte daher also auch als ein Mechanismus interpretiert werden, der erstens eine dauerhafte, genaue Fixierung eines entfernten Objektes durch die Linsenwirkung der konvexen Wände zulässt, und zweitens für die sensitive Wahrnehmung der Bewegungen dieses Objektes im Augenwinkel genutzt werden könnte (OEHME 1964, PUMPHREY 1948, PUMPHREY 1961). Die Verzerrung ist umso größer, je steiler der Clivus verläuft und wird vor allem von Spezies mit kleinen Augen benötigt, da diese nur ein kleines Retinabild haben. Vermutlich liegt daher beim Turmfalken im Vergleich zum Mäusebussard auch der spitzere Trichter vor. Bei der *F. temporalis* muss ebenfalls von einem Verzerrungseffekt ausgegangen werden, jedoch scheint dieser nicht so entscheidend zu sein wie der für das monokulare Fixieren durch die *F. centralis*. Dies spiegelt sich auch in ihrer ebenfalls trichterförmigen, aber weniger stark ausgeprägten Gestalt wider (OEHME 1964).

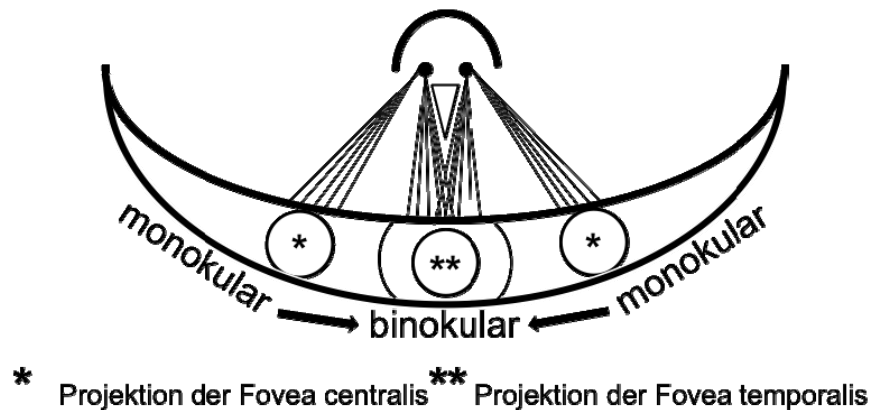
Eine zentral oder nasal gelegene Fovea dient dem lateralen, monokularen Sehen. Bei vielen Vögeln, deren Augen mehr seitlich als vorwärts ausgerichtet sind, ist nur sie ausgebildet (WALLS 1963 b).

Vögel, die über eine temporale, weit außen in der Peripherie der Retina liegende Fovea verfügen (z. B. Eulen und bifoveale Arten), haben eine geradeaus gerichtete Sehachse. In Zusammenarbeit beider Augen dient sie der Fixierung eines nahen Objektes vor dem Vogel.

Bei einigen Sperlingsvögeln und Beutegreifern sind sowohl eine zentrale als auch eine zweite, temporale Fovea ausgebildet (Abb. 5). Selten jedoch ist letztere ebenso gut entwickelt (DUKE-ELDER 1958 b, FITE&ROSENFELD-WESSELS 1975, MARTIN 1985, MEYER 1986, WALLS 1963 c, WOOD 1917). Die Foveae centrales sind bei diesen Vögeln lateral ausgerichtet und dienen der monokularen Überwachung der Umgebung durch Wahrnehmung entfernter, sich bewogender Objekte und der Vermeidung von Hindernissen, während die Foveae temporales geradeaus gerichtet sein können. Sie lassen ein binokulares Bild entstehen. Dies dient dem Einschätzen von Distanzen und Geschwindigkeiten eines Objektes. So können gleichzeitig drei Punkte fixiert werden (Abb. 6) (DUKE-ELDER 1958 b, MARTIN 1985, TUCKER 2000, WALLS 1963 c), man nennt dies *visuelle Trident* (MURPHY 1984).

Es kann beobachtet werden, dass Vögel im Flug ihren Kopf kippen um monokular mit der Fovea centralis entfernte Objekte auf dem Boden zu sehen (DUKE-ELDER 1958 b, TUCKER 2000).

Auch eine Eule kann, obwohl sie nicht über die visuelle Trident verfügt, Distanzen einschätzen, da sie die Foveae temporales für das binokulare Sehen nutzt und zusätzlich durch Einsatz ihres hochentwickelten Gehörs sicher genug potentiellen Hindernissen ausweichen kann (WALLS 1963 c).



© CS

**Abbildung 6:** Visuelle Trident, modifiziert nach WALLS 1963. Darstellung der Projektionen der Foveae und dem daraus resultierenden monokularen und binokularen Sehen.

### 1.6.2. Fundus – Augenhintergrund

Betrachtet man während der Ophthalmoskopie den Fundusbereich, so stellen sich der Pecten oculi, die Retina, der Nervus opticus, die Choroidea und choroidale Blutgefäße sowie die Areae retinae dar. Verteilt im Fundus sind gelbliche, gelbweiße, braune oder graue pigmentierte Punkte zu erkennen. Es handelt sich hierbei um farbige Öltropfen. Nervenfasern im Fundus sind kaum sichtbar bei nachtaktiven Vögeln. Bei tagaktiven Arten können sie jedoch von der Sehnervenscheibe über eine kleine Strecke in den Fundus ausstrahlen (DUKE-ELDER 1958 a).

### 1.6.3. Nervus opticus – Sehnerv

Der Nervus opticus tritt als ein gerader Strang aus dem Foramen opticum der Orbita aus und verläuft zum Augenhintersegment. Da die Bulbi sehr eng in der Augenhöhle liegen und somit kaum Augenbewegungen möglich sind, verläuft er nur über eine sehr kurze Distanz. Er wird ummantelt von harter und weicher Hirnhaut, wobei die Pia mater in den Strang hineinzieht und ihn in einzelne Bündel unterteilt (REESE et al. 2009, WOOD 1917). Als ovaler bis ovoider Sehnervenkopf tritt er in den ventro-temporalen Fundus ein und verläuft entlang der foetalen Choroideaspalte. Er wird fast vollständig verdeckt durch den Augenfächer, so dass während der Ophthalmoskopie nur ein schmaler, weißlich-gelber Grenzbereich rund um die Basis des Pecten oculi zu erkennen ist (DUKE-ELDER 1958 a, KORBEL 1994, REESE et al. 2009, WOOD 1917). Manchmal strahlen radiär vom Sehnervenkopf ausgehend

vereinzelte Nervenfasern in den Fundus aus, wie z. B. in einem kleinen Bereich beim Turmfalken. Da sie jedoch die retinale Wahrnehmung beeinflussen können, kommen sie bei Arten, die ein besonders scharfes Sehen benötigen, kaum oder gar nicht vor. Bei nachtaktiven Arten sind sie z. B. absent. Weiterhin wurden sie bei keinem der Flachbrustvögel festgestellt (WOOD 1917).

Als Besonderheit des Vogels kreuzen sich alle Fasern der beiden Nervi optici im Chiasma opticum, so dass kein konsensueller Pupillenreflex auslösbar ist (KORBEL 2000, REESE et al. 2009).

#### **1.6.4. Pecten oculi – Augenfächer**

Eine besondere Einrichtung des Vogelauges ist der Augenfächer, Pecten oculi. Als schwarze, longitudinale, choroidale Projektion mesodermalen und neuroektodermalen Ursprungs mit undulierenden Rändern ragt er ventro-temporal im Bereich des Sehnervenkopfes in den Glaskörper hinein, die Spitze in Richtung Linse zeigend (KERN&COLITZ 2013, KORBEL 1994, MEYER 1986, PEARSON 1972, WALLS 1963 a, WOOD 1917). Die Papille verdeckt er zu großen Teilen (REESE et al. 2009). Bindegewebe bildet das akkordeonähnlich gefaltete Stützgerüst aus. Ein ausgeklügeltes Blutgefäßsystem und stark pigmentiertes Gewebe mit Melaningranula sind darin eingelagert (MARTIN 1985, PEARSON 1972, REESE et al. 2009). Nerven- und Muskelfasern sind nicht enthalten. Nach außen schließt eine Membran ab, über die eine enge Verbindung zum Glaskörper besteht (MEYER 1986, WOOD 1917). An der Spitze des Augenfächers ist eine Art Brücke ausgebildet, die den hoch vaskulären Körper stabilisiert, sie fehlt jedoch bei Eulen (DUKE-ELDER 1958 a, MARTIN 1985). In jedes Querblatt des Augenfächers ziehen Arteriolen und Venolen, die über kollaterale Kapillaren verbunden sind (MARTIN 1985, PEARSON 1972, WALLS 1963 a). Durch einen speziellen Aufbau der Kapillarendothelien kann ein aktiver, transepithelialer Stofftransport in den Glaskörper hinein bis zur Retina erfolgen. Begünstigt wird diese Verteilung durch rhythmische Kontraktionen der extraokulären Augenmuskeln, den sogenannten oszillatorischen Augenbewegungen, und dem damit verbundenen Nachschwingen des Augenfächers im verhältnismäßig dünnflüssigen Vitreus (REESE et al 2009, WOOD 1917).

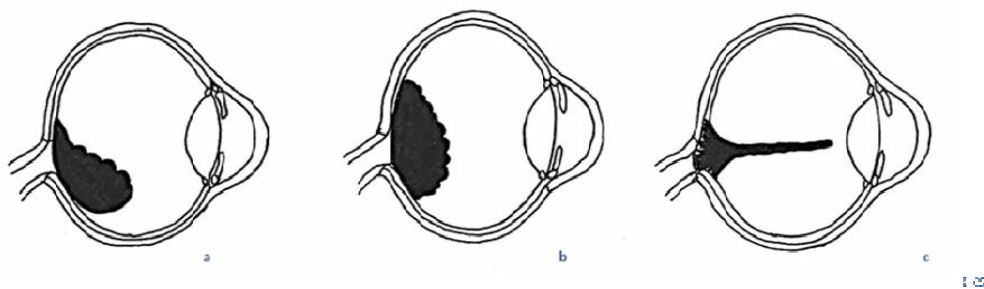
Der Pecten oculi ist eine dem Vogel ganz eigene Einrichtung, die in ähnlicher, einfacherer Form als Conus papillaris nur beim Reptil auftritt (PEARSON 1972, REESE et al. 2009). Interspezifische Variationen bestehen sowohl in der Größe und Form als auch in der Länge, Weite, Gestalt, Anzahl und Anordnung der Falten und im Ausmaß der Pigmentierung (MARTIN 1985). Man kann den Augenfächer,

abhängig von seiner Gestalt (Abb. 7), in drei Typen einordnen:

- Faltentyp (*Pecten plicatus oculi*)
- Flügel- oder Fahnentyp (*Pecten vanellus oculi*)
- Konustyp (*Pecten conicus oculi*)

Der Faltentyp besteht aus engen vertikale Falten, die an seiner Spitze zur Brücke verwachsen sind. Er ist bei Kielbrustvögeln (Überbegriff aller flugfähigen Vögel, die für den Ansatz der Flugmuskeln einen Kiel am Brustbein haben. Das Gegenstück hierzu sind die Flachbrustvögel, also die Laufvögel) zu finden. Der Fahnentyp weist 25 bis 30 vertikale Flügel auf, die an einer zentralen, vertikalen Lamina befestigt sind. Er kommt bei Flachbrustvögeln wie Strauß, Emu und Nandu vor (MARTIN 1985, MEYER 1986, REESE et al. 2009).

Der Konustyp besitzt weder Falten noch Flügel. Er ist gänzlich ungegliedert und dehnt sich weit aus, bis fast zur Linse. Er kommt beim Kiwi vor (MARTIN 1985).



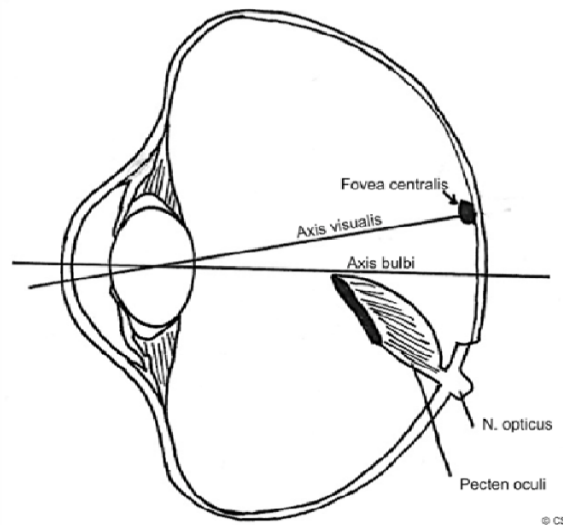
**Abbildung 7:** Typen des Pecten oculi, modifiziert nach WOOD 1917: a) *Pecten plicatus oculi*, b) *Pecten vanellus oculi*, c) *Pecten conicus oculi*

Die Funktion des Pecten oculi ist nach wie vor noch nicht eindeutig geklärt (KIAMA et al. 2001, KORBEL 1994). Es sind insgesamt über 30 Theorien aufgestellt worden, hinsichtlich der vaskulären Versorgung des Fächers als auch eines möglichen Schattenwurfs und seine Auswirkungen auf die Retina (MARTIN 1985, MEYER 1986, PEARSON 1972, REESE et al. 2009, WALLS 1963 a). Die Rolle des pigmentierten Gewebes ist bisher noch unklar (KIAMA et al. 2001). Die starke Vaskularisation und die einzigartige Morphologie des Kapillarendothels (mikrovilliähnlicher Aufbau) lassen jedoch eine Funktion bei der Versorgung der inneren Schichten der avaskulären Retina und des Vitreus mit Nährstoffen vermuten (KERN&COLITZ 2013, KIAMA et al. 2001, MARTIN 1985, PEARSON 1972, REESE et al. 2009). Diese Theorie wird durch Untersuchungen von KORBEL unterstützt (KORBEL et al. 1999; KORBEL et al. 2000). Er konnte durch fluoreszenzangiografische Untersuchungen zeigen, dass Stoffe aus dem Pecten

oculi ausgestoßen und im Glaskörper verteilt werden.

### 1.7. Augenachsen

Am Auge lassen sich zwei verschiedene Achsen finden (Abb. 8). Die **Axis bulbi**, auch Axis opticus genannt, ist die Verbindungslinie zwischen dem zentralen Punkt der Kornea und der der Linse. Die **Axis visualis**, Axis visus, ist die Verbindungslinie von der Fovea centralis ausgehend durch das Zentrum der Linse (s. auch Abb. 1), sie stellt die Achse des schärfsten Sehens dar (EVANS 1979).



**Abbildung 8:** Darstellung der Augenachsen, Axis bulbi und Axis visualis, modifiziert nach EVANS 1979

## 2. Pathologische Veränderungen des Fundus

Verschiedene Studien haben sich bisher mit dem Auftreten von Retinopathien bei Zoo-, Wild- und Greifvögeln beschäftigt (BUYUKMIHCI 1985, COUSQUER 2005, KORBEL 1994, KORBEL 1999, KORBEL 2000, KORBEL et al. 1997 a, MURPHY 1982, RAVELHOFER 1996, WILLIAMS et al. 2006).

Augenerkrankungen kommen bei Vogelpatienten relativ häufig vor. So wurden bei knapp 8 % von 1883 in eine Studie einbezogenen Vögeln (inkl. 204 verunfallten Wildgreifvögeln) pathologische Veränderungen des Auges festgestellt. Am meisten waren hiervon die Wildvögel betroffen (12 %), angeführt von den Accipitriformes (26 %), Strigiformes (20 %) und Falconiformes (20 %). Ähnlich sah die Verteilung bei falknerisch gehaltenen Vögeln aus, mit etwas niedrigeren Inzidenzen (KORBEL 2000, KORBEL 2014).

Auffallend häufig, nämlich bei 22 % der Vögel mit Augenveränderungen, traten



Erkrankungen des *hinteren* Augensegmentes auf (BUYUKMIHCI 1985, COUSQUER 2005, KORBEL 2000, MURPHY et al. 1982, WILLIAMS et al. 2006). Bei Wildgreifvögeln sind diese wesentlich häufiger zu finden als bei in Gefangenschaft gehaltenen Spezies. Letztere leiden vor allem unter infektiösen Fundopathien. Hauptursache für Fundusveränderungen bei Wildgreifvögeln sind Traumata (88 %) (BUYUKMIHCI 1985, KORBEL 2000, MURPHY et al. 1982). Sie entstehen oft durch Kollisionen mit Autos, durch Schüsse und darauffolgende Aufprallverletzungen (BUYUKMIHCI 1985, WILLIAMS et al. 2006), oder durch Verbrennungen (COUSQUER 2005, MURPHY et al. 1982). Bemerkenswert ist, dass bei verunfallten Tieren häufig keine oder kaum erkennbare Veränderungen des vorderen Augensegmentes vorliegen. Dies unterstreicht die Bedeutung einer vollständigen ophthalmoskopischen Untersuchung (KORBEL 1994). Traumata verursachen zu 80 % Glaskörperblutungen, v.a. ausgehend vom Pecten oculi. Sie treten meist unilateral auf (KORBEL 2000). Dies gilt sowohl für Zoo- als auch für Wildvögel (KORBEL et al 1997a).

### **Ätiologie der Funduserkrankungen**

Augenerkrankungen können einerseits erworben werden, andererseits hereditär bedingt sein. Sie werden unterteilt nach unbekannter, infektiöser (viral, bakteriell, mykotisch, parasitär) und nicht-infektiöser Ätiologie (Traumata, Stoffwechselerkrankungen, Vitaminmangel, Vergiftungen). Sie können lokal oder beim Vogel auch sehr häufig systemisch bedingt auftreten, mit okularer Manifestation (KORBEL 1991, KORBEL 1992 a, KORBEL 1992 b, SEIDEL 1988).

### **Veränderungen des Fundus**

Da die Retina und die Choroidea eng in Verbindung stehen, treten isolierte Erkrankungen einzelner Schichten nur selten auf.

Sämtliche Erkrankungen, die den Bulbus, die Augenhäute (v.a. die Uvea) oder andere Strukturen des Auges betreffen, wie z. B. Rupturen oder intraokuläre Fibrosen, können auch eine pathologische Auswirkung auf die Retina haben. So kann z. B. eine vorliegende Mikrophthalmie zu einer Dysplasie oder auch zu einer Zystenbildung in der Netzhaut führen (BUYUKMIHCI 1985, BUYUKMIHCI et al. 1988). Die Physiologie der Retina beeinträchtigen können auch Panophthalmien durch Bakterien wie Salmonellen oder Mykobakterien (GYLSTORFF&GRIMM 1998, KORBEL 1992 a, KORBEL et al. 1997 b), Pilze, Viren wie z. B. Avipox-Viren (KORBEL 1992 b), Verletzungen, eine linseninduzierte Uveitis (LIU)/Endophthalmitis bis hin zur phakoklastischen Uveitis (KORBEL 2001), Waldkauzkeratitis (KORBEL 1991), Intoxikationen (SEIDEL 1988) oder

(intraokuläre) Neoplasien (KERN&COLITZ 2013, KORBEL 1992 b, WILLIAMS 1994).

Pigmentierte Läsionen sind Hinweise auf chronische Prozesse (MURPHY 1984). Auch hierdurch kann das Sehen stark beeinträchtigt werden oder nicht mehr vorhanden sein (BUYUKMIHCI 1985).

Läsionen am **Pecten oculi**, wie z. B. Blutungen (KORBEL 2000), Entzündungen, Degenerationen oder Zerreißungen (BUYUKMIHCI 1985, BUYUKMIHCI et al. 1988) und Veränderungen an der **Choroidea**, wie Zerreißung, Degeneration und Entzündung (BUYUKMIHCI 1985), können ebenfalls Auswirkungen auf die Retina haben (SEIDEL 1988).

**Chorioretinitiden**, also die gemeinsame Entzündung von Choroidea und Retina, kommen beim Greifvogel sehr häufig vor (WOOD 1917). Sie können durch Traumata bedingt sein, häufig gefolgt von Zerreißungen der Aderhaut oder Retinaverletzungen, die zu Blindheit führen (MURPHY 1984, SEIDEL 1988, WILLIAMS et al. 2006). Weitere Ursachen von Chorioretinitiden können systemische Infektionen sein. Als bakterielle Ursache kommt eine Infektion mit Salmonellen (*Salmonella Typhimurium* var. *Copenhagen*) oder Mykobakterien in Frage, viral die Infektion mit Paramyxo- oder Herpesviren (KORBEL 2000, KORBEL et al. 1997 b, RAVELHOFER 1996). Eine sowohl für Greifvögel als auch für den Menschen in den USA bedeutsame Viruserkrankung mit Augenbeteiligung, die sich derzeit auch in Europa ausbreitet, ist die Infektion mit dem West Nile Virus. So wurden in einer Studie in den USA während der Hauptaktivitätszeit der Überträgermücken (Mai bis November) mehrere Vögel ophthalmoskopisch untersucht. Hierbei waren im Fundus aktive, chorioretinitische Läsionen (erhaben, weißlich, undeutlich abgegrenzt), z. T. Glaskörperblutungen, Pektinitis (gekennzeichnet durch Anlagerung von fibrinösen Material an den Augenfächer) und multifokale chorioretinitische Narben erkennbar. Diese waren flach und scharf abgegrenzt, einhergehend mit einer Verdünnung der Retina (Blässe) oder mit Pigment-Verklumpungen. Weiterhin waren flache, sehr helle, abgegrenzte, eingezogene Bereiche sichtbar, die vermutlich mineralienhaltig waren. Histologisch wurde eine unorganisierte Anordnung des RPEs durch Verlust an RPE-Zellen als auch deren Fortsätze beobachtet, so dass kein Ineinandergreifen zwischen die Fotorezeptorzellen mehr möglich war und die RPE-Zellen kleine Anhäufungen formten. Zwischen Retina und Choroidea war eine Spaltbildung erkennbar. Außerdem lag eine retinale Nekrose der inneren und der äußeren Körnerschicht vor, sowie eine teilweise alle Schichten der Retina betreffende Atrophie, die auf Bereiche direkt oberhalb entzündeter Choroidearegionen begrenzt war. Von den

Veränderungen waren alle drei Neuronen der Retina und das Pigmentepithel betroffen. Die mineralisierten Bereiche konnten nicht hinreichend abgeklärt werden (PAULI et al. 2007).

Eine parasitäre Chorioretinitis kann z. B. durch Toxoplasmose verursacht werden (KORBEL 2000). Ophthalmoskopisch ist im Fundus eine Chorioretinitis maculosa mit Nekrosen und Pigmenteinlagerungen zu sehen (KORBEL 1992 a). Bei einem Weißkopfsееadler wurde außerdem von einer disseminierten Milbeninfektion mit Streuung in ein Auge berichtet. Die Milben konnten in der Retina nachgewiesen werden und verursachten dort multiple, geschlängelte chorioretinitische Atrophien. Sie waren gekennzeichnet durch multifokale, gut begrenzte Bereiche mit degenerierten äußeren Retinaschichten, Retinaablösung, hypertrophen und verklumpten RPE-Zellen und frakturierten oder nicht mehr vorhandenen Fotorezeptoren (BUENO-PADILLA et al. 2012).

Chorioretinitische Läsionen beim Geflügel können ebenfalls durch *Toxoplasma gondii* verursacht werden oder bei der aviären Enzephalomyelitis entstehen, verursacht durch Picornaviren. Bei Enten können sie durch Mangelernährung bedingt sein (GYLSTORFF&GRIMM 1998, MURPHY 1984).

### **Veränderungen der Retina**

Veränderungen der Retina können fokal begrenzt sein oder auch die gesamte Retina betreffen. Sie äußern sich in Form von Entzündungen, Blutungen, Degenerationen der Retina mit oder ohne Degeneration des Sehnervs, Verklumpung des Pigmentepithels, Ablösungen der Retina (BUYUKMIHCI 1985, SEIDEL 1988) mit oder ohne assoziierter choroidaler Blutung (BUYUKMIHCI et al. 1988, MURPHY 1984), Narben (MURPHY 1984), aber auch in Form von Nekrose, Ödem und Zerreißen der Retina (BUYUKMIHCI 1985). Es können sämtliche Schichten betroffen sein (SEIDEL 1988).

#### *Angeborene Anomalien*

Angeborene Veränderungen treten in Zusammenhang mit spaltförmigen Missbildungen der Uvea auf. Solche Kolombome sind selten und können vom Greifvogel, bei unilateralem Auftreten, gut kompensiert werden. Sie verursachen meist eine Aplasie der Retina. Immunassoziierte Veränderungen sind beim Haushuhn berichtet worden. So kommt es aufgrund einer Autoimmunreaktion auf die Pigmente der Choroidea zu einer Atrophie des Pigmentepithels und der Fotorezeptoren. Die Erkrankung ist genetisch bedingt (SEIDEL 1988). Bei Zuchtfasanen sind retinale Ablationen mit nachfolgender Erblindung bekannt

(GYLSTORFF&GRIMM 1998), bei in Gefangenschaft erbrüteten Uhus (*Bubo bubo*) und beim Präriefalken (*Hierofalco mexicanus*) wurden angeborene Retinadysplasien festgestellt (GYLSTORFF&GRIMM 1998). Sie hatten meist die Form von Falten oder Rosetten. Bei der erblich bedingten Retina-Dysplasie des Falkens bildete sich eine Zyste, die von Reihen an Zellkernen umgeben wurde und Fibrillen-ähnliches Material, vermutlich die Fortsätze von Fotorezeptoren, enthielt. Außerdem wurde eine retinale Gliose beobachtet. Die sehr seltene Erkrankung äußerte sich in Form von Blindheit (DUKES & FOX 1983).

#### *Erworbene Erkrankungen mit nicht-infektiöser Ätiologie*

Fundusveränderungen, wie Sehnerv-Cupping, Degeneration des Pecten oculi und Ablösung der Retina, Ausdünnung der Netzhaut u. v. m., sind bei durchgehend unter Kunstlicht gehaltenem Geflügel bekannt (LAUBER&MCGINNIS 1966). Veränderungen werden auch im Bereich der Forschung gezielt genetisch oder chemisch produziert, um Hühner-Augenmodelle für die Humanmedizin zu erhalten. So gibt es z. B. ein zapfenreiches Retinal Detachment (Retinaablösungs-) Modell (CEBULLA et al. 2012) oder Modelle für Retinale Dysplasie und Degeneration (HUANG et al. 1998, MCKIBBIN et al. 2014).

WILLIAMS et al. (2006) und Cousquer (2005) untersuchten verunfallte Waldkäuze (*Strix aluco*) hinsichtlich okularer Veränderungen und beschrieben sowohl akute als auch chronische Veränderungen. Am häufigsten traten präretinale Membranen, Verklebungen, Retinarrupturen, Retinadegeneration, präretinale Fibrosen und gezackte Retinaläsionen auf. Diese Vernarbungen wurden hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit mit Toxoplasmose-bedingten Veränderungen untersucht, es konnte jedoch keine signifikante Beziehung hergestellt werden (COUSQUER 2005, WILLIAMS et al. 2006).

#### *Erworbene Erkrankungen mit infektiöser Ätiologie*

*Viren:* Ein Beispiel für eine systemische Infektionserkrankung mit Auswirkungen auf die Retina ist die durch Bornaviren verursachte Drüsenmagendilatation (PDD) bei Psittaziden. Hierbei ließen sich in einer Studie bei auf natürlichem Wege mit Bornavirus infizierten und an PDD erkrankten Papageien Fundusläsionen in Form von Verlust des retinalen Pigmentepithels, Retinaablösung und Chorioretinitis ophthalmoskopisch und auch histologisch nachweisen (KORBEL&RINDER 2011 a, KORBEL&RINDER 2011 b). Auch bei der Augenuntersuchung eines an PDD erkrankten Graupapageies (*Psittacus erithacus erithacus*) konnte eine bilateral vorliegende Blindheit festgestellt werden, die mittels ERG bestätigt wurde. Ophthalmoskopisch stellte sich der Fundus im dorsomedialen Bereich aufgrund

streifenförmiger Pigmentepithelverluste heller dar. Histologisch wurde eine multifokale Retinadegeneration festgestellt, die durch Fotorezeptorverlust, vor allem der Stäbchen, und einer partiellen Netzhautablösung gekennzeichnet war. Die Atrophie dehnte sich über zwei Drittel der Retina aus und umfasste auch die Fovea und den Sehnervenkopf. Weiterhin wurden Retinoschisis und chorioretinale Narben beobachtet (STEINMETZ et al. 2008).

*Parasiten:* Ein Beispiel für parasitär bedingte Retinitis ist die Infektion mit *Toxoplasma gondii* (KORBEL 1992 a, KORBEL 2000, STEINMETZ et al. 2008, WILLIAMS 1994). Beim Greifvogel ist Blindheit in Folge von Toxoplasmose durch Narbenzüge beschrieben (GYLSTORFF&GRIMM 1998, MURPHY 1984). Beim Kanarienvogel wurde der Erreger ebenfalls als Ursache von Retinitis und Blindheit identifiziert (WILLIAMS 1994). Bei dieser Spezies ging die Infektion mit weißlichen Veränderungen des Vitreus und Kollaps des Augapfels einher.

*Traumata* können penetrierend oder stumpf auftreten. Bei letzterem wird von einer Störung in der Gefäß- und Nervenversorgung der Retina berichtet. Häufig kommt es beim Vogel zum Contrecoup, da die Orbita und der Skleralring den Bulbus in seiner Elastizität stark einschränken. KORBEL (2000) berichtete von einer Häufigkeit des Auftretens der Veränderungen auf der kontralateralen Seite von 70 %. Auftretende Blindheit nach Traumata lässt sich auf Blutungen des Pecten oculi oder Einblutungen in den Glaskörper zurückführen. Im Zuge der Fibrinresorption kann es zu Verklebungen kommen und dadurch zum retinalen „detachment“ (Traktionsamotio, Amotio retinae) (KORBEL 1999).

Auch Sekundärglaukome (infektiös-toxisch bedingt oder nach Trauma) können Retinaschäden hervorrufen (SEIDEL 1988).

### *Unklare Ätiologie*

Murphy (1984) beschrieb eine vor allem bei Eulen vorkommende vollständige, fokale Degeneration an Fotorezeptoren, die sich als kleine punktförmige retinale Läsionen darstellten. Sie waren scharf umschrieben und nicht pigmentiert und traten zusätzlich zu anderen okulären Erkrankungen auf, wurden aber auch isoliert beobachtet. Die Ätiologie ist nicht gesichert, aufgrund der ventralen Lokalisation im Fundus wurde aber als Ursache der Blick in die Sonne während des Fixierens entfernter Objekte vermutet (MURPHY 1984).

### **3. Optische Kohärenztomografie**

#### **3.1. Optische Kohärenztomografie (OCT) - eine Einführung**

Die Optische Kohärenztomografie (OCT) ist ein bildgebendes Verfahren, das hochauflösende, zwei- und dreidimensionale Schnittbilder verschiedenster Gewebe erzeugen kann (Abb. 9). Die Tomogramme sind von histologischer Qualität, entstehen in vivo und in Echtzeit. Das Verfahren ist nicht invasiv und es ist kein direkter Kontakt oder ein Kontaktmedium zum zu untersuchenden Objekt von Nöten (Abb. 10). Im Prinzip ist die OCT vergleichbar mit der Sonografie. Analog zum B-Mode des Ultraschalls kann ein Schnittbild errechnet werden, durch Messungen der Zeitverzögerung und des Intensitätsunterschiedes der reflektierten Wellen. Statt Schallwellen werden jedoch Lichtwellen genutzt (HUANG et al. 1991, DREXLER&FUJIMOTO 2008, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Da auch in streuenden Medien, wie z. B. lebendem Gewebe, eine hohe Tiefenauflösung erreicht werden kann, wird die OCT neben dem industriellen Einsatz vor allem auch in der medizinischen Diagnostik angewendet. Durch ihre Eigenschaften kann sie als Zwischenstufe von konfokaler Mikroskopie und Sonografie angesehen werden (HUANG et al. 1991). In der Ophthalmologie ermöglicht sie eine äußerst genaue Untersuchung der einzelnen Retinaschichten am Auge in vivo (KERN&COLITZ 2013).

#### **3.2. Geschichte und Entwicklung der OCT**

Ursprünglich in der Industrie eingesetzt, fand die OCT gegen Ende der 1980er Jahre Eingang in den medizinischen Bereich (HUANG et al. 1991). Die ersten eindimensionalen Messungen zur Ermittlung der Bulbuslänge (axiale Informationen entsprechend den Ultraschall A-Scans) führten 1988 FERCHER et al. durch (FERCHER et al. 1988). Durch Weiterentwicklungen der OCT wurden auch die Retina und der Sehnervenkopf darstellbar (DREXLER&FUJIMOTO 2008). HUANG et al. publizierten im Jahr 1991 die ersten zweidimensionalen Bilder ex vivo (HUANG et al. 1991). Die ersten Bilder der menschlichen Netzhaut in vivo entstanden zwei Jahre später. Es folgten klinische Untersuchungen verschiedener Erkrankungen des Auges (DREXLER&FUJIMOTO 2008). Technische Weiterentwicklungen und Fortschritte führten zu Verbesserungen der Bildgebung und -darstellung (GEITZENAUER et al. 2011). Mittlerweile ist die OCT eine in der humanmedizinischen Augenheilkunde etablierte Methodik (FUJIMOTO 2003) zur Darstellung von Erkrankungen und physiologischen Zuständen der Netzhaut oder des Augenvordersegments (KERN&COLITZ 2013).



**Abbildung 9:** OCT-Einheit mit Kamera. Mit freundlicher Genehmigung von Heidelberg Engineering.

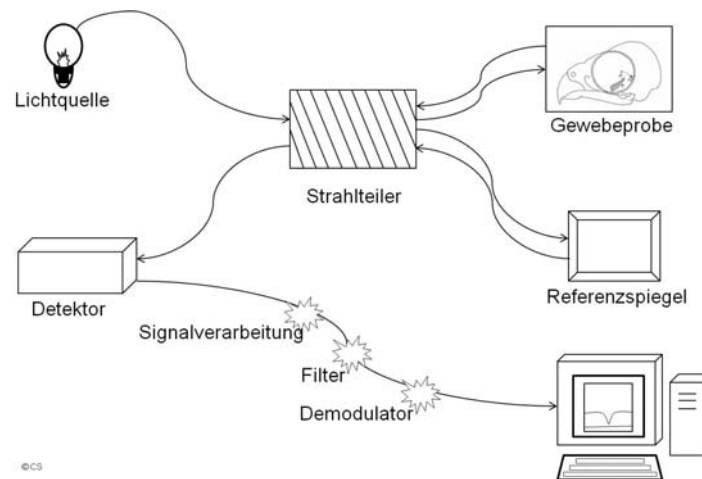


**Abbildung 10:** Ausrichten der Kamera auf das Auge eines Raufußkauzes (*Aegolius funereus*). (Foto: Prof. Dr. R. Korbel)

### 3.3. Technische Grundlagen der OCT

Durch die unterschiedliche optische Dichte biologischer Gewebe entsteht bei Lichteinfall eine gewisse Reflexion, bedingt durch die verschiedenen Brechungsindizes an den Übergängen. Die Optische Kohärenztomografie basiert auf der Niedrigkohärenz-Interferometrie (HUANG et al. 1991). Das bedeutet, es werden Querschnittbilder erschaffen, indem ein Lichtstrahl ein Gewebe „scannt“ und die Echo-Zeitverzögerung und die Intensität des zurückgeworfenen Lichtes gemessen wird. Das reflektierte Licht wird mit Licht korreliert, das eine bekannte Strecke zurückgelegt hat. Dies wird Interferenz genannt. Räumliche Informationen zum untersuchten Objekt werden so erhältlich (FUJIMOTO 2003, HUANG et al. 1991, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Dieser Vorgang wird im Folgenden noch näher beschrieben (Abb. 11). Eine Lichtquelle sendet niedrigkohärentes Licht mit einer Kohärenzlänge von 10  $\mu\text{m}$  bis 1  $\mu\text{m}$  aus (HUANG et al. 1991, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Im Interferometer wird das Licht durch den enthaltenen Strahlteiler in zwei Partien, den Referenzarm und den Probenarm, aufgeteilt. Letzterer wird in Richtung Gewebeprobe weitergeleitet, deren Entfernung unbekannt ist, und von dieser reflektiert. Der andere Strahl wird von einem Referenzspiegel mit bekanntem Abstand zur Lichtquelle reflektiert (HUANG et al. 1991, KERN&COLITZ 2013, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Das reflektierte Licht wird im Michelson-Interferometer wieder zusammengeführt und an einen Detektor weitergeleitet. Der Lichtanteil des Probenarmes interferiert mit dem Licht des Referenzarmes, das eine bekannte Wegstrecke zurückgelegt hat (DREXLER et al. 2001, HUANG et al. 1991, IZATT et al. 1994). Die Interferenz entsteht nur, wenn die Weglänge beider Pfade in der Kohärenzlänge übereinstimmt oder kleiner ist als die Kohärenzlänge der Lichtquelle (DREXLER et al. 2001, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Dieses Signal kann analysiert werden. Es charakterisiert das untersuchte Gewebe, indem die zurückgelegte optische Wegstrecke und die Intensität der Reflexion anhand eines axialen Tiefenprofils abgebildet werden. Dies wird als A-Scan bezeichnet. (GABRIELE et al. 2011, HUANG et al. 1991, VAN VELTHOVEN et al. 2007, IZATT et al. 1994). Aus den Interferenzen und der bekannten Weglänge des Referenzarmes kann also die Weglänge des Probenarmes und damit die Tiefe eines einzelnen Punktes errechnet werden (HUANG et al. 1991, IZATT 1994, KERN&COLITZ 2013, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Das entstandene Bild enthält demnach Informationen über die räumliche Anordnung der Strukturen im Gewebe (KERN&COLITZ 2013).



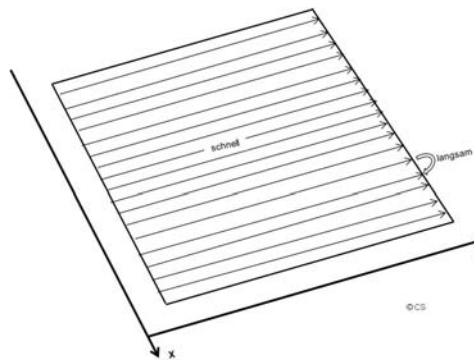


**Abbildung 11:** Grundprinzip der OCT-Funktionsweise

Da Lichtwellen im Bereich der Lichtgeschwindigkeit gemessen werden, können die Messungen nicht mit Detektionssystemen direkt erfasst werden, wie sie z. B. beim Ultraschall verwendet werden (KERN&COLITZ 2013, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Es wird ein spezielles Nachweisverfahren benötigt, die niedrigkohärente Interferometrie nach Michelson. Das verwendete Interferometer zeichnet sich durch eine hohe Empfindlichkeit aus. (HUANG et al. 1991).

Wird eine Serie an A-Scans nebeneinander angeordnet, so dass sich ein zweidimensionales Querschnittsbild ergibt, entsteht der B-Scan. Hierfür muss der Scan in zwei Ebenen erfolgen (Abb. 12): als Lateralscan (x-Achse) mit gleichzeitig durchgeführtem Tiefenscan (z-Achse) (HUANG et al 1991, KERN&COLITZ 2013, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Zwei vom Computer gesteuerte Spiegel scannen hierfür die transversale Position des Lichtstrahls auf der Retina. So kann ein topografisches Bild errechnet werden. Eine „charge-coupled device“ (CCD)-Kamera liefert gleichzeitig eine Fundusansicht, so dass die OCT-Bilder retinalen Leitstrukturen oder Veränderungen zugeordnet werden können (DREXLER et al. 2001). Der B-Scan der OCT entspricht dem B-Mode der Sonografie (HUANG et al. 1991).

Der Vorteil der OCT gegenüber der Sonografie liegt darin, dass durch die kürzere Wellenlänge Auflösungen im Mikrometerbereich möglich sind (DREXLER&FUJIMOTO 2008, HUANG et al. 1991, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Gegenüber der konfokalen Mikroskopie erreicht die OCT eine höhere Eindringtiefe (SCHMITT 1999).



**Abbildung 12:** Schema des B-Scans, modifiziert nach VAN VELTHOVEN et al. 2001: Lateralscan (x-Achse) mit gleichzeitig durchgeführtem Tiefenscan (z-Achse).

### 3.4. OCT-Bildgebungsverfahren

#### 3.4.1. Time Domain-OCT (TD-OCT)

Die Time Domain-OCT, also die zeitabhängige Variante der OCT-Systeme, basiert auf dem oben bereits beschriebenen Prinzip. Es wird niedrig kohärentes Licht ausgesendet, für die Retinadarstellung mit einer Wellenlänge von etwa 800 nm (HUANG et al. 1991, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Wird nun der Referenzarm über den zu messenden Bereich bewegt, kann anhand der Rückstreuung bzw. Messung der Interferenzmuster die jeweilige Tiefenposition zugeordnet werden. Sie hängt sowohl von der Wellenlänge des verwendeten Lichtes, als auch vom Abstand des Gewebes bzw. des Referenzspiegels ab. (HUANG et al. 1991, IZATT 1994, KERN&COLITZ 2013, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Da das mechanische Bewegen des Referenzarms nötig ist, ist die Bilderhebung sehr zeitaufwändig und verhältnismäßig langsam, da die Daten Pixel für Pixel entlang eines A-Scans zusammengetragen werden. Die Bildqualität ist daher eingeschränkt. Mit der TD-OCT sind nur 400 A-Scans pro Sekunde möglich. Natürlicherweise auftretende Augenbewegungen führen daher zu starken Artefakten (DREXLER&FUJIMOTO 2008, KERN&COLITZ 2013, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Die axiale Auflösung liegt bei 15  $\mu\text{m}$  (GEITZENAUER et al. 2011).

#### 3.4.2. Fourier Domain- OCT (FD-OCT)

Die Bildgebung durch TD- und FD-OCT lassen sich nicht direkt miteinander vergleichen (KERN &COLITZ 2013). Durch stetige Weiterentwicklung und Verbesserung der OCT-Verfahren, entstand die Fourier Domain-OCT, welche als herausragenden Vorteil gegenüber der TD-OCT sowohl eine bessere Sensitivität als auch eine höhere Geschwindigkeit aufweist. Die FD-OCT misst im Vergleich zur TD-OCT **das gesamte optische Signal, zeitgleich** und nicht Stück für Stück, unter

Anwendung der Fourier-Transformation (DREXLER&FUJIMOTO 2008, VAN VELTHOVEN et al. 2007).

#### 3.4.2.1. Spektral Domain-OCT (SD-OCT)

Die Spektral Domain-OCT ist eine Variante der FD-OCT. Die Interferenzmuster werden hier im Vergleich zur TD-OCT nicht mechanisch erzeugt. Der Referenzarm bleibt starr, die reflektierten Lichtstrahlen mehrerer Wellenlängen werden **gleichzeitig** im **Spektrometer** gesammelt. Das Licht wird spektral zerlegt, um so die Interferenzmuster zu erkennen, und mittels sehr empfindlicher, Hochgeschwindigkeits-CCD-Kameras ausgelesen (DREXLER&FUJIMOTO 2008, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Nach zusätzlicher Filterung kann dann das Tiefenprofil errechnet werden, denn **jede einzelne Lichtfrequenz stellt eine andere Gewebetiefe** dar und kann daher unterschiedlichen Bereichen in der Retina zugeordnet werden (TOWNSEND et al. 2009 zitiert aus KERN&COLITZ 2013).

Durch Anwendung einer breitbandigen Lichtquelle im Nahinfrarotlichtbereich (800 bis 1300 nm) kann eine verbesserte axiale Auflösung von 3  $\mu\text{m}$  bei einer Eindringtiefe von 1,5 mm erreicht werden (DREXLER&FUJIMOTO 2008, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Die Geschwindigkeit der Datenerhebung kann durch die gleichzeitige Messung des gesamten optischen Signals wesentlich gesteigert werden. Sie wird nur durch die Ausleserate der CCD-Kamera beschränkt. Mit der SD-OCT sind zwischen 24.000 und 55.000 A-Scans pro Sekunde möglich (DREXLER&FUJIMOTO 2008, GABRIELE et al. 2011, KERN&COLITZ 2013).

#### 3.4.2.2. Swept Source-OCT (SS-OCT)

Die neueste Generation der OCT-Geräte arbeitet auf einem ähnlichen Prinzip wie die Spektral Domain-OCT. Reflexionen werden aufgrund von Lichtfrequenzen lokalisiert. Die verwendete Lichtquelle („frequency swept light source“) ist jedoch schmalbandig (DREXLER&FUJIMOTO 2008, SRINIVASAN et al. 2008). Sie kann die Emissionswellenlängen schnell verändern und durchstimmen. Die Interferenzen werden dann von einem einzelnen Fotodetektor empfangen. Es werden nicht einzelne Breitband-Reflexionen detektiert, sondern die ganze Bandbreite aller Frequenzen zur selben Zeit. Die Geschwindigkeit der Datenerhebung wird also nur durch die Wechsel-Geschwindigkeit der Lichtquelle („sweep speed“) begrenzt. Dadurch können Scanraten von über 200.000 A-Scans pro Sekunde erreicht und Bewegungsartefakte fast ausgeschlossen werden (DREXLER&FUJIMOTO 2008, WIESER et al. 2010). Da viele SS-OCT-Systeme jedoch mit einer höheren Wellenlänge arbeiten, wird aufgrund der Wasserabsorption bei 1.000 nm eine geringere axiale Auflösung erreicht. Sie liegt bei 8  $\mu\text{m}$  im Gewebe

(SRINIVASAN et al. 2008). Allerdings sind die äußere Retina, RPE und Choroidea deutlicher erkennbar, was deren automatische Segmentierung verbessert (GABRIELE et al. 2011). Die Arbeitsgruppe um WIESER entwickelte sogar ein System mit einer Scanrate von 20,8 Millionen A-Scans pro Sekunden und einer axialen Auflösung von 11  $\mu\text{m}$ . (WIESER et al. 2010).

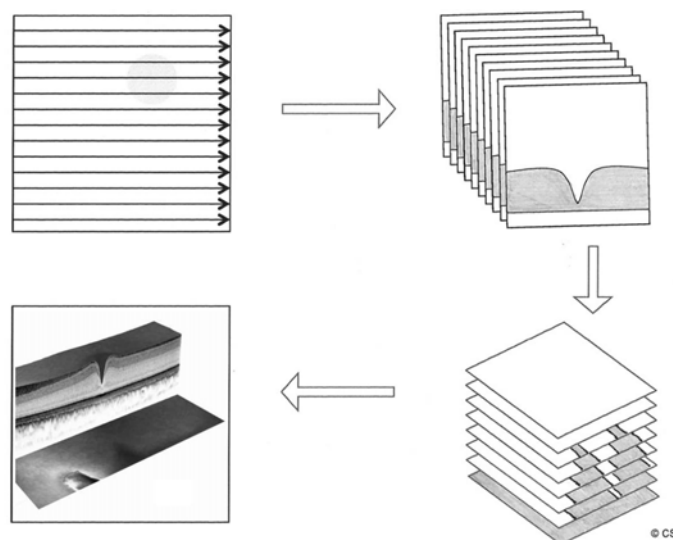
### 3.4.3. Ultrahigh Resolution-OCT (UHR-OCT)

Um eine Verbesserung der Bildqualität der OCT zu erreichen, können als Lichtquelle verschiedene Laser eingesetzt werden, z. B. ein Ultra-Breitband Femtosecond Titanium:Sapphire Laser. Dieser Kurzpulslaser ermöglicht eine spektrale Bandbreite von 125 nm, zentriert bei 815 nm Wellenlänge. Dadurch wird eine axiale Auflösung von 3  $\mu\text{m}$  erreicht und eine Reduzierung der Speckles (DREXLER&FUJIMOTO 2008, KO et al. 2004). Speckles sind kleine Störsignale, die sich im Tomogramm als unterschiedlich große Sprengel oder Flecken mit niedriger Intensität darstellen und so das OCT-Bild körnig aussehen lassen (SCHMITT et al. 1999). Je breitbandiger die Lichtquelle, umso feinkörniger werden die Speckles und umso besser wird die axiale Auflösung. Das gesamte UHR-OCT System muss hinsichtlich der Optiken, Linsen und anderen Einrichtungen an die optische Bandbreite angepasst werden (DREXLER&FUJIMOTO 2008, KO et al. 2004). Allerdings wird die UHR-OCT durch eine relativ langsame Geschwindigkeit begrenzt. Da der Titanium:Sapphire Laser derzeit mit hohen Kosten verbunden ist, wird er nur in der Forschung verwendet (DREXLER&FUJIMOTO 2008, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Daher wurden die Lichtquellen weiterentwickelt und eine breitbandige Superlumineszenzdiode (SLD) entworfen, die beinahe die Auflösung des Lasers erreicht und zudem kostengünstiger ist (DREXLER et al. 2001, DREXLER 2004, SCHMITT 1999). Die UHR-OCT ermöglicht eine axiale Auflösung von 2 bis 3  $\mu\text{m}$ . Dies ist die höchste Auflösung, die aktuell bei ophthalmologischen bildgebenden Verfahren *in vivo* erreicht wird (DREXLER et al. 2001). Die Bildauflösung ist 10 bis 100 Mal feiner als die des kommerziell genutzten Ultraschalls, der Magnetresonanz- oder der Computer Tomografie (FUJIMOTO 2003). Eine beinahe subzelluläre Auflösung ist möglich. Mit der UHR-OCT ist eine genaue Darstellung aller intraretinalen Strukturen möglich, inklusive der Fotorezeptorschicht bis hin zu sehr feinen Strukturen wie die ELM oder des IS/OS-Komplexes (DREXLER&FUJIMOTO 2008, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Das ermöglicht eine verbesserte Diagnostik der drei am häufigsten zu Blindheit führenden okulären Erkrankungen des Menschen - Glaukom, diabetische Retinopathie und Makuladegeneration (DREXLER et al. 2001).

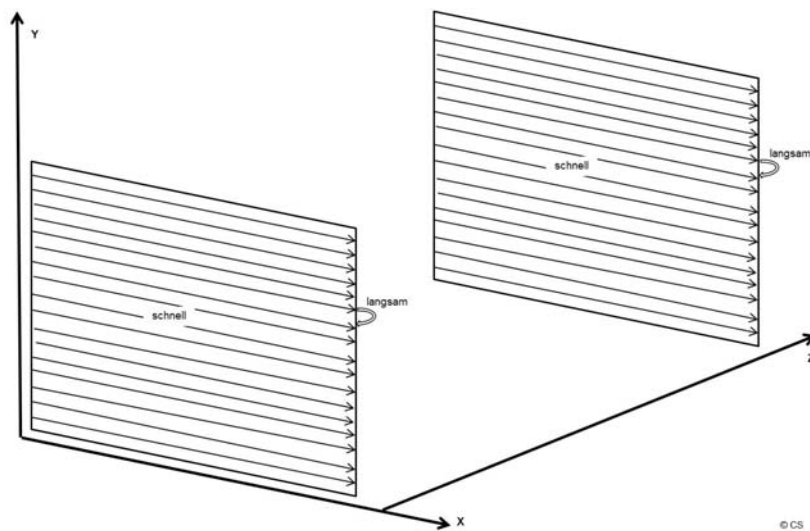
### 3.4.4. Dreidimensionale OCT (3D-OCT)

Mittels OCT können, analog zum MRT, 3D-Bilder durch Kombination der A- und B-Scans erzeugt werden (Abb. 13). Um möglichst hochaufgelöste Bilder zu erhalten und Bewegungsartefakte zu vermeiden, ist eine der wichtigsten Voraussetzungen eine hohe Geschwindigkeit, weshalb z. B. Ultrahochgeschwindigkeits-FD- oder SS-OCT-Systeme genutzt werden. Bei z. B. 249.000 axialen Scans pro Sekunde und einer Wellenlänge von 1.060 nm ist es möglich, hochauflösende 3D-Bilder des ONH, der Retina, der Fotorezeptoren, des RPEs, der Lamina cribrosa, der Choroidea und der Sklera aufzunehmen. Aufgrund der schnellen Datenakquisition werden dicht aneinander liegende B-Scans erstellt. Diese Bilderstapel können durchgemustert und jedes einzelne Schnittbild analysiert werden (DREXLER&FUJIMOTO 2008, SRINIVASAN et al. 2008, VAN VELTHOVEN et al. 2007). So konnte beim Glaukom die Lamina cribrosa hinsichtlich verschiedener Parameter wie Porengröße und Aussehen untersucht werden. Die Lamina war leichter darstellbar durch die durch das Glaukom verursachte dünnere Nervenfaserschicht (SRINIVASAN et al. 2008).

Der Datenstapel kann auch in Form eines C-Scans (Abb. 13 und Abb. 14) (auch *en face*-Aufnahmen genannt) verwendet werden. Hierbei ist eine Durchsicht der Retinaschichten parallel zu ihrer Oberfläche in unterschiedlicher Tiefe möglich. Die C-Scans verwenden dicht gepackte dreidimensionale Datensets, da für jedes Pixel ein axialer Scan benötigt wird. Die *en face*-Bilder ermöglichen so eine Darstellung von Mikrostrukturen, die andernfalls nicht erkennbar wären (GEITZENAUER et al. 2011, KERN&COLITZ 2013, SRINIVASAN et al. 2008).



**Abbildung 13:** Schema der dreidimensionalen Datenakquisition, modifiziert nach DREXLER&FUJIMOTO 2008.



**Abbildung 14:** Schema der TD-OCT eines OCT C-Scans, modifiziert nach VAN VELTHOVEN et al. 2007.

Für die Errechnung der Bilder ist die Kombination transversaler Bildinformationen eines konfokalen Scanning Laser Ophthalmoskop (cSLO) und axialer Tiefenschnittbilder der OCT erforderlich. Durch die Daten der cSLO wird die Fundusansicht geliefert. Die cSLO erreicht eine hohe transversale Auflösung, jedoch nur eine axiale Tiefenauflösung von  $10\ \mu\text{m}$ . Das konfokale Bild **entsteht zeitgleich** mit dem Bild des OCT-Systems. Durch Abspaltung eines Teils des vom Auge reflektierten Lichtes wird das konfokale Signal verursacht. Da **dieselbe Lichtquelle** verwendet wird, entsprechen sich die Bildinformationen streng, also Pixel zu Pixel. Die Fundusansicht, welche einer Fundusfotografie ähnelt, bietet eine übersichtliche und detaillierte retinale Topografie. So lassen sich die (Aus-) Maße von Veränderungen bestimmen.

Durch die volumetrische Darstellung der Retinaschichten ist sowohl eine genaue Zuordnung bestimmter Fundusbereiche zu einem Schnittbild möglich als auch eine bessere Positionierung und Zuordnung des B-Scans. Artefakte, beispielsweise durch Augenbewegungen oder Atmung, sind leichter erkennbar. Darüber hinaus lassen sich anhand der 3D-Bilder Dickenmessungen der Retina durchführen (DREXLER&FUJIMOTO 2008, JIAO et al. 2005, KERN&COLITZ 2013, VAN VELTHOVEN et al. 2007).

### **3.4.5. Eye Tracking**

Obwohl mittlerweile dreidimensionale Datensätze der Retina mittels FD-OCT möglich sind, wird deren Qualität immer noch durch Bewegungsartefakte, wie z. B. Augenbewegung, vermindert. Der Patient muss sich deshalb während der Aufnahmen ruhig verhalten und einen bestimmten Punkt fixieren (KERN&COLITZ 2013, SRINIVASAN et al. 2008). Manche OCT-Geräte verfügen über ein aktives Eye Tracking System, welches den Augenbewegungen folgt und die Position des Scan-Strahles korrigiert. Darüber hinaus können auch Folgeaufnahmen an exakt derselben Fundusstelle erfolgen – Verlaufsuntersuchungen und Therapiekontrollen werden möglich (GEITZENAUER et al. 2011). Die Instrumente benötigen für das Eye Tracking ein zusätzliches optisches System, welches sich an bestimmten retinalen Strukturen orientiert und die Bewegungen durch Veränderungen in der Reflexion erkennt, und Aktuatoren um die Augenbewegung durch Reposition des diagnostischen Scanstrahls auszugleichen. Dadurch können Datensets mit einer hohen Dichte und eine lange Aufnahmezeit erreicht werden (FERGUSON et al. 2004, SRINIVASAN et al. 2008).

### **3.4.6. Adaptive Optiken**

Die transversale Auflösung hängt von der Spotgröße des Lichtstrahles auf der Retina ab, was maßgebend durch die numerische Apertur inklusive des Auges selbst bestimmt wird (DREXLER 2001, GEITZENAUER et al. 2011). Es entstehen Aberrationen durch die Hornhaut und in geringerem Maße auch durch die Linse. Das Bild kann nicht mehr hochauflösend abgebildet werden (DREXLER&FUJIMOTO 2008, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Kommerzielle OCTs verwenden einen Strahlendurchmesser von ca. 1 mm, was die transversale Auflösung auf ungefähr 20  $\mu\text{m}$  begrenzt (GEITZENAUER et al. 2011). Die Aberrationen können mit Hilfe von verformbaren Spiegeln korrigiert werden, so dass die Spotgröße kleiner wird und hohe Auflösungen möglich werden. (FERNANDEZ&DREXLER 2005). Kombiniert man AO und UHR-OCT, ist eine axiale Auflösung von 3  $\mu\text{m}$  möglich, mit einer transversalen Auflösung von 5  $\mu\text{m}$  (DREXLER 2004).

### **3.4.7. Anterior segment - OCT (AS-OCT)**

Mit einem speziellen „Kornea-Modul“, das ebenfalls ohne Kontakt zum Auge verwendet werden kann, ist es möglich das vordere Augensegment zu untersuchen – von der äußersten Korneaschicht bis zur Linsenvorderfläche (KERN&COLITZ 2013). Die transversale Auflösung kann hier deutlich verbessert werden, da die Pupille die numerische Apertur des einfallenden Lichtstrahls nicht beeinflusst.

Es kann eine axiale Auflösung von 2  $\mu\text{m}$  und eine transversale Auflösung von 6  $\mu\text{m}$  erreicht werden. Somit können das Korneaepithel, die Bowman-Membran und intrastromale Strukturen dargestellt werden. Die AS-OCT findet Verwendung im Monitoring und in der intraoperativen Kontrolle während der refraktiven Hornhautchirurgie (DREXLER et al. 2001).

### **3.5. Einsatz der Optischen Kohärenztomografie**

#### **3.5.1. Einsatz der OCT in der Grundlagenforschung und an Tiermodellen**

##### **Entwicklung von Therapeutika**

Im Bereich der Forschung an Kleintieren gewinnt die OCT zunehmend an Bedeutung, da Untersuchungen wiederholt und Therapeutika effizienter entwickelt und validiert werden können. So ist z. B. neben einer rein morphologischen Darstellung der Retinastrukturen auch eine quantitative Beurteilung von Veränderungen notwendig, um Progression und Behandlung zu kontrollieren, wie beispielsweise Tumorstudien zum Retinablastom bei der Maus zeigten. Dies gewährleistet die OCT (DREXLER&FUJIMOTO 2008, RUGGERI et al. 2007, RUGGERI et al. 2009).

##### **Entwicklungsstudien und tierexperimenteller Einsatz**

Im Labortierbereich findet die OCT Einsatz in der Erforschung der Embryonenentwicklung, u.a. von Nagern, Wachteln und Hühnern, und in der Untersuchung der Auswirkungen von Pharmaka auf die Früchte (DAVIS et al. 2008, JENKINS et al. 2007, LARINA et al. 2011, LARINA et al. 2009). Durch Einsatz von Doppler-OCT ließ sich die Entwicklung des kardiovaskulären Systems und dynamische Vorgänge wie Herzschlag und Blutfluss untersuchen, um zugrunde liegende Mechanismen für die Entstehung von angeborenen Herzerkrankungen beim Menschen zu verstehen (DAVIS et al. 2008, LARINA et al. 2009). Die Farb-Doppler OCT kombiniert die Geschwindigkeitsmessung mittels Doppler mit der Optischen Kohärenztomografie. Sie kann den Blutfluss in den Gefäßen der Retina darstellen und diesen durch Zeitdifferenz aneinander grenzender Scans messen (WANG et al. 2009, YAZDANFAR et al. 2003). Einsatz findet die OCT auch in der tierexperimentellen Chirurgie, z. B. beim Kaninchen als Arteriosklerosemodell (MALLE 2013).

##### **Ophthalmologische Studien an Nagern**

Die OCT wird häufig bei kleinen Säugern wie Ratten und Mäusen eingesetzt, um die Pathogenese und das Krankheitsbild verschiedener ophthalmologischer



Erkrankungen zu verstehen und zu erforschen. Diese Tierarten haben für die Forschungsstudien den Vorteil, dass sie kostengünstig sind und eine kurze Generationsdauer haben. Durch OCT kann die Zahl an Versuchstieren reduziert werden, da Verlaufsstudien am selben Individuum möglich sind. Dadurch können auch transgene Nager, die unter Umständen nur in begrenzter Anzahl verfügbar sind, eingesetzt werden. Insgesamt steigert das die Möglichkeiten der Grundlagenforschung und somit die Chancen einer Übertragung in die klinische Patientenversorgung (FISCHER et al. 2009, RUGGERI et al. 2007; SRINIVASAN et al. 2006).

Bei Ratten und Mäusen wurden mittels OCT bisher eine ganze Reihe von Studien zur Retina und dem Sehnerv durchgeführt, und zwar zur Erforschung von Defekten während der Entwicklung, von durch Licht induzierten Schäden und von erblichen Retinadegenerationen und -tumoren. Dabei waren unterschiedlichste pathologische Veränderungen darstellbar (FISCHER et al. 2009, KNOTT et al. 2012, RUGGERI et al. 2007, RUGGERI et al. 2009). Auch sehr feine Veränderungen, wie Ödeme und deren Verlauf, konnten mittels OCT untersucht werden. Dies stellt einen deutlichen Vorteil gegenüber der konventionellen histologischen Untersuchung dar, da Ödeme in Schnittbildern durch die Bearbeitung nicht mehr erkennbar sind (FISCHER et al. 2009). Da die verwendeten Tiere extrem kleine Augen und daher eine kurze fokale Länge haben, wurde oftmals eine Kontaktlinse und/oder Augentropfen verwendet, um eine Retinaprojektion zu ermöglichen und um Aberrationen durch die starken Kornearefraktionen abzumindern. Zusätzlich verhinderte dies das Austrocknen der Hornhaut (FISCHER et al. 2009, KNOTT et al. 2012, MCLELLAN&RASMUSSEN 2012, RUGGERI et al. 2009, SRINIVASAN et al. 2006). RUGGERI et al. (2007) verwendeten ein speziell für Kleinsäuger entwickeltes UHR-OCT mit einer angepassten, rotierbaren Haltevorrichtung. Bei diesen Studien konnten alle Hauptschichten der Netzhaut, inklusive der Blutgefäße, Nervenfaserschicht und Sehnervenscheibe dargestellt werden. Ein besonderes Relikt bei der Maus ist die Arteria hyaloidea, die ebenfalls erkennbar war. Bei Tieren mit veränderter Retina, wie z. B. Fotorezeptordegeneration oder Retinatumoren, waren die pathologischen Veränderungen deutlich sichtbar.

Die Interpretation der OCT-Aufnahmen bei Mäusen, Ratten und sogar Spitzhörnchen (*Tupaia belangeri*) erfolgte durch Vergleichen der Aufnahmen mit histologischen Schnittpräparaten, die jedoch teilweise (Schrumpfungs-) Artefakte aufwiesen. Dennoch korrelierten die Ergebnisse sehr gut miteinander. Dreidimensionale Ansichten, Dickenmessungen, volumetrische Berechnung von

Tumoren und deren Größenwachstum unter Verwendung von Blutgefäßen als „landmarks“ waren möglich und wurden histologisch bestätigt (ABOTT et al. 2009, FISCHER et al. 2009, KNOTT et al. 2012, RUGGERI et al. 2007, RUGGERI et al. 2009, SRINIVASAN et al. 2006).

Selbst an sehr kleinen Augen waren Untersuchungen und Darstellungen der Retinaschichtung mittels OCT möglich, zum Beispiel bei Kaulquappen von Krallenfingerfröschen (*Xenopus laevis*) oder bei adulten Zebrafischen (*Danio rerio*) (BAILEY et al. 2012, LEE et al. 2010, VERMA et al. 2008). Nach unterschiedlich induzierten Schäden konnte sogar die Regeneration der geschädigten Retina (-schichten) verfolgt werden (BAILEY et al. 2012).

### **Tiere als Augenmodelle**

Als humanes Augenmodell werden die Augen von größeren Tieren, wie beispielsweise Halbprimaten, Hunden, Katzen, Schweinen oder Kaninchen verwendet. Kaninchen dienten bisher sehr häufig als Tiermodelle für unterschiedlichste Erkrankungen des vorderen Augensegments (MCLELLAN&RASMUSSEN 2012, RIAU et al. 2012) und der Retina, wie beispielsweise der Retinitis pigmentosa. Diese Krankheit geht mit einem fortschreitenden Verlust der Sehfähigkeit einher, bedingt durch progressive Veränderungen der retinalen Struktur und eine Abnahme der Gesamtreinadicke. Die Degeneration der Fotorezeptoren und dadurch der Reflektivität der Segmente war mittels OCT darstellbar (MURAOKA et al. 2012). Beim Kaninchen konnte bei Untersuchungen zur Kornea und vorderen Augenkammer mittels OCT und mit Hilfe des Vorderkammer-Segmentes herausgefunden werden, dass sich Brechkraft und Dicke der Kornea während des Wachstums im ersten Lebensjahr ständig ändern, so dass die Auswirkungen des Alters in vielen (v.a. Langzeit-) Augenstudien berücksichtigt werden sollten. Es zeigte sich, dass beim Kaninchen die Darstellung des ONH aufgrund der Größe und Lage weit superior im Auge relativ schwierig ist. Zusätzliche Probleme entstanden bei der Lagerung der Tiere (MCLELLAN&RASMUSSEN 2012, RIAU et al. 2012).

Das Schweineauge eignet sich nicht nur aufgrund seiner Größe als Modell, sondern es ähnelt dem humanen Auge auch in weiteren Merkmalen. So ist es ebenfalls holangiotisch. GLOESMANN et al. (2003) zeigten an in vitro Aufnahmen von enukleierten, präparierten Augen eine Darstellbarkeit aller Retinaschichten und eine bemerkenswerte Ähnlichkeit der Schweine- und Menschenretina. Auch bei dieser Studie wurden die OCT-Tomogramme mittels histologischer (Gefrier-) Schnittbilder validiert. Die Blutgefäße dienten hier ebenfalls zur Orientierung.

Primaten werden aufgrund der Ähnlichkeit ihrer Augen mit denen des Menschen in Augenstudien eingesetzt, z. B. für die Glaukomforschung. An Rhesusaffen (*Macaca mulatta*) wurden die Auswirkungen eines akut erhöhten Augeninnendrucks (intraokulärer Druck, IOD) auf den Sehnervenkopf und darunter liegende Strukturen erforscht und signifikante Veränderungen, z. B. an RNFL und Lamina cribrosa, festgestellt (MCLELLAN&RASMUSSEN 2012, STROUTHIDIS et al. 2011). Durch eine Schätzung der Dicke der GCL lässt sich eine Aussage über den Zustand des Glaukoms und der Neuropathie treffen. Die gängige Methode zum Rückschluss auf vorliegende Veränderungen in der Nervenfaserschicht ist die Vermessung des Gesichtsfeldes, die Perimetrie. Sie ist jedoch weniger sensitiv gegenüber kleinen Verlusten der Nervenfaserschicht als die Messungen der Dicke der RNFL mittels OCT (HARWERTH et al. 2007). Unter Einsatz von polarisiertem Licht (= Polarisations-sensitive OCT, PS-OCT) kann ein größerer Kontrast zwischen der retinalen Nervenfaserschicht (RNFL) und den weiteren Schichten der Retina geschaffen werden. Da die Mikrotubuli der Nervenfaserschicht durch ihre Parallelität doppelbrechend sind, verändert sich das zurückgestreute Licht bereits bei kleinen Veränderungen ihrer Anordnung. Dadurch kann die Dicke der RNFL berechnet werden (GEITZENAUER et al 2011, HARWERTH et al. 2007). Damit lässt sich die Papille untersuchen und Rückschlüsse auf die Dicke ziehen (DUCROS et al. 2001).

Ob kleine Nager oder größere Säuger, die OCT bietet die Möglichkeit von Langzeit- und Verlaufsstudien. Medikamentöse, prothetische und chirurgische Forschung werden dadurch wesentlich erleichtert (GABRIELE et al. 2011).

### **3.5.2. Einsatz der OCT in der Humanmedizin**

Seit der ersten Anwendung der OCT in der Humanmedizin hat sich die Technologie rasant weiter entwickelt. Mittlerweile ist es nicht nur möglich, beinahe sämtliche Strukturen des menschlichen Auges zu visualisieren, die OCT findet auch in vielen anderen Bereichen der Humanmedizin Anwendung oder es wird an deren Etablierung gearbeitet. So zum Beispiel in der Kardiologie (HAMDAN et al. 2012), in der Urologie (BAUER 2010), in der Onkologie (FUJIMOTO 2003), unter anderem z. B. zur Tumorfrüherkennung von Gebärmutterhalskrebs (TURK 2012), in der Dermatologie (GAMBICHLER et al. 2005) und vielen anderen Bereichen.

Am weitesten entwickelt ist der klinische Einsatz der OCT im Bereich der ophthalmologischen Bildgebung (FUJIMOTO 2003). In der Ophthalmologie angewendet, dient die OCT nicht nur der Erforschung, sondern auch der frühzeitigen Diagnostik verschiedener Krankheiten des vorderen Augensegmentes und des Fundus, hier insbesondere des Sehnervenkopfes (KERN&COLITZ 2013,

VAN VELTHOVEN et al. 2007, VIZZERI et al. 2009), der Netzhaut (WANG et al. 2009, WU et al. 2008) und der Makula (AHLERS et al. 2010, BARAK et al. 2011, DUBIS et al. 2009, KO et al. 2004, STEINBERG 2011) sowie der Choroidea (AHLERS&SCHMIDT-ERFURTH 2009, REGATIERI et al. 2012). Sie wird außerdem zur Tumordiagnostik eingesetzt. Die Progression einer Funduserkrankung kann mittels OCT regelmäßig überprüft werden (KERN&COLITZ 2013).

Die OCT findet Einsatz in der Glaukomdiagnostik und deckt hier lokalisierte Schäden in der RNFL auf, durch eine quantitative Datenerhebung zum Verlust an Axonen und Neuronen (KERN&COLITZ 2013, VIZZERI et al. 2009). Diese Veränderungen sind erkennbar, noch bevor Ausfälle des Gesichtsfeldes auftreten. Bei Glaukompatienten wird vor allem die Polarisations-sensitive OCT angewendet (VAN VELTHOVEN et al. 2007).

Mit der Doppler-OCT wird der retinale Blutfluss bei Retinaerkrankungen, beispielsweise bei Diabetes, beurteilt (WANG et al. 2009). Auch bei chirurgischen Eingriffen liefert die OCT Informationen z. B. zum posterioren partiellen „detachment“ des Glaskörpers (PVD), zu vitreomakulären bzw. -retinalen Traktionen, epiretinalen Membranen (ERM) oder Makulaforamina. Eine möglichst genaue Darstellung der Strukturen erleichtert eine genaue Planung und Durchführung des chirurgischen Eingriffs bzw. des therapeutischen Vorgehens (AHLERS&SCHMIDT-ERFURTH 2009, BARAK et al. 2012, MALAGOLA et al. 2014).

Die Choroidea ist äußerst wichtig für die Versorgung der menschlichen Retina. Störungen im Blutfluss beeinträchtigen die Funktion der Netzhaut. Auch hier ist es möglich mittels OCT, insbesondere der dreidimensionalen OCT, genaue Untersuchungen der Choroidea und Messungen ihrer Dicke durchzuführen. Durch die Darstellung relevanter, betroffener Strukturen werden wertvolle Hinweise auf Erkrankungen erlangt (AHLERS&SCHMIDT-ERFURTH 2009, REGATIERI et al. 2012). Krankheiten, die mittels OCT darstellbar sind und mit einer Verdickung der Choroidea einhergehen, sind die Chorioretinopathia centralis serosa (CSC), polypoidale choroidale Vaskulopathie (PCV) und Vogt-Koyanagi-Harada (VKH). Erkrankungen mit einer Verdünnung der Aderhaut sind die neovaskuläre altersabhängige Makuladegeneration (nAMD), die trockene AMD, die proliferative diabetische Retinopathie, das diabetische Makulaödem, die multifokale Choroiditis, die Retinitis pigmentosa und das Glaukom (REGATIERI et al. 2012).

Einen besonderen Schwerpunkt in der Bildgebung der Retina bilden hierbei die Untersuchungen der Makulae. In mehreren Studien wurde versucht, einen Algorithmus zu entwickeln, der möglichst genau die foveale Morphologie wiedergibt und Segmentierungen der Retinaschichten im Bereich der Makula ermöglicht (BARAK et al. 2011, DUBIS et al. 2009, GHORBEL et al. 2011, SCHEIBE et al. 2014). Damit sind die normale Entwicklung der Fovea überprüfbar und pathologische Zustände erkennbar (DUBIS et al. 2009). Prädisponierende Faktoren für Erkrankungen konnten so festgestellt werden. Dies gewährleistet eine engmaschige Kontrolle und Behandlung des Patienten. So kann z. B. durch eine genaue OCT-Untersuchung der fovealen Anatomie und Morphologie eine Prädisposition für die Entstehung von Makulalöchern festgestellt und deren Progression bestimmt werden. Zudem können prognostische Aussagen zum Verlauf eines chirurgischen Eingriffs bei Makulaforamina gemacht werden. Als weiteres, bedeutendes Kriterium für die Prognose von Erkrankungen der Makula ist der Zustand des retinalen Pigmentepithels (RPE) anzusehen, da sich Makuladystrophien vor allem in der Fotorezeptorschicht und im RPE befinden. Diese Schichten waren mit der UHR-OCT deutlich darstellbar. Anhand der Kontinuität des RPE und des Ausprägungsgrades der pathologischen Veränderungen wurden die verschiedenen Stufen der altersbedingten Makuladegeneration (trockene und nasse Form; Drusen, Atrophie, neovaskuläre AMD und fibrotische Narben) differenziert (AHLERS et al. 2010, AHLERS&SCHMIDT-ERFURTH 2009, STEINBERG 2011, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Mittels UHR-OCT ließ sich außerdem differenzieren ob z. B. eine Zyste in der inneren oder der äußeren Körnerschicht lokalisiert ist (VAN VELTHOVEN et al. 2007).

Folgende Parameter zur Form und Struktur der menschlichen Makula wurden untersucht: Tiefe, Neigung, Schichtung, foveales Volumen (FV), parafoveale maximale Dicke oder auch maximale retinale Dicke (PMT/MRT), Abstand der beiden PMT-Punkte (dPMT), zentrale makuläre / foveale Dicke (CMT/CFT), Fläche, Symmetrie der fovealen Grube (gemessen anhand einer Mittellinie durch den tiefsten Punkt der Fovea) und die Beziehung zur fovealen avaskulären Zone (FAZ) (BARAK et al. 2011, DUBIS et al. 2009, DUBIS et al. 2012, TICK et al. 2011). Die Studien zeigten eine hohe Variabilität hinsichtlich der Form und Morphologie der Fovea (DUBIS et al. 2009, TICK et al. 2011, WAGNER-SCHUMAN et al. 2011). In weiteren Untersuchungen (ADHI et al. 2012, WAGNER-SCHUMAN et al. 2011) wurden sowohl geschlechtsspezifische Unterschiede als auch eine Abhängigkeit von der geographischen Herkunft bzw. ethnischen Abstammung (Kaukasier, Afrikaner, Afrikanische Amerikaner) in der Ausprägung der fovealen Morphologie

und der makulären Dicke festgestellt. Zudem wurden Unterschiede zwischen Augen von normalsichtigen und an Kurzsichtigkeit leidenden Menschen ermittelt. Patienten mit Myopie hatten meist eine größere retinale Dicke in der Foveola und eine dünnere perimakuläre Retinadicke als eine normalsichtige Vergleichsgruppe (WU et al. 2008). Außerdem war die foveale Grube bei Kurzsichtigen etwas weniger tief und wies eine etwas flachere Neigung auf (DUBIS et al. 2009).

### **3.5.3. Einsatz der OCT in der Veterinärmedizin**

Die OCT wird auch bereits in der Tiermedizin eingesetzt, hier vor allem im Bereich Kleintiere wie Hunde und Katzen, aber auch bei Pferden (ALARIO&PIRIE 2013 a, ALARIO&PIRIE 2013 b, GRAHN et al. 2008, GEKELER et al. 2007, HERNANDEZ-MERION et al. 2011, NIEMELÄ et al. 2014, PINTO&GILGER 2014). Die ersten OCT-Untersuchungen in der Veterinärmedizin erfolgten 2007 durch GEKELER et al. an der Retina der Katze. Die Dicke der Katzen-Retina variierte in Abhängigkeit von der Lokalisation und nahm peripher ab. Dies entsprach den Ergebnissen aus histologischen Studien. Darüber hinaus waren induzierte pathologische Veränderungen wie „detachments“ (Retinaablösung) oder eine subretinale Prothese darstellbar. Katzen spielen bei der Erforschung des Sehvorganges eine wichtige Rolle, und eine möglichst exakte Diagnose und Darstellung von Veränderungen ist von hoher Bedeutung, auch für die Grundlagenforschung. Eine erste Studie am Hund, bei der eine rassebedingte retinale Erkrankung (Retinopathie des Coton de Tulear) untersucht wurde, folgte ein Jahr später. Mittels OCT waren multifokale seröse „detachments“ mit retinaler Ausdünnung darstellbar, überwiegend im Bereich des Tapetum lucidum. Die ILM wurde in den Glaskörper hinein angehoben. Eine Kontrolle nach mehreren Jahren zeigte, dass sich die Veränderungen zu fokalen, hyperreflektiven Bereichen (vermutlich durch das durchscheinende Tapetum lucidum) entwickelten (GRAHN et al. 2008). In einer weiteren Studie wurden an 6 gesunden, narkotisierten Beagle-Hündinnen die Dickenwerte der Gesamtretina, Nervenfaserschicht, Fotorezeptorschicht und äußeren Körnerschicht ermittelt und der Bereich superior (dorso-temporal des N. opticus) im Auge, physiologischerweise mit Tapetum lucidum und Area centralis, und der Bereich inferior (ventro-temporal des N. opticus) ohne Tapetum lucidum, miteinander verglichen. Die retinalen Messwerte waren im dorso-temporalen Bereich größer, außer die ONL, die in beiden Regionen ungefähr gleich dick war. Auch rund um die Sehnervenscheibe war die Nervenfaserschicht superior dicker als inferior (HERNANDEZ-MERINO et al. 2011).

Beim Pferd wurden erstmals *in vivo* mittels SD-OCT sowohl die Retina und der Bereich des ONH als auch benachbarte Bereiche visualisiert und vermessen

(PINTO&GILGER 2014). Bei dieser Tierart wurde die OCT nicht nur in der Ophthalmologie, sondern auch in der Arthroskopie, hier aber bislang nur an toten Tieren, angewendet. Dabei erfolgte eine quantitative Bewertung der Knorpelschäden, die auch an ansonsten schwer zugänglichen Gelenken möglich war (NIEMELÄ et al. 2014).

Auch für Untersuchungen am vorderen Augensegment wurde die OCT bei Tieren eingesetzt. So wurden Messungen zur Korneadicke bei Hund (ALARIO&PIRIE 2014), Katze (ALARIO&PIRIE 2013 b) und Pferd (PINTO&GILGER 2014) durchgeführt. Die einzelnen Arbeitsgruppen verwendeten hierfür keine Anästhesie (Pferd nur Sedation) und ein tragbares (Hund / Katze) oder ein in der Hand gehaltenes Gerät (Pferd). Im Jahr 2015 wurde auch eine Studie an Reptilien zur zentralen und peripheren Korneadicke und der Tiefe der Augenvorderkammer publiziert. Insgesamt wurden 42 adulten Tieren aus 17 verschiedenen Spezies untersucht. Bei der Untersuchung des vorderen Augensegmentes zeigten sich Unterschiede im Aufbau zwischen drei Gruppen von Reptilien. So wiesen Schlangen eine dicke Hornhaut mit sphärischer Linse und enger Vorderkammer auf, Echsen eine dünne Hornhaut bei flacher Linsenvorderkapsel und tiefer Augenvorderkammer. Schildkröten ließen sich dazwischen einordnen, ähnelten aber eher den Echsen (RIVAL et al. 2015)

#### 3.5.4. OCT beim Vogel

*„Visusstörungen beim Vogel sind häufig mit retinalen Erkrankungen korreliert. Aussagen, welche Retinaschichten betroffen sind und hiervon abhängige Prognosen lassen sich jedoch in vivo meist **nicht** treffen [...]. Einzig in der Ornitho-Ophthalmologie findet sie [die OCT] bisher kaum oder nur im Bereich der biomedizinischen Forschung Anwendung“* (VELASCO GALLEGO et al. 2014).

Das Huhn dient häufig als Augenmodell für die Humanmedizin. Die ersten *in vivo* Aufnahmen der Retina beim Huhn (Rasse White Leghorn) mittels ultrahochauflösender, dreidimensionaler OCT wurden 2011 von MOAYED et al. publiziert. Dabei wurde eine ungleichmäßige Dicke der RNFL und der GCL bei einem 13 Tage alten Huhn an unterschiedlichen Lokalisationen im Auge festgestellt (MOAYED et al. 2011).

Im Rahmen von Studien zur Myopie bei jungen Hühnern (ebenfalls Rasse White Leghorn) mittels OCT wurden die Auswirkungen einer einseitigen Iridektomie u.a. auf die Akkomodation untersucht. So konnte die Tiefe der Augenkammern vermessen werden. Sie wurde nach einer Iridektomie kleiner (OSTRIN et al. 2011). Beim Augenmodell Huhn kommen für die Untersuchung der Fotorezeptoren

mittlerweile auch die adaptiven Optiken zum Einsatz, um Aberrationen der Kornea auszugleichen (HEADINGTON et al. 2011).

Das Huhn wurde als Tiermodell nicht nur zu Studien der Kurzsichtigkeit verwendet, sondern auch für Untersuchungen zur Retinalen Dysplasie/Degeneration (HUANG et al. 1998, MCKIBBIN et al. 2014), zum lichtinduzierten Wachstum der Retina (MOAYED 2011) sowie für Nachforschungen zu Reaktionen der Retina (MOAYED et al. 2012 a) oder der Pupille auf lichtinduzierte Stimuli (MOAYED et al. 2012 b). So konnten an zehn, zwei Wochen alten Hühnern mittels OCT die Dynamik der Pupillenreaktion nach Stimulierung mittels farbiger Lichtreize charakterisiert werden. Unter Verwendung von UHR-OCT-Tomogrammen der Pupille zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Stimulierung konnte die Veränderung des Durchmessers der Pupille über einen gewissen Zeitraum aufgezeigt werden.

Die OCT wird jedoch nicht nur in Tierversuchen für die Humanmedizin verwendet, sie findet auch Anwendung in der aviären Ophthalmologie. Bisher sind jedoch vergleichsweise wenige Studien veröffentlicht worden. Neben Hühnern und Puten wurden vor allem Psittaziden untersucht (KORBEL et al. 2012 b, KORBEL et al. 2013 a, KORBEL et al. 2013 b). Ein Schwerpunkt der Studien bei Ziervögeln lag in der Erforschung von klinischen Veränderungen bei Infektionen mit aviären Bornaviren, die sich unter anderem im Auge manifestieren (KORBEL et al. 2012 a, KORBEL et al. 2013 c). Weiterhin fand die OCT Anwendung in der Ophthalmologie von Wildvögeln, insbesondere von Greifvögeln (AZMANIS et al. 2012, KORBEL et al. 2012 b, KORBEL et al. 2013 b, RAUSCHER et al. 2013, RUGGERI et al. 2010, VELASCO GALLEGO et al. 2014, VELASCO GALLEGO 2015). Die ersten Untersuchungen zur Retina der Greifvögel erfolgten durch RUGGERI et al. (2010). Mittels SD-OCT wurden in einer Art Pilotstudie bei vier Greifvögeln zwei- und dreidimensionale Aufnahmen der Retina und Foveae durchgeführt. Letztere wurden jedoch nur rein morphologisch beschrieben und ohne quantitative Daten wie z. B. Tiefe, Weite oder Dicke der fovealen Eminenzen oder fovealen Schichtung etc. zu erheben. Bei insgesamt vier Vögeln, die zwei tagaktiven (*Buteo platypterus*, Breitschwingenbussard und *Buteo brachyurus*, Kurzschwanzbussard) und zwei nachtaktiven Spezies (*Bubo virginianus*, Virginia-Uhu und *Strix varia*, Streifenkauz) angehörten, konnten alle Schichten der Netzhaut dargestellt, der Pecten oculi visualisiert und pathologische Prozesse aufgedeckt werden. Die vogeltypische, anangiotische Retina war erkennbar. Die Choroidea konnte, anders als beim Menschen, sehr deutlich dargestellt werden. Es wurde eine unterschiedliche Dicke der Retina in Abhängigkeit von der Lokalisation beschrieben. Die Lokalisation der Foveae und Areae und ihre Ausdehnung wurden anhand der



Verteilung der RNFL- und GCL-Dicke in einer Dickenkarte kartiert. Für die Aufnahmen waren die Tiere weder sediert noch narkotisiert. Die Durchführung erfolgte zur Ruhigstellung in einem abgedunkelten Raum. Die Forschungsgruppe beschrieb unterschiedlich ausgeprägte Foveae der zwei tagaktiven im Vergleich zu den zwei nachtaktiven Vögeln. So nahm die **Fovea centralis** des **Breitschwingenbussard** 66 % der Retinadicke ein, ihre Ränder waren leicht erhoben. In der parafovealen Region der Fovea centralis war die GCL erkennbar, welche in einem anderen Bereich der Retina nicht identifiziert werden konnte. Es konnte nicht festgestellt werden, ob eine verbreiterte Schicht der Fotorezeptoraxone die Fovea umgibt. Die **Fovea temporalis** des Breitschwingenbussards dagegen senkte sich nicht ab, sondern war durch eine Verdickung der Netzhaut, insbesondere der Fotorezeptoraußensegmente, gekennzeichnet. Im Bereich dieser Verdickung war ebenfalls die GCL als dünne, dunkle Linie erkennbar. In keiner der beiden Foveae war die RNFL sichtbar. Im Vergleich hierzu war die perifoveale Retina der **F. centralis** beim **Kurzschwanzbussard** stark angehoben bevor sie in den Clivus überging. Auch die **F. temporalis** senkte sich zu einer Grube herab, sie betrug ca. 34 % der Retinadicke. Die Fovea temporalis der nachtaktiven Vögel wurde nicht beschrieben. Auch die Dicken der retinalen Schichten im Bereich der Area und Fovea wurden nicht untersucht (RUGGERI et al. 2010).

In dieser Studie wurde auch die Rezeptorschicht der beiden tagaktiven und der beiden nachtaktiven Vögel beschrieben. Da bei den Eulen die F. centralis nicht angelegt ist, wurde hier ein Bereich in unmittelbarer Umgebung des ONH und Pecten oculi ausgewählt und dieser mit einem Bereich in der Nähe der Fovea centralis bei den tagaktiven Tieren verglichen. Die Rezeptorschicht stellte sich bei den vier Individuen unterschiedlich dick dar. Die Außensegmentenschicht erschien bei allen vier Individuen dicker als die Innensegmentenschicht, insbesondere beim Virginia-Uhu. RUGGERI et al. (2010) beschrieben zudem eine größere Reflexion der OS im Vergleich zu den IS, welche bei den beiden tagaktiven Vögeln stärker war als bei den beiden Eulenvögeln. Die Arbeitsgruppe äußerte die Vermutung, dass die unterschiedlichen Rückstrahlungs-Eigenschaften der Fotorezeptoraußensegmente mit der Dichte der Zapfen und Stäbchen korrelieren könnten (RUGGERI et al. 2010). In dieser Studie gelang es erstmals, mittels OCT die Retina von Greifvögeln darzustellen. Allerdings blieb unklar, ob es sich bei den beschriebenen Merkmalen der Retina um physiologische Zustände und um art- oder lediglich um individualspezifische Eigenschaften handelte.

Eine zweite Studie zum Einsatz der OCT bei Greifvögeln umfasste neben

13 Greifvogel- und Eulenspezies (Schwarzmilan, *Milvus migrans*; Rotmilan, *Milvus milvus*, Habicht, *Accipiter gentilis*; Sperber, *Accipiter nisus*; Seeadler, *Haliaeetus albicilla*; Mäusebussard, *Buteo Buteo*; Turmfalke, *F. tinnunculus*; Wanderfalke, *Falco peregrinus*; Turkmenischer Uhu, *Bubo bubo omissus*; Waldkauz, *Strix aluco*; Waldohreule, *Asio otus*, Schneeeule, *Bubo scandiaca*; Schleiereule, *Tyto alba*) noch weitere, nicht domestizierte Vogelspezies (RAUSCHER et al. 2013). Insgesamt wurden 45 Vögel aus 25 Spezies untersucht, wobei die exakte Zahl der einbezogenen Greifvögel und Eulen nicht angegeben war und bei allen Vögeln jeweils nur das rechte Auge in die Auswertung aufgenommen wurde. Die Tiere stammten z. T. aus Gefangenschaft und z. T. aus falknerischer Haltung. Es handelte sich jedoch überwiegend um Wildtiere, oftmals mit Traumahintergrund.

Das Hauptziel dieser Studie lag in der Darstellung pathologischer Zustände am Auge, die mittels OCT bei einer deutlich größeren Zahl von Vögeln nachgewiesen werden konnten als lediglich mit klassischer ophthalmoskopischer Untersuchung. So wurden alle fünf bei der Ophthalmoskopie als augenerkrankt identifizierten Vögel mit OCT bestätigt und noch 12 zusätzliche Tiere mit pathologischen Veränderungen nachgewiesen. Die Darstellung der Ergebnisse beschränkte sich größtenteils auf rein morphologische Beschreibungen überwiegend pathologischer Zustände der Netzhaut, wie z. B. drusenoide Veränderungen, Vakuolen, intraretinale Schisis, „detachment“ (Ablösung) und Degenerationen der äußeren Retinaschichten. In einigen Fällen wurden auch nichtpathologische Veränderungen, wie z. B. Funduspigmentierungen beschrieben. Es gelang, alle retinalen Schichten, die Choroidea und zusätzlich noch die beiden Schichten der Sklera, sowohl der bindegewebige Anteil als auch der hyaline Knorpel, darzustellen. In dieser Studie ergaben sich ebenfalls Hinweise auf Unterschiede im anatomischen Aufbau der Retina zwischen den einbezogenen Vogelspezies. Die physiologische Retina wurde allerdings nur wenig detailliert beschrieben und wichtige Strukturen wie die Foveae beim Greifvogel nicht bzw. nur marginal erwähnt, nämlich lediglich in Form einer dreidimensionalen Aufnahme (OCT-Videosequenz) der F. centralis und der F. temporalis bei einem Mäusebussard, die online verfügbar ist. Bei einem Mäusebussard wurden die pathologischen Veränderungen, die mittels OCT darstellbar waren, und zwar eine umschriebene Degeneration aller Retinaschichten, *post mortem* mit histologischen und immunhistologischen Methoden bestätigt. In dieser Studie erwies sich die OCT als hervorragend dazu geeignet, Veränderungen der Vogelretina *in vivo* zu evaluieren und strukturelle Unterschiede zwischen verschiedenen Vogelspezies darzustellen (RAUSCHER et al. 2013).

Insgesamt ist zu beiden Studien jedoch kritisch anzumerken, dass aufgrund der

teilweise geringen Tierzahl die Ergebnisse nicht einer speziesspezifischen oder einer individuellen Eigenart zugeschrieben werden können. Die Autoren dieser beiden Studien wiesen daher darauf hin, dass dementsprechend noch weitere Untersuchungen erforderlich sind (RAUSCHER et al. 2013, RUGGERI et al. 2010).

Um erstmals physiologische Zustände der Retina von Greifvögeln und Eulen systematisch zu charakterisieren, also um die Voraussetzung zum Erkennen pathologischer Zustände zu schaffen, wurde an der Klinik für Vögel, Reptilien, Amphibien und Zierfische der LMU München eine Studie geplant, in der eine große Anzahl von Arten und Individuen zunächst ophthalmoskopisch und dann mittels OCT untersucht werden sollten. Parallel zu der in der vorliegenden Arbeit dargestellten systematischen Untersuchung der Foveae wurde in einer weiteren Arbeit (VELASCO GALLEGO 2015) am selben Patientengut die physiologische Struktur der Retina an anderen Lokalisationen des Augenhintergrundes charakterisiert. Dabei wurden an 56 tag- und nachtaktiven Greifvögeln aus 12 Spezies sowohl intra- also auch interspeziesspezifische Unterschiede aufgezeigt. Es wurden fünf verschiedene Bereiche im Augenfundus untersucht, und zwar superior des Pecten oculi und des Sehnervenkopfes, am Äquator sowie an einer Position superior im Fundus als auch so weit wie möglich nasal und temporal auf Höhe des Äquators. Gemessen wurde die retinale Gesamtdicke und komplexweise verschiedene Retinaschichten. Dies beinhaltete das RPE bis zur ILM, RNFL&GCL, die äußere Retina, die zwischen RPE und innerster Grenze der äußeren Körnerschicht liegt sowie ein Komplex aus RPE bis ELM. Dabei wurde als generelles Muster festgestellt, dass die Retinagesamtdicke und mit ihr die Nervenfaserschicht inkl. GCL superior des Pecten oculi am größten war und in der Peripherie abnahm. Die äußere Retina (hier gemessen von ONL bis BM) und der RPE-Komplex waren jedoch in der Dicke einheitlich. Im Vergleich von tag- zu nachtaktiven Greifvögeln wiesen die Eulen eine dünnere Retinagesamtdicke auf, besaßen aber eine dickere äußere Retina und einen dickeren RPE-Komplex. Bei manchen Spezies, wie Wespenbussard (*Pernis apivorus*), Waldkauz (*Strix aluco*) und Raufußkauz (*Aegolius funereus*) konnte die ONL nicht differenziert werden. Diese Studie lieferte dabei erstmals Messwerte zur Retina und ihrer Schichtung für einzelne Greifvogel- und Eulenarten und bietet somit „die Grundlage für die Interpretation von OCT-Ergebnissen hinsichtlich pathologischer Veränderungen der Retina von Greifvögeln, sowie die Basis für eine in vivo Kontrolle von Krankheitsverläufen der Retina und die Beurteilung von Behandlungserfolgen über die Zeit.“ (VELASCO GALLEGO 2015).

### 3.6. Physiologische Darstellung okularer Strukturen und Interpretation der OCT-Tomogramme

#### 3.6.1. Darstellung bei Mensch und Säugetier

Es ist noch nicht gelungen, jede einzelne Schicht der Retina und der Choroidea, die sich im OCT-Tomogramm darstellt, verlässlich zu interpretieren. Der innere Anteil der Retina und die hier identifizierten Schichten wurden zwar bereits histologisch bestätigt, die Zuordnung der Schichten der äußeren Retina von RPE bis zum Choroidkomplex ist bisher allerdings noch umstritten. Es ist wichtig zu verstehen, dass eine hundertprozentige Entsprechung von Histologie und OCT-Bild nicht möglich ist, da die beiden Verfahren auf unterschiedlichen Prinzipien beruhen: Bei der Histologie erreicht man den Gewebekontrast durch exogene Färbung (DREXLER&FUJIMOTO 2008), und je nach verwendetem Farbstoff kommt es zur Anfärbung unterschiedlicher Strukturen und damit Darstellung unterschiedlicher Gewebebestandteilen. Bei der OCT hingegen nutzt man die intrinsischen, unterschiedlichen optischen Eigenschaften (DREXLER&FUJIMOTO 2008). Mit dieser Technik können also Gewebe mit ähnlichen optischen Eigenschaften nicht unterschieden werden (RUGGERI et al. 2007, SRINIVASAN et al. 2006). Die Schichten können somit im OCT-Tomogramm eher unscheinbar sein, während sie sich kontrastreich in der Histologie darstellen.

Eigenschaften der Zellen und Gewebe, die das OCT-Signal beeinflussen, sind bei der Interpretation zu berücksichtigen. So haben z. B. Dicke der Gewebeprobe, Absorption und Refraktionsindex Auswirkungen auf die Streuung, Reflexion und Lichtlenkung. Daher tritt unterschiedliche Streuung zwischen nervenfaserhaltigen bzw. plexiformen (resp. axodendritischen) Schichten und kernhaltigen Schichten auf: **RNFL, IPL und OPL** sind **stark reflektierend**, während **GCL, INL und ONL** nur **schwach optisch streuend** wirken (Abb. 15). Das Signal, und damit einhergehend der Kontrast, wird zusätzlich mit zunehmendem Fokusabstand abgeschwächt (DREXLER et al. 2001, GLOESMANN et al. 2003, KERN&COLITZ 2013, RUGGERI et al. 2007). Die OCT-Tomogramme werden in logarithmischen Graustufen oder einer Falschfarbenskala dargestellt (DREXLER&FUJIMOTO 2008, KO et al. 2004). Manche Bildinformationen und -strukturen sind in Grautönen, manche in Falschfarben für das Auge des Untersuchers besser darstellbar (KO et al. 2004, LUMBROSO&RISPOLI 2011).

Die Darstellung der Retinaschichtung in der OCT scheint zwischen Mensch und anderen Mammalia vergleichbar zu sein (RUGGERI et al. 2007, GLOESMANN et al. 2003).

**RNFL:**

In einer Reihe von Studien unter Verwendung unterschiedlicher OCT-Geräte ließ sich die RNFL aufgrund des starken Signals der Axonbündel eindeutig identifizieren. Sie verdickte sich als einzige Schicht in Richtung ONH (KERN&COLITZ 2013, PINTO&GILGER 2014, RUGGERI et al. 2007, HEIDELBERG ENGINEERING GMBH 2014).

**GCL:**

GLOESMANN et al. (2003) und SRINIVASAN et al. (2006) beschrieben eine nicht eindeutig zur RNFL abgrenzbare GCL bei Schwein und Nager. Diese Schicht stellte sich beim Menschen im Bereich der Makula zwar schwach reflektierend dar, war aber eindeutig zuzuordnen (SCHULZ-WACKERBARTH 2011). Die **Dicke der GCL** nahm mit zunehmender **Peripherie ab**.

**IPL, OPL, INL und ONL:**

Die **IPL** und **OPL** erschienen als relativ **hoch lichtstreuende** Schichten, die **INL** und **ONL** dagegen als nur hyporeflektive (GLOESMANN et al. 2003).

**Äußere Retina:**

Die äußere Retina ließ sich durch **vier hyperreflektive Banden** charakterisieren: die ELM, das Ellipsoid der Innensegmente, die Kontakt-Stelle von OS und RPE und das RPE (SPAIDE&CURCIO 2011).

Die **ELM** erschien als ein **dünnes, reflektierendes Band** direkt unterhalb der ONL (GLOESMANN et al. 2003, RUGGERI et al. 2007, SRINIVASAN et al. 2006). Das Signal entsteht wahrscheinlich durch die Verbindung der Müllerzellen mit der ELM. Eventuell tragen auch die Mikrovilli der Müllerzellen hier zur Breite des Bandensignals bei (SPAIDE&CURCIO 2011).

Der **Fotorezeptor-RPE-Komplex** stellte sich als eine **dreilagige Schicht** dar, vermutlich bedingt durch die Verankerung der äußeren Segmente der Fotorezeptoren mit den melaninhaltigen Fortsätzen der RPE (DREXLER&FUJIMOTO 2008, GLOESMANN et al. 2003, SRINIVASAN 2006, RUGGERI et al. 2007, SPAIDE&CURCIO 2011, STEINBERG 2011, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Bisher ist es noch nicht eindeutig geklärt, wie die subzelluläre Zusammensetzung der Fotorezeptoren das OCT-Signal beeinflusst. Es wird vermutet, dass sich die distale Retina (unterhalb der ELM) in Abhängigkeit von Zapfen- und Stäbchen-Anteilen unterschiedlich darstellt.

Die **Innensegmentschicht** lag mit einem relativ **hohen Signal** direkt **distal der**

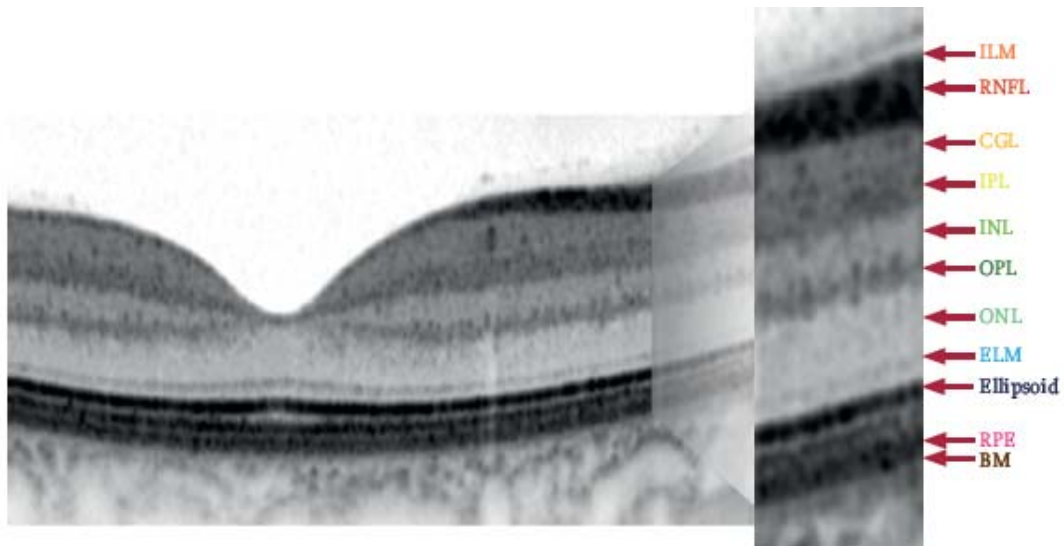
**ELM.** Diese reflektive Bande wurde oft als Übergang von Innensegment zum Außensegment bezeichnet. Die hohe Reflexion stammte jedoch vom Ellipsoid des inneren Segments der Fotorezeptoren. Es ist dicht gepackt mit Mitochondrien. Da diese hier eine ungewöhnliche Dichte, Form und Anordnung haben, könnten sie in besonderer Weise zu dem hohen optischen Signal beigetragen haben (SPAIDE&CURCIO 2011). Es folgte **posterior** ein charakteristisch aussehendes **hyperreflektives** Band der Spitzen der **Außensegmente**, die verzahnt mit dem RPE sind.

Darunter lag die **stark reflektierende**, letzte Schicht der Retina, das **RPE** samt Bruchmembran (DREXLER&FUJIMOTO 2008, GLOESMANN et al. 2003, RUGGERI et al. 2007, SRINIVASAN 2006, STEINBERG 2011, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Allerdings ist hier noch nicht eindeutig geklärt, ob und welche Komponenten zusätzlich zum Signal der RPE-Bande beitragen (SPAIDE&CURCIO 2011).

Weiterhin erkennbar waren: die Choriocapillaris (mittelreflektiv), die Choroidea mit prominenten Blutgefäßen (bei Nager und Schwein mit hoher Reflektivität) und die Sklera (mit gesteigertem Signal, vermutlich aufgrund des Melanins der Choroidea) (GLOESMANN et al. 2003, KERN&COLITZ 2013, RUGGERI et al. 2007, SCHULZ-WACKERBARTH 2011, SRINIVASAN et al. 2006). Die Blutgefäße verursachten durch ihre hohe Lichtabsorption einen Schatten auf die distal liegenden Retinaschichten (SRINIVASAN 2006; HEIDELBERG ENGINEERING GMBH 2014).

## **Makula**

Im Bereich der Makula war dieselbe retinale **Schichtung homolog** wie in der sie umgebenden Netzhaut erkennbar (KO et al. 2004, SCHULZ-WACKERBARTH 2011). In Abbildung 15 ist das OCT-Tomogramm einer menschlichen Makula dargestellt. Da sich die distale Retina in Abhängigkeit von Zapfen- und Stäbchen-Anteil unterschiedlich darstellt, können die **fovealen Fotorezeptoren im Bereich des „IS/OS-Komplexes“ ein sehr charakteristisches Signal** haben (GLOESMANN et al. 2003). Beim Menschen war das Ellipsoid der Innensegmente schmal und hoch reflektiv. Die **Außensegmente** der Fotorezeptoren waren im Bereich der Fovea **verbreitert** (SCHULZ-WACKERBARTH 2011). Typischerweise fusionierte die dritte äußere Retinabande (die Verzahnung der OS-Spitzen mit den RPE-Fortsätzen) im Bereich der Fovea mit dem RPE (SPAIDE&CRUCIO 2011).



**Abbildung 15:** Zuordnung der im OCT sichtbaren Linien zu den Strukturen der Netzhaut. Mit freundlicher Genehmigung von Heidelberg Engineering GmbH, Heidelberg. ILM=Innere Grenzmembran, RNFL=Retinale Nervenfaserschicht, GCL=Ganglienzellschicht, IPL=innere plexiforme Schicht, INL=innere Körnerschicht, OPL=äußere plexiforme Schicht, ONL=äußere Körnerschicht ELM=äußere Grenzmembran, RPE=retinales Pigmentepithel, BM=Basalmembran

### 3.6.2. Darstellung beim Vogel

Auch beim Vogel waren die plexiformen bzw. nervenfaserenthaltenden Schichten optisch stärker reflektierend als die Kerne enthaltenden Schichten (RUGGERI et al. 2010). Die retinale Schichtung war beim Vogel vollständig erkennbar, die einzelnen Schichten konnten zugeordnet werden wie bei der Retina des Menschen und des Säugers. Darüber hinaus ließen sich auch die Choroidea und die Sklera abbilden (HUANG et al. 1998, MCKIBBIN et al.2013, MOAYED et al. 2011, RAUSCHER et al. 2013, RUGGERI et al. 2010). In der proximalen Retina streute die RNFL am stärksten, die IPL mittelmäßig und die INL am niedrigsten zurück (HUANG et al. 1998).

Die aviäre Retinaschichtung stellte sich wie folgend dar:

#### **RNFL:**

Die RNFL war ein breites, hochreflektierendes Band. Sie war die erste erkennbare Schicht im OCT-Tomogramm (RUGGERI et al. 2010). Die Dicke der Nervenfaserschicht variierte in Abhängigkeit von der Lokalisation in der Retina und ist am dicksten im Bereich des ONH (MOAYED et al. 2011).

**GCL:**

Beim Greifvogel war sie als dünne Linie erkennbar. RUGGERI et al. (2010) beschrieben bei den beiden untersuchten tagaktiven Tieren (Breitschwingenbussard, Kurzschwanzbussard) jedoch Unterschiede je nach Lokalisation. Sie war beim Breitschwingenbussard nur in der Nähe der Foveae deutlich differenzierbar, z. B. parafoveal der F. centralis (RUGGERI et al. 2010). Beim Huhn stellte sie sich als erkennbares Band direkt unter der stark rückstreuenden NFL dar (MOAYED et al. 2011).

**IPL, INL, OPL, ONL:**

Diese Schichten waren alle darstellbar, sie waren abwechselnd stark- und schwach-reflektierend (RUGGERI et al. 2010). Beim Huhn erschien die ONL im Vergleich zu Säugetieren verhältnismäßig dünn (MOAYED et al. 2011).

**ELM:**

Die ELM war eine charakteristische dünne, reflektierende Linie beim Greifvogel. Sie lag direkt oberhalb der Fotorezeptorschicht (RUGGERI et al. 2010).

**IS/OS Komplex:**

Der Übergang der Fotorezeptorsegmente war darstellbar, wobei die Außensegmente stärker zurück strahlten als die Innensegmente (RUGGERI et al. 2010).

**RPE-Komplex:**

Das RPE war ein reflektierendes Band. Es bestand aus einer dünnen, wenig streuenden Lage, die umgeben wurde von zwei sehr klar abgrenzbaren, rückstreuenden Schichten (RUGGERI et al. 2010).

**Choroidea:**

Sie lag unterhalb des RPEs und erschien als eine heterogene Schicht. Niedrig reflektierende Bereiche stellten Gefäße dar (RUGGERI et al. 2010).



#### 4. Weitere Untersuchungsverfahren in der Ornithophthalmologie

Die OCT stellt eine noch sehr junge Untersuchungsmethode dar, die bisher noch wenig Anwendung in der Ornithophthalmologie findet (VELASCO GALLEGO et al. 2014). Das Auge beim Vogel kann als „diagnostisches Fenster“ gesehen werden. Neben traumatisch bedingten Veränderungen, sind oftmals pathognomonische Prozesse oder Hinweise auf systemische Erkrankungen erkennbar (KORBEL 2005). Zusätzlich stellt das Sehen den wichtigsten Sinn dieser Tiere dar (KORBEL 1994). Eine möglichst genaue ophthalmologische Untersuchung ist daher bei der Klasse der Aves unabdingbar.

Aussagen über den Funktionszustand der Retina lassen sich **mittels Elektoretinografie (ERG)** treffen. Die retinale Antwort auf Lichtreize wird anhand von elektrischen Potentialen gemessen (STÜTZ et al 1997). Dies ist von Bedeutung, wenn aufgrund von Trübungen im vorderen Augensegment, wie z. B. eine Katarakt, eine ophthalmologische Untersuchung des Augenhintergrundes nicht möglich ist und um ergänzende Informationen zu Retinopathien zu erhalten (KORBEL&STÜTZ 1999).

Eine Untersuchung mittels **Computertomografie (CT)** kann bei Einschränkungen des vorderen dioptrischen Apparates, wie Trübungen und Blutungen, ebenfalls sinnvoll sein. Mit Hilfe dieser Methode lassen sich Vermessungen der Augenstrukturen, wie z. B. der Linse oder der Dicke der Augenhäute, und der knöchernen Bestandteile nebst Skleralring durchführen und auch die Adnexe und retrobulbären Strukturen untersuchen. Feinere Strukturen wie Blutkoagula im Glaskörper, Fibrinansammlungen oder der Augenfächer sind jedoch nicht darstellbar. Eine Unterscheidung von einzelnen Retinaschichten oder die Darstellung oberflächlicher Retinaveränderungen wie z. B. bei Detachment oder Chorioretinitis sind ebenfalls nicht möglich (GUMPENBERGER&KOLM 2006, GUMPENBERGER &KORBEL 2001).

Auch wenn die Computertomografie schneller und effektiver durchzuführen ist als die Magnetresonanztomografie (MRT), ist für beide Verfahren eine Anästhesie notwendig. Die CT ist aufgrund der bereits genannten Nachteile zudem eher nur als eine ergänzende Untersuchungstechnik bei unklaren Erkrankungen, Trübungen im vorderen Augensegment oder hinsichtlich Abklärung von Beteiligung knöcherner Strukturen zu betrachten (GUMPENBERGER&KOLM 2006).

Aussagen zum Blutfluss lassen sich mittels **Fluoreszenzangiografie (FAG)** treffen. Hämorrhagien, Gefäßatrophien, Retinaablationen, und andere pathologische Fundusveränderungen sind erkennbar (REESE et al. 2009). Durch (unphysiologisch) austretenden Farbstoff sind pathologisch durchlässige Bereiche im Gefäßsystem der Choroidea und des Pecten oculi darstellbar (KORBEL et al. 1999, KORBEL et al. 2000). Die Verteilung der Fluoreszein-haltigen Lösung kann mittels Hochfrequenz-Fluoreszein-**Funduskamera** (KORBEL et al. 1999) oder mit einer Kombination aus indirektem Kopfbandophthalmoskop und Videokamera unter Verwendung einer Ophthalmoskopie-Linse (KORBEL et al. 2000) festgehalten werden. Die Kamera stellt eine Methode dar, bei der durch Fotografien (KORBEL et al. 1999) oder Filmaufzeichnungen (KORBEL et al. 2000) pathologische Veränderungen des Fundus dokumentiert und Verlaufskontrollen erfolgen können. So konnten KORBEL et al. (2012 a) bei Bornavirus-infizierten und an neuropathischer Drüsenmagendilatation (PDD) erkrankten Psittaziden chorioretinitische Herde und Retinaablationen detailliert untersuchen. Verwendet wurde hierfür eine spezielle an den Vogel adaptierte **Digitale Scanner-Ophthalmoskopie-Kamera** (Scanning digital ophthalmoscopy, SDO, Wild, Inc./Schweiz) (KORBEL et al. 2012 a), die eine Dokumentation auch bei sehr kleinem Pupillendurchmesser erlaubt (KORBEL et al. 2008).

Weitere Untersuchungsmethoden zum Augenhintergrund stellen die **Pupillometrie** (KALLÄHN 2014) und die 2D- und 3D-Sonografie (LIEPERT 2013, STROBEL 2010) dar. Erstere ist, ebenso wie die ERG, ein funktionales Diagnostikum und beruht auf der Infrarot-Videoaufnahme und Vermessung des Pupillendurchmessers. Durch Lichtreize verschiedener Lichtlängen und Intensität werden Pupillenlichtreflexe ausgelöst. Die erfasste Pupillenbewegung wird grafisch dargestellt (KALLÄHN 2014). Durch eine unterschiedliche Empfindlichkeit der Fotorezeptor- als auch der Ganglienzellen auf verschiedene Wellenlängen des Lichts (Farben) können die Reflexe entsprechend charakteristisch ausfallen und eine Zuordnung pathologischer Veränderungen zu den betroffenen Retinaschichten ist möglich (HANKINS et al. 2008, KARDON et al. 2009). Die Methode ist nicht invasiv und wurde beim Vogel bisher nur in einer einzigen Arbeit untersucht. Verwendet wurde das Pupillometer PLR – 200 der Firma Neuroptics, Irvine, CA, USA. Es konnten interspezifisch unterschiedliche Eigenschaften (z. B. Kontraktionsamplitude und –geschwindigkeit) bei insgesamt 117 einbezogenen Tieren aus sechs Vogelordnungen aufgezeigt werden. Retinale Funktionsstörungen waren diagnostizierbar. Das Gerät weist großes Potential als ergänzendes Diagnostikum in der aviären Ophthalmologie auf (KALLÄHN 2014).

Die **sonografische Untersuchung** des Vogelauges ist eine schnell durchführbare, nicht invasive Methode (GUMPENBERGER&KOLM 2006) und kann mittels 2D- und 3D-Sonografie erfolgen (LIEPERT et al. 2011, KORBEL et al. 2012 b). Durch Messungen der Zeitverzögerung und des Intensitätsunterschiedes reflektierter Ultraschall-Wellen wird ein Schnittbild (B-Mode) errechnet (HUANG et al. 1991). Auch eine Untersuchung mittels Farbdoppler ist möglich. Die dreidimensionalen Ansichten werden aus 2D-Schnittbildern errechnet und können durch Durchfächern dieser Bilder bzw. Rotation des Volumensatzes (LIEPERT 2013) detaillierte Informationen des gesamten Auges, retrobulbär liegender Strukturen und des Pecten oculi aufzeigen. Dies gelingt auch bei vorliegender Katarakt oder sonstigen Trübungen im Auge (KORBEL 2014, GUMPENBERGER&KOLM 2006). In mehreren Untersuchungen an Psittaziden, Greifvögeln und anderen Wildvögeln konnten physiologische Standardwerte des Augenhintergrundes (LIEPERT 2013, STROBEL 2010) und des Augenvordersegmentes (DOROBK 2013) erarbeitet werden. Verwendet wurde das Ultraschallgerät Voluson i der Firma GE (General Electrics) Healthcare Ultraschall Deutschland GmbH (Solvingen, Deutschland) mit einem 17 MHz-Schallkopf (KORBEL 2014). Die Eindringtiefe bei einer Frequenz von 5,6 bis 18,4 MHz liegt bei 37,4 mm, die Scanbreite bei 38 mm (LIEPERT 2013). In der Ultraschall-Untersuchung am Auge unterscheidet man drei verschiedene Untersuchungstechniken: die direkte korneale Kontaktmethode, die transpalpebrale Methode und die Anwendung einer Vorlaufstrecke, die direkt auf die Kornea aufgetragen wird (POULSEN NAUTRUP et al. 1998). Für die sonografische Untersuchung mit der kornealen Kontaktmethode wird zunächst eine Oberflächenanästhesie der Kornea mittels Conjuncain®, 0,4 %, benötigt. Anschließend wird eine ausreichende Vorlaufstrecke mittels Ultraschallgel für eine optimale Ankopplung und zur Schonung der Kornea geschaffen (LIEPERT 2013). Pathologische Veränderungen wie Linsenluxationen, Blutungen, Ablösungen und Degenerationen sind darstellbar (GUMPENBERGER&KORBEL 2001, LIEPERT 2013, STROBEL 2010). Mittels Sonografie können Pectenveränderungen dargestellt werden, eine Unterscheidung der Retinaschichten ist jedoch nicht möglich (GUMPENBERG&KOLM 2006). Sie weist im Vergleich zur OCT eine schlechtere Auflösung auf, so dass letztere für eine detaillierte Untersuchung der Retinaschichten zu bevorzugen ist (DREXLER et al. 2001).

### III. MATERIAL UND METHODEN

#### 1. Ziel

Die Optische Kohärenztomografie (OCT) wird erfolgreich in der humanen Ophthalmologie angewendet und findet zunehmend auch Einsatz in der Tiermedizin. Da durch die OCT hochwertige Informationen zum strukturellen Aufbau der Retina als auch pathologischen Veränderungen am lebenden Tier erhältlich sind, die mit keiner anderen Technologie in dieser Qualität dargestellt werden können, soll die Anwendung der OCT beim Greifvogel im Rahmen dieser Dissertation evaluiert werden. Dies soll eine Grundlage bilden um die OCT gegebenenfalls in die Ornitho-Ophthalmologie zu integrieren.

Ziele dieser Studien waren daher:

1. Untersuchung der Darstellbarkeit der physiologischen Foveae bei einem breiten Spektrum von Greifvogel- und Eulenarten
2. Darstellung des physiologischen Aufbaus der Foveae bei Greifvogel- und Eulenarten mittels OCT
3. Ermittlung von Variationen in der Morphologie der Foveae centralis und temporalis innerhalb einer tagaktiven Spezies
4. Ermittlung von Variationen in der Morphologie der Foveae innerhalb tagaktiver und innerhalb nachtaktiver Spezies und zwischen den Arten

Die Ergebnisse der Optischen Kohärenztomografie sollten dabei mit einer vorausgegangenen ophthalmologischen Untersuchung verglichen werden.

Bei denselben Patienten wurden zeitgleich in einer anderen Studie (VELASCO GALLEG0 2015) Untersuchungen zur Retina an weiteren Lokalisationen des Augenhintergrundes durchgeführt.

## 2. Materialbeschreibung

### 2.1. Probanden

Von Februar 2012 bis Juli 2013 wurden 56 tag- und nachtaktive Wildgreifvögel untersucht, die als Patienten in die Klinik für Vögel, Reptilien, Amphibien und Zierfische der LMU München eingeliefert und aufgenommen wurden. Bei allen Tieren bestand eine medizinische Indikation zur ophthalmologischen Untersuchung einschließlich einer Untersuchung mittels Optischer Kohärenztomografie. Es wurden, wenn möglich, immer beide Augen examiniert. Insgesamt wurden 13 Arten aus 3 Ordnungen einbezogen (Tab. 1). Die häufigste Vogelart, mit 15 Tieren, war der Mäusebussard (*Buteo buteo*). Eine eindeutige Identifizierung des Geschlechts anhand von äußeren geschlechtsspezifischen Merkmalen war nur beim Turmfalken (*Falco tinnunculus*) möglich. Bei einem weiblichen Wanderfalken (*Falco peregrinus*) erfolgte die Geschlechtsbestimmung durch Sexing (DNA-Untersuchung).

Ein Mäusebussard (*Buteo buteo*) konnte im Rahmen einer nachfolgenden pathologischen Untersuchung ebenfalls als weiblich eingestuft werden. Da in allen Fällen das Alter der Wildvogelpatienten nicht bekannt war und sich nur grob einschätzen ließ, erfolgte lediglich eine Einteilung in adult und juvenil. Eine Untersuchung bei Nestlingen bzw. sehr jungen Tieren fand aufgrund der bei den Greifvögeln vorhandenen juvenilen Katarakt nicht statt.

**Tabelle 1:** Übersicht der mittels Optischer Kohärenztomografie untersuchten Greifvogelpatienten und Artenverteilung. m = männlich, w = weiblich, n.b. = Geschlecht nicht bestimmt, insg. = insgesamt

Ordnung/Art	m	w	n.b.	adult	juvenil	insg.
<b>Accipitriformes</b>						<b>27</b>
Mäusebussard ( <i>Buteo buteo</i> LINNAEUS 1758)	0	1	14	15	0	15
Wespenbussard ( <i>Pernis apivorus</i> LINNAEUS 1758)	0	0	5	3	2	5
Sperber ( <i>Accipiter nisus</i> LINNAEUS 1758)	0	0	4	3	1	4

Ordnung/Art	m	w	n.b.	adult	juvenil	insg.
Habicht ( <i>Accipiter gentilis</i> LINNAEUS 1758)	0	0	2	2	0	2
<b>Falconiformes</b>						<b>12</b>
Turmfalke ( <i>Falco tinnunculus</i> LINNAEUS 1758)	3	4	0	7	0	7
Wanderfalke ( <i>Falco peregrinus</i> TUNSTALL 1771)	0	1	4	5	0	5
Rohrweihe ( <i>Circus aeruginosus</i> LINNAEUS 1758)	0	0	1	1	0	1
<b>Strigiformes</b>						<b>17</b>
Waldohreule ( <i>Asio otus</i> LINNAEUS 1758)	0	0	7	7	0	7
Waldkauz ( <i>Strix aluco</i> LINNAEUS 1758)	0	0	5	4	1	5
Schleiereule ( <i>Tyto alba</i> SCOPOLI 1769)	0	0	1	1	0	1
Uhu ( <i>Bubo bubo</i> LINNAEUS 1758)	0	0	2	2	0	2
Raufußkauz ( <i>Aegolius funereus</i> LINNAEUS 1758)	0	0	1	1	0	1
Steinkauz ( <i>Athene noctua</i> SCOPOLI 1769)	0	0	1	1	0	1

## **2.2. Material für die ophthalmoskopische Untersuchung**

### **2.2.1. Spaltlampe**

Für die Spaltlampenuntersuchung wurde das Fabrikat Kowa SL 15 (Fa. Kowa, Tokio, Japan) verwendet. Die Augenuntersuchung wurde in drei verschiedenen Lichtintensitäten (Blaufilter zuschaltbar) und mit 10- bzw. 16-facher Vergrößerung durchgeführt. Hierfür wurden Spaltbreiten von 0,1 mm, 0,2 mm und 0,8 mm gewählt. Außerdem wurde eine punktförmige Lichtquelle zugeschaltet.

### **2.2.2. Diaskleralkegel**

Für die direkte monokulare Untersuchung und zur Untersuchung des vorderen Augensegmentes wurde ein Diaskleralkegel verwendet. Dieser wurde mit Ladegriffaufsatz Beta NT 3,5 V von Heine (Herrsching, Deutschland) für das Otoskop verwendet. Mittels Diaskleralkegel wurde der Fundus 5- bis 7-fach vergrößert und somit nur eine beschränkte Übersicht ermöglicht.

### **2.2.3. Kopfbandophthalmoskop**

Das verwendete Kopfbandophthalmoskop Omega 100 für die indirekte binokulare ophthalmoskopische Untersuchung war ein Gerät der Firma Heine, Herrsching, Deutschland. Es wurden drei unterschiedliche Farbspektren (blau, grün, weiß), unterschiedliche Durchmesser des Lichtkegels und drei verschiedene Lichtintensitäten eingesetzt. Bei der Anwendung des Kopfbandophthalmoskopes werden Ophthalmoskopierlupen zur vergrößerten Darstellung des Augenhintergrundes benötigt. Für diese Arbeit wurden die Linsen „Double Aspheric“ der Firma Volk Optical Inc. Mentor, USA, mit einer Brechkraft von 30, 78 und 90 Dioptrien und die Clear View®-Linsenvergütung verwendet. Die Wahl der Linse war abhängig von der Größe der Augen eines Patienten, welche negativ mit der Anzahl der Dioptrien der Linse korrelierte. So erfolgte z. B. die Ophthalmoskopie beim Mäusebussard mit einer Linse von 30 Dioptrien. Die Linse wurde zwischen dem Auge des Patienten und dem Kopfbandophthalmoskop positioniert und durch geringe Bewegungen ausgerichtet. Das hierbei entstehende Bild des Fundus wird spiegelverkehrt und auf dem Kopf stehend dargestellt.

### **2.2.4. Tonometrie**

Unmittelbar vor und nach der Untersuchung mittels OCT wurde jeweils der Augeninnendruck (IOD) mit einem Applanationstonometer, dem Tono-Vet (Fa. Acrivet, Heningsdorf, Deutschland), gemessen.

### **2.2.5. Fluoreszeintest**

Lag der Verdacht auf eine Hornhautläsion vor, so erfolgte eine Anfärbung der Hornhaut mit steriler Fluoreszein-Lösung (SE Thilo, Fa. Alcon Pharma GmbH, Wien, Österreich). Nach einer Wartezeit von 30 Sekunden wurde das Auge mit steriler Kochsalzlösung von überschüssiger Fluoreszein-Lösung befreit und mittels Blaulicht der Spaltlampe in einem abgedunkelten Raum untersucht. Defekte der Hornhaut stellten sich bläulich fluoreszierend dar. Patienten, die eine solche Läsion aufwiesen, wurden nicht weitergehend mit der OCT untersucht, sondern ihre Rekonvaleszenz abgewartet. Eine Aufnahme des Fundus erfolgte grundsätzlich nur bei intakter Kornea.

## **2.3. Material für die Untersuchung mittels OCT**

### **2.3.1. Optische Kohärenztomografie**

Für die Untersuchung mittels Optischer Kohärenztomografie wurde das OCT-Gerät Spectralis® Plus, erweitert auf das Modell HRA+OCT, der Firma Heidelberg Engineering, Heidelberg, Deutschland, verwendet.

Die Geräteeinheit bestand aus einer Laser-Scanning-Kamera, einer Kamerahalterung mit einer integrierten Kinn- und Kopfstütze, einem Bedienpult (Touchscreen), einem Fußschalter, einem Rechner mit Bildschirm, zur Datensicherung eine interne 40 GB Festplatte und der Betriebssoftware HEYEX für die Durchführung der Aufnahmen, Speicherung, Bearbeitung und Auswertung der Bilder.

Das Gerät verfügte über zwei voneinander unabhängige Scansysteme, die konfokale Scanning-Laser-Ophthalmoskopie (cSLO) und die Spektral Domain-OCT (SD-OCT). Mit der letzteren konnten zweidimensionale Schnittbilder (B-Scans) erzeugt und daraus dreidimensionale Volumina errechnet werden. Dies fand zeitgleich zur Fundusbildgebung der cSLO statt. Hierfür tastete ein fokussierter Laserstrahl mit Hilfe zweier oszillierender Spiegel die Retinaoberfläche ab. Die Intensität des reflektierten Lichtes wurde mit einem Detektor gemessen. Licht, dass außerhalb des Fokus reflektiert wurde, wurde gefiltert, so dass äußerst scharfe Bilder des Fundus entstanden. Das Verfahren eignete sich auch für sehr geringe Pupillendurchmesser, so dass für die Untersuchung der Patienten auf eine Parazentese zur Erzielung einer Mydriasis verzichtet werden konnte. Durch Integration des Eye Tracking (TruTrack™ Technologie) konnten Bewegungsartefakte vermindert werden. Dies geschah durch einen zweiten Scan-Laserstrahl, welcher kontinuierlich die Retina scannte und den eigentlichen Scan-Strahl bei



Augenbewegungen so korrigierte, dass er an dieselbe Stelle zurückkehren konnte. Weiterhin konnten die Fundusaufnahmen exakt den OCT-Scans zugeordnet werden. Die Bilder wurden bereits während der Aufnahmen abgespeichert.

Für die SD-OCT wurde eine SLD- Lichtquelle mit einer mittleren Wellenlänge von 870 nm verwendet. Die Wellenlänge des IR-Lasers betrug 820 nm. Der Strahldurchmesser in der Pupille lag bei der IR-Lichtquelle bei 3 mm, bei der OCT-SLD bei 2 mm. Dabei wurde eine axiale Auflösung von bis 3,9  $\mu\text{m}$  und eine transversale Auflösung von bis zu 6  $\mu\text{m}$  bei einer Eindringtiefe von 1,9 mm mit einem Bildfeld von bis zu 30° x 30° erreicht. Generierte Bilder wurden je nach Aufnahmemodus (Normal, High Speed oder High Resolution) mit einer Auflösung zwischen 384 x 384 und 1536 x 1536 Pixel dargestellt.

Für die Bilderstellung, -bearbeitung und -archivierung wurde das Software Programm Heidelberg Eye Explorer (HEYEX) in der Version 5.4, Heidelberg Engineering, Heidelberg, Deutschland, genutzt. Zur Auswahl standen sowohl die Aufnahmen einzelner Bilder als auch Rasterscans (Bildsequenzen) bzw. dreidimensionale Volumendarstellungen. Die Aufnahmen erfolgten vertikal oder horizontal. Die Größe des zu scannenden Bereiches, die Anzahl der Scans, die Geschwindigkeit und somit auch die Bildqualität resp. die Auflösung wurden je nach Patientencompliance individuell festgelegt. Vor der Aufnahme wurde zwischen den Augengrößen S, M, L und XL ausgewählt. Während der Aufnahmen wurde zusätzlich Kontrast und Helligkeit und die Dioptrien (Fokuseinstellbereich von – 12 bis zu + 12 Dioptrien), z. B. bei vorliegender Vignettierung, angepasst.

Die aufgenommen Bilder konnten unterschiedlich auf dem Bildschirm dargestellt werden, in Graustufen (schwarz auf weiß oder auch weiß auf schwarz) und in Falschfarben. Die dreidimensionalen Datensätze konnten gedreht oder gekippt werden, je nachdem was visualisiert werden sollte. Geeignete Bilder wurden ausgewählt, Abstände vermessen, beschriftet und markiert. Auch hier wurde bei Bedarf Kontrast und Helligkeit weiter angepasst. Für eine bessere Bearbeitung wurden die Aufnahmen vergrößert. In einer „Lightbox“ abgespeichert, waren speziell ausgewählte und bearbeitete Bilder verschiedener Zeitpunkte später wieder aufrufbar. Sämtliche Daten zu einem Tomogramm konnten so gesammelt angezeigt werden.

Die Bilddaten wurden auf einem Rechner gespeichert und wurden über eine USB-Schnittstelle zusätzlich auf externe Festplatten gesichert. Die weitere Bearbeitung und Vermessung war an einem zusätzlich eingerichteten Arbeitsplatz möglich, der auf die Daten und das Programm über eine Lizenz zugreifen konnte.

### 2.3.2. Weitere Materialien

Folgende Materialien für die Vorbereitung, Durchführung der Aufnahmen und Nachsorge kamen zum Einsatz: Kochsalzlösung, Notfallmedikamente, Midazolam, angewärmte Infusionen und Desinfektionstücher.

Die Handtücher wurden für eine Fixierung der Vögel durch Einwickeln benötigt. So konnten Abwehrbewegungen vermieden und sowohl der Patient als auch die sensible Kamera vor Flügelschlägen geschützt werden. Ein ausschließlich freies Halten der Tiere vor die Kamera durch eine Hilfsperson war nicht möglich, da es durch leichtes Verwackeln, z. B. durch die Atmung der Hilfsperson, zu Artefakten während der Aufnahmen kam. Um die Patienten auf Höhe der Kamera zu bringen, wurde daher zum Abstützen eine erhöhte Ablagefläche aus einem Keilkissen und darauf gelagerten Handtüchern erstellt, so dass die Höhe für jeden Patienten individuell gestaltet werden konnte. War der Patient sehr unruhig, wurde zusätzlich das nicht untersuchte Auge mit einem dünnen Tuch abgedeckt. Die Tücher wurden nach jedem Patienten gewechselt. Vor der ersten und nach jeder erfolgten Untersuchung wurden die Kamera, die Kinnstütze und alle Kontaktflächen gesäubert und mit Desinfektionstüchern gereinigt, um eine Übertragung von Infektionen zu vermeiden.

Vor einer Aufnahme wurden die Federn, die an das zu untersuchende Auge angrenzten, mittels physiologischer Kochsalzlösung angefeuchtet und zur Seite gestrichen, um Bildartefakte und Vignettierung zu vermeiden. Während der Aufnahmen und direkt danach wurde dieses Auge zusätzlich regelmäßig mit einem Tropfen Kochsalzlösung benetzt, um das Auge vor Trockenheit zu schützen. Dies führte zudem zu besseren Aufnahmen.

Die Aufnahmen wurden in der Regel am wachen Tier durchgeführt. War dies aufgrund erhöhter Stressanfälligkeit nicht möglich, erhielten die Tiere eine leichte Sedation mit Midazolam (Midazolam-ratiopharm®, Ratiopharm, 2 mg/kg). Das Medikament wurde intranasal appliziert (AJADI et al. 2009; CARPENTER 2005, KORBEL&LIERZ 2012, MANS et al. 2012; PAUL-MURPHY &FIALKOWSKI 2001; VESAL&ESKANDRANI 2006). Der Patient wurde nach der Gabe für 20 Minuten in seine abgedunkelte Box zurückgesetzt. Bei extrem stressanfälligen oder bei schmerzhaften Tieren (z. B. bei Vorliegen von Frakturen) oder bei Patienten, die aufgrund infauster Prognose im Anschluss euthanasiert wurden, wurde eine Inhalationsnarkose mit Isofluran (IsoFlo®, Albrecht, Aulendorf, Deutschland) in medizinischem Sauerstoff als Trägergas in einem halboffenen System verwendet. Die Einleitung erfolgte mittels Kopfkammer (Narkosegasgemisch

mit fünf Vol.-% Isofluran). Bei Erreichen des chirurgischen Toleranzstadiums (LIERZ&KORBEL 2012) erfolgte eine Lokalanästhesie der Glottis mittels Lidocain-Spray mit anschließender Intubation. Die Narkosetiefe wurde so gehalten, dass der Patient im chirurgischen Toleranzstadium blieb (Verwendung von zwei bis drei Vol.-% Isofluran) und die Narkosebelastung möglichst niedrig war. Die Pupille war während dieses Stadiums aufgrund der Ausschaltung des Pupillarreflexes sehr weit. Dies ermöglichte eine schnelle Durchführung und eine kurze Untersuchungsdauer.

Während sämtlicher Untersuchungen lagen stets Notfall-Medikamente (Atropin, Adrenalin, Doxapram, Effortil®, Knopfkanülen und Tupfer) für einen Narkosezwischenfall oder Kreislaufkollaps griffbereit, die jedoch nicht eingesetzt werden mussten.

Nach den Untersuchungen in Sedation oder Narkose erhielten die Patienten eine Ringer-Lösung mit 5 % Glukose (20 ml/kg, körperwarm) subkutan in die Kniefalte und wurden bis zum vollständigen Erwachen in der Box durchgehend überwacht.

### **3. Untersuchungsmethodik**

#### **3.1. Die klinische Untersuchung**

Alle Patienten der Klinik für Vögel, Reptilien, Amphibien und Zierfische wurden nach ihrer Einlieferung einer gewissenhaften klinischen Untersuchung unterzogen, die sich an eine gründliche Anamneseerhebung anschloss. Da es sich bei den Patienten dieser Arbeit ausschließlich um Wildtiere handelte, wurde die Anamnese angepasst:

- Anamnese:
  - Signalement  
(Tierart / Alter (juvenil-adult) / Geschlecht)
  - Fundumstände  
(Fundort / Funduhrzeit/Flugfähigkeit / Hinweis auf Traumata / Sichtbare Verletzungen / Krankheitsanzeichen / Anzahl der erkrankten Tiere / Dauer der Erkrankung / Verhalten / Futteraufnahme)
- Adspektion:

Die Adspektion erfolgte soweit wie möglich zuerst bei unfixiertem Zustand des Tieres, das sich in einer Box oder einem ruhigen Raum befand, so dass

es sich unbeobachtet fühlte. Beurteilt wurden:

- Körperhaltung und Habitus
- Verhalten
- Allgemeinbefinden
- Atmung
- Gefiederzustand
- Körperöffnungen
- Sehvermögen und ggf. Flugfähigkeit
- Körperausscheidungen

- Klinische Untersuchung

Adspektion des Kopfes

- Symmetrie des Schädels und der Orbitae
  - des Gefieders, der Haut und der Anhangsgebilde
  - der Nares
  - der Schnabelhöhle
  - der Ohröffnungen
  - der Augen und Lider und der Lage der Augen in der Augenhöhle
- Dies geschah von oben auf den Kopf herabblickend und von beiden Seiten, um Schwellungen und andere pathologische Veränderungen zu erkennen, die Hinweise auf Erkrankungen und Traumata geben konnten

Palpation und zusätzliche Untersuchungen

- Palpation des Kropfes hinsichtlich des Füllungszustandes oder pathologischer Veränderungen. Entnahme eines Kropftupfers zur mikroskopischen Untersuchung auf Bakterien und Parasiten.
- Palpation der Carina sterni zur Beurteilung des Ernährungszustandes. Durch leichtes Wegpusten oder Anfeuchten des Gefieders in diesem Bereich konnten zusätzlich Hämatome dargestellt werden.
- Palpation des Abdomens
- Adspektion der Kloake und Entnahme einer Tupferprobe zur mikroskopischen Untersuchung auf Bakterien und Parasiten.

- Palpation der Wirbelsäule. Durch Wegpusten bzw. leichtes Benetzen des Gefieders mit Wasser konnten auch hier Hämatome dargestellt werden. Dies ist besonders wichtig im Bereich zwischen Notarium und Synsakrum, da hier häufig Frakturen auftreten.
- Seitenvergleichende Palpation der Furcula und des Coracoids, der Scapula und des Schultergelenks hinsichtlich Hämatomen, Schwellungen, Krepitationen, Luxationen.
- Seitenvergleichende Adspektion und Palpation beider Flügel hinsichtlich Vollständigkeit der Federn, Verschmutzung und Verletzungen
- Seitenvergleichende Adspektion und Palpation der Hintergliedmaßen
- Gewichterhebung (Wiegen)

Je nach Indikation erfolgten weiterführende labordiagnostische Untersuchungen wie Blutentnahmen (zur Bestimmung von Hämatokrit, Organwerten, Differentialblutbild, Bleiwert), Probennahme (Abstriche von Kloake oder Choane / Kropf) für virologische, mykologische und bakterielle Untersuchungen, parasitologische Untersuchungen von Kotproben, Röntgenaufnahmen, gegebenenfalls Endoskopie. Bei den in die vorliegende Untersuchung einbezogenen Tieren lag stets ein Traumaverdacht vor, daher erfolgte auch immer eine ophthalmologische Untersuchung.

Die Dauer aller notwendigen Untersuchungen wurde so kurz wie möglich gehalten und berücksichtigte immer das Allgemeinbefinden des Tieres. Die klinische Untersuchung erfolgte bei professionellem Handling. Um Stresssituationen vorzubeugen, erfolgten alle Vorbereitungen bereits vor der Fixation des Patienten. Röntgenaufnahmen wurden in der Regel unter Allgemeinanästhesie durchgeführt.

### **3.2. Die ophthalmologische Untersuchung**

Die Untersuchung des vorderen und hinteren Augensegmentes erfolgte anhand etablierter und standardisierter ophthalmologischer Untersuchungsverfahren (REESE et al. 2009). Sie gehören zur Routineuntersuchung in der Vogelophthalmologie und sind nicht schmerzhaft. Die dabei erforderliche Fixation des Vogels erfolgte ebenfalls fachgerecht nach etablierten Techniken (KORBEL et al. 2009 b) und stellte nur eine minimale Belastung dar, die ohne Allgemeinanästhesie zu vertreten war (KORBEL 1992 c). Da das Auge nicht berührt wurde, war eine lokale Betäubung nicht indiziert.

Zuerst wurde die Sehkraft am nicht fixierten Patienten anhand des Verhaltens und der Flug- und Orientierungsfähigkeit beurteilt. Der Patient wurde anschließend für die weiteren ophthalmologischen Untersuchungen von einer Hilfsperson fachgerecht

im Kappengriff fixiert (KORBEL et al. 2009 b). Der Visus wurde dann zusätzlich durch Überprüfung des Optikofazialreflexes (Drohreflex) bestimmt. Es schloss sich die Adspektion und Palpation der Augen und ihrer Adnexe an. Es wurden die Lage, Größe, die Umgebung und Symmetrie der Bulbi und Orbitae als auch die Schädelkonturen beurteilt. Die Lider, Konjunktiven und die Nickhaut wurden auf Veränderungen wie Schwellungen, Hämatome, Verletzungen, Epiphora, Chemosis, Lakrimation, Sekretion, Blepharospasmus, etc. untersucht. Auch über den Zustand der Hornhaut, Pupille, Iris und der vorderen Augenkammer wurde sich ein erster Überblick geschaffen. Mittels angefeuchtetem Wattestäbchen wurde der Kornealreflex überprüft. Bei sanftem Berühren der Hornhaut mit dem Stäbchen soll sich bei voller Funktionalität des Reflexes die Nickhaut reflexartig verschieben. Wichtige Hinweise lieferten weiterhin die Ohröffnungen, insbesondere bei Eulen, da bei diesen Spezies die Augen sehr groß sind und durch die Ohröffnung hindurch die lateralen und kaudalen Anteile des Auges beurteilbar sind. Bei Auftreten von Blutungen im Ohr sind Fundusläsionen aufgrund von Traumata sehr wahrscheinlich.

Alle weiteren Komponenten der ophthalmologischen Untersuchung fanden in einem ruhigen, abgedunkelten Raum statt. Dies geschah einerseits, um den Vogelpatienten optisch ruhig zu stellen und somit zu einer Stressreduzierung beizutragen und um gegebenenfalls eine leichte Pupillendilatation zu erzeugen und andererseits, um Veränderungen besser darstellen zu können. Bei Eulen konnte zudem die häufig physiologisch auftretende „Schreck-Mydriasis“ genutzt werden. Bei den Tieren dieser Studie wurde somit auf eine medikamentöse Weitstellung per Parazentese verzichtet.

Bei schlechtem Allgemeinzustand wurden alle Untersuchungsschritte fraktioniert durchgeführt. Wurde das Tier aus anderen Gründen anästhesiert, schloss sich unmittelbar danach die spezielle ophthalmologische Untersuchung an, um die Narkose-induzierte Pupillendilatation zu nutzen.

#### ***Spezielle Augenuntersuchung:***

Bei den hier einbezogenen Patienten, die mit einem Traumaverdacht eingeliefert worden waren, war eine Ermittlung von Hornhautdefekten mit Hilfe des **Fluoreszein-Tests** notwendig (s. 2.2.5.). Dieser Test wurde in der vorliegenden Studie routinemäßig angewendet, um Defekte und Läsionen auszuschließen.

Mittels punktförmigen Lichtes der **Spaltlampe** wurden im seitlich durchfallenden bzw. von vorne einfallenden Licht die Tiefe und der Inhalt der vorderen Augenkammer, die Iris, Linsenschlottern sowie Trübungen der vorderen Linse und der Hornhaut untersucht. Anhand des reflektierten Lichtes war die Beurteilung der

Transparenz möglich. Wurde die Spaltlampe auf spaltförmiges Licht umgestellt, konnten anhand der drei Purkinje-Sansonschen Reflexe die Transparenz untersucht und die Lage der Linse (z. B. Luxation) als auch eventuelle Fremdkörper im Augenvordersegment dargestellt werden.

Es schloss sich die direkte monokulare Ophthalmoskopie des Fundus mittels **Diaskleralkegel** an. Hierbei konnte nur ein kleines Sichtfeld des Augenhintergrundes untersucht werden, welches mit einer 5- bis 7-fachen Vergrößerung dargestellt wurde.

Im Anschluss fand die indirekte binokulare Untersuchung mittels **Kopfbandophthalmoskop** und spezieller Ophthalmoskopier-Linsen (s. 2.2.3.) statt. Hierdurch war ein wesentlich größerer Ausschnitt des Augenhintergrundes untersuchbar und auch die Peripherie darstellbar. Es erfolgte die Beurteilung des Glaskörpers, des Fundus, des Pecten oculi und der Retina. Es wurde auf Trübungen und unphysiologischen Inhalt im Glaskörper (Blut und Fibrin), auf Veränderungen der Retina (Ablösungen, Atrophie, Entzündungen), der Choroidea und auf Veränderungen des Pecten oculi (Abrisse, Blutungen, degenerative Veränderungen) geachtet.

Mittels **Tonometrie** wurde der durchschnittliche Augeninnendruck ermittelt. Hierzu wurden die Messungen jeweils dreimal pro Auge durchgeführt und der Mittelwert errechnet. Gemessen wurde unmittelbar vor den OCT-Aufnahmen und direkt im Anschluss.

Gegebenenfalls schlossen sich **weiterführende Untersuchungen** an. Diese beinhalteten die Untersuchung mittels Sonografie oder Pupillometrie.

### **Sonografie**

Um einen möglichst genauen Überblick über pathologische Veränderungen zu erhalten, die die Prognose einer Wiederauswilderung beeinflussen konnten, wurde bei manchen Patienten auch eine sonografische Untersuchung durchgeführt. Der Patient wurde für die Durchführung in ein Handtuch gewickelt und der Kopf im Kappengriff (KORBEL et al. 2009 b) fixiert. Die Kornea wurde mittels Oxybuprocainhydrochlorid (Conjuncain®, 0,4 %) anästhesiert und mit ausreichend Ultraschallgel bedeckt. Dies diente sowohl einer optimalen Ankopplung als auch dem Schutz der Hornhaut vor Verletzungen. Für die Ultraschalluntersuchung wurde das tragbare Ultraschallgerät Voluson i der Firma General Electrics Healthcare Ultraschall Deutschland GmbH, Solingen, Deutschland, verwendet. Mit diesem Fabrikat konnten Aufnahmen mit Dopplerfunktion und in unterschiedlichen Modi erfolgen (B-/M-/Volumen-Mode). Die Bildverarbeitung erfolgte mittels Compound

Resolution Imaging und Speckle Reduction Imaging. Als Schallkopf wurde die Linearsonde RSP 6–16-RS der Firma General Electrics Healthcare Ultraschall Deutschland GmbH, Solingen, Deutschland verwendet. Diese Ultraschallsonde mit einer Frequenz von 5,6 bis 18,4 MHz verfügte über eine Eindringtiefe von bis zu 37,4 mm, einer Auflagefläche von 52 x 52 mm und einer Scanbreite von 38 mm.

### **Pupillometrie**

Bei vielen Patienten erfolgte zudem eine Untersuchung mittels Pupillometrie. Dies war insbesondere dann der Fall, wenn der Verdacht einer retinalen Funktionsstörung vorlag. Die Pupillometrie ist ein funktionales Diagnostikum und beruht auf der Infrarot-Videoaufnahme und Vermessung der Veränderung des Pupillendurchmessers in Reaktion auf einfallendes Licht (s. Kap. 4 Weitere Untersuchungsverfahren in der Ornithoophthalmologie, II. Literaturübersicht). Die Untersuchung erfolgte unter Verwendung des Pupillometers PLR–200 der Firma Neuroptics, Irvine, CA, USA in einem ruhigen, abgedunkelten Raum. Das Tier wurde auch hier in ein Handtuch gewickelt, um Abwehrbewegungen zu vermeiden. Der Kopf wurde vom Untersucher leicht gehalten und das Pupillometer ausgerichtet. Durch Lichtreize verschiedener Intensitäten und in verschiedenen Farben (blau, weiß und rot) wurden Pupillenkontraktionen unterschiedlich stark und schnell ausgelöst. Anhand des Verlaufs und der Ausprägung dieser Reaktionen wurden Rückschlüsse auf die Funktionalität der an der Pupillenkontraktion beteiligten Strukturen gezogen und Einschränkungen oder Ausfälle verschiedenen Retinaschichten zugeordnet.

Jeder Patient mit Traumavorbericht oder -verdacht und jedes Tier, bei dem eine weitere Indikation zur OCT-Untersuchung vorlag, erhielt maximal 24 Stunden vor den OCT-Aufnahmen eine ophthalmologische Untersuchung.

### **3.3. Die Untersuchung mittels OCT**

#### **3.3.1. Vorbereitung des Patienten und des Systems**

In die OCT-Untersuchungen einbezogen wurden nur Patienten mit einem stabilen Allgemeinbefinden sowie mit intakter, transparenter Kornea und Linse. Die Durchführung der Untersuchung und das Handling erfolgten möglichst stressarm für das Tier. Da sich die Patienten zumeist schon ein paar Stunden in der Klinik aufhielten, konnten ihre Stressanfälligkeit und ihr Allgemeinzustand in Ruhe beobachtet und aufgrund der klinischen Untersuchung bewertet werden. Anhand der Ergebnisse wurde entschieden, ob ein Tier wach und unsediert, sediert oder in Narkose untersucht werden sollte. Letzteres war bei sehr stressanfälligen Vögeln



der Fall oder bei Patienten mit infauster Prognose, da sich bei diesen Tieren nach den OCT-Untersuchungen die Euthanasie anschloss. Eine Sedation erfolgte intranasal mit 2 mg/kg Midazolam, wobei auf Wechselwirkungen mit vorangegangener Medikamentengabe geachtet wurde. Der Patient wurde danach bis zum Wirkungseintritt für 15 bis 20 Minuten in seine Box zurückgesetzt. Patienten, die bereits bei der ophthalmologischen Untersuchung einen ausgeprägten Hippus der Pupille zeigten, wurden ebenfalls sediert. Während der Wartezeit, und bei Patienten ohne Sedation bereits vor Beginn der Fixation für die Aufnahmen, wurde das OCT-System gestartet, der Patient mit Kliniknummer, Vogelart, gegebenenfalls Geschlecht und Datum in einer eigenen Datei angelegt und der Aufbau für die Lagerung des Patienten vorbereitet. Dieser Aufbau befand sich auf einem zusätzlichen Untersuchungstisch, der so ausgerichtet wurde, dass der Vogel direkt vor der Kamera positioniert werden konnte. Eine Hilfsperson konnte so sowohl neben dem Tisch stehen und sich abstützen, das Tier halten und ausrichten, als auch den Allgemeinzustand durchgehend bewerten. Zusätzliche Handtücher zur Ergänzung, Notfallmedikamente, Kochsalzlösung zum Befeuchten der Kornea und Stäbchentupfer wurden bereit gelegt. Die Datei des Patienten wurde geöffnet und der Aufnahmemodus IR+OCT wurde ausgewählt, welches eine Fundusübersicht mit gleichzeitiger Aufnahme und Ansicht der B-Scans (SD-OCT Modus) bedeutete. Andere Aufnahmemodi wie z. B. rotfrei und Ähnliches zur angiografischen Untersuchung der Retina wurden in dieser Arbeit nicht angewendet. Erst dann wurde der Patient geholt und sanft, mit angelegten Flügeln und mit von einer Hilfsperson fixierten Ständern, in ein Handtuch gewickelt. Die Atmung wurde durch das Tuch nicht behindert und der Kopf blieb jederzeit frei zugänglich. Mit Hilfe der Tonometrie wurde der intraokuläre Augeninnendruck gemessen und vermerkt. Die Messungen fanden immer seitenvergleichend statt. Bei keinem der Tiere ergab sich hierbei ein Hinweis auf ein Glaukom, welches ein Verzicht auf die OCT-Untersuchung bedeutet hätte, da beim Vogel stressbedingt der intraokuläre Augeninnendruck weiter steigen kann. Die Federn rund um das Auge wurden angefeuchtet und zur Seite gestrichen, um eine uneingeschränkte Untersuchung zu gewährleisten.

Während der gesamten Untersuchung blieb immer eine Hand der Hilfsperson direkt am Tier um eventuelle Abwehrbewegungen rechtzeitig zu erkennen, den Allgemeinzustand und die Atmung durchgehend zu bewerten und auch um eine eventuelle Hitzeentwicklung rechtzeitig zu bemerken. Der Patient wurde aufrecht sitzend auf dem Aufbau positioniert. Währenddessen waren die Ständer weiterhin fixiert, so dass die Hand der Hilfsperson direkt unter dem Tier zu liegen kam. Bei stark sedierten oder bei anästhesierten Vögeln war dies nicht nötig, die Hand wurde

jedoch seitlich am Tier abgelegt, um die Atmung nicht zu behindern und weiterhin direkten Kontakt und Überwachung zu gewährleisten. Bei anästhesierten Patienten wurden zudem in regelmäßigen Abständen die Atemfrequenz, der Reflexstatus und die Narkosetiefe überprüft. Der Kopf wurde während der Untersuchung nur leicht im Kappengriff gehalten, um ein Ausrichten des Kopfes bzw. des zu untersuchenden Auges zu ermöglichen (KORBEL 1992 c). Sowohl der Schnabel als auch die Hand wurden auf der Kinnablage abgestützt, um kleine Bewegungen zu vermeiden, die die Qualität der Aufnahmen verschlechtert hätten. Der Kopf des Tieres bzw. das zu untersuchende Auge wurde auf die Kamera ausgerichtet. Je nach Grad der Sedation oder Compliance des Patienten wurde das Ober- oder Unterlid sanft und ohne Druck verschoben um einen uneingeschränkten Lichteinfall durch die Pupille zu ermöglichen. Dies wurde meist durch den Untersuchenden durchgeführt, konnte jedoch auch von der Hilfsperson übernommen werden. Blinzeln war für den Patienten weiterhin und jederzeit möglich. Bei anästhesierten Patienten wurden die Augenlider regelmäßig geschlossen und die Hornhaut befeuchtet. Zum Einsatz kam hier physiologische Kochsalzlösung.

### **3.3.2. Ablauf der Aufnahmen**

Mit Start des Aufnahmemodus und Auswahl der Augengröße (S bis XL) wurde die bewegliche Kamera auf das Auge zu bewegt, so dass der Scanstrahl mittig durch die Pupille trat und eine Vignettierung durch die Iris verhindert wurde. Für kleinere Greifvögel, wie Steinkauz (*Athene noctua*), Turmfalke (*Falco tinnunculus*), Sperber (*Accipiter nisus*) und Waldohreule (*Asio otus*) wurde die Augengröße S, für größere Vögel, wie Mäusebussard (*Buteo buteo*), Wespenbussard (*Pernis apivorus*), Wanderfalke (*Falco peregrinus*) und Waldkauz (*Strix aluco*) die Größe M, manchmal auch L ausgewählt.

Die Kamera verfügte über eine automatische Seitenerkennung für die Anwendung beim Menschen. Anhand ihrer Position wurde festgelegt, ob das rechte oder das linke Auge untersucht wurde. Auf dem Bildschirm wurde dies mit OD oder OS gekennzeichnet und in den Aufnahmen abgespeichert, so dass auf eine korrekte Lagerung des Vogelpatienten und eine richtige Bezeichnung des Bildes geachtet werden musste. Die Untersuchungen erfolgten immer zuerst am rechten und dann am linken Auge. Die Kamera war in der Höhe verstellbar sowie nach vorne, nach hinten und zur Seite verschiebbar. Mit einem schwenkbaren Arm und einem Joystick ließen sich Bewegungen in minimalen Schritten ausführen. Die Hilfsperson richtete zeitgleich durch geringste Bewegungen den Kopf des Patienten aus, bis sowohl ein Fundusbild als auch ein scharfer Echtzeit-OCT-B-Scan angezeigt wurde. Eine gute Fundusaufsicht war durch eine gleichmäßige, helle Ausleuchtung des

Bildes gekennzeichnet. Trat Vignettierung auf, so war dies an schwarzen, verschatteten Ecken des Bildes erkennbar. Nicht immer ließ sich dies vermeiden, insbesondere bei Turmfalken, da diese im Vergleich zum Menschen recht kleine Augen besitzen und die starke Krümmung des Bulbus nicht zu einer gleichmäßigen Ausleuchtung der Retina führte. Durch Anpassen der Fokuseinstellung anhand des Dioptrien-Drehknopfes an der Kamera wurde versucht diese Qualitätsminderung so weit wie möglich zu korrigieren. Bei allen Patienten wurde zu Beginn der Aufnahmen eine Fokuseinstellung von Null Dioptrien verwendet.

Durch Bewegungen der Kamera und leichtes Ausrichten des Kopfes ließ sich der gesamte Fundus samt Pecten oculi und Foveae (Aufnahmen der cSLO) bis hin zur Peripherie betrachten. Die zu untersuchenden Bereiche ließen sich so schnell auffinden. Die Echtzeitbilder der SD-OCT dienten hierbei als zusätzliche Orientierungshilfe. Beide Bilder wurden im Modus IR+OCT nebeneinander angezeigt. Im Fundusbild wurde die Scanposition des gleichzeitig angezeigten B-Scans als eine grüne Linie dargestellt (Abb. 17)

Wurde der gesuchte Bereich gefunden, ließ sich die Qualität des B-Scans an einem blauen Qualitätsbalken und einer numerischen Bewertungsskala unterhalb des Schnittbildes ablesen. Je höher die Werte, umso besser war die Qualität. War die Kamera zu weit entfernt, war kein oder nur ein schlechter Querschnitt zu sehen. War sie zu nahe am Auge, so kippte der B-Scan und stand auf dem Kopf. Die Bildhelligkeit wurde durch einen Drehknopf am Bedienpult angepasst. Der Pecten oculi war aufgrund seiner Durchblutung mit der SD-OCT nicht darstellbar und führte zu Auslöschungen des Signals.

### **3.3.3. Aufnahmen der Foveae und des Zwischenbereichs**

Sobald eine zufriedenstellende Qualität erreicht wurde, wurden sowohl horizontale als auch vertikale Aufnahmen der Foveae durchgeführt. Die Bildaufnahme konnte entweder durch Berühren des Touchscreen ausgelöst werden oder mit Hilfe des Fußschalters. Der Eyetracker konnte bei Bedarf vorher hinzu geschaltet werden. Aufgrund ihrer Lage wurde meist zuerst die F. centralis aufgenommen, welche allerdings bei nachtaktiven Vögeln nicht vorhanden ist, und im Anschluss die F. temporalis. Zusätzlich wurde als Vergleich ein Zwischenbereich untersucht, der die normale Retinaschichtung außerhalb der Foveae und Areae beinhalten sollte (Abb. 16). Es wurden Einzelscans (B-Scans) und Volumenscans (3D-Aufnahmen) angefertigt. Um den tiefsten Punkt der Fovea zu treffen, erfolgten, in Abhängigkeit vom Patienten, mehrere Aufnahmen, wobei bei den C-Scans zwischen schnellen und hochauflösenden Scans ausgewählt werden konnte. Sowohl die Anzahl der

Schnittbilder pro C-Scan (Messdichte) als auch die Länge und Breite (Messfeld) waren variabel und frei wählbar. Bei diesen dreidimensionalen Aufnahmen war es äußerst wichtig, dass der Patient weder blinzelte bzw. sich die Nickhaut vorschob, und, dass der Patient oder die Hilfsperson sich nicht bewegten. Es konnte vorkommen, dass trotz Echtzeit Eye Tracking der Scanvorgang abgebrochen und wiederholt werden musste.

Da die Aufnahmen von der Software sofort gespeichert wurden, konnte der Aufnahmemodus zwischendurch ohne großen Aufwand verlassen werden, die bereits generierten Daten betrachtet und beurteilt werden und die Aufnahmen fortgesetzt werden.

Im Anschluss wurden für eine andere Studie (VELASCO GALLEGO 2015) verschiedene andere Bereiche des Fundus untersucht. Dies beinhaltete Lokalisationen im superioren, inferioren, nasalen und temporalen Bereich, einen Bereich im Äquator des Augenhintergrundes sowie einen Bereich oberhalb des Pecten oculi inklusive des Sehnervens.

Waren mittels OCT Läsionen im Fundus erkennbar, die bei der vorangegangenen ophthalmoskopischen Untersuchung nicht aufgefallen waren, wurden sie dokumentiert.

Nach Beenden der Aufnahmen wurde der Patient in seine Box zurückgebracht und sein Allgemeinbefinden beurteilt. War das Tier sediert oder sogar in Narkose, erhielt es eine angewärmte Ringer-Glucose-Lösung (20 ml/kg) subkutan verabreicht und wurde bis zur vollständigen Rekonvaleszenz betreut.

Die Daten wurden dann auf Vollständigkeit und richtige Kennzeichnung (OD oder OS) überprüft. Anschließend wurde die OCT-Einheit gesäubert und desinfiziert.

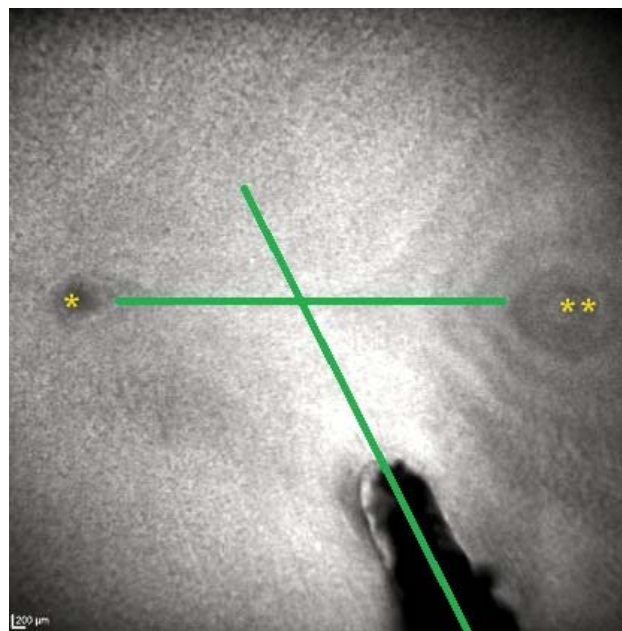
#### **3.3.4. Bildbearbeitung und Vermessung**

Die von der Software HEYEX abgespeicherten Daten wurden gesichtet und geeignete Aufnahmen für eine Vermessung ausgewählt. Die Kriterien hierfür waren eine gute Aufnahmequalität mit gut abgrenzbaren Schichten, keine Artefakte und ein B-Scan, der die tiefste Stelle der Fovea aufzeigte. Wurde nur der Randbereich der Fovea aufgenommen, wurden diese Bilder nicht vermessen. Weiterhin wurde auf eine möglichst mittige Position der Fovea im Anschnitt geachtet, um eine größtmögliche Symmetrie zu gewährleisten.

Für einen Vergleich des Aufbaus der Fovea mit der „normalen“ Retina wurden zusätzlich Aufnahmen jenes Bereichs untersucht, der im Schnittpunkt von Äquator und der Verlängerung einer gedachten Linie durch den Pecten oculi lag.

Als Orientierung für den Äquator wurde die Gefäßkaskade genutzt. Konnte diese Gefäßkaskade nicht identifiziert werden, wurde mit einer Verbindungslinie zwischen den beiden Foveae ein Bereich ausgewählt, der möglichst nah am Äquator lag. In die Messungen der Foveae und des Zwischenbereiches wurden nur Daten einbezogen, die von einer Retina mit an diesen Stellen physiologischer Struktur stammten.

Die Bilder wurden in einer „lightbox“ abgespeichert. Dies ist ein eigener Bereich innerhalb der Patientenakte, in dem ausgewählte Aufnahmen gesammelt und angezeigt werden. Je nach Auswahl des OCT-Analysefensters konnten hier bis zu drei Arbeitsbereiche angezeigt werden, und zwar die Fundusaufnahme, der OCT-Querschnitt und eine Grafik, die die Vermessung der Retina darstellt („Dickenprofil“).



**Abbildung 16:** Fundusansicht der Messbereiche bei einem Habicht (OD) mit Darstellung der F. centralis (\*\*), der F. temporalis (\*) und des Zwischenbereiches (Schnittpunkt der beiden grünen Linien)

Zur weiteren Bearbeitung wurde dann in der Registerkarte „Thickness Profile“ manuell der Messbereich der Retina festgelegt (Abb. 17), Segmentierung genannt. Hierzu wurden zwei Begrenzungslinien (entsprechend der ILM, innere Grenzmembran, und BM, Basalmembran) verwendet, die durch Anklicken kleiner Verbindungsstücke eine genaue Anpassung zuließen. Basierend auf diesen Linien wurde eine automatische Berechnung der Retinagesamtdicke, gemessen von ILM bis BM, durchgeführt. Einzelne Schichten dagegen konnten mit manuell mit der

Computer-Maus gesetzten Punkten vermessen werden. Um die manchmal etwas verschwommenen Grenzen besser erkennen zu können, wurde mit verschiedenen Kontrasten, Farbdarstellungen und Helligkeiten gearbeitet. Waren eine oder mehrere Schichten nicht abgrenzbar, wurden sie folglich nicht gemessen und dies in den Daten vermerkt. Wichtig war es, die Messungen in der Einstellung „ $\mu\text{m}$ “ vorzunehmen, da es in der Einstellung „pixel“ zu ungenauen Werten kommen konnte.

Es wurden von beiden Augen und von jedem Messbereich jeweils horizontale als auch vertikale Aufnahmen zur Messung ausgewählt. Vermessen wurde die Fovea temporalis und, wenn vorhanden, die Fovea centralis, jeweils an ihrer tiefsten Stelle und im Bereich der Eminenzen. Im Einzelnen wurden die im Folgenden aufgelisteten Strukturen und Parameter untersucht:

**Zentrale Fovea:**

- Die foveale Retinagesamtdicke (CFT; central foveal thickness)
- Das Vorhandensein der verschiedenen Schichten in diesem Bereich
- Vermessung der Dicke von INL bis ELM (INL-ELM)
- Vermessung der Dicke von ELM bis BM (ELM-RPE/BM)
- Tiefe der Fovea (=  $\emptyset$  TRT - CFT)

Die Tiefe der Fovea wurde durch Subtraktion der CFT von einem Durchschnittswert der beiden TRT-Werte der Eminenzen (s.u.) berechnet.

**Parafoveale Eminenzen:**

- Die parafoveale Retinagesamtdicke (TRT; total retinal thickness, Eminenz) am höchsten Punkt der Eminenzen, gemessen von ILM bis BM
- RNFL und GCL als ein Komplex (= RNFL&GCL)
- IPL und INL als ein Komplex (= IPL&INL)
- OPL und ONL als ein Komplex (= OPL-ELM)
- INL bis ELM als ein Komplex (= INL-ELM)
- ELM bis RPE/BM (= ELM-RPE/BM)
- Die Abstände der beiden höchsten Punkte der Eminenzen:
  - Im Horizontalschnitt: nasal-temporal = N-T
  - im Vertikalschnitt: superior-inferior = S-I

### **Zwischenbereich**

- die retinale Gesamtdicke (TRT; total retinal thickness, Zwischenbereich)
- RNFL und GCL als ein Komplex (= RNFL&GCL)
- IPL und INL als ein Komplex (= IPL&INL)
- OPL und ONL als ein Komplex (= OPL-ELM)
- INL bis ELM als ein Komplex (= INL-ELM)
- ELM bis RPE/BM (= ELM-RPE/BM)

Die Daten für den Zwischenbereich wurden entweder exakt im Schnittpunkt oder möglichst in der Nähe des Schnittpunktes gemessen und ein Mittelwert aus den Horizontal- und Vertikalscans berechnet.

#### **3.3.5. Speicherung der Messdaten**

Alle Messdaten wurden, sortiert nach Aufnahmebereichen, in Form von Patientenberichten, die über die Software auswählbar waren, und als .jpg-Datei exportiert. Die bearbeiteten Bilder wurden über das Programm HEYEX weiterhin in der lightbox abgespeichert.

#### **3.3.6. Auswertung der Messungen**

Für die Messergebnisse der untersuchten Parameter wurden Mittelwerte und Standardabweichungen errechnet und zum Vergleich graphisch dargestellt. Einen Überblick der vermessenen Schichtkomplexe bietet Abbildung 18. Die Ergebnisse der Auswertung sind in den Tabellen im Anhang II bis V aufgeführt.

##### **3.3.6.1. Fovea centralis und Fovea temporalis**

###### **3.3.6.1.1. Zentrale Fovea:**

###### Zentrale Fovea: Auswertung der Schichtkomplexe

Für die zentrale foveale Retina wurden Horizontal- und Vertikalscans ausgewertet, die am tiefsten Punkt der Fovea aufgenommen wurden. Es wurde der Mittelwert und die Standardabweichung aus den Längs- und den Querschnitten des rechten und des linken Auges gebildet, um durchschnittliche Werte für die zentrale foveale Retinadicke (CFT= central foveal thickness) und für die Schichtkomplexe INL-ELM (=obere Grenze der inneren Körnerschicht bis obere Grenze der externen Grenzmembran) und ELM-RPE/BM (=obere Grenze der äußeren Grenzmembran bis zur äußeren Grenze des retinalen Pigmentepithels/Basalmembran) zu erhalten.

Tiefe:

Die Tiefe der Fovea wurde zuerst pro Patient und Fovea errechnet. Hierfür wurde jeweils von der Durchschnittsdicke der Eminenzen des Vertikalscans (= Durchschnitt der Eminenz superior und inferior) und des Horizontalscans (= Durchschnitt der nasalen und temporalen Eminenz) die Dicke der Retina an der tiefsten Stelle (CFT) des Vertikalscans resp. des Horizontalscans subtrahiert. So entstanden für die Tiefe pro Patient und Fovea zwei Werte, ein Wert des Vertikalscans und ein Wert des Horizontalscans.

Der durchschnittliche Gesamtwert der fovealen Tiefe aller Patienten einer Vogelart setzte sich dann aus der Summe der Messwerte der *Längsscans* der linken und rechten Augen und der Summe der *Querscans* der linken und rechten Augen zusammen und wurde durch die Gesamtzahl der Messungen geteilt.

Schichtung der Retina im Bereich der CFT:

Zusätzlich wurde die Schichtung der Retina am tiefsten Punkt der Fovea, sowohl im Vertikal- und im Horizontalscan als auch OD und OS, mittels 0- und 1-Score beschrieben (0 = nicht vorhanden, 1 = vorhanden) und das Vorhandensein der einzelnen Schichten in Prozent ausgedrückt. Konnte eine Schicht nicht eindeutig erkannt oder zugeordnet werden, wurde sie nicht in die Auswertung aufgenommen.

Die Entscheidung über das Vorhandensein und die Messwerte der Schichten Retinale Nervenfaserschicht (RNFL), Ganglienzellschicht (GCL), innere plexiforme Schicht (IPL), innere Körnerschicht (INL), äußere plexiforme Schicht (OPL), äußere Körnerschicht (ONL), äußere Grenzmembran (ELM), Übergang der Innen- zu den Außensegmenten der Fotorezeptoren (IS/OS), retinales Pigmentepithel/Basalmembran (RPE/BM) setzten sich aus den Ergebnissen der Längs- und Querscans von OD und OS zusammen.

**3.3.6.1.2. Abstand der Eminenzen:**

Für den Abstand der Eminenzen N-T (= nasal-temporal) wurde ein Gesamtmittelwert aller Querscans der rechten und der linken Augen errechnet und die Standardabweichung gebildet. Für den Abstand der Eminenzen S-I wurde jeweils ein Gesamtmittelwert aller Längsscans OD und OS und die Standardabweichung errechnet.

**3.3.6.1.3. Dickenmessungen der Schichten der Eminenzen**

Es wurde ein Gesamtmittelwert der Retinadicke (TRT) der fovealen Eminenzen (nasal, temporal, superior, inferior) und ein Gesamtmittelwert für die Dicke der Schichten retinale Nervenfaserschicht und Ganglienzellschicht (RNFL&GCL), innere



plexiforme Schicht und innere Körnerschicht (IPL&INL), äußere plexiforme Schicht bis zur äußeren Grenzmembran (OPL-ELM), innere Körnerschicht bis äußere Grenzmembran INL-ELM und äußere Grenzmembran bis unterhalb des Retinalen Pigmentepithels/der Basalmembran (ELM-RPE/BM) im Bereich der vier Messpunkte der Eminenzen gebildet. Hierfür wurde jeweils ein Mittelwert für den jeweiligen Schichtkomplex (z. B. RNFL&GCL der nasalen Eminenz) im rechten Auge und im linken Auge errechnet und ein Gesamtmittelwert aus OD und OS und die Standardabweichung erstellt. Für die Eminenzen nasal und temporal wurden die Horizontalscans der Fovea (durch die tiefste Stelle) verwendet, für die Eminenzen superior und inferior die Vertikalscans.

Aus den Messwerten für die einzelnen Komplexe der beiden Eminenzen des Horizontalscans (nasal und temporal) und denen des Vertikalscans (superior und inferior) wurde anschließend ein Mittelwert und die Standardabweichung gebildet.

### **3.3.6.2. Retinaler Zwischenbereich**

Für den retinalen Zwischenbereich wurde der Mittelwert und die Standardabweichung aus den Längs- und den Querschnitten des rechten und des linken Auges gebildet, um einen durchschnittlichen Wert für die retinale Gesamtdicke (TRT, total retinal thickness), die retinale Nervenfaserschicht und Ganglienzellschicht (RNFL&GCL), die innere plexiforme Schicht und innere Körnerschicht (IPL&INL), die äußere plexiforme Schicht bis zur äußeren Grenzmembran (OPL-ELM), die innere Körnerschicht bis äußeren Grenzmembran INL-ELM und für die äußere Grenzmembran bis unterhalb des Retinalen Pigmentepithels/der Basalmembran (ELM-RPE/BM) zu erhalten.

## **IV. ERGEBNISSE**

### **1. Ergebnisse der Ophthalmoskopie**

Im Rahmen der ophthalmologischen Untersuchung von 56 Greifvogelpatienten der Klinik für Vögel, Reptilien, Amphibien und Zierfische der LMU wurden bei 25 Vögeln (48 %) okuläre Läsionen nachgewiesen. Bilateral auftretende Veränderungen wurden bei 36 % (9 Tiere) der Vögel mit Augenveränderungen festgestellt. Bei 72 % (18 Tiere) der augenerkrankten Patienten waren eine oder mehrere Strukturen des Augenhintersegmentes betroffen. Bei drei Vögeln war der Augenhintergrund aufgrund einer Linsenluxation oder einer hochgradigen Einblutung in die vordere Augenkammer nicht einsehbar.

### **2. Ergebnisse aus anderen ophthalmologischen Untersuchungsverfahren**

Zehn Patienten erhielten zusätzlich zur Ophthalmoskopie und OCT noch eine Untersuchung mittels Sonografie (vier Patienten) oder Pupillometrie (acht Patienten). Zwei Patienten erhielten beides. Einer der beiden, ein Mäusebussard, wies bei Ophthalmoskopie, OCT und Sonografie sichtbare Veränderungen im Fundus auf. Die Untersuchung mittels Pupillometer war hingegen unauffällig. Der zweite Vogel, ein Habicht, zeigte bei der Ophthalmoskopie beidseits eine geringgradige Chorioretinitis maculosa disseminata. Die Augen waren jedoch weder sonografisch noch in der OCT-Untersuchung noch in der Pupillometrie verändert. In Tab. 2 findet sich eine Übersicht der bei den untersuchten Patienten festgestellten Veränderungen am Augenhintergrund.

**Tabelle 2:** Ergebnisse von Ophthalmoskopie, Sonografie, Pupillometrie und OCT bei zehn Patienten mit Veränderungen des Augenhintergrundes (MB= Mäusebussard, TF= Turmfalke, WB = Wespenbussard; n.d. = nicht durchgeführt; obB = ohne besonderen Befund; OD = oculus dexter, OS = oculus sinister; Fc = Fovea centralis; PLR = Pupillenlichtreflex).

Vogelart	Ophthalmoskopie	Sonografie	OCT	Pupillometrie
<b>MB</b>	OD: Blutkoagel, in Peripherie chorioretinitischer Herd OS: obB	OD: Blutkoagel, fragliche Netzhautablösung OS: obB	OD: in der Fundusaufsicht aufgehellte, rundliche Bereiche dorsal der Pektenspitze, im OCT unauffällig OS: obB Bds beide Foveae unauffällig	obB
<b>MB</b>	OD: Glaskörperblutung, Retinaödem in der Peripherie OS: Fc nicht darstellbar	n.d.	Bds. hgr. Einblutung, Retina nicht darstellbar	obB
<b>MB</b>	bds. obB	n.d.	bds. obB	Bds. keine Pupillenreaktion (auf sämtliche Lichtreize)
<b>MB</b>	OD: schwer beurteilbar, evtl. leicht aufgeworfene Retina OS: Blutung	n.d.	OD: große Retinaläsion zw. Pecten oculi und Fc, Fc wirkt ödematös im Tomogramm OS: nicht untersuchbar, da Auge vollständig verändert	OD: PLR kaum vorhanden OS: kein PLR
<b>MB</b>	OD: obB OS: Pektenblutung, kl. Veränderungen neben Pektenspitze	bds. Einblutung in hintere Augenkammer, Linse obB	OD: Blutung, veränderte Linse OS: Blutung ventro-temporal	n.d.
<b>Sperber</b>	OD: obB OS: Pektenblutung, kl. Veränderungen neben Pektenspitze	n.d.	Fundusaufsicht: bds. rundliche dunklere Bereiche nasal des Pektens; Im OCT bds. obB	OD: PLR verzögert OS: obB
<b>Habicht</b>	bds. hgr. Einblutung	n.d.	bds. höchstgradige Einblutung	obB
<b>Habicht</b>	bds. ggr. Chorioretinitis maculosa disseminata	bds. obB	bds. obB	bds. obB
<b>TF</b>	OD: alte Pektenblutung OS: alte ablatio retinae dorsonasal	n.d.	Aufnahmen nicht mögl. (Retinaschichtung stark aufgehoben; stressbedingter Abbruch)	OD nur leichter PLR OS: kein PLR
<b>WB</b>	OD: obB OS: nicht einsehbar (hgr. Einblutung)	OD: obB OS: hgr. Einblutung mit Anheftung an Linse und Pecten oculi	OD: in Fundusaufsicht kleine dunkle Bereiche, im OCT-Tomogramm obB OS: Retina nicht darstellbar	n.d.

### **3. Untersuchung mittels Optischer Kohärenztomografie**

#### **3.1. Toleranz und Verträglichkeit der Untersuchung**

Insgesamt wurde die Untersuchung mittels OCT von den 56 untersuchten Patienten gut toleriert. 34 Patienten konnten wach oder mit einer nur leichten Sedation untersucht werden. 16 Tiere erhielten eine Sedation mit Midazolam, 13 Patienten intranasal, zwei oral und ein Patient intramuskulär. Alle Tiere erholten sich problemlos und innerhalb von maximal zwei Stunden. Drei Tiere (Mäusebussard, Wanderfalke, Waldohreule) wurden aufgrund erhöhter Stressanfälligkeit in Narkose untersucht. Bei 19 Tieren erfolgte die OCT-Untersuchung aufgrund einer infausten Prognose mit anschließender Euthanasie in Allgemeinanästhesie mit Narkosemonitoring. Unsedierte Tiere zeigten z. T. Abwehrbewegungen wie Flügelschlag, Strampeln und Befreiungsversuche während der Fixierung und Ausrichtung des Patienten. Bei sedierten und unsedierten Patienten kam es beim Wechsel des zu untersuchenden Auges gegebenenfalls zu erneuten Abwehrbewegungen (Kopfbewegungen, Versuche die Flügel zu bewegen oder Greifen mit dem Fang). Bei drei Tieren, welche jeweils ohne Sedation oder Narkose untersucht worden waren, wurde die Untersuchung aufgrund von stressbedingter Tachypnoe abgebrochen. Bei keinem der anästhesierten oder sedierten Tiere kam es zu (Narkose-) Zwischenfällen. Keiner der Patienten zeigte nach einer OCT-Untersuchung Anzeichen von Schmerzen oder Irritationen der Augen. Auffallend war jedoch bei vereinzelt Patienten, die ein akutes Augentrauma erlitten hatten, beim Einschalten des OCT-Scanners ein Zukneifen der Augenlider des schmerzenden Auges. Dies wurde vermutlich durch den hohen Pfeifton während des Scanvorgangs verursacht.

Die Messungen des Augeninnendrucks, die in aufrecht gehaltener Position der Patienten durchgeführt wurden, ergaben einen durchschnittlichen Druck von 15,5 mmHg vor der OCT-Untersuchung. Die Durchschnittswerte pro Vogelart sind in Tab. 3 aufgeführt. Nach der OCT-Untersuchung betrug der Druck durchschnittlich 14,18 mmHg (Tab. 3).

**Tabelle 3:** Übersicht des durchschnittlichen Augeninnendrucks, gemessen mittels Tono-Vet (Fa. Acrivet, Heningsdorf, Deutschland), vor und nach den OCT-Aufnahmen (n=24).  
n = Anzahl der vermessenen Tiere

<b>Vogelart</b>	<b>n davor</b>	<b>Ø Druck vor OCT in mmHg</b>	<b>SD (vor OCT)</b>	<b>Ø Druck nach OCT in mmHg</b>	<b>SD (nach OCT)</b>	<b>n danach</b>
Mäusebussard	8	<b>26,83</b>	5,18	<b>25,73</b>	3,24	5
Wespenbussard	2	<b>17,05</b>	3,49	<b>15,98</b>	2,75	2
Habicht	2	<b>17,48</b>	2,17	<b>19,48</b>	1,12	2
Turnfalke	5	<b>10,58</b>	3,42	<b>10,07</b>	3,05	3
Wanderfalke	1	<b>13,65</b>	2,33	<b>11,60</b>	-	1
Waldohreule	4	<b>10,56</b>	3,59	<b>10,20</b>	2,04	3
Waldkauz	1	<b>13,50</b>	0,71	<b>13,00</b>	1,41	1
Raufußkauz	1	<b>14,25</b>	1,06	<b>10,75</b>	1,06	1
Steinkauz	1	<b>12,65</b>	0,49	<b>10,80</b>	2,55	1

### 3.2. Untersuchungsdauer:

Die durchschnittliche Untersuchungsdauer der beiden Foveae eines Auges betrug beim tagaktiven Greifvogel 6,3 Minuten. Bei den nachtaktiven Tieren verringerte sich die Untersuchungszeit, da nur eine Fovea pro Auge vorhanden war, auf 5,0 Minuten. Die durchschnittliche Untersuchungsdauer pro Fovea betrug 4,15 Minuten.

Die Untersuchungszeit hing stark von der Kooperation des Patienten ab. Tiere mit Schreckstarre wie Strigiformes waren leicht zu untersuchen, Falconiformes waren etwas schwieriger zu handeln. Es konnte vorkommen, dass Tiere trotz Sedation noch leichte Abwehrbewegungen zeigten. Natürlich vorkommende Kopf- und Augenbewegungen erschwerten die Datenerhebung, führten zu Artefakten im OCT-Tomogramm und verlängerten die Untersuchungsdauer bis zum Erhalt auswertbarer Aufnahmen. Durch Einsatz des Eye Tracking konnten jedoch, trotz Bewegungen des Patienten, qualitativ gute Bilder angefertigt werden. Bei sedierten Tieren konnte es außerdem zum leichten Nickhautvorfall kommen, der zu einer Vignettierung des Bildes führte. In diesen Fällen wurde die Nickhaut mit einem angefeuchteten Wattestäbchen für die Aufnahmen kurzzeitig und vorsichtig, ohne

Druck auf den Bulbus auszuführen, nach unten geschoben. Auch die Augengröße hatte einen Einfluss auf die Untersuchungsdauer. Je kleiner das Auge, umso schwieriger ließen sich der Fundus und die Foveae darstellen. Dies traf insbesondere für die tagaktiven Tiere, und hierbei für die kleinste untersuchte Art, den Turmfalken, zu. Interessanterweise waren die Foveae bei den kleinen Arten der nachtaktiven Spezies wie Steinkauz und Raufußkauz trotzdem problemlos darstellbar. Eine gewisse Vignettierung aufgrund der Augengröße ließ sich jedoch nicht verhindern.

Bei Tieren mit erhöhter Stressanfälligkeit, die in Inhalationsnarkose untersucht wurden, erschwerte der Trachealtubus die Schwenkbarkeit und Ausrichtung der Kamera, was die Dauer der Untersuchung und die Darstellung der Fovea bzw. eine Untersuchung des Fundus erschwerte.

## **4. Darstellung der physiologischen Strukturen mittels OCT**

### **4.1. Ein- und Ausschlusskriterien**

In die Messungen der Foveae und Zwischenbereiche wurden 42 Tiere und insgesamt 74 Augen einbezogen. Bei diesen Patienten wurden die Augen erfolgreich untersucht und die Foveae deutlich dargestellt. In die Auswertung gingen nur physiologisch aufgebaute Foveae bzw. Zwischenbereiche sowie qualitativ gute Aufnahmen ohne Artefakte ein. In diesen Fällen waren die Schichten alle gut abgrenzbar. Für die Auswertung der Foveae wurde das Schnittbild verwendet, das den tiefsten Punkt der Augengrube zeigte. Etwa zwei Drittel dieser Patienten waren tagaktive Greifvögel (29 Tiere mit 52 untersuchten Augen). Bei einem Drittel handelte es sich um nachtaktive Vögel (13 Patienten mit 22 Augen).

Allerdings wurden nicht bei allen Vögeln alle zu untersuchenden Bereiche in die Auswertung einbezogen. Vögel, bei denen die Fovea centralis, die Fovea temporalis oder der Zwischenbereich hochgradig verändert waren, also vom physiologischen Bild abwichen, wurden nicht aufgenommen. Bei diesen Vögeln wurden nur diejenigen Bereiche, die physiologisch unauffällig und vermessbar waren, einbezogen.

### **4.2. Darstellung und Messungen der Foveae**

Abbildung 17 stellt eine Aufnahme des Fundus mit konfokalem Scanning-Laser-Ophthalmoskop (links) und das zugehörige Tomogramm der

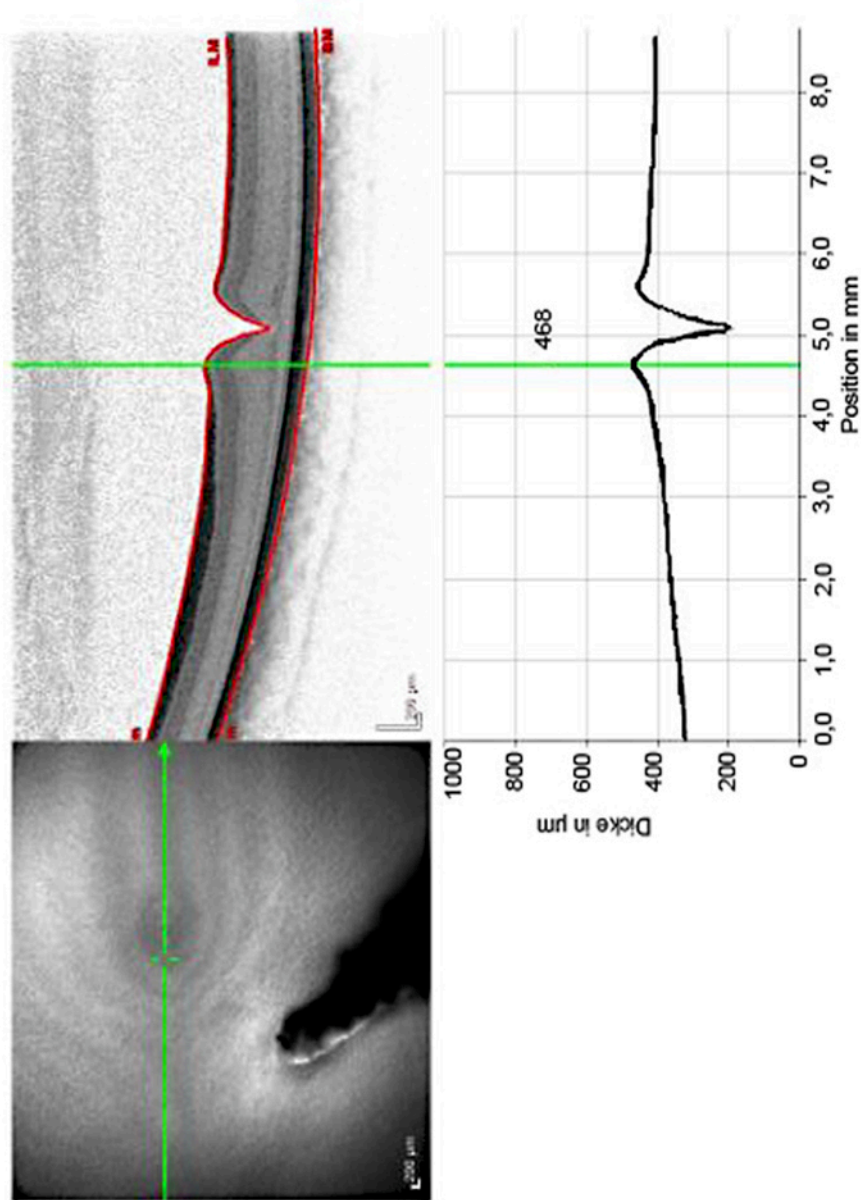
Optischen Kohärenztomografie (rechts) dar. In der Fundusaufsicht ist deutlich der Pecten oculi, der Verlauf der choroidalen Gefäßkaskade im Äquator des Auges und die Fovea centralis zu erkennen. Darunter wird von der Software die Dicke des zu vermessenden Bereichs, in diesem Fall die der TRT der temporalen Eminenz der Fovea, als Grafik wiedergegeben. Die grünen Linien in der cSLO- und in der OCT-Aufnahme zeigen die Position des Laserscanners an. Im OCT-Tomogramm (rechtes Bild) konnte mittels roter Segmentierungslinien der zu vermessende Bereich festgelegt werden. In dem in der Abbildung 17 dargestellten Fall wurde die gesamte Retinadicke (TRT) von der ILM bis zur BM vermessen. Der Messwert ist in der Grafik unterhalb davon abzulesen.

Die Bezeichnung und Zuordnung der Retinaschichten der Fovea centralis, der Fovea temporalis und des retinalen Zwischenbereichs erfolgte wie beschrieben in Kapitel 3.6.2., II. Literaturübersicht, und ist exemplarisch in Abb. 18 dargestellt. Diese Abbildung findet sich auch im Anhang I als Teil eines Ausfaltblattes (Abb. A-I) wieder. Sie soll als Hilfestellung beim Lesen des Ergebnisteils dienen, da im Weiteren nur die Abkürzungen der Bezeichnungen der Schichten verwendet werden.

#### **4.3. Ergebnisse der Retina-Messungen**

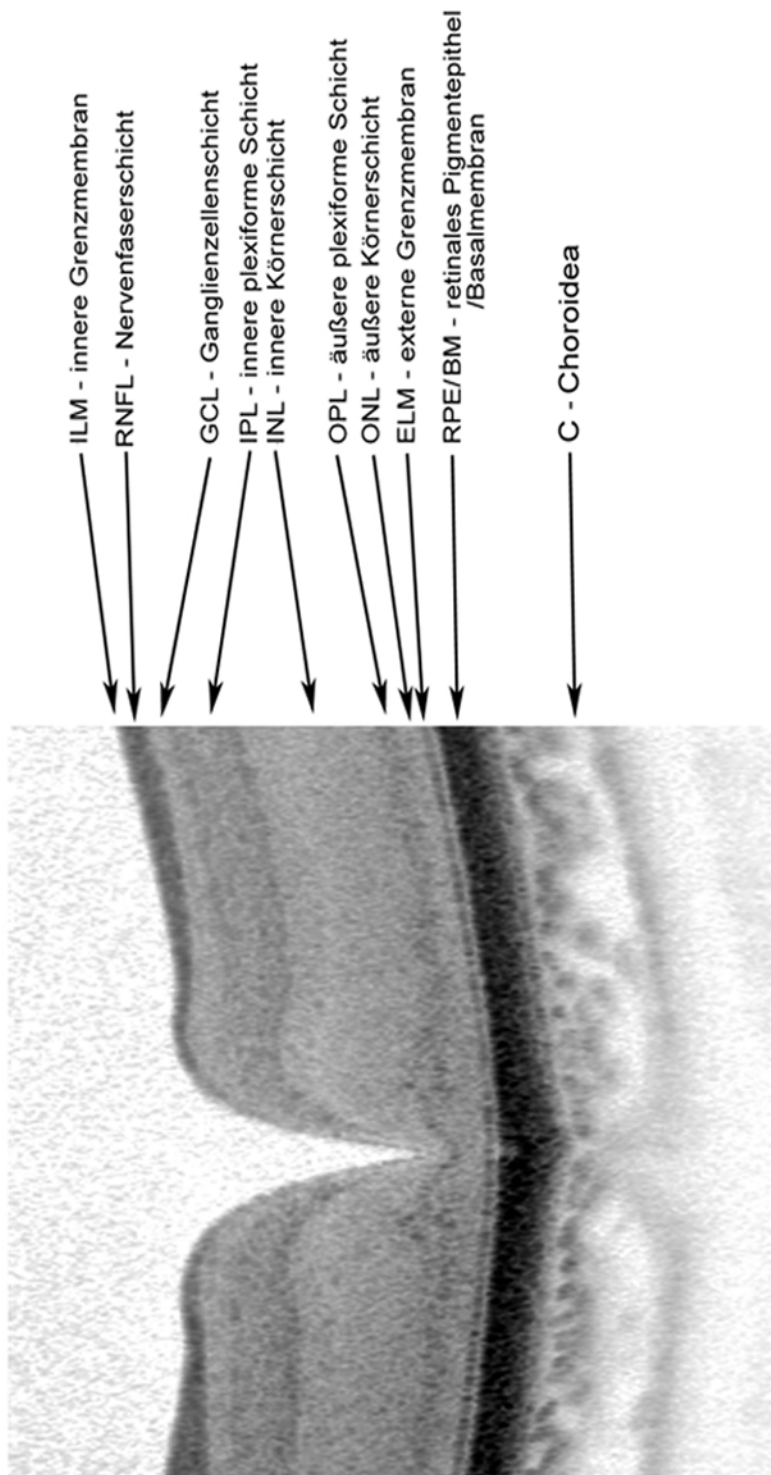
Die einzelnen Messwerte der Schichtkomplexe der unterschiedlichen, untersuchten Bereiche, die in Abb. 19 grafisch dargestellt sind, werden im Anhang (Tab. II-A bis II-C, Tab IV-A und IV-B, Tab. V-A bis V-C) im Einzelnen aufgeführt. Zusätzlich sind die dazu gehörenden Standardabweichungen, die Gesamtzahl der einbezogenen Messungen pro untersuchten Parameter und die untersuchte und für das Ergebnis einbezogene Anzahl an Tieren und Augen pro Parameter zu finden. Es werden die Ergebnisse zur Fovea centralis und Fovea temporalis dargestellt. Weiterhin sind hier auch die Ergebnisse zum Zwischenbereich (Schnittpunkt von Äquator und der Verlängerung einer gedachten Linie durch den Pecten oculi) zu finden.

Abbildung 19 findet sich zusätzlich im Anhang I wieder als Teil eines Ausfaltblattes (Abb. A-I). Dieses Ausfaltblatt soll als Hilfestellung beim Lesen des Ergebnisteils dienen, da im Weiteren nur die Abkürzungen der Schichten verwendet werden.



**Abbildung 17:** Darstellung einer OCT-Aufnahme unter Verwendung des Software-Programmes HEYEX®. Links ist die Aufnahme des cSLO, rechts oben das OCT-Tomogramm und rechts unten die Dickengraphik des festgelegten Bereiches zu sehen. In diesem Fall handelt es sich um einen Horizontal-scan des rechten Auge eines Habichts. Dargestellt wird die Retinagesamtdicke (TRT) der temporalen Eminenz der Fovea centralis.





**Abbildung 18:** OCT-Tomogramm (B-Scan) einer physiologischen Fovea centralis beim Mäusebussard. Die verschiedenen Banden korrelieren mit der anatomischen Schichtung der Retina. Als oberste Banden sind die retinale Nervenfaserschicht (RNFL) und die Ganglienzellschicht (GCL) erkennbar. Es folgen die innere plexiforme Schicht (IPL), die innere Körnerschicht (INL), die äußere plexiforme Schicht (OPL) und die äußere Körnerschicht (ONL). Unter der hyperreflektiven Bande der äußeren Körnerschicht ist die sehr dünne, hyperreflektive Bande der äußeren Grenzmembran (ELM) zu erkennen. Darunter findet sich ein schmaler Bereich, der dem Übergang der Innen- zu den Außensegmenten der Fotorezeptoren darstellt (IS/OS-Komplex). Die sich anschließende hyperreflektive, breite Bande entspricht dem retinalen Pigmentepithel (RPE). Die darunterliegende Basalmembran (BM) ist nicht immer deutlich abzugrenzen. Abschließend ist die beim Greifvogel deutlich darstellbare, wenig reflektierende Choroidea (C) zu erkennen.

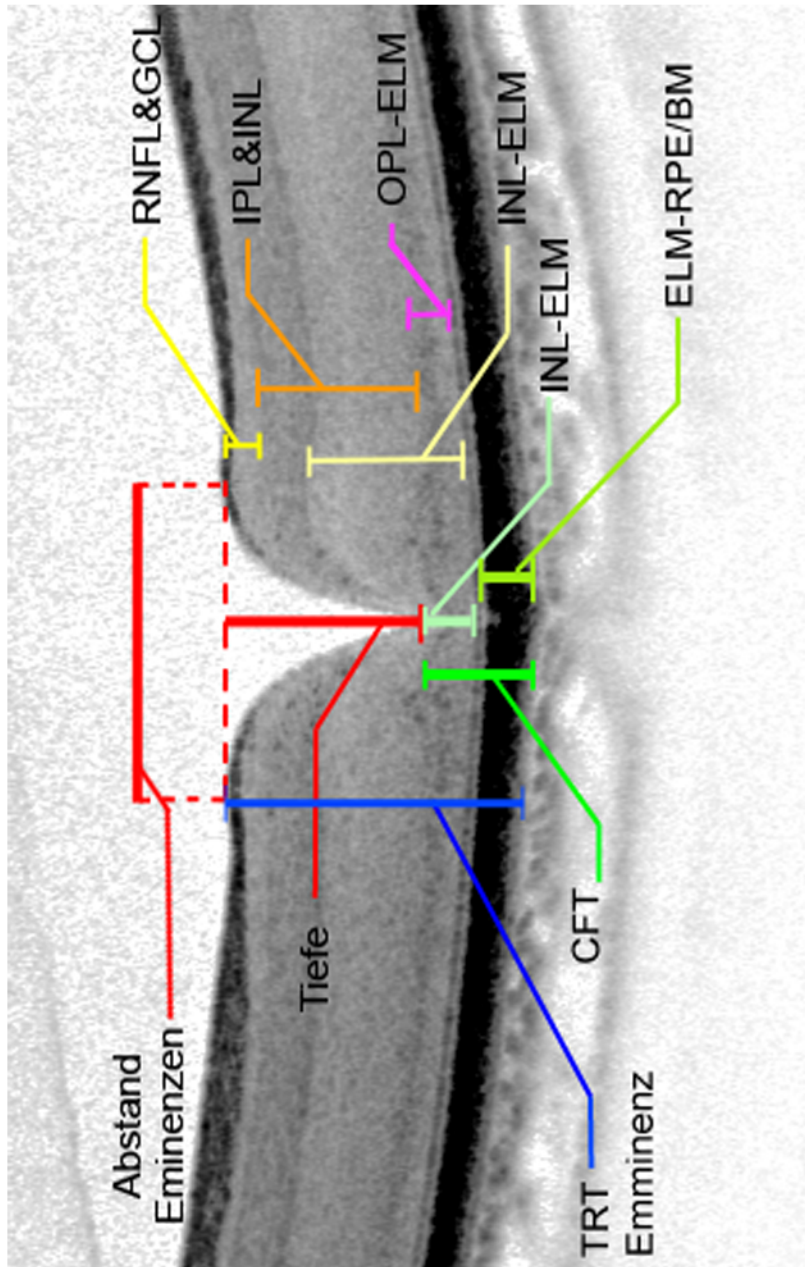


Abbildung 19: Beispiel der vermessenen Schichtkomplexe. **Höchster Punkt der Eminenz:** retinale Gesamtdicke (TRT; total retinal thickness), retinale Nervenfaserschicht und Ganglienzellschicht (RNFL&GCL), innere plexiforme Schicht und innere Körnerschicht (IPL&INL), äußere plexiforme Schicht bis zur äußeren Grenzmembran (OPL-ELM), innere Körnerschicht bis äußere Grenzmembran (INL-ELM) und äußere Grenzmembran bis unterhalb des Retinalen Pigmentepithels/der Basalmembran (ELM-RPE/BM). Außerdem: Abstand der Eminenzen. **Zentrale Fovea:** zentrale foveale Retinadicke (CFT, central foveal thickness), Foveatiefe, Schichtkomplex der inneren Körnerschicht bis äußeren Grenzmembran (INL-ELM) und der Komplex äußere Grenzmembran bis unterhalb des Retinalen Pigmentepithels/der Basalmembran (ELM-RPE/BM)

#### 4.4. Tagaktive Greifvögel: Accipitriformes und Falconiformes im Vergleich

##### *Mäusebussard:*

Bei insgesamt 12 Patienten konnten zufriedenstellende Aufnahmen der Foveae und des retinalen Zwischenbereichs gemacht werden, so dass 21 Augen in die Auswertung eingingen.

##### *Sperber:*

Bei vier Patienten konnten Aufnahmen der Foveae gemacht werden. Es gingen sechs Augen in die Auswertung ein. Insgesamt war die Darstellung des Fundus mit einer gleichmäßigen Ausleuchtung nicht möglich. Bei allen Augen trat Vignettierung auf. Für den Abstand der Eminenzen S-I und die Schichtkomplexe in der Eminenz superior und inferior der F. temporalis gibt es jeweils nur **einen** Messwert, so dass der Mittelwert der Schichtkomplexe der Eminenzen N/T nur von **einem** einzelnen Individuum stammen.

##### *Habicht:*

Bei zwei Patienten konnten Aufnahmen der Foveae gemacht werden. Es gingen vier Augen in die Auswertung ein.

##### *Turnfalke:*

Zwei Patienten konnten in die Auswertung einbezogen werden, davon vier Augen. Bei allen vier Augen konnten Aufnahmen der Foveae gemacht werden.

##### *Wanderfalke:*

Bei drei Patienten konnten Aufnahmen der Foveae gemacht werden. Es gingen sechs Augen in die Auswertung ein.

##### *Rohrweihe:*

Bei **einem** Patienten konnten Aufnahmen der Foveae gemacht werden. Es gingen zwei Augen in die Auswertung ein. Hier konnte die F. temporalis aufgrund pathologischer Veränderungen in beiden Augen nicht dargestellt werden. Es sind daher keine Messwerte zur F. temporalis vorhanden.

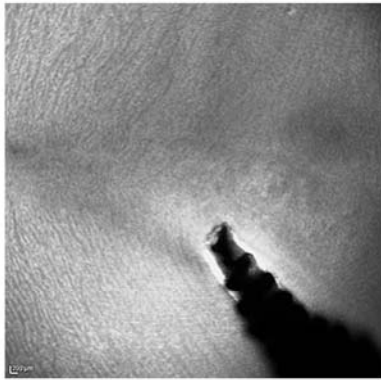
##### *Wespenbussard:*

Bei fünf Patienten konnten Aufnahmen der Foveae gemacht werden. Es gingen 9 Augen in die Auswertung ein. Die Schichten ELM und IS/OS konnten beim Wespenbussard in der zentralen Fovea centralis nicht abgegrenzt werden, da sie im Vergleich zu den sonstigen Greifvögeln sich völlig unterschiedlich darstellten. Für diese Komplexe werden daher keine Werte angegeben. Die Komplexe OPL-ELM und EML-RPE/BM der Eminenzen der Fovea centralis waren nicht differenzierbar.

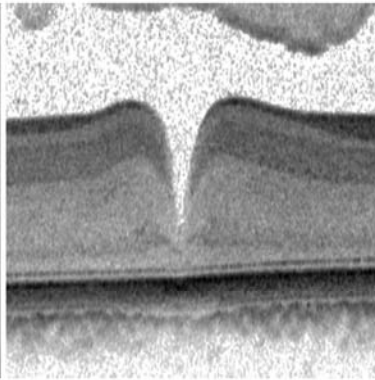
Der Wespenbussard hat physiologischerweise nur eine F. centralis, eine F. temporalis fehlt. Es konnten zudem keine Aufnahmen des Zwischenbereichs ausgewertet werden. Wegen dieser Besonderheiten wurde der Wespenbussard separat beschrieben.

Die einzelnen Messergebnisse des zentralen Bereiches der Foveae centrales und temporales, des Abstandes der Eminenzen, der Dickenmessungen der Schichten der vier Eminenzen und des retinalen Zwischenbereiches sind in den Tabellen im Anhang II bis IV aufgeführt. Die Auswertung der Messdaten erfolgte wie in Kap. 3.3.6. des Material- und Methodenteils beschrieben.

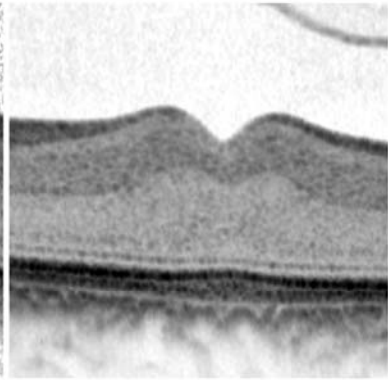
Nachfolgend ist eine vergleichende Übersicht der OCT-Aufnahmen der tagaktiven Greifvögel zu finden (Abb. 20). Zu sehen sind die Aufsicht auf den Augenhintergrund mittels cSLO und jeweils ein B-Scan der F. centralis und der F. temporalis. In der Fundusaufsicht sind die F. centralis und F. temporalis deutlich als rundliche, im Grauton abweichende Strukturen erkennbar. Die Gefäßkaskade stellt sich als dichter, horizontal verlaufender, grauer Streifen zwischen den beiden Foveae dar, von dem aus die Gefäße divergieren. Sie sind im Bild grau-weiß gestreift und schräg verlaufend. Der Pecten oculi ist partiell als dunkle, in das Bild hineinragende Struktur erkennbar. Er wird von einem hellen Bereich umsäumt, der dem Sehnervenkopf entspricht. In den Aufnahmen der OCT-B-Scans sind unterschiedliche Foveaformen zu erkennen. So war die F. centralis konvexiclivall geformt, die F. temporalis konkaviclivall.



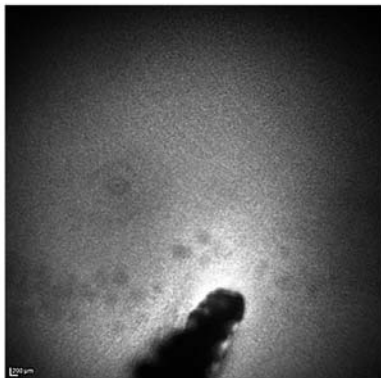
Fundusaufsicht MB 24734 OD



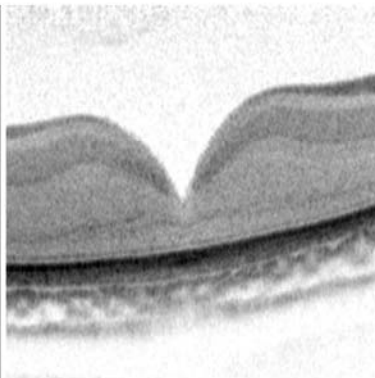
Fc MB 24889 OD, Vertikalscan



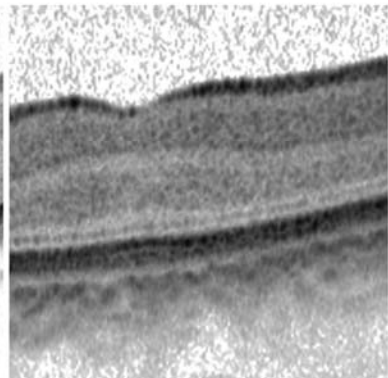
Ft MB 24889 OS, Vertikalscan



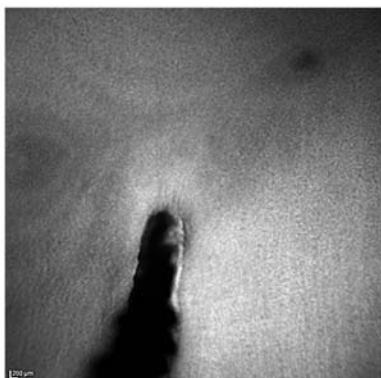
Fundusaufsicht Sperber 24235 OS



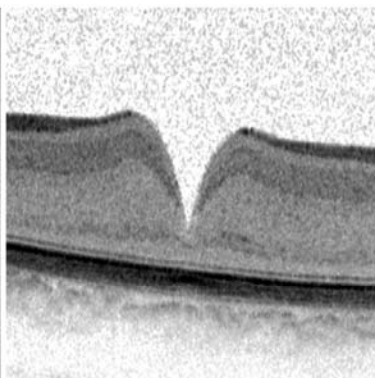
Fc Sperber 23909 OS, Horizontalscan



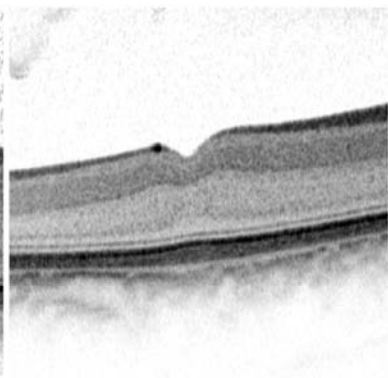
Ft Sperber 25089 OD, Vertikalscan



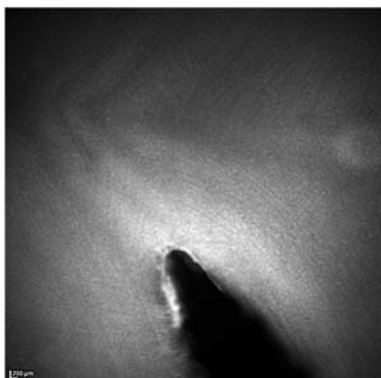
Fundusaufsicht Habicht 25419 OS



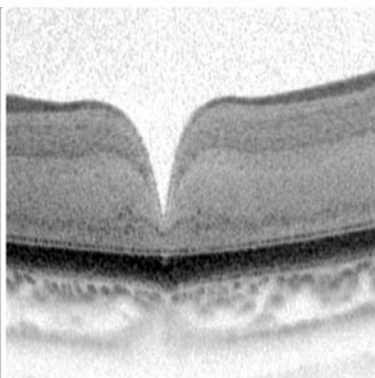
Fc Habicht 25419 OD, Horizontalscan



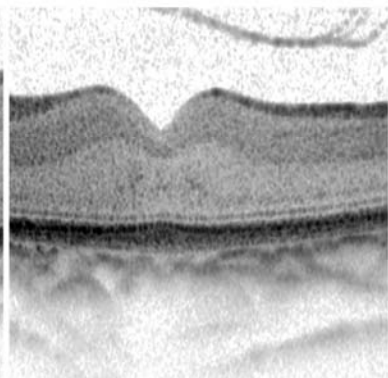
Ft Habicht 25419 OD, Horizontalscan



Fundusaufsicht TF 25494 OD

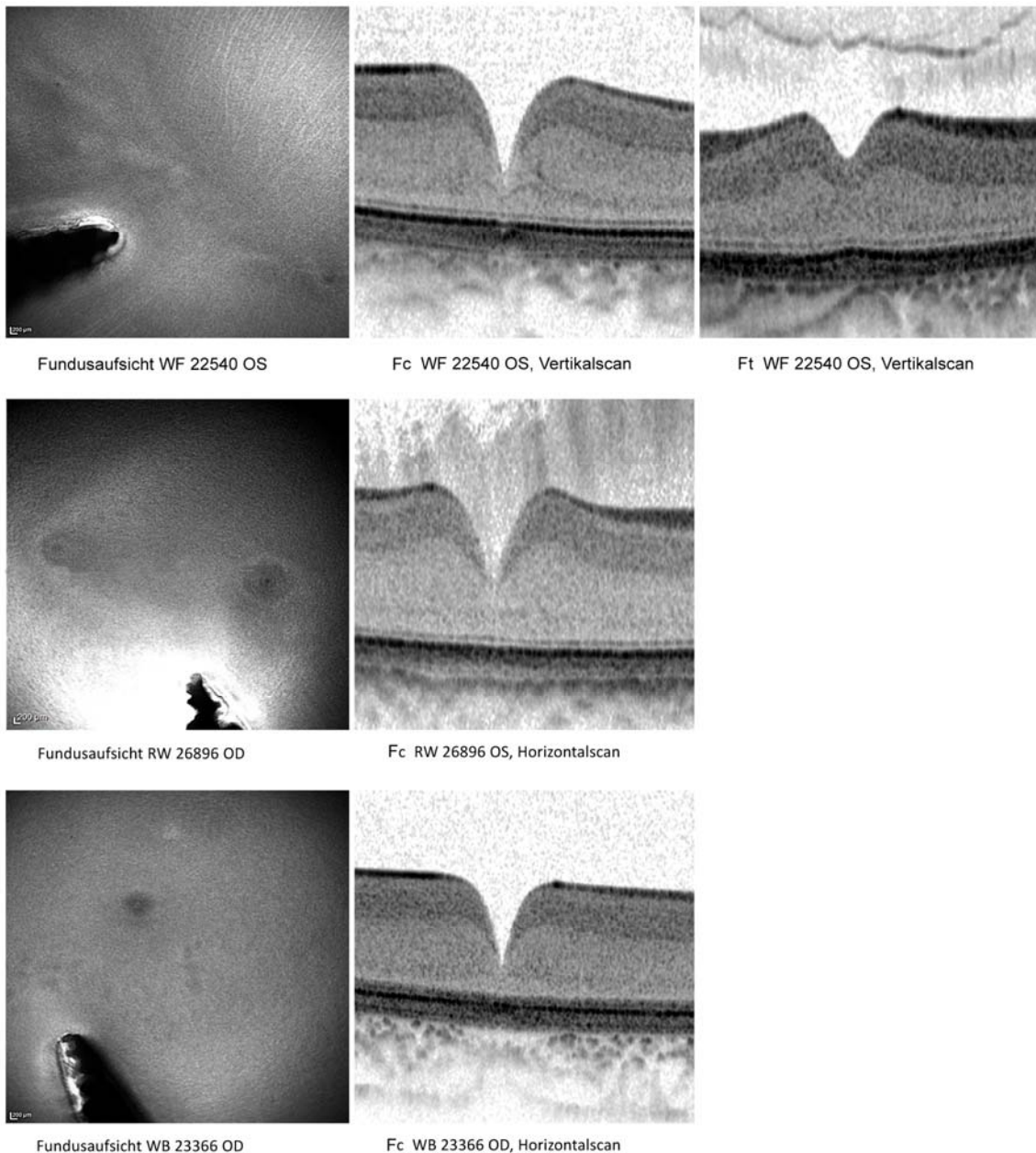


Fc TF 26654 OS, Horizontalscan



Ft TF 26654 OS, Vertikalscan





**Abbildung 20:** Bildertafel, tagaktive Greifvögel: Morphologische Darstellung der Fundusaufnahme mittels cSLO (links) sowie des OCT-Scans der Fovea centralis (Fc, mittleres Bild) und der Fovea temporalis (Ft, rechtes Bild) bei ausgewählten Patienten. MB = Mäusebussard, TF = Turmfalke, WF = Wanderfalke, RW = Rohrweihe, WB = Wespenbussard. Die angegebene Nummer entspricht der Patientennummer. OD, rechtes Auge, OS, linkes Auge.

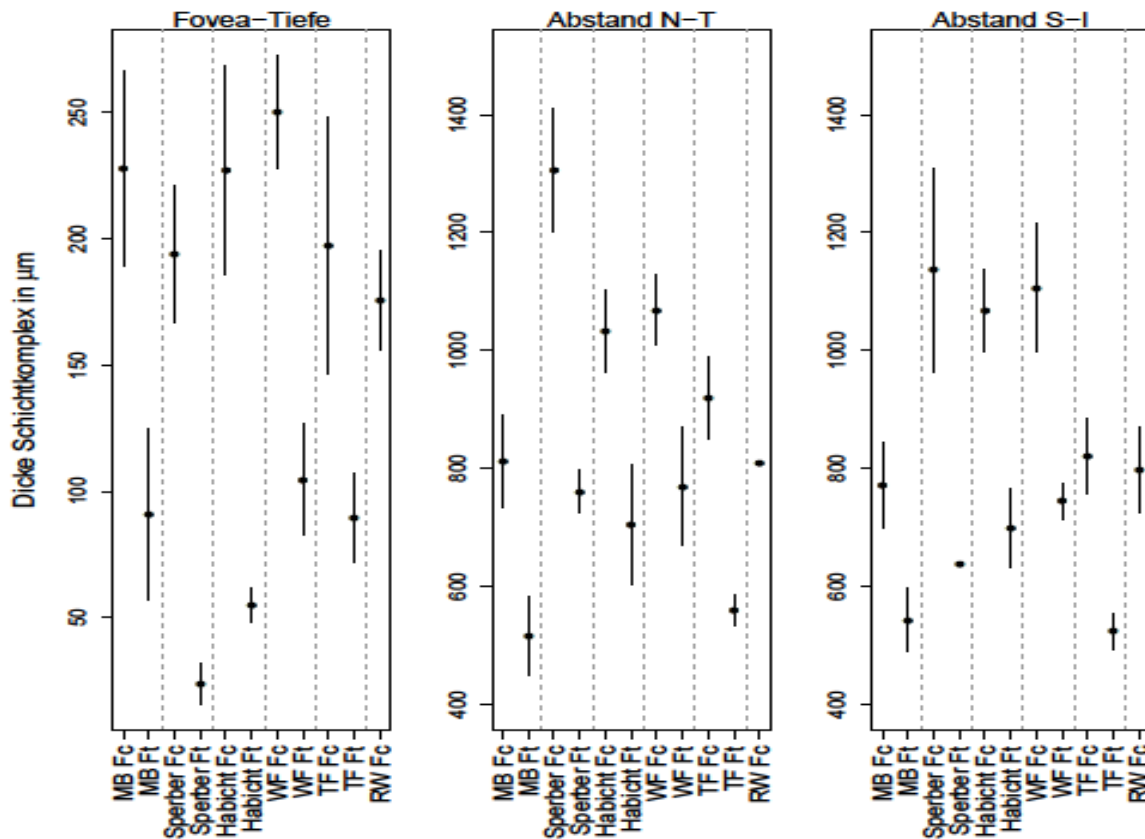
#### 4.4.1. Fovea centralis im Vergleich

Betrachtet man die äußeren Durchmesser der F. centralis, gemessen anhand der **Abstände der Eminenzen N-T und S-I**, fällt auf, dass die F. centralis an der Retinaoberfläche nicht kreisrund war, sondern eine längliche Form aufwies. Im Vergleich der einzelnen Taggreifvögeln untereinander wiesen die Sperber mit dem Abstand N-T von durchschnittlich 1305,17  $\mu\text{m}$  und S-I von durchschnittlich 1136,50  $\mu\text{m}$  die weitesten Abstände der Eminenzen auf, gefolgt von Turmfalke und Habicht mit vergleichbar weiten Dimensionen. Beim Wanderfalken waren die Ausmaße etwas kleiner. Mäusebussard und Rohrweihe hatten mit dem Abstand N-T von durchschnittlich 811,89 (MB) resp. 809,00 (RW) und dem Abstand S-I von durchschnittlich 771,29 (MB) und 798,00 (RW) die kleinsten Abstände und ähnelten sich darin (Abb. 21, Abb. 26).

Die **Tiefe der Fovea centralis** war beim Turmfalken mit im Mittel 250,19  $\mu\text{m}$  am größten, gefolgt von Mäusebussard und Habicht. Sperber und Wanderfalke ähnelten sich mit 194,13  $\mu\text{m}$  und 197,50  $\mu\text{m}$ . Am flachsten war sie mit 175,75  $\mu\text{m}$  bei der Rohrweihe. Die Tiefe war somit im Vergleich zum Turmfalken um 74  $\mu\text{m}$  geringer (Abb. 21, Abb. 26).

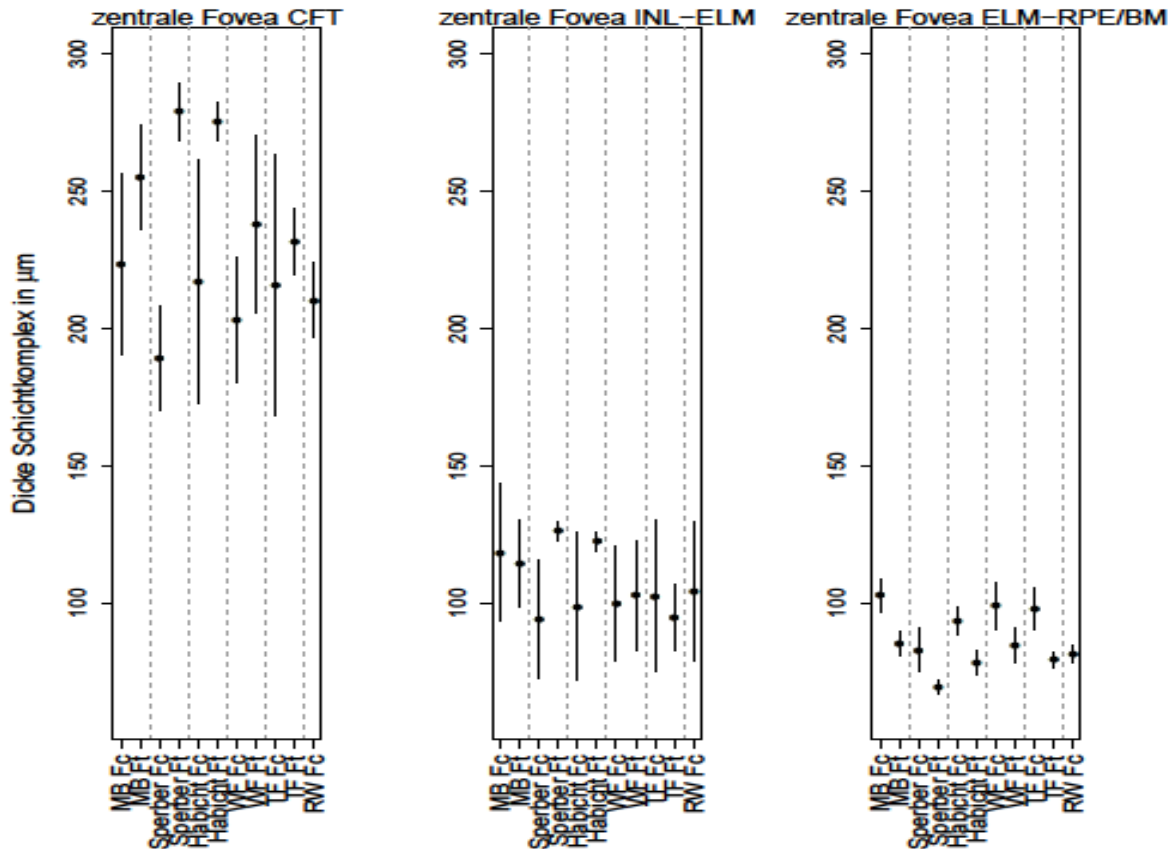
Betrachtet man die zentrale Retinadicke der Fovea (CFT) im Vergleich zu den sie umgebenden Eminenzen, fällt auf, dass sich die Schichtung hier bei allen Arten um ca. die Hälfte reduzierte. Am stärksten ausgeprägt war der Clivus der Fovea centralis beim Turmfalken (CFT = 44,82 % der TRT der Eminenzen), Sperber (CFT = 48,77 %), Habicht (CFT = 48,9 %) und Mäusebussard (CFT = 49,55 %). Beim Wanderfalken betrug die zentrale Retinadicke der Fovea etwas mehr als die Hälfte (52,13 %), ebenso bei der Rohrweihe (54,46 %) (Abb. 22). Die Dimensionen der Abstände der Eminenzen und die Tiefe der Fovea centralis waren demnach am markantesten bei Sperbern, Turmfalken und Habichten ausgeprägt (Abb. 21 und Abb. 26).

Die Dicke des Schichtkomplexes INL-ELM in der **zentralen Fovea** war bei allen Arten ähnlich. Er war im Vergleich zum Bereich der Eminenzen stets wesentlich dünner. Die Dicke des Schichtkomplexes ELM-RPE/BM in der zentralen Fovea variierte etwas zwischen den Arten. Beim Mäusebussard war dieser Komplex mit 102,78  $\mu\text{m}$  am dicksten, bei der Rohrweihe mit 81,33  $\mu\text{m}$  am dünnsten (Abb. 22). Er war bei allen Vögeln im Bereich der zentralen Fovea etwas dicker als im Bereich der Eminenzen.



**Abbildung 21:** Darstellung der Tiefe und der Abstände der Eminenzen der Fovea centralis und der Fovea temporalis der tagaktiven Greifvögel. Zu erkennen sind die Mittelwerte (Punkte) und die dazugehörigen Standardabweichungen (Linien). N = nasal, T = temporal, S = superior, I = Inferior, Fc = Fovea centralis, Ft = Fovea temporalis, MB = Mäusebussard, WF = Wanderfalke, TF = Turmfalke, RW = Rohrweihe





**Abbildung 22:** Darstellung der vermessenen Schichten in der zentralen Fovea centralis und in der Fovea temporalis der tagaktiven Greifvögel. Zu erkennen sind die Mittelwerte (Punkte) und die dazugehörigen Standardabweichungen (Linien). CFT = zentrale Foveadicke (central foveal thickness), INL-ELM = Schichtkomplex innere Körnerschicht (INL) bis äußere Grenzmembran (ELM), ELM-RPE/BM = Schichtkomplex äußere Grenzmembran (ELM) bis retinales Pigmentepithel/Basalmembran (RPE/BM), Fc = Fovea centralis, Ft = Fovea temporalis, MB = Mäusebussard, WF = Wanderfalke, TF = Turmfalke, RW = Rohrweihe

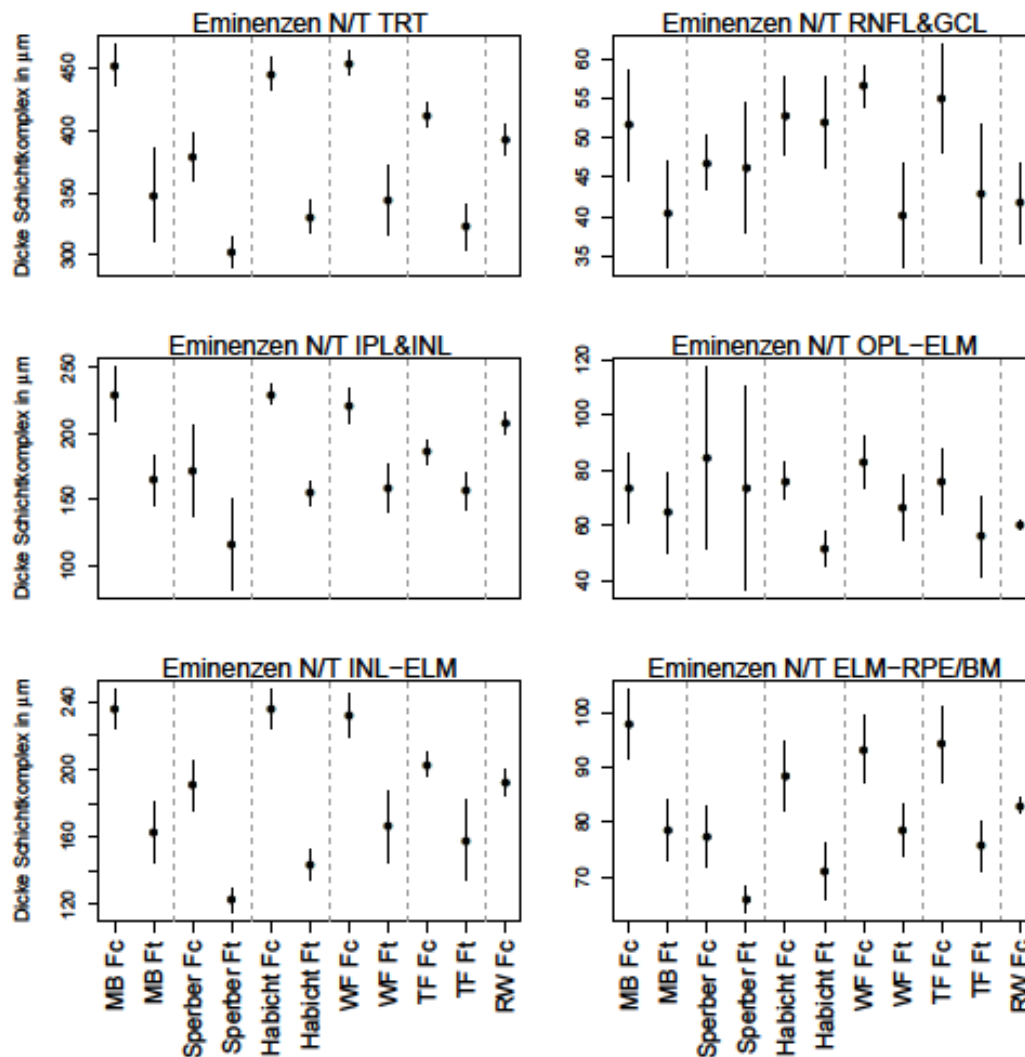
**Schichtung im zentralen Bereich** der F. centralis: Im Bereich der zentralen Fovea waren die in anderen Bereichen der Retina erkennbaren Schichten nur noch eingeschränkt sichtbar und voneinander abgrenzbar. So war die RNFL bei keinem tagaktiven Greifvogel im OCT-Tomogramm differenzierbar und die GCL nur in zwei B-Scans, und zwar bei einem Mäusebussard und einem Wanderfalken. Die IPL war in unterschiedlichem Ausmaß erkennbar. Beim Mäusebussard war sie nur bei 16 % der Scans abgrenzbar, bei Sperber, Turmfalke und Wanderfalke bei 13 %, beim Habicht bei 25 % und bei der Rohrweihe dagegen bei 75 % der Aufnahmen. Die INL war in allen Bildern erkennbar, mit Ausnahme des Sperbers. Hier konnte sie nur bei 87,5 % identifiziert werden. Die Schichten der äußeren Retina (OPL, ONL, ELM, IS/OS-Komplex und RPE/BM) waren bei allen tagaktiven Greifvogelarten identifizierbar. Eine Übersicht über die nachgewiesene Schichtung findet sich in Tabelle III-A im Anhang.

Vergleicht man die Dicke der Retinaschichten im Bereich der **Eminenzen N/T** mit denen im Bereich der **Eminenzen S/I innerhalb einer Vogelart** (Abb. 23 und 24), so lässt sich sagen, dass bei Mäusebussard, Habicht, Turmfalke und Wanderfalke sich die Werte der Schichtkomplexe TRT, RNFL&GCL, IPL&INL, OPL-ELM, INL-ELM und ELM-RPE/BM kaum unterschieden. Beim Sperber wurden an den Eminenzen S/I eine um 17 µm dickere TRT und eine um 27 µm dickere OPL-ELM im Vergleich zu den Eminenzen N/T festgestellt. Die restlichen oben genannten Komplexe unterschieden sich zwischen den Eminenzen N/T und S/I auch beim Sperber nur geringgradig. Bei der Rohrweihe, bei der jedoch nur ein Einzeltier für Messungen verfügbar war, unterschieden sich die Gesamtdicke der Eminenzen N/T und Eminenzen S/I ebenfalls. Erstere war um 15 µm dicker. Die restlichen Schichtkomplexe wiesen ähnliche Werte auf.

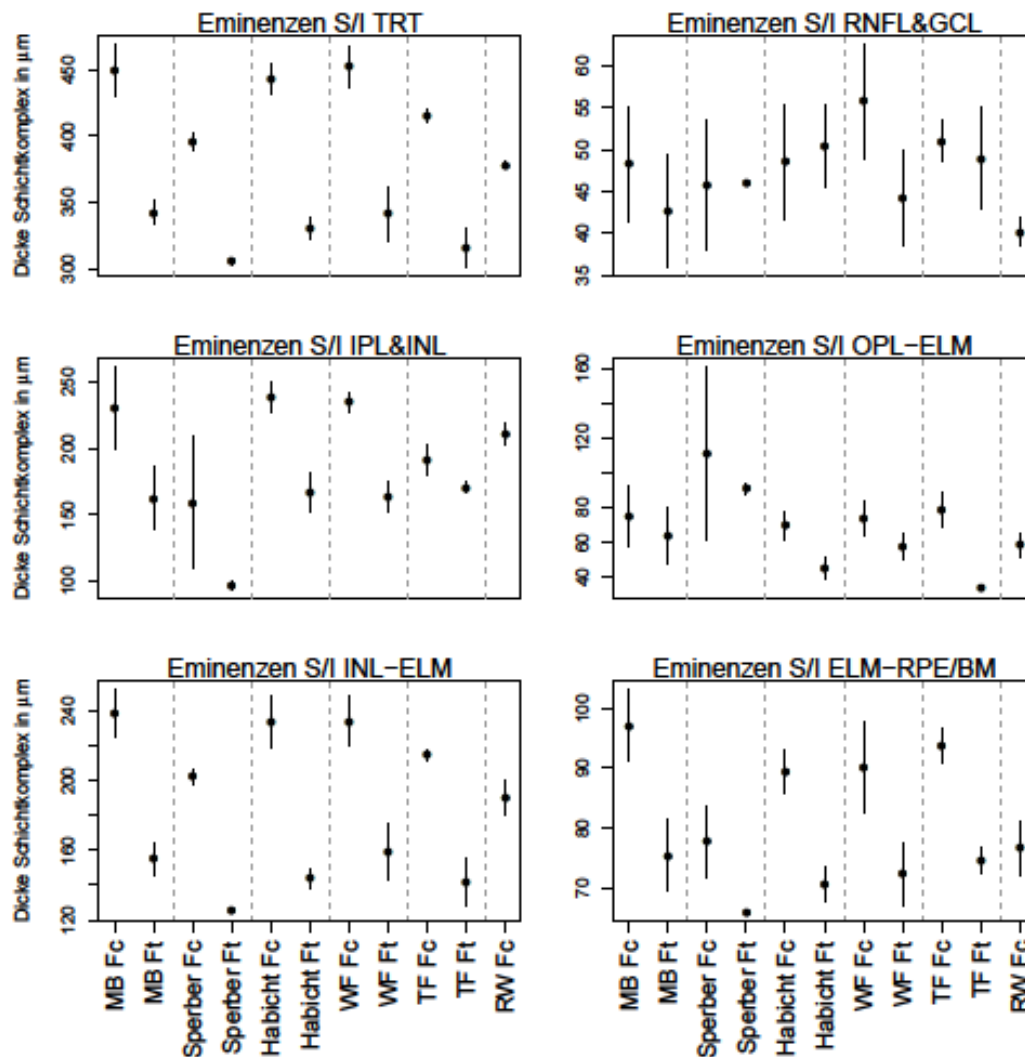
Addiert man die Messwerte für die beiden Komplexe IPL&INL und OPL-ELM, so waren diese Schichten bei allen Arten in den beiden Eminenzkomplexen N/T und S/I in der Summe gleich dick.

Vergleicht man die Retinadicke der **Eminenzen innerhalb der tagaktiven Gruppe** der Greifvögel **zwischen den Arten (interspezifische Variation)**, so war die Retina der Eminenzen bei Turmfalke und Mäusebussard mit etwa 450 µm am dicksten, gefolgt von Habicht, Wanderfalke, Sperber und Rohrweihe (absteigende Reihenfolge). Bei dieser letztgenannten Art konnte jedoch nur ein Einzeltier einbezogen werden. Die RNFL&GCL waren bei Turmfalke und Wanderfalke am dicksten. Sowohl der Komplex IPL&INL als auch der Komplex INL-ELM waren bei Sperber, Wanderfalke und Rohrweihe im Vergleich zu den restlichen Arten etwas dünner. OPL-ELM, also der die äußere Körnerschicht enthaltende Komplex, war bei

der Rohrweihe am dünnsten und beim Sperber am dicksten. Bei allen tagaktiven Greifen war der Komplex IPL&INL dicker als der Komplex OPL-ELM. Beim Mäusebussard, Habicht und Turmfalke waren die IPL&INL dreimal so dick wie die OPL-ELM, bei der Rohrweihe ca. 3,5 Mal, beim Wanderfalken ca. 2,5 Mal und beim Sperber doppelt so dick. Addiert man die beiden Komplexe IPL&INL und OPL-ELM, erreichten diese Schichten bei Mäusebussard, Habicht und Turmfalke eine Gesamtdicke von etwa 305  $\mu\text{m}$ , und waren somit dicker als bei Sperber, Wanderfalke und Rohrweihe mit 265  $\mu\text{m}$ . Der Komplex ELM-RPE/BM war bei Sperber und Rohrweihe am dünnsten, bei den restlichen Arten jedoch ungefähr gleich dick (Abb. 23 und 24).



**Abbildung 23:** Darstellung der vermessenen Schichten im Bereich der Eminenzen nasal und temporal der Fovea centralis und der Fovea temporalis der tagaktiven Greifvögel. Zu jedem Schichtkomplex wurde je ein Mittelwert aus den Messergebnissen der nasalen und der temporalen Eminenz gebildet. Zu erkennen sind die Mittelwerte (Punkte) und die dazugehörigen Standardabweichungen (Linien). N = nasal, T = temporal, TRT = Retinagesamtdicke (total retinal thickness), RNFL&GCL = Schichtkomplex der retinalen Nervenfaserschicht (RNFL) zusammen mit der Ganglienzellschicht (GCL), IPL&INL= Schichtkomplex der inneren plexiformen Schicht (IPL) und der inneren Körnerschicht (INL), OPL-ELM = Schichtkomplex der äußeren plexiformen Schicht (OPL) bis zur äußeren Grenzmembran (ELM), INL-ELM = Schichtkomplex der inneren Körnerschicht (INL) bis äußere Grenzmembran (ELM), ELM-RPE/BM = Schichtkomplex äußere Grenzmembran (ELM) bis retinales Pigmentepithel/Basalmembran (RPE/BM), Fc = Fovea centralis, Ft = Fovea temporalis, MB = Mäusebussard, WF = Wanderfalke, TF = Turmfalke, RW = Rohrweihe



**Abbildung 24:** Darstellung der vermessenen Schichten im Bereich der Eminenzen superior und inferior der Fovea centralis und der Fovea temporalis der tagaktiven Greifvögel. Zu jedem Schichtkomplex wurde je ein Mittelwert aus den Messergebnissen der Eminenz superior und der Eminenz inferior gebildet. Zu erkennen sind die Mittelwerte (Punkte) und die dazugehörigen Standardabweichungen (Linien). N = nasal, T = temporal, TRT = Retinagesamtdicke (total retinal thickness), RNFL&GCL = Schichtkomplex der retinalen Nervenfaserschicht (RNFL) zusammen mit der Ganglienzellschicht (GCL), IPL&INL= Schichtkomplex der inneren plexiformen Schicht (IPL) und der inneren Körnerschicht (INL), OPL-ELM = Schichtkomplex der äußeren plexiformen Schicht (OPL) bis zur äußeren Grenzmembran (ELM), INL-ELM = Schichtkomplex der inneren Körnerschicht (INL) bis äußere Grenzmembran (ELM), ELM-RPE/BM = Schichtkomplex äußere Grenzmembran (ELM) bis retinales Pigmentepithel/Basalmembran (RPE/BM), Fc = Fovea centralis, Ft = Fovea temporalis, MB = Mäusebussard, WF = Wanderfalke, TF = Turmfalke, RW = Rohrweihe

### **Morphologie der F. centralis des Wespenbussards (*Pernis apivorus*) im Vergleich zur F. centralis bei den restlichen Arten der Accipitriformes und Falconiformes**

Die Schichten ELM, IS/OS und RPE konnten beim Wespenbussard nicht abgegrenzt werden, da sie sich in den OCT-Tomogrammen im Vergleich zu den sonstigen Greifvögeln völlig unterschiedlich darstellten. Die Zuordnung der Schichten der äußeren Retina unterhalb der äußeren Körnerschicht (ONL) war nicht möglich. Für die Komplexe OPL-ELM und ELM-RPE/BM werden daher keine Werte angegeben. Messungen und Beschreibungen der Schichten beschränkten sich auf den Bereich der Fovea centralis, da der Zwischenbereich nicht vermessen werden konnte. Die Gefäßkaskade, die den Verlauf des Äquators begrenzt, war nicht erkennbar, somit ergab sich kein Schnittpunkt zwischen Äquator und gedachter Linie einer Verlängerung durch den Pecten oculi. Die Position des Zwischenbereichs konnte also nicht festgelegt werden (Abb. 20).

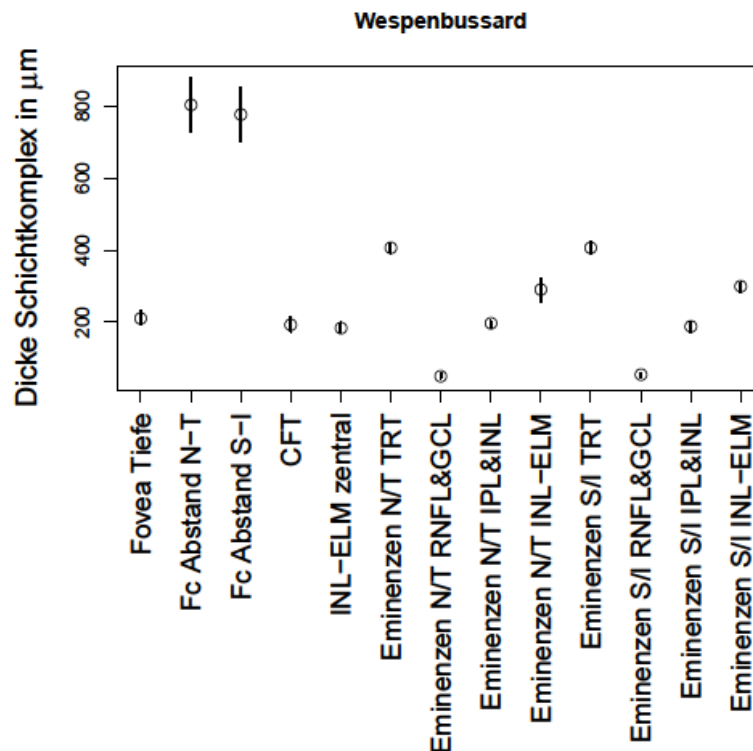
Die **Abstände der Eminenzen N-T und S-I** waren auch beim Wespenbussard nicht gleich groß, so dass auch hier von einer leicht länglichen Fovea ausgegangen werden muss (Abb. 25). Im Vergleich zu den anderen tagaktiven Greifvögeln waren die Abstände beim Wespenbussard mit 804,11 µm N-T und 777,33 µm ähnlich wie die des Mäusebussards mit 811,89 µm N-T und 771,29 µm S-I. Die **Tiefe der Fovea** war mit 211,71 µm kleiner als beim Turmfalke, Mäusebussard und Habicht und nur etwas flacher als beim Wanderfalke und Sperber. Die zentrale Retinadicke der Fovea (CFT) betrug im Vergleich zur TRT der sie umgebenden Eminenzen nur noch ungefähr die Hälfte (47,6 %). Der Clivus war daher nicht ganz so steil wie bei der Fovea centralis des Turmfalken, jedoch etwas stärker als bei Sperber, Habicht oder Mäusebussard.

Die Dicke des Schichtkomplexes INL-ELM der **zentralen Fovea** war wesentlich geringer als im Bereich der Eminenzen. Im Vergleich mit der zentralen Fovea der anderen tagaktiven Arten waren die INL-ELM im entsprechenden Bereich beim Wespenbussard wesentlich dicker. Zum Schichtkomplex ELM-RPE/BM kann keine Aussage getroffen werden, da sich die Schichten nicht zuordnen ließen (Abb. 25).

**Schichtung in der zentralen Fovea:** Auch beim Wespenbussard war im Bereich der zentralen Fovea die in den anderen Bereichen der Retina erkennbaren Schichten nur noch eingeschränkt sichtbar und voneinander abgrenzbar. Die RNFL und GCL war in keinem OCT-Tomogramm differenzierbar, die IPL bei 27 %. Die INL, OPL, ONL und RPE/BM waren zu 100 % identifizierbar. Die ELM und der IS/OS-Komplex konnten bei keiner Aufnahme eindeutig abgegrenzt und zugeordnet

werden (Tab. III-B im Anhang).

Vergleicht man **beim Wespenbussard** die Schichtkomplexe im Bereich der **Eminenzen N/T** und **S/I**, so unterschieden sich die Werte der Schichtkomplexe TRT, RNFL&GCL, IPL&INL und INL-ELM kaum. Die Retinagesamtdicke der **Eminenzen des Wespenbussards** war **innerhalb der Gruppe der tagaktiven** Greifvögel ähnlich wie die beim Wanderfalken. Die RNFL&GCL unterschied sich in der Dicke nicht von der Dicke der anderen Arten. Der Komplex IPL&INL war etwas dicker als beim Sperber, ähnlich wie bei Wanderfalke und Rohrweihe, und im Vergleich zu den restlichen Arten etwas dünner. Beim Wespenbussard war der Komplex INL-ELM jedoch wesentlich dicker ausgebildet als bei den anderen Arten. Die Schichten OPL-ELM konnten nicht eindeutig identifiziert werden. Die beiden Komplexe IPL&INL und OPL-ELM konnten daher nicht miteinander verglichen werden. Auch der Komplex ELM-RPE/BM konnte nicht abgegrenzt werden (Abb. 25).



**Abbildung 25:** Darstellung der vermessenen Schichten in der zentralen Fovea centralis und im Bereich der Eminenzen, der Tiefe und der Abstände der Eminenzen der F. centralis des Wespenbussards, *Pernis apivorus*. Da sich das Bild der Schichtung beim Wespenbussard im OCT im Vergleich zu den anderen tagaktiven Greifvögeln unterschied, konnten die Schichten OPL-ELM und ELM-RPE/BM nicht eindeutig zugeordnet werden. Es wurden in diesem Fall keine Messwerte erhoben. Zu jedem Schichtkomplex im Bereich der Eminenzen wurde je ein Mittelwert aus den Messergebnissen der Eminenz superior und der Eminenz inferior resp. der Eminenzen nasal und temporal gebildet. Zu erkennen sind die Mittelwerte (Punkte) und die dazugehörenden Standardabweichungen (Linien). N = nasal, T = temporal, S = superior, I = Inferior, CFT = zentrale Foveadicke (central foveal thickness), TRT = Retinagesamtdicke (total retinal thickness), RNFL&GCL = Schichtkomplex der retinalen Nervenfaserschicht (RNFL) zusammen mit der Ganglienzellschicht (GCL), IPL&INL= Schichtkomplex der inneren plexiformen Schicht (IPL) und der inneren Körnerschicht (INL), OPL-ELM = Schichtkomplex der äußeren plexiformen Schicht (OPL) bis zur äußeren Grenzmembran (ELM), INL-ELM = Schichtkomplex der inneren Körnerschicht (INL) bis äußere Grenzmembran (ELM), ELM-RPE/BM = Schichtkomplex äußere Grenzmembran (ELM) bis retinales Pigmentepithel/Basalmembran (RPE/BM)



#### 4.4.2. F. temporalis im Vergleich

Da bei der Rohrweihe die F. temporalis in beiden Augen aufgrund pathologischer Veränderungen nicht beurteilt werden konnte und da beim Wespenbussard nur die F. centralis vorkommt, wurden bei der Beschreibung der F. temporalis nur fünf tagaktive Greifvogelarten berücksichtigt. Für den Abstand der Eminenzen S-I und die Schichtkomplexe in der Eminenz superior und inferior der F. temporalis beim Sperber gibt es jeweils nur **einen** Messwert, so dass der Mittelwert der Schichtkomplexe der Eminenzen N/T nur von **einem** einzelnen Individuum stammen.

Bei der F. temporalis waren die **Abstände der Eminenzen N-T und S-I** bei allen einbezogenen tagaktiven Greifvogelarten nicht identisch und zeigen, dass die F. temporalis ebenfalls oval war. Die weitesten Abstände der Fovea-Eminenzen wies der Turmfalke mit 769,75 µm N-T und 744,00 µm S-I auf, gefolgt von Sperber, Habicht und Wanderfalke. Der Mäusebussard wies mit 516,75 µm N-T und 542,20 µm S-I die kleinsten Abstände der Eminenzen und damit die kleinsten Durchmesser der Fovea temporalis auf Höhe der Retinaoberfläche auf (Abb. 21, Abb. 27).

Die **Tiefe der Fovea** war beim Turmfalken mit 104,81 µm am größten, gefolgt von Mäusebussard, Wanderfalke und Habicht (absteigende Reihenfolge) (Abb. 21 und 27).

Die Dicke der zentralen Retina der Fovea (CFT) reduzierte sich ebenfalls im Vergleich zur TRT der sie umgebenden Eminenzen. Die Dickenunterschiede waren aber geringer als bei der F. centralis. Am flachsten war die Fovea temporalis beim Sperber, die CFT erreichte hier 91,79 % der TRT der Eminenzen. Am tiefsten war die Fovea beim Wanderfalken. Hier nahm die CFT zwei Drittel (66,83 %) der TRT der Eminenzen ein. Habicht (83,37 %), Mäusebussard (73,91 %) und Turmfalke (69,42 %) lagen dazwischen (Abb. 22). Die Dimensionen der Abstände der Eminenzen und die Tiefe der Fovea temporalis, verbunden mit einer Dickenreduktion der Retinaschichten am tiefsten Punkt, waren demnach am größten beim Turmfalken ausgeprägt (Abb. 21 und Abb. 27).

Die Dicke des Schichtkomplexes INL-ELM des **zentralen Bereichs der temporalen Fovea** unterschied sich bei den verschiedenen Arten. Am ausgeprägtesten war der Komplex bei Sperber und Habicht, am dünnsten beim Wanderfalken. Er war im Vergleich zum Bereich der Eminenzen jedoch etwas dünner. Der Schichtkomplex ELM-RPE/BM im zentralen Bereich der Fovea war beim Mäusebussard am dicksten, beim Sperber am dünnsten (Abb. 22) und war bei allen Vögeln im Bereich

der zentralen Fovea temporalis etwas dicker als im Bereich der Eminenzen.

**Schichtung im zentralen Bereich** der F. temporalis: Dass die Fovea temporalis nicht sehr tief ausgeprägt war, wird auch bei der Betrachtung der Schichtenreduzierung erkennbar. Die RNFL war bei 60 % und 14 % der Aufnahmen beim Sperber bzw. Habicht differenzierbar, wenn auch erkennbar ausgedünnt im Vergleich zur RNFL an den Eminenzen. Auch die GCL war meist deutlich ausgeprägt (69 % beim Mäusebussard, 60 % beim Sperber, 100 % beim Habicht, 50 % beim Turmfalke und 14 % beim Wanderfalken). Die Schichten IPL bis inkl. RPE/BM waren bei allen Aufnahmen zu 100 % vorhanden. Die Daten zur Rohrweihe konnten, wie bereits erwähnt, nicht erhoben werden. Beim Wespenbussard war physiologischerweise keine F. temporalis vorhanden. Die Übersicht der Daten findet sich in Tabelle III-A im Anhang.

Vergleicht man die Schichtkomplexe TRT, RNFL&GCL, IPL&INL, OPL-ELM, INL-ELM und ELM-RPE/BM der **Eminenzen N/T** mit denen der **Eminenzen S/I innerhalb einer Vogelart**, so lässt sich sagen, dass sich die Werte nur in wenigen Ausnahmen unterschieden. Beim Sperber wurde an den Eminenzen S/I eine um 19 µm dünnere IPL-INL und eine um 17 µm dickere OPL-ELM im Vergleich zu den Eminenzen N/T festgestellt. Beim Habicht und beim Wanderfalken war die IPL-INL der Eminenzen S/I um 12 µm bzw. 14 µm dicker als im Vergleich zu den Eminenzen N/T. Beim Wanderfalken wurde außerdem eine um 23 µm dünnere OPL-ELM und eine um 16 µm dünnere INL-ELM der Eminenzen S/I im Vergleich zu den Eminenzen N/T festgestellt. Addiert man die Messwerte für die beiden Komplexe IPL&INL und OPL-ELM, so war diese Schichtung in den beiden Eminenzen N/T und S/I gleich dick.

Vergleicht man die Retinadicke (TRT) der **Eminenzen innerhalb der tagaktiven Greifvögel (interspezifische Variation)**, so war sie am höchsten bei Mäusebussard (348,38 µm an den Eminenzen N/T und 342,20 µm an den Eminenzen S/I) und Turmfalke (344,00 µm im Bereich der Eminenzen N/T und 341,38 µm im Bereich der Eminenzen S/I), gefolgt von Habicht, Wanderfalken und Sperber (absteigende Reihenfolge). Die RNFL&GCL waren bei Habicht und Sperber am dicksten. IPL&INL waren beim Mäusebussard mit 164,87 µm und 162,88 µm an den Eminenzen N/T bzw. S/I am dicksten. Beim Turmfalke (158,71 µm an den Eminenzen N/T bzw. 163,83 µm an den Eminenzen S/I), Habicht (155,17 µm an den Eminenzen N/T und 167,00 µm an den Eminenzen S/I) und Wanderfalken (156,67 µm an den Eminenzen N/T bzw. 171,00 µm an den Eminenzen S/I) waren die Schichten ähnlich dick. Am dünnsten waren die IPL&INL beim Sperber mit 116,5 µm im Bereich der Eminenzen N/T und 97,5 µm im Bereich der Eminenzen

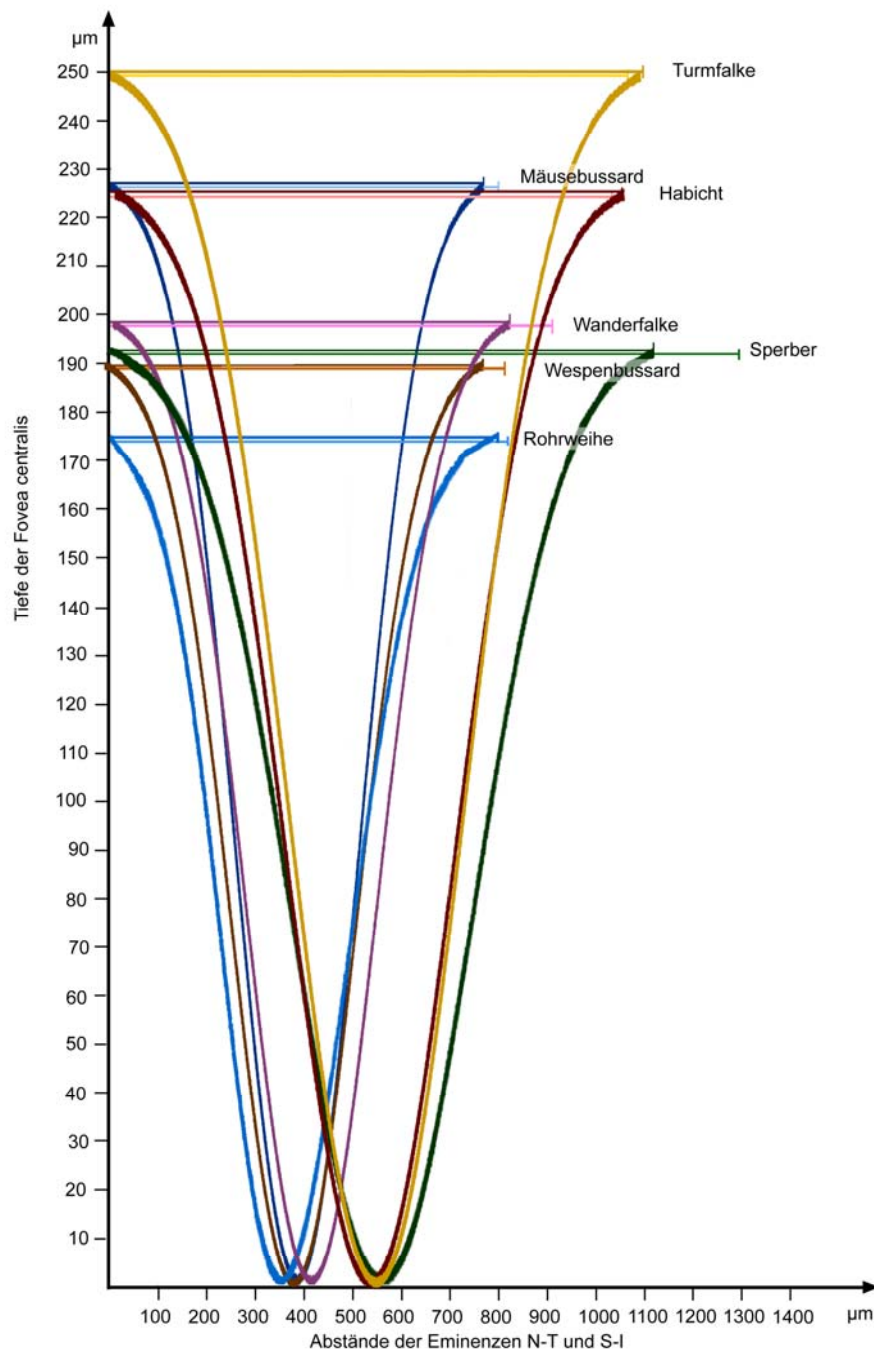
S/I. Auch die INL-ELM waren beim Turmfalken mit 166,13  $\mu\text{m}$  an den Eminenzen N/T und 159,38  $\mu\text{m}$  an den Eminenzen S/I am dicksten, gefolgt vom Mäusebussard. Beim Sperber war der Komplex mit 122,88  $\mu\text{m}$  an den Eminenzen N/T und 126,00  $\mu\text{m}$  an den Eminenzen S/I am dünnsten. Der OPL-ELM-Komplex war beim Sperber am dicksten und am dünnsten bei Habicht und Wanderfalke. Bei allen Arten war der Komplex IPL&INL dicker als der Komplex OPL-ELM. Addiert man die Dicke der beiden Komplexe IPL&INL und OPL-ELM, waren diese Schichten beim Mäusebussard mit 229,6  $\mu\text{m}$  im Bereich der Eminenzen N/T und 227  $\mu\text{m}$  im Bereich der Eminenzen S/I am dicksten, dicht gefolgt von Turmfalke, Wanderfalke und Habicht, bei denen sie ähnlich dick waren. Beim Sperber waren sie am dünnsten und erreichten lediglich 190  $\mu\text{m}$  an den Eminenzen N/T und 188  $\mu\text{m}$  an den Eminenzen S/I (Abb. 23 und Abb. 24). Der Komplex ELM-RPE/BM war beim Mäusebussard und Turmfalken am dicksten ausgebildet und am dünnsten beim Sperber. Beim Habicht und Wanderfalke war er ungefähr gleich dick (Abb. 23 und Abb. 24).

#### 4.4.3. F. centralis und F. temporalis im Vergleich

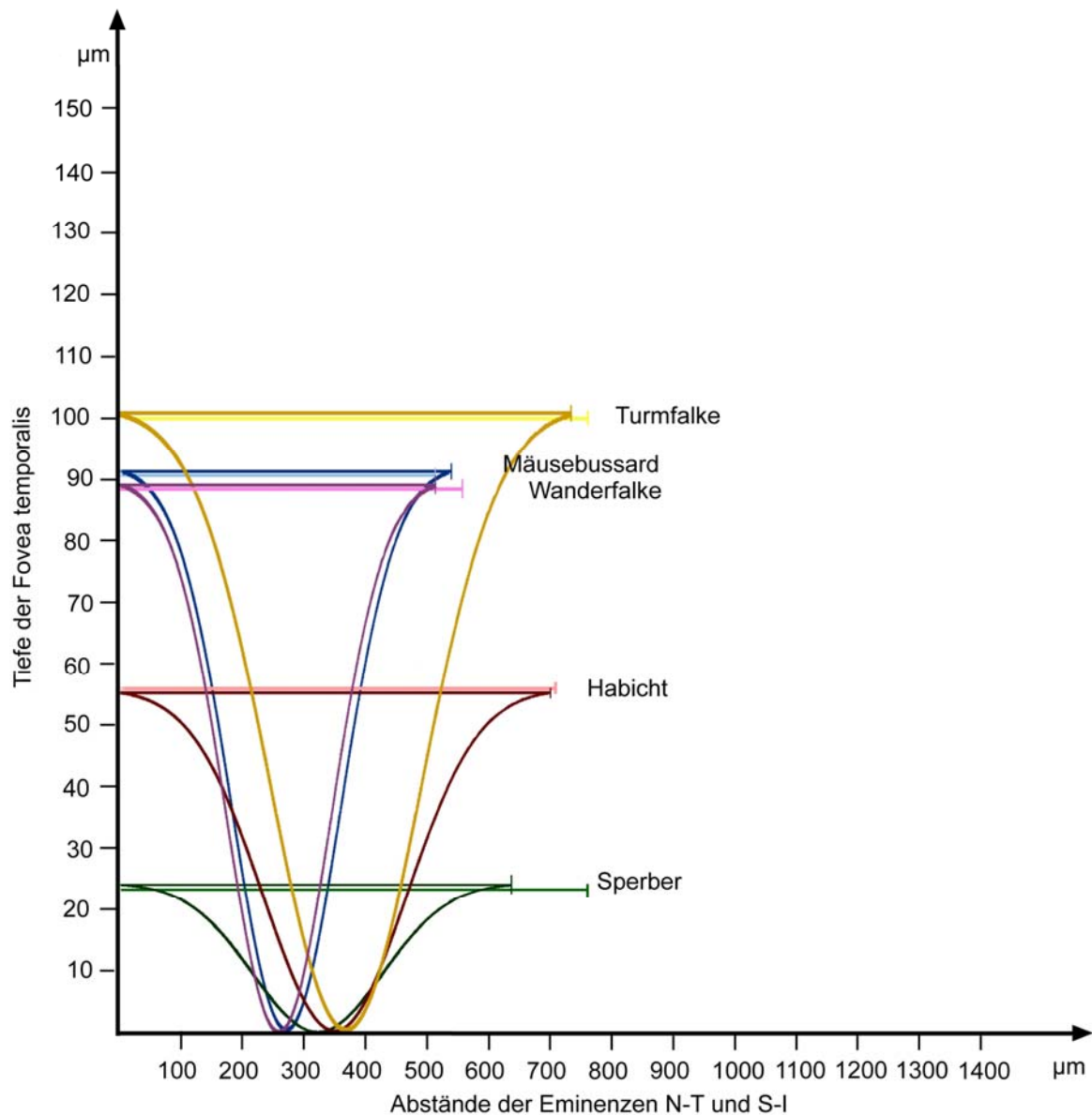
Wie bereits erwähnt, existiert beim Wespenbussard keine F. temporalis und war bei der Rohrweihe keine physiologisch ausgebildete F. temporalis für eine Messung verfügbar. Beide Arten wurden demnach nicht in die Vergleiche mit einbezogen.

**Zentraler Foveabereich:** Im Vergleich zwischen F. centralis und F. temporalis wurden bei der ersteren sowohl eine größere Tiefe als auch weitere Abstände N-T und S-I (Abb. 21, Abb. 26 und 27) ermittelt. Die CFT war bei allen Arten in der F. temporalis dicker als in der F. centralis (Abb. 22). Der Komplex INL-ELM war beim Sperber, Habicht und Turmfalke in der F. temporalis und beim Mäusebussard und Wanderfalke in der F. centralis stärker ausgebildet. Der Komplex ELM-RPE/BM war bei allen Arten in der F. centralis dicker (Abb. 22).

**Eminenzen:** Die TRT der Eminenzen der F. centrales und F. temporales unterschieden sich deutlich. Bei allen Vogelarten wies die F. centralis in diesen Bereichen die dickere Gesamtretina (TRT) auf. Der Schichtkomplex RNFL&GCL war bei den Foveae centrales dicker oder ähnlich dick wie bei den Foveae temporales. Die Schichtkomplexe IPL&INL, OPL-ELM, INL-ELM und ELM-RPE/BM waren bei allen Arten in der F. centralis dicker (Abb. 23 und Abb. 24).



**Abbildung 26:** Schematische Übersicht der Morphologie der Fovea centralis: Darstellung der Abstände N-T und S-I als waagerechte Linien (S-I mit hellerem Farbton dargestellt) und der Tiefe der F. centralis tagaktiver Greifvögel. Eine sich daraus ergebende Form der Fovea ist anhand einer standardisierten Kurve gezeichnet.



**Abbildung 27:** Schematische Übersicht der Morphologie der Fovea temporalis: Darstellung der Abstände N-T und S-I als waagerechte Linien (S-I mit hellerem Farbton dargestellt) und der Tiefe der F. temporalis tagaktiver Greifvögel. Eine sich daraus ergebende Form der Fovea ist anhand einer standardisierten Kurve gezeichnet.

#### 4.4.4. Retinaler Zwischenbereich im Vergleich

Betrachtet man die Werte des Zwischenbereiches, also dem Schnittpunkt der im Äquator verlaufenden Linie der Gefäßkaskade mit einer gedachten Verlängerung einer Linie entlang des Pecten oculi, so fällt auf, dass die Schichten insgesamt am dicksten beim Turmfalken und am dünnsten beim Sperber ausgebildet waren (Abb. 28). Die Retinagesamtdicke (TRT) war beim Turmfalken mit 405,17  $\mu\text{m}$  wesentlich dicker als beim Sperber mit 323,00  $\mu\text{m}$ . Die Gesamtretina der restlichen Arten variierte etwas: Mäusebussard 364,21  $\mu\text{m}$ , Habicht 355,25  $\mu\text{m}$ , Wanderfalke 329,5  $\mu\text{m}$  und Rohrweihe mit 337  $\mu\text{m}$ . Die RNFL&GCL waren bei Sperber und Habicht am stärksten ausgebildet und gleich dick, gefolgt von Mäusebussard, Turmfalke und Wanderfalke. Bei der Rohrweihe war der Komplex aus diesen beiden Schichten am dünnsten. Die Komplexe IPL&INL und OPL-ELM waren beim Turmfalken am dicksten und beim Sperber am dünnsten. Beim Schichtkomplex INL-ELM ergaben sich die höchsten Messwerte beim Turmfalken (160,50  $\mu\text{m}$ ), während sie beim Sperber mit 88,67  $\mu\text{m}$  nur etwa halb so groß waren. Die Schichten von der ELM bis zum retinalen Pigmentepithel / der Basalmembran waren bei allen einbezogenen tagaktiven Greifvogelarten vergleichbar, mit maximaler Dicke beim Turmfalken (83,5  $\mu\text{m}$ ) und Mäusebussard (81,67  $\mu\text{m}$ ) und minimalster Dicke beim Sperber und Habicht mit 66,33  $\mu\text{m}$  bzw. 69,75  $\mu\text{m}$ . Der Komplex war beim Wanderfalken und bei der Rohrweihe mit ca. 78  $\mu\text{m}$  gleich dick (Abb. 28). Beim Wespenbussard erfolgten keine Messungen im retinalen Zwischenbereich.

#### Der retinale Zwischenbereich im Vergleich zur Retina der Foveae

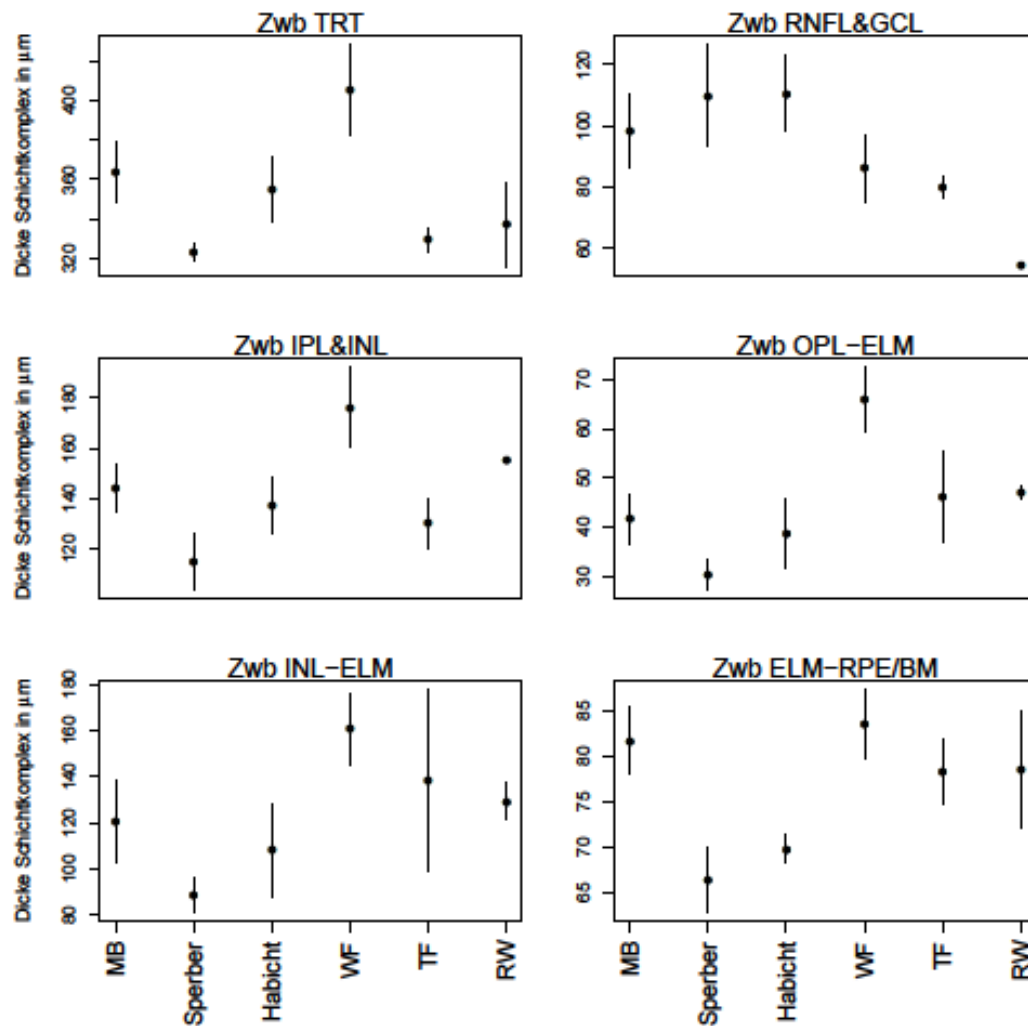
Wie in Abbildung 28 dargestellt, war die TRT des Zwischenbereichs dicker als die Retina im zentralen Bereich der F. centrales und temporales (Abb. 22) und dünner als die TRT der Eminenzen der F. centrales (Abb. 23 und 24). Im Vergleich zur TRT der Eminenzen der F. temporales war die TRT des Zwischenbereichs dicker. Bei der Rohrweihe kann kein Vergleich gezogen werden, da hier keine Aufnahmen der F. temporalis im physiologischen Zustand verfügbar waren.

Der Komplex RNFL&GCL war im Zwischenbereichs deutlich dicker (beinahe das Doppelte) als im Bereich der Eminenzen der F. centrales und F. temporales, außer bei der Rohrweihe. Bei ihr war der Komplex RNFL&GCL im Zwischenbereich mit 54,5  $\mu\text{m}$  nur wenig dicker als im Bereich der Eminenzen N/T und S/I mit 41,67  $\mu\text{m}$  bzw. 40,25  $\mu\text{m}$ . Im Gegensatz dazu waren die Komplexe IPL&INL, OPL-ELM und INL-ELM im Zwischenbereich meist dünner als an den Eminenzen der F. centrales und temporales. Eine Ausnahme stellte hier der Turmfalke dar, dessen Komplexe

IPL&INL, OPL-ELM und INL-ELM im Zwischenbereich ungefähr gleich dick waren wie die Komplexe im Bereich der Eminenzen N/T oder S/I der Fovea temporalis oder sogar etwas dicker. Dies gilt auch für den Komplex IPL&INL des Zwischenbereichs beim Sperber und den Komplex OPL-ELM des Zwischenbereichs beim Wanderfalken im Vergleich zu den jeweiligen Komplexen im Bereich der Eminenzen N/T und S/I der F. temporalis.

Der Komplex der Schichten ELM-RPE/BM war im Zwischenbereich dünner als an den Eminenzen der F. centralis, aber ungefähr gleich dick wie oder geringgradig dicker als an den Eminenzen der F. temporalis. Bei Betrachtung des zentralen Bereichs der Foveae und bei Vergleich der Messwerte innerhalb einer Art waren die Schichten INL-ELM bei allen einbezogenen tagaktiven Greifvogelarten im Zwischenbereich dicker als bei der F. centralis. Eine Ausnahme bildete der Sperber, bei dem der Komplex INL-ELM im Zwischenbereich etwas dünner war als in der zentralen F. centralis und F. temporalis. Beim Habicht war der Komplex INL-ELM des Zwischenbereichs nur im Vergleich zur zentralen INL-ELM der F. temporalis dünner.

Die ELM-RPE/BM waren im Zwischenbereich stets dünner als im zentralen Bereich der F. centralis oder F. temporalis.



**Abbildung 28:** Darstellung der vermessenen Schichten im retinalen Zwischenbereich der tagaktiven Greifvögel. Zu erkennen sind die Mittelwerte (Punkte) und die dazugehörigen Standardabweichungen (Linien). Zwb = retinaler Zwischenbereich, TRT = Retinagesamtdicke (total retinal thickness), RNFL&GCL = Schichtkomplex der retinalen Nervenfaserschicht (RNFL) zusammen mit der Ganglienzellschicht (GCL), IPL&INL= Schichtkomplex der inneren plexiformen Schicht (IPL) und der inneren Körnerschicht (INL), OPL-ELM = Schichtkomplex der äußeren plexiformen Schicht (OPL) bis zur äußeren Grenzmembran (ELM), INL-ELM = Schichtkomplex der inneren Körnerschicht (INL) bis äußere Grenzmembran (ELM), ELM-RPE/BM = Schichtkomplex äußere Grenzmembran (ELM) bis retinales Pigmentepithel/Basalmembran (RPE/BM), MB = Mäusebussard, WF = Wanderfalke, TF = Turmfalke, RW = Rohrweihe



#### 4.5.      **Nachtaktive Greifvögel: Strigiformes im Vergleich**

##### *Waldohreule:*

Bei fünf Patienten konnten Aufnahmen der Foveae gemacht werden. Es gingen neun Augen in die Auswertung ein.

##### *Waldkauz:*

Bei fünf Patienten konnten Aufnahmen der Foveae gemacht werden. Es gingen neun Augen in die Auswertung ein.

##### *Schleiereule:*

Es konnten keine Aufnahmen der Foveae gemacht werden, da diese nicht darstellbar waren. Der retinale Zwischenbereich wurde daher nicht untersucht. Es gingen keine Augen in die Messungen ein. Diese Daten fehlen entsprechend in den Abbildungen.

##### *Uhu:*

Bei **einem** Patienten waren Aufnahmen der Foveae realisierbar. Es ging allerdings nur **ein** Auge in die Auswertung ein. Es konnte kein auswertbarer Vertikalschnitt der Fovea oder des Zwischenbereichs angefertigt werden, so dass sowohl der Abstand der Eminenzen S-I, als auch die Schichtkomplexe dieser Eminenzen und des Zwischenbereiches nicht vermessen werden konnten. Diese Werte fehlen dementsprechend in den Abbildungen 30 und 31. Die dargestellten Ergebnisse und sämtliche Werte basieren demnach nur auf der Messung eines Auges.

##### *Raufußkauz:*

Bei **einem** Patienten konnten Aufnahmen der Foveae gemacht werden. Es gingen zwei Augen in die Auswertung ein. Für den Zwischenbereich konnte nur **eine** einzelne Aufnahme (Horizontalscan) ausgewertet werden.

##### *Steinkauz:*

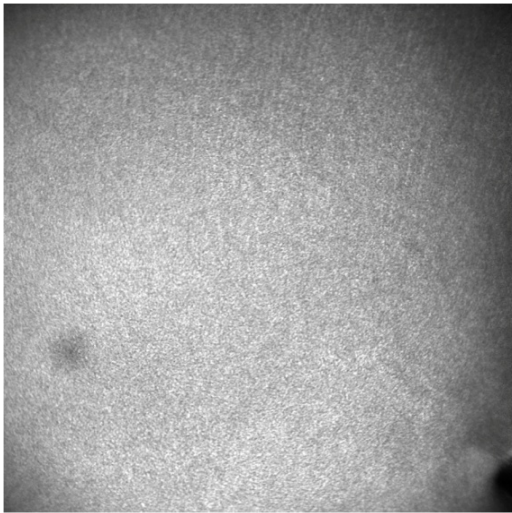
Bei **einem** Patienten konnten Aufnahmen der Foveae gemacht werden. Es ging nur **ein** Auge in die Auswertung ein. Für den Abstand der Eminenzen gibt es daher nur jeweils **einen** Messwert. Für den retinalen Zwischenbereich gibt es zudem nur einen auswertbaren Horizontalscan.

Bei allen einbezogenen Patienten der Ordnung Strigiformes wurden in der Fundusaufsicht und mittels OCT keine Strukturen, die den Foveae centrales der Accipitriformes und Falconiformes entsprechen, nachgewiesen. Die Ergebnisse der Messungen der Foveae temporales einschließlich der zentralen Bereiche und der Eminenzen mit Dickenmessungen der Schichten sowie die Messungen des retinalen Zwischenbereiches sind in den Tabellen V-A bis V-C im Anhang

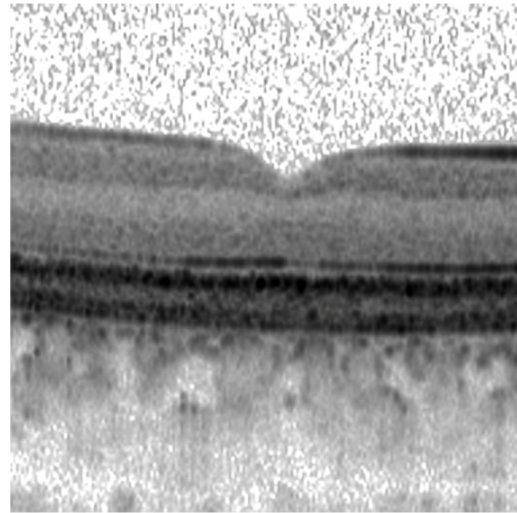
aufgeführt. Die Auswertung der Messdaten für die Foveae und den Zwischenbereich erfolgte wie bei den tagaktiven Greifvögeln.

In Abb. 29 findet sich eine vergleichende Übersicht der OCT-Aufnahmen der nachtaktiven Greifvögel. Dargestellt wurde eine Aufsicht auf den Augenhintergrund mittels cSLO und je ein B-Scan der F. temporalis. In der Fundusaufsicht ist die F. temporalis als eine rundliche, dunkelgraue Struktur erkennbar. Die Gefäßkaskade ist als ein schmaler Streifen identifizierbar, von dem aus die Gefäße, erkennbar als dunkle feine Linien, divergieren. Sie war bei den Eulen schwieriger zu erkennen als bei tagaktiven Greifvögeln. Der Pecten oculi ist als dunkle, nur teilweise in das Bild hineinragende Struktur sichtbar. Er wird an seiner Basis von einem hellen Saum umgeben, dem Sehnervenkopf. Bei allen einbezogenen Eulenvögeln wurde eine konkavklivale Form der F. temporalis festgestellt.

Einen vergleichenden Überblick zu den vermessenen Komplexen der Foveae und des Zwischenbereiches bieten Abbildungen 30 bis 35.



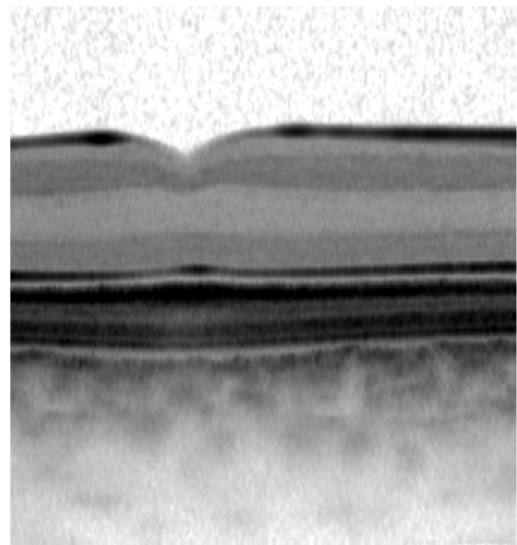
Fundusaufsicht Waldohreule 23590 OD



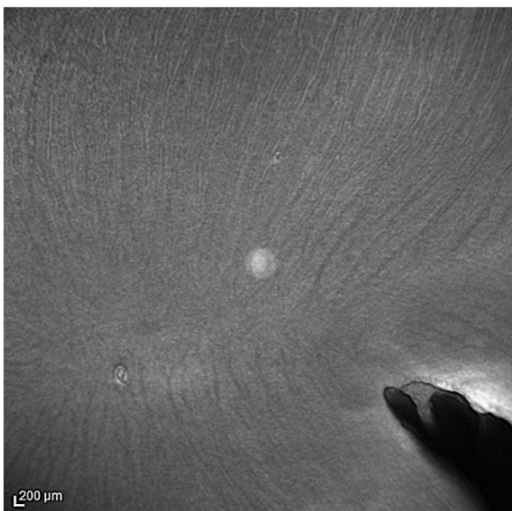
Waldohreule 25293 OS, Horizontalscan



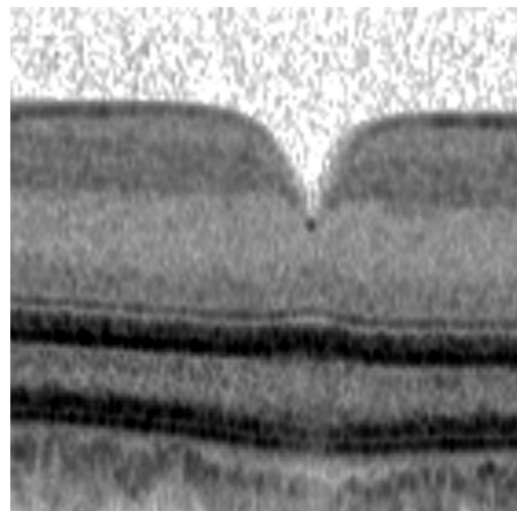
Fundusaufsicht Waldkauz 22466 OD



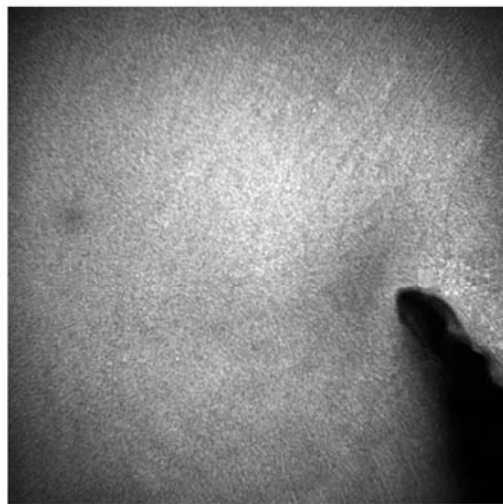
Waldkauz 22466 OD, Horizontalscan



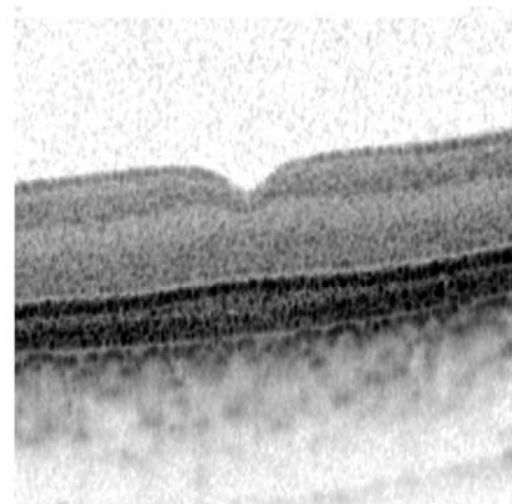
Fundusaufsicht Uhu 20631 OD



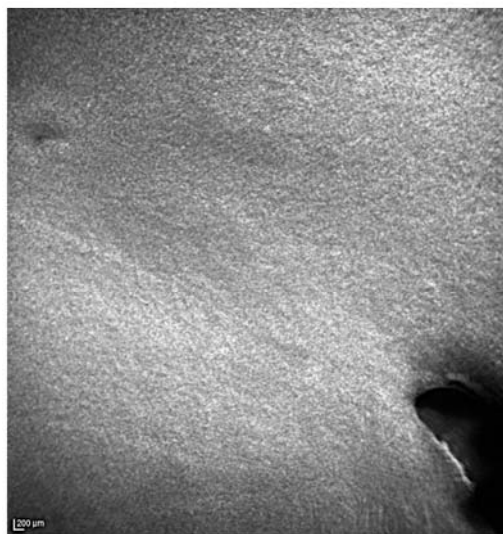
Uhu 20631 OD, Horizontalscan



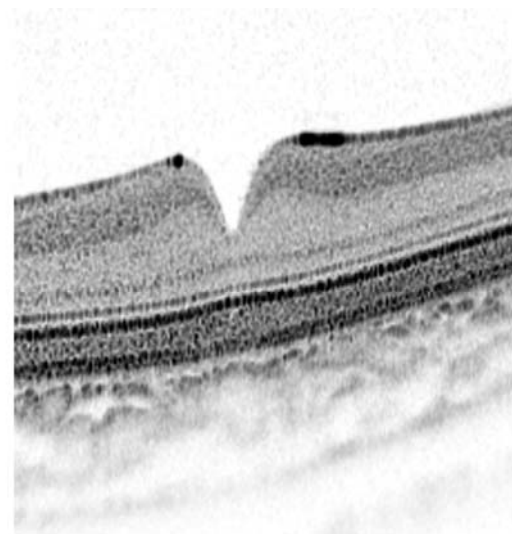
Fundusaufsicht Raufußkauz 24811 OD



Raufußkauz 24811 OS, Horizontalscan



Fundusaufsicht Steinkauz 25420 OD



Steinkauz 25420 OD, Vertikalscan

**Abbildung 29:** Bildertafel, nachtaktive Greifvögel: Morphologische Darstellung der Fundusaufsicht mittels cSLO (links) und der dazugehörigen OCT-B-Scans der Fovea temporalis (rechts) bei ausgewählten Patienten. Die angegebene Nummer entspricht der Patientennummer. OD, rechtes Auge, OS, linkes Auge

#### 4.5.1. F. temporalis im Vergleich

Es ist zu beachten, dass bei Uhu, Raufußkauz und Steinkauz nur einzelne Individuen in die Untersuchungen einbezogen wurden. Bei Uhu und Steinkauz ging außerdem nur ein Auge in die Auswertung ein (s. Tab. V-A bis V-C im Anhang).

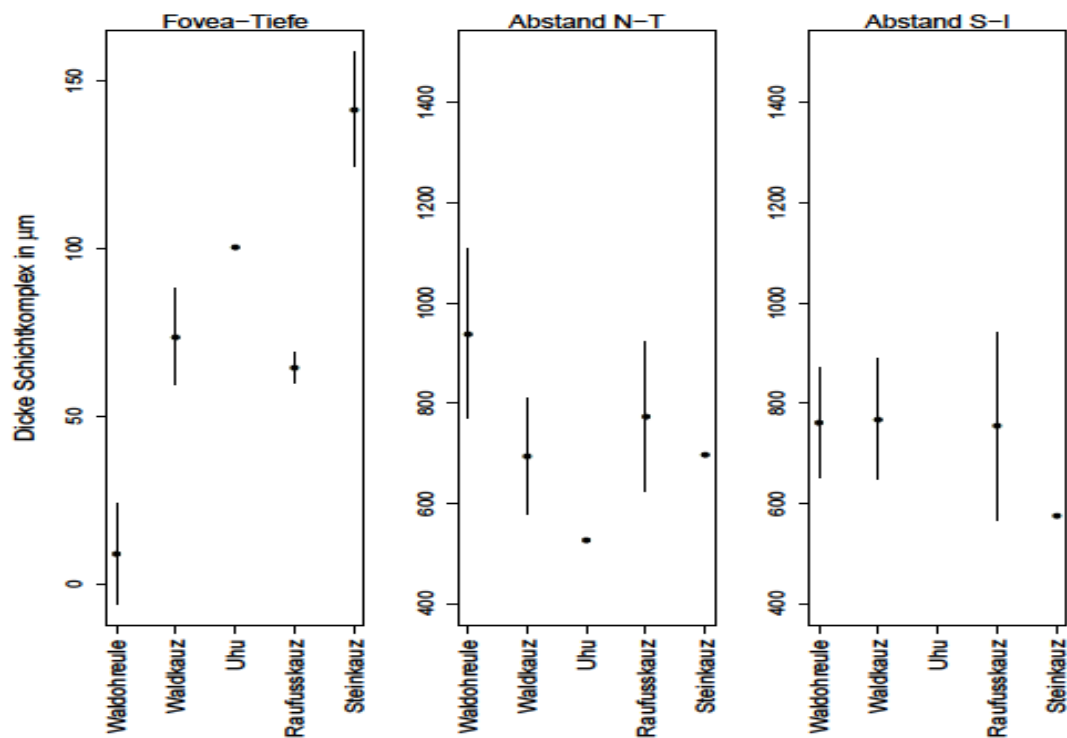
Die **Abstände der Eminenzen N-T und S-I**, also die Quer- und Längsdurchmesser der Fovea temporalis an der Retinaoberfläche, waren bei allen einbezogenen Individuen unterschiedlich weit, die Fovea wies also eine ovale Form auf. Der Uhu kann hier jedoch aufgrund des fehlenden Vertikalschnittes nicht beurteilt werden. Die weitesten Abstände wies die Waldohreule auf, gefolgt von Raufußkauz, Waldkauz und zuletzt Steinkauz (Abb. 30 und 34). In Bezug auf die **Tiefe der Fovea temporalis** ist festzustellen, dass die Foveae der Eulen beim Steinkauz mit 141,5 µm und beim Uhu mit 100,5 µm am tiefsten und bei der Waldohreule (47,03 µm) am flachsten waren (Abb. 30).

Die Dicke der **zentralen Bereiche der Fovea (CFT)** war bei allen nachtaktiven Arten ungefähr gleich, am stärksten war sie jedoch beim Waldkauz ausgeprägt (Abb. 31). Bezogen auf die TRT der sie umgebenden Eminenzen erreichte sie zwischen 59 % (Steinkauz) und 82 % (Waldohreule) der Dicke. Bei Steinkauz und Uhu waren die Abstände der Eminenzen am schmalsten und die Tiefe der zentralen Fovea am stärksten ausgeprägt. Bei Waldohreule, Raufußkauz und Waldkauz waren die Foveae eher weit und flach (Abb. 34).

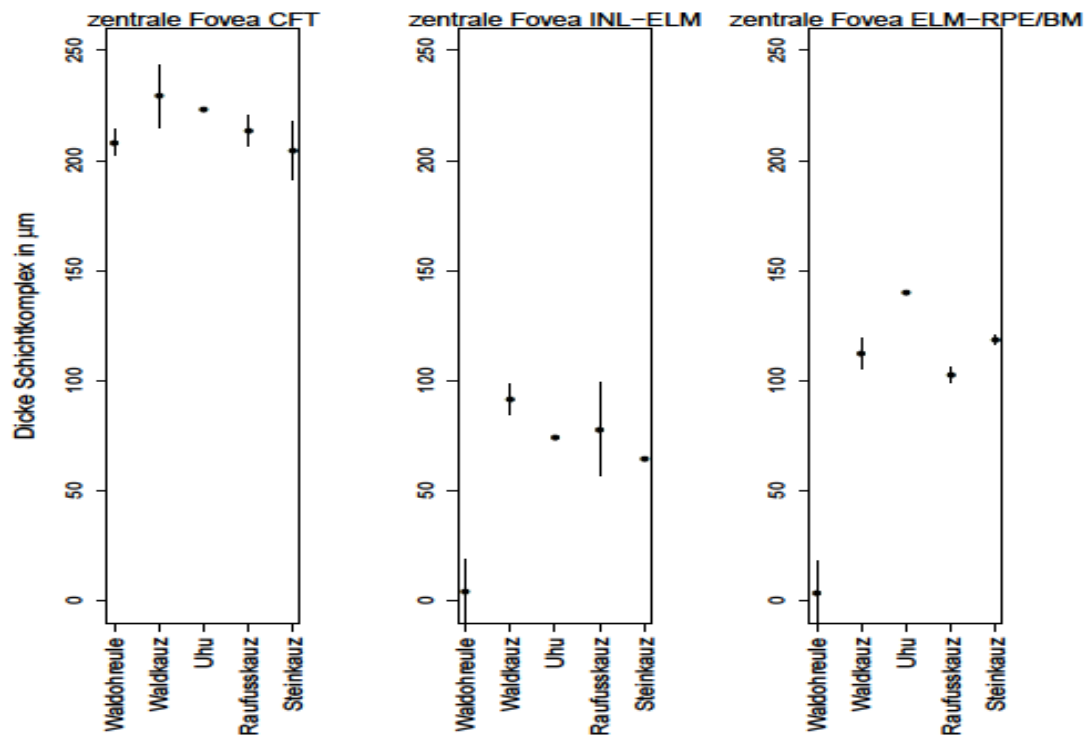
**Schichtung im zentralen Bereich** der F. temporalis: Die Schichtung im Bereich der zentralen Fovea reduzierte sich etwas. So war die RNFL bei keinem der OCT-Tomogramme mehr vorhanden. Die GCL war bei Uhu, Raufußkauz und Steinkauz ebenfalls nicht mehr vorhanden, jedoch noch bei der Waldohreule (29 % der B-Scans) und beim Waldkauz (8 % der B-Scans). Die IPL war beim Waldkauz bei 85 % und beim Steinkauz bei der Hälfte der Tomogramme sichtbar. Bei den restlichen drei Arten war sie zu 100 % vorhanden. Die Schichten ab der INL (INL, OPL, ONL, ELM, IS/OS-Komplex und RPE/BM) waren bei allen nachtaktiven Greifvogelarten zu 100 % identifizierbar (s. Tab. III-C im Anhang).

Die Dicke des Schichtkomplexes INL-ELM der zentralen Fovea variierte etwas zwischen den Arten. Am dicksten war er beim Waldkauz, am dünnsten beim Steinkauz. Er war bei allen Eulen im Vergleich zum Bereich der Eminenzen jedoch deutlich dünner. Der Schichtkomplex ELM-RPE/BM in der zentralen Fovea war ebenfalls unterschiedlich ausgebildet: 96,07 µm bei der Waldohreule, 112,23 µm beim Waldkauz, 140,00 µm beim Uhu, 102,5 µm beim Raufußkauz und 118,50 µm beim Steinkauz (Abb. 31). Er war bei allen Vögeln im Bereich der zentralen Fovea

etwas dicker als im Bereich der Eminenzen.



**Abbildung 30:** Darstellung der Tiefe und der Abstände der Eminenzen der Fovea temporalis der nachtaktiven Greifvögel. Zu erkennen sind die Mittelwerte (Punkte) und die dazugehörigen Standardabweichungen (Linien). N = nasal, T = temporal, S = superior, I = Inferior, Ft = Fovea temporalis, WOE = Waldohreule, WK = Waldkauz, Rfk = Raufußkauz, Stk = Steinkauz



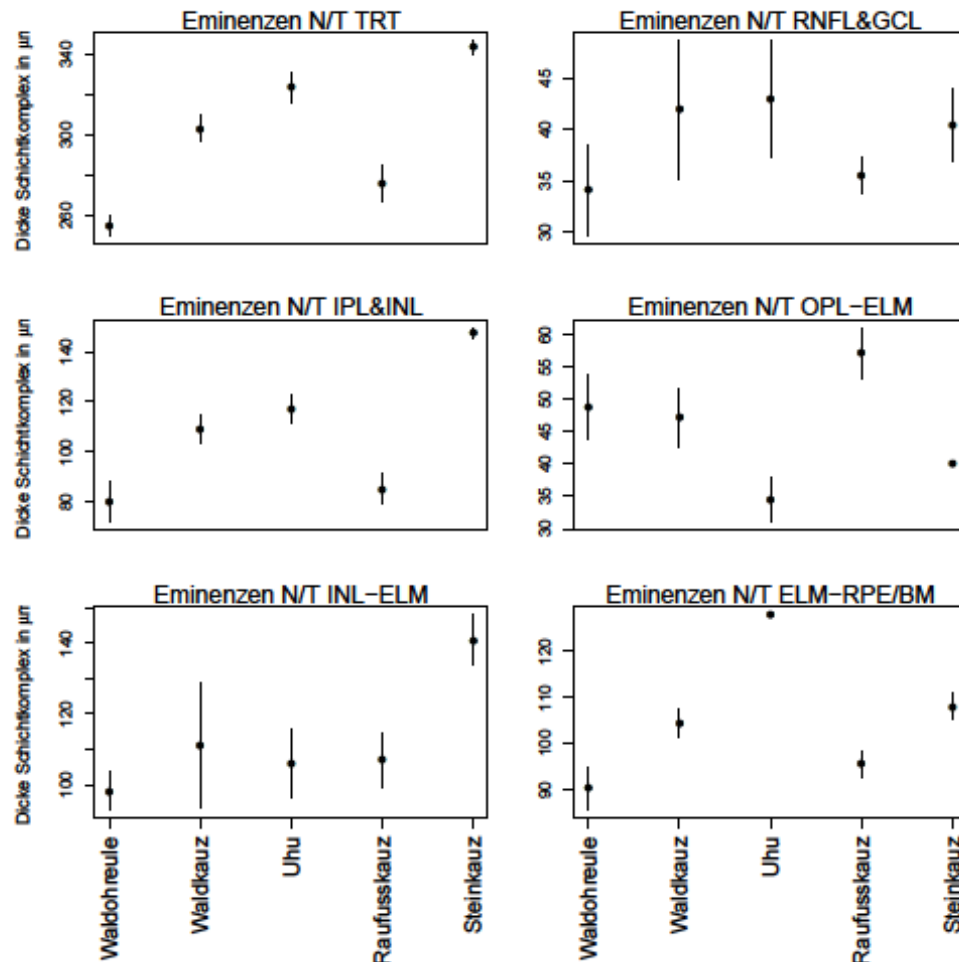
**Abbildung 31:** Darstellung der vermessenen Schichten in der zentralen Fovea temporalis der nachtaktiven Greifvögel. Zu erkennen sind die Mittelwerte (Punkte) und die dazugehörigen Standardabweichungen (Linien). CFT = zentrale Foveadicke (central foveal thickness), INL-ELM = Schichtkomplex der inneren Körnerschicht (INL) bis zur äußeren Grenzmembran (ELM), ELM-RPE/BM = Schichtkomplex äußere Grenzmembran (ELM) bis retinales Pigmentepithel/Basalmembran (RPE/BM), Fc = Fovea centralis, Ft = Fovea temporalis, WOE = Waldohreule, WK = Waldkauz, Rfk = Raufußkauz, Stk = Steinkauz

An den **Eminenzen N/T** und **Eminenzen S/I** unterschieden sich die Werte der Schichtkomplexe TRT, RNFL&GCL, IPL&INL, OPL-ELM, INL-ELM und ELM-RPE/BM kaum **innerhalb einer Vogelart**. Addiert man die beiden Komplexe IPL&INL und OPL-ELM, so war die Schichtung bei allen einbezogenen Arten in den beiden Eminenzkomplexen N/T und S/I ungefähr gleich dick (Abb. 32 und 33).

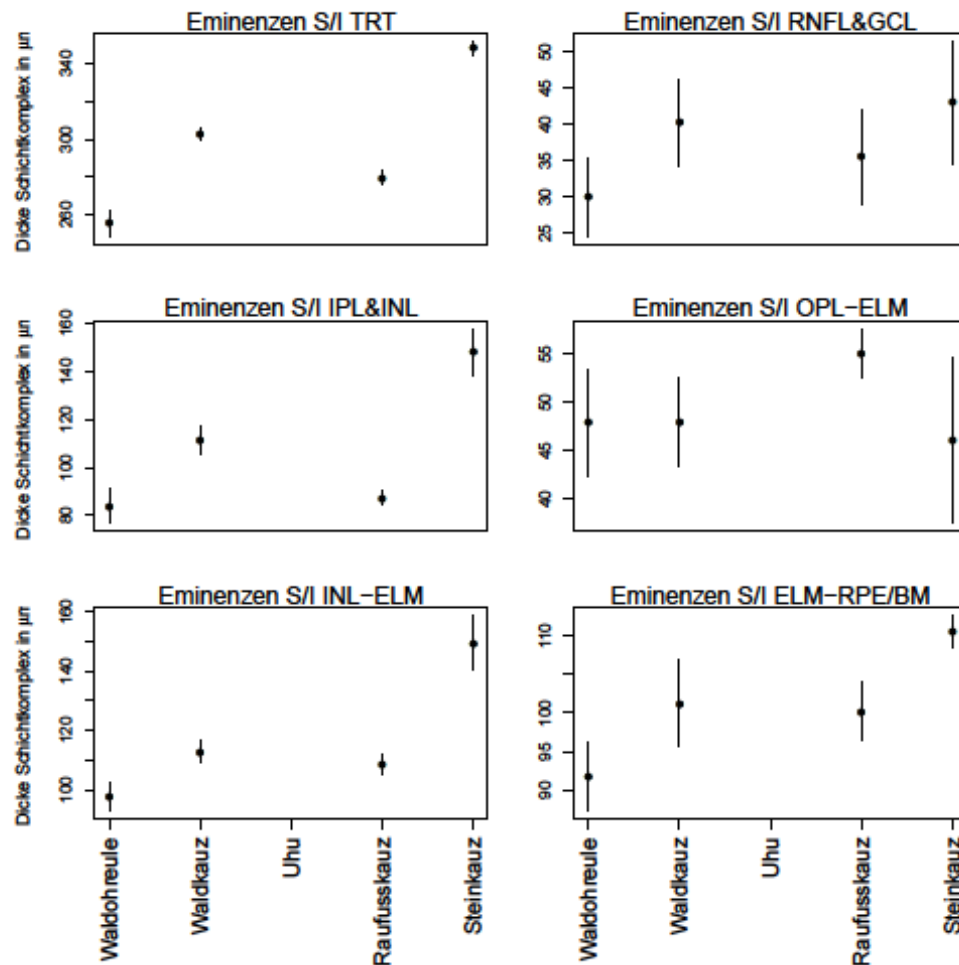
Vergleicht man die Retinadicke der **Eminenzen innerhalb der nachtaktiven Gruppe** der Greifvögel (**interspezifische Variation**), so war diese am dicksten beim Steinkauz (343,5 µm an den Eminenzen N/T und 348,5 µm an den Eminenzen S/I) und Uhu (323,5 µm im Bereich der Eminenzen N/T), gefolgt von Waldkauz und Raufußkauz, in absteigender Reihenfolge. Am dünnsten war die TRT der Eminenzen bei der Waldohreule mit 254,94 µm an den Eminenzen N/T und 255,57 µm an den Eminenzen S/I. Die RNFL&GCL waren bei Steinkauz, Uhu und Waldkauz am dicksten und ungefähr gleich stark (um die 42 µm) ausgeprägt. Beim Steinkauz, waren sowohl der Komplex IPL&INL mit 147,5 µm im Bereich der Eminenzen N/T und 148,0 µm im Bereich der Eminenzen S/I als auch der Komplex INL-ELM mit 141,0 µm an den Eminenzen N/T bzw. 149,5 µm an den Eminenzen S/I am stärksten ausgebildet. IPL&INL waren beim Raufußkauz mit 85,5 µm (an den Eminenzen N/T) und 87,25 µm (an den Eminenzen S/I) und der Waldohreule mit 80,31 µm (Eminenzen N/T) und 83,86 µm (Eminenzen S/I) am dünnsten. Der Komplex INL-ELM war bei Waldkauz, Uhu und Raufußkauz ungefähr gleich dick und bei der Waldohreule mit 98,25 µm im Bereich der Eminenzen N/T und 97,57 µm im Bereich der Eminenzen S/I am dünnsten. Der Komplex OPL-ELM war bei Uhu (34,5 µm an den Eminenzen N/T) und Steinkauz (40,0 µm an den Eminenzen N/T und 46,0 µm an den Eminenzen S/I) am dünnsten und beim Raufußkauz mit 57,25 µm im Bereich der Eminenzen N/T und 55,0 µm im Bereich der Eminenzen S/I am dicksten. Bei allen nachtaktiven Greifen war der Komplex IPL&INL dicker als der Komplex OPL-ELM. Setzt man die beiden Komplexe zueinander ins Verhältnis, so betrug die OPL-ELM bei Waldohreule, Waldkauz und Raufußkauz grob die Hälfte des Komplexes IPL&INL, beim Uhu (ein Individuum und nur die Eminenz N/T einbezogen) ein Drittel und beim Steinkauz ungefähr ein Viertel. Addiert man die beiden Komplexe IPL&INL und OPL-ELM so waren sie beim Steinkauz mit 187,5 µm an den Eminenzen N/T und 194,0 µm an den Eminenzen S/I am dicksten ausgebildet. Beim Waldkauz und Uhu waren sie etwas dünner und ungefähr gleich dick und beim Raufußkauz mit 142,75 µm an den Eminenzen N/T und 142,25 µm an den Eminenzen S/I im Vergleich zum Steinkauz um etwa 50 µm dünner. Am schwächsten waren die beiden Komplexe bei der Waldohreule ausgebildet. Der Schichtkomplex ELM-RPE/BM war bei Waldkauz, Raufußkauz und Waldohreule vergleichbar. Etwas dicker war er beim Steinkauz. Der Uhu wies die dicksten



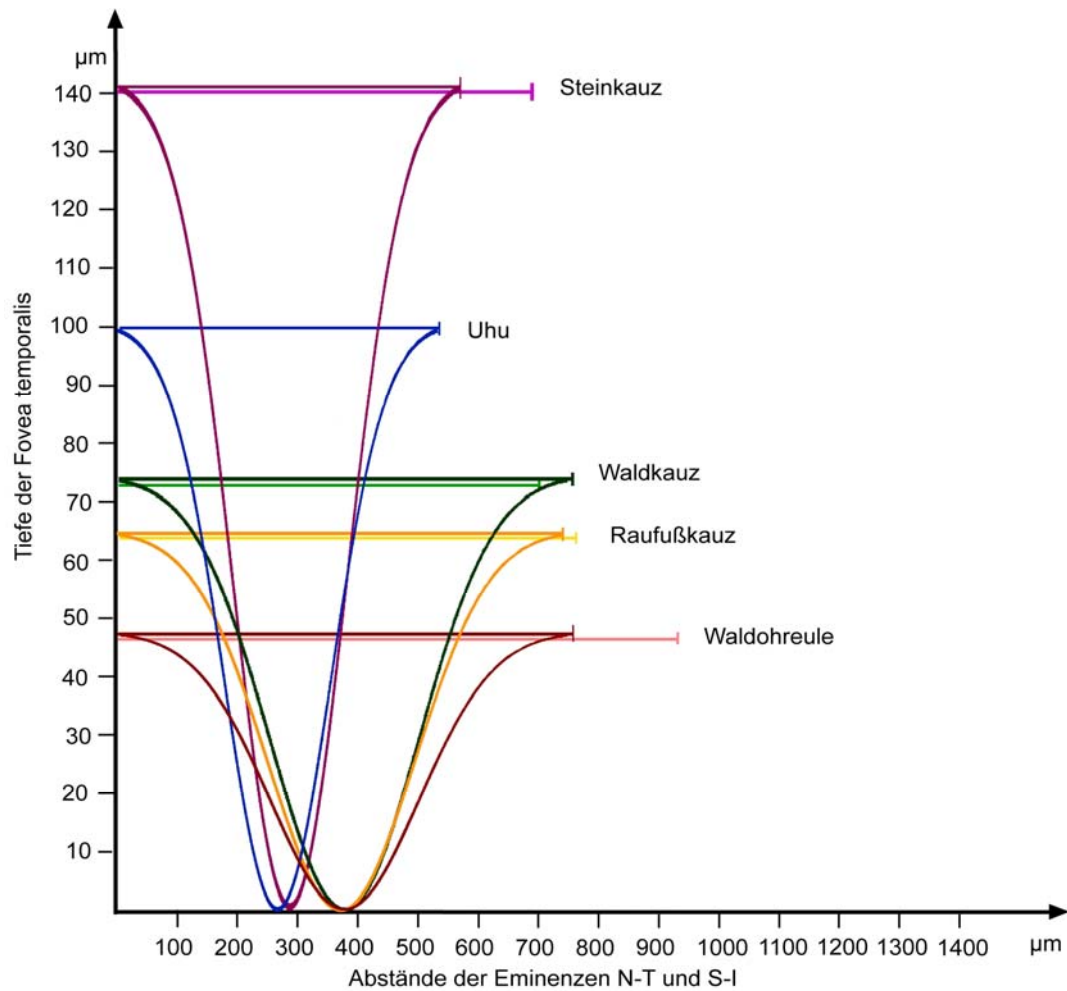
Schichten auf, sie waren im Vergleich zur Waldohreule (am dünnsten) fast 40  $\mu\text{m}$  dicker (Abb. 32 und 33).



**Abbildung 32:** Darstellung der vermessenen Schichten im Bereich der Eminenzen nasal und temporal der Fovea temporalis der nachtaktiven Greifvögel. Zu jedem Schichtkomplex wurde je ein Mittelwert aus den Messergebnissen der nasalen und der temporalen Eminenz gebildet. Zu erkennen sind die Mittelwerte (Punkte) und die dazugehörigen Standardabweichungen (Linien). N = nasal, T = temporal, TRT = Retinagesamtdicke (total retinal thickness), RNFL&GCL = Schichtkomplex der retinalen Nervenfaserschicht (RNFL) zusammen mit der Ganglienzellschicht (GCL), IPL&INL = Schichtkomplex der inneren plexiformen Schicht (IPL) und der inneren Körnerschicht (INL), OPL-ELM = Schichtkomplex der äußeren plexiformen Schicht (OPL) bis zur äußeren Grenzmembran (ELM), INL-ELM = Schichtkomplex der inneren Körnerschicht (INL) bis äußere Grenzmembran (ELM), ELM-RPE/BM = Schichtkomplex äußere Grenzmembran (ELM) bis retinales Pigmentepithel/Basalmembran (RPE/BM), Ft = Fovea temporalis, WOE = Waldohreule, WK = Waldkauz, Rfk = Raufußkauz, Stk = Steinkauz



**Abbildung 33:** Darstellung der vermessenen Schichten im Bereich der Eminenzen superior und inferior der Fovea temporalis der nachtaktiven Greifvögel. Zu jedem Schichtkomplex wurde je ein Mittelwert aus den Messergebnissen der Eminenz superior und der Eminenz inferior gebildet. Zu erkennen sind die Mittelwerte (Punkte) und die dazugehörigen Standardabweichungen (Linien). N = nasal, T = temporal, TRT = Retinagesamtdicke (total retinal thickness), RNFL&GCL = Schichtkomplex der retinalen Nervenfaserschicht (RNFL) zusammen mit der Ganglienzellschicht (GCL), IPL&INL= Schichtkomplex der inneren plexiformen Schicht (IPL) und der inneren Körnerschicht (INL), OPL-ELM = Schichtkomplex der äußeren plexiformen Schicht (OPL) bis zur äußeren Grenzmembran (ELM), INL-ELM = Schichtkomplex der inneren Körnerschicht (INL) bis äußere Grenzmembran (ELM), ELM-RPE/BM = Schichtkomplex äußere Grenzmembran (ELM) bis retinales Pigmentepithel/Basalmembran (RPE/BM), Ft = Fovea temporalis, WOE = Waldohreule, WK = Waldkauz, Rfk = Raufußkauz, Stk = Steinkauz



**Abbildung 34:** Schematische Übersicht der Morphologie der Fovea temporalis: Darstellung der Abstände N-T und S-I als waagerechte Linien (S-I mit hellerem Farbton dargestellt) und der Tiefe der F. temporalis nachtaktiver Greifvögel. Eine sich daraus ergebende Form der Fovea ist anhand einer standardisierten Kurve gezeichnet.

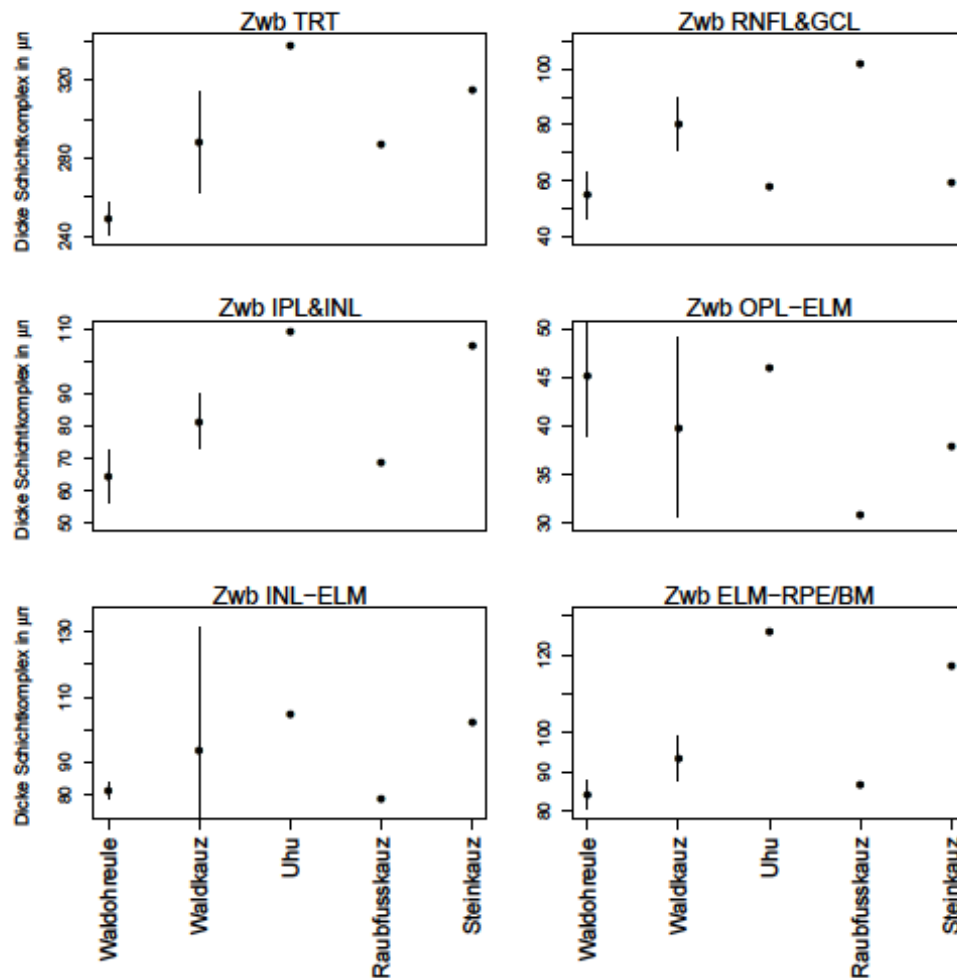
#### **4.5.2. Retinaler Zwischenbereich im Vergleich**

Bei den Ergebnissen ist zu beachten, dass bei Uhu und Steinkauz jeweils nur ein Individuum und nur ein Auge in die Auswertung eingingen und jeweils nur ein Schnittbild vom Zwischenbereich ausgewertet werden konnte.

Die Retinagesamtdicke (TRT) war beim Uhu mit 338,0  $\mu\text{m}$  und beim Steinkauz mit 315,0  $\mu\text{m}$  wesentlich höher als bei der Waldohreule mit 248,89  $\mu\text{m}$ . Die Gesamtretnadicken von Waldkauz und Raufußkauz waren ungefähr gleich, während bei der Waldohreule ca. 40  $\mu\text{m}$  niedrigere Messwerte erhalten wurden als bei den beiden vorher genannten Arten. Der Komplex RNFL&GCL war bei Waldohreule, Uhu und Steinkauz etwa gleich dick und dabei im Vergleich zu den anderen Arten am dünnsten. Am dicksten war er beim Raufußkauz (fast 45  $\mu\text{m}$  dicker). Die Komplexe IPL&INL und OPL-ELM variierten stark zwischen den Arten und erreichten die höchsten Messwerte beim Uhu mit 109,0  $\mu\text{m}$  bzw. 46,0  $\mu\text{m}$ , dies galt ebenso für den Schichtkomplex INL-ELM. Am niedrigsten waren die Werte der IPL&INL bei der Waldohreule mit 64,44  $\mu\text{m}$ . Der Komplex OPL-ELM war beim Raufußkauz mit 31,0  $\mu\text{m}$  am dünnsten. Die Schichten ELM bis retinales Pigmentepithel/Basalmembran unterschieden sich zwischen den Arten sehr deutlich. Am dicksten waren sie beim Uhu mit 126,0  $\mu\text{m}$ , gefolgt vom Steinkauz mit 117,0  $\mu\text{m}$  und Waldkauz mit 93,63  $\mu\text{m}$ . Die Dicke dieser Komplexe war bei Waldohreule (84,33  $\mu\text{m}$ ) und Raufußkauz (87,0  $\mu\text{m}$ ) ungefähr gleich (Abb. 35).

#### **Der retinale Zwischenbereich im Vergleich zur Retina der Foveae**

Die TRT des Zwischenbereichs war generell deutlich höher als die Retinadicke im zentralen Bereich (CFT), aber niedriger als an den Eminenzen der F. temporalis, außer beim Uhu und Raufußkauz. Hier war jeweils die TRT des Zwischenbereichs geringgradig dicker. Der Komplex RNFL&GCL des Zwischenbereichs war deutlich dicker als jener der Eminenzen der F. temporalis. Die Komplexe IPL&INL, OPL-ELM und INL-ELM waren im Zwischenbereich dünner als an den Eminenzen der F. temporalis, mit Ausnahme des Uhus. Hier war der Komplex OPL-ELM des Zwischenbereichs um 11,5  $\mu\text{m}$  dicker als an den Eminenzen N/T. Der Komplex ELM-RPE/BM des Zwischenbereichs war ebenfalls bei allen Arten dünner, mit Ausnahme des Steinkauzes, bei dem diese Schichten im Zwischenbereich im Vergleich zu den Eminenzen dicker waren. Die INL-ELM des Zwischenbereichs war dicker als die der zentralen F. temporalis. Die ELM-RPE/BM waren im Zwischenbereich dünner ausgeprägt als zentral in der F. temporalis.



**Abbildung 35:** Darstellung der vermessenen Schichten im retinalen Zwischenbereich der nachtaktiven Greifvögel. Zu beachten ist, dass es sich bei Uhu und Steinkauz um Einzelwerte und beim Raufußkauz um die Werte eines einzelnen Individuums handelt. Zu erkennen sind die Mittelwerte (Punkte) und die dazugehörigen Standardabweichungen (Linien). Zwb = retinaler Zwischenbereich, TRT = Retinagesamtdicke (total retinal thickness), RNFL&GCL = Schichtkomplex der retinalen Nervenfaserschicht (RNFL) zusammen mit der Ganglienzellschicht (GCL), IPL&INL = Schichtkomplex der inneren plexiformen Schicht (IPL) und der inneren Körnerschicht (INL), OPL-ELM = Schichtkomplex der äußeren plexiformen Schicht (OPL) bis zur äußeren Grenzmembran (ELM), INL-ELM = Schichtkomplex der inneren Körnerschicht (INL) bis äußere Grenzmembran (ELM), ELM-RPE/BM = Schichtkomplex äußere Grenzmembran (ELM) bis retinales Pigmentepithel/Basalmembran (RPE/BM), WOE = Waldohreule, WK = Waldkauz, Rfk = Raufußkauz, Stk = Steinkauz

#### 4.6. Vergleich tagaktive und nachtaktive Greifvögel

##### 4.6.1. Vergleich der F. centralis tagaktiver Greifvögel und der F. temporalis nachtaktiver Greifvögel

Betrachtet man den Abstand der **Eminenzen N/ T und S/I**, so wird sowohl bei den tagaktiven als auch bei den nachtaktiven Greifvögeln eine leichte Asymmetrie der Fovea deutlich. Die Abstände der Eminenzen der F. centralis waren weiter als die der F. temporalis, eine Ausnahme bilden die Rohrweihe, Mäusebussard und der Wespenbussard, bei denen die Weite der F. centralis vergleichbar war mit der F. temporalis der Waldohreule. Die **Tiefe der Fovea** war bei den tagaktiven Arten sehr viel prägnanter ausgebildet als bei den nachtaktiven, bei denen sie eine eher flache Form aufwies (Abb. 26 und 34). Die Retinagesamtdicke (CFT) in der zentralen Fovea war, mit Ausnahme des Sperbers, der eine wesentlich dünnere Retina aufwies, bei den tagaktiven Greifen und den Eulen ungefähr gleich dick. Dies galt jedoch nicht für den Schichtkomplex INL-ELM der **zentralen Fovea**, welcher bei den tagaktiven Vögeln dicker war als bei den nachtaktiven, und für die Schichten ELM-RPE/BM, die bei den tagaktiven Greifvögeln in der zentralen Fovea lediglich geringfügig dünner waren als bei den nachtaktiven. Die Dicke des Komplex ELM-RPE/BM der Waldohreule war mit der Dicke bei den tagaktiven Greifvögeln vergleichbar.

##### Schichtung der zentralen Fovea

Die Schichtung in der zentralen Fovea reduzierte sich bei den tagaktiven Greifvögeln in der F. centralis stärker als bei den nachtaktiven in der Fovea temporalis. So war bei den meisten nachtaktiven Eulen lediglich die RNFL und GCL nicht mehr differenzierbar, die IPL aber noch deutlich abgrenzbar. Bei den tagaktiven Greifen waren RNFL, GCL und meistens auch die IPL nicht mehr erkennbar. Beim Sperber war teilweise sogar die INL reduziert.

##### Eminenzen

Die TRT der **Eminenzen N/T und S/I** waren bei der F. centralis der tagaktiven Greifvögel dicker als bei der F. temporalis der nachtaktiven Vögel. Allerdings ist zu beachten, dass bei Rohrweihe, Uhu, Raufußkauz und Steinkauz nur jeweils ein einzelnes Tier einbezogen werden konnte. Die RNFL&GCL war bei den tagaktiven Arten generell geringgradig dicker ausgebildet als bei den Eulen, ebenso die Schichten IPL&INL, OPL-ELM (hierzu war beim Wespenbussard keine Aussage möglich, da die Schichten nicht eindeutig differenziert werden konnten) und INL-ELM, wobei hier der Dickenunterschied zu den nachtaktiven Arten recht deutlich

war. Bei den tag- und bei den nachtaktiven Vögeln war die IPL&INL dicker ausgebildet als die OPL-ELM, und zwar bei den tagaktiven Vögeln dreimal so dick (lediglich beim Wanderfalken nur 2,5 Mal so dick und bei der Rohrweihe sogar 3,5 Mal so dick). Bei den nachtaktiven Vögeln war der Komplex IPL&INL doppelt so dick wie der Komplex OPL-ELM, mit Ausnahme des Steinkauzes, bei dem die IPL&INL rund viermal so dick waren. Die äußere Körner- und äußere plexiforme Schicht waren also bei den nachtaktiven Greifen relativ dicker als bei den tagaktiven. Der Uhu wurde hier aufgrund einer begrenzten Anzahl an Messungen nicht berücksichtigt.

Bei Addition der Dickenmesswerte der Komplexe IPL&INL und OPL-ELM betrug die Dicke bei Mäusebussard, Habicht und Turmfalke jeweils etwa 305  $\mu\text{m}$  und bei Sperber, Wanderfalke und Rohrweihe jeweils etwa 265  $\mu\text{m}$ . Bei beiden Gruppen war die Dicke höher als bei den nachtaktiven Arten, bei denen die Summe der Dickenmesswerte der beiden Komplexe zwischen durchschnittlich 130  $\mu\text{m}$  und 160  $\mu\text{m}$  variierte. Eine Ausnahme bildete hier der Steinkauz mit rund 190  $\mu\text{m}$  Dicke. Am schwächsten waren die beiden Komplexe bei der Waldohreule ausgebildet.

Der Komplex ELM-RPE/BM war bei den nachtaktiven Arten meist etwas dicker ausgebildet als bei den tagaktiven. Am dicksten waren die Schichten bei Uhu, Steinkauz und Waldkauz. Eine Ausnahme stellte dieser Komplex bei der Waldohreule dar, er war bei dieser Art im Vergleich zu den anderen Eulen relativ dünn und ähnlich dick wie bei den tagaktiven Greifen.

#### **4.6.2. Vergleich der *F. temporalis* tagaktiver und nachtaktiver Greifvögel**

Da bei der Rohrweihe die *F. temporalis* in beiden Augen aufgrund pathologischer Veränderungen nicht dargestellt werden konnte und da beim Wespenbussard nur eine *F. centralis* festgestellt wurde, wurden bei der Beschreibung der *F. temporalis* nur fünf tagaktive Greifvogelarten berücksichtigt.

Die **Abstände der Eminenzen N/ T und S/I der *F. temporalis*** sowohl der tagaktiven als auch der nachtaktiven Greifvögel unterschieden sich geringfügig und wiesen daher auf eine leicht längliche Form der Foveae temporales hin. Nicht mit einbezogen wurde der Uhu. Bei ihm waren keine verwertbaren Daten aus dem Vertikalschnitt vorhanden, so dass der Abstand S-I nicht gemessen werden konnte.

Die **Tiefe** der Fovea temporalis variierte im Vergleich zwischen den Arten der beiden Gruppen stark. Allerdings besaß der Turmfalke, der unter den einbezogenen tagaktiven Vögeln die tiefste Fovea aufwies (104,81  $\mu\text{m}$ ), eine flachere Fovea als der Steinkauz, der bei den nachtaktiven Greifen den größten Wert erreichte

(141,5  $\mu\text{m}$ ). Die flachste Fovea temporalis bei den tagaktiven Arten hatte der Sperber mit 24,0  $\mu\text{m}$  Tiefe, bei den nachtaktiven war es die Waldohreule mit 47,03  $\mu\text{m}$  (Abb. 27 und 34).

### Schichtung der zentralen Fovea

Bei den tagaktiven Vögeln war eine deutlich geringere Reduzierung der Schichten zu beobachten als bei den nachtaktiven Vogelarten. Die RNFL war bei keiner der nachtaktiven Arten im zentralen Bereich der F. temporalis erkennbar, jedoch bei 60 % und 14 % der Aufnahmen beim Sperber bzw. Habicht, wenn auch deutlich reduziert. Die GCL war bei drei nachtaktiven Arten gar nicht mehr und bei zwei Arten nur noch gering abgrenzbar, während sie bei den tagaktiven Greifen meist deutlich differenzierbar war. Die IPL war bei allen tagaktiven Arten immer vorhanden, nicht aber bei den nachtaktiven Arten. Bei den Eulen war die Schichtung erst ab der INL vollständig vorhanden (s. Tab. III-A bis III-C im Anhang).

Die CFT war bei den nachtaktiven Arten geringer als bei den tagaktiven. Der Schichtkomplex INL-ELM der **zentralen Fovea** war bei den tagaktiven dicker als bei den nachtaktiven. Sowohl bei tag- als auch bei nachtaktiven Greifvögeln waren die ELM-RPE/BM im Bereich der zentralen Fovea dicker als im Bereich der Eminenzen. Außerdem waren sie bei den tagaktiven Vögeln in der zentralen Fovea etwas dünner als bei den nachtaktiven. Der Uhu wies mit 140  $\mu\text{m}$  die dicksten Schichten auf. Am dünnsten war der Komplex beim Sperber (69,40  $\mu\text{m}$ ).

### Eminenzen

Die TRT der **Eminenzen N/T und S/I** erreichte bei den tagaktiven und nachtaktiven Arten ähnliche Ausmaße. Die RNFL&GCL waren bei den tagaktiven Arten nur gering dicker ausgebildet als bei den Eulen. Die Schichten IPL&INL waren bei den tagaktiven Vögeln dicker als bei den nachtaktiven. Eine Ausnahme bildete der Steinkauz, bei dem die beiden-Schichten ähnlich dick wie bei den tagaktiven Arten ausgebildet waren. Bei den tagaktiven Greifvögeln ebenfalls dicker waren die OPL&ONL und die INL-ELM. Sowohl bei tag- als auch bei nachtaktiven Arten war die IPL&INL dicker ausgebildet als die OPL&ONL. Der Komplex ELM-RPE/BM war bei den Eulen deutlich dicker aufgebaut als bei den tagaktiven Greifen.



#### **4.6.3. Vergleich des retinalen Zwischenbereiches tagaktiver und nachtaktiver Greifvögel**

Da der Zwischenbereich beim Wespenbussard nicht vermessen werden konnte, entfällt diese Vogelart in der vergleichenden Betrachtung.

Die TRT des Zwischenbereichs war bei den tagaktiven Vögeln deutlich höher als bei den nachtaktiven, mit Ausnahme des Uhus. Dies traf ebenso für die RNFL&GCL (mit Ausnahme des Raufußkauzes), die IPL&INL und die INL-ELM zu. Die OPL-ELM war beiden Gruppen ähnlich dick, während der Komplex ELM-RPE/BM bei den nachtaktiven Arten dicker war (Abb. 28 und 35).

## V. DISKUSSION

### 1. Material und Methodik der OCT

#### 1.1. Probanden

Das Ziel dieser Studie war es, die Darstellbarkeit und Möglichkeit der Untersuchung der Fovea mittels OCT aufzuzeigen und sowohl den Aufbau der Foveae bei tagaktiven Greifvogelarten und bei Eulen zu beschreiben als auch Variationen in der Morphologie der F. centralis und F. temporalis zu erfassen. Dazu wurde mit 56 Wildvogelpatienten, die 13 verschiedenen Arten aus 3 Ordnungen angehörten, ein breites Spektrum von tag- und nachtaktiven Arten einbezogen. Lediglich bei einigen Arten stand im Untersuchungszeitraum nur ein Einzeltier zur Verfügung, und zwar bei der Rohrweihe (*Circus aeroginosus*), dem Raufußkauz (*Aegolius funereus*), dem Steinkauz (*Athene noctua*) und der Schleiereule (*Tyto alba*), so dass keine Informationen zu einer möglichen intraartlichen Variation vorliegen. Bei der Schleiereule konnten keine Aufnahmen der Fovea gemacht werden, da sie nicht lokalisiert werden konnte. Ob die Fovea von Schleiereulen sich tatsächlich nicht als Grube wie bei den anderen Eulen darstellte, kann an dieser Stelle nicht entschieden werden. Hierfür sind Untersuchungen weiterer Exemplare von Nöten. Beim Uhu wurden Augenuntersuchungen bei zwei Tieren durchgeführt, jedoch konnten nur von einem Patienten auswertbare OCT-Aufnahmen der Retina gemacht werden, da der andere Uhu eine mature Katarakt aufwies und eine Untersuchung des Augenhintergrundes somit nicht möglich war. Es ging also auch hier nur ein einzelnes Exemplar in die Auswertung ein.

Die Studie war als Orientierungsstudie konzipiert und hatte somit nicht das Ziel statistisch belegte Referenzwerte zu erheben. Daher wurden auch die oben genannten Einzelpatienten als Einzelfallbeschreibungen berücksichtigt. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss jedoch berücksichtigt werden, dass es sich um Eigenheiten eines Einzeltieres handeln könnte.

#### 1.2. Verwendete Technik

In der vorliegenden Studie wurde das OCT-Gerät Spectralis® Plus, erweitert auf das Modell HRA+OCT, der Firma Heidelberg Engineering, Heidelberg, Deutschland, verwendet. Die im OCT-Gerät verwendete Superlumineszenzdiode (SLD) erzeugte einen Lichtstrahl mit einem durchschnittlichen Strahldurchmesser von zwei Millimetern. Für eine Reihe von Greifvogel- und Eulenarten liegen Informationen zum durchschnittlichen Pupillendurchmesser vor, die zwischen 5,5 mm

(Sperber; KALLÄHN 2014) und 15 mm (Virginia-Uhu; LIND et al. 2008) variierten. Für tagaktive Arten wurde beim Mäusebussard 8,1 mm, beim Wespenbussard 6,4 mm, beim Wanderfalke 6,1 mm, beim Sperber 5,5 mm und beim Habicht 8,1 mm ermittelt (KALLÄHN 2014). Bei den nachtaktiven Arten war der Pupillendurchmesser etwas größer. So betrug er beim Virginia-Uhu 15 mm, beim Raufußkauz 12 mm, bei der Sumpfohreule 13 mm und beim Bart- und Habichtskauz 14 mm bzw. 12,5 mm (LIND et al. 2008). Der von dem in dieser Studie verwendeten Gerät produzierte Lichtstrahl konnte somit die Pupille der hier einbezogenen Arten passieren, ohne Vignettierung durch die Iris zu verursachen.

Zur weiteren Erleichterung der Durchführung fanden die Untersuchungen in einem abgedunkelten Raum statt. Nicht nur um die Tiere zu beruhigen, sondern auch, um einer Miosis vorzubeugen. Fanden die Untersuchungen in Allgemeinanästhesie statt, so wurde die Narkose-induzierte Weitstellung der Pupille genutzt, um die Aufnahmen zu erleichtern. Beim Vogel ist die Irismuskulatur quergestreift und reagiert willkürlich. Parasympatolytica zur Induzierung einer Mydriasis sind daher unwirksam. Eine Weitstellung kann jedoch durch Injektion von d-Tubocurarin mittels Parazentese in die vordere Augenkammer (KORBEL 2000, REESE et al. 2009) oder durch die topische Anwendung von Rocuronium Bromid (BARSOTTI et al. 2012) erzeugt werden. Da jedoch bei den einbezogenen Vogelarten die Pupillenweite generell für eine Untersuchung mittels OCT ausreichte, konnte auf die Induzierung einer Mydriasis durch die beiden genannten Methoden verzichtet werden.

Das in dieser Arbeit verwendete Spectralis® Plus erreichte eine Eindringtiefe von 1,9 mm in das Gewebe und ermöglichte somit auch die Untersuchung tief liegender Schichten. Es waren alle Schichten der Retina darstellbar und konnten basierend auf Kenntnissen von anderen Tierarten und vom Menschen differenziert werden. Eine Ausnahme stellte lediglich der Wespenbussard dar, bei dem sich die äußeren Schichten ab der äußeren Körnerschicht nicht eindeutig zuordnen ließen. Die Ursachen dafür sind unklar. Ob dies auf einen anderen Aufbau der Retina oder andere intrinsische Eigenschaften, beispielsweise einer anderen zellulären oder biochemischen Zusammensetzung und damit anderen optischen Eigenschaften der Schichten zurückzuführen ist, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden. Hierfür wären weitere Studien, z. B. immunhistologische Untersuchungen, von großem Wert.

Bei vereinzelten Patienten dieser Arbeit war eine Darstellung des Augenhintergrundes mittels OCT nicht möglich. Dies war in diesen Fällen auf eine Linsenluxation, eine Katarakt oder ein hochgradiges Hyphema zurückzuführen, also

auf pathologisch veränderte Strukturen mit geringer Lichtdurchlässigkeit. Zwar könnte die Retina in diesen Fällen mittels Sonografie, CT oder MRT untersucht werden, um Aussagen zu eventuell pathologischen Zuständen der Retina zu treffen, eine Darstellung und Untersuchung der **Foveae** an sich ist jedoch mit diesen Methoden nicht möglich (GUMPENBERGER&KOLM 2006, GUMPENBERGER&KORBEL 2001, LIEPERT 2013, STROBEL 2010), da das nötige Auflösungsvermögen nicht erreicht wird.

Das verwendete OCT-Gerät nutzte eine Wellenlänge von 870 nm und erreichte so eine axiale Auflösung von bis zu 3,9 µm und eine transversale Auflösung von bis zu 6 µm. Im Vergleich zur MRT oder CT verfügte es somit über eine bessere axiale und transversale Auflösung (HUANG et al. 1991, DREXLER 2004, DREXLER&FUJIMOTO 2008). Gegenüber dem konventionellen Ultraschall weist es ebenfalls eine um eine Größenordnung bessere Auflösung auf (DREXLER 2004, FUJIMOTO 2003). Gegenüber der konfokalen Mikroskopie besitzt die hier verwendete OCT den Vorteil, bis zu ein bis drei Millimeter tief in die meisten Gewebe (neben transparenten Geweben wie die Retina) eindringen zu können, dies jedoch in Abhängigkeit von den optischen Eigenschaften des Gewebes und der Streuung des Lichtes (DREXLER 2004, FUJIMOTO 2003, HUANG et al. 1991, KERN&COLITZ 2013,). Mittels OCT sind jedoch keine direkten Aussagen zur Funktionalität der Retina oder der Areae und Foveae möglich. Hierfür müsste auf die Elektroretinografie (STÜTZ 1997) oder die Pupillometrie (KALLÄHN 2014) zurückgegriffen werden.

Für die Sonografie des Augenhintergrundes, für die verschiedene Methoden der Untersuchung angewendet werden können, also direkt korneal, transpalpebral oder mittels einer auf die Hornhaut aufgetragenen Vorlaufstrecke (LIEPERT 2013, POULSEN NAUTRUP et al. 1998, STROBEL 2010), ist es erforderlich, das Auge für die Untersuchung zu berühren. Daher wird in der Regel eine Lokalanästhesie angewendet. Für eine CT- oder MRT-Untersuchung der Retina ist eine Allgemeinanästhesie unumgänglich (GUMPENBERGER&KOLM 2006). Diese Techniken sind somit mit einem Narkoserisiko behaftet. Die OCT kann ohne direkten Kontakt zum Auge und sogar ohne Lokalanästhesie durchgeführt werden. Eine Narkose war bei dem hier einbezogenen Patientengut nicht nötig. Eine leichte Sedation mit Midazolam erwies sich jedoch als vorteilhaft (Stressreduzierung, schnellere Durchführung, bessere Bildqualität). Im Vergleich zu Ophthalmoskopie, Ultraschall und Pupillometrie lieferte die OCT in der aktuellen Studie bei zehn Patienten, die mit all diesen Methoden vergleichend untersucht wurden, zusätzliche strukturelle/morphologische Informationen zu Foveaform und -aufbau.

### **1.3. Durchführung der Aufnahmen**

#### **1.3.1. Prozedere**

RAUSCHER et al. (2013) führten ihre OCT-Untersuchungen bei Vögeln unter Allgemeinanästhesie, RUGGERI et al. (2010) dagegen ohne jegliche Ruhigstellung durch. In dieser Studie wurde kein einheitliches Prozedere gewählt. Die OCT-Aufnahmen wurden bei 21 einbezogenen Patienten wach, bei 16 Patienten mit einer leichten Sedation und bei 19 Patienten in Narkose durchgeführt. Für die Sedation wurde Midazolam in einer Dosierung von 2 mg/kg verwendet. Diese hatte sich bereits in der Untersuchung bei anderen Vogelarten bewährt (AJADI et al. 2009, CARPENTER 2005, KORBEL&LIERZ 2012, MANS et al. 2012, PAUL-MURPHY&FIALKOWSKI 2001, VESAL&ESKANDRANI 2006). Das Medikament wurde überwiegend intranasal appliziert, zeigte aber auch nach oraler oder intramuskulärer Verabreichung zufriedenstellende Wirkung. Bei 22 Patienten wurde entschieden, die Aufnahmen in Narkose durchzuführen. Dabei handelte es sich um 19 Patienten, die im Anschluss an die Untersuchung aufgrund infauster Prognosen anderweitiger Erkrankungen euthanasiert werden sollten, bei denen also eine Allgemeinnarkose im Rahmen der Euthanasie geplant war, und um drei Patienten, die bereits in der vorangegangenen Allgemeinuntersuchung als sehr stressempfindlich aufgefallen waren. Bei diesen drei Vögeln wurde eine Narkose aus Gründen der Stressreduzierung eingesetzt. Damit verbundene Nachteile liegen in Risiken eines Narkosezwischenfalls und im größeren Aufwand. Zudem wurden die OCT-Aufnahmen häufig durch den für die Narkose verwendeten Trachealtubus erschwert, weil dieser die Schwenkbarkeit der Kamera und damit die genaue Ausrichtung behinderte. Dadurch war es schwieriger, qualitativ gute Aufnahmen zu erhalten und die Dauer von Narkosebeginn bis zum Abschluss erfolgreicher Aufnahmen im Vergleich zu der Durchführung im Wachzustand oder Sedation der Patienten war deutlich verlängert (Ergebnisse nicht dargestellt).

Unterschiede bei der Vorgehensweise ergaben sich auch zwischen den einbezogenen Vogelordnungen. Es gestaltete sich bei den Falconiformes schwieriger, auswertbare Aufnahmen im Wachzustand zu erhalten, als bei den Accipitriformes und Strigiformes. Die Falkenartigen neigten zu relativ starken Abwehrbewegungen und Bewegen des Kopfes und der Augen, was die Untersuchungszeit verlängerte und für die Tiere Stress bedeutete. Zusätzlich trat vor allem bei den Turmfalken Vignettierung der Fundusaufsicht auf, auch wenn im Aufnahmemodus die Augengröße S (small) ausgewählt wurde. Dies resultierte in einem schlechteren B-Scan. Die Ursache war vermutlich die kleine Augengröße und die Augenform dieser Vögel. Bei vielen Bussarden und Eulenarten trat während der

Untersuchung eine natürliche Schreckstarre auf, die für die Untersuchung genutzt werden konnte. Es ist unklar ob das entsprechende Verhalten dieser Vögel einen unterschiedlichen Stresspegel anzeigte. Dazu wären weitere Studien wünschenswert. In der vorliegenden Untersuchung war die OCT-Untersuchung medizinisch indiziert

Die beim Vogel physiologischerweise auftretenden oszillatorischen Augenbewegungen (REESE et al. 2009, WOOD 1917) erschwerten die Aufnahmen des Augenhintergrundes nicht. Generell erleichterte jedoch das im System vorhandene Eye -Tracking (TruTrack™ Technologie) die Aufnahmen und verkürzte erheblich die Aufnahmedauer, da sich beim Vogel, anders als beim Menschen, Augen- und Kopfbewegungen nicht vermeiden lassen. Auch durch die Person, die den Patienten hielt und ausrichtete, wurden kleine, ungewollte Bewegungen ausgeführt und konnten somit zu Artefakten führen, die jedoch vom TruTrack™ in einem kleinen Rahmen gehalten werden konnten.

### **1.3.2. Verträglichkeit**

Insgesamt wurden die OCT-Untersuchungen von den einbezogenen Patienten gut toleriert und bei sedierten Tieren nur leichte, bei wachen Tieren unterschiedlich ausgeprägte Abwehrbewegungen beobachtet. Falconiformes waren hierbei wehrhafter als Accipitriformes oder Strigiformes. Bei drei von insgesamt 56 untersuchten Tieren mussten die Untersuchungen aufgrund von Tachypnoe und/oder Schnabelatmung abgebrochen werden. Diese Tiere waren im Wachzustand untersucht worden. Keines der Tiere in Allgemeinanästhesie erlitt einen Narkosezwischenfall. Als eine gute Methode erwies es sich, die Untersuchung mit einer leichten Sedation mit Midazolam durchzuführen. Für die Tiere bedeuteten die Aufnahmen weniger Stress, die Untersuchungen konnten zügig durchgeführt werden, was dadurch stressmindernd war und es waren in relativ kurzer Zeit qualitativ gute, auswertbare Aufnahmen erhältlich. Alle Tiere erholten sich gut von der Sedation. Aus den vorliegenden Erfahrungen kann daher empfohlen werden, die OCT-Untersuchungen von Greifvogelpatienten mit einer leichten Sedation durchzuführen.

Um ein Glaukom zu erkennen, das für die OCT-Untersuchung ein Ausschlusskriterium bedeutet hätte, aber auch zur Erfassung möglicher stressbedingter Erhöhung des Augeninnendruckes, wurde jeweils vor und direkt nach der OCT-Untersuchung der IOD gemessen. Bei allen Patienten lag der Druck vor der OCT-Untersuchung im Referenzbereich. Nur bei den Waldohreulen und einem Waldkauz waren die Werte mit 10,56 mmHg und 13,5 mmHg leicht erhöht

(REUTER 2009, TANDLER 2013). Der IOD nach der OCT-Untersuchung war bei allen Patienten unverändert oder war niedriger als zuvor (s. Tab. 3). Eine Ausnahme bildeten die beiden Habichte, bei denen der Augeninnendruck um 2 mmHg auf durchschnittlich 19,48 mmHg anstieg und somit geringgradig erhöht war (REUTER 2009). Für die Arten Wespenbussard, Steinkauz und Raufußkauz lagen keine Referenzwerte vor, die Messwerte waren aber mit dem durchschnittlichen IOD der tagaktiven und der nachtaktiven Vögel vergleichbar. Auch aufgrund der Ergebnisse der Augeninnendruckmessungen wurden daher die OCT-Untersuchungen dieser Arbeit als relativ stressarme Untersuchungen bewertet.

RUGGERI et al. (2007) empfahlen in einer Studie an Mäusen künstliche Tränen zu verabreichen, um die Kornea ausreichend feucht und damit transparent zu halten. In der vorliegenden Arbeit wurde daher die Kornea bei allen untersuchten Tieren in regelmäßigen Abständen mit steriler Kochsalzlösung benetzt und es war wachen Patienten erlaubt zu blinzeln. Es konnte hier bestätigt werden, dass die Qualität der Bilder bereits während der Aufnahmen durch die Gabe von künstlichen Augentropfen verbessert wurde. Außerdem wurde so einer Austrocknung der Kornea und damit einhergehend einer Reizung vorgebeugt. Möglicherweise wirkte sich auch die Tatsache positiv aus, dass die OCT eine kontaktfreie Methode ist und dass daher keine Lokalanästhetika wie bei der Sonografie verwendet werden mussten. Kein Tier wies direkt im Anschluss an die OCT-Untersuchung, oder Tage danach, eine Reizung der Hornhaut auf.

#### **1.4. Auswahl und Vermessung der Aufnahmen**

Insgesamt traten, neben den bereits erwähnten Vignettierungen, verhältnismäßig wenige Artefakte auf. Die Vignettierungen ließen sich nicht vermeiden und traten vor allem bei Vögeln mit kleinen Augen auf, wie z. B. Turmfalken, trotz Auswahl der Einstellung S für die kleinste Augengröße vor Beginn der Aufnahmen. Interessanterweise trat sie zwar auch bei den noch kleineren nachtaktiven Vogelarten Steinkauz und Raufußkauz auf, aber in wesentlich geringerem Ausmaß. Eine Ursache für dieses Phänomen könnte die starke Krümmung des Bulbus und der Retina beim Turmfalken und damit einhergehend eine eingeschränkte Ausleuchtung des Augenhintergrundes sein. Die Technik und Software der OCT wurde für die Humanmedizin entwickelt, so dass es hier für die Vogelophthalmologie noch an Änderungen und Anpassungen bedarf.

Die Verwendung einzelner Aufnahmen wurde allerdings auch durch Effekte eingeschränkt, die nicht dem verwendeten Gerät zu schulden sind. Kopf- und Augenbewegungen stellten sich entweder als unscharfe oder verschwommene

Bereiche oder als ganze Ausfälle mit Auslöschung des Signals im OCT-Scan dar. Im Glaskörper flotierende Substanzen, wie z. B. Fibrin oder Blut, verursachten ebenfalls eine Störung. Sie interferierten mit dem Scan-Strahl und führten unterhalb davon zu einer Auslöschung im Bild oder zumindest zu einer Verschlechterung der Bildqualität an dieser Stelle. Der Bereich der Fovea war jedoch selten davon betroffen, so dass eine gute Auswahl an Aufnahmen zur Auswertung der Daten zur Verfügung stand. Insgesamt war es möglich, mit dem Spectralis® Plus qualitativ hochwertige Aufnahmen der Foveae und des Zwischenbereiches anzufertigen. Die Schichtung der Retina im Bereich der Fovea und parafoveal war bei fast allen Patienten gut identifizierbar. Es wurden nur Aufnahmen für die Auswertung ausgewählt, die eine gute Qualität aufwiesen.

Waren die Schichten bei einem Patienten in der verwendeten Grundeinstellung, bei der die Schichten in Graustufen dargestellt wurden, nicht sofort eindeutig abgrenzbar, so wurde die von der Software zur Verfügung gestellten Möglichkeiten der Bearbeitung und Darstellbarkeit der Retina genutzt. So konnten durch Anpassen der Helligkeit, Kontrast und oftmals auch in der Farbdarstellung anstatt der grundeingestellten Graustufen, eine Abgrenzung der Schichtung deutlicher herausgearbeitet werden. Insgesamt war so auch bei den nachtaktiven Vögeln eine Abgrenzung der äußeren Retina ab der OPL zwar etwas schwieriger, jedoch nicht unmöglich. VELASCO GALLEG0 (2015) berichtete, dass bei Steinkauz und Raufußkauz die äußere Retina an fünf verschiedenen Bereichen des Augenhintergrundes, die in der hier dargestellten Studie nicht einbezogen wurden, aus diesem Grund nicht vermessen werden konnte. Bei der Retina der Fovea und des Zwischenbereichs konnte dies bei diesen beiden Vogelarten nicht bestätigt werden.

Als etwas schwieriger gestaltete sich das Auffinden geeigneter Schnittbilder für die Vermessung der Fovea. Für die Auswertung sollte die Fovea genau im Zentrum angeschnitten sein, und die tiefste Stelle, also der Bereich mit der tiefsten Einsenkung der Retina erfasst werden. Da es sich bei der Fovea jedoch um einen sehr kleinen Bereich handelt, könnte es also sein, dass die Fovea möglicherweise nicht immer exakt an der tiefsten Stelle getroffen wurde. Für die Auswertung wurden alle Schnittbilder gesichtet und jenes mit der tiefsten Einsenkung der Retina ausgewählt. Bei der Interpretation der Ergebnisse, insbesondere bei Arten, von denen nur Einzeltiere einbezogen werden konnten, muss also bedacht werden, dass die Werte eventuell nicht an der tatsächlich tiefsten Stelle der Fovea erhoben wurden, sondern nur an der mittels OCT identifizierten tiefsten Stelle.

Bei der Betrachtung der Schichtung im zentralen Bereich der Fovea fällt auf, dass



es Patienten gab, bei denen eine Schicht oder ein Teil eines Schichtkomplexes erkennbar war, während bei anderen Patienten aus derselben Art die Schicht nicht abgegrenzt werden konnte. So war beispielsweise die IPL in der F. centralis beim Mäusebussard nicht bei allen einbezogenen Individuen differenzierbar. Dies könnte damit erklärt werden, dass nicht bei allen Einzeltieren ein Scan von der tiefsten Stelle der Fovea gemacht wurde, sondern geringgradig parafoveal davon.

Ein parafovealer Anschnitt beeinflusst jedoch nicht nur den Messwert der Tiefe, sondern auch die zentrale Foveadicke und den Abstand der Eminenzen im B-Scan. Auch das muss bei der Interpretation der Ergebnisse bedacht werden. Allerdings ist zu bedenken, dass es sich hierbei nur um eine Diskrepanz von wenigen Mikrometern handeln dürfte, da Foveaaufnahmen, die erkennbar stark parafoveal angeschnitten waren, nicht in die Auswertung eingingen.

Ein ähnliches Problem entstand, wenn ein B-Scan nicht exakt senkrecht aufgenommen wurde, sondern leicht schräg (z. B. bei verkipptem Kopf). Die gemessenen Abstände der Eminenzen entsprachen dann nicht mehr der tatsächlichen Weite der Fovea. In diesem Fall entstanden Messfehler auch bei der Ermittlung der Dicke der Eminenzen und der Tiefe der Fovea. Außerdem konnte es sein, dass durch ein leichtes Verdrehen des Kopfes nicht mehr exakt die Eminenzen nasal, temporal, superior oder inferior getroffen wurden, sondern der Bereich zwischen ihnen. Die Messergebnisse der Abstände N/T und S/I variierten daher stark mit der Folge verhältnismäßig hoher Standardabweichungen. Diese Schwierigkeiten sind auch in der Humanmedizin bekannt, und es wird an Logarithmen gearbeitet, um diese Fehler zu bearbeiten oder auch um eine dreidimensionale optimierte Fovea (-Oberfläche) zu erstellen, an der dann die Messungen vollzogen werden können (DUBIS et al. 2009, SCHEIBE et al. 2014, TICK et al. 2011, WAGNER-SCHUMAN et al. 2011). Derzeit wird in der Humanmedizin eine spezielle Software eingesetzt, die für eine zentrale Ausrichtung der Makula und ein korrektes Ausrichten des B-Scans sorgt oder aber den Fokus korrigiert. Aufgrund des völlig anderen Aufbaus der menschlichen Makula im Vergleich zu den unterschiedlich ausgeprägten Foveae der Vögel ist diese Software aber in der aviären Ophthalmologie nicht einsetzbar.

Eine Entwicklung einer Software für die exakte OCT-Untersuchung der Retina, insbesondere der Foveae beim Vogel, wäre stark wünschenswert. Derzeit gibt es allerdings erst einzelne Publikationen über OCT-Untersuchungen beim Vogel, die Kenntnisse sind daher noch sehr beschränkt. Eine Software ist aufgrund der vielen Variationen der Foveatypen beim Vogel, die auch in der vorliegenden Untersuchung mittels OCT differenziert werden konnten, daher noch nicht in Aussicht. Somit lässt

sich ein fehlerhaftes Schnittbild nur vermeiden, indem sowohl auf eine korrekte Ausrichtung des Kopfes und der Augen des Vogelpatienten als auch des B-Scans geachtet wird. Zur Orientierung können im Fundusbild die Gefäßkaskade, welche horizontal und somit parallel zur unteren Bildbegrenzung verlaufen sollte, und die Position des Pecten oculi genutzt werden, der im Aufnahmebild physiologischerweise schräg stehen sollte, mit seiner Basis nach superio-temporal zeigend. Im B-Scan kann auf eine möglichst dünne zentrale Retina der Fovea geachtet werden, was aber bei tierischen Patienten herausfordernd ist und einiges an Erfahrung fordert. ADHI et al. (2012) untersuchten mit dieser Vorgehensweise die Makula beim Menschen, TICK et al. (2011) achteten zusätzlich auf einen kleinen Lichtreflex, der im B-Scan zu sehen ist, sobald die tiefste Stelle in der Fovea dargestellt wird. Beide Methoden werden von den beiden Gruppen als reproduzierbar und etabliert beschrieben. Ein Lichtreflex in den B-Scans der tiefsten Fovea war lediglich bei einigen Patienten in dieser Studie erkennbar.

Ein retinaler Zwischenbereich wurde als Bezugsgröße ausgewählt und die Differenzierbarkeit und Dicke der Schichten mit denen der Eminenzen und der zentralen Fovea verglichen. Dieser retinale Zwischenbereich wurde an einem definierten Punkt im Auge festgelegt und sollte für alle Vogelarten reproduzierbar sein. Es wurden Aufnahmen ausgewählt, auf denen der Schnittpunkt einer Linie im Bereich des Äquators mit einer gedachten Verlängerung durch den Pecten oculi zu erkennen war und die qualitativ gut geeignet für die Auswertung waren. Der Schnittpunkt wurde nach diesen Kriterien ausgewählt, um bei allen Patienten denselben Bereich der Retina vergleichen zu können, denn sowohl VELASCO GALLEG0 (2015) als auch RUGGERI et al. (2010) beschrieben eine Variation der Retinagesamtdicke (TRT) und Veränderungen der RNFL und GCL in Abhängigkeit von der Lokalisation im Auge. Konnte nicht exakt in diesem Schnittpunkt gemessen werden, so wurde ein Bereich so nahe wie möglich ausgewählt. Die erhobenen Messdaten zeigen auf, dass hier keine Unterschiede zu berücksichtigen waren. Bei einzelnen Patienten wurden jedoch zu diesem Zwischenbereich keine oder nur eingeschränkt Daten erhoben. Es lagen teilweise keine Aufnahmen in ausreichender Nähe zum Schnittpunkt vor oder es waren nur Horizontal- oder nur Vertikalschnitte vorhanden. Teilweise traten in dieser Lokalisation häufig Veränderungen auf, die eine Verwendung als Referenzpunkt ausschlossen. Das häufige Vorkommen pathologischer Veränderungen kann dadurch erklärt werden dadurch, dass der Bereich sehr nahe der Axis visualis (s. Abb. 8) lag und daher besonders prädisponiert war für Schädigungen der Retina, z. B. durch „sunburn“ (QUELLE: PROF. R. KORBEL mündlich; MURPHEY 1984).

Denkbar ist auch eine Prädisposition aufgrund systemisch bedingter, retinaler Erkrankungen, da der ausgewählte Zwischenbereich in der Nähe des Augenfächers und damit der Blut- und Nährstoffversorgung lag. Krankheitserreger und Keime können somit leicht auf die anliegenden Bereiche des Pecten oculi und somit den untersuchten Zwischenbereich übergreifen.

Die Betriebssoftware HEYEX sorgte für eine automatische Segmentierung der Schichten im B-Scan. Da sie jedoch für die menschliche Makula entwickelt wurde, mussten in jeder für die Auswertung ausgewählten Aufnahme die Segmentierungslinien manuell angepasst werden. Dies war bei Aufnahmen des Zwischenbereichs nur in geringem Maße nötig, insbesondere im Bereich der Fovea centralis jedoch wesentlich aufwendiger, da ihre Struktur sich wesentlich von der Morphologie der Makula des Menschen unterscheidet. Die manuelle Nachbearbeitung der Segmentierung bei der F. temporalis gestaltete sich einfacher, vermutlich bedingt durch den weniger stark ausgeprägten Clivus, die geringere Tiefe und ihre höhere Ähnlichkeit mit der menschlichen Makula. Teilweise wurde die Segmentierungslinie auch von der Software fälschlicherweise an im Glaskörper flotierende Substanzen wie Fibrin oder Blutkoagel angelegt, was ebenfalls korrigiert werden musste. Auch hier wäre die Entwicklung eines automatisch arbeitenden Logarithmus, wie er in der Humanmedizin erarbeitet wurde (SCHEIBE et al. 2014), wünschenswert.

Die Vermessung der Schichten im Zwischenbereich, in den Eminenzen und zentral in der Fovea wurde komplexeweise vorgenommen. Dies war einerseits durch eine bessere Abgrenzung eines Übergangs von einer nukleären zu einer plexiformen Schicht begründet. Letztere stellten sich stärker reflektierend dar und die Messungen wurden dadurch genauer und reproduzierbar. Andererseits bilden die innere und äußere plexiforme Schichten (IPL und OPL) mit der inneren und äußeren Körnerschicht (INL bzw. ONL) funktionelle Einheiten, da in den plexiformen Schichten die Synapsen der jeweiligen Zellkörper der Körnerschichten liegen. Bei Dickenveränderungen der nukleären Schichten sollten sich somit auch die plexiformen Schichten entsprechend verhalten. Daher wurde jeweils eine körnerenthaltende Schicht zusammen mit der zugehörigen plexiformen Schicht vermessen, also INL zusammen mit IPL und ONL zusammen mit der OPL. Die ELM war als eine deutlich abgrenzbare Schicht zu erkennen. RUGGERI et al. (2010) beschrieben in ihrer Studie, bei der allerdings jeweils nur ein Individuum zweier tagaktiver und zweier nachtaktiver Greifvogelarten einbezogen wurden, dass die äußere Außensegmentschicht der Fotorezeptoren (OS) dicker war als die innere (IS). Die Zuordnung des IS/OS-Komplexes im B-Scan in der

vorliegenden Arbeit war zwar möglich, eine deutliche Abgrenzung des OS zum darunterliegenden retinalen Pigmentepithel war jedoch unmöglich, so dass auch keine Aussage getroffen werden konnte, wie sich die Dicke des OS zum IS verhält. Die Beschreibungen von RUGGERI et al. (2010) können demnach weder bestätigt noch widerlegt werden.

Eine Abgrenzung des RPE zur Basalmembran war in der vorliegenden Studie nicht möglich. Daher wurden die Schichten von der äußeren Grenzmembran bis zum unteren retinalen Pigmentepithel bzw. der Basalmembran als ein Komplex gemessen (= ELM-RPE/BM). Dickenänderungen in der ELM oder BM wurden bisher weder histologisch beschrieben noch in Untersuchungen mittels OCT erwähnt. Dickenveränderung im Komplex ELM-RPE/BM sind daher in der vorliegenden Studie vermutlich entweder auf den Komplex der Außen- und Innensegmente der Fotorezeptoren zurückzuführen (IS/OS) oder aber auf Veränderungen im RPE. Da beide Schichten gemeinsam vermessen wurden, konnte hier allerdings nicht entschieden werden, welche der beiden Schichten eine Dickenveränderung ausmachte.

Bei allen tagaktiven und nachtaktiven Arten war zwischen IPL und INL eine besonders scharfe Abgrenzung zu erkennen, vermutlich aufgrund der starken Reflektivität der inneren plexiformen Schicht (s. Abb. 20 und 29). Diese deutliche Grenzlinie wurde genutzt, um bei allen Patienten einen Komplex von der inneren Körnerschicht bis zur äußeren Grenzmembran zu vermessen. Der Komplex INL-ELM sollte zusätzlich verwendet werden, um ein eventuell subjektives Empfinden bei der etwas schwierigeren Unterscheidung der Grenze zwischen INL und OPL auszugleichen, vor allem bei den nachtaktiven Arten. In histologischen Untersuchungen der Foveae verschiedener Vogelarten, u. a. tagaktiver Greifvögel und Eulen (FITE&ROSENFELD-WESSELS 1975, OEHME 1964), und in ausführlichen Untersuchungen zur Anatomie des Auges und der Fovea beim Sperling (SOLANKER 1918) wurde eine Verdrängung aller Schichten mit Ausnahme der Rezeptor-enthaltenden Schicht und des RPEs beschrieben. Das konnte in dieser Studie mittels OCT nicht bestätigt werden. Die Schichten reduzierten sich bei den tagaktiven Greifvögeln und Eulen zwar deutlich im Bereich der Fovea, aber maximal bis auf die INL, beim Sperber sogar bis zur OPL (s. Tab. III-A bis III-C im Anhang). Eine Schichtreduktion wurde auch in der menschlichen Makula so beschrieben (TICK et al. 2011). In der vorliegenden Untersuchung war eine Abgrenzung der Schichten in der zentralen Fovea aufgrund einer individuellen und interspezifisch unterschiedlichen Schichtreduzierung schwierig (s. Tab. III-A bis III-C im Anhang). Die Schichten konnten hier nicht einzeln oder komplexweise, wie in den

Eminenzen oder im Zwischenbereich, vermessen werden. Um die zentrale Fovea dennoch mit den anderen Bereichen vergleichen zu können, wurden hier die Messwerte des Komplexes INL-ELM herangezogen.

Da sich die Schichten beim Wespenbussard in ihrem Aussehen und ihrer Reflektivität anders darstellten als bisher in der Literatur beim Greifvogel beschrieben, sie sich somit nicht eindeutig zuordnen ließen und insbesondere keine ELM erkennbar war, konnten hier die Komplexe OPL-ELM und ELM-RPE/BM nicht vermessen werden. Stattdessen wurde zusätzlich der Komplex INL-RPE/BM untersucht. Ob die Schichtung aufgrund veränderter intrinsischer Eigenschaften nicht zuordenbar war oder ob beim Wespenbussard ein generell unterschiedlicher Retinaaufbau vorlag, kann an dieser Stelle nicht entschieden werden. Weitere histologische Untersuchungen wären hier interessant um die Einzelschichten identifizieren zu können.

### **1.5. Auswertung der Messdaten**

Die für die Analyse zu verwendenden Datensets waren nicht immer vollständig zu erfassen. Zum Retina-Zwischenbereich des Wespenbussards wurden keine Messdaten erhoben, da die Referenzposition wegen fehlender Sichtbarkeit der Gefäßkaskade nicht lokalisiert werden konnte. Außerdem wiesen alle fünf einbezogenen Patienten dieser Art Fundusveränderungen auf. Pathologische Veränderungen im Bereich der F. temporalis in beiden Augen waren die Ursache für fehlende Messwerte in der entsprechenden Region bei der Rohrweihe. Steinkauz, Raufußkauz und Uhu waren jeweils nur durch Einzeltiere vertreten. Bei diesen Patienten konnten nur Teile der Daten erfasst werden. So wurden keine Vertikalscans der Fovea und des Zwischenbereichs durchgeführt. Zusätzlich konnten bei Uhu und Steinkauz nur jeweils ein Auge untersucht werden, da das andere hochgradig pathologisch verändert war.

Da die vorliegende Arbeit als eine Orientierungsstudie konzipiert war und meist nur eine relativ geringe intraspezifische Variation der erfassten Merkmale festzustellen war, wurden die bei Einzelvögeln erhobenen Daten, auch wenn sie lückenhaft sind, in der vorliegenden Arbeit dargestellt. Für die Etablierung von statistisch validen Referenzbereichen sind noch weitere Studien mit einer höheren Fallzahl unabdingbar. Für den Einsatz der OCT in der Vogelophthalmologie sind sie unbedingt erforderlich. Diese Arbeit liefert dennoch eine erste Orientierungsbasis zur Bewertung der Foveae bei verschiedenen Greifvögeln in einer OCT-Untersuchung, da bisher keine ausführlichen Beschreibungen zur Foveamorphologie vorhanden waren.

Für jede der vier Messstellen der Eminenzen nasal, temporal, superior und inferior wurden die Werte für die TRT und die Komplexe RNFL&GCL, IPL&INL, OPL-ELM, ELM-RPE/BM einzeln erhoben. Da sich die Werte für die nasale und temporale Seite sowie die superiore und inferiore Seite jeweils kaum voneinander unterschieden (s. Tabellen II-B, IV-B und V-B im Anhang) wurde jeweils ein Mittelwert für die Eminenzen des Horizontalscans, der durch den nasalen und temporalen Rand der Fovea führte (= Eminenz N/T) und die des Vertikalscans (= Eminenz S/I) gebildet und für die Darstellung verwendet.

## **2. Ergebnisse der Untersuchung mittels Optischer Kohärenztomografie**

### **2.1. Darstellung der physiologischen Fovea und des Zwischenbereiches.**

Im Vergleich zur direkten oder indirekten Ophthalmoskopie ergänzt die OCT die fehlenden Tiefeninformationen der Netzhaut (DREXLER&FUJIMOTO 2008, JIAO et al. 2005, RUGGERI et al. 2007, SRINVANSAN et al. 2006, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Die OCT ist derzeit die einzige Methode, mit der die Fovea im Detail auch in der Tiefe betrachten werden kann. Dies wurde auch in einer ersten OCT-Pilotstudie an Greifvögeln bei je einem Individuum zweier tagaktiver und zweier nachtaktiver Greifvogelarten bestätigt (RUGGERI et al. 2010). In der vorliegenden Studie unter Einbeziehung von gesunden Retinabereichen von insgesamt 56 Vögeln aus 13 Arten und drei Greifvogel-Ordnungen (Falconiformes, Accipitriformes und Strigiformes) lieferte die OCT auch im direkten Vergleich zur Ophthalmoskopie, Sonografie und Pupillometrie, der bei zehn Individuen durchgeführt wurde, wertvolle zusätzliche Informationen. So konnten in der Ophthalmoskopie als „pathologisch verändert“ bestimmte Bereiche mit der OCT als unauffällig erkannt werden oder das Ausmaß pathologischer Veränderungen ergab sich mittels OCT als weit ausgeprägter als mit der Ophthalmoskopie vermutet. Auch bei z. T. schwer einsehbaren und damit nur schwer zu beurteilbaren Veränderungen konnten die Dimensionen erst mittels OCT hinreichend erkannt werden. Im Vergleich zur Pupillometrie, welche nur ein funktionelles Diagnostikum darstellt, konnten mittels OCT Veränderungen der Retina dargestellt werden. Im Vergleich zur Sonografie bestätigte die OCT-Untersuchung die Ergebnisse und ergänzte diese mit zusätzlichen Tiefeninformationen zu den Retinaschichten, welche mittels Ultraschall nicht weiter differenziert werden konnten. So ist zu erwarten, dass bei einer zukünftigen Anwendung der OCT bei Vögeln mit Augenerkrankungen

wesentliche Verbesserungen bei der Stellung der Diagnose und Prognose und bei der Festlegung der Therapie zu erwarten sind.

Beim Menschen wurden in der Makula bzw. „gelben Fleck“ (pigmentierte Struktur, die der Area entspricht), derselbe Aufbau der retinalen Schichtung wie in der sie umgebenden Netzhaut beschrieben (KO et al. 2004, SCHULZ-WACKERBARTH 2011). Eine Area ist ein Bereich in der Retina, in dem das lokale Auflösungsvermögen ansteigt und welche die Fovea umgibt. Auch beim Greifvogel wurde im Bereich der parafovealen Eminenzen, welche dem Bereich der Area entsprechen, eine Retinaschichtung wie in umgebenden Bereichen, aber verbunden mit einer Verdickung einzelner Schichten, nachgewiesen. Die vorliegende Studie liefert daher für die Veterinärmedizin erstmals OCT-basierte Informationen zum physiologischen Aufbau dieser Retinaregionen der Foveae und Areae, die es bisher als Studien zur Morphologie der Makula nur für den Menschen gab (BARAK et al. 2011, DUBIS et al. 2009, GHORBEL et al. 2011, SCHEIBE et al. 2014).

RUGGERI et al. (2010) beschrieben einen aufgenommen Querschnitt einer F. centralis eines Breitschwingenbussards. Eine dünne Schicht, die unterhalb der RNFL im Bereich der Eminenzen lag, ordneten sie der GCL zu. In der hier vorliegenden Arbeit waren alle Schichten der Vogelretina bei allen Patienten aller einbezogenen Arten, mit Ausnahme des Wespenbussards, eindeutig zu identifizieren. Dies galt sowohl für den retinalen Zwischenbereich als auch für die Foveae der tag- und der nachtaktiven Greifvogelarten. Insbesondere ist festzustellen, dass die GCL an allen untersuchten Bereichen der Eminenzen und im Zwischenbereich deutlich erkennbar und abgrenzbar war, sogar beim Wespenbussard (Abb. 20 und 29, Tabellen II-C und V-C).

In einer Pilotstudie von RUGGERI et al. (2010) zur OCT bei Greifvögeln wurden bei zwei Vögeln, einem Breitschwingenbussard (*Buteo platypterus*) und einem Kurzschwanzbussard (*Buteo brachyurus*), die Foveae dargestellt. Bei dem Breitschwanzbussard-Individuum wurden einige Besonderheiten in der Schichtung der Retina beschrieben, die in der vorliegenden Studie bei keiner Art festzustellen waren, allerdings wurde kein Breitschwingenbussard einbezogen. So war bei RUGGERI et al. (2010) in OCT-Scans an den Regionen der F. centralis die GCL als dünne Schicht unterhalb der RNFL lediglich im Bereich der Eminenzen und in einem längsovalen Bereich der Retina um die Foveae herum dicker und damit differenzierbar, konnte aber in anderen Fundus-Regionen nicht abgegrenzt werden (RUGGERI et al. 2010). Außerdem war die Fovea temporalis des Breitschwingenbussards nicht als eine Vertiefung, sondern als eine Verdickung

ausgebildet mit einer verdickten Schicht der Fotorezeptoraußensegmente. Allerdings wurde der B-Scan ohne das zugehörige Fundusaufsbild aufgeführt, so dass unklar ist, ob das Tomogramm im zentralen Bereich der Fovea oder vielleicht in der Area, also parafoveal, aufgenommen wurde. Basierend auf histologischen Untersuchungen wurde von WALLS (1963 a) bei der Area der Vertebraten eine Verdickung der beiden Körnerschichten, der Ganglienzellschicht und der Nervenfaserschicht beschrieben und stellte SLONAKER (1918) beim Spatz eine Verdickung der äußeren Körnerschicht im Zentrum der Fovea fest. Eine Verdickung der Fotorezeptoraußensegmente lässt sich mit einer größeren Dichte an Fotorezeptoren (Zapfen) erklären, die sowohl in der Area als auch in der Fovea ermittelt wurde. In den eigenen Untersuchungen (Ergebnisse nicht dargestellt) war ein parafovealer Anschnitt gekennzeichnet durch die Verdickung der GCL, INL, ONL und der Fotorezeptoraußensegmente der Retina und durch eine Abnahme der RNFL, kurz bevor sich die Retina zu einer fovealen Grube absenkte. Dies war besonders gut in dreidimensionalen Datensätzen zu beobachten. Für die F. temporalis des Breitschwingenbussards (RUGGERI et al. 2010) kann an dieser Stelle nicht entschieden werden, ob es sich bei der als B-Scan dargestellten Position um einen nicht zentralen Anschnitt oder eine individuelle (es wurde nur ein Einzeltier untersucht) oder artspezifische Besonderheit handelte. In der vorliegenden Studie wurde eine starke Abweichung der Morphologie der Foveae bei den untersuchten Wespenbussarden festgestellt. Sie wiesen nur eine gut ausgebildete Fovea, die F. centralis, auf, während eine Fovea oder Area temporalis nicht festgestellt werden konnte. Diese Vogelart unterscheidet sich in ihrer Lebensweise sehr stark von den anderen einbezogenen Arten. Sie zeigt eine Nahrungssuche und -aufnahme am Boden, so dass sich die Augen möglicherweise besonders angepasst haben. Die Lebensbedingungen des Breitschwingenbussards unterscheiden sich jedoch nicht von denen eines „typischen“ tagaktiven Greifvogels mit Jagd aus Distanz und sprechen daher gegen eine Reduzierung der Fovea temporalis zu einer reinen Area. Um zu evaluieren, ob die F. temporalis beim Breitschwingenbussard tatsächlich nicht ausgebildet ist, wären weitere Aufnahmen nötig.

RUGGERI et al. (2010) bezogen in ihre Untersuchungen zum Aufbau der Foveae noch die Aufnahme der F. centralis und temporalis bei einem Kurzschwanzbussard-Individuum ein. Hier konnten beide Foveae, mit typischer Schichtung tagaktiver Ausprägung, ähnlich wie in der vorliegenden Studie, dargestellt werden. Leider sind in der Studie von RUGGERI et al. (2010) keine Messwerte von einzelnen Retinaschichten angegeben, so dass ein Vergleich mit den eigenen Ergebnissen



nicht möglich ist.

Bezüglich der Form der Foveae wurde von RUGGERI et al. (2010) für den Kurzschwanzbussard festgestellt, dass die F. centralis im Bereich ihrer Eminenzen eine relativ starke Anhebung aufwies, wie sie auch in dieser Studie bei Mäusebussard, Habicht und Rohrweihe, sowie bei Wanderfalke und Turmfalke auch in der F. temporalis, beobachtet werden konnte (s. Abb. 20). Im Vergleich hierzu beschrieben RUGGERI et al. (2010) beim Breitschwingenbussard den Übergang der Retina in die F. centralis als flach. Dies konnte in dieser Studie bei Sperber und Wespenbussard ebenfalls beobachtet werden (s. Abb. 20).

In einer zweiten bislang publizierten Arbeit zu OCT-Untersuchungen beim Vogel (RAUSCHER et al. 2013) wurde insgesamt ein breites Artenspektrum von 45 Tieren aus 25 Spezies einbezogen, darunter 12 Greifvogel- und Eulenarten, für die die genaue Zahl an einbezogenen Individuen nicht angegeben war. Allerdings lag der Fokus bei RAUSCHER et al. (2013) auf der Darstellung pathologischer Zustände. Die physiologisch ausgeprägte Fovea wurde nur marginal einbezogen. Es konnte lediglich eine kurze OCT-Videosequenz der F. centralis und temporalis bei einem Mäusebussard in der Online-Version der Publikation betrachtet werden, Beschreibungen wurden nicht gegeben.

Zur Fovea nachtaktiver Greifvögel und Eulen existieren derzeit keine publizierten OCT-Studien, so dass Vergleiche mit den eigenen Ergebnissen also nicht möglich sind.

Dies ist somit die erste Studie, die in umfangreichen Untersuchungen eine Darstellbarkeit und Untersuchungsmöglichkeit der Foveae mittels OCT beim Greifvogel aufdeckt, morphologische Beschreibungen und Erhebungen von Messdaten beim tagaktiven Greifvogel und bei Eulen liefert und darüber hinaus Unterschiede in der Morphologie der F. centralis und temporalis zwischen tagaktiven Spezies, zwischen nachtaktiven Spezies und zwischen diesen beiden Gruppen aufzeigt. Ein retinaler Zwischenbereich wurde außerdem als Referenzbereich einbezogen.

## **2.2. Vergleich: Foveae der tagaktiven Greifvögel**

Die Retina tagaktiver Greifvögel ist in der Regel nicht nur mit einer Fovea centralis ausgestattet, sondern es findet sich hier meist noch eine zweite, oft weniger gut entwickelte Fovea temporalis (DUKE-ELDER 1958 b, FITE&ROSENFELD-WESSELS 1975, MARTIN 1985, MEYER 1986, WALLS 1963 c, WOOD 1917). Die F. centralis wurde als meist breiter, tiefer und besser differenziert als die F.

temporalis beschrieben (FITE&ROSENFELD-WESSELS 1975). Sie dient dem monokularen Sehen. Mit ihr kann der Vogel die Umgebung überwachen und sich schnell bewegende und vor allem entfernte Objekte erkennen (DUKE-ELDER 1958 b, MARTIN 1985, WALLS 1963 c).

Die Ergebnisse dieser Studie bestätigten auch mittels OCT das Vorhandensein einer sehr gut differenzierten Fovea centralis bei den einbezogenen tagaktiven Greifvogelarten. Die Retina veränderte sich sehr beeindruckend im Vergleich von Zwischenbereich bis zur Ausbildung der Fovea centralis: Die retinale Gesamtdicke nahm im Vergleich zum Zwischenbereich zu. Bei Mäusebussard, Habicht und Rohrweihe wölbte sich die Retina im Bereich der Eminenzen deutlich in den Glaskörper vor. Die Dickenzunahme war vor allem auf die Körner enthaltenden Messkomplexe zurückzuführen, denn die Nervenfaserschicht und die Ganglienzellschicht waren im Vergleich zum Zwischenbereich wesentlich dünner. Dafür nahmen aber die Komplexe INL&IPL, ONL-ELM und INL-ELM deutlich zu. Auch der Komplex ELM-RPE/BM wurde dicker, vermutlich aufgrund der sich proportional verdickenden Schicht der Außensegmente der Fotorezeptoren. Der Clivus war besonders steil ausgeprägt und dem Typ einer konvexiclivalen Fovea zuzuordnen. Die Schichten im zentralen Bereich reduzierten sich bei allen Greifvögeln bis zur inneren Körnerschicht. Der Komplex INL-ELM in der zentralen Fovea nahm im Vergleich zu den Eminenzen in der Dicke etwas ab. Auch der Komplex ELM-RPE/BM verdünnte sich etwas, war jedoch immer noch dicker als im Zwischenbereich, was vermutlich auf einen verdickten IS/-OS-Komplex zurückzuführen sein dürfte. Am tiefsten war die Fovea centralis beim Turmfalken, am flachsten bei der Rohrweihe.

Die Unterschiede in der Morphologie der F. temporalis im Vergleich zur F. centralis waren in dieser Studie sehr deutlich zu erkennen. Die Eminenzen der Fovea temporalis wölbten sich nur bei Wanderfalke und Turmfalke deutlich in den Glaskörper vor. Die retinale Gesamtdicke der Eminenzen war im Vergleich zum Zwischenbereich nicht dicker, sondern dünner. Dennoch war die Schichtung der Eminenzen mit denen der F. centralis vergleichbar: die RNFL und GCL waren dünner als im Zwischenbereich, die Körner enthaltenden Schichtkomplexe IPL&INL, OPL&ONL und INL-ELM nahmen zu. Eine Ausnahme stellte hier der Turmfalke dar, dessen Komplexe in den Eminenzen vergleichbar mit denen des Zwischenbereichs oder sogar etwas dünner waren. Allerdings wurde hier nur eine geringe Anzahl an Messungen einbezogen. Es wurden nur zwei Tiere untersucht, so dass weitere Untersuchungen notwendig sind. Die ELM-RPE/BM blieb im Bereich der Eminenzen gleich dick, vermutlich weil in der F. temporalis die Fotorezeptoren nicht ganz so

deutlich ansteigen wie in der F. centralis (FITE&ROSENFELD-WESSELS 1975), und sich somit auch die Außensegmente deutlich weniger verdickten. Nach einem etwas weniger steilen Clivus als in der F. centralis reduzierten sich die Schichten bei den meisten Greifvögeln bis auf die GCL, maximal bis zur IPL. Der Komplex INL-ELM nahm im Vergleich zu den Eminenzen etwas ab, der Komplex ELM-RPE/BM nahm geringgradig zu und war somit ungefähr gleich dick oder nur minimal dicker als im Zwischenbereich. Am tiefsten war die F. temporalis beim Turmfalken, am flachsten beim Sperber.

Der Wespenbussard war der einzige tagaktive Greifvogel ohne eine zweite, temporale Fovea und stellte sich insgesamt in seiner Schichtung im Vergleich zu den anderen tagaktiven Greifvögeln sehr unterschiedlich dar, er konnte daher nicht mit in die Auswertungen eingehen.

### **Weite und Tiefe**

Betrachtet man die Weite und Tiefe der Fovea centralis (Abb. 26), so ist eine speziesabhängige Gestalt (OEHME 1964) deutlich erkennbar. So war in der vorliegenden Untersuchung die Fovea am weitesten beim Sperber, Turmfalke und Habicht. Am tiefsten war sie jedoch beim Turmfalken, Mäusebussard und Habicht. Am kleinsten ausgeprägt, sowohl in der Weite als auch in der Tiefe, war sie bei der Rohrweihe. Vergleicht man die beiden Vertreter der Falconiformes, Turmfalke und Wanderfalke, so lassen sich keine Gemeinsamkeiten feststellen, ebenso bei den Habichtartigen, so dass man durch die Form der Fovea centralis nicht auf die Familienzugehörigkeit schließen kann. Insgesamt waren die F. centrales beim Mäusebussard und Habicht und beim Wanderfalke und Wespenbussard in ihrer Morphologie sehr ähnlich. Alle Foveae zeigten eine konvexiclivale Form. Hinweise auf eine negative Korrelation der Weite der Fovea mit der Augengröße (FITE&ROSENFELD-WESSELS 1975) deuteten sich auch in der vorliegenden Studie an. Demnach müssten Spezies mit einer kleinen retinalen Ausdehnung eine im Verhältnis weitere Fovea aufweisen. Dies traf in der vorliegenden Studie zumindest auf den Turmfalken und auf den Sperber zu, welche beide recht kleine Augen haben. Im Umkehrschluss müssten die größten Augen eine relativ kleine Weite der Fovea centralis aufweisen. So waren die Abstände der Fovea relativ schmal beim Mäusebussard, Wespenbussard und der Rohrweihe, alle drei Greifvögel mit relativ großen Augen. Um diese Beobachtungen zu bestätigen, sind jedoch weitere, histologische Untersuchungen und Vermessungen der Retinalängen und Augenproportionen von Nöten. Ein Zusammenhang zwischen der Tiefe der Fovea und der Augengröße (FITE&ROSENFELD-WESSELS 1975) konnte auch hier nicht beobachtet werden.

Die F. temporalis war meist ebenfalls konvexiclival, aber kleiner und weniger steil ausgebildet, und dies stützt somit die bisherigen Beschreibungen in der Literatur (FITE&ROSENFELD-WESSELS 1975, PUMPHREY 1961). Sie zeigte jedoch bei Vergleich innerhalb der tagaktiven Gruppe deutlich größere Unterschiede (s. Abb. 27). Die F. temporalis der Rohrweihe konnte aufgrund beidseits vorliegender pathologischer Veränderungen nicht einbezogen werden. In der Weite waren sich einerseits Sperber, Habicht und Turmfalke (mit den größten Abständen) und andererseits Mäusebussard und Wanderfalke (eher schmal) sehr ähnlich, was auch hier auf einen Zusammenhang zwischen Weite der Fovea und Augengröße bzw. retinaler Ausdehnung deuten könnte. In der Tiefe wurden deutliche Unterschiede festgestellt. Der Turmfalke hatte die tiefste Fovea, sie erreichte beinahe die Dimensionen der F. centralis der Rohrweihe. Mäusebussard und Wanderfalke ähnelten sich stark hinsichtlich Tiefe und Weite. Zwar sehr weit, jedoch nur sehr flach ausgebildet waren die Foveae temporales beim den nahe verwandten Arten Habicht und Sperber. Die Form ihrer Foveae entsprach eher dem konkaviclivalem Typ.

RUGGERI et al. (2010) beschrieben das Ausmaß der Tiefe der F. centralis eines Breitschwingenbussards mit 66 % der sie umgebenden Eminenzen, die Tiefe der F. temporalis wurde mit 34 % angegeben. FITE&ROSENFELD-WESSELS (1975) gaben, basierend auf histologischen Untersuchungen, für die Tiefe der F. centralis bei einem Rotschwanzbussard 56 % und für die F. temporalis 30 % der umgebenden Eminenzen an. Der Sperber erreichte in ihren Untersuchungen sogar eine Tiefe von 70 % für die F. centralis und von 52 % für die F. temporalis. Vergleicht man diese Ergebnisse mit den Werten der CFT (zentrale, foveale Dicke) in Bezug zur Gesamtretnadicke der Eminenzen in dieser Studie, so wies der Sperber dieser Studie sowohl eine flachere F. centralis als auch eine flachere F. temporalis auf. Die Werte für die Bussarde, also für die Arten der Gattung *Buteo*, waren jedoch sehr gut vergleichbar.

Insgesamt lässt sich von den Dimensionen der Foveae der hier untersuchten Taggreifvögel nicht auf phylogenetische Gemeinsamkeiten, Entwicklungsstufen oder Verbindungen zu einer ähnlichen Lebensweise schließen. Jedoch gibt es zur Funktionsweise der Fovea verschiedene Theorien, welche die unterschiedlichen Morphologien der Foveae centrales und temporales der hier untersuchten tagaktiven Greifvögel erklären könnte. Unter anderem soll eine tiefe, konvexe Fovea als ein Mechanismus dienen, der durch Verzerrung des Retinabildes im Bereich der Fovea eine genauere Fixierung und sensitivere Wahrnehmung entfernter oder sich bewegender Objekte, vor allem im Augenwinkel; bewirkt, wobei die Linsenwirkung

der Eminenzen umso größer ist, je steiler der Clivus verläuft (OEHME 1964, PUMPHREY 1948, PUMPHREY 1961). Demnach benötigen also vor allem Vögel mit einem kleinen Retinabild, also kleinen Augen, eine tiefe Fovea. Dies würde die tiefere F. centralis beim Turmfalken im Vergleich zum Mäusebussard (OEHME 1964), welches sich auch mittels OCT darstellen ließ, erklären. Die F. centralis dient, so wird vermutet, also durch ihre ausgeprägte Form und laterale Anordnung im Auge vor allem der monokularen Wahrnehmung sich schnell bewogender und weit entfernter Objekte (DUKE-ELDER 1958 b, MARTIN 1985, WALLS 1963 c).

Auch bei der F. temporalis kann von einem Verzerrungseffekt des Retinabildes ausgegangen werden, wenn auch abgeschwächer (OEHME 1964). Da die Sehachse der F. temporalis also geradeaus gerichtet ist um den binokularen Sehen zu dienen, also dem Einschätzen von Distanzen und Geschwindigkeiten dient (DUKE-ELDER 1958 b, MARTIN 1985, WALLS 1963 c), muss ihre Verzerrungswirkung und sensitive Wahrnehmung für Bewegungen eines Objektes nicht so stark ausgeprägt wie in der F. centralis sein. So stellten sich auch hier die mittels OCT untersuchten Foveae temporales insgesamt als weniger differenziert dar, also schmaler, flacher und weniger steil ausgeprägt. Am prägnantesten ausgebildet waren sowohl die F. centralis als auch die F. temporalis beim Turmfalken.

Im weiteren Verlauf wird der Wespenbussard aufgrund der Besonderheiten, dass die einzelnen Retinaschichten wegen eines von den anderen Arten abweichenden Reflexionsverhaltens nicht eindeutig identifiziert werden konnten, nicht mit aufgeführt. Hier sind weitere, insbesondere histologische und histochemische Untersuchungen notwendig, um dieses Phänomen zu klären.

### **Zentrale Fovea**

Basierend auf histologischen Untersuchungen beschrieben SLONAKER (1918) und PUMPHREY (1948) eine Verdrängung der Schichten im zentralen Bereich der Fovea bis auf die Fotorezeptor-enthaltende Schicht und das RPE. Das konnte in der vorliegenden Studie mittels OCT bei den einbezogenen tagaktiven Greifvögeln nicht bestätigt werden. Die Schichten in der F. centralis reduzierten sich deutlich, beim Sperber sogar maximal bis zur Tiefe der OPL. Bei allen anderen tagaktiven Greifvogelarten waren die Schichten bis maximal zur INL rückgebildet. In der F. temporalis waren die Schichten sogar nur maximal bis zur Tiefe der IPL verdrängt. Bei den tagaktiven Vögeln wurden bei beiden Foveae im zentralen Bereich vereinzelt Reste der rückgebildeten retinalen Schichten in

unterschiedlichem Ausmaß beobachtet. In der Fovea centralis der Patienten aller tagaktiven Greifvogelarten war jedoch nie die RNFL und die GCL vorhanden. Die GCL trat lediglich in einem Schnittbild bei einem Individuum der Art Mäusebussard und bei der Art Wanderfalke auf. Dies könnte mit einem dezentralen B-Scan oder, vermutlich eher unwahrscheinlich, ein als individualspezifisches Merkmal zu erklären sein. In der F. temporalis war die Reduzierung der Schichten weniger stark. Meist war die RNFL nicht mehr vorhanden, sie konnte allerdings in Einzelfällen beim Sperber und beim Habicht identifiziert werden. Sie schien aber in den Fällen, in denen sie abgegrenzt werden konnte, im Vergleich zur Ausbildung in den Eminenzen und in der Area peripher um die Foveae stark verdünnt. Messwerte zur Dicke der RNFL liegen allerdings nicht vor. Die GCL konnte bei allen Arten in unterschiedlichem Ausmaß identifiziert werden.

In dieser Studie wurden generell keine Messwerte von einzelnen Schichten oder Schichtkomplexen im zentralen Bereich der F. centralis und F. temporalis erhoben, weil in den unterschiedlichen B-Scans, vermutlich durch unterschiedliche Anschnitte des Zentrums der Fovea, unterschiedlich starke Reduzierungen auch innerhalb einer Vogelart beobachtet wurden, die eine Messung in Komplexen unmöglich machte. Die Komplexe hätten somit nicht miteinander verglichen werden können. Außerdem war eine Abgrenzung der einzelnen Schichten in der insgesamt sehr schmalen Retina im Bereich der zentralen Fovea sehr schwierig und wäre somit fehlerhaft gewesen. Eine Ausnahme stellte die INL-ELM dar, die als einziger Komplex in der zentralen Fovea vermessen wurde, da die INL bei allen Patienten (nur bei einem einzigen Schnittbild beim Sperber nicht) im zentralen Bereich der Fovea identifiziert werden konnte. In diesem Schichtkomplex sind beide Körnerschichten enthalten, einschließlich der Fotorezeptorzellen. Im Vergleich zur INL-ELM des Zwischenbereichs war die INL-ELM in beiden Foveae etwas dünner ausgeprägt. Eine Ausnahme bildeten Sperber und Habicht. Bei ihnen war der Komplex INL-ELM in der zentralen Fovea temporalis stärker ausgeprägt als im Zwischenbereich, was auf einen Anstieg der Zahl der Fotorezeptoren in diesem Bereich zurückzuführen sein könnte, wenn auch nicht so stark wie in der F. centralis. Ob die beim Sperber und Habicht beobachtete Gemeinsamkeit phylogenetische Aspekte, also die nahe Verwandtschaft beider Arten; widerspiegelt, kann an dieser Stelle nicht entschieden werden und müsste in weiteren Untersuchungen abgeklärt werden.

Bei den tagaktiven Vögeln wurde in der Retina aufgrund der dominierenden Zapfenzahl im Vergleich zu den Stäbchen, und damit einhergehend ein Vorhandensein von mehr bipolaren Zellen, eine dickere innere Körnerschicht

beschrieben (SILMAN 1973, zitiert nach KIAMA et al. 2001). Welche der beiden Körnerschichten des Komplexes INL-ELM in dieser Studie in der zentralen Fovea wirklich verdickt war, kann hier nicht entschieden werden. Dazu wären histologische Untersuchungen oder Einzelmessungen der INL und ONL erforderlich, die jedoch infolge schlechter Abgrenzbarkeit aufgrund der Reflektivität der Schichten mit der angewendeten Technik nicht möglich waren.

In dieser Studie wurde außerdem die Gesamtdicke des Komplexes ELM-RPE/BM untersucht. Der Komplex war in der Retina der tagaktiven Greifvögel in der zentralen F. centralis und in der zentralen F. temporalis dicker als im Zwischenbereich. In diesem Komplex ELM-RPE/BM sind als wesentliche Bestandteile sowohl die Innen- und die Außensegmente der Fotorezeptoren als auch das retinale Pigmentepithel enthalten. Die ELM und die BM stellen sehr dünne Membranen dar, und Dickenänderungen dieser Schichten wurden in OCT-Untersuchungen bisher nicht gemessen. Änderungen in der Dicke des Komplexes ELM-RPE/BM könnten daher entweder auf Veränderungen in den Fortsätzen der Fotorezeptoren oder des Pigmentepithels zurückzuführen sein. In der Pilotstudie von RUGGERI et al. (2010) wurden die Innen- und Außensegmente der Fotorezeptoren bei je einem Tier zweier tagaktiven Greifvögel in einem Bereich, der möglichst nahe an der F. centralis lag, anhand ihrer optischen Eigenschaften differenziert. Die Außensegmentenschicht wurde als dicker und reflektiver als die Innensegmentenschicht beschrieben. In der hier vorliegenden Arbeit konnten die Außensegmente nicht eindeutig von der Innensegmentenschicht und vom RPE abgegrenzt werden, Vermessungen wurden dementsprechend nicht vorgenommen. Es konnte daher nicht geklärt werden, ob der verdickte Komplex auf einen verdickten IS/OS-Komplex oder auf ein besonders dickes RPE zurückzuführen ist, das beispielsweise Streustrahlung im zentralen Bereich der Fovea besser abfangen könnte. Weitere Untersuchungen hierzu in Form von (Immun-) histologischen Untersuchungen oder durch weiterentwickelte OCT-Technik wären wünschenswert.

### **Eminenzen**

Die retinale Gesamtdicke (TRT) war in den Eminenzen der F. centralis höher als im retinalen Zwischenbereich und höher als in der F. temporalis. Dabei waren alle Schichtkomplexe in der F. centralis dicker als in der F. temporalis (s.u.). An den Eminenzen der F. temporalis war die TRT geringer als im retinalen Zwischenbereich. In der Pilotstudie von RUGGERI et al. (2010) und bei den Untersuchungen von VELASCO GALLEGGO (2015), die parallel zur hier vorgelegten Studie an denselben Patienten, aber unter Einbeziehung anderer Lokalisationen der Retina durchgeführt wurden, wurden Variationen der TRT von Greifvögeln in

Abhängigkeit von der Lokalisation im Auge beschrieben. VELASCO GALLEGO (2015) konnte die Dickenänderungen der Retina vor allem auf eine Veränderung der Dicke der RNFL (und nur geringgradig der GCL) zurückführen. Die RNFL war besonders stark in der Nähe des Sehnervenkopfes ausgebildet und nahm mit exzentrischer Lokalisation stetig ab. In der vorliegenden Studie stellte sich die GCL sowohl im Zwischenbereich als auch in den Eminenzen als eine deutlich erkennbare, aber im Vergleich zur RNFL sehr dünne Schicht dar. Da die Schichten RNFL&GCL immer komplexweise vermessen wurden, können keine Aussagen zur Dickenveränderung der GCL gemacht werden. Allerdings kann wie bei VELASCO GALLEGO (2015) allein anhand der Dünne der GCL gefolgert werden, dass Dickenveränderungen des Komplexes RNFL&GCL primär durch Änderungen der RNFL verursacht wurden. In der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass die RNFL&GCL sowohl an den Eminenzen der F. centralis als auch an der F. temporalis etwa gleich dick und ungefähr nur halb so dick wie im Zwischenbereich waren. Die Unterschiede der Retinagesamtdicken an den Eminenzen im Vergleich der beiden Foveae zueinander und zum Zwischenbereich wurden demnach zumindest teilweise durch Dickenänderungen anderer Schichten verursacht.

Die IPL&INL, OPL-ELM und INL-ELM waren bei beiden Foveae an den Eminenzen dicker ausgeprägt als im retinalen Zwischenbereich. Dies könnte sich durch einen Anstieg der Fotorezeptoren (ONL) und dadurch bedingt auch der bipolaren Zellen (INL) erklären lassen und würde bestätigen, dass die Fotorezeptor-enthaltenden Schichten im Bereich der Area und Fovea (resp. hier der Eminenzen) ansteigen (PUMPHREY 1948, SLONAKER 1918). Da die tagaktiven Vögel ausschließlich Zapfen in ihren Foveae und Areae haben, die eine geringere Summation aufweisen, folgt aus einer großen Zahl an Zapfen auch eine verhältnismäßig dicke INL (PUMPHREY 1948, SILMAN 1973, zitiert nach KIAMA et al. 2001). Bei allen tagaktiven Greifvögeln waren die IPL&INL, OPL-ELM und INL-ELM in den Eminenzen der F. centralis dicker als in den Eminenzen der F. temporalis (Abb. 23 und 24). Auch der Komplex ELM-RPE/BM war in den Eminenzen der F. centralis dicker als in den Eminenzen der F. temporalis.

Bei Betrachtung des Komplexes ELM-RPE/BM fiel auf, dass er an den Eminenzen der F. centralis dicker, aber an den Eminenzen der F. temporalis ungefähr gleich dick wie im Zwischenbereich war. Im Vergleich von F. centralis und F. temporalis war die ELM-RPE/BM in der F. centralis also dicker. Wie bereits angemerkt, ließen sich die Dickenänderungen im Komplex ELM-RPE/BM nicht eindeutig einer Änderung des retinalen Pigmentepithels oder dem



Innensegment-/Außensegment-Komplex der Fotorezeptoren zuordnen. Da im Bereich der Eminenzen jedoch die Dicke der Fotorezeptor-enthaltenden Schicht (OPL-ELM) deutlich zunahm, und mit ihr zusätzlich die Schicht der bipolaren Zellen, die indirekt einen Anstieg der Fotorezeptoren anzeigt, ist davon auszugehen, dass sich der Komplex ELM-RPE/BM aufgrund einer zunehmenden Schicht an IS/OS verdickt.

### **2.3. Foveae der nachtaktiven Eulen**

Die in dieser Studie untersuchten Eulen verfügten nur über eine F. temporalis. Sie dient dem binokulären Sehen und der Fixierung eines relativ nahen Objektes vor dem Vogel (WALLS 1963 c). Dennoch können auch Eulen Distanzen gut einschätzen und Hindernissen ausweichen, da sie ihr äußerst gut entwickeltes Gehör einsetzen (WALLS 1963 c). Die F. temporalis ist meist wenig entwickelt (DUKE-ELDER 1958 b, FITE und ROSENFELD-WESSELS 1975, MARTIN 1985, MEYER 1986, WALLS 1963 c, WOOD 1917). Die Ergebnisse dieser Studie bestätigten, dass die F. temporalis insgesamt schmal, verhältnismäßig flach und nicht sehr steil ausgeprägt war. Die retinale Gesamtdicke der Eminenzen der F. temporalis war im Vergleich zum Zwischenbereich dicker. Die RNFL und GCL waren dünner als im Zwischenbereich, die Körnerenthaltenden Schichtkomplexe IPL&INL, OPL&ONL und INL-ELM nahmen zu. Die ELM-RPE/BM im Bereich der Eminenzen war dicker. Nach einem relativ flachen Clivus reduzierten sich die Schichten bei den meisten Eulen bis auf die INL. Der Komplex INL-ELM nahm etwas ab. Der Komplex ELM-RPE verdünnte sich wieder etwas und blieb jedoch immer noch etwas dicker als im Zwischenbereich. Am tiefsten war die F. temporalis beim Steinkauz, am flachsten bei der Waldohreule.

### **Weite und Tiefe**

Die Fovea temporalis war am weitesten bei der Waldohreule, Raufußkauz und Waldkauz. Am tiefsten war sie bei Steinkauz und Uhu. In der Morphologie der Fovea ähnelten sich einerseits Steinkauz und Uhu und andererseits Waldkauz und Raufußkauz, deren Fovea am meisten der Fovea der Waldohreule entsprach, welche deutlich eine konkaviclivale Form zeigte (Abb. 34). Ob dies phylogenetische Beziehungen widerspiegelt, kann an dieser Stelle nicht entschieden werden. Hinweise auf eine negative Korrelation der Weite der Fovea mit der Augengröße (FITE&ROSENFELD-WESSELS 1975) ergaben sich bei Steinkauz und Uhu. Der Steinkauz wies relativ kleine Augen und im Verhältnis sehr weite Abstände der Fovea auf. Der Uhu, mit den größten Augen der hier untersuchten Eulen, wies einen eher schmalen Abstand auf. Allerdings wurde bei beiden Arten nur ein Individuum

untersucht und beim Uhu existierte nur ein Horizontalschnitt. Da die Bulbi bei den Eulen eine besondere, nämlich tubuläre Form aufweisen, lässt sich allein aufgrund ihrer Größe keine direkte Aussage zur Ausdehnung der Retina treffen. Zu den Arten Waldkauz, Raufußkauz und Waldohreule können demnach keine Aussagen bezüglich einer Korrelation der Retinalänge und der Weite der Fovea getroffen werden. Hierfür wären histologische Untersuchungen und Vermessungen der Retinalänge nötig.

FITE&ROSENFELD-WESSELS (1975) gaben bei einem Virginia-Uhu für die F. temporalis eine Weite von 750  $\mu\text{m}$  und eine Tiefe von 48 % an, gemessen im Vergleich zur parafovealen Retinadicke. Die Tiefe der Fovea temporalis beim Uhu in dieser Studie betrug 100,5  $\mu\text{m}$ , was im Vergleich zur TRT der Eminenzen ca. 31 % entsprach. Sie war somit etwas flacher. Auch die Weite war mit 527  $\mu\text{m}$  schmaler ausgeprägt.

Die Foveae temporales entsprachen in ihrer Form bei Steinkauz und Uhu eher dem konvexiclivalen Typ, allerdings nicht sehr stark ausgeprägt, und bei Waldkauz, Raufußkauz und Waldohreule eher dem konkaviclivalen Typ. Die abgeflachte Form spiegelte somit ihre Funktion als Struktur des binokularen Sehens wider. Diese Foveatypen müssen weniger stark ausgeprägt sein (PUMPHREY 1948). Da Eulen nachtaktiv sind und Stäbchen in ihrer Retina und Fovea haben (DUKE-ELDER 1958 a, PUMPHREY 1948, REESE et al. 2009), muss die Fovea weniger deutlich ausgeprägt sein. Zusätzlich kompensieren diese nachtaktiven Greifvögel eine fehlende F. centralis durch geradeaus gerichtete Augen, einen weit drehbaren Kopf und ein hochentwickeltes Gehör (REESE et al. 2009, WALLS 1963 c).

### **Zentrale Fovea**

Ähnlich wie bei den tagaktiven Greifvögeln reduzierten sich die Retinaschichten in der F. temporalis deutlich, die Reduktionen reichten jedoch weniger tief und bis maximal zur INL. Die RNFL trat bei keinem der Patienten im Bereich der F. temporalis auf, jedoch konnte bei einzelnen Vögeln die GCL abgegrenzt werden. Ein Vorhandensein der IPL wurde in unterschiedlichem Prozentsatz bei allen nachtaktiven Arten dokumentiert. Es zeigte sich, dass bei den nachtaktiven Arten die Reduzierung der Schichtung nicht so deutlich ausgeprägt war und bereits bei B-Scans in großer Nähe zum tiefsten Punkt der Fovea wieder Schichten zu erkennen waren, die bei tagaktiven Greifvögeln nur parafoveal auftraten. Die etwas geringere Reduzierung der Schichten im zentralen Bereich ist durch die geringere Ausprägung der F. temporalis zu erklären (FITE&ROSENFELD-WESSELS 1975)

und spiegelt vermutlich die Funktion der F. temporalis wider. Da sie, wie bereits oben erwähnt, dem binokulären Sehen dient, und Eulen durch das Gehör mögliche Defizite im Sehen kompensieren (REESE et al. 2009), muss sie nicht stark ausgeprägt und differenziert sein (OEHME 1964). Weiterhin kommen bei Eulen Stäbchen in der Fovea vor (DUKE-ELDER 1958 a, REESE et al. 2009), so dass eine weniger ausgeprägte Fovea und geringere Reduzierung der Schichten eventuell auch auf die dadurch bedingte bessere Sensitivität der F. temporalis der Eulen zurückzuführen ist.

Da in dieser Orientierungsstudie bei einigen Arten der nachtaktiven Eulenvögel, und zwar bei Uhu, Steinkauz und Raufußkauz, lediglich Einzeltiere verfügbar waren und einbezogen werden konnten, müssen allerdings weitere Studien mit einem größeren Stichprobenumfang zeigen, ob es sich bei den bei diesen Arten erhobenen Ergebnissen um individualspezifische oder um artspezifische Charakterisierungen handelte.

Wie bei den tagaktiven Vögeln war bei den nachtaktiven Eulen eine Dickenmessung von artübergreifend identischen Komplexen aufgrund der unterschiedlichen Reduzierungen im zentralen Bereich der Fovea unmöglich. Die Schichten waren zudem aufgrund der Rückbildung nicht deutlich voneinander abzugrenzen. Da außerdem ein Vergleich mit den tagaktiven Vogelarten durchgeführt werden sollte, wurde auch hier der Komplex INL-ELM, der die innere und äußere Körnerschicht und somit also die Kerne der Fotorezeptoren enthielt, und der Komplex ELM-RPE/BM vermessen. Letzterer enthält die Außensegmente der Fotorezeptoren und das retinale Pigmentepithel. Die INL-ELM der zentralen Fovea war im Vergleich zur INL-ELM des Zwischenbereichs und der Eminenzen etwas dünner. Welche der beiden Körnerschichten, die innere oder die äußere, für die Umfangsreduzierung des Komplexes INL-ELM in der zentralen Fovea verantwortlich war, kann auch hier mit den erhobenen Messungen nicht gesagt werden, da Einzelmessungen zur INL oder ONL nicht angefertigt werden konnten. Auch hier wären histologische Untersuchungen zur eindeutigen Klärung interessant. Der Komplex ELM-RPE/BM verdickte sich im zentralen Bereich der Fovea im Vergleich zu den Eminenzen und zum Zwischenbereich etwas. Änderungen in der Dicke des Komplexes ELM-RPE/BM könnten entweder auf Veränderungen in den Fortsätzen der Fotorezeptoren oder des Pigmentepithels zurückzuführen sein.

### **Eminenzen**

Die retinale Gesamtdicke (TRT) war im Allgemeinen an den Eminenzen der F. temporalis dicker als im retinalen Zwischenbereich. Lediglich beim Raufußkauz

und beim Uhu, bei denen jeweils nur ein Individuum einbezogen wurde, war die TRT der Eminenzen etwas dünner als im Zwischenbereich.

Die RNFL&GCL der Eminenzen der F. temporalis waren deutlich dünner als im Zwischenbereich. Auch bei den Eulen war die GCL deutlich in der F. temporalis und im Zwischenbereich erkennbar. Die Komplexe IPL&INL, OPL-ELM und INL-ELM waren in den Eminenzen dicker ausgeprägt als im retinalen Zwischenbereich mit Ausnahme der OPL-ELM beim Uhu. Dieser Komplex war im Zwischenbereich etwas dicker. Allerdings handelt es sich bei diesem Wert um ein Ergebnis aus einem einzelnen Schnittbild. Basierend auf histologischen Studien wurde ermittelt, dass nachtaktive Vögel mehr Stäbchen in ihrer Retina haben. Folglich ist bei ihnen die äußere Körnerschicht dicker ausgebildet als die innere (SILMAN 1973, zitiert nach KIAMA et al. 2001), da aufgrund der größeren Summation die Zahl der bipolaren Zellen in der inneren Körnerschicht reduziert ist. Die hier vorgestellten OCT-Aufnahmen, bei denen ein im Vergleich zum IPL&INL dickerer Komplex der OPL-ELM dargestellt werden konnte, und der die äußere Körnerschicht enthält, bestätigten das. Der Komplex ELM-RPE/BM der Eminenzen der F. temporalis war dicker als im Zwischenbereich. Die Dickenänderung im Komplex ELM-RPE/BM ließ sich nicht eindeutig einer Änderung des retinalen Pigmentepithels oder dem Innensegment-/Außensegment-Komplex der Fotorezeptoren zuordnen.

#### **2.4. Zwischenbereich der tagaktiven und nachtaktiven Greifvogelarten im Vergleich**

In der vorliegenden Arbeit wurde für die Beurteilung verschiedener Bereiche der Foveae ein Bezugspunkt definiert, der im Schnittpunkt einer Linie durch den Äquator des Auges und einer verlängerten Linie durch die Achse des Augenfächers lag. Bei Betrachtung dieses Referenzpunktes war bei den tagaktiven Vögeln die Gesamtretinadicke wesentlich größer als bei den Eulen, und bei Betrachtung der einzelnen Schichten der Retina, auch der Schichtkomplex der Nervenfaserschicht und der Ganglienzellschicht (RNFL&GCL). Ähnliche Beobachtungen wurden auch in den Untersuchungen von VELASCO GALLEGO (2015) für verschiedene andere Lokalisationen im Auge, an denselben Greifvogelpatienten wie in der vorliegenden Studie, dokumentiert.

Zusätzlich waren auch der Komplex, der die innere plexiforme und die innere Körnerschicht enthielt (IPL&INL), bei den tagaktiven Greifvögeln dicker ausgeprägt als bei den nachtaktiven Arten, während der Komplex mit äußerer Körnerschicht und äußerer plexiforme Schicht, welcher die Fotorezeptoren enthält, bei beiden Gruppen ähnlich dick war. VELASCO GALLEGO (2015) beschrieb in ihrer Arbeit,

dass die dickste äußere Retina (OR) beim Waldkauz vorlag (gemessen von der inneren Begrenzung der ONL bis zur äußeren Begrenzung des RPEs), was in dieser Studie nicht bestätigt werden konnte, und vermutete einen Zusammenhang zu den Fotorezeptoren. In der vorliegenden Studie war der Komplex ELM-RPE/BM, der die Innen- und Außensegmente der Fotorezeptoren enthält, bei den nachtaktiven Arten dicker ausgeprägt, wie in der Studie von VELASCO GALLEGO (2015) für andere Retinalokalisationen auch festgestellt wurde. Bei den nachtaktiven Arten dominieren die Stäbchen in der Retina. Sie haben große, schlanke Außenglieder (DUKE-ELDER 1958 a, MEYER 1986, REESE et al. 2009, WALLS 1963 a), so dass sich es vermutlich hierdurch erklären lässt, dass der Komplex ELM-RPE/BM in dieser Studie bei den Eulen dicker war als bei den tagaktiven Arten. Eine Verdickung des Komplexes ELM-RPE/BM aufgrund eines differenzierteren Pigmentepithels ist vermutlich eher unwahrscheinlich.

## **2.5. Foveae der tagaktiven und nachtaktiven Greifvogelarten im Vergleich**

Es ist unklar, ob die F. temporalis der Eulen sich phylogenetisch aus einer einzelnen F. centralis entwickelt hat, welche mit zunehmend frontaler Ausrichtung der Augen zur Seite wanderte, oder ob es sich um eine zusätzlich, temporal angelegte Fovea handelt und die F. centralis sich im Laufe der Zeit zurückentwickelt hat. Fakt ist jedoch, dass Eulen aufgrund des tubulären Aufbaus der Bulbi bei Vorliegen von zwei Foveae, einen nur sehr engen (visuellen) Winkel zwischen den Sehachsen der F. centralis und F. temporalis haben würden. Außerdem sind die Bulbi unbeweglich in die Orbitae, mit frontaler Ausrichtung, eingebettet. Eulen können ihren Kopf weit drehen, um ihr Blickfeld zu erweitern, und verfügen über ein extrem gutes Gehör, mit dem sie eine fehlende F. centralis, und somit nicht vorhandene visuelle Trident, ausgleichen können. Für das Einschätzen von Distanzen verfügen sie über die F. temporalis, welche für das binokuläre Sehen zuständig ist (WALLS 1963 c). Zusätzlich sind in ihren Foveae Stäbchen angelegt (DUKE-ELDER 1958 a, REESE et al. 2009). Die Eulen sind daher auch ohne eine F. centralis optimal an ihre Lebensweise und ihr Jagdverhalten im Dunklen angepasst.

Tagaktive Greifvögel und nachtaktive Eulen unterschieden sich in der vorliegenden Untersuchung deutlich in der dreidimensionalen Form ihrer Foveae. Die Foveae der tagaktiven Greifvögel ließen sich dem Typ konvexiclivall zuordnen, die der Eulen waren zwar beim Steinkauz und Uhu auch eher konvexiclivall, jedoch wesentlich schmaler und flacher ausgebildet. Die Form der Fovea temporalis bei der Waldohreule, Raufußkauz und Waldkauz entsprachen eher dem Typ konkaviclivall. Insgesamt ähnelten sich die Foveae temporales der nachtaktiven und tagaktiven Arten in den OCT-Tomogrammen.

Bereits WOOD (1917) berichtete von einer asymmetrischen Fovea bzw. Area bei unterschiedlichen Vogelspezies. SLONAKER (1918) beschrieb in seinen histologischen Untersuchungen zum Spatz eine elliptische Form der Fovea, mit einem größeren horizontalen als vertikalen Durchmesser. Eine ähnliche horizontal-ovale, also in der Achse nasal-temporal längsovale Form der Fovea wurde bei Wanderfalke, Sperber, Rohrweihe (hier nur eine von zwei Foveae erfasst), Wespenbussard, Steinkauz und Waldohreule bei allen untersuchten Foveae, sowie bei den Arten Mäusebussard, Turmfalke und Habicht bei einer der beiden einbezogenen Foveae dokumentiert, bei den beiden letzteren bei der F. temporalis. Im Gegensatz dazu wurde bei einigen Arten auch ein größerer vertikaler Durchmesser, und damit eine in der Achse superior-inferior längsovale Form der Foveae ermittelt, und zwar bei Waldkauz und Raufußkauz und bei der zweiten Fovea von Mäusebussard, Turmfalke und Habicht. Bei den beiden letzteren handelt es sich hierbei um die F. centralis.

Die F. centralis der tagaktiven Vögel war im Allgemeinen weiter und tiefer als die F. temporalis der nachtaktiven Vögel, also räumlich größer, was für eine bessere Differenzierung der F. centralis spricht. Die F. temporales der tagaktiven Arten und der nachtaktiven Arten waren hinsichtlich der Weite miteinander vergleichbar, variierten aber hinsichtlich der Tiefe zwischen den beiden Gruppen. Die Form der F. temporales der tag- und der nachtaktiven Vögel, vor allem bei Steinkauz und Uhu, ähnelte sich sehr. Die F. temporales der restlichen nachtaktiven Arten waren zwar eher konkavicihval, aber trotzdem eher mit den F. temporales der tagaktiven Greifvögel vergleichbar als mit der F. centralis, was sich auf die Funktion der F. temporalis im Allgemeinen zurück führen lassen könnte. Diese dient dem binokularen Sehen und dem Einschätzen von Distanzen. Sie hat zwar vermutlich auch einen gewissen Verzerrungseffekt eines über die Retina wandernden Bildes, allerdings nicht so stark wie eine F. centralis, die vor allem für das monokulare und vor allem das Sehen weit entfernter und die Wahrnehmung sich schnell bewegender Objekte, zuständig ist. Der Clivus der F. temporalis kann daher weniger steil, und die Fovea flacher sein. Die Ausprägung der F. temporalis muss daher weniger stark sein. Allerdings waren in der vorliegenden Studie die Schichten der F. temporales der tagaktiven Arten zentral nicht ganz so stark reduziert wie in den F. temporales der Eulen, was vielleicht darauf zurückzuführen ist, dass die tagaktiven Arten noch über eine zweite Fovea verfügen und auf die visuelle Trident zurückgreifen können, also auf das gleichzeitige Fixieren dreier Punkte. Eventuell gibt es aber auch einen Zusammenhang zu den Stäbchen, die Eulen in ihrer Fovea haben. So müssten unter Umständen vielleicht vergleichsweise mehr Schichten verdrängt werden als

bei den tagaktiven Arten, damit mehr Licht in der Nacht auf die Fotorezeptoren fallen kann. Weitere Untersuchungen wären hierzu nötig.

Im zentralen Bereich der Fovea reduzierten sich die Schichten bei allen Arten. In der F. centralis und in der F. temporalis der nachtaktiven Arten bis auf die INL, bei der F. temporalis der tagaktiven Arten bis auf die GCL. Die Komplexe INL-ELM und ELM-RPE/BM verdünnten sich hier bei der F. centralis der tagaktiven und der F. temporalis der nachtaktiven Arten wieder etwas. In der F. temporalis der tagaktiven Vögel war eine leichte Verdickung des Komplexes ELM-RPE/BM zu verzeichnen, die INL-ELM verdünnte sich ebenfalls.

Interessanterweise waren die Messwerte sowohl der TRT als auch der Schichtkomplexe an den verschiedenen Lokalisationen der Eminenzen der einzelnen Foveae sehr ähnlich, so dass Mittelwerte aus je zwei Lokalisationen der Eminenzen gebildet wurden. Da die untersuchte Tierzahl insgesamt allerdings relativ gering war, war eine umfassende statistische Analyse nicht sinnvoll und Variationen wurden anhand der errechneten Standardabweichungen eingeschätzt.

Eine im wissenschaftlichen Schrifttum dokumentierte Asymmetrie bezüglich der RNFL zwischen nasalem und temporalem Bereich (FITE&ROSENFELD-WESSELS 1975, WALLS 1963 a), konnte im Bereich der Eminenzen der Foveae nicht beobachtet werden. Es war zwar in den OCT-Tomogrammen eine deutliche Verdickung der RNFL in Richtung Sehnervenkopf erkennbar, aber erst ab einem größeren Abstand von der Fovea entfernt und außerhalb der Bereiche, die in der vorliegenden Untersuchung einbezogen wurden. An den Eminenzen, also am höchsten Punkt der Fovea, war die Dicke der RNFL jedoch an allen vier gemessenen Lokalisationen bei allen einbezogenen Vogelarten gleich. FITE&ROSENFELD-WESSELS (1975) beschrieben eine Verdickung der GCL im Bereich der Foveae. Die GCL wurde in der vorliegenden Untersuchung nicht als Einzelschicht vermessen. Allerdings sprach ein Eindruck, der auf der Sichtung der Tomogramme und Vergleich der Aufnahmen der Foveae mit den Zwischenbereichen basiert, für eine Dickenzunahme der GCL im Bereich der Fovea. Dies galt für die einbezogenen tagaktiven und auch nachtaktiven Arten (Ergebnisse nicht dargestellt).

Hinsichtlich des Aufbaus der Eminenzen waren die F. centralis und F. temporalis der tagaktiven Arten und die F. temporalis der nachtaktiven vergleichbar: Bei der F. centralis der tagaktiven und der F. temporalis der nachtaktiven Arten stieg die TRT im Bereich der Eminenzen an, bei der F. temporalis der tagaktiven Arten blieb sie gleich dick oder wurde etwas dünner als im Zwischenbereich.

Die Nervenfaserschicht und die Ganglienzellschicht bei allen drei Foveatypen waren im Vergleich zum Zwischenbereich dünner. Die Eminenzen, also die Vorwölbung der Retina in den Glaskörper, wölben sich umso mehr, je dicker die Schichten werden und umso mehr die Fotorezeptoren in der Zahl ansteigen (WALLS 1963 b). Das heißt, dass bei der *F. centralis* der tagaktiven Arten und der *F. temporalis* der nachtaktiven Eulen die Körnerschichten dicker sein müssten als im Zwischenbereich. Bei den tagaktiven Greifvögeln müssten die Körnerschichten in der *F. temporalis* daher ungefähr gleich dick bzw. etwas dicker sein als im Zwischenbereich, da sich ja sonst keine Fovea ausbilden würde. In dieser Studie stieg die Dicke der Körner enthaltenden und den dazugehörenden plexiformen Schichten in allen Foveae an. SILMAN (1973, zitiert nach KIAMA et al. 2001) beschreibt bei den tagaktiven Vögeln aufgrund der dominierenden Zapfenzahl im Vergleich zu den Stäbchen, und damit einhergehend aufgrund des Vorhandenseins von mehr bipolaren Zellen, eine dickere innere Körnerschicht als bei den nachtaktiven, was hier mittels OCT bestätigt werden konnte. Mittels histologischer Untersuchungen wurde festgestellt, dass auch bei Eulen im Bereich der Area und Fovea die Rezeptorzahl erhöht ist (WALLS 1963 a). Nachtaktive Arten haben im Bereich der Areae und Foveae sowohl Stäbchen als auch Zapfen (DUKE-ELDER 1958 a, PUMPHREY 1948, REESE et al. 2009). Da der Anteil an Zapfen aber deutlich geringer ist als bei den tagaktiven Vögeln, sollten die Eulen zwar eine stark ausgeprägte äußere Körnerschicht (Schicht der Zellkerne der Fotorezeptoren), jedoch eine im Vergleich zu den tagaktiven Arten relativ dünner ausgeprägte innere Körnerschicht haben, da aufgrund der größeren Summation weniger bipolare Zellen vorhanden sind als bei den tagaktiven. Diese Annahme wird durch den Vergleich der entsprechenden Schichten in der Studie gestützt. Bei den tagaktiven Vögeln war die IPL&INL dreimal so dick wie der OPL-ELM-Komplex, bei den nachtaktiven nur doppelt so dick.

Warum in den Eminenzen der *F. temporalis* der tagaktiven Greifvögel die TRT im Vergleich zum Zwischenbereich nicht anstieg, ist unklar. Die Schichtung war im zentralen Bereich dieser Foveae nicht sehr deutlich reduziert, was insgesamt darauf deuten könnte, dass die *F. temporalis* der tagaktiven Arten noch eine etwas andere Funktion haben könnte als die *F. temporalis* der nachtaktiven Arten. Die Eminenzen spielen auch hinsichtlich der Entstehung eines Clivus eine wichtige Rolle. Je höher die Eminenzen und je dünner die CFT, umso tiefer und steiler ist der Clivus ausgeprägt. Das bedeutet, die Linsenwirkung, die durch die beiden Clivus entsteht, ist deutlicher ausgeprägt, die Verzerrungswirkung der Fovea ist dann höher. Die Sensitivität für sich bewegende und weit entfernte Objekte ist dadurch also



gesteigert, was für die F. centralis der tagaktiven Greifvögel beschrieben wurde (PUMPHREY 1948) und für diese Vögel, welche aus großen Distanzen jagen, unabdingbar ist. Ein stark ausgeprägter Clivus und eine sehr dicke TRT wurden auch in der vorliegenden Untersuchung mittels OCT bei der F. centralis der tagaktiven Greifvögel festgestellt. Die im wissenschaftlichen Schrifttum beschriebenen Befunde können also durch die Ergebnisse aus den Untersuchungen mittels OCT gestützt werden.

Bei den Eminenzen der F. centralis der tagaktiven und F. temporalis der nachtaktiven Arten verdickten sich außerdem die Schichten, die zwischen der äußeren Grenzmembran und der Basalmembran (ELM-RPE/BM) lagen. Der ELM-RPE/BM-Komplex der F. temporalis der tagaktiven Vögel verdickte sich allerdings nicht, was durch die dort etwas geringere Ausdifferenzierung der Fotorezeptorschicht im Vergleich zur F. centralis erklärbar sein könnte (FITE&ROSENFELD-WESSELS1975). Der Komplex ELM-RPE/BM war bei den nachtaktiven Arten sowohl im zentralen Bereich als auch an den Eminenzen der F. temporales dicker als bei den beiden Foveae der tagaktiven Arten. Wie bereits erläutert, kann anhand der vorliegenden Untersuchungen nicht entschieden werden, ob die Verdickung des Komplexes ELM-RPE/BM auf den Komplex der Innen-/Außensegmente (IS/OS) der Fotorezeptoren oder das retinale Pigmentepithel zurückzuführen ist. Da bei den tagaktiven Greifvögeln aber besonders die Schicht der bipolaren Zellen (INL) und die dazugehörige plexiforme Schicht (IPL) ausgebildet war, welche mit einer stärkeren Ausprägung der Fotorezeptorkernschicht (ONL) und der dazugehörenden plexiformen Schicht (OPL) einherging, liegt die Vermutung nahe, dass die Verdickung des Komplexes ELM-RPE auf den IS/OS-Komplex zurückzuführen ist. Bei den Eulen wäre eine Verdickung aufgrund der erhöhten Anzahl an Stäbchen (verdickte äußere Körnerschicht) denkbar, welche im Vergleich zu den Zapfen große, schlanke Außensegmente aufweisen. Trotzdem wäre auch ein zusätzlich erhöhter Melaniningehalt des RPEs in diesem Bereich aufgrund der erhöhten Fotorezeptorzahl denkbar, um eventuelle Streustrahlung noch besser abzufangen. Dies könnte so zu einer Verdickung des Komplexes beigetragen haben. Für eine Bestätigung oder Widerlegung dieser Vermutungen sind jedoch weitere Untersuchungen, eventuell unter Verwendung eines höher auflösenden OCT-Gerätes, erforderlich.

Der Wespenbussard nahm unter den in diese Studie einbezogenen tagaktiven Greifvögeln eine Sonderstellung ein, da er physiologischerweise nur eine F. centralis aufweist, was eine Adaptation an seine besondere Lebensweise darstellen könnte. Er ist bereits phänotypisch, z. B. durch schlitzförmige

Nasenöffnungen, an eine Nahrungsaufnahme am Boden, nämlich unter anderem das Ausgraben von Wespennestern, angepasst. Für diesen Nahrungserwerb muss der Wespenbussard nicht über eine visuelle Trident verfügen, welche für die schnelle Jagd aus hohen Distanzen wichtig ist. So könnte sich z. B. die in der OCT nicht darstellbare, und daher vermutlich nicht vorhandene, F. temporalis erklären lassen.

### **3 Möglichkeiten und Grenzen der OCT beim Vogel - Schlussfolgerung**

Die OCT ist ein bildgebendes Verfahren, das in Echtzeit, am lebenden Objekt und nicht invasiv, Schnittbilder verschiedener Gewebe erzeugen kann. Diese haben eine zelluläre Auflösung, die histologischen Präparaten von Biopaten nahezu gleich kommt. Die entstehenden Tomogramme geben die intrinsischen Unterschiede der optischen Gewebeeigenschaften als Bildkontrast wieder (DREXLER&FUJIMOTO 2008, GABRIELE et al. 2011, HUANG et al. 1998). In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass die optische Kohärenztomografie eine geeignete Methode darstellt, Schnittbilder der Foveae von nahezu histologischer Qualität am lebenden Greifvogel zu erhalten. Mit diesen Aufnahmen war es möglich, bei 56 Greifvogel- und Eulenarten aus drei Ordnungen, die unterschiedlichen Morphologien und strukturellen Unterschiede im Aufbau der Foveae centrales und temporales anhand erhobener Messdaten zu beschreiben und die Foveae sowohl innerhalb der tagaktiven und nachtaktiven als auch zwischen den beiden Gruppen zu vergleichen.

Es konnten alle Schichten der physiologischen Retina und der Foveae dargestellt und identifiziert werden, mit Ausnahme des Wespenbussards, dessen Retina ein optisch anderes Bild der Schichtung ergab, die noch nicht zugeordnet werden konnte.

Die unterschiedliche Morphologie der Fovea war abhängig von der Lokalisation im Auge und dem Aktivitätsmuster des Vogels. So war die Fovea centralis bei den tagaktiven, bifovealen Greifvogelarten größer, tiefer und differenzierter ausgebildet als die Fovea temporalis der nachtaktiven, monofovealen Eulen, die keine F. centralis besitzen. Die F. temporalis der tagaktiven Vögel war im Vergleich zur F. centralis ebenfalls weniger stark ausgeprägt. Die Ausprägungen der Schichten im Bereich der Fovea war bei tagaktiven und nachtaktiven Vögeln vergleichbar und vor allem durch einen Anstieg der Dicke der Körnerschichten gekennzeichnet. Bei den Tagaktiven war besonders die innere Körnerschicht ausgeprägt, bei den Nachtaktiven die äußere Körnerschicht. Worauf die unterschiedliche

Dickenverteilung des Komplexes ELM-RPE/BM bei tag- und nachtaktiven Arten im Bereich der Eminenzen und zentral in den Foveae beruhte, konnte nicht geklärt werden. Ob Unterschiede im Innensegment-/Außensegment-Komplex der Fotorezeptoren vorliegen, konnte aufgrund einer schlechten Abgrenzbarkeit des Außensegments zum retinalen Pigmentepithel nicht entschieden werden. Weitere Untersuchungen zum Aufbau der Foveae der Greifvögel mittels höher auflösender OCT wären interessant, auch um Erkenntnisse zum Sehvorgang und zur Beurteilung pathologischer Prozesse zu erhalten. Aus der Humanmedizin ist bekannt, dass Veränderungen unterhalb der ELM im Bereich des IS/OS-Komplexes mit einer schlechteren Prognose des Visus eingehen (Praxisleitfaden der Heidelberg Engineering Academy „Spurensuche im OCT“).

Da die meisten retinalen Erkrankungen dynamischen Prozessen unterliegen, stößt eine Beurteilung mittels histologischer Untersuchung, die nur an einem dem Tier entnommenen, isolierten Auge möglich sind, an ihre Grenzen. Mit der OCT können sich schnell ändernde Prozesse, wie z. B. Ödeme, beliebig oft und *in vivo* untersucht werden (FISCHER et al. 2009). Verlaufsstudien, Entwicklung von Therapiestrategien, Therapiekontrollen, Progressionsüberwachung und Quantifizierung pathologischer Prozesse sind möglich (AHLERS&SCHMIDT-ERFURT 2009, DREXLER&FUJIMOTO 2008, RUGGERI et al. 2007, SRINVANSAN et al. 2006). Auch beim Vogel zeigte sich bereits in ersten Untersuchungen, dass die OCT für die Darstellung und somit für die Diagnosestellung retinaler Erkrankungen geeignet ist (RAUSCHER et al. 2013, RUGGERI et al. 2010).

Im Bereich der Grundlagenforschung zu Augenerkrankungen wurden in der Vergangenheit mit der OCT verschiedene Tiermodelle, wie Kaninchen, Schweine, Katzen und Hühner verwendet. Diese Tierarten wurden unter anderem aufgrund einer geeigneten, nicht zu geringen Augengröße ausgewählt (GEKELER et al. 2007, GLOESMANN et al. 2003, MOAYED et al. 2011, MURAOKA et al. 2012). Ein großer Vorteil der OCT in diesem Bereich liegt darin, dass am selben Tier wiederholte Untersuchungen *in vivo* möglich sind und so die benötigte Tieranzahl für Versuche reduziert und gegebenenfalls auch auf Euthanasie für histologische Untersuchungen oder Kryokonservierung verzichtet werden kann (FISCHER et al. 2009, HUANG et al. 1998, SRINVANSAN et al. 2006). Aber auch in der Erforschung der anatomischen Grundlagen bei Geflügel, Psittaziden und Greifvögeln wurde die OCT bereits eingesetzt (HUANG et al. 1998, KORBEL et al. 2013 b, MOAYED et al. 2011, MOAYED et al. 2012, RAUSCHER et al. 2013, RUGGERI et al. 2010, VELASCO GALLEGGO 2015). Die OCT besitzt zudem großes

Potential bei der Erforschung der Pathogenese verschiedener Erkrankungen, z. B. Borna, und bei der Früherkennung von pathologischen Prozessen im Rahmen von Vorsorgeuntersuchungen (KORBEL et al. 2012 a, KORBEL et al. 2013 b, KORBEL et al. 2013 c).

Im Vergleich zur direkten oder indirekten Ophthalmoskopie konnten mittels OCT zusätzliche Informationen erhalten werden, denn die OCT ergänzte bislang fehlende Tiefeninformationen zur Netzhaut (DREXLER&FUJIMOTO 2008, JIAO et al. 2005, RUGGERI et al. 2007, SRINVANSAN et al. 2006, VAN VELTHOVEN et al. 2007). Die OCT kann zwar nicht direkt die Funktionalität der Retina oder Fovea überprüfen, jedoch Informationen zu physiologischen oder pathologischen Zuständen liefern. Sie ist die einzige Untersuchungsmethode, die *in vivo* Informationen zum strukturellen Aufbau der Foveae im Detail bieten kann. Dies ist umso wichtiger, da Erkrankungen im Bereich der Foveae beim Greifvogel äußerst wichtige und komplexe Strukturen betreffen, die für den Sehvorgang und für seine Jagd- und somit Überlebensfähigkeit essentiell sind.

Die Anwendung der OCT war bei den hier einbezogenen Greifvogel- und Eulenarten unproblematisch und mit nur minimalem Stress für den Patienten verbunden. Es wurde entgegen der Aussagen von KERN&COLITZ (2013), MCLELLAN&RASMUSSEN (2012) und den Durchführungen von RAUSCHER et al. (2013) keine starke Sedation oder sogar Allgemeinanästhesie benötigt. Eine leichte Sedation des Patienten war jedoch empfehlenswert. Bei kleineren Augen, wie beim Turmfalken, ließ sich eine Vignettierung der Fundusaufnahmen und somit eine Qualitätsminderung der B-Scans nicht ganz verhindern. Dies ist vermutlich vor allem auf die Augenform und die starke Retinakrümmung zurückzuführen und nicht nur auf die reine Größe, denn der Augenhintergrund konnte in anderen Studien an noch kleineren Augen, wie beim Mauersegler (RAUSCHER et al. 2013) oder auch bei Ratten und Mäusen (FISCHER et al. 2009, RUGGERI et al. 2007; SRINIVASAN et al. 2006) erfolgreich dargestellt werden. Trotz Eye-Tracking konnte es zur Artefaktentstehung in den OCT-Tomogrammen kommen, da sich Kopfbewegungen des Patienten nicht immer vermeiden ließen. Die Verwendung noch schnellerer Technik könnte hier Abhilfe schaffen. Die automatisierten Segmentierungen der Software mussten manuell an die besonders starken Einsenkungen der Foveae angepasst werden, dennoch war eine exakte Erhebung der Daten möglich. Die Entwicklung eines passenden Logarithmus würde die Auswertung allerdings vereinfachen. Die nicht-invasive und kontaktfreie Anwendung für so stressanfällige Patienten wie Vögel und der strukturelle Informationsgewinn macht die OCT insgesamt zu einem hervorragenden Diagnostikum in der aviären Ophthalmologie.

## VI. ZUSAMMENFASSUNG

Die Optische Kohärenztomografie (OCT) ist eine neue Methode der Bilddarstellung, welche bereits erfolgreich in der humanmedizinischen Ophthalmologie etabliert wurde. Sie bietet die Möglichkeit, den Aufbau und die Morphologie der Retina in Querschnitten darzustellen und dies nicht-invasiv, kontraktfrei und *in vivo* in annähernd histologischer Auflösung. In der aviären Ophthalmologie wurde die OCT bisher kaum angewendet.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, die OCT als ein geeignetes Diagnostikum zur Untersuchung der Fovea zu bewerten. Hierfür lag der Fokus dieser Arbeit auf der Darstellbarkeit und Darstellung der physiologischen Fovea bei Greifvögeln und Eulen. Morphologische Variationen der beiden Fovea-Typen F. centralis und F. temporalis innerhalb der Spezies wurden untersucht, ebenso wie Variationen innerhalb der und zwischen den nacht- und tagaktiven Vogelgruppen.

Dazu wurden in einem Zeitraum von 1,5 Jahren 56 tag- und nachtaktive Wildgreifvogelpatienten 13 verschiedener Arten aus drei Ordnungen untersucht. Die Tiere stammten alle aus dem Patientengut der Klinik für Vögel, Reptilien, Amphibien und Zierfische der Ludwig-Maximilians-Universität München. Bei allen Tieren war eine ophthalmologische Untersuchung, an die sich eine Untersuchung mittels OCT anschloss, medizinisch indiziert. Diese wurde in Abhängigkeit von Patientenstatus und Toleranz des Tieres entweder in wachem Zustand, in Sedation unter der Anwendung von Midazolam (2 mg/kg oronasal), oder unter Inhalationsanästhesie durchgeführt. Für die OCT-Untersuchung wurde das Modell Spectralis® HRA+OCT Plus der Firma Heidelberg Engineering und für die Bildbearbeitung und Archivierung das Software-Programm Heidelberg Eye Explorer (HEYEX) in der Version 5.4, Heidelberg Engineering, Heidelberg, Deutschland, verwendet. Von den Foveae centrales und temporales wurden sowohl horizontale als auch vertikale Schnittbilder (B-Scans und 3D-Aufnahmen) angefertigt. Dies beinhaltete Scans der jeweils tiefsten Stelle der Fovea und der parafovealen Eminenzen an den Lokalisationen nasal, temporal, superior und inferior. Zusätzlich wurden zum Vergleich Längs- und Querschnitte eines retinalen Zwischenereichs angefertigt, welcher im Schnittpunkt des Augenäquators (Verlauf der Gefäßkaskade) und einer gedachten Verlängerung entlang des Pecten oculi lag. Die Messungen beinhalteten im Bereich der zentralen Fovea, also an der tiefsten Stelle, die foveale Retinagesamtdicke, die Dicke der Schichtkomplexe von der inneren Körnerschicht bis zur äußeren Grenzmembran und von der äußeren Grenzmembran bis zum äußeren retinalen Pigmentepithel resp. bis zur Basalmembran. Weiterhin wurde die Tiefe der Einsenkung berechnet und die Retinaschichtung der zentralen Fovea vermerkt. Bei den Eminenzen und im Zwischenbereich wurde die retinale Gesamtdicke (von der inneren Grenzmembran bis zur Basalmembran) und zusätzlich folgende Schichten als Komplexe vermessen: die Nervenfaserschicht und die

Ganglienzellschicht, die innere plexiforme Schicht und die innere Körnerschicht, die äußere plexiforme Schicht und die äußere Körnerschicht, die inneren Körnerschicht bis zur äußeren Grenzmembran und die äußere Grenzmembran bis zum äußeren retinalen Pigmentepithel bzw. bis zur Basalmembran. Außerdem wurde bei den Eminenzen der Abstand nasal-temporal und superior-inferior, also die Weite der Foveae an der Retinaoberfläche, vermessen.

Mittels OCT konnte die Fovea in beinahe histologischer Qualität dargestellt werden. Es waren Gemeinsamkeiten und auch deutliche morphologische Unterschiede zwischen den verschiedenen Spezies erkennbar. Bei allen Vogelarten konnte eine etwas längliche Form der Fovea gezeigt werden. Die unterschiedlichen Foveatypen, konvexiclival bei den tagaktiven Greifvögeln und konkaviclival bei den nachtaktiven Arten, waren deutlich erkennbar, genauso wie Größenunterschiede sowohl innerhalb der tagaktiven und der nachtaktiven Spezies, als auch zwischen den beiden Gruppen. Bei den tagaktiven Arten war die F. centralis im Vergleich zur F. temporalis der Eulen weiter und tiefer ausgeprägt. Die F. temporalis der tagaktiven Greifvögel war insgesamt weniger deutlich ausgebildet und ähnelte eher der F. temporalis der nachtaktiven Arten. Die Reduzierung der Schichten im zentralen Bereich der Fovea reichte bei der F. centralis der tagaktiven Greifvögel und der F. temporalis der Eulen bis zur inneren Körnerschicht. Bei der F. temporalis der tagaktiven Arten reichte sie nur bis zur Ganglienzellschicht. Die Eminenzen wiesen bei allen Foveae-Typen dieselben Schichten auf. Die Dicke der Gesamtretina und der Schichtkomplexe variierte sowohl zwischen den Arten in der jeweiligen tag- oder nachtaktiven Gruppe als auch zwischen Tag- und Nachtaktiven. So waren die Retinagesamtdicke und die Komplexe bis zur äußeren Grenzmembran bei den tagaktiven Greifvögeln insgesamt dicker als bei den nachtaktiven Eulen. Die Schichten von der äußeren Grenzmembran bis zum äußeren retinalen Pigmentepithel / Basalmembran waren hingegen bei den nachtaktiven Arten dicker. Bei beiden Gruppen waren die innere plexiforme Schicht und die innere Körnerschicht dicker als die äußere plexiforme Schicht und äußere Körnerschicht. Bei den Eulen waren jedoch die äußere Körner- und die äußere plexiforme Schicht relativ deutlich ausgeprägt. Beim Wespenbussard konnten im Unterschied zu den anderen Vogelarten die retinalen Schichten nicht eindeutig zugeordnet werden.

Mittels OCT konnte die Fovea von Greifvögeln und Eulen einschließlich des Schichtaufbaus der Retina dargestellt werden. Diese Studie lieferte somit eine erste Grundlage zur Interpretation von OCT-Ergebnissen hinsichtlich der physiologischen Morphologie der Foveae beim Greifvogel und die Voraussetzungen zur Erfassung und Bewertung von Veränderungen in der Fovea.

## VII. SUMMARY

Optical coherence tomography is a new method of imaging that has been successfully established in human ophthalmology. It offers the possibility to display structure and morphology of the retina in cross sections at nearly histological quality *in vivo*, while also being non-invasive and without contacting the eye. In avian ophthalmology, OCT has so far rarely been used.

The aim of this study was, therefore, to evaluate OCT as a suitable diagnostic agent for investigating the fovea. To this end, this study focused on the presentability and presentation of the physiological fovea in birds of prey and owls. Morphological variations of both fovea types—fovea centralis and fovea temporalis—were investigated within the diurnal species, as well as variations within and between the diurnal and nocturnal bird groups.

To investigate this, 56 diurnal and nocturnal wild birds of prey, representing 12 different species from three zoological families, were investigated over a span of 1.5 years. The animals were obtained from the Clinic for Birds, Reptiles, Amphibians and Ornamental Fish of the University of Munich. For all animals, an ophthalmological examination was medically indicated and was followed by optical coherence tomography. This was performed, depending on patient status and animal toleration, either while conscious, in sedation using Midazolam (2 mg/kg oral-nasal or IM) or under inhalation anesthesia. For examination, the Spectralis® HRA+OCT Plus from Heidelberg Engineering was used. Image editing and archiving was done using the software program Heidelberg Eye Explorer (HEYEX) version 5.4 (Heidelberg Engineering, Heidelberg, Germany). From the foveae centralis and temporalis, horizontal and vertical cross-sectional images (B-Scans and 3D images) were conducted. This included scans of the deepest spots of the fovea and of the parafoveal eminences at the locations nasal, temporal, superior, and inferior. Additionally, longitudinal- and cross-sections of a retinal comparison area were prepared, coming from the intersection of the eyeball equator (along the blood vessel cascade) and an imaginary extension along the pecten oculi. The measurements in the region of the central fovea, i.e. at the deepest point, consisted of the entire foveal retina thickness, the thickness of the layer complex spanning from the inner nuclear layer to the outer limiting membrane, and the complex from the outer limiting membrane to the outer retinal pigment epithelium resp. to the basal membrane. Furthermore, the depth of the depression was calculated and the retina layering of the central fovea was recorded. In the eminences and in the intermediate region, the retinal total thickness (from the internal limiting membrane to the basal membrane) and the following layers were measured as complexes: the nerve fiber layer together with the ganglion cell layer, the inner plexiform layer and the inner nuclear layer, the outer plexiform layer and the outer nuclear layer, the inner nuclear layer to the outer limiting membrane, and the outer

limiting membrane to the outer retinal pigment epithelium resp. to the basal membrane. In addition, nasal and temporal distance, as well as the superior to inferior eminence distance, was measured indicating the width of the Fovea at the retinal surface.

Using OCT, we were able to image the fovea in near histologic grade. Similarities and significant morphological differences between species were observable. In all bird species, a somewhat elongated fovea shape was observed. The different fovea types, convexiculate for the diurnal birds of prey and concaviculate for the nocturnal types, were clearly distinguishable, as well as differences in size within the diurnal and nocturnal species and between the two groups. In the diurnal types, the fovea centralis was wider and deeper as compared to the fovea temporalis of owls. The fovea temporalis of the diurnal birds of prey was overall less clearly formed and was more similar to the fovea temporalis of the nocturnal types. The layers in the central area of the fovea were reduced up to the inner nuclear layer of the fovea centralis of diurnal birds of prey and the fovea temporalis of owls. In the fovea temporalis of the diurnal types, the reduction was somewhat less pronounced, namely only up to the ganglion cell layer. In all fovea types, the eminences showed the same layers. The total thickness of the retina as well as of the layer complexes varied between the species within the diurnal and nocturnal groups, as well as between diurnal and nocturnal groups. Thus the total retina and the layer complexes up to the outer limiting membrane were thicker in diurnal birds of prey as compared to the nocturnal owls. The complex spanning from the outer limiting membrane to the outer retinal pigment epithelium/basal membrane was, however, thicker in the nocturnal species. In both groups, the inner plexiform layer and the inner nuclear layer were thicker than the outer plexiform layer and outer nuclear layer. However, in the nocturnal species, the outer nuclear and outer plexiform layers were especially pronounced. In the European honey buzzard foveae, the retinal layers could not clearly be distinguished.

Using optical coherence tomography, the fovea of birds of prey and owls could successfully be displayed, including the layering of the retina. This study provides an initial basis for the interpretation of OCT results with regards to the physiological morphology of the foveae in birds of prey and basis points for the assessment of changes in the fovea.



## VIII. RESUMEN

La tomografía de coherencia óptica (OCT) es un nuevo método de Imagen, el cual ya es entablado exitosamente en la oftalmología humana. La OCT ofrece la oportunidad de mostrar las capas y la morfología de la retina en sección transversal de un modo no invasivo, sin contracción y « in vivo » con una calidad poco inferior a la histología. En la oftalmología aviaria la OCT no se ha usado con frecuencia.

La meta de este trabajo a sido calificar la OCT como instrumento diagnostico adecuado para la investigación de la fovea. El foco principal del trabajo ha sido la posibilidad de representación y presentación de la fovea fisiológica de las aves de presa y búhos. Se ha examinado la variación morfológica de los dos tipos de fovea, la F. centralis y F. temporalis en la misma especie y también la variación dentro y entre los grupos aviares diurnos y nocturnos.

Para esto se ha estudiado en un tiempo de 1.5 años a 56 aves de presa salvajes diurnos y nocturnos de 13 diferentes tipos y 3 especies. Todos los animales pertenecen a la clínica de la universidad Ludwig-Maximilians-Universität en Múnich. En todos los animales que recibieron un examen oftalmológico seguido de un examen de OCT habían indicaciones para tal. Dependiendo del estado físico del paciente y su tolerancia, los exámenes se hicieron despiertos, en sedación con Midazolam (2 mg/kg oronasal) or anestesia de inhalación. Para el examen de OCT se utilizó el modelo Spectralis® HRA+OCT Plus de la Firma Heidelberg Engineering y para la edición de imágenes y archivamiento el programa software Heidelberg Eye Explorer (HEYEX) en la versión 5.4, Heidelberg Engineering, Heidelberg, Alemania. De la fovea centralis y temporalis se hicieron cortes de imagen verticales como también horizontales (B-Scans y tomas 3D). Estas contienen scans de la parte mas profunda de la fovea y de la eminencia parafovea las localizaciones nasal, temporal, superior e inferior. Además se hicieron cortes verticales y horizontales de la parte intermedia de la retina cual corta con el ecuador del ojo (en dirección de los vasos sanguíneos) y una línea imaginaria a lo largo del pecten, como uso de comparación. Las medidas implican en la parte central de la fovea, quiere decir en la parte mas profunda, el grueso retinar completo de la fovea, el grueso del complejo de las capas de la capa granular interior hasta la membrana limite exterior y desde la membrana limite exterior hasta el epitelio pigmentario retinar exterior respectivamente hasta la membrana basal. También se calculó la profundidad del hundimiento y se anotaron las capas de la fovea central. En la eminencia y en la parte intermedia se midió el grueso retinar completo (desde el limite de membrana interior hasta la membrana basal) y aparte las siguientes capas como complejos: las capa de fibra de nervio óptico y capas de las células ganglionares, la capa plexiforme interior y capa granular exterior, la capa granular interior hasta la membrana limitante exterior y la membrana limitante exterior hasta epitelio pigmentario de la retina exterior

respectivamente hasta la membrana basal. Además se midió en las “Eminenzen” la distancia nasal-temporal y superior-inferior, como también lo largo de las fovea en la superficie de la retina.

Atravez de la OCT se pudo representar la fovea en calidad cercana a la histología. Se pudo mostrar parecidos y también claramente diferencias morfológicas entre las diferentes especies. En todos los tipos de aves se pudo mostrar una forma alargada de la fovea. Los diferentes tipos de fovea, convexiclival en las aves de presa diurnas y concaviclival en las especies nocturnas, se pudieron mostrar claramente, como también la diferencia de tamaño en dentro de las especies diurnas y nocturnas y también entre los dos grupos. En las especies diurnas la F. central eran mas anchas y profundas en su dimensión comparadas a la F. temporal de los búhos. La F. temporal de las aves de presa diurnas no estaban claramente desarrolladas y se parecían mas a las F. temporal de las especies nocturnas. La reducción de las capas en la parte central de la fovea alcanzaba en la F. central en las aves de presa diurnas y en la F. temporal en los búhos hasta la capa granular interna. En la F. temporalis de las especies diurnas solo alcanzaban hasta la capa de las células ganglionares. Las “Eminenzen” mostraban en todos los tipos de fovea las mismas capas. El grueso de la retina en su totalidad y las capas complejas variaban entre las especies de los grupos diurnos y nocturnos, como también entre diurnos y nocturnos en la misma especie. El grueso total de la retina y de los complejos hasta el limite de la membrana exterior era mas grueso en las aves de presa diurnas que en los búhos nocturnos. Las capas desde el limite de la membrana exterior hasta el epitelio pigmentario exterior / membrana basal de la retina eran por lo contrario mas gruesos en las especies nocturnas. En ambos grupos la capa plexiforme interna y la capa granular interna eran mas gruesas que la capa plexiforme exterior y la capa granular exterior. En los búhos la capa granular y plexiforme exterior estaban claramente mas desarrolladas. En el halcón abejero no se pudo clasificar claramente las capas de la retina como en las otras especies de aves.

Por medio de la OCT se pudo mostrar la fovea de las aves de presa y los búhos incluyendo la constitución de las capas de la retina. Por lo cual este estudio suministra la base para la interpretación de resultados de la OCT en cuanto a la morfología fisiológica de la fovea en aves de presa y la condición previa para el registro y calificación de las alteraciones en la fovea.

## IX. LITERATURVERZEICHNIS

1. ABBOTT, C. J., MCBRIEN, N. A., GRUNERT, U., Pianta, M. J. (2009). Relationship of the optical coherence tomography signal to underlying retinal histology in the tree shrew (*Tupaia belangeri*). *Investigative ophthalmology & visual science*, 50, 414-423.
2. ADHI, M., AZIZ, S., MUHAMMAD, K., ADHI, M. I (2012). Macular thickness by age and gender in healthy eyes using spectral domain optical coherence tomography. *PLOS ONE*.
3. AHLERS, C., GOTZINGER, E., PIRCHER, M., GOLBAZ, I., PRAGER, F., SCHUTZE, C., BAUMANN, B., HITZENBERGER, C. K., SCHMIDT-ERFURTH, U. (2010). Imaging of the retinal pigment epithelium in age-related macular degeneration using polarization-sensitive optical coherence tomography. *Investigative ophthalmology & visual science*, 51, 2149-57.
4. AHLERS, C., SCHMIDT-ERFURTH, U. (2009). Three-dimensional high resolution OCT imaging of macular pathology. *Optics Express*, 4037-4045.
5. AJADI, R. A., KASALI, O. B., MAKINDE, A. F., ADELEYE, A. I., OYEWUSI, J. A., AKINTUNDE O. G. (2009). Effects of Midazolam on Ketamine-Xylazine Anesthesia in Guinea Fowl (*Numida meleagris galeata*). *Journal of Avian Medicine and Surgery* 23(3), 199-204.
6. ALARIO, A. F., PIRIE, C. G. (2013a). A spectral-domain optical coherence tomography device provides reliable corneal pachymetry measurements in canine eyes. *The Veterinary record*, 172, 605.
7. ALARIO, A. F., PIRIE, C. G. (2013b). Intra- and inter-user reliability of central corneal thickness measurements obtained in healthy feline eyes using a portable spectral-domain optical coherence tomography device. *Veterinary ophthalmology*, 16, 446-50.
8. AZMANIS, P., KOCH, C., FRANKE, M., RAUSCHER, F. G., HÜBEL, J., THIELEBEIN, J., KRAUTWALD-JUNGHANNS, M. E. (2012). Der Einsatz der optischen Kohärenztomographie (OCT) als diagnostisches Verfahren in der Ornitho-Ophthalmologie. *Proceedings 17. DVG Tagung über Vogelkrankheiten*, 38-41, München 2012.
9. BAILEY, T. J., DAVIS, D. H., VANCE, J. E., HYDE, D. R. (2012). Spectral-domain optical coherence tomography as a noninvasive method to assess damaged and regenerating adult zebrafish retinas. *Investigative ophthalmology & visual science*, 53, 3126-38.
10. BARAK, Y., SHERMAN, M. P., SCHAAL, S. (2011). Mathematical analysis of

- specific anatomic foveal Configurations predisposing to the formation of macular holes. *Investigative Ophthalmology & Visual Scienc*, 8266-8270.
11. BARSOTTI, G., BRIGANTI, A., SPRATTE, J. R., CECCHERELLI, R., BREGHI, G. (2012). Safety and efficacy of bilateral topical application of rocuronium bromide for mydriasis in european kestrels (*Falco tinnunculus*). *Journal of Avian Medicine and Surgery, Association of Avian Veterinarians*. 1-5.
  12. BAUER, M. A. (2010). Optische Kohärenztomographie im Ureter: Intraluminale Anwendung einer hochauflösenden Bildgebungsmethode im ex vivo Modell. Ludwig-Maximilians-Universität München, München.
  13. BEZZEL, E., & PRINZINGER, R. (1990). Sinnesorgane. In: BEZZEL, E. & PRINZINGER, R. (Eds.), *Ornithologie*, 148-155. Stuttgart: Ulmer.
  14. BUENO-PADILLA, I., KLAUSS, G., GARDINER, C. H., WUENSCHMANN, A. (2012). Disseminated mite infection with ocular involvement in a juvenile bald eagle (*Haliaeetus leucocephalus*). *Veterinary Ophthalmology*, 15, 271-275, Blackwell Publishing Ltd.
  15. BUYUKMIHCI, N. C. (1985). Lesions in the ocular posterior segment of raptors. *J Am Vet Med Assoc*, 187 (11), 1121-1124.
  16. BUYUKMIHCI, N. C., MURPHY, C. J., SCHULZ, T. (1988). Developmental ocular disease of, *J Wildl Dis*, 24 (2), 207-213.
  17. CARPENTER, J. W. (2005). *Exotic Animal Formulary*. Third edition. Saunders Elsevier 2005. p.73-83, 199-212, 220-222.
  18. CEBULLA, C. M., ZELINKA, C. P., SCOTT, M. A., LUBOW, M., BINGHAM, A., RASIAH, S., MAHMOUD, A. M., FISCHER, A. J. (2012). A chick model of retinal detachment: cone rich and novel. *PLoS One*, 7.
  19. COUSQUER, G. (2005) Ophthalmological findings in free-living tawny owls (*Strix aluco*) examined at a wildlife veterinary hospital, *Veterinary Record*, 734-739.
  20. DAVIS, A. M., ROTHENBERG, F. G., SHEPHERD, N., IZATT, J. A. (2008). In vivo spectral domain optical coherence tomography volumetric imaging and spectral Doppler velocimetry of early stage embryonic chicken heart development. *Journal of the Optical Society of America A*, 25, 3134-3143, OSA.
  21. DOROBK, K. (2013). Dreidimensionale Sonographie am Vogelauge – Das vordere Augensegment. Ludwig-Maximilians-Universität München, München.
  22. DREXLER, W. (2004). Ultrahigh-resolution optical coherence tomography. *Journal of biomedical optics*, 9, 47-74.

23. DREXLER, W., FUJIMOTO, J.G., (2008). State-of-the-art retinal optical coherence tomography. *Prog Retin Eye Res*, 45-88.
24. DREXLER, W., MORGNER, U., GHANTA, R. K., KARTNER, F. X., SCHUMAN, J. S., FUJIMOTO, J. G. (2001). Ultrahigh-resolution ophthalmic optical coherence tomography. *Nat Med* 7, 502-507.
25. DUBIS, A. M., MC ALLISTER, J. T., CARROLL, J. (2009). Reconstructing foveal pit morphology from optical coherence tomography imaging. *British Journal of Ophthalmology*, 1223-1227.
26. DUBIS, A. M., HANSEN, B. R., COOPER, R. F., BERINGER, J., DUBRA, A., CARROLL, J. (2012). Relationship between the Foveal Avascular Zone and Foveal Pit Morphology. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 53, 1628-1636.
27. DUCROS, M. G., MARSACK, J. D., RYLANDER, H. G., 3<sup>rd</sup>, THOMSEN, S. L., MILNER, T. E. (2001). Primate retina imaging with polarization-sensitive optical coherence tomography. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, image science, and vision*, 18, 2945-56.
28. DUKE-ELDER, S. (1958a). Kap. 14 The Eye of Birds. In: KIMPTON, H.(.), *System of Ophthalmology: The Eye in Evolution*, 397-428.
29. DUKE-ELDER, S. (1958b). Kap. 18 The Vision of Vertebrates. *System of Ophthalmology: The Eye in Evolution*. H. Kimpton, 597-707 H. Kimpton.
30. DUKES, T. W. & FOX, G. A. (1983). Blindness associated with retinal dysplasia in a prairie falcon, *falco mexicanus*. *J Wildl Dis*, 19(1), 66-69.
31. EVANS, H. E. (1979). Organa Sensoria. In: BAUMEL, J. J. (Ed.), *Nomina anatomica avium*. London, Acad. Pr. 505-525.
32. FERCHER, A. F., MENGEDOHT, K., WERNER, W. (1988). Eye-length measurement by interferometry with partially coherent light. *Optics Letters*, 13, 186-188, OSA.
33. FERGUSON, R. D., HAMMER, D., PAUNESCU, L. A., BEATON, S., SCHUMAN, J. S. (2004). Tracking optical coherence tomography. *Optics Letters*, 29, 2139-2141, OSA.
34. FERNANDEZ, E., DREXLER, W. (2005). Influence of ocular chromatic aberration and pupil size on transverse resolution in ophthalmic adaptive optics optical coherence tomography. *Optics express*, 13, 8184-97.
35. FISCHER, M. D., HUBER, G., BECK, S. C., TANIMOTO, N., MUEHLFRIEDEL, R., FAHL, E., GRIMM, C., WENZEL, A., EME, C. E., VAN DE PAVERT, S. A. WIJNHOLDS, J., PACAL, M., BREMNER, R., SEELIGER, M. W. (2009).

- Noninvasive, In Vivo Assessment of Mouse Retinal Structure Using Optical Coherence Tomography. PLoS ONE, 4.
36. FITE, K. V., ROSENFELD-WESSELS, S. (1975). A Comparative Study of Deep Avian Foveas. *Brain, Behavior and Evolution*, 12, 97-115.
  37. FRANZ, V. (1934). Höhere Sinnesorgane. In BOLK, L., GÖPPERT, E. & KALLIUS, E. (Eds.), *Handbuch der vergleichenden Anatomie der Wirbeltiere*, Band 2, pp. 989-1292. Berlin, Wien: Urban und Schwarzenberg.
  38. FRANZ-ODENDAAL, T. A., VICKARYOUS, M. K. (2006). Skeletal elements in the vertebrate eye and adnexa: Morphological and developmental perspectives. *Developmental Dynamics* Wiley-Liss, Inc., 1244-1255.
  39. FUJIMOTO, J. G. (2003). Optical coherence tomography for ultrahigh resolution in vivo imaging. *Nature biotechnology*, 21, 1361-7.
  40. GABRIELE, M. L., WOLLSTEIN, G., ISHIKAWA, H., KAGEMANN, L., XU, J., FOLIO, L. S., SCHUMAN, J. S. (2011). Optical Coherence Tomography: History, Current Status, and Laboratory Work. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 52, 2425-36.
  41. GALLEGO, A. (1983). Organization of the outer plexiform layer of the tetrapoda retina. In: OTTOSON, D. (Ed.), *Progress in Sensory Physiology*, Vol. 4. Springer-Verlag, Berlin and New York. In MARTIN, G. R. (1985). *Eye*. In KING, A. S. & MCLELLAND, J. (Eds.), *Form and Function in Birds* (Vol. 3, pp. 311-373). London, Orlando, San Diego, New York, Montreal, Sydney, Tokyo: Academic Press.
  42. GAMBICHLER, T., MOUSSA, G., SAND, M., SAND, D., ALTMAYER, P., HOFFMANN, K. (2005). Applications of optical coherence tomography in dermatology. *Journal of dermatological science*, 40, 85-94.
  43. GEITZENAUER, W., HITZENBERGER, C. K., SCHMIDT-ERFURTH, U. M. (2011) Retinal optical coherence tomography: past, present and future perspectives. *British Journal of Ophthalmology*, 95, 171-177.
  44. GEKELER, F., GMEINER, H., VOLKER, M., SACHS, H., MESSIAS, A., EULE, C., BARTZ-SCHMIDT, K. U., ZRENNER, E., SHINODA, K. (2007). Assessment of the posterior segment of the cat eye by optical coherence tomography (OCT). *Veterinary ophthalmology*, 10, 173-8.
  45. GHORBEL, I., ROSSANT, F., BLOCH, I., TICK, S., PAQUES, M. (2011). Automated segmentation of macular layers in OCT images and quantitative evaluation of performances. *Pattern Recognition*, 44, 1590-1603.

46. GLOESMANN, M., HERMANN, B., SCHUBERT, C., SATTMANN, H., AHNELT, P. K., DREXLER, W. (2003). Histologic correlation of pig retina radial stratification with ultrahigh-resolution optical coherence tomography. *Investigative ophthalmology & visual science*, 44, 1696-703.
47. GRAHN, B. H., SANDMEYER, L. L., BREAU, C. (2008). Retinopathy of Coton de Tulear dogs: clinical manifestations, electroretinographic, ultrasonographic, fluorescein and indocyanine green angiographic, and optical coherence tomographic findings. *Veterinary ophthalmology*, 11, 242-9.
48. GUMPENBERGER, M., KOLM, G. (2006). Ultrasonographic and computed tomographic examinations of the avian eye: physiologic appearance, pathologic findings, and comparative biometric measurement. *Veterinary radiology & ultrasound: the official journal of the American College of Veterinary Radiology and the International Veterinary Radiology Association*, 47, 492-502.
49. GUMPENBERGER, M., KORBEL, R. T. (2001). Sonographische und computertomographische Untersuchungen am Vogelauge. 6. Europäischer AAV-DVG-Kongress über Vogelkrankheiten, München, 7.-10.3.2001. *Tierärztliche Praxis (Kleintiere / Heimtiere)* 29, 5, 78-79.
50. GYLSTORFF, I., & GRIMM, F. (1988). Organkrankheiten: Sinnesorgane. In GYLSTORFF, I. & GRIMM, F. (Eds.), *Vogelkrankheiten*, 2nd ed., 321-323. Stuttgart: Eugen Ulmer GmbH&Co.
51. HAMDAN, R., GONZALEZ, R. G., GHOSTINE, S., CAUSSIN, C. (2012). Optical coherence tomography: from physical principles to clinical applications. *Archives of cardiovascular diseases*, 105, 529-534.
52. HANKINS, M. W., PEIRSON, S. N., FOSTER, R. G. (2008). Melanopsin: an exciting photopigment. *Trends in neurosciences*, 31, 27-36.
53. HARKNESS, L., BENNET-CLARK, H. C. (1978). The deep fovea as a focus indicator. *Nature*, 272, 814-816.
54. HARMENING, W. M., WAGNER, H. (2011). From optics to attention: visual perception in barn owls. *Journal of Comparative Physiology A*, Springer-Verlag, 197, 1031-1042.
55. HARWERTH, R. S., VILUPURU, A. S., RANGASWAMY, N. V., SMITH, E. L., 3<sup>rd</sup> (2007). The relationship between nerve fiber layer and perimetry measurements. *Investigative ophthalmology & visual science*, 48, 763-773.
56. HEADINGTON, K., CHOI, S. S., NICKLA, D., DOBLE, N. (2011). Single cell imaging of the chick retina with adaptive optics. *Current eye research*, 36, 947-57.

57. HEIDELBERG ENGINEERING GMBH (2014): Spurensuche im OCT. Praxisleitfaden der Heidelberg Engineering Academy. <http://www.heidelbergengineering.com/germany/academy/praxistipps/> (05.10.2015).
58. HERNANDEZ-MERINO, E., KECOVA, H., JACOBSON, S. J., HAMOUCHE, K. N., NZOKWE, R. N., GROZDANIC, S. D. (2011). Spectral domain optical coherence tomography (SD-OCT) assessment of the healthy female canine retina and optic nerve. *Veterinary Ophthalmology*, 14, 400-405, Blackwell Publishing Ltd.
59. HUANG, D., SWANSON, E. A., LIN, C. P., SCHUMAN, J. S., STINSON, W.G., CHANG, W., HEE, M. R., FLOTTE, T., GREGORY, K., PULIAFITO, C. A., (1991). Optical coherence tomography. *Science*, 1178-1181.
60. HUANG, Y., CIDECIYAN, A. V., PAPASTERGIOU, G. I., BANIN, E., SEMPLE-ROWLAND, S. L., MILAM, A. H., JACOBSON, S. G. (1998). Relation of optical coherence tomography to microanatomy in normal and rd chickens. *Investigative ophthalmology & visual science*, 39, 2405-16.
61. IZATT, J. A., SWANSON, E. A., FUJIMOTO, J. G., HEE, M. R., OWEN, G. M. (1994). Optical coherence microscopy in scattering media. *Optics Letters*, 19, 590-592, OSA.
62. JENKINS, M. W., ADLER, D. C., GARGESHA, M., HUBER, R., ROTHENBERG, F., BELDING, J., WATANABE, M., WILSON, D. L., FUJIMOTO, J. G., ROLLINS, A. M. (2007). Ultrahigh-speed optical coherence tomography imaging and visualization of the embryonic avian heart using a buffered Fourier Domain Mode Locked laser. *Optics Express*, 15, 6251-6267, OSA.
63. JIAO, S., KNIGHTON, R., HUANG, X., GREGORI, G., PULIAFITO, C. (2005). Simultaneous acquisition of sectional and fundus ophthalmic images with spectral-domain optical coherence tomography. *Optics Express*, 13, 444-452, OSA.
64. KALLÄHN, S. V. (2014). Untersuchungen zur chromatischen Pupillometrie am Vogelauge. Ludwig-Maximilians-Universität München, München.
65. KARDON, R., ANDERSON, S. C., DAMARJIAN, T. G., GRACE, E. M., STONE, E., KAWASAKI, A. (2009). Chromatic pupil responses: preferential activation of the melanopsin-mediated versus outer photoreceptor-mediated pupil light reflex. *Ophthalmology*, 116, 1564-73.



66. KERN, T. J., & COLITZ, C. M. H. (2013). Section IV: Special Ophthalmology. In GELATT, K. N., GILGER, B. C. & KERN, T. J. (Eds.), *Veterinary Ophthalmology, Fifth Edition, Vol II, 1750-1819*, John Wiley & Sons, Inc.
67. KIAMA, S. G., MAINA, J. N., BHATTACHARJEE, J., WEYRAUCH, K. D. (2001). Functional morphology of the pecten oculi in the nocturnal spotted eagle owl (*Bubo bubo africanus*), and the diurnal black kite (*Milvus migrans*) and domestic fowl (*Gallus gallus* var. *domesticus*): a comparative study. *Journal of Zoology*, 254, 521-528, Blackwell Publishing Ltd.
68. KNOTT, E. J., SHEETS, K. G., ZHOU, Y., GORDON, W. C., BAZAN, N. G. (2011). Spatial correlation of mouse photoreceptor-RPE thickness between SD-OCT and histology. *Experimental eye research*, 92, 155-60.
69. KO, T. H., FUJIMOTO, J. G., DUKER, J. S., PAUNESCU, L. A., DREXLER, W., BAUMAL, C. R., PULIAFITO, C. A., REICHEL, E., ROGERS, A. H., SCHUMAN, J. S. (2004). Comparison of ultrahigh- and standard-resolution optical coherence tomography for imaging macular hole pathology and repair. *Ophthalmology*, 2033-2043.
70. KORBEL R., STÜTZ S. (1999). Untersuchungen zur Elektroretinographie bei Mäusebussarden (*Buteo buteo* L., 1758). *Tierärztl Prax (K)* , 27, 255-62.
71. KORBEL R., HUFEN, H., SCHWEIKL, M., STROBEL, B. (2008). Morphological reference values in turkeys using digital scanning ophthalmoscopy and ultrasonography. *Proceedings of the 7th International Symposium on Turkey Diseases*, Berlin, 1-2.
72. KORBEL, R., RINDER, M. (2011a). Ophthalmological findings in birds affected with PDD. *Proceedings of the 11th European AAV conference and 1st ECZM meeting*, Madrid, Spain, April 26-30, 2011, 193.
73. KORBEL, R., RINDER, M. (2011b). Ocular findings in psittacine birds infected with avian bornavirus (ABV). *Proceedings of the 32<sup>nd</sup> Annual Conference of the Association of Avian Veterinarians 2011*, 21.
74. KORBEL, R. (1991). Zum derzeitigen Stand der Ornithophthalmologie. *Tierärztl Prax*, 19, 497-507.
75. KORBEL, R. (1992a). Okulare Manifestationen systemischer Erkrankungen beim Vogelpatienten. Teil 1. *Tierärztl Prax*, 20 (4), 385-394.
76. KORBEL, R. (1992b). Okulare Manifestationen systemischer Erkrankungen beim Vogelpatienten. Teil 2. *Tierärztl Prax*, 20 (5), 483-491.

77. KORBEL, R. (1992c). Zwangsmaßnahmen beim Vogelpatienten. Theoretische Grundlagen und praktische Durchführung Teil 1 und 2, Tierärztliche Praxis, 1992, 20, 59-64, 164-170.
78. KORBEL, R. (1994). Augenheilkunde bei Vögeln: Ätiologie und Klinik von Augenkrankheiten, Luftsack-Perfusionsanästhesie, ophthalmologische Photographie und Bildatlas der Augenerkrankungen bei Vögeln, Vet Habil. München.
79. KORBEL, R. (2000). Diseases of the posterior eye segment. In LUMEIJ J. T., REDIG P. T., REMPLE J. D., LIERZ M., COOPER J. E. (Eds.), Raptor biomedicine III. Lake worth: Zool Educ. Network 2000 c, 179-194.
80. KORBEL, R. (2001). Das Ophthalmologische Quiz. Visusstörung bei einer Eule. Tierärztl Prax, 29, 264-269.
81. KORBEL, R. (2002). Das Ophthalmologische Quiz. Linsentrübung bei einem juvenilen Uhu (*Bubo virginianus*). Tierärztl Prax. 30 (K), 145-147.
82. KORBEL, R. (1999). Erkrankungen des Augenhintergrundes beim Vogel - Untersuchungstechniken und Befunde. Tierärztl Mschr, 86, 395-410.
83. KORBEL, R. (2014). Avian Ophthalmology – A Practically Orientated Review on Recent Developments. Proceedings AAV Conference, 139-147.
84. KORBEL, R., DOROBOK, K., LIEPERT, A. & HUFEN, H. (2012b). Ocular 2D- and 3D-Ultrasonography and Optical Coherence Tomography (OCT). Paper presented at the 33rd Annual Association of Avian Veterinarians Conference and Expo, Louisville.
85. KORBEL, R., LIERZ, M. (2012). Kap. 14.7 Vögel. In ERHARDT, W., HENKE, J., HABERSTROH, J., BAUMGARTNER, C., TACKE, S. (Eds.) Anästhesie und Analgesie beim Klein- und Heimtier: mit Exoten, Labortieren, Vögeln, Reptilien, Amphibien und Fischen, 2nd ed., 790-834, Stuttgart: Schattauer.
86. KORBEL, R., NELL, B., REDIG, P., WALDE, I. & REESE, S. (2000). Video Fluorescein Angiography in the Eyes of Various Raptors and Mammals. Proceedings AAV Conference, 89-95.
87. KORBEL, R., REDIG, P., & JONES, R. (1999). Untersuchungen zur Fluoreszenzangiographie am Greifvogelauge. Tierärztl. Prax., 27 (K), 396-407.
88. KORBEL, R., REESE, S., KÖNIG, H. E. (2009a). Klinischer Untersuchungsgang. In: KÖNIG, H.E., LIEBICH, H.-G. (Eds.), Anatomie und Propädeutik des Geflügels. Stuttgart: Schattauer Verlag.

89. KORBEL, R., REESE, S., LIEBICH, H.G. (2009b). Fixationstechniken und Anästhesieverfahren. In: KÖNIG, H. E., KORBEL, R., LIEBICH, H. G. (Hrsg.) *Anatomie der Vögel, Klinische Aspekte und Propädeutik*. Schattauer, 2. Auflage 2009, S. 293-320.
90. KORBEL, R., SCHÄFFER, E. H., RAVELHOFER, K., & KÖSTERS, J. (1997b). Okulare Manifestationen von Mykobakteriosen bei Vögeln. *Tierärztl Prax*, 25, 552-558.
91. KORBEL, R., SCHULZE, C., VELASCO GALLEGGO, M. L., RINDER, M. (2013b). Optical Coherence Tomography (OCT) in the Avian Eye: Clinical Findings and Evaluation Protocols. *Proc Annu Conf Assoc Avian Vet*. 2013 Jacksonville, 241-242.
92. KORBEL, R., VELASCO GALLEGGO, M. L., SCHULZE, C., RINDER, M. (2013c). Avian bornavirus infections in parrots: characterization of ophthalmological lesions using optical coherence tomography (OCT). *Proceedings of the 1st International Conference on Avian, Herpetological and Exotic Mammal Medicine Wiesbaden*, 357-358.
93. KORBEL, R., WIESNER, H., & HECTOR, J. (1997a). Ophthalmoskopie bei Zoo- und Wildvögeln – Untersuchungstechniken und Befunde. *Verh.ber.Erkrgr. Zootiere*, 38, 103-110.
94. KORBEL, R. T. (2005). Avian Ophthalmology – Principles And Application. *ECVO/ESVO Annual Meeting: 15-19th of June, Oporto – Portugal*.
95. KORBEL, R. T., SCHULZE, C., VELASCO GALLEGGO, M. L., STEIN, K. (2013a). Investigations in the turkey eye using optical coherence tomography (OCT) as a basis to evaluate light induced alterations in the turkey eye. *Proc 7th Hafez Int Symp Turkey Dis.*, 54-57, Berlin.
96. KORBEL, R., SCHULZE, C., VELASCO GALLEGGO, M. L., RINDER, M. (2012a). Vergleichende Untersuchungen zur Optischen Kohärenz-Tomographie (OCT) und Digitalen Scanner-Ophthalmoskopie (SDO) beim Vogel. Paper presented at the DGK-DVG Kongress in Düsseldorf.
97. LARINA, I. V., FURUSHIMA, K., DICKINSON, M. E., BEHRINGER, R. R., LARIN, K. V. (2009). Live imaging of rat embryos with Doppler swept-source optical coherence tomography. *Journal of biomedical optics*, 14.
98. LARINA, I. V., LARIN, K. V., JUSTICE, M. J., DICKINSON, M. E. (2011). Optical Coherence Tomography for live imaging of mammalian development. *Current Opinion in Genetics & Development*, 21, 579-584.
99. LAUBER, J. K., MCGINNIS, J. (1966). Eye lesions in domestic fowl reared under continuous light. *Vision Research*, 6, 11-12

100. LEE, D. C., XU, J., SARUNIC, M. V., MORITZ, O. L. (2010). Fourier domain optical coherence tomography as a noninvasive means for in vivo detection of retinal degeneration in *Xenopus laevis* tadpoles. *Investigative ophthalmology & visual science*, 51, 1066-70.
101. LIEPERT, A. (2013). Dreidimensionale Sonographie des Vogelauges - das hintere Augensegment. Ludwig-Maximilians-Universität München.
102. LIEPERT, A., DOROBK, K., HUFEN, H., KORBEL, R. (2011). Application of 3D Ultrasonography in clinical avian ophthalmology, *Proc 11th EAAV Conf.* 2011, 212-213.
103. LIND, O. E., KELBER, A., KROGER, R. H. (2008). Multifocal optical systems and pupil dynamics in birds. *The Journal of experimental biology*, 2752-2758.
104. LISNEY, T. J., IWANIUK, A. N., BANDET, M. V., WYLIE, D. R. (2012). Eye shape and retinal topography in owls (Aves: Strigiformes). *Brain, behavior and evolution*, 79, 218-36.
105. LOCKET, N. A. (1992). Problems of deep foveas. *Australian and New Zealand journal of ophthalmology*, 20, 281-95.
106. LUMBROSO, B., RISPOLI, M. (2010). *Guide to Interpreting Spectral Domain Optical Coherence Tomography*. Jaypee Brothers, Medical Publishers.
107. MALAGOLA, R., IOZZO, N., GRENGA, P. (2014). Volumetric assessment of the space between the posterior hyaloid and internal limiting membrane using SD-OCT. *British Journal of Ophthalmology*, 98, 16-18.
108. MALLE, C. (2013). Beurteilung der Stenteinheilung mittels Optischer Kohärenztomographie im atherosklerotischen Kaninchenmodell und die Übertragbarkeit auf den Menschen, Angefertigt am Deutschen Herzzentrum München, Ludwig-Maximilians-Universität München.
109. MANS, C., SANCHEZ-MIGALLON GUZMAN, D., LAHNER L. L., PAUL-MURPHY, J., SLADKY, K. (2012). Sedation and Physiologic Response to Manual Restraint After Intranasal Administration of Midazolam in Hispaniolan Amazon Parrots (*Amazona ventralis*). *Journal of Avian medicine and Surgery* 26(3), 130-139.
110. MARTIN, G. R. (1985). Eye. In KING, A. S. & MCLELLAND, J. (Eds.), *Form and Function in Birds*, Vol.3, pp. 311-373. London, Orlando, San Diego, New York, Montreal, Sydney, Tokyo: Academic Press.
111. MCKIBBIN, M., ALI, M., INGLEHEARN, C., SHIRES, M., BOYLE, K., HOCKING, P. M. (2014). Spectral domain optical coherence tomography imaging of the posterior segment of the eye in the retinal dysplasia and

- degeneration chicken, an animal model of inherited retinal degeneration. *Veterinary ophthalmology*, 17, 113-9.
112. MCLELLAN, G. J., RASMUSSEN, C. A. (2012). Optical coherence tomography for the evaluation of retinal and optic nerve morphology in animal subjects: practical considerations. *Veterinary ophthalmology*, 15 Suppl 2, 13-28.
113. MEYER, D.B. (1986). The avian eye. In: STURKIE, P.D. (Ed.), *Avian Physiology*. Springer. New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo: 37-48.
114. MOAYED, A. A., CHOH, V., HARIRI, S., LUI, C., WONG, A. & BIZHEVA, K. (2012 b). Stimulus-Specific pupil Dynamics measured in Birds (*Gallus gallus domesticus*) In Vivo with Untrahigh Resolution Optical Coherence Tomography. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 53 (11), 6863-6869.
115. MOAYED, A. A., HARIRI, S., CHOH, V., BIZHEVA, K. (2012 a). Correlation of visually evoked intrinsic optical signals and electroretinograms recorded from chicken retina with a combined functional optical coherence tomography and electroretinography system. *Journal of biomedical Optics* 17 (1), 016011-016015.
116. MOAYED, A. A., HARIRI, S., SONG, E. S., CHOH, V., BIZHEVA, K. (2011). In vivo volumetric imaging of chicken retina with ultrahigh-resolution spectral domain optical coherence tomography. *Biomedical Optics Express* 2 (5), 1268-1274.
117. MURAOKA, Y., IKEDA, H. O., NAKANO, N., HANGAI, M., TODA, Y., OKAMOTO-FURUTA, K., KOHDA, H., KONDO, M., TERASAKI, H., KAKIZUKA, A., YOSHIMURA, N. (2012). Real-Time Imaging of Rabbit Retina with Retinal Degeneration by Using Spectral-Domain Optical Coherence Tomography. *PLoS One*, 7.
118. MURPHY, C. J. (1984). Raptor Ophthalmology. *Proceedings AAV Conference*, 43-56.
119. MURPHY, C. J., KERN, T. J., MCKEEVER, K., MCKEEVER, L., & MACCOY, D. (1982). Ocular lesions in free – living raptors. *J Am Vet Med Assoc*, 181 (11), 1302-1304.
120. NIEMELA, T., VIREN, T., LIUKKONEN, J., ARGUELLES, D., TE MOLLER, N. C., PUHAKKA, P., JURVELIN, J., TULAMO, R., TOYRAS, J. (2014). Application of optical coherence tomography enhances reproducibility of arthroscopic evaluation of equine joints. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 56, 3.
121. OEHME, H. (1964). Vergleichende Untersuchungen an Greifvogeläugen. *Zeitschrift für Morphologie und Ökologie der Tiere*, 53, 618-635.

122. OSTRIN, L. A., LIU, Y., CHOH, V., WILDSOET, C. F. (2011). The role of the iris in chick accommodation. *Investigative ophthalmology & visual science*, 52, 4710-6.
123. PAULI, A. M., CRUZ-MARTINEZ, L. A., PONDER, J. B., REDIG, P. T., GLASER, A. L., KLAUSS, G., SCHOSTER, J. V., & WÜNSCHMANN, A. (2007). Ophthalmologic and oculopathologic findings in red-tailed hawks and Cooper's hawks with naturally acquired West Nile virus infection. *J Am Vet Med Assoc*, 231(8), 1240-1248.
124. PAUL-MURPHY, J., FIALKOWSKI, J. (2001). *Injectable Anesthesia and Analgesia of Birds. Recent Advances in Veterinary Anesthesia and Analgesia: Companion Animals*. R. D. Gleed and J. W. Ludders (Eds.), International Veterinary Information Service, Ithaca, New York, USA.
125. PEARSON, R. (1972). The avian eye and vision. In: PEARSON, R. (Ed.), *The avian brain* (pp. 279-318). London, New York: Academic Press.
126. PINTO, N. I., GILGER, B. C. (2014). Spectral-domain optical coherence tomography evaluation of the cornea, retina, and optic nerve in normal horses. *Veterinary Ophthalmology*, 17, 140-148.
127. POULSEN NAUTRUP, C., HEIDER, H. J. & EGGERS, S. (1998). In POULSEN NAUTRUP, C. & TOBIAS, R. (Eds.), *Atlas und Lehrbuch der Ultraschalldiagnostik von Hund und Katze*, 2nd ed., 92-108, Hannover: Schlütersche GmbH.
128. PUMPHREY, R. J. (1961). Sensory Organs: Vision. In MARSHALL, A. J. (Ed.), *Biology and Comparative Physiology of Birds Vol. 2*, New York, London: Academic Pres, 55-68.
129. PUMPHREY, R. J. (1948). The Theory of the Fovea. *Journal of Experimental Biology*, 299-312.
130. RAUSCHER, F. G., AZMANIS, P., KORBER, N., KOCH, C., HUBEL, J., VETTERLEIN, W., WERNER, B., THIELEBEIN, J., DAWCZYNSKI, J., WIEDEMANN, P., REICHENBACH, A., FRANCKE, M., KRAUTWALD-JUNGHANNS, M. E. (2013). Optical coherence tomography as a diagnostic tool for retinal pathologies in avian ophthalmology. *Investigative ophthalmology & visual science*, 8259-69.
131. RAVELHOFER, K. (1996). *Pathologisch-anatomische Untersuchungen an Augen verschiedener Vogelspezies*. Ludwig-Maximilian-Universität München, München.
132. REESE, S., KORBEL, R., & LIEBICH, H.-G.(2009). Sehorgan (Organum visus). In KÖNIG, H. E., KORBEL, R. & LIEBICH, H.-G. (Eds.), *Anatomie der*

- Vögel – Klinische Aspekte und Propädeutik. Zier-, Greif-, Zoo-, Wildvögel und Wirtschaftsgeflügel, 229-256, Stuttgart: Schattauer.
133. REGATIERI, C. V., BRANCHINI, L., FUJINOTO, J. G., DUKER, J.S. (2012). Choroidal imaging using spectral-domain optical coherence tomography. *Retina*, Philadelphia, Pa., 865-876.
134. REUTER, A. (2009). Evaluation des Rebound-Tonometers TonoVet® für die Bestimmung des Augeninnendrucks bei Greifvögeln und Eulen. Freie Universität Berlin, Berlin.
135. RIAU, A. K., TAN, N. Y., ANGUNAWELA, R. I., HTOON, H. M., CHAURASIA, S. S., MEHTA, J. S. (2012). Reproducibility and age-related changes of ocular parametric measurements in rabbits. *BMC Veterinary Research*, 8, 138.
136. RIVAL, F., LINSART, A., ISARD, P. F., BESSON, C., DULAURENT, T. (2014). Anterior segment morphology and morphometry in selected reptile species using optical coherence tomography. *Veterinary ophthalmology*.
137. ROCHON-DUVIGNEAUD, A. (1943). Les yeux et la vision des vertébrés. Paris: Masson. In: PEARSON, R. (1972). The avian eye and vision. In: PEARSON, R. (Ed.), The avian brain (pp. 279-318). London, New York: Academic Press.
138. RUGGERI, M., MAJOR, J. C., JR., MCKEOWN, C., KNIGHTON, R. W., PULIAFITO, C. A., JIAO, S. (2010). Retinal structure of birds of prey revealed by ultra-high resolution spectral-domain optical coherence tomography. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 5789-95.
139. RUGGERI, M., TSECHPENAKIS, G., JIAO, S., JOCKOVICH, M. E., CEBULLA, C., HERNANDEZ, E., MURRAY, T. G., PULIAFITO, C. A. (2009). Retinal tumor imaging and volume quantification in mouse model using spectral-domain optical coherence tomography. *Optics Express*, 17, 4074-4083.
140. RUGGERI, M., WEHBE, H., JIAO, S., GREGORI, G., JOCKOVICH, M. E., HACKAM, A., DUAN, Y., PULIAFITO, C. A. (2007). In vivo three-dimensional high-resolution imaging of rodent retina with spectral-domain optical coherence tomography. *Invest Investigative ophthalmology & visual science*, 48, 1808-14.
141. SCHEIBE, P., LAZAREVA, A., BRAUMANN, U., REICHENBACH, A., WIEDEMANN, P., FRANCKE, M., RAUSCHER, F. G. (2014). Parametric model for the 3D reconstruction of individual fovea shape from OCT data. *Experimental Eye Research*, 119, 19-26.
142. SCHMITT, J. M. (1999). Optical coherence tomography (OCT): a review. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 5, 1205-1215.

143. SCHULZ-WACKERBARTH, C. N. (2011). Evaluation der Spaltlampen Spectral Radar Optischen Kohärenztomographie (SL SR OCT) und Vergleich mit SL OCT und Stratus OCT bei physiologischen und pathologischen Befunden des vorderen und hinteren Augenabschnittes. Universität zu Lübeck, Lübeck.
144. SCOTT, D.E. (2015). A Retrospective Look at Outcomes of Raptors with Ocular Trauma. Proceedings Exotics Conf, 103-104.
145. SEIDEL, B. (1988). Augenkrankheiten der Vögel. In SCHMIDT, V. (Ed.), Augenkrankheiten der Haustiere, Vol. 2, 237-261, Stuttgart: Enke.
146. SEVERIN, G. A. (1995) Severin's Veterinary Ophthalmology Notes. 3rd ed., Ft. Collins, CO: Colorado State University.
147. SILMAN, A. J. (1973). Avian Vision. In Avian biology 2: 349-387. Farner, D. S., King, J. R. & Parker, K. C. (Eds.), New York: Academic Press. In: KIAMA, S.G., MAINA, J. N., BHATTACHARJEE, J., Weyrauch, K. D. (2001). Functional morphology of the pecten oculi in the nocturnal spotted eagle owl (*Bubo bubo africanus*), and the diurnal black kite (*Milvus migrans*) and domestic fowl (*Gallus gallus* var. *domesticus*): a comparative study. Journal of Zoology, London 254, 521-528.
148. SINOWATZ, F. (1998). Sinnesorgane. In: RÜSSE, I., SINOWATZ, F., (Eds.), Lehrbuch der Embryologie der Haustiere, 2nd ed., 287-303, Berlin: Parey.
149. SLONAKER, J. R. (1918). A Physiological study of the anatomy of the eye and its accessory parts of the english sparrow (*Passer domesticus*). Journal of Morphology, 31, 351-459.
150. SPAIDE, R. F., CURCIO, C. A. (2011). Anatomical correlates to the bands seen in the outer retina by optical coherence tomography: Literature Review and Model. Retina, Philadelphia, Pa., 31, 1609-19.
151. SRINIVASAN, V. J., ADLER, D. C., CHEN, Y., GORCZYNSKA, I., HUBER, R., DUKER, J. S., SCHUMAN, J. S., FUJIMOTO, J. G. (2008). Ultrahigh-Speed Optical Coherence Tomography for Three-Dimensional and En Face Imaging of the Retina and Optic Nerve Head. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 49, 5103-5110.
152. SRINIVASAN, V. J., KO, T. H., WOJTKOWSKI, M., CARVALHO, M., CLERMONT, A., BURSELL, S. E., SONG, Q. H., LEM, J., DUKER, J. S., SCHUMAN, J. S., FUJIMOTO, J. G. (2006). Noninvasive Volumetric Imaging and Morphometry of the Rodent Retina with High-Speed, Ultrahigh-Resolution Optical Coherence Tomography. Investigative ophthalmology & visual science, 47, 5522-8.



153. STEINBERG, J. S. (2011). In-vivo Bildgebung retikulärer Drusen bei altersabhängiger Makuladegeneration mittels konfokaler Scanning Laser Ophthalmoskopie und Spektral-Domain optischer Kohärenztomographie, Hohe Medizinische Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.
154. STEINMETZ, A., PEES, M., SCHMIDT, V., WEBER, M., KRAUTWALD-JUNGHANNS, M.-E., & OECHTERING, G. (2008). Blindness as a sign of proventricular dilatation disease in a grey parrot (*Psittacus erithacus erithacus*). *Journal of Small Animal Practice*, 49(12), 660-662.
155. STROBEL, B. K. (2010). Okulare Sonographie des gesunden und erkrankten Auges bei Wildgreifvögeln. Ludwig-Maximilians-Universität München, München.
156. STROUTHIDIS, N. G., FORTUNE, B., YANG, H., SIGAL, I. A., BURGOYNE, C. F. (2011). Effect of acute intraocular pressure elevation on the monkey optic nerve head as detected by spectral domain optical coherence tomography. *Investigative ophthalmology & visual science*, 52, 9431-9437.
157. STÜTZ S. (1997). Elektroretinographie bei Mäusebussarden (*Buteo buteo* L., 1758). Ludwig-Maximilians-Universität München, München.
158. TANDLER, G. H. F. (2013). Tonometrie am Vogelauge mittels Tonovet® und Tonolab® im Vergleich zum TonopenXL®. Ludwig-Maximilians-Universität München, München.
159. TICK, S., ROSSANT, F., GHORBEL, I., GAUDRIC, A., SAHEL, J.-A., CHAUMET-RIFFAUD, P., PAQUES, M. (2011). Foveal Shape and Structure in a Normal Population. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 52, 5105-5110.
160. TOWNSEND, K. A. , et al. (2009). In: KERN, T. J. & COLITZ, C. M. H. (2013). Section IV: Special Ophthalmology. In: GELATT, K. N., GILGER, B. C. & KERN, T. J. (Eds.), *Veterinary Ophthalmology, Fifth Edition, Vol II*, pp 1750-1819, John Wiley & Sons, Inc.
161. TUCKER, V. A. (2000). The deep fovea, sideways vision and spiral flight paths in raptors. *The Journal of experimental biology*, 203, 3745-54.
162. TURK, L. (2012). Die optische Kohärenztomographie – ein nicht invasives Untersuchungsverfahren zur Beurteilung von zervikalem Gewebe. Validierung einer neuen Methode in vivo. Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

164. VAN VELTHOVEN, M. E., FABER, D. J., VERBRAAK, F. D., VAN LEEUWEN, T. G., DE SMET, M. D. (2007). Recent developments in optical coherence tomography for imaging the retina. *Progress in retinal and eye research*, 57-77.
165. VELASCO GALLEGO, M. L. (2015). Imaging of physiological retinal structures in various raptor species using Optical Coherence Tomography (OCT). Ludwig-Maximilians-Universität München, München.
166. VELASCO GALLEGO, M. L., SCHULZE, C., RINDER, M. KORBEL, R. (2014). Vergleichende Untersuchungen an Greifvogelaugen mittels Optischer Kohärenztomografie (OCT) und Histologie. 1. Jahrestagung der DVG-Fachgruppe „Zier-, Zoo- und Wildvögel, Reptilien und Amphibien“. München, 6.-8. März, 27-29. *Tierärztl Prax* 2014;42 (K):A38.
167. VERMA, Y., DIVAKAR RAO, K., GUPTA, P. K. (2008). In-vivo imaging of adult zebrafish using optical coherence tomography. *Proc. SPIE* 7139, 1st Canterbury Workshop on Optical Coherence Tomography and Adaptive Optics, Published in SPIE Proceedings Vol. 7139.
168. VESAL N., ESKANDARI M. H. (2006). Sedative effects of midazolam and xylazine with or without ketamine and detomidine alone following intranasal administration in Ring-necked Parakeets. *Journal of the American Veterinary Medical Association* 228(3), 383-388.
169. VIZZERI, G., BALASUBRAMANIAN, M., BOWD, C., WEINREB, R. N., MEDEIROS, F. A., ZANGWILL, L. M. (2009). Spectral domain-optical coherence tomography to detect localized retinal nerve fiber layer defects in glaucomatous eyes. *Optics express*, 17, 4004-18.
170. WAGNER-SCHUMAN, M., DUBIS, A. M., NORDGREN, R. N., LEI, ODELL, D., CHIAO, H., WEH, E., FISCHER, W., SULAI, Y., DUBRA, A., CARROLL, J. (2011). Race- and Sex-Related Differences in Retinal Thickness and Foveal Pit Morphology. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 52, 625-634.
171. WALLS, F.L. The Vertebrate Eye. Bulletin Nr. 19 Cranbook Institute of Science 1942.
172. WALLS, G. L. (1963a). The Vertebrate Eye and its Adaptive Radiation - Chapter 17: Birds. New York, London: Hafner Publishing Company.
173. WALLS, G. L. (1963b). The Vertebrate Eye and its Adaptive Radiation - Chapter 8: Adaptions To Diurnal Activity. New York, London: Hafner Publishing Company.
174. WALLS, G. L. (1963c). The Vertebrate Eye and its Adaptive Radiation - Chapter 10: Adaptions To Space And Motion. New York, London: Hafner Publishing Company.

175. WANG, Y., FAWZI, A., TAN, O., GIL-FLAMER, J., HUANG, D. (2009). Retinal blood flow detection in diabetic patients by Doppler Fourier domain optical coherence tomography. *Optics express*, 17, 4061-73.
176. WIESER, W., BIEDERMANN, B. R., KLEIN, T., EIGENWILLIG, C. M., HUBER, R. (2010) Multi-Megahertz OCT: High quality 3D imaging at 20 million A-scans and 4.5 GVoxels per second. *Optics Express*, 18, 14685-14704, OSA.
177. WILLIAMS, D. (1994). Section Four: Internal Medicine. Ophthalmology. In RITCHIE, B. W., HARRISON, G. J. & HARRISON, L. R. (Eds.), *Avian Medicine: Principles and Application*, 673-695. Lake Worth, Florida: Wingers Publishing.
178. WILLIAMS, D. L., GONZALES VILLAVINCENCIO, C. M., WILSON, S. (2006). Chronic ocular lesions in tawny owls (*Strix aluco*) injured by road traffic, *Veterinary Record*, 148-153.
179. WOOD, C.A. (1917). *The Fundus Oculi of Birds, Especially As Viewed by the Ophthalmoscope; a Study in the Comparative an.* BiblioBazaar.
180. WU, P. C., CHEN, Y. J., CHEN, C. H., CHEN, Y. H., SHIN, S. J., YANG, H. J., KUO, H. K. (2008). Assessment of macular retinal thickness and volume in normal eyes and highly myopic eyes with third-generation optical coherence tomography. *Eye*, 22, 551-555, Royal College of Ophthalmologists.
181. YAZDANFAR, S., ROLLINS, A. M., IZATT, J. A. (2003). In vivo imaging of human retinal flow dynamics by color Doppler optical coherence tomography. *Archives of ophthalmology*, 121, 235-239.



X. ANHANG

Anhang I: Ausfaltblatt

Abbildung A- 1: Ausfaltblatt. Vermessene Schichtkomplexe und Zuordnung der Schichten im OCT-Tomogramm.

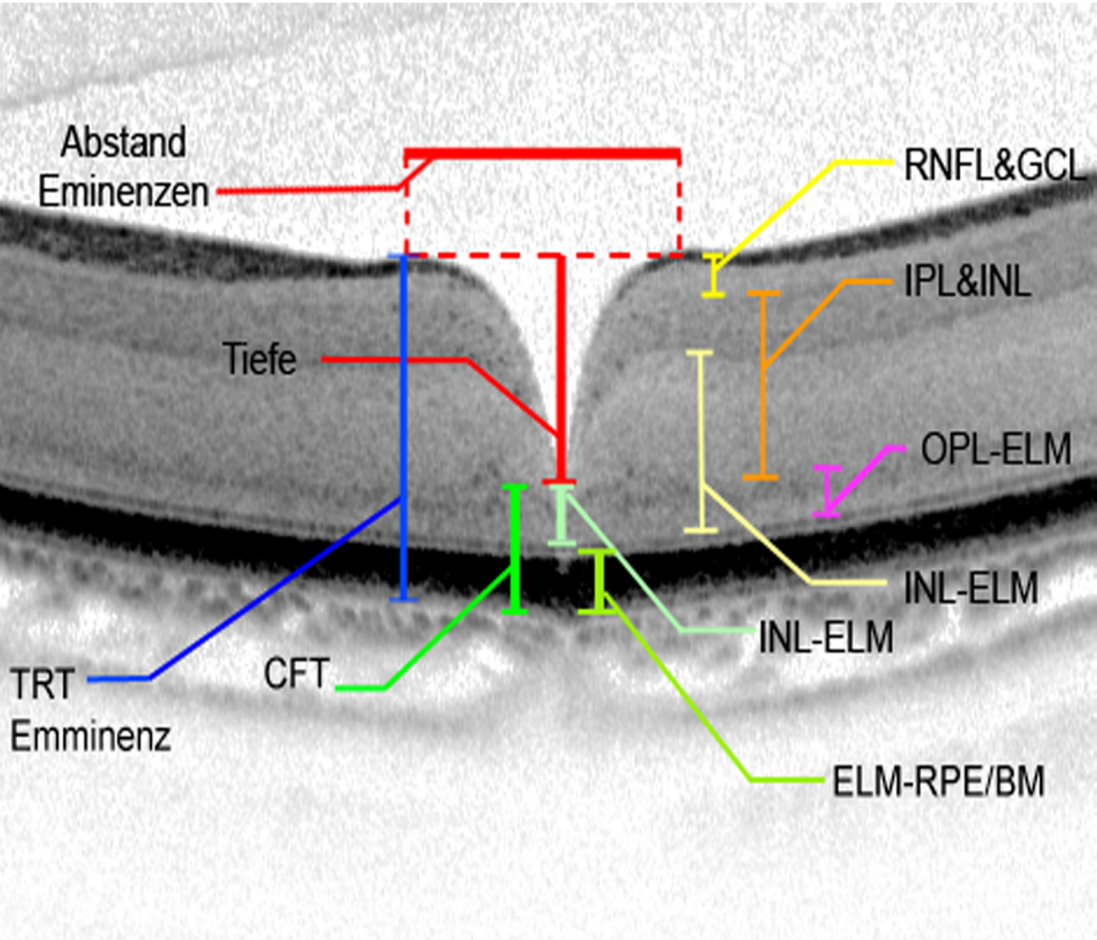


Abb. 19: Beispiel der vermessenen Schichtkomplexe. **Höchster Punkt der Eminenz:** retinale Gesamtdicke (TRT; total retinal thickness), retinale Nervenfaserschicht und Ganglienzellschicht (**RNFL&GCL**), innere plexiforme Schicht und innere Körnerschicht (**IPL&INL**), äußere plexiforme Schicht bis zur äußeren Grenzmembran (**OPL-ELM**), innere Körnerschicht bis äußere Grenzmembran (**INL-ELM**) und äußere Grenzmembran bis unterhalb des Retinalen Pigmentepithels/der Basalmembran (**ELM-RPE/BM**). Außerdem: Abstand der Eminenzen. Zentrale Fovea: zentrale foveale Retinadicke (**CFT**, central foveal thickness), Foveatiefe, Schichtkomplex der inneren Körnerschicht bis äußeren Grenzmembran (**INL-ELM**) und der Komplex äußere Grenzmembran bis unterhalb des Retinalen Pigmentepithels/der Basalmembran(**ELM-RPE/BM**)

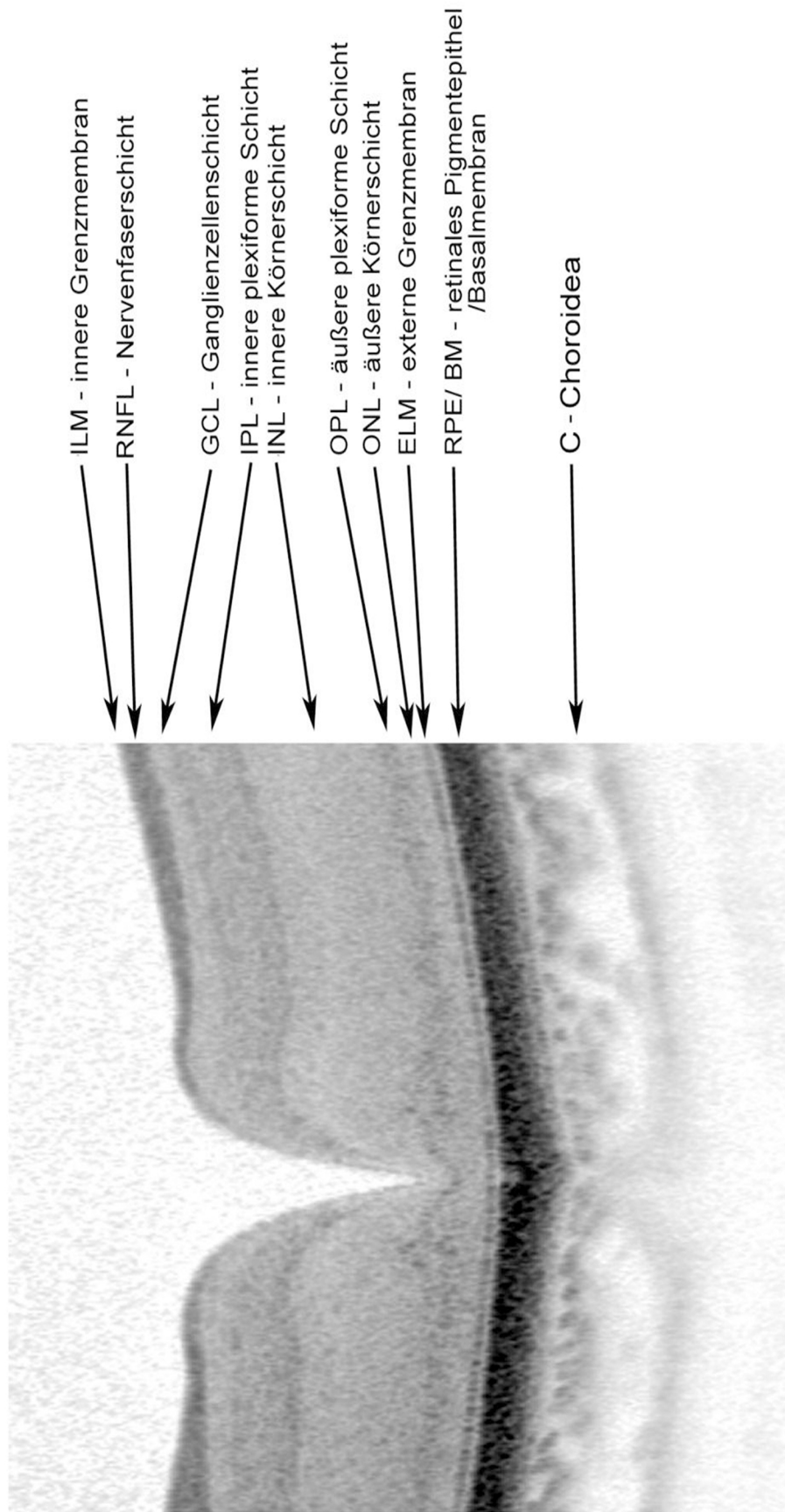


Abb. 18: OCT-Tomogramm (B-Scan) einer physiologischen Fovea centralis beim Mäusebussard.



## Anhang II: Ergebnistabellen - tagaktive Greifvögel

Aufgeführt werden die Messergebnisse und die Standardabweichungen zu den untersuchten Parametern der Foveae centrales und temporales und des Zwischenbereichs der tagaktiven Greifvögel. Aufgeführt sind außerdem die Anzahl der in die Auswertung einbezogenen Messungen, Tiere und untersuchten Augen.

SD	=	standard deviation/Standardabweichung
n M	=	Anzahl der einbezogenen Messungen insgesamt
n T	=	Anzahl der einbezogenen untersuchten Tiere
n A	=	Anzahl der einbezogenen untersuchten Augen
MB	=	Mäusebussard
SP	=	Sperber
H	=	Habicht
TF	=	Turmfalke
WF	=	Wanderfalke
RW	=	Rohrweihe
F	=	Fovea
FC	=	Fovea centralis
FT	=	Fovea temporalis
CFT	=	central foveal thickness/zentrale Foveadicke
INL-ELM zentral	=	Dicke des Komplexes der inneren Körnerschicht bis zur äußeren Grenzmembran im Bereich der zentralen Fovea
ELM-RPE/BM	=	Dicke des Schichtkomplexes der äußeren Grenzmembran bis zum retinalen Pigmentepithel resp. der Basalmembran im zentralen Bereich der Fovea
Abstand N-T	=	Abstand der Eminenzen nasal bis temporal
Abstand S-I	=	Abstand der Eminenzen superior bis inferior
TRT	=	total retinal thickness/retinale Gesamtdicke
RNFL&GCL	=	retinale Nervenfaserschicht und Ganglienzellschicht
IPL&INL	=	innere plexiforme Schicht und innere Körnerschicht
OPL-ELM	=	äußere plexiforme Schicht bis zur äußeren Grenzmembran
IN-ELM	=	innere Körnerschicht bis äußere Grenzmembran
ELM-RPE/BM	=	äußere Grenzmembran bis unterhalb des retinalen Pigmentepithels/der Basalmembran

**Tab. II-A:** Messergebnisse (in  $\mu\text{m}$ ) zur Fovea centralis und Fovea temporalis der tagaktiven Greifvögel. Zentrale Fovea, Tiefe, Abstände der Eminenzen (Verwendung der Abkürzungen wie oben unter Anhang II angegeben).

### Zentrale Fovea

Art	F	CFT	SD	nM	nT	nA	INL-ELM zentral	SD	nM	nT	nA	ELM-RPE/BM zentral	SD	nM	nT	nA
MB	FC	223,59	33,06	32	11	19	118,44	24,87	32	11	19	102,78	5,94	32	11	19
MB	FT	255,19	19,10	26	11	16	114,31	15,94	26	11	16	85,08	4,35	26	11	16
SP	FC	188,88	19,01	8	4	6	93,88	21,62	8	4	6	83,00	7,67	8	4	6
SP	FT	279,00	10,37	5	2	4	126,20	3,27	5	2	4	69,40	2,70	5	2	4
H	FC	217,25	44,42	8	2	4	98,75	27,12	8	2	4	93,63	5,07	8	2	4
H	FT	275,63	6,97	8	2	4	122,50	3,46	8	2	4	78,13	4,45	8	2	4
TF	FC	203,25	22,83	8	2	4	99,75	20,69	8	2	4	98,88	8,29	8	2	4
TF	FT	237,88	32,17	8	2	4	102,88	20,01	8	2	4	84,75	6,23	8	2	4
WF	FC	215,75	47,53	8	3	6	102,50	27,44	8	3	6	98,13	7,66	8	3	6
WF	FT	231,50	12,06	8	3	6	94,63	11,89	8	3	6	79,38	2,92	8	3	6
RW	FC	210,25	13,52	4	1	2	104,50	25,30	4	1	2	81,33	3,06	3	1	2

### Tiefe und Abstände

Art	F	Tiefe	SD	nM	nT	nA	Abstand N-T	SD	nM	nT	nA	Abstand S-I	SD	nM	nT	nA
MB	FC	227,77	38,54	32	11	19	811,89	79,60	18	11	18	771,29	73,37	14	9	14
MB	FT	90,81	34,08	26	11	16	516,75	66,45	16	11	16	542,20	53,79	10	7	10
SP	FC	194,13	27,05	8	4	6	1305,17	104,16	6	4	6	1136,50	173,24	2	2	2
SP	FT	24,00	8,25	5	2	4	761,00	35,95	4	4	4	637,00	-	1	1	1
H	FC	227,06	41,35	8	2	4	1033,25	69,21	4	2	4	1067,75	70,67	4	2	4
H	FT	55,00	6,97	8	2	4	704,75	101,08	4	2	4	699,25	67,42	4	2	4
TF	FC	250,19	22,40	8	2	4	1068,50	59,02	4	2	4	1106,25	108,89	4	2	4
TF	FT	104,81	21,89	8	2	4	769,75	100,12	4	2	4	744,00	30,99	4	2	4
WF	FC	197,50	50,68	8	3	6	920,83	69,66	6	3	6	821,50	64,35	2	1	2
WF	FT	89,56	17,34	8	3	6	560,33	25,80	6	3	6	523,00	29,70	2	2	2
RW	FC	175,75	19,43	4	1	2	809,00	4,24	2	1	2	798,00	72,12	2	1	2



**Tab. II-B:** Messergebnisse (in  $\mu\text{m}$ ) zu den Eminenzen der Fovea centralis und Fovea temporalis der tagaktiven Greifvögel (Verwendung der Abkürzungen wie oben unter Anhang II angegeben).

### Eminenz Nasal

Art	F	TRT	SD	n M	n T	n A	RNFL & GCL	SD	n M	n T	n A	IPL & INL	SD	n M	n T	n A	OPL- ELM	SD	n M	n T	n A	INL- ELM	SD	n M	n T	n A	ELM- RPE/ BM	SD	n M	n T	n A
MB	FC	453,94	16,93	18	11	18	51,06	5,49	18	11	18	229,31	18,42	16	10	16	75,38	13,37	16	10	16	233,61	12,39	18	11	18	97,94	6,13	18	11	18
MB	FT	351,75	13,52	16	11	16	39,07	6,84	15	11	15	171,25	14,95	8	6	8	67,00	12,49	8	6	8	172,13	19,34	16	11	16	80,88	4,44	16	11	16
SP	FC	381,33	21,11	6	4	6	46,50	3,78	6	4	6	177,50	34,38	6	4	6	81,50	34,63	6	4	6	191,83	12,81	6	4	6	75,67	5,01	6	4	6
SP	FT	311,75	7,59	4	4	4	48,50	4,36	4	4	4	120,50	45,96	2	2	2	78,00	45,25	2	2	2	128,25	6,34	4	4	4	66,50	2,38	4	4	4
H	FC	441,50	11,09	4	2	4	50,75	5,38	4	2	4	227,75	8,22	4	2	4	77,00	4,08	4	2	4	234,25	12,12	4	2	4	88,75	6,18	4	2	4
H	FT	342,25	3,86	4	2	4	52,75	5,19	4	2	4	162,33	4,04	3	2	3	52,00	2,65	3	2	3	149,25	9,39	4	2	4	74,25	2,99	4	2	4
TF	FC	457,75	11,50	4	2	4	57,00	2,94	4	2	4	223,25	12,74	4	2	4	85,75	11,70	4	2	4	240,50	12,18	4	2	4	90,00	5,16	4	2	4
TF	FT	356,75	26,89	4	2	4	43,50	5,80	4	2	4	170,00	14,31	4	2	4	67,25	9,74	4	2	4	176,50	17,33	4	2	4	81,25	3,59	4	2	4
WF	FC	415,17	11,37	6	3	6	54,17	5,88	6	3	6	185,33	8,69	6	3	6	78,50	8,12	6	3	6	203,83	8,91	6	3	6	94,33	6,80	6	3	6
WF	FT	334,00	14,25	6	3	6	49,67	2,58	6	3	6	160,00	14,34	5	3	5	61,00	12,98	5	3	5	163,67	7,94	6	3	6	78,00	3,35	6	3	6
RW	FC	390,00	14,14	2	1	2	44,50	2,12	2	1	2	202,00	-	1	1	1	59,00	-	1	1	1	191,50	3,54	2	1	2	82,00	-	1	1	1

### Eminenz Temporal

Art	F	TRT	SD	n M	n T	n A	RNFL & GCL	SD	n M	n T	n A	IPL & INL	SD	n M	n T	n A	OPL- ELM	SD	n M	n T	n A	INL- ELM	SD	n M	n T	n A	ELM- RPE/ BM	SD	n M	n T	n A
MB	FC	451,50	16,46	18	11	18	52,06	8,34	18	11	18	230,94	22,93	16	11	16	71,38	11,75	16	11	16	237,17	10,37	18	11	18	97,78	6,53	18	11	18
MB	FT	345,00	52,92	16	11	16	41,50	6,57	16	11	16	157,57	21,46	7	5	7	62,14	17,27	7	5	7	153,50	9,66	16	11	16	76,13	5,38	16	11	16
SP	FC	376,17	17,47	6	4	6	47,17	3,31	6	4	6	166,33	38,02	6	4	6	87,50	33,77	6	4	6	189,00	16,60	6	4	6	79,00	6,29	6	4	6
SP	FT	293,00	6,98	4	4	4	44,00	11,17	4	4	4	112,50	37,48	2	2	2	69,00	43,84	2	2	2	117,50	1,91	4	4	4	65,50	2,65	4	4	4
H	FC	448,75	15,39	4	2	4	54,75	3,86	4	2	4	232,25	5,85	4	2	4	75,25	9,03	4	2	4	236,75	12,58	4	2	4	88,25	7,27	4	2	4
H	FT	318,50	2,38	4	2	4	51,25	7,09	4	2	4	148,00	4,58	3	2	3	51,00	9,85	3	2	3	138,25	3,40	4	2	4	67,75	4,99	4	2	4
TF	FC	451,00	7,12	4	2	4	56,00	2,45	4	2	4	219,50	15,86	4	2	4	80,50	7,23	4	2	4	222,75	7,09	4	2	4	96,50	5,69	4	2	4
TF	FT	331,25	26,64	4	2	4	37,00	6,22	4	2	4	143,67	9,71	3	2	3	65,67	16,80	3	2	3	155,75	21,11	4	2	4	75,75	4,43	4	2	4
WF	FC	410,17	8,80	6	3	6	55,83	8,06	6	3	6	187,00	11,01	6	3	6	73,17	15,25	6	3	6	201,33	4,97	6	3	6	94,00	7,46	6	3	6
WF	FT	311,33	13,60	6	3	6	34,80	5,63	5	3	5	152,50	13,20	4	3	4	50,00	15,56	4	3	4	152,83	33,21	6	3	6	73,33	4,63	6	3	6
RW	FC	397,00	14,14	2	1	2	36,00	-	1	1	1	214,00	-	1	1	1	61,00	-	1	1	1	192,50	13,44	2	1	2	84,00	-	1	1	1

**Tab. II-B:** Messergebnisse (in  $\mu\text{m}$ ) zu den Eminenzen der Fovea centralis und Fovea temporalis der tagaktiven Greifvögel (Verwendung der Abkürzungen wie oben unter Anhang II angegeben).

### Eminenz Superior

Art	F	TRT	SD	n M	n T	n A	RNFL & GCL	SD	n M	n T	n A	IPL & INL	SD	n M	n T	n A	OPL- ELM	SD	n M	n T	n A	INL- ELM	SD	n M	n T	n A	ELM- RPE/ BM	SD	n M	n T	n A
MB	FC	448,86	19,59	14	9	14	46,07	4,98	14	9	14	235,92	31,96	13	8	13	70,38	18,60	13	8	13	239,50	14,18	14	9	14	97,79	5,56	14	9	14
MB	FT	338,80	7,86	10	7	10	40,20	6,27	10	7	10	161,17	26,95	6	5	6	63,67	18,81	6	5	6	153,00	11,16	10	7	10	77,90	5,43	10	7	10
SP	FC	390,50	0,71	2	2	2	41,00	1,41	2	2	2	160,50	61,52	2	2	2	111,00	57,98	2	2	2	204,50	6,36	2	2	2	75,50	3,54	2	2	2
SP	FT	307,00	-	1	1	1	46,00	-	1	1	1	100,00	-	1	1	1	88,00	-	1	1	1	127,00	-	1	1	1	66,00	-	1	1	1
H	FC	439,75	13,40	4	2	4	44,75	4,27	4	2	4	237,25	10,21	4	2	4	69,25	5,44	4	2	4	239,75	12,01	4	2	4	90,50	3,11	4	2	4
H	FT	325,50	7,14	4	2	4	49,25	5,91	4	2	4	157,00	9,13	4	2	4	48,75	5,74	4	2	4	139,50	5,07	4	2	4	71,00	2,31	4	2	4
TF	FC	454,00	18,97	4	2	4	52,25	3,50	4	2	4	231,00	3,61	3	2	3	77,33	13,05	3	2	3	240,00	16,27	4	2	4	92,00	2,94	4	2	4
TF	FT	338,50	22,65	4	2	4	42,75	6,45	4	2	4	157,00	4,58	3	2	3	61,00	9,17	3	2	3	158,50	21,49	4	2	4	74,25	4,57	4	2	4
WF	FC	412,00	5,66	2	1	2	49,50	2,12	2	1	2	203,00	-	1	1	1	68,00	-	1	1	1	217,50	0,71	2	1	2	94,50	2,12	2	1	2
WF	FT	318,50	17,68	2	2	2	46,00	4,24	2	2	2	174,00	-	1	1	1	34,00	-	1	1	1	138,50	21,92	2	2	2	76,50	0,71	2	2	2
RW	FC	377,50	0,71	2	1	2	40,00	2,83	2	1	2	208,50	7,78	2	1	2	57,50	4,95	2	1	2	182,50	4,95	2	1	2	77,50	6,36	2	1	2

### Eminenz Inferior

Art	F	TRT	SD	n M	n T	n A	RNFL & GCL	SD	n M	n T	n A	IPL & INL	SD	n M	n T	n A	OPL- ELM	SD	n M	n T	n A	INL- ELM	SD	n M	n T	n A	ELM- RPE/ BM	SD	n M	n T	n A
MB	FC	450,36	20,30	14	9	14	50,43	8,02	14	9	14	224,77	30,12	13	9	13	79,08	15,56	13	9	13	238,43	13,28	14	9	14	96,64	6,43	14	9	14
MB	FT	345,60	8,98	10	7	10	45,20	6,39	10	7	10	168,00	14,14	2	2	2	63,50	10,61	2	2	2	157,60	6,40	10	7	10	73,10	5,49	10	7	10
SP	FC	401,00	0,00	2	2	2	50,50	9,19	2	2	2	158,00	60,81	2	2	2	111,50	62,93	2	2	2	200,50	0,71	2	2	2	80,00	8,49	2	2	2
SP	FT	304,00	-	1	1	1	46,00	-	1	1	1	95,00	-	1	1	1	93,00	-	1	1	1	125,00	-	1	1	1	66,00	-	1	1	1
H	FC	447,25	10,87	4	2	4	52,50	7,14	4	2	4	240,00	14,47	4	2	4	69,50	11,15	4	2	4	228,50	16,42	4	2	4	88,50	4,12	4	2	4
H	FT	336,25	5,32	4	2	4	51,50	4,36	4	2	4	177,00	13,29	4	2	4	41,75	6,13	4	2	4	148,00	1,63	4	2	4	70,25	3,95	4	2	4
TF	FC	451,00	12,94	4	2	4	59,25	7,89	4	2	4	238,00	9,09	4	2	4	70,75	6,90	4	2	4	229,00	9,83	4	2	4	88,00	10,74	4	2	4
TF	FT	344,25	20,71	4	2	4	45,50	5,32	4	2	4	170,67	13,50	3	2	3	54,00	5,00	3	2	3	160,25	13,18	4	2	4	70,50	5,92	4	2	4
WF	FC	418,00	2,83	2	1	2	52,50	2,12	2	1	2	185,00	5,66	2	1	2	83,50	6,36	2	1	2	212,00	0,00	2	1	2	93,00	4,24	2	1	2
WF	FT	314,00	18,38	2	2	2	55,00	-	1	1	1	168,00	-	1	1	1	33,00	-	1	1	1	145,50	7,78	2	2	2	73,00	1,41	2	2	2
RW	FC	379,50	3,54	2	1	2	40,50	0,71	2	1	2	212,00	11,31	2	1	2	59,00	9,90	2	1	2	199,00	0,00	2	1	2	76,00	4,24	2	1	2

**Tab. II-B:** Messergebnisse (in  $\mu\text{m}$ ) zu den Eminenzen der Fovea centralis und Fovea temporalis der tagaktiven Greifvögel (Verwendung der Abkürzungen wie oben unter Anhang II angegeben).

### Eminenzen Nasal/Temporal

Art	F	TRT	SD	n M	n T	n A	RNFL & GCL	SD	n M	n T	n A	IPL & INL	SD	n M	n T	n A	OPL- ELM	SD	n M	n T	n A	INL- ELM	SD	n M	n T	n A	ELM- RPE/ BM	SD	n M	n T	n A
MB	FC	452,72	16,50	36	11	18	51,56	6,98	36	11	18	230,13	20,48	32	11	17	73,38	12,55	32	11	17	235,39	11,40	36	11	18	97,86	6,24	36	11	18
MB	FT	348,38	38,15	32	11	16	40,32	6,71	31	11	16	164,87	18,95	15	6	8	64,73	14,56	15	6	8	162,81	17,77	32	11	16	78,50	5,42	32	11	16
SP	FC	378,75	18,67	12	4	6	46,83	3,41	12	4	6	171,92	35,05	12	4	6	84,50	32,77	12	4	6	190,42	14,22	12	4	6	77,33	5,69	12	4	6
SP	FT	302,38	12,08	8	2	4	46,25	8,21	8	2	4	116,50	34,55	4	2	2	73,50	36,75	4	2	2	122,88	7,20	8	2	4	66,00	2,39	8	2	4
H	FC	445,13	13,01	8	2	4	52,75	4,83	8	2	4	230,00	7,03	8	2	4	76,13	6,56	8	2	4	235,50	11,51	8	2	4	88,50	6,26	8	2	4
H	FT	330,38	13,04	8	2	4	52,00	5,81	8	2	4	155,17	8,75	6	2	3	51,50	6,47	6	2	3	143,75	8,80	8	2	4	71,00	5,15	8	2	4
TF	FC	454,38	9,56	8	2	4	56,50	2,56	8	2	4	221,38	13,47	8	2	4	83,13	9,43	8	2	4	231,63	13,23	8	2	4	93,25	6,11	8	2	4
TF	FT	344,00	28,28	8	2	4	40,25	6,56	8	2	4	158,71	18,22	7	2	4	66,57	11,93	7	2	4	166,13	21,04	8	2	4	78,50	4,75	8	2	4
WF	FC	412,67	10,04	12	3	6	55,00	6,78	12	3	6	186,17	9,49	12	3	6	75,83	11,98	12	3	6	202,58	7,00	12	3	6	94,17	6,81	12	3	6
WF	FT	322,67	17,79	12	3	6	42,91	8,73	11	3	6	156,67	13,56	9	3	6	56,11	14,44	9	3	6	158,25	23,71	12	3	6	75,67	4,56	12	3	6
RW	FC	393,50	12,23	4	1	2	41,67	5,13	3	1	2	208,00	8,49	2	1	1	60,00	1,41	2	1	1	192,00	8,04	4	1	2	83,00	1,41	2	1	1

### Eminenzen Superior/Inferior

Art	F	TRT	SD	n M	n T	n A	RNFL & GCL	SD	n M	n T	n A	IPL & INL	SD	n M	n T	n A	OPL- ELM	SD	n M	n T	n A	INL- ELM	SD	n M	n T	n A	ELM- RPE/ BM	SD	n M	n T	n A
MB	FC	449,61	19,59	28	9	14	48,25	6,92	28	9	14	230,35	30,95	26	9	14	74,73	17,38	26	9	14	238,96	13,49	28	9	14	97,21	5,93	28	9	14
MB	FT	342,20	8,92	20	7	10	42,70	6,67	20	7	10	162,88	23,61	8	5	6	63,63	16,40	8	5	6	155,30	9,16	20	7	10	75,50	5,85	20	7	10
SP	FC	395,75	6,08	4	2	2	45,75	7,68	4	2	2	159,25	49,96	4	2	2	111,25	49,41	4	2	2	202,50	4,36	4	2	2	77,75	5,91	4	2	2
SP	FT	305,50	2,12	2	2	1	46,00	0,00	2	2	1	97,50	3,54	2	2	1	90,50	3,54	2	2	1	126,00	1,41	2	2	1	66,00	0,00	2	2	1
H	FC	443,50	11,99	8	2	4	48,63	6,84	8	2	4	238,63	11,69	8	2	4	69,38	8,12	8	2	4	234,13	14,61	8	2	4	89,50	3,55	8	2	4
H	FT	330,88	8,18	8	2	4	50,38	4,96	8	2	4	167,00	15,02	8	2	4	45,25	6,65	8	2	4	143,75	5,73	8	2	4	70,63	3,02	8	2	4
TF	FC	452,50	15,12	8	2	4	55,75	6,78	8	2	4	235,00	7,72	7	2	4	73,57	9,64	7	2	4	234,50	13,76	8	2	4	90,00	7,60	8	2	4
TF	FT	341,38	20,33	8	2	4	44,13	5,67	8	2	4	163,83	11,72	6	2	4	57,50	7,64	6	2	4	159,38	16,53	8	2	4	72,38	5,29	8	2	4
WF	FC	415,00	5,03	4	1	2	51,00	2,45	4	1	2	191,00	11,14	3	1	2	78,33	10,02	3	1	2	214,75	3,20	4	1	2	93,75	2,87	4	1	2
WF	FT	316,25	14,95	4	2	2	49,00	6,00	3	2	2	171,00	4,24	2	1	1	33,50	0,71	2	1	1	142,00	14,02	4	2	2	74,75	2,22	4	2	2
RW	FC	378,67	2,89	4	1	2	40,25	1,71	4	1	2	210,25	8,18	4	1	2	58,25	6,45	4	1	2	190,75	9,95	4	1	2	76,75	4,50	4	1	2

**Tab. II-C:** Messergebnisse (in  $\mu\text{m}$ ) zum Zwischenbereich der tagaktiven Greifvögel.  
(Verwendung der Abkürzungen wie oben unter Anhang II angegeben)

**Zwischenbereich**

Art	TRT	SD	n M	n T	n A	RNFL & GCL	SD	n M	n T	n A	IPL & INL	SD	n M	n T	n A	OPL- ELM	SD	n M	n T	n A	INL- ELM	SD	n M	n T	n A	ELM- RPE/ BM	SD	n M	n T	n A
MB	364,21	15,35	24	11	17	98,25	12,25	24	11	17	143,86	9,63	22	11	15	41,68	5,02	22	11	15	120,50	18,05	24	11	17	81,67	3,63	24	11	17
SP	323,00	4,58	3	3	3	110,00	16,64	3	3	3	115,00	11,36	3	3	3	30,33	3,06	3	3	3	88,67	7,23	3	3	3	66,33	3,51	3	3	3
H	355,25	16,26	4	2	4	110,75	12,47	4	2	4	137,25	11,18	4	2	4	38,75	7,04	4	2	4	108,25	19,96	4	2	4	69,75	1,50	4	2	4
TF	405,17	22,99	6	2	4	86,17	10,85	6	2	4	176,33	15,93	6	2	4	65,83	6,68	6	2	4	160,50	15,76	6	2	4	83,50	3,78	6	2	4
WF	329,50	5,92	4	2	3	80,00	3,27	4	2	3	130,00	9,97	4	2	3	46,25	9,22	4	2	3	138,25	39,36	4	2	3	78,25	3,50	4	2	3
RW	337,00	21,21	2	1	2	54,50	0,71	2	1	2	155,50	0,71	2	1	2	47,00	1,41	2	1	2	129,50	7,78	2	1	2	78,50	6,36	2	1	2

## Anhang III: Übersicht Schichtung zentrale Fovea

Aufgeführt werden die Anzahl der untersuchten Schnittbilder, die Häufigkeit des Auftretens der untersuchten Schicht in diesen Schnittbildern und das Vorhandensein der Schicht in Prozent ausgedrückt. Die Schichtung wurde am objektiv tiefsten Punkt der Fovea beschrieben. Konnte eine Schicht nicht eindeutig erkannt oder zugeordnet werden, wurde sie nicht in die Auswertung aufgenommen.

RNFL = retinale Nervenfaserschicht, GCL = Ganglienzellschicht, IPL = innere plexiforme Schicht, INL = innere Körnerschicht, OPL = äußere plexiforme Schicht, ELM = äußere Grenzmembran, IS/OS = Innensegment/Außensegment-Komplex der Fotorezeptoren, RPE/BM = retinales Pigmentepithel/Basalmembran

**Tab. III-A: Tagaktive Greifvögel, zentrale Foveaschichtung (Verwendung der Abkürzungen wie oben unter Anhang III angegeben)**

Mäusenbussard, Buteo, buteo						
Messbereich	Fovea Centralis			Fovea Temporalis		
	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl
RNFL	0	0	32	0	0	26
GCL	3,13	1	32	69,23	18	26
IPL	15,63	5	32	100	26	26
INL	100	32	32	100	26	26
OPL	100	32	32	100	26	26
ONL	100	32	32	100	26	26
ELM	100	32	32	100	26	26
IS/OS	100	31	31	100	26	26
RPE/BM	100	32	32	100	26	26

Sperber, Accipiter nisus						
Messbereich	Fovea Centralis			Fovea Temporalis		
	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl
RNFL	0	0	8	60	3	5
GCL	0	0	8	60	3	5
IPL	12,5	1	8	100	5	5
INL	87,5	7	8	100	5	5
OPL	100	7	7	100	5	5
ONL	100	7	7	100	5	5
ELM	100	8	8	100	5	5
IS/OS	100	8	8	100	5	5
RPE/BM	100	8	8	100	5	5
Habicht, Accipiter gentilis						
Messbereich	Fovea Centralis			Fovea Temporalis		
	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl
RNFL	0	0	8	14,29	1	7
GCL	0	0	8	100	8	8
IPL	25	2	8	100	8	8
INL	100	8	8	100	8	8
OPL	100	8	8	100	8	8
ONL	100	8	8	100	8	8
ELM	100	8	8	100	8	8
IS/OS	100	8	8	100	8	8
RPE/BM	100	8	8	100	8	8

Turmfalke, falco tinnunculus						
Messbereich	Fovea Centralis			Fovea Temporalis		
	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl
RNFL	0	0	8	0	0	8
GCL	0	0	8	50	4	8
IPL	12,5	1	8	100	8	8
INL	100	8	8	100	8	8
OPL	100	8	8	100	8	8
ONL	100	8	8	100	8	8
ELM	100	8	8	100	8	8
IS/OS	100	8	8	100	8	8
RPE/BM	100	8	8	100	8	8
Wanderfalke, Falco Peregrinus						
Messbereich	Fovea Centralis			Fovea Temporalis		
	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl
RNFL	0	0	8	0	0	8
GCL	12,5	1	8	14,29	1	7
IPL	12,5	1	8	100	8	8
INL	100	8	8	100	8	8
OPL	100	8	8	100	8	8
ONL	100	8	8	100	8	8
ELM	100	8	8	100	8	8
IS/OS	100	8	8	100	8	8
RPE/BM	100	8	8	100	8	8

Rohrweihe, <i>Circus aeruginosus</i>			
Messbereich	Fovea Centralis		
	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl
RNFL	0	0	4
GCL	0	0	4
IPL	75	3	4
INL	100	4	4
OPL	100	4	4
ONL	100	4	4
ELM	100	4	4
IS/OS	100	4	4
RPE/BM	100	4	4

Zur Fovea temporalis wurden bei diesem Patient keine Daten erhoben.

**Tab. III-B: Wespenbussard, zentrale Foveaschichtung (Verwendung der Abkürzungen wie oben unter Anhang III angegeben)**

Wespenbussard, <i>Pernis apivorus</i>			
Messbereich	Fovea Centralis		
	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl
RNFL	0	0	15
GCL	0	0	15
IPL	26,67	4	15
INL	100	15	15
OPL	100	15	15
ONL	100	15	15
ELM	-	-	-
IS/OS	-	-	-
RPE/BM	100	15	15

Die Schichten ELM und IS/OS konnten beim Wespenbussard weder abgegrenzt werden noch waren sie zuordenbar, da sie im Vergleich zu den sonstigen Greifvögeln sich völlig unterschiedlich darstellen.



**Tab. III-C: Eulen, zentrale Foveaschichtung (Verwendung der Abkürzungen wie oben unter Anhang III angegeben)**

Waldohreule, Asio otus			
Messbereich	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl
RNFL	0	0	15
GCL	28,57	4	14
IPL	100	15	15
INL	100	15	15
OPL	100	15	15
ONL	100	15	15
ELM	100	15	15
IS/OS	100	15	15
RPE/BM	100	15	15
Waldkauz, Strix aluco			
Messbereich	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl
RNFL	0	0	13
GCL	7,69	1	13
IPL	84,62	11	13
INL	100	13	13
OPL	100	13	13
ONL	100	13	13
ELM	100	13	13
IS/OS	100	13	13
RPE/BM	100	13	13
Uhu, Bubo bubo			
Messbereich	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl
RNFL	0	0	1
GCL	0	0	1
IPL	100	1	1
INL	100	1	1
OPL	100	1	1
ONL	100	1	1
ELM	100	1	1
IS/OS	100	1	1
RPE/BM	100	1	1

Raufußkauz, <i>Aegolius funereus</i>			
Messbereich	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl
RNFL	0	0	4
GCL	0	0	4
IPL	100	4	4
INL	100	4	4
OPL	100	4	4
ONL	100	3	3
ELM	100	4	4
IS/OS	100	4	4
RPE/BM	100	4	4
Steinkauz, <i>Athene noctua</i>			
Messbereich	Vorhandensein Schichten %	Vorhandensein Schichten	Anzahl
RNFL	0	0	2
GCL	0	0	2
IPL	50	1	2
INL	100	2	2
OPL	100	2	2
ONL	100	2	2
ELM	100	2	2
IS/OS	100	2	2
RPE/BM	100	2	2

## Anhang IV: Ergebnistabellen-Wespenbussard

Aufgeführt werden die Messergebnisse und die Standardabweichungen zu den untersuchten Parametern der Fovea centralis und des Zwischenbereichs des Wespenbussards. Aufgeführt sind außerdem die Anzahl der in die Auswertung einbezogenen Messungen, Tiere und untersuchten Augen.

SD	=	standard deviation/Standardabweichung
n M	=	Anzahl der einbezogenen Messungen insgesamt
n T	=	Anzahl der einbezogenen untersuchten Tiere
n A	=	Anzahl der einbezogenen untersuchten Augen
WB	=	Wespenbussard
CFT	=	central foveal thickness/zentrale Foveadicke
INL-ELM zentral	=	Dicke des Komplexes der inneren Körnerschicht bis zur äußeren Grenzmembran im Bereich der zentralen Fovea
Abstand N-T	=	Abstand der Eminenzen nasal bis temporal
Abstand S-I	=	Abstand der Eminenzen superior bis inferior
TRT	=	total retinal thickness/retinale Gesamtdicke
RNFL&GCL	=	retinale Nervenfaserschicht und Ganglienzellschicht
IPL&INL	=	innere plexiforme Schicht und innere Körnerschicht
IN-ELM	=	innere Körnerschicht bis äußere Grenzmembran

**Tab. IV-A:** Messergebnisse (in µm) zur Fovea centralis des Wespenbussards. Zentrale Fovea, Tiefe, Abstände der Eminenzen (Verwendung der Abkürzungen wie oben unter Anhang IV angegeben)

Art	F	CFT	SD	nM	nT	nA	INL-ELM zentral	SD	nM	nT	nA
WB	FC	193,33	19,50	15	5	9	184,33	13,59	15	5	9
		Tiefe	SD	nM	nT	nA	Abstand N-T	SD	nM	nT	nA
		211,71	17,66	14	5	8	804,11	72,72	9	5	9
							Abstand S-I	SD	nM	nT	nA
							777,33	74,58	6	4	6

**Tab. IV-B:** Messergebnisse (in µm) zu den Eminenzen der Fovea centralis des Wespenbussards. (Verwendung der Abkürzungen wie oben unter Anhang IV angegeben)

Eminenzen

Fc	TRT	SD	nM	nT	nA	RNFL& GCL	SD	nM	nT	nA	IPL& INL	SD	nM	nT	nA	INL-ELM	SD	nM	nT	nA
N	406,67	15,39	9	5	9	50,44	4,30	9	5	9	193,86	9,89	7	4	7	297,11	12,31	9	5	9
T	404,00	13,20	9	5	9	52,78	9,22	9	5	9	195,40	4,77	5	4	5	282,44	44,01	9	5	9
S	408,17	17,93	6	4	6	53,40	5,98	5	3	5	189,00	5,29	4	3	4	300,17	12,54	6	4	6
I	405,67	12,56	6	4	6	52,83	3,13	6	4	6	185,20	19,64	5	4	5	294,17	11,87	6	4	6
N/T	405,33	13,98	18	5	9	51,61	7,08	18	5	9	194,50	7,89	12	4	7	289,78	32,25	18	5	9
S/I	406,92	14,82	12	4	6	53,09	4,39	11	4	6	186,89	14,40	9	4	5	297,17	12,06	12	4	6

## Anhang V: Ergebnistabellen-Eulen

Aufgeführt werden die Messergebnisse und die Standardabweichungen zu den untersuchten Parametern der Fovea temporalis und des Zwischenbereichs der Eulen. Aufgeführt sind außerdem die Anzahl der in die Auswertung einbezogenen Messungen, Tiere und untersuchten Augen.

SD	=	standard deviation/Standardabweichung
n M	=	Anzahl der einbezogenen Messungen insgesamt
n T	=	Anzahl der einbezogenen untersuchten Tiere
n A	=	Anzahl der einbezogenen untersuchten Augen
WOE	=	Waldohreule
WK	=	Waldkauz
U	=	Uhu
Rfk	=	Raufußkauz
Stk	=	Steinkauz
CFT	=	central foveal thickness/zentrale Foveadicke
INL-ELM zentral	=	Dicke des Komplexes der inneren Körnerschicht bis zur äußeren Grenzmembran im Bereich der zentralen Fovea
ELM-RPE/BM	=	Dicke des Schichtkomplexes der äußeren Grenzmembran bis zum retinalen Pigmentepithel resp. der Basalmembran im zentralen Bereich der Fovea
Abstand N-T	=	Abstand der Eminenzen nasal bis temporal
Abstand S-I	=	Abstand der Eminenzen superior bis inferior
TRT	=	total retinal thickness/retinale Gesamtdicke
RNFL&GCL	=	retinale Nervenfaserschicht und Ganglienzellschicht
IPL&INL	=	innere plexiforme Schicht und innere Körnerschicht
OPL-ELM	=	äußere plexiforme Schicht bis zur äußeren Grenzmembran
IN-ELM	=	innere Körnerschicht bis äußere Grenzmembran
ELM-RPE/BM	=	äußere Grenzmembran bis unterhalb des retinalen Pigmentepithels/der Basalmembran

**Tab. V-A:** Messergebnisse (in µm) zur Fovea temporalis der Eulen. Zentrale Fovea, Tiefe, Abstände der Eminenzen (Verwendung der Abkürzungen wie oben unter Anhang V angegeben)

Zentrale Fovea

Art	CFT	SD	n M	n T	n A	INL-ELM zentral	SD	n M	n T	n A	ELM-RPE/ BM zentral	SD	n M	n T	n A
WOE	208,20	5,93	15	4	8	79,87	3,85	15	4	8	96,07	3,08	15	4	8
WK	229,23	14,31	13	5	9	91,54	7,16	13	5	9	112,23	7,00	13	5	9
U	223,00	-	1	1	1	74,00	-	1	1	1	140,00	-	1	1	1
Rfk	213,50	7,05	4	1	2	77,75	21,30	4	1	2	102,50	3,42	4	1	2
Stk	204,50	13,44	2	1	1	64,50	0,71	2	1	1	118,50	2,12	2	1	1

Tiefe und Abstände

Art	Tiefe	SD	n M	n T	n A	Abstand N-T	SD	n M	n T	n A	Abstand S-I	SD	n M	n T	n A
WOE	47,03	9,11	15	4	8	939,25	169,27	8	4	8	762,29	109,72	7	4	7
WK	73,77	14,39	13	5	9	694,89	116,12	9	5	9	767,75	120,54	4	2	4
U	100,50	-	1	1	1	527,00	-	1	1	1					
Rfk	64,38	4,42	4	1	2	773,00	149,91	2	1	2	754,50	187,38	2	1	2
Stk	141,50	16,97	2	1	1	697,00	-	1	1	1	574,00	-	1	1	1

**Tab. V-B: Messergebnisse (in µm) zu den Eminenzen der Fovea temporalis der Eulen**  
(Verwendung der Abkürzungen wie oben unter Anhang V angegeben)

**Eminenz Nasal**

Art	TRT	SD	n M	n T	n A	RNFL& GCL	SD	n M	n T	n A	IPL& INL	SD	n M	n T	n A	OPL- ELM	SD	n M	n T	n A	INL- ELM	SD	n M	n T	n A	ELM- RPE/ BM	SD	n M	n T	n A
WOE	255,88	4,88	8	4	8	36,88	4,73	8	4	8	78,63	10,11	8	4	8	48,63	5,26	8	4	8	98,88	5,87	8	4	8	90,25	4,53	8	4	8
WK	304,78	6,40	9	5	9	43,33	6,28	9	5	9	110,11	4,88	9	5	9	46,22	4,29	9	5	9	114,00	4,56	9	5	9	104,78	1,48	9	5	9
U	329,00	-	1	1	1	47,00	-	1	1	1	113,00	-	1	1	1	37,00	-	1	1	1	99,00	-	1	1	1	128,00	-	1	1	1
Rfk	281,00	5,66	2	1	2	36,50	0,71	2	1	2	87,50	3,54	2	1	2	59,50	4,95	2	1	2	109,00	12,73	2	1	2	94,50	3,54	2	1	2
Stk	346,00	-	1	1	1	43,00	-	1	1	1	146,00	-	1	1	1	40,00	-	1	1	1	146,00	-	1	1	1	110,00	-	1	1	1

**Eminenz Temporal**

Art	TRT	SD	n M	n T	n A	RNFL& GCL	SD	n M	n T	n A	IPL& INL	SD	n M	n T	n A	OPL- ELM	SD	n M	n T	n A	INL- ELM	SD	n M	n T	n A	ELM- RPE/ BM	SD	n M	n T	n A
WOE	254,00	4,99	8	4	8	31,38	1,30	8	4	8	82,00	6,39	8	4	8	49,25	5,23	8	4	8	97,63	5,18	8	4	8	90,25	5,09	8	4	8
WK	301,22	6,28	9	5	9	40,56	7,18	9	5	9	107,67	6,38	9	5	9	48,11	4,94	9	5	9	108,22	24,74	9	5	9	104,00	4,09	9	5	9
U	318,00	-	1	1	1	39,00	-	1	1	1	121,00	-	1	1	1	32,00	-	1	1	1	113,00	-	1	1	1	128,00	-	1	1	1
Rfk	271,00	11,31	2	1	2	34,50	2,12	2	1	2	83,50	9,19	2	1	2	55,00	1,41	2	1	2	105,00	0,00	2	1	2	96,50	2,12	2	1	2
Stk	341,00	-	1	1	1	38,00	-	1	1	1	149,00	-	1	1	1	40,00	-	1	1	1	136,00	-	1	1	1	106,00	-	1	1	1

**Eminenz Superior**

Art	TRT	SD	n M	n T	n A	RNFL& GCL	SD	n M	n T	n A	IPL& INL	SD	n M	n T	n A	OPL- ELM	SD	n M	n T	n A	INL- ELM	SD	n M	n T	n A	ELM- RPE/ BM	SD	n M	n T	n A
WOE	252,71	6,34	7	4	7	28,00	5,23	7	4	7	80,57	6,90	7	4	7	48,57	6,00	7	4	7	95,71	2,43	7	4	7	92,57	3,82	7	4	7
WK	302,00	2,16	4	2	4	40,25	4,92	4	2	4	110,00	1,41	4	2	4	47,75	4,92	4	2	4	113,00	3,74	4	2	4	102,25	4,92	4	2	4
U																														
Rfk	277,50	3,54	2	1	2	35,00	11,31	2	1	2	85,00	1,41	2	1	2	55,00	1,41	2	1	2	106,50	2,12	2	1	2	100,00	5,66	2	1	2
Stk	346,00	-	1	1	1	37,00	-	1	1	1	155,00	-	1	1	1	40,00	-	1	1	1	143,00	-	1	1	1	109,00	-	1	1	1

**Tab. V-B:** Messergebnisse (in  $\mu\text{m}$ ) zu den Eminenzen der Fovea temporalis der Eulen  
(Verwendung der Abkürzungen wie oben unter Anhang V angegeben)

### Eminenz Inferior

Art	TRT	SD	n M	n T	n A	RNFL& GCL	SD	n M	n T	n A	IPL& INL	SD	n M	n T	n A	OPL- ELM	SD	n M	n T	n A	INL- ELM	SD	ELM- RPE/ BM	n M	n T	n A
WOE	258,43	6,68	7	4	7	31,86	5,11	7	4	7	87,14	6,44	7	4	7	47,14	5,49	7	4	7	99,43	5,83	90,86	7	4	7
WK	304,00	4,69	4	2	4	40,25	7,72	4	2	4	113,00	8,25	4	2	4	48,25	4,79	4	2	4	112,75	3,86	100,25	4	2	4
U																										
Rfk	282,00	1,41	2	1	2	36,00	1,41	2	1	2	89,50	2,12	2	1	2	55,00	4,24	2	1	2	110,50	3,54	100,50	2	1	2
Stk	351,00	-	1	1	1	49,00	-	1	1	1	141,00	-	1	1	1	52,00	-	1	1	1	156,00	-	112,00	-	1	1

### Eminenzen Nasal/Temporal

Art	TRT	SD	n M	n T	n A	RNFL& GCL	SD	n M	n T	n A	IPL& INL	SD	n M	n T	n A	OPL- ELM	SD	n M	n T	n A	INL- ELM	SD	ELM- RPE/ BM	n M	n T	n A
WOE	254,94	4,86	16	4	8	34,13	4,40	16	4	8	80,31	8,36	16	4	8	48,94	5,08	16	4	8	98,25	5,39	90,25	16	4	8
WK	303,00	6,42	18	5	9	41,94	6,70	18	5	9	108,89	5,66	18	5	9	47,17	4,59	18	5	9	111,11	17,51	104,39	18	5	9
U	323,50	7,78	2	1	1	43,00	5,66	2	1	1	117,00	5,66	2	1	1	34,50	3,54	2	1	1	106,00	9,90	128,00	2	1	1
Rfk	276,00	9,31	4	1	2	35,50	1,73	4	1	2	85,50	6,14	4	1	2	57,25	3,95	4	1	2	107,00	7,70	95,50	4	1	2
Stk	343,50	3,54	2	1	1	40,50	3,54	2	1	1	147,50	2,12	2	1	1	40,00	0,00	2	1	1	141,00	7,07	108,00	2	1	1

### Eminenzen Superior/Inferior

Art	TRT	SD	n M	n T	n A	RNFL& GCL	SD	n M	n T	n A	IPL& INL	SD	n M	n T	n A	OPL- ELM	SD	n M	n T	n A	INL- ELM	SD	ELM- RPE/ BM	n M	n T	n A
WOE	255,57	6,93	14	4	7	29,93	5,36	14	4	7	83,86	7,26	14	4	7	47,86	5,57	14	4	7	97,57	4,70	91,71	14	4	7
WK	303,00	3,55	8	2	4	40,25	5,99	8	2	4	111,50	5,71	8	2	4	48,00	4,50	8	2	4	112,88	3,52	101,25	8	2	4
U																										
Rfk	279,75	3,40	4	1	2	35,50	6,61	4	1	2	87,25	2,99	4	1	2	55,00	2,58	4	1	2	108,50	3,32	100,25	4	1	2
Stk	348,50	3,54	2	1	1	43,00	8,49	2	1	1	148,00	9,90	2	1	1	46,00	8,49	2	1	1	149,50	9,19	110,50	2	1	1



**Tab. V-C:** Messergebnisse (in  $\mu\text{m}$ ) zum Zwischenbereich der Eulen  
(Verwendung der Abkürzungen wie oben unter Anhang V angegeben).

**Zwischenbereich**

Art	TRT	SD	n M	n T	n A	RNFL& GCL	SD	n M	n T	n A	IPL& INL	SD	n M	n T	n A	OPL- ELM	SD	n M	n T	n A	INL- ELM	SD	n M	n T	n A	ELM- RPE/ BIM	SD	n M	n T	n A
WOE	248,89	8,22	9	4	7	54,67	8,11	9	4	7	64,44	7,86	9	4	7	45,11	6,15	9	4	7	81,22	2,54	9	4	7	84,33	3,57	9	4	7
WK	288,25	25,63	8	4	5	80,25	9,30	8	4	5	81,38	8,42	8	4	5	39,88	9,23	8	4	5	93,38	38,04	8	4	5	93,63	5,73	8	4	5
U	338,00	-	1	1	1	58,00	-	1	1	1	109,00	-	1	1	1	46,00	-	1	1	1	105,00	-	1	1	1	126,00	-	1	1	1
Rfk	287,00	-	1	1	1	102,00	-	1	1	1	69,00	-	1	1	1	31,00	-	1	1	1	79,00	-	1	1	1	87,00	-	1	1	1
Stk	315,00	-	1	1	1	59,00	-	1	1	1	105,00	-	1	1	1	38,00	-	1	1	1	102,00	-	1	1	1	117,00	-	1	1	1

**XI. ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

<b>Abbildung 1:</b> Orbitae der Eule .....	4
<b>Abbildung 2:</b> Bulbusformen beim Vogel .....	6
<b>Abbildung 3:</b> Neuronen der Reizweiterleitung .....	13
<b>Abbildung 4:</b> Foveatypen .....	21
<b>Abbildung 5:</b> Anordnung der Foveae im Auge eines Greiffvogels .....	23
<b>Abbildung 6:</b> Visuelle Trident .....	25
<b>Abbildung 7:</b> Typen des pecten oculi .....	27
<b>Abbildung 8:</b> Darstellung der Augenachsen .....	28
<b>Abbildung 9:</b> OCT-Einheit mit Kamera .....	35
<b>Abbildung 10:</b> Ausrichten der Kamera auf das Auge eines Raufußkauzes .....	35
<b>Abbildung 11:</b> Grundprinzip der OCT-Funktionsweise .....	37
<b>Abbildung 12:</b> Schema des B-Scans .....	38
<b>Abbildung 13:</b> Schema der dreidimensionalen Datenakquisition .....	41
<b>Abbildung 14:</b> Schema der TD-OCT eines OCT C-Scans .....	42
<b>Abbildung 15:</b> Zuordnung der im OCT sichtbaren Linien zu den Strukturen der Netzhaut .....	59
<b>Abbildung 16:</b> Fundusansicht der Messbereiche bei einem Habicht .....	81
<b>Abbildung 17:</b> Darstellung einer OCT-Aufnahme .....	92
<b>Abbildung 18:</b> OCT-Tomogramm (B-Scan) einer physiologischen F. centralis .....	93
<b>Abbildung 19:</b> Beispiel der vermessenen Schichtkomplexe .....	94
<b>Abbildung 20:</b> Bildertafel, tagaktive Greifvögel .....	98
<b>Abbildung 21:</b> Darstellung der Tiefe und der Abstände der Eminenzen der Fovea centralis und der Fovea temporalis der tagaktiven Greifvögel .....	100
<b>Abbildung 22:</b> Darstellung der vermessenen Schichten in der zentralen Fovea centralis und in der Fovea temporalis der tagaktiven Greifvögel .....	101
<b>Abbildung 23:</b> Darstellung der vermessenen Schichten im Bereich der Eminenzen nasal und temporal der Fovea centralis und der Fovea temporalis der tagaktiven Greifvögel .....	104
<b>Abbildung 24:</b> Darstellung der vermessenen Schichten im Bereich der Eminenzen superior und inferior der Fovea centralis und der F. temporalis der tagaktiven Greifvögel .....	105
<b>Abbildung 25:</b> Darstellung der vermessenen Schichten in der zentralen Fovea centralis und im Bereich der Eminenzen, der Tiefe und der Abstände der Eminenzen der F. centralis des Wespenbussards .....	108
<b>Abbildung 26:</b> Schematische Übersicht der Morphologie der F. centralis .....	112
<b>Abbildung 27:</b> Schematische Übersicht der Morphologie der F. temporalis ..	113

---

<b>Abbildung 28:</b> Darstellung der vermessenen Schichten im retinalen Zwischenbereich der tagaktiven Greifvögel .....	116
<b>Abbildung 29:</b> Bildertafel, nachtaktive Greifvögel.....	120
<b>Abbildung 30:</b> Darstellung der Tiefe und der Abstände der Eminenzen der Fovea temporalis der nachtaktiven Greifvögel.....	122
<b>Abbildung 31:</b> Darstellung der vermessenen Schichten in der zentralen Fovea temporalis der nachtaktiven Greifvögel.....	123
<b>Abbildung 32:</b> Darstellung der vermessenen Schichten im Bereich der Eminenzen nasal und temporal der Fovea temporalis der nachtaktiven Greifvögel.....	125
<b>Abbildung 33:</b> Darstellung der vermessenen Schichten im Bereich der Eminenzen superior und inferior der Fovea temporalis. ....	126
<b>Abbildung 34:</b> Schematische Übersicht der Morphologie der F. temporalis ...	127
<b>Abbildung 35:</b> Darstellung der vermessenen Schichten im retinalen Zwischenbereich der nachtaktiven Greifvögel. ....	129
<b>Abbildung A- 1:</b> Ausfaltblatt. Vermessene Schichtkomplexe und Zuordnung der Schichten im OCT-Tomogramm. ....	192

## XII. TABELLENVERZEICHNIS

<b>Tabelle 1:</b> Übersicht der mittels Optischer Kohärenztomografie untersuchten Greifvogelpatienten und Artenverteilung.....	65
<b>Tabelle 2:</b> Ergebnisse von Ophthalmoskopie, Sonografie, Pupillometrie&OCT.	87
<b>Tabelle 3:</b> Übersicht des durchschnittlichen Augeninnendrucks .....	89
<b>Tab. II-A:</b> Messergebnisse (in $\mu\text{m}$ ) zur Fovea centralis und Fovea temporalis der tagaktiven Greifvögel.).....	194
<b>Tab. II-B:</b> Messergebnisse (in $\mu\text{m}$ ) zu den Eminenzen der Fovea centralis und Fovea temporalis der tagaktiven Greifvögel.....	195
<b>Tab. II-C:</b> Messergebnisse (in $\mu\text{m}$ ) zum Zwischenbereich der tagaktiven Greifvögel.....	198
<b>Tab. III- A:</b> Tagaktive Greifvögel, zentrale Foveaschichtung .....	199
<b>Tab. III- B:</b> Wespenbussard, zentrale Foveaschichtung.....	202
<b>Tab. III- C:</b> Eulen, zentrale Foveaschichtung .....	203
<b>Tab. IV- A:</b> Messergebnisse (in $\mu\text{m}$ ) zur Fovea centralis des Wespenbussards .....	206
<b>Tab. IV- B:</b> Messergebnisse (in $\mu\text{m}$ ) zu den Eminenzen der Fovea centralis des Wespenbussards.....	206
<b>Tab. V- A:</b> Messergebnisse (in $\mu\text{m}$ ) zur Fovea temporalis der Eulen. ....	208
<b>Tab. V- B:</b> Messergebnisse (in $\mu\text{m}$ ) zu den Eminenzen der Fovea temporalis der Eulen .....	209
<b>Tab. V- C:</b> Messergebnisse (in $\mu\text{m}$ ) zum Zwischenbereich der Eule.....	211

### **XIII. DANKSAGUNG**

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. R. Korbel für die Überlassung dieses spannenden Themas und die Betreuung der Dissertation bedanken. Dieser Dank gilt insbesondere auch Frau PD. Dr. M. Rinder für die immer währende Unterstützung, Geduld und Beratung zur Umsetzung dieser Arbeit. Danke für deine Hilfe und deine Betreuung!

Insbesondere möchte ich mich bei meiner Kollegin und Freundin „May“ Velasco Gallego für die gemeinsame Zeit, das Motivieren und die Durchführung unserer beiden Dissertationen bedanken. Danke für's Zuhören und Probleme lösen! Du warst eine große Stütze und bist eine tolle Freundin, die mir viel Kraft geschenkt hat! All den lieben Menschen des (ehemaligen) Teams der Vogelklinik, die mir tatkräftig zur Seite standen, gilt ebenfalls mein großer Dank: S. Kallähn, C. Högemann, A. Peschel, K. Moser, M. Rzepka und N. Schmidt. Weiterhin ein großes Dankeschön dem Team der Neuroanatomischen Anstalt der LMU München: Prof. Dr. Christoph Schmitz, Beate Aschauer und Astrid Baltruschat, Nicholas Angstman und insbesondere Frau Dr. Maren Kiessling. Danke für deine immer gute Laune und die Unterstützung bis zum Schluss! Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Minh An Le und Frau Dr. Deffner vom STABLAB der LMU München für die Beratung bei der Auswertung und das Gestalten der plots. Ein ganz großes Dankeschön gilt meinen beiden (ehemaligen) Kolleginnen des TÜZ Tenniken, Dr. Martina Gerber und Kirsten Wilbers. Danke für's Mitfiebern und für's Rücken frei halten, vor allem in der Endphase dieser Arbeit. Ihr seid wunderbar! Dankeschön auch an Dr. Sandro Hinden für die Hilfe bei der spanischen Übersetzung. Ein großer Dank geht an Guido Coenen, GC Digitaldruck, für die kurzfristige Druckaktion und die Unterstützung!

Zu guter Letzt gilt mein tiefer, aufrichtiger Dank meiner Familie und meinen Freunden, die mich durchgehend während des Studiums und vor allem in der Phase der Anfertigung dieser Dissertation ausgehalten, motiviert, gestützt und mir die Treue gehalten haben. Lea, du bist eine großartige und so wertvolle Freundin! Danke für deinen Glauben an mich, deine Freundschaft, deine Unterstützung und die Hilfsbereitschaft zu allen Zeiten und in allen Lebenslagen, vor allem auch in dieser Arbeit!

Und zum Schluss: Basti, Danke - für all die letzten anstrengenden Jahre, die du mit mir zusammen durchgestanden und gemeistert hast, mit viel Geduld, Liebe und vor allem viel Verständnis. Danke für all die Kraft und den Zuspruch, den du mir hast zukommen lassen. Ohne dich wäre diese Arbeit unmöglich gewesen!