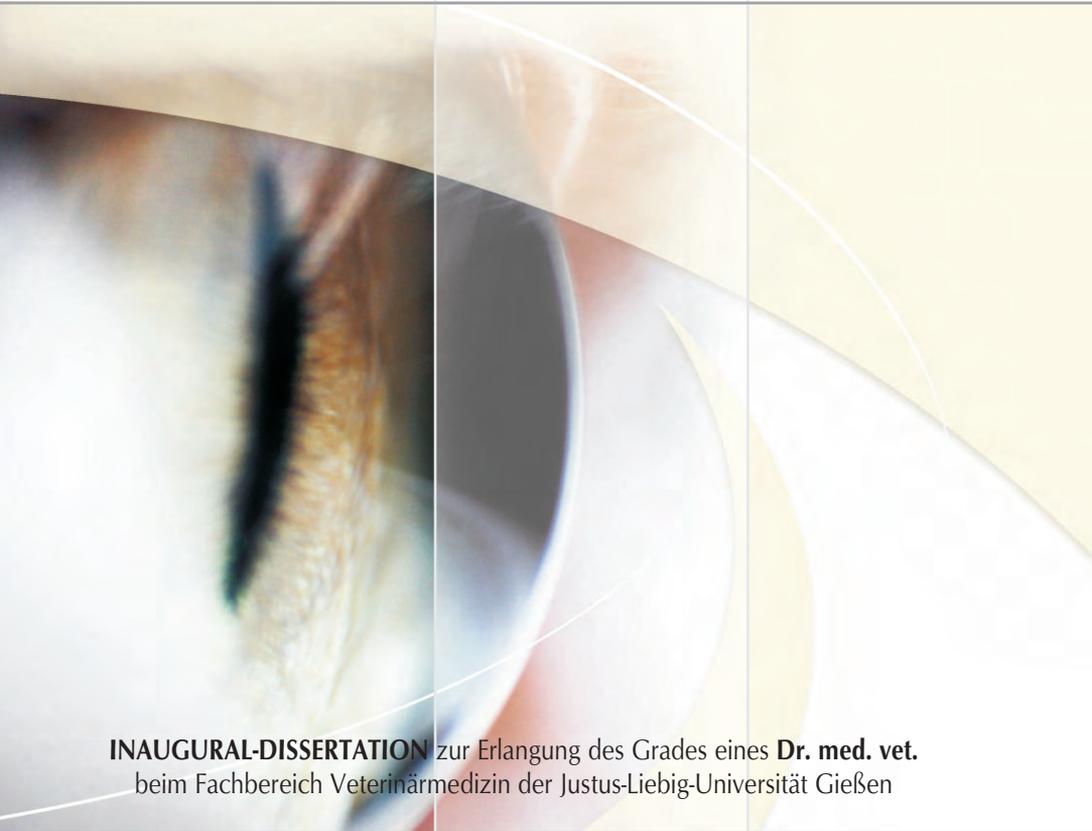


Statistische Kennwerte der Bulbuslänge
und der einzelnen Teilabschnitte des Katzenauges
unter Berücksichtigung der Faktoren
Rasse, Geschlecht, Gewicht und Intraokulardruck
mit Hilfe des A-Modus Ultraschallverfahrens

Birgit Koerschgen



INAUGURAL-DISSERTATION zur Erlangung des Grades eines **Dr. med. vet.**
beim Fachbereich Veterinärmedizin der Justus-Liebig-Universität Gießen



édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung ist ohne schriftliche Zustimmung des Autors oder des Verlages unzulässig. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in und Verarbeitung durch elektronische Systeme.

1. Auflage 2010

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the Author or the Publishers.

1st Edition 2010

© 2010 by VVB LAUFERSWEILER VERLAG, Giessen
Printed in Germany



édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

STAUFENBERGRING 15, D-35396 GIESSEN
Tel: 0641-5599888 Fax: 0641-5599890
email: redaktion@doktorverlag.de

www.doktorverlag.de

Aus dem
Klinikum Veterinärmedizin
Klinik für Kleintiere, Chirurgie
der Justus-Liebig-Universität Gießen
Betreuer: Prof. Dr. Martin Kramer

**Statistische Kennwerte der Bulbuslänge
und der einzelnen Teilabschnitte des Katzenauges
unter Berücksichtigung der Faktoren
Rasse, Geschlecht, Gewicht und Intraokulardruck
mit Hilfe des A-Modus Ultraschallverfahrens**

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung des Grades eines
Dr. med. vet.
beim Fachbereich Veterinärmedizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

eingereicht von

Birgit Koerschgen

Tierärztin aus Düren

Gießen 2010

**Mit Genehmigung des Fachbereichs Veterinärmedizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen**

Dekan

Prof. Dr. Dr. habil. Georg Baljer

Gutachter

Prof. Dr. Martin Kramer

Prof. Dr. Dr. Stefan Arnhold

Tag der Disputation

24.06.2010

Für meine Eltern

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Literaturübersicht	2
2.1	Geschichtlicher Überblick.....	2
2.2	Das A-Modus-Ultraschallverfahren am menschlichen Auge.....	5
2.2.1	Anatomische Biometrie.....	5
2.2.2	Funktionelle Biometrie.....	11
2.2.3	Biometrie am pathologisch veränderten Auge.....	18
2.3	Das A-Modus-Ultraschallverfahren am Tierauge	26
2.3.1	Anatomische Biometrie.....	26
2.3.2	Funktionelle Biometrie.....	31
2.3.3	Biometrie am pathologisch veränderten Auge.....	35
2.4	Das A-Modus-Ultraschallverfahren am Katzenauge	40
2.4.1	Anatomische Biometrie.....	40
2.4.2	Funktionelle Biometrie.....	42
2.4.3	Biometrie am pathologisch veränderten Auge.....	45
2.5	Physik des Ultraschalls.....	50
2.5.1	Grundlagen des Ultraschalls.....	50
2.6	Ultraschallverfahren	57
2.6.1	A-Modus-Verfahren	57
2.6.2	B-Modus-Verfahren	59
2.6.3	M-Modus-Verfahren	60
3	Material und Methoden	61
3.1	Technische Voraussetzungen	61
3.1.1	Das Ultraschallgerät	61
3.2	Patientendaten	63
3.3	Klinische Untersuchung	64
3.4	Durchführung der Messungen.....	65

3.5	Eigene Messungen.....	66
3.6	Patientengut.....	67
3.6.1	Altersverteilung.....	67
3.6.2	Geschlechtsverteilung.....	68
3.6.3	Gewichtsverteilung.....	69
3.6.4	Rasseverteilung.....	69
3.7	Statistische Auswertung.....	72
4	Ergebnisse.....	73
4.1	Einfluss des Wachstums auf die biometrischen Daten.....	73
4.2	Einfluss der Rasse auf die biometrischen Daten.....	84
4.3	Einfluss der Augenseite auf die biometrischen Daten.....	96
4.4	Einfluss des Geschlechts auf die biometrischen Daten.....	98
4.5	Einfluss der Größe und des Gewichts auf die biometrischen Daten.....	99
4.6	Einfluss des Intraokulardrucks auf die biometrischen Daten.....	102
5	Diskussion.....	103
5.1	Einfluss des Wachstums auf die biometrischen Daten.....	103
5.2	Einfluss der Rasse auf die biometrischen Daten.....	107
5.3	Einfluss der Augenseite auf die biometrischen Daten.....	110
5.4	Einfluss des Geschlechts auf die biometrischen Daten.....	111
5.5	Einfluss der Größe und des Gewichts auf die biometrischen Daten.....	112
5.6	Einfluss des Intraokulardrucks auf die biometrischen Daten.....	114
5.7	Einfluss der Refraktion auf die biometrischen Daten.....	116
6	Zusammenfassung.....	118
7	Summary.....	121
8	Literaturverzeichnis.....	124
9	Danksagung.....	152

Abkürzungsverzeichnis

α	Signifikanzniveau
α	Ausbreitungswinkel der Schallwelle
μm	Mikrometer
A	Schallwellenamplitude
A	mittlerer Anstieg nach der Geburt bis zum mittleren Endwert
A_0	Ausgangswert der Schallwellenamplitude
Acta Ophthalmol	Acta Ophthalmologica
Acta Soc Ophthal Jap	Japanese Journal of Clinical Ophthalmology
Akad AvH	Akademi Alexander-von-Humboldt
A-Konstante	Konstante, die vom Hersteller von Intraokularlinsen angegeben wird und die vom Material und der Brechkraft der Linse abhängig ist
Am J Clin Nutr	The American Journal of Clinical Nutrition
Am J Obstet Gynecol	American Journal of Obstetrics & Gynecology
Am J Ophthalmol	American Journal of Ophthalmology
Am J Physiol	The American Journal of Physiology
Am J Vet Res	American Journal of Veterinary Research
A-Modus	Amplituden-modulierter Modus
Anatom Hefte	Anatomische Hefte
Ann Ophthalmol	Annals of Ophthalmology
Arch Ophthal	Archives of Ophthalmology
Augenärztl Fortbild	Augenärztliche Fortbildung
Aust Vet J	Australian Veterinary Journal
A_x	axiale Bulbuslänge
b	logarithmischer Steigungskoeffizient
b	Regressionskoeffizient
Biochem Biophys Res Commun	Biochemical and Biophysical Research Communications
B-Modus	Brightness-Modus
BMC Ophthalmol	Biomed Central Ophthalmology
Br J Ophthalmol	The British Journal of Ophthalmology
BSAVA	British Small Animal Veterinary Association
Bull Soc Belge Ophtal	Bulletin de la Société Belge d'Ophtalmologie

bzw.	beziehungsweise
C	postoperative Vorderkammertiefe
c	Schallgeschwindigkeit
Can J Ophthalmol	Canadian Journal of Ophthalmology
Can Vet J	Canadian Veterinary Journal
Clin Experiment Ophthalmol	Clinical & Experimental Ophthalmology
Clin Tech Small Anim Pract	Clinical Techniques in Small Animal Practice
cm	Zentimeter
cos	Cosinus
D	Dioptrie
d.h.	das heißt
dB	Dezibel
Doc Ophthalmol	Documenta Ophthalmologica
Doc Ophthalmol Proc Ser	Documenta Ophthalmologica. Proceeding Series
Dtsch Ophthal Ges	Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft
E	mittlerer Endwert der Messungen
e	Kompressionsfähigkeit
e	Euler'sche Zahl
EKH	Europäisch Kurzhaar
ε	Zufallsabweichung
et al.	et alii/et aliae
exp	Exponentialfunktion
f	Frequenz
Graefe's Arch Ophthal	Von Graefe's Archiv für Ophthalmologie
Hz	Hertz
Int Ophthalmol Clin	International Ophthalmology Clinics
Invest Ophthalmol Vis Sci	Investigative Ophthalmology & Visual Science
IOP	Intraocular pressure
J Am Vet Med Assoc	Journal of the American Veterinary Medical Association
J Cataract Refract Surg	Journal of Cataract and Refractive Surgery
J Comp Physiol A	Journal of Comparative Physiology
J Feline Med Surg	Journal of Feline Medicine and Surgery
J Fr Ophthalmol	Journal Francais d'Ophthalmologie
J Glaucoma	Journal of Glaucoma

K	Korneale Krümmung
kg	Kilogramm
KM	Körpermasse
kHz	Kilohertz
Klin Mbl Augenheilk	Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde
L	axiale Bulbuslänge
Lab Anim Sci	Laboratory Animal Science
<i>m</i>	Meter
m	männlich
Mem Acad Roy Sci	Memoirs of the Royal Academy of Sciences
Metab Pediatr Syst Ophthalmol	Metabolic, Pediatric and Systemic Ophthalmology
Mhz	Megahertz
mm	Millimeter
mmHg	Millimeter-Quecksilbersäule
M-Modus	Motion-Modus
Mod Vet Practice	Modern Veterinary Practice
N	refraktiver Index des Kammerwassers und Glaskörpers
n	Stichprobenumfang
N Z Vet J	New Zealand Veterinary Journal
nm	Nanometer
Ophthal Physiol Opt	Ophthalmic Physiology and Optics
Ophthalmic rev	Ophthalmic Review
Ophthalmic Surg	Ophthalmic Surgery
Optom Vis Sci	Optometry and Vision Science: official publication of the American Academy of Optometry
<i>p</i>	Dichte
p	p-Wert (Überschreitungswahrscheinlichkeit)
P	zur Emmetropisation benötigte Dioptrienzahl
PCI	partielle teilkohärente Interferometrie
r	Radius der Korneaoberfläche
<i>r</i>	Korrelationskoeffizient
R	Reflektionsfaktor
Res Vet Sci	Research in Veterinary Science
Roy Lond Ophthal Hosp Rep	Royal London Ophthalmic Hospital Reports
s	Standardabweichung

<i>s</i>	Sekunde
s	Wegstrecke
β	Absorptionskoeffizient
<i>t</i>	Laufzeit
Trans Am Ophthalmol Soc	Transactions of the American Ophthalmological Society
Tr Ophthal Soc UK	Transactions of the Ophthalmological Societies of the United Kingdom
Ultrasound in Med & Biol	Ultrasound in Medicine & Biology
UV-Licht	ultraviolettes Licht
<i>v</i>	Ausbreitungsgeschwindigkeit
Vet Clin North Am Small Anim Pract	The Veterinary Clinics of North America. Small Animal Practice
Vet Ophthalmol	Veterinary Ophthalmology
Vet Pathol	Veterinary Pathology
Vet Radiol Ultrasound	Veterinary Radiology & Ultrasound
Vet Rec	The Veterinary Record
Vision Res	Vision Research
VK	Vorderkammer
<i>w</i>	Alter in Wochen
<i>w</i>	weiblich
Wiss Z Ernst Moritz Arndt Univ	Wissenschaftliche Zeitschrift der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald
Wiss Z Humboldt-Univ	Wissenschaftliche Zeitung der Humboldt-Universität zu Berlin
<i>x</i>	Messgröße
<i>x</i>	Alter in Monaten
X	Alter in Wochen
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert
x_{\max}	Maxima
x_{\min}	Minima
Y	Messgröße
<i>Y</i>	axiale Bulbuslänge
<i>z</i>	akustische Impedanz
z.B.	zum Beispiel
λ	Wellenlänge
χ	Dichte

1 Einleitung

Die sonographische Untersuchung des Auges ist seit ihrer Entwicklung und Etablierung die am weitesten verbreitete Methode zur biometrischen Vermessung des Auges und seiner einzelnen Abschnitte. Die relativ einfache Durchführbarkeit, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit am lebenden Patienten und intakten Auge und die Möglichkeit, Untersuchungen wiederholt ohne Schäden am Organ vornehmen zu können, machen diese Methode zu einer Standardmethode der Augenuntersuchung. Während für die klinische Diagnostik aufgrund des zweidimensionalen Bildes und der besseren Interpretationsmöglichkeit in der Regel auf den B-Modus zurückgegriffen wird, werden Vermessungen der Augenabschnitte mit dem exakt ablesbaren A-Modus-Verfahren durchgeführt. Bei diesem eindimensionalen Ultraschallbild kann das Ablesen der Distanzen automatisch durch den Computer erfolgen. Berechnungen der Bulbuslänge und der einzelnen Abschnitte des Auges sind bei verschiedenen Fragestellungen indiziert. Die präoperative Berechnung der Teilstrecken des Auges ist unumgänglich, um bei Kataraktoperationen Kunstlinsen einzusetzen, die einen guten postoperativen Visus ermöglichen. Während in der Humanmedizin diese Messungen stets individuell vor einer Operation erfolgen, beschränkt sich die Veterinärmedizin in der Regel auf Erkenntnisse aus Durchschnittsmessungen.

Erkrankungen, die mit Veränderungen der Teilstrecken des Auges einhergehen, wie zum Beispiel Mikrophthalmie, Glaukom oder Phthisis bulbi, können oft nur anhand dieser exakten Messungen diagnostiziert werden. Dabei kann das gesunde Auge als Vergleichsobjekt dienen. Für Fälle, in denen beide Augen betroffen sind oder zumindest der Verdacht nahe liegt, ist es notwendig, Messdaten eines Patienten mit vergleichbaren Kriterien, wie Alter, Geschlecht und Rasse heranzuziehen, um eine Einschätzung als pathologisch oder physiologisch zu ermöglichen.

Ziel dieser Arbeit ist es mit Hilfe des A-Modus-Ultraschallverfahrens statistische Kennwerte der Bulbuslänge und der einzelnen Teilabschnitte des Auges bei der Katze zu ermitteln. Dabei wird über eine Wachstumskurve zunächst ermittelt, ab welchem Alter das Katzenauge ausgewachsen ist. Neben der Abhängigkeit vom Alter der Tiere wird der Einfluss der qualitativen Faktoren Rasse und Geschlecht und der quantitativen Faktoren Gewicht und Intraokulardruck untersucht. Außerdem wird der Zusammenhang zwischen der Größe der einzelnen Teilstrecken und der gesamten Länge des Auges analysiert.

2 Literaturübersicht

2.1 Geschichtlicher Überblick

Humanmedizin

Schon im frühen 18. Jahrhundert wird versucht, intraokulare Distanzen mit verschiedenen Hilfsmitteln zu vermessen. Pourfour du Petit (1723) ist einer der ersten, der mit mechanischen Geräten arbeitet. Auch andere anatomische Messungen, die von Wissenschaftlern wie Von Jaeger (1861), Collins (1890), Merkel und Orr (1892), Von Hippel (1898), Von Pflügh (1909) oder Smith (1912) durchgeführt werden, ergeben erste Anhaltspunkte für die Dimensionen des menschlichen Auges.

Allen diesen Vermessungen ist gemein, dass sie post mortem durchgeführt werden und die untersuchten Bulbi damit schon Veränderungen unterlegen sind. Erst Messungen mit optischen Methoden, wie sie durch Von Helmholtz (1866) durchgeführt werden, erlauben es, das menschliche Auge in vivo zu untersuchen. Seine Ergebnisse stimmen mit denen vieler anatomischer Studien überein (Stadtfeldt 1898, Awerbach 1900, Saunte 1905, Zeeman 1911). Nachdem 1938 Rushton die Bulbuslänge mittels Röntgenstrahlen vermisst, kommt 1940 mit dem photographischen Verfahren ein weiteres bildgebendes Verfahren zum Einsatz. Goldmann (1940, 1941) und Heim (1941) kalkulieren mit dieser Methode die Vorderkammertiefe. Mundt und Hughes wenden 1956 zum ersten Mal Ultraschall für diagnostische Zwecke an Augen an und benutzen das so genannte A-Modus-Verfahren. Mit dieser Methode sind sie in der Lage, Distanzen des Auges bis auf 1 bis 2 mm Genauigkeit zu vermessen. Die Bedeutung des Ultraschalls für die Ophthalmologie steigt schnell, da das Verfahren verhältnismäßig einfach und schnell in der Anwendung, ohne Nebenwirkung wiederholt am Patienten anwendbar und vor allem von hoher Genauigkeit ist. Die Ultraschall-Vermessung erlaubt es erstmals, alle Abstände im Auge gleichzeitig zu vermessen (Nover und Grote 1965). Oksala und Varonen (1964) wenden das Verfahren seit 1959 systematisch in der Diagnostik an und Yamamoto et al. (1960) erheben erste Vermessungen der axialen Bulbuslänge mit dieser neuen Methode. Vor allem durch Buschmann (1963) und Ossoinig (1969) kommt es zu entscheidenden Verbesserungen und Weiterentwicklungen der Geräte und der Methodik. Coleman (1969) bezeichnet das A-Modus-Verfahren als das Mittel der Wahl zur Bestimmung der axialen Dimensionen.

Er sieht die Bedeutung des A-Modus vor allem unter folgenden Gesichtspunkten:

1. Basis-Untersuchungen der Population um durchschnittliche Messungen verschiedener Alterklassen zu dokumentieren
2. Vergleiche der Veränderungen in axialen Dimensionen bei Refraktionsfehlern, wie Myopie
3. Vergleiche der axialen Dimensionen mit optischem Messgeräten, d.h. Emmetropisations-Analyse oder Studien der Aniseikonie bei Strabismus oder Messungen der physiologischen Linsenveränderungen bei der Akkommodation
4. Bestimmung der optischen Ansprüche für Keratoprothesen oder Intraokularlinsen
5. Analyse der Linsendicke und Vorderkammer beim Glaukom

Auch beschreibt er die Bedeutung des B-Modus für die zweidimensionale Orientierung am Auge.

Shawn und McQuown (1975) sehen neben der Bedeutung für die Diagnostik von intraokulären Prozessen bei Augen mit trüben Medien, Netzhautablösungen, Trauma und Fremdkörperverdacht, intraokularen Blutungen und Tumoren die Möglichkeit der Biometrie für axiale Längenvermessungen vor der Implantation von Intraokularlinsen. Sie charakterisieren das lebende Auge als ein ideales Organ für die Anwendung von Ultraschall, da es mit Kammerwasser und Vitreus flüssigkeitsgefüllt ist.

Die Biometrie kann zur Evaluation von Größen- oder Formabweichungen dienen, wie z.B. beim Mikrophthalmus, Buphthalmus oder Mikrokornea. Nover und Grote (1965) sehen bei unklaren intraokularen Prozessen und gleichzeitiger Trübung der brechenden Medien eine absolute Indikation für den Ultraschall. Sie stellen in ihrer Arbeit auch die Befunde von B-Modus-Untersuchungen dar.

Schon Binkhorst (1976) rät zu biometrischen Untersuchungen vor Kataraktoperationen und hält sie für zwingend, wenn Unsicherheiten über die Refraktion bestehen.

Der A-Modus hat aktuell weiterhin größte Bedeutung in der Ermittlung von Teilstrecken des Auges zur präoperativen Diagnostik und Berechnung der Brechkraft neu einzusetzender Linsen (Kiss et al. 2002, Nemeth et al. 2007, Rajan et al. 2008, Raymond et al. 2009).

Veterinärmedizin

In der Veterinärmedizin gelangt das A-Modus-Verfahren 1968 durch Rubin und Koch zur erstmaligen Anwendung. Olson und Kolodner (1981) machen erste Versuche zur Linsenimplantation bei Katzen. Schiffer et al. (1982) führen biometrische Studien an Hundeaugen durch, gefolgt von Gelatt et al. (1983). Die Diagnostik mit Hilfe des B-Modus findet am Hundeauge erst seit 1985 Beachtung. Eisenberg (1985) stellt die B-Modus Untersuchung beim

Hund vor. Er beschreibt sowohl die Beziehung von anatomischen Strukturen zum entstehenden B-Bild als auch die Diagnostik pathologischer Veränderungen. Dziezyc et al. (1987) beschreiben die Bedeutung bei Augen mit getrübttem Vordersegment. Trotz mangelnder optischer Untersuchungsmethoden in solchen Fällen können Erkrankungen wie Katarakte, Linsenluxationen, Fremdkörper, Netzhautablösungen und intraokulare Massen diagnostiziert werden. Zudem zeigen sie, dass der B-Modus die Möglichkeit der Diagnostik von Erkrankungen im Bereich der Orbita verbessert. Gonzalez et al. (2001) betonen die Möglichkeit der Untersuchung der Vorderkammer auf Exsudate, Hyphaema oder Hypopyon bei durch Uveitis oder Glaukom ödematöser und damit getrübtter Kornea des Hundes. Beim Glaukom sehen sie den Vorteil der möglichen Vermessung der axialen Bulbuslänge und die Untersuchung auf zusätzliche Veränderungen im Auge, wie zum Beispiel eine Netzhautablösung. Auch ursächliche Veränderungen der Iris, wie Synechien oder Iris bombé können festgestellt werden. Bei intraokulären Massen ist durch den A-Modus eine zusätzliche Aussage über die quantitative Echographie, d.h. die Reflektion der Zubildung und Stärke der Echowelle möglich. In Fällen von Katarakten können Linsenschwellungen sichtbar gemacht werden. Cotrill (1989) vergleicht die Einsatzmöglichkeiten von A- und B-Modus am Hundeauge.

Veröffentlichungen über Untersuchungen von Katzenaugen mittels Ultraschall liegen bislang nur in geringem Umfang vor. Belkin et al. (1977) und Kirby et al. (1982) untersuchen die Einflüsse der visuellen Umgebung auf die Refraktionskraft des Katzenauges. Die Messungen erfolgen mit A-Modus Verfahren. Hendrickson und Rosenblum (1985) untersuchen mittels A-Mode, ob durch eine Beeinflussung der Akkommodationsfähigkeit oder der Sehschärfe die Bulbusdimensionen verändert werden. Zwei Arbeiten von Gilger et al. (1998, 1998b) beschreiben neben der biometrischen Untersuchung auch die Keratometrie.

2.2 A-Modus-Ultraschallverfahren am menschlichen Auge

Über die Möglichkeiten der Vermessung des menschlichen Auges liegen zahlreiche Studien vor (Jansson und Kock 1962, Gernet 1965, Francois und Goes 1981, Kiss et al. 2002, Nemeth et al. 2007). Bei der Vermessung der axialen Bulbuslänge und ihrer Teilstrecken spielt heute die Ultraschalluntersuchung eine entscheidende Rolle (Kiss et al. 2002, Nemeth et al. 2007, Rajan et al. 2008, Velez-Montoya 2010). Die Messgenauigkeit dieser Untersuchungstechnik ist weitaus höher als die röntgenologischer und optischer Messmethoden (Francois und Goes 1981). Das A-Modus-Ultraschallverfahren ist das am häufigsten in der Humanmedizin angewendete bildgebende Verfahren zur Biometrie des Auges. Unterschieden wird zwischen den Begriffen der anatomischen oder statischen Biometrie und der funktionellen oder dynamischen Biometrie (Francois und Goes 1968). Unter der anatomischen Biometrie werden Untersuchungen verstanden, die Achsenlänge, Linsendicke, Tiefe der Vorderkammer und des Vorderabschnitts, Glaskörperstrecke, Quer- und Vertikaldurchmesser des Auges sowie andere Parameter betreffen. Die funktionelle Biometrie wird als Oberbegriff für alle Messungen und darauf basierenden Berechnungen am lebenden Auge verwendet (Gernet 1967).

2.2.1 Anatomische Biometrie

Bei dieser Form der Biometrie werden die anatomischen Teilstrecken des Auges vermessen. Diese Messungen sind Grundlage für Diagnose und Differentialdiagnose bei Anomalien und pathologischen Veränderungen der Teilstrecken des Auges wie Makrophthalmus, Mikrophthalmus, Phthisis bulbi, Achsenmyopie und Achsenhyperopie.

2.2.1.1 Teilstrecken der anatomischen Biometrie

Bei den zu untersuchenden Teilstrecken der anatomischen Biometrie handelt es sich um die axiale Bulbuslänge, die Vorderkammertiefe, die Linsendicke und die Glaskörperstrecke.

Axiale Bulbuslänge

Die axiale Bulbuslänge entspricht der Distanz zwischen dem Scheitelpunkt der Hornhautoberfläche und der Netzhautinnenfläche. Daraus ergibt sich, dass der durch Ultraschall erhaltene Messwert der Achsenlänge kleiner ist als der äußere Durchmesser des Auges (Gernet 1967). Die Distanz von der inneren retinalen Schicht, die den Ultraschall reflektiert, bis zur äußeren Schicht wird von verschiedenen Autoren im Bereich von 0,3 mm bis 0,5 mm angegeben (Gernet 1963, Sorsby et al. 1963, Okasala und Varonen 1964, Buschmann 1966, Gernet

1967). Beim Menschen besteht eine große Streubreite der axialen Bulbuslänge beim Erwachsenen (20,12 - 25,94 mm). Die durchschnittliche axiale Bulbuslänge bei Männern wird mit $23,4 \pm 1,17$ mm und bei Frauen mit $23,32 \pm 0,93$ mm angegeben (Francois und Goes 1981).

Vorderkammertiefe

Die Vorderkammertiefe wird bestimmt durch den Abstand zwischen dem Scheitelpunkt der Hornhautvorderfläche und der Linsenvorderfläche. Es besteht eine signifikant positive Korrelation zwischen Vorderkammertiefe und der axialen Bulbuslänge (Jansson 1963, Francois und Goes 1968, Larsen 1979, Jivrajka et al. 2008). Die Vorderkammertiefe beträgt bei Männern durchschnittlich $3,04 \pm 0,19$ mm und bei Frauen $2,71 \pm 0,27$ mm (Francois und Goes 1981).

Linsendicke

Die Linsendicke wird bestimmt durch den Abstand zwischen der Vorder- und Hinterfläche der Linse. Die durchschnittliche Linsendicke beträgt bei Männern $4,03 \pm 0,46$ mm und bei Frauen $4,19 \pm 0,41$ mm (Francois und Goes 1981).

Glaskörperstrecke

Die Glaskörperstrecke wird durch den Abstand zwischen Linsenhinterfläche und der Netzhautinnenfläche definiert. Sie beträgt durchschnittlich bei Männern $15,49 \pm 0,83$ mm, bei Frauen $15,55 \pm 0,78$ mm (Francois und Goes 1981).

2.2.1.2 Einfluss des Wachstums auf die biometrischen Daten

Die durchschnittliche Achsenlänge des Auges kurz nach der Geburt liegt bei 17,1 mm. Die Variationsbreite in der Achsenlänge dieser Altersstufe ist wesentlich kleiner als diejenige emmetroper erwachsener Augen (Gernet 1964). Francois und Goes (1981) beschreiben das Wachstum des menschlichen Auges in unterschiedlichem Alter. In den ersten drei Lebensjahren beträgt das Wachstum der axialen Bulbuslänge 1,4 mm pro Jahr, vom dritten bis sechsten Jahr 0,4 mm pro Jahr. Danach verlangsamt sich das Wachstum bis zum 15. Lebensjahr auf 0,1 mm pro Jahr.

Bei beiden Geschlechtern nimmt die Linsendicke mit zunehmendem Alter zunächst ab. Die Vorderkammertiefe und die axiale Bulbuslänge nehmen gleichzeitig zu. Der Einfluss des Wachstums auf die Refraktion ist nachvollziehbar. Kinder im Alter von 6 und 7 Jahren zeigen eine stärkere Hyperopie als Kinder im Alter von 9-14 Jahren. Die 8-jährigen Kinder wiederum zeigen eine stärkere Hyperopie als die von 10-14 Jahren (Zadnik et al. 2003). Das Wachstum des Auges in der zweiten Lebensdekade ist kontinuierlich, aber unterschied-

lich ausgeprägt (Wilson et al. 2009). Es erfolgt eine Abflachung der Vorderkammer vom jungen Erwachsenen zum älteren Menschen (Francois und Goes 1968, Touzeau et al. 2003). Touzeau et al. (2003) beobachten eine Abnahme der Vorderkammer von 0,1 - 0,2 mm pro Altersjahrzehnt.

Die Linse wächst lebenslang als Folge der kontinuierlichen Produktion neuer Linsenfasern vom Linsenepithel (Jansson 1963, Gernet 1967, Touzeau et al. 2003, Jivrajka et al. 2008).

Die Resorption von Linsenfasern im Zentrum der Linse ist geringer als die Neuproduktion. Die negative Korrelation zwischen Vorderkammertiefe und Linsendicke ist durch das Abflachen der Vorderkammer bei zunehmender Linsendicke zu erklären (Weekers et al. 1975). Auch die Glaskörperstrecke korreliert negativ mit einer Linsenverdickung (Weekers et al. 1975, Francois und Goes 1981). Die axiale Bulbuslänge korreliert geringgradig signifikant mit der Linsendicke (Jansson 1963).

Die Glaskörperstrecke wird durch die zunehmende Linsendicke im Laufe des Lebens kleiner. Sie korreliert ebenfalls positiv mit der axialen Bulbuslänge emmetroper Augen (Jansson 1963, Larsen 1979, Francois und Goes 1981).

In einer breit angelegten Studie können Wong et al. (2001) zeigen, dass die bei Menschen ab 40 Jahren höhere Prävalenz von Hyperopie mit biometrischen Daten zu diagnostizieren ist. Während sich die korneale Krümmung in Verlauf des Alters nur minimal verändert, zeigen die im A-Modus vermessenen Werte der axialen Bulbuslänge, Vorderkammertiefe und Glaskörperstrecke eine Verringerung, die Linsendicke eine Zunahme. Vor allem die axiale Bulbuslänge und die Glaskörperstrecke sind ihrer Studie nach entscheidende Werte für die Refraktionsunterschiede im Alter. Die Autoren stellen fest, dass pro 10 Jahre Lebensalter eine Hyperopie von 1,4 Dioptrien zu erwarten ist und dies mit einer Verkürzung der axialen Bulbuslänge um 0,31 mm einhergeht. Erst ab einem Alter von 60 Jahren kommt eine Linsentrübung als weiterer Faktor hinzu. Schon Leighton und Tomlinson (1972) finden eine Verkürzung der axialen Bulbusstrecke bei älteren Menschen. Sie beschreiben neben einer vergrößerten Linsendicke eine flachere Vorderkammer. Diese Umstände erklären das häufigere Auftreten von Winkelblockglaukomen im Alter. Durch die flache Vorderkammer wird der Ausflusswiderstand erhöht, die geringe Größe des Bulbus erhöht den Ausflusswiderstand im trabekulären Maschenwerk und im uveo-skleralen Abfluss-System.

2.2.1.3 Einfluss der Zugehörigkeit zu einer Völkergruppe auf die biometrischen Daten

Untersuchungen von Fanny et al. (2007) zeigen signifikante Unterschiede der biometrischen Augenvermessung von schwarzafrikanischen und weißen Patienten. Die schwarzafrikanischen Patienten zeigen mit einer axialen Bulbuslänge von $23,26 \text{ mm} \pm 1,07 \text{ mm}$ für Männer geringgradig kleinere Augen als weiße Patienten. Bei Frauen liegt die axiale Bulbuslänge mit $22,56 \text{ mm} \pm 0,9$ deutlicher unter der von weißen Frauen. Die Vorderkammertiefe liegt mit $2,69 \text{ mm} \pm 0,54$ für Männer und $2,53 \pm 0,48$ für Frauen vor allem bei Männern deutlich unter den Messwerten weißer Patienten. Untersuchungen an asiatischen Patienten (Wong et al. 2001) zeigen ähnliche Verhältnisse wie bei europäischen Patienten.

2.2.1.4 Einfluss der Augenseite auf die biometrischen Daten

Kurtz et al. (2004) zeigen in ihrer Studie an 468 Kindern, dass die durchschnittliche Achsenlänge der rechten und linken Augen nicht signifikant voneinander abweichen. Rajan et al. (2008) untersuchen 1379 Patienten. 24 % dieser Patienten zeigen eine Abweichung der axialen Bulbuslänge vom linken zum rechten Auge von mindestens 0,3 mm. Je länger die Bulbuslänge des größeren Auges, desto größer ist dabei auch die Differenz zum kleineren Auge. Die Korrelation zwischen der Größe des Bulbus und der Größe des Unterschiedes beider Augen ist dabei mit $p < 0,001$ hochsignifikant.

2.2.1.5 Einfluss des Geschlechts auf die biometrischen Daten

Bei Kindern kurz nach der Geburt findet Gernet (1964) im Gegensatz zu Erwachsenen keinen geschlechtsgebundenen Unterschied. Bei Schulkindern zeigen Zadnik et al. (2003), dass bei Mädchen die axiale Bulbuslänge kürzer ist als bei Jungen. Dieser Unterschied liegt vor allem in der geringeren Vorderkammertiefe begründet. Auch die Glaskörperstrecke ist geringer. Die Kornea von Mädchen ist steiler, die Linse zeigt eine stärkere Brechkraft. Hinsichtlich der Refraktion ist kein Unterschied zwischen den Geschlechtern nachweisbar.

In der Studie von Wong et al. (2001) wird ein signifikanter Unterschied zwischen den biometrischen Daten von Männern und Frauen gefunden. Die Augen von Frauen zeigen kürzere axiale Bulbuslängen, flachere Vorderkammern, kürzere Glaskörperstrecken und dickere Linsen als Männer. Der Ausgleich der Refraktion liegt offensichtlich in den gleichzeitig gemessenen steileren Kornea-Kurvaturen. Auch Fanny et al. (2007) finden signifikante Unterschiede der biometrischen Daten von Männern und Frauen, mit kürzeren axialen Bulbuslängen bei Frau-

en. Larsen (1979) sieht den Zusammenhang der Geschlechtsunterschiede mit Körpergröße, Kopfumfang, Kopflänge und Breite des Kopfes. In seiner Studie kann er zwischen diesen Messwerten und der axialen Bulbuslänge jeweils einen signifikanten Zusammenhang nachweisen. Die Unterschiede in der Größe des Kopfes könnten seiner Meinung nach auch den Unterschied der axialen Bulbuslänge bei den Geschlechtern erklären.

2.2.1.6 Einfluss der Größe und des Gewichts auf die biometrischen Daten

Blomdahl (1979) findet bei neugeborenen Babys die axiale Bulbuslänge umso größer, je schwerer das Kind ist. Die Linsendicke zeigt keinen Zusammenhang mit der Achsenlänge oder dem Gewicht des Kindes. Zwischen der axialen Bulbuslänge und dem kornealen Radius sieht er eine signifikante Korrelation.

Bei den weiteren Auswertungen der oben genannten Untersuchungen stellen Wong et al. (2001b) fest, dass die Größe der untersuchten Personen einen Einfluss auf die Messwerte hat. Größere Personen zeigen grundsätzlich größere axiale Bulbuslängen, tiefere Vorderkammern, eine längere Glaskörperstrecke und dünnere Linsen als kleine Menschen. Die trotz größerer axialer Bulbuslänge unveränderte Refraktion führen die Autoren auf das delikate Gleichgewicht der einzelnen refraktiven Strukturen, namentlich der dünneren Linse und der flacheren Kornea zurück.

Wu et al. (2007) zeigen in ihrer Studie einen signifikanten Zusammenhang zwischen Größe und Gewicht der untersuchten Personen einerseits und der axialen Bulbuslänge, Vorderkammertiefe und Glaskörperstrecke sowohl Korneadicke und Krümmung andererseits. Größere und schwerere Personen zeigen eine größere axiale Bulbuslänge, eine tiefere Vorderkammer und eine längere Glaskörperstrecke. Die Kornea dieser Personen ist flacher und dicker als bei weniger großen und schweren Probanden. Sie stellen weiterhin keine Veränderung der Refraktion bei größeren Personen fest.

2.2.1.7 Einfluss des Intraokularsdrucks auf die biometrischen Daten

Bei Kindern wird ein besonders deutlicher Zusammenhang der biometrischen Daten und des Augeninnendrucks gesehen. Die Sklera dehnt sich durch einen erhöhten Druck aus (Grehn 2003). Dauer und Stärke des Druckanstiegs wirken sich direkt auf die Vergrößerung des Auges, die sowohl die vorderen als auch die hinteren Segmente betrifft, aus (Francois und Goes 1981).

Bei erwachsenen Patienten zeigen Cashwell und Martin (1999), dass durch den Druckabfall nach einer Trabekulotomie bei glaukomatösen Patienten eine Verringerung der axialen Bulbuslänge resultiert. Der mittlere Abfall der axialen Bulbuslänge liegt postoperativ bei 0,423 mm. Der Intraokulardruck liegt präoperativ durchschnittlich bei 26,3 mmHg, bei der postoperativen Messung, die durchschnittlich 22,5 Monate nach dem Eingriff stattfindet, ist er durchschnittlich auf 9,8 mmHg gesunken.

Druckanstiege, die auf ein akutes Engwinkelglaukom zurückzuführen sind, zeigen sich in charakteristischen sonographischen Befunden. Die Vorderkammer ist abgeflacht, die Linse verdickt und nach anterior verlagert. Aufgrund einer Verkürzung der Glaskörperstrecke kommt es zu einer generellen Verkürzung der axialen Bulbuslänge (Lim et al. 2006, Lan et al. 2007, Ramani et al. 2007). Bei chronischen Engwinkelglaukomen vertieft sich die Vorderkammer und die axiale Bulbuslänge nimmt zu (Lan et al. 2007).

Beim Weitwinkelglaukom sehen Tomlinson und Philips (1970) eine positive Korrelation zwischen Augeninnendruck und axialer Bulbuslänge. Diesen Anstieg der Bulbuslänge mit zunehmendem Augeninnendruck sehen Delmarcell et al. (1976) sowie Arranz-Marquez und Teus (2004) nicht.

2.2.1.8 Einfluss der Refraktion auf die biometrischen Daten

Die Refraktion des Auges entspricht der Differenz zwischen der für seine Achsenlänge und Krümmungsradien notwendigen Gesamtbrechkraft und der tatsächlichen Gesamtbrechkraft. Im günstigsten Fall, bei einer Refraktion von Null, werden parallele Lichtstrahlen in der Fovea centralis der Retina fokussiert. Dieser Zustand wird als Emmetropie bezeichnet. Ist die Gesamtbrechkraft des Auges zu hoch, werden nur nahe liegende Gegenstände scharf abgebildet. Parallele Lichtstrahlen werden vor der Retina fokussiert. Dieser Zustand wird als Myopie bezeichnet. Werden hingegen die einfallenden Lichtstrahlen erst hinter der Retina vereinigt, ist also die Gesamtbrechkraft zu gering, spricht man von einer Hyperopie (Hansen 2007). Francois und Goes (1971) sehen einen Ausgleich zwischen der Refraktionskraft der Kornea und der axialen Bulbuslänge, so dass abnorme Bulbuslängen hinsichtlich der Refraktion durch die Kornea neutralisiert werden.

Gernet (1965) zeigt, dass bei kurzer Achsenlänge eine hohe Linsenbrechkraft die Emmetropisation bewirkt. Er folgert dies aus der im Vergleich zur Hornhautbrechkraft ungefähr dreimal so großen Variationsbreite der Linsenbrechkraft. In einer weiteren Arbeit erläutert Gernet (1967), dass sich der Ausgleich der Linsenbrechkraft über die Aufhängung am Ziliarapparat

ergibt. Der Ziliarkörperring ist in Abhängigkeit von der Augengröße ausgebildet. Liegt nun ein großes Auge vor, ist der Ziliarkörperring ebenfalls vergrößert und verstärkt dadurch die Zugkräfte auf die Linse. Die Linse plattet sich ab, der hintere Brennpunkt des Auges verlagert sich in die weiter entfernte Netzhaut und das Auge bleibt trotz Achsenverlängerung emmetrop. Bei kurzen Augen wird die Spannung des kleineren Ziliarkörperrings auf die Zonulafasern geringer, die Linse kugelt sich aufgrund ihrer elastischen Eigenschaften ab und der Brennpunkt rückt weiter nach vorne.

Auch Francois und Goes (1968) weisen nach, dass Linsen unterschiedlicher Refraktionskraft als Ausgleich für die unterschiedliche axiale Bulbuslänge fungieren. Jivrajka et al. (2008) stellen bei kürzeren Augen eine höhere Linsendicke fest, ohne dies zu werten. Die Linsendicke ist proportional dicker, je kürzer das Auge ist.

Im Gegensatz zu Jansson (1963), der eine hochsignifikante Korrelation zwischen Glaskörperstrecke und Refraktion normalsichtiger Augen feststellt, zweifelt Gernet (1967) an der Zuverlässigkeit dieses Indikators, da mit 4,5 mm eine hohe physiologische Variationsbreite der Glaskörperstrecke emmetroper Augen gefunden wird.

Grundsätzlich scheint eine Verbindung zwischen Art und Grad der Ametropie und der Glaskörperstrecke zu bestehen, wobei myope Augen eine erhöhte Distanz, hypermetrope Augen eine erniedrigte Distanz zwischen Linsenhinterfläche und Netzhautinnenfläche zeigen (Jansson 1963, Gernet 1967, Francois und Goes 1968, Touzeau et al. 2003, Wong et al. 2010). Xie et al. (2009) weisen nach, dass bei zunehmender Myopie auch eine signifikante Zunahme der Glaskörperstrecke vorliegt. Vorderkammertiefe und Linsendicke sowie die korneale Krümmung stehen in keinem Zusammenhang mit der Myopie.

2.2.2 Funktionelle Biometrie

2.2.2.1 Implantation von Kunstlinsen

Die Sonographie spielt bei der Kataraktchirurgie eine große Rolle. Die sonographische Untersuchung ist zur Erkennung pathologischer Zustände, die eine Operation erschweren, verändern, oder unmöglich machen, präoperativ wertvoll (Kaskaloglu 1985).

Die funktionelle Biometrie dient vor allem der Berechnung zu implantierender Kunstlinsen und wird routinemäßig vor Kataraktoperationen durchgeführt.

Die Messung der axialen Bulbuslänge ist integraler Bestandteil der Voruntersuchung von Kataraktpatienten und ist essentiell, um die Brechkraft der einzusetzenden Intraokularlinse zu

bestimmen (Olsen 2007, Rajan et al. 2008, Velez-Montoya et al. 2010). Touzeau et al. (2003) bezeichnen die axiale Bulbuslänge als Schlüsselement der Biometrie und der Refraktionsberechnung.

Auch wenn neue Verfahren zur Bestimmung der intraokularen Distanzen vorhanden sind, wie die partielle teilkohärente Interferometrie – partial coherence interferometry (PCI) (Drexler et al. 1998), ist die Vermessung mittels A-Modus immer noch die am weitesten verbreitete Messmethode (Kiss et al. 2002, Nemeth et al. 2007, Rajan et al. 2008, Velez-Montoya 2010). Vergleiche der beiden Messmethoden zeigen eine signifikante Korrelation. Die geringfügigen Unterschiede sind dabei nicht signifikant (Kiss et al. 2002, Németh et al. 2003). Die Reproduzierbarkeit beider Verfahren ist vergleichbar (Nemeth et al. 2007). Auch bei den funktionellen Ergebnissen hinsichtlich der postoperativen Refraktion ist kein signifikanter Unterschied feststellbar (Rajan et al. 2002, Raymond et al. 2009). Die Messungen mit PCI basieren auf dem Ausstrahlen eines dualen Infrarot-Lichtstrahls (780 nm) von kurzer Kohärenz Länge (160 μm) mit unterschiedlicher optischer Länge. Das zu vermessende Auge und der Photodetektor sind auf den entgegengesetzten Seiten des Interferometers platziert. Beide Lichtstrahlen werden an der Kornea und an der Retina reflektiert. Interferenz tritt auf, wenn die Differenz beider Strahlen kleiner ist als die Kohärenzlänge. Das Interferenz-Signal wird vom Photodetektor aufgenommen und gibt dann die optische Länge zwischen Kornea und Retina wieder. Wichtig für die Messungen ist die Ausrichtung des Auges anhand eines Lichtstrahls, den der Patient fixiert. Nur dann ist die Ausrichtung anhand der optischen Achse gewährleistet (Rajan et al. 2002). Untersuchungen in der Humanmedizin zeigen daher Schwierigkeiten bei Messungen von Patienten, die nicht kooperativ sind (Rajan et al. 2002, Németh et al. 2003). Auch bei optischen Eintrübungen, wie Katarakten, kornealer Dystrophie oder Degeneration, Vitreustrübungen, Einblutungen, Fibrin-Akkumulationen in der Vorderkammer oder starker Myopie kann die PCI-Methode nicht angewendet werden. Diese Patienten machen circa 18 % aller Fälle aus (Németh et al. 2003).

In einer Untersuchung zur Variabilität von biometrischen Daten, die mit A-Modus Ultraschall erfasst werden, zeigen Kurtz et al. (2004), dass auch bei Kindern, denen eine schlechtere Kooperation während der Untersuchung unterstellt wird, dieses Verfahren präzise Daten der okulären Abschnitte liefert.

Bei Messungen mit der PCI-Methode wird eine längere axiale Bulbusstrecke gemessen. Dies liegt daran, dass die Reflektionsfläche der Retina bei der optischen und der akustischen Methode unterschiedlich sind. Beim Ultraschall erfolgt die Reflektion an der inneren limitieren-

den Membran, während bei der PCI die Reflektion an der Grenzfläche zum Pigmentepithel erfolgt (Kiss et al. 2002). Die Unterschiede der mit den 2 verschiedenen Techniken ermittelten Refraktion sind allerdings nicht signifikant (Kiss et al. 2002, Rajan et al. 2002).

Intra-Observer Studien von Bansal et al. (2008) mit Kontaktverfahren zeigen, dass es hinsichtlich der Wiederholbarkeit von A-Modus-Messungen keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Messungen des gleichen Untersuchers gibt.

Das aphake Auge bildet ein simples optisches System. Die Brechkraft liegt ausschließlich in der Kornea. Wenn die Korneakurvatur und die axiale Bulbuslänge vorgegeben sind, kann die notwendige Brechkraft einer Korrekturlinse, sei es als Brille, Kontaktlinse oder Intraokularlinse, errechnet werden (Binkhorst 1978). Zur Berechnung von Brechkraft und Durchmesser einzusetzender Intraokularlinsen wird die funktionelle Biometrie zusammen mit der Keratometrie eingesetzt (Ohlhorst et al. 1991, Olsen 2007). Die Brechkraft der Kornea umfasst circa zwei Drittel der gesamten Dioptrien-Zahl des Auges und ist eine wichtige Komponente im okulären refraktiven System.

Sie wird mit Keratometern erfasst. Dabei wird die Größe eines Bildes gemessen, das von der konvex spiegelnden Fläche der Kornea mit dem Tränenfilm reflektiert wird. Das Keratometer errechnet die Vergrößerung des von ihm ausgesandten und empfangenen Bildes. Diese ist direkt korreliert mit dem Radius der Krümmung der reflektierenden Korneafläche. Der ermittelte Radius kann dann in eine Gleichung eingesetzt werden und die Dioptrienzahl der Kornea wird errechnet:

$$D = 337,5 / r$$

Dabei entspricht D der Dioptrienzahl der Kornea, r ist gleichbedeutend dem Radius der Korneaoberfläche (Olsen 2007).

Es existieren verschiedene Gleichungen, in die die gemessenen Werte eingesetzt werden können und somit die Brechkraft relativ einfach errechnet wird (Binkhorst 1978, Olsen 2007).

Eine häufig verwendete Formel wird von Retzlaff, Sanders und Kraff (1990) entworfen :

$$P = A - 0,9 * K - 2,5 * Ax$$

Dabei steht P für Emmetropisation benötigte Dioptrienzahl der Intraokularlinse, A für die A-Konstante, die vom Material und damit der Brechkraft der Intraokularlinse abhängig ist und vom Hersteller angegeben wird, K für die korneale Krümmung und Ax für die axiale Bulbuslänge (Retzlaff et al. 1990).

In ihrer Studie untersuchen Narváez et al. (2006) die refraktiven Ergebnisse von Kataraktoperationen bei der Anwendung von unterschiedlichen theoretischen Formeln. Obgleich in neue-

ren Formeln zusätzliche Faktoren wie Kornea-Durchmesser und Linsendicke aufgenommen werden, um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, sind die Ergebnisse für alle Formeln gleich präzise.

Fehler in der Berechnung der axialen Bulbuslänge sind häufig die Ursache für Fehler in der späteren Refraktion, die zu Beeinträchtigungen der Patienten führen (Rajan et al. 2008). Netzhautablösungen können als Komplikation nach Kataraktoperationen auftreten. Die Wahrscheinlichkeit einer Netzhautablösung steigt mit größerer Vorderkammertiefe und längerem Bulbus (Bhagwandien et al. 2006).

2.2.2.2 Akkommodation

Eine wichtige Eigenschaft des visuellen Systems ist die Akkommodationsfähigkeit der menschlichen Linse.

Als Akkommodation wird die Veränderung der Dioptrienzahl des optischen Systems definiert, die durch Kontraktion des Ziliarmuskels herbeigeführt wird (Kenney et al. 1995). Die elastischen Fasern der Linse ermöglichen eine Umwandlung der kugeligen Linsenform (dadurch wird eine hohe Brechkraft erreicht für das Nahsehen) in eine elliptische Form (die Brechkraft ist geringer).

Die am Ziliarmuskel entspringenden Zonulafasern, die als Aufhängeapparat der Linse fungieren, üben bei Kontraktion des Ziliarmuskels Zug auf die Linse aus, die sich entsprechend verformt.

Bei der Akkommodation verringert sich der äquatoriale Durchmesser der Linse, der Radius der vorderen Krümmung nimmt ab, der vordere Pol der Linse bewegt sich nach vorne und damit nimmt die Linsendicke zu. Die Linse sinkt minimal ab. Die Vorderkammertiefe wird flacher (Garner und Yap 1997, Ostrin et al. 2006, Nurispahic et al. 2008). Die Abflachung der Vorderkammer bei maximaler Akkommodation beträgt 0,24 mm, die Zunahme der Linsendicke 0,24 mm (Garner und Yap 1997). Die Abflachung der Vorderkammer ist altersabhängig unterschiedlich stark. Die größten Abflachungen werden bei Jugendlichen und Kindern gemessen, bei den ältesten Personen in der Untersuchung werden die geringsten Veränderungen der Vorderkammertiefe nachgewiesen (Nurispahic et al. 2008). Die Veränderung der Glaskörperstrecke ist nicht signifikant (Garner und Yap 1997). Bei der axialen Bulbuslänge wird eine geringe Verlängerung festgestellt (Nurispahic et al. 2008).

Die Fähigkeit der Akkommodation nimmt beim Menschen mit zunehmendem Alter ab, da der Nukleus der Linse an Elastizität verliert. Die Kräfte des Ziliarkörpers, die ebenfalls abneh-

men, reichen dann nicht mehr aus, um die Linse adäquat zu verformen. Man spricht dann von Presbyopie (Kriechbaum et al. 2005).

2.2.2.3 Emmetropisation

Straub (1909) schafft für den korrelativen Ausgleich zwischen Achsenlänge und Gesamtrefraktion des Auges den Begriff der Emmetropisation.

Franceschetti und Luyckx (1965) können nachweisen, dass der Emmetropisationseffekt vor allem durch die Refraktionsunterschiede in der Linse erreicht wird. Dazu untersuchen sie Patienten, die ein Auge mit Myopie und ein emmetropes Auge aufweisen. Die Augenabschnitte werden sonographisch untersucht und die Refraktion bestimmt. Wird nun aufgrund der biometrischen Daten die Refraktion berechnet, wäre die Myopie deutlich gravierender als die tatsächliche Messung ergibt. Daraus kann gefolgert werden, dass der Ausgleich in der Refraktionskraft der Linse liegt.

2.2.2.4 Myopie

Beim Zustand der Myopie ist die Fovea auf einen im Endlichen liegenden Punkt eingestellt. Es gibt drei mögliche Ursachen dafür:

1. eine Vergrößerung der Achsenlänge, die zu einer so genannten Achsenmyopie führt
2. eine stärkere Krümmung der Hornhautvorderfläche oder auch der Linsenoberflächen bzw. eine geringere Wölbung der Hornhautrückfläche, wodurch eine Krümmungmyopie entsteht
3. ein erhöhter Index brechender Teile, vor allem der Linse, daraus folgt die Indexmyopie (Hansen 2007)

Franceschetti und Gernet (1965) zeigen in einer Studie die Verlängerung der Achsenlänge bei myopen Patienten und führen daher Myopien außer in wenigen pathologischen Fällen, wie Keratokonus oder Sphärophakie, auf Achsenmyopien zurück. Gleichzeitig stellen sie fest, dass die resultierende Refraktionskraft zusätzlich durch eine geringere Brechkraft der Linse verändert ist.

Der Langbau des myopen Auges beruht vorwiegend auf einer Verlängerung der Glaskörperstrecke. Die Korrelation zwischen ihr und der Höhe der Myopie ist deshalb noch enger, als die zwischen Achsenlänge und myopischer Refraktion (Gernet 1968).

Die Disposition zu hoher Myopie lässt sich schon beim Neugeborenen an einer verlängerten Augenachse erkennen (Gernet 1967).

Shum et al. (1993) finden in ihren Untersuchungen die Verdickung der Linse und damit verbunden eine Abflachung der Vorderkammer. Sie beobachten gleichzeitig eine dezente Verlängerung der axialen Bulbuslänge. Diese erklären sie durch den zunehmenden Druck auf den Glaskörper, der während der Akkommodation entsteht. Der posteriore Pol der Sklera, der am dünnsten ausgebildet ist, dehnt sich ihrer Meinung nach aus, was eine Verlängerung der axialen Bulbuslänge zur Folge hat. Dieser Umstand könnte erklären, warum durch häufiges Arbeiten im Nahbereich mit starker Akkommodation durch die dauerhafte Dehnung der Sklera und Ermüdung der Strukturen eine Verlängerung des Bulbus und daraus resultierend eine Myopie entsteht.

Drexler et al. (1998) hingegen machen die Kontraktion des Ziliarmuskels für die Verlängerung des Bulbus verantwortlich. Durch das Vorwärts- und Einwärtsziehen der Chorioidea verringert sich der Umfang derselben. Dies führt zur Verlängerung des Augapfels. Für diese finden sie eine positive Korrelation mit der Akkommodation.

Touzeau et al. (2003) sehen neben der Verlängerung der hinteren Segmente des Auges auch eine Verlängerung der Vorderkammertiefe. Sie postulieren, dass eine Verlängerung der axialen Bulbuslänge um 1 mm Länge einer Refraktionsänderung von 2,6 Dioptrien entspricht.

Ein weiterer wichtiger Faktor bei der Myopie ist der korneale Radius. Der Hauptindikator für die Stärke der Myopie ist das Verhältnis von kornealem Radius zur Vorderkammertiefe (Baker und Tasman 2008).

Ostrin et al. (2006) untersuchen den Zusammenhang von Refraktion und Biometrie des vorderen Augenabschnitts. Dazu ermitteln sie parallel zur Refraktion eines Auges die Vorderkammertiefe und Linsendicke des anderen Auges mit Hilfe des A-Modus unter der Prämisse, dass die akkommodative Reaktion beider Augen äquivalent ist. Ihre Ergebnisse zeigen einen linearen Zusammenhang. Wenn die Augen in Richtung Myopie akkommodieren, zeigt sich gleichzeitig eine Verschiebung der vorderen Linsenoberfläche nach vorne und der hinteren Linsenoberfläche nach hinten. Dabei macht die Verschiebung des vorderen Linsenpols etwa 75 % der Linsenverdickung aus, die des hinteren Pols nur etwa 25 %. Untersuchungen von Bolz et al. (2007) bestätigen die Ergebnisse. Die Autoren stellen fest, dass die Akkommodation bei emmetropen und myopen Augen leicht unterschiedlich erfolgt. Während sich bei den emmetropen Augen zunächst der posteriore Pol leicht nach posterior verlagert, und erst dann der anteriore Pol mit einer Vorwärtsbewegung die Linsendicke erhöht, erfolgt bei den myopen Augen zunächst die Veränderung des anterioren Pols. Dementsprechend unterschiedlich abge-

flacht ist die Vorderkammertiefe je nach Akkommodationsstadium bei den verschiedenen Patienten.

2.2.2.5 Hyperopie

Anhand des Ultraschallbefundes sind bei der Hyperopie zwei Gruppen zu unterscheiden: einmal Augen mit höherer Hyperopie, die einen harmonischen Kurzbau des Auges zeigen. Die Vorderkammer ist flach, Glaskörperstrecke und axiale Bulbuslänge sind kurz, die Linsen sind häufig axial verdickt.

Bei leichter Hyperopie zeigt circa ein Viertel der untersuchten Personen eine normale oder leicht verlängerte Bulbusachse, sodass sich die Hyperopie aus einer geringeren Hornhautbrechkraft und einer niedrigen Linsenbrechkraft erklärt. Vermutlich liegt ein entsprechend großer Ziliarkörperring vor, der eine relativ starke Abplattung der Linse bewirkt (Gernet 1971).

In einer Untersuchung an Schulkindern wird kein signifikanter Unterschied in der Refraktion von Mädchen und Jungen festgestellt, obgleich Mädchen einen signifikant kürzeren Bulbus aufweisen. Gleichzeitig wird bei Mädchen eine steilere Kornea, eine flachere Vorderkammer und eine höhere Brechkraft der Linse festgestellt (Zadnik et al. 2003).

2.2.2.6 Einfluss von Medikamenten auf biometrische Daten

Pharmakologische Aspekte können mit der Biometrie beispielsweise bei der Verabreichung von Miotika beobachtet werden. Miotika haben eine pupillenverengende Wirkung und verursachen einen Akkommodationsspasmus. Die Linsendicke nimmt zu, die Vorderkammer wird flacher. Dies entspricht dem Vorgang der Akkommodation.

Ein zur Untersuchung der Akkommodation eingesetztes Medikament ist Pilocarpin. Messungen zeigen, dass Pilocarpin bei gesunden Menschen eine vergleichbare Wirkung und bei Augen mit implantierter Kunstlinse sogar eine stärkere Veränderung der biometrischen Daten herbeiführt als bloße Akkommodation auf einen refraktiven Reiz (Kriechbaum et al. 2005). Im Gegensatz hierzu bewirken Mydriatika eine Weitung der Pupille. Der Einfluss auf den Ziliarmuskel bewirkt eine Abflachung der Linse und eine Vertiefung der vorderen Augenkammer (Francois und Goes 1981).

In einer Studie zur Wirksamkeit des drucksenkenden Medikaments Latanoprost zeigen Arranz-Marquez und Teus (2004), dass die Augentropfen eine signifikant höhere Wirksamkeit aufweisen bei Augen mit kleinerer axialer Bulbuslänge. Der Mechanismus ist bislang unbe-

kannt. Die Autoren schätzen aber aufgrund dieser Erkenntnisse das Medikament als besonders wirksam bei Patienten mit Augen geringer axialer Bulbuslänge ein.

Eine weitere Studie zu Latanoprost zeigt, dass bei Patienten mit primärem Offenwinkelglaukom die Vorderkammertiefe erhöht wird. Bei gesunden Patienten verändert sich die Vorderkammertiefe nicht (Cankaya et al. 2009). Die Auswirkung von drucksenkenden Augentropfen auf biometrische Daten wird von Francois und Goes (1981) untersucht. Bei Instillation von Pilocarpin-Augentropfen wird eine Abflachung der Vorderkammer festgestellt. Bei einigen Probanden kommt zusätzlich eine Verschiebung der Linse nach anterior hinzu. Es ergibt sich eine positive Korrelation zwischen Konzentration des Wirkstoffs (1, 4 und 8 %-ig) und den Veränderungen des vorderen Augenabschnitts. Aufgrund dieser Veränderungen kann erklärt werden, warum bei einzelnen Patienten ein akuter Glaukomanfall nach Gabe der grundsätzlich drucksenkenden Augentropfen auftritt. Es handelte sich hierbei um Patienten mit einer ohnehin flachen Vorderkammer, die dann ein Engwinkelglaukom entwickeln.

Die Autoren vergleichen die Wirkung von weiteren drucksenkenden Augentropfen mit diesen Ergebnissen. Aceclidin-Augentropfen zeigen deutlich geringere Veränderungen der biometrischen Daten und werden daher als sicherer auch für Patienten mit flacher Vorderkammer eingestuft. Augentropfen mit Beta-Blockern zeigen keinerlei signifikante Veränderungen der Augenabschnitte.

Succinylcholin- und Atropin-Augentropfen, die keine drucksenkende Wirkung zeigen, wirken sich mit einer Vertiefung der Vorderkammer und Abflachung der Linse aus (Francois und Goes 1981).

2.2.3 Biometrie am pathologisch veränderten Auge

Das A-Modus-Ultraschallverfahren kann sowohl als Absicherung als auch zur Erhebung von Diagnosen hilfreich sein. Bei Erkrankungen, die mit einer Veränderung der Teilstrecken des Auges einhergehen, können wichtige Rückschlüsse gezogen werden, vor allem dann, wenn die normalerweise transparenten Medien des Auges getrübt sind (Gonzalez et al. 2001). Im Folgenden werden einige Erkrankungen des Auges erläutert, für deren Diagnose und Therapie das A-Modus Verfahren von entscheidender Bedeutung ist.

2.2.3.1 Mikrophthalmus

Unter einem Mikrophthalmus versteht man einen zu kleinen Bulbus, wobei das Größenspektrum sehr variabel ist. Er kann isoliert oder zusammen mit anderen Missbildungen wie Katarakt, persistierenden Pupillarmembranen, Kolobomen und Netzhautablösungen auftreten.

Auch Defekte aus dem Bereich der Spaltbildungen mit Störungen der Schädel- und Hirnentwicklung treten überproportional häufig auf (Guthoff 2003).

Das Auftreten kann durch intrauterine Infektionen, wie z.B. Rubella, Zytomegalievirus oder Toxoplasmose hervorgerufen werden oder auch durch Hyperthermie, fetales Alkoholsyndrom oder als Teil von Gendefekten wie Trisomie 13 oder 18 (Blazer et al. 2006). Die Mikrokornea, die häufig zusammen mit dem Mikrophthalmus auftritt, wurde vor der Einführung des Ultraschalls als Diagnostikum für einen Mikrophthalmus herangezogen. Eine Mikrokornea tritt aber nicht zwangsweise gemeinsam mit einem Mikrophthalmus auf (Francois und Goes 1981).

Der Mikrophthalmus kann mit Hilfe des Ultraschalls leicht diagnostiziert werden. Notwendig sind Vergleichswerte, die aufgrund Erhebungen an größeren Gruppen von vergleichbaren Individuen (Spezies, Rasse, Geschlecht, Gewicht) eine Abweichung von der Norm erkennen lassen.

Bei einseitigem Mikrophthalmus kann das gesunde Partnerauge zum Vergleich herangezogen werden. Ein gewisser Emmetropisationseffekt ist beim Mikrophthalmus an der Linsendicke erkennbar. Die Brechkraft der Linse ist gegenüber normal großen Augen deutlich erhöht und die Linsendicke kann bis zum 1,5-fachen der Norm betragen (Gernet 1967).

2.2.3.2 Phthisis bulbi

Die Phthisis bulbi umschreibt eine Schrumpfung des Augapfels, beispielsweise nach einer Uveitis. Die Verkleinerung des Augapfels wird vor allem durch eine geringere Glaskörperstrecke bewirkt. Auch geringfügige Änderungen und somit das Anfangsstadium der Phthisis können anhand der Bulbusstrecke biometrisch sichtbar gemacht werden (Francois und Goes 1981). Rochels (1984) beschreibt die Phthisis als häufigen Befund nach schwersten Augenverletzungen. Die axiale Bulbuslänge ist sonographisch nachweisbar deutlich verkürzt.

2.2.3.3 Linsenveränderungen

Katarakt

Strukturveränderungen der Linse gehen mit dem Verlust der Transparenz einher. Solche Durchsichtigkeitsverluste werden als Katarakt bezeichnet.

Als frühzeitig von der Durchblutung abgekoppeltes, bradytrophes epitheliales Gewebe ist das Linsengewebe besonders anfällig gegen Störungen des Stoffwechsels. Die Ursachen einer Katarakt sind außerordentlich zahlreich und reichen von Traumata, Intoxikationen, Uveitiden, systemischen Erkrankungen, Bestrahlungen, Tumoren, intrauterinen Infektionen, okulären Missbildungen bis hin zu erblichen Formen. Die bei weitem häufigste Form ist die idiopathische senile Katarakt, die die häufigste Erblindungsursache weltweit darstellt (Hansen 2007). Obgleich dieser Altersstar als physiologischer Alterungsprozeß angesehen werden kann, scheint doch eine genetische Disposition wahrscheinlich. Als weitere Risikofaktoren werden UV-Licht, hohe Myopie, Rauchen und Alkoholismus, Diabetes mellitus, Kortikosteroide und Ernährungsfaktoren genannt (Grehn 2003).

Taylor und Moeller (2000) finden einen deutlichen Zusammenhang zwischen Adipositas und gehäuftem Auftreten von Katarakten. Der genaue Mechanismus ist nicht bekannt.

Wichtig bei der Einteilung der Katarakte ist, ob es sich um eine kongenitale oder erworbene Katarakt handelt. Beim Menschen sind 3 Formen der Katarakt klinisch besonders bedeutsam (Kernkatarakt, Rindentrübungen und die hintere subkapsuläre Katarakt) (Hansen 2007).

Das Entwicklungsstadium der Katarakt wird in verschiedene Grade eingeteilt. Die inzipiente Katarakt mit kleineren Bereichen der Linsentrübung macht kaum eine Beeinträchtigung der Sehstärke. Die fortgeschrittene Katarakt macht deutliche Beschwerden und stellt in der Regel eine Operationsindikation dar. Bei der immaturen Katarakt kann der Reflex des vom Fundus zurückfallenden Lichtes noch erkannt werden, wohingegen bei der maturen Form kein Fundusreflex mehr sichtbar ist. Rasche Wasseraufnahme und damit verbundene Vergrößerung kennzeichnet die intumeszente Katarakt.

Bei weiterem Fortschreiten kommt es zu einer Verflüssigung der Randbereiche der Linse, wodurch das Auge eine gewisse Aufklärung erfährt. Man spricht in diesem Stadium von der hypermaturen Katarakt (Grehn 2003).

Die Linsendicke verändert sich in der Regel im Verlaufe der Entwicklung einer Katarakt. Bei der senilen Katarakt wird eine Abflachung der Linse beschrieben, die mit einer Zunahme der

Vorderkammertiefe korreliert (Babel et al. 1969). Der umgekehrte Fall entsteht nach proteolytischem Zerfall von Linsenprotein. Hierbei steigt der osmotische Druck innerhalb der Linsenkapsel. Der zunehmende intrakapsuläre Wassergehalt bedingt eine intumeszente Katarakt (Weekers et al. 1975). Die dadurch verdickte Linse hat eine abgeflachte Vorderkammer zur Folge (Francois und Goes 1981).

Bei Säuglingen und Kleinkindern werden bei kongenitaler Katarakt eine Verringerung der axialen Bulbuslänge und eine geringere Linsendicke festgestellt (Zetterström und Syrén-Nordqvist 1996).

Wong et al. (2003) beschreiben in ihren Ergebnissen Unterschiede je nach Lokalisation der Katarakt. Nukleäre Trübungen zeigen ihrer Studie nach keinen Zusammenhang mit biometrischen Daten, bewirken aber eine Myopie. Kortikale Katarakte imponieren hingegen mit einer dünneren Linse ohne Veränderung der Refraktion. Posterior subkapsulär gelegene Trübungen zeigen eine tiefere Vorderkammer, dünnere Linsen und eine verlängerte Glaskörperstrecke im Vergleich zu gesunden Augen. Die axiale Bulbuslänge bleibt gleich. Diese Veränderungen führen zu einer Myopie.

Tritt eine Phakolyse der Linse ein, kann sich die Linse verflüssigen und Linsenprotein austreten. Eine solche Linse ist ebenfalls flacher mit einer korrespondierend tieferen Vorderkammer.

Kataraktös veränderte Linsen zeigen abgeänderte Echos im A-Modus-Verfahren. Es werden je nach Trübung diffuse Echos mit unterschiedlich hohen Amplituden zwischen den Echos der Vorder- und Hinterkapsel der Linse gesehen. Die Kapselechos selbst können ebenfalls zusätzliche Echos produzieren. Die höchsten Amplituden werden gewöhnlich am Übergang des getrübbten Nukleus zum Kortex gesehen (Coleman 1975). Bei biometrischen Untersuchungen an Augen mit einer Nukleussklerose kommt es zu einer stärkeren Abschwächung der Schallwellen und damit zu Echogrammen, deren Peaks eine reduzierte Amplitudenhöhe aufweisen (Wong et al. 2003).

Die Schallwellen können durch getrübbte Linsen sowohl abgeschwächt, als auch in der Geschwindigkeit beeinflusst werden. Vor allem kalzifizierte Linsen führen zu einer Abschwächung der Schallwellen. Mitunter können Schallschatten im hinteren Augenabschnitt produziert werden. Die Durchdringung des Auges mit den Schallwellen macht manchmal die Anwendung eines Schallkopfes mit einer geringeren Frequenz und damit besserem Penetrationsvermögen erforderlich (Coleman 1975).

Die Geschwindigkeit des Schalls verhält sich je nach Art der Linsentrübung sehr unterschiedlich. Während sich bei einer normalen Alterstrübung (Nukleusklerose) die Geschwindigkeit nicht ändert (Jansson und Kock 1962, Pallikaris und Gruber 1981), sinkt sie bei intumeszenten Katarakten um 31 *m/s* (Pallikaris und Gruber 1981). Bei kapsulären Katarakten erhöht sich die Geschwindigkeit gegenüber einer ungetrübten Linse um 29 *m/s*. Die Folge der erhöhten Geschwindigkeit ist eine augenscheinliche Verlagerung der beiden Linsenechos nach vorne (Coleman 1975).

In einer Studie zeigen Jivrajka et al. (2008), dass Augen mit Myopie und damit verbundener höherer axialer Bulbuslänge eine Prädisposition zur Entwicklung von Katarakten im jungen Lebensalter aufweisen.

Mikrophakie

Die Mikrophakie resultiert aus einer Fehlentwicklung der Linse und der Zonulafasern. Durch die mangelnde Zugkraft der Zonulafasern auf den Linsenäquator verändert die normalerweise eher sphärische Linse sich zu einer ellipsoiden Form. Es kommt zu einer starken Abflachung der Vorderkammer und einer Vertiefung des Glaskörpers. Letztere wird durch einen Rückstau von Kammerwasser durch die verformte Linse in der Hinterkammer verursacht (Nirankari und Maudgal 1959).

2.2.3.4 Glaukom

Beim Glaukom handelt es sich um eine Anzahl ätiologisch verschiedener Krankheiten, deren gemeinsames Kennzeichen eine charakteristische Schädigung des Sehnervs mit nachfolgenden Gesichtsfelddefekten ist. Als Ursache wird ein zu hoher Augeninnendruck angesehen (Grehn 2003). Die Toleranz gegenüber dem Augeninnendruck ist individuell sehr unterschiedlich. Daher spricht man von einem für das betroffene Auge relativ zu hohen Augeninnendruck. Das Glaukom ist nach dem Diabetes mellitus die zweithäufigste Erblindungsursache in Industrieländern (Hansen 2007). Es wird durch Regulationsstörungen im Verhältnis von Kammerwasserproduktion und Abfluss hervorgerufen. Das Kammerwasser wird in den Fortsätzen des Ziliarkörpers gebildet. Von dort fließt es durch die hintere Augenkammer zwischen Iris und Linse durch die Pupille in die vordere Augenkammer. Der Abfluss geschieht aus dem Kammerwinkel zu 85 % durch das Trabekelwerk in den Schlemm-Kanal. Von hier gelangt es in die episclerale Kammerwasservenen. Etwa 15 % des Kammerwassers fließen aus dem Kammerwinkel über ein uveosklerales Gefäßsystem in den allgemeinen venösen Kreislauf (Lang 2000). Abflussbehinderungen können kongenital und idiopathisch sein (Pri-

märglaukom), oder Folge von vorausgegangenen oder gleichzeitig bestehenden Erkrankungen (Sekundärglaukom). Sekundärglaukome können über verschiedene Pathomechanismen ausgelöst werden. Ursache sind Entzündungen, Durchblutungsstörungen, operative Eingriffe, Ablagerungen im Kammerwinkel, Medikamente oder Missbildungen (Hansen 2007).

Gemeinsam mit der Tonometrie stellt die Biometrie ein wichtiges diagnostisches Hilfsmittel bei der Beurteilung eines Glaukoms dar. In der Humanmedizin ist sie vor allem beim kongenitalen Glaukom unabdingbar (Buschmann und Bluth 1974, Gernet und Hollwich 1968, Sampaolesi und Caruso 1982, Bluth 1983, Tarkannen et al. 1983). Während Druckmessungen bei Neugeborenen sehr schwer durchzuführen sind und durch die Umstände der Untersuchung stark beeinflusst werden, spiegelt die axiale Bulbuslänge den Verlauf des intraokulären Drucks sicher wider. Bei Normalisierung des Augeninnendrucks normalisiert sich auch die Wachstumskurve des Auges. Diese kann daher als Monitor des Glaukoms betrachtet werden (Tarkannen et al. 1983, Law et al. 2001). Cashwell und Martin (1999) zeigen in ihren Studien eine Verringerung der axialen Bulbuslänge nach erfolgreicher Glaukomchirurgie und den damit verbundenen Abfall des Augeninnendrucks. Dabei ist die Verkürzung der axialen Bulbuslänge umso stärker, je massiver der Abfall des Augeninnendrucks nach der Operation ist.

Beim Primärglaukom des Menschen werden drei Arten unterschieden. Das kongenitale Glaukom zeigt andere spezifische Veränderungen der Teilstrecken als das Engwinkelglaukom oder das Weitwinkelglaukom.

Kongenitales Glaukom

Beim primären kongenitalen Glaukom ist das Kammerwinkelgewebe mangelhaft ausgereift und führt zu einer Abflussbehinderung (Hansen 2007). Die Kammerwinkelstrukturen entsprechen etwa der Entwicklungsstufe im 7. - 8. Fetalmonat. Das persistierende embryonale Gewebe blockiert den Kammerwasserabfluss, da die Irisbasis den Bereich des Trabekelwerks und des Schlemm-Kanals teilweise noch überdeckt. Der chronisch erhöhte Augeninnendruck führt typischerweise zu einer Hornhautvergrößerung und zu einer Dilatation der Bulbuswand mit Vergrößerung des Bulbus (Grehn 2003). Es ist eine direkte proportionale Korrelation zwischen dem Beginn, der Dauer, dem Grad der Druckerhöhung und der Vergrößerung des Bulbus zu erkennen (Gernet und Hollwich 1968, Francois und Goes 1981, Bluth 1983, Law et al. 2001). Tonometrische Untersuchungen können nur stichprobenartig durchgeführt werden und der Augeninnendruck kann je nach Umständen der Untersuchung bei Aufregung oder notwendiger Fixierung des jungen Patienten außergewöhnlich hoch sein. Druckschwankungen

können daher fehl gedeutet werden, wohingegen die Biometrie verlässlich Veränderungen erfasst, die Rückschlüsse auf den Verlauf des Augeninnendrucks zulassen (Sampaolesi und Caruso 1982, Law et al. 2001).

Grundsätzlich wird eine Vertiefung der Vorderkammer und eine Verlängerung der Glaskörperstrecke beobachtet (Gernet und Hollwich 1968, Buschmann und Bluth 1974, Francois und Goes 1981). Sampaolesi und Caruso (1982) finden zusätzlich zur Verlängerung der Glaskörperstrecke eine Verringerung der Linsendicke.

Engwinkelglaukom

Das Kriterium für die Diagnose eines akuten Engwinkelglaukoms ist ein nicht sichtbares hinteres trabekulares Maschenwerk über mindestens 180 Grad und damit eine Verlegung des Abflusssystemes (Ramani et al. 2007). Es wird in etwa der Hälfte aller Glaukomfälle beim Menschen diagnostiziert (Lim et al. 2006). Das primäre Winkelblockglaukom tritt plötzlich auf. Meist basiert die Verlegung des Kammerwinkels auf einer Verlegung des Durchflusses zwischen Linse und Iris. Die Vergrößerung der Linse im Alter ist ein Risikofaktor für diese Glaukomform (Hansen 2007).

Das akute Engwinkelglaukom zeigt sich sonographisch in einer Zunahme der Linsendicke und einer Verschiebung der Linse nach anterior. Es kommt zu einer Abflachung der Vorderkammer und einer Verlegung des Kammerwinkels. Die Glaskörperstrecke ist reduziert (Francois und Goes 1981, Lim et al. 2006, Lan et al. 2007, Ramani et al. 2007, Damji et al. 2009). Diese Veränderungen führen zu einer generellen Verkürzung der axialen Bulbuslänge (Lim et al. 2006, Ramani et al. 2007). Markowitz und Morin (1985) stellen fest, dass das Verhältnis von Linsendicke zu axialer Bulbuslänge ein Indiz für die Prognose bei der Behandlung von Engwinkelglaukomen ist. Je größer die Ratio von Linsendicke zur axialen Bulbuslänge, desto eher ist ein operativer Eingriff notwendig. Auch Panek et al. (1990) befinden dieses Verhältnis als repräsentativ und aussagekräftig über den Zustand des Kammerwinkels.

Ramani et al. (2007) finden in ihren Studien zusätzlich einen Unterschied zwischen den biometrischen Daten von Männern und Frauen mit akutem Engwinkelglaukom. Die Linsendicke ist bei Frauen signifikant größer. Die Verschiebung der Linse nach anterior finden sie vor allem bei männlichen Probanden. So sind geschlechtsspezifisch unterschiedliche Mechanismen für die Abflachung der Vorderkammer verantwortlich. Die axiale Bulbuslänge ist bei Frauen kürzer als bei Männern.

Beim chronischen Engwinkelglaukom verlängert sich die Vorderkammertiefe und die axiale Bulbuslänge, was beim akuten Engwinkelglaukom nicht der Fall ist (Lan et al. 2007). Aussa-

gekräftigt ist nicht allein die Veränderung einer der Teilstrecken, sondern nur das Verhältnis der Linsendicke zum vorderen Augenabschnitt.

Weitwinkelglaukom

Bei den primären Glaukomen spielt das Offenwinkelglaukom beim Menschen als die häufigste Glaukomform eine besondere Rolle. Ursache ist eine Abflussbehinderung im Bereich des Trabekelwerkes, die klinisch nicht nachweisbar ist. Die Veränderungen entwickeln sich langsam und sind mit mäßigen Augeninnendruckerhöhungen verbunden (Hansen 2007).

Bezüglich der Teilstrecken des Auges beim Weitwinkelglaukom existieren unterschiedliche Auffassungen. Während Tomlinson und Philips (1970) eine positive Korrelation zwischen der Erhöhung des Augeninnendrucks und der axialen Bulbuslänge feststellen, finden Delmarcell et al. (1976) keine korrelierenden Veränderungen. Arranz-Marquez und Teus (2004) finden in ihrer Studie ein ausgeglichenes Verhältnis von langen und kurzen axialen Bulbusstrecken.

Die Vorderkammertiefe ist bei dieser Art von Glaukom nicht verkürzt (Damji et al. 2009).

2.2.3.5 Buphthalmus

Als Buphthalmus (Ochsenauge) wird ein vergrößerter Bulbus bezeichnet. In der Regel ist ein kongenitales Glaukom die Ursache. Durch den vergrößerten Augeninnendruck kommt es zur Ausdehnung der Sklera (Grehn 2003). Das hintere Augensegment ist ebenso betroffen wie die vorderen Augenabschnitte. Zwischen der Vergrößerung des Auges und der Dauer und Stärke der Druckerhöhung besteht ein direkter Zusammenhang. Durch die Verlängerung des Bulbus resultiert eine Myopie, die teilweise durch eine steilere Korneakurvatur wieder ausgeglichen wird (Francois und Goes 1981). Für den geringgradigen und mittelstarken Buphthalmus ergibt sich das Bild eines im Ganzen vergrößerten Bulbus, in dem allein die Linsendicke mit der des normalen Auges übereinstimmt. Im Gegensatz zur normalen Glaskörperwachstumskurve beginnt die Hydrophthalmuskurve bereits 2 mm über der Altersnorm, die Verteilung entspricht einer Geraden, wohingegen sich die Wachstumswerte beim gesunden Kind einem Plateau annähern (Gernet 1968).

2.3 A-Modus-Ultraschallverfahren am Tierauge

2.3.1 Anatomische Biometrie

Schiffer et al. (1982) führen ihre Messungen an narkotisierten Hunden durch und ermitteln für die Vorderkammertiefe einen durchschnittlichen Wert von $4,95 \pm 0,45$ mm, für die Linsendicke $7,14 \pm 0,3$ mm, die Glaskörperstrecke $9,51 \pm 0,31$ mm und die axiale Bulbuslänge $21,6 \pm 0,77$ mm.

Untersuchungen von Cottrill et al. (1989), die Hundeaugen mit A- und B-Modus untersuchen, zeigen signifikante Unterschiede bei der Vermessung mit Ultraschall und direkten anatomischen Messungen. Die anatomischen Messungen werden post mortem ermittelt, wobei sich die untersuchten Augen verändern.

Die Messungen in vivo zeigen bei der axialen Bulbuslänge einen signifikanten Unterschied zwischen mesocephalen und dolichocephalen Hunden. Die Ultraschall-Messungen ergeben für mesocephale Hunde eine durchschnittliche Vorderkammertiefe von $3,5 \pm 0,7$ mm, für die Linsendicke Werte von $7,6 \pm 1,5$ mm, für die Glaskörperstrecke $8,5 \pm 1,4$ mm und für die gesamte axiale Bulbuslänge $19,6 \pm 2,0$ mm. Bei dolichocephalen Rassen ergeben sich Werte von $3,7 \pm 1,1$ mm für die Vorderkammertiefe, $7,6 \pm 0,5$ mm für die Linsendicke, $9,4 \pm 1,6$ mm für die Glaskörperstrecke und $21,1 \pm 2,2$ mm für die axiale Bulbuslänge. Bei dieser Erfassung wird kein Unterschied zwischen Hunden unterschiedliche Gewichtsklassen gemacht, die untersuchten Hunde wiegen zwischen 9 und 32 kg.

Die durchschnittliche Vorderkammertiefe bei Frettchen liegt bei $1,31 \pm 0,16$ mm, die Linsendicke bei $3,42 \pm 0,15$ mm, die Glaskörperstrecke bei $2,26 \pm 0,11$ mm und die axiale Bulbuslänge bei $7 \pm 0,24$ mm (Hernández-Guerra und Rodilla 2007).

Beim Dromedar finden Osuobeni und Hamidzada (1999) eine durchschnittliche Vorderkammertiefe von 5,27 mm, eine Linsendicke von 10,93 mm, eine Glaskörperstrecke von 14,85 mm und eine axiale Bulbuslänge von 31,05 mm.

Bei Rindern werden rassespezifische Unterschiede hinsichtlich der biometrischen Daten ermittelt. Die axiale Bulbuslänge bei Holsteiner Friesen beträgt $34,6 \pm 0,9$ mm, die bei Jersey-Rindern liegt bei $32,7 \pm 1,9$ mm. Die Vorderkammertiefe wird mit $3,3 \pm 0,5$ mm bei Holsteiner Friesen, mit $3,6 \pm 0,7$ mm bei Jersey-Rindern gemessen. Die Linsendicke variiert zwischen $17,8 \pm 0,9$ mm bei Holsteiner Friesen und $19,2 \pm 1,1$ mm bei den Jersey-Rindern. Die

Glaskörperstrecke ist bei Holsteiner Friesen trotz der insgesamt größeren Bulbuslänge mit $14,6 \pm 0,9$ mm kleiner als bei den Jersey-Rindern mit $16,2 \pm 0,4$ mm (Potter et al. 2008).

Beim Vogel ist das Auge im Verhältnis zum Kopf ausgesprochen groß. Dabei ist der hintere Augenabschnitt deutlich größer als der vordere Augenabschnitt (Lawton 2002). Die axiale Bulbuslänge differiert sehr stark zwischen 8 mm beim Kiwi und 50 mm beim Strauß (Duke-Elder 1958).

2.3.1.1 Einfluss des Wachstums auf die biometrischen Daten

Nach der Geburt entwickeln sich die Augen von Hunden während der ersten 2-3 Monate rasch weiter und erreichen die Funktion eines erwachsenen Hundeauges. Während dieser Entwicklungsphase nimmt die axiale Bulbuslänge zu. Das Wachstum zeigt sich zunächst in einem rapiden Anstieg der Wachstumskurve der axialen Bulbuslänge zwischen der 2. und 9. Lebenswoche. Dann verlangsamt sich das Wachstum und die Kurve nähert sich ab der 20. Woche dann allmählich einem Plateau (Tuntivanich et al. 2007). Der Einfluss des Alters auf die axiale Bulbuslänge kann in einer Gleichung zusammengefasst werden, so dass diese nach Einsetzen des Alters in Wochen berechnet werden kann:

$$Y = e^{\mu} X^b$$

Dabei steht Y für die axiale Bulbuslänge in mm, X für das Alter in Wochen; die Konstanten $\mu = 2,3839$, $b = 0,1653$ und die Euler'sche Zahl (dargestellt durch e) finden Verwendung.

Lohmann (1994) sieht ebenfalls einen Zusammenhang zwischen dem Alter der von ihr untersuchten Hunde und den Messgrößen axiale Bulbuslänge, Vorderkammertiefe und Linsendicke. Dabei kann sie den Zusammenhang mit einer nichtlinearen Exponentialregression charakterisieren. Das Alter, in dem die Anstiegsphase der Exponentialfunktion beendet ist, unterscheidet sich je nach der Gewichtsklasse, der die Hunde zugeordnet wurden. So ist das Alter, in dem 99 % der Tiere den Endwert der Exponentialfunktion erreichen, hinsichtlich der axialen Bulbuslänge bei Tieren mit einem Gewicht von 6 - 15 kg Körpermasse 0,99 Jahre, bei Tieren der Gewichtsklasse 16 - 30 kg Körpermasse beträgt das entsprechende Alter 1,39 Jahre. Die Vorderkammertiefe ist bei Tieren bis 15 kg Körpermasse mit 0,69 Jahren erreicht, bei Tieren bis 30 kg Körpermasse mit 1,03 Jahren. Die Linsendicke wird bei den leichteren Tieren mit 1,01 Jahren erreicht, bei den schwereren mit 1,48 Jahren. Eksten und Torrang (1995) zeigen den schnellen Wachstumsanstieg bei jungen Hunden, gefolgt von einer Phase des langsameren Wachstums. Die Verringerung der Vorderkammertiefe, die vor allem durch das fort-

während Wachstum der Linse bedingt ist, scheint ihnen relevant für das Auftreten von Glaukomen.

Bei Minipferden wird ebenfalls ein Zusammenhang der biometrischen Daten mit dem Alter festgestellt. Eine positive Korrelation kann zwischen allen einzelnen Abschnitten des Auges und dem Alter gefunden werden, wobei die Linsendicke und die axiale Bulbuslänge die stärkste und direkteste Korrelation aufweisen. Die endgültige axiale Bulbuslänge bei den Minipferden ist bei 95 % der Tiere mit 2 Jahren erreicht. Sie beträgt 33,7 mm. Die Vorderkammertiefe wird mit 5,6 mm gemessen, die Linsendicke mit 10,0 mm, die Glaskörperstrecke mit 18,1 mm. Damit zeigt sich ein deutlicher Unterschied zu Pferden großer Rassen (Plummer et al. 2003).

Die axialen Distanzen des Meerschweinchens vergrößern sich logarithmisch im Verlauf des zunehmenden Alters. Ausgenommen von diesem Verhältnis ist die Linse. Das Wachstum der axialen Bulbuslänge während der ersten 30 Tage verläuft linear, danach verlangsamt sich das Wachstum (Howlett und McFadden 2007).

Die axiale Bulbuslänge bei Rhesusaffen nimmt bis zu einem Alter von 12 Jahren zu, danach ist eine Verkürzung zu verzeichnen. Die Verkürzung basiert vor allem auf einer Verringerung der Glaskörperstrecke und der Vorderkammertiefe. Die Linsendicke nimmt zu (Fernandes et al. 2003).

2.3.1.2 Einfluss der Rasse auf die biometrischen Daten

Die durchschnittliche axiale Bulbuslänge von dolichocephalen Hunden ist mit $21,2 \pm 1,3$ mm signifikant länger als die von mesocephalen Hunden mit einer durchschnittlichen Bulbuslänge von $19,9 \pm 1,2$ mm (Cottrill et al. 1989). Gaiddon et al. (1991) stellen fest, dass die Augen von Hunden großer Rassen signifikant länger sind als die kleiner Rassen.

McMullen und Gilger (2006) untersuchen die axiale Bulbuslänge bei Pferden und stellen fest, dass die axiale Bulbuslänge beim Belgischen Kaltblut mit 43,1 mm deutlich länger ist als die erhobenen Durchschnittswerte von verschiedenrassigen Pferden mit 39,23 mm. Während die Vorderkammertiefe mit 6,72 mm im Vergleich zu 5,63 mm ebenfalls deutlich abweicht, ist die Linsendicke mit 11,83 mm im Vergleich zu 11,75 mm nur geringfügig größer.

Bei Rindern werden rassespezifische Unterschiede hinsichtlich der biometrischen Daten ermittelt. Die axiale Bulbuslänge bei Holsteiner Friesen beträgt $34,6 \pm 0,9$ mm, die bei Jersey-Rindern liegt bei $32,7 \pm 1,9$ mm. Die Vorderkammertiefe wird mit $3,3 \pm 0,5$ mm bei Holsteiner Friesen, mit $3,6 \pm 0,7$ mm bei Jersey-Rindern gemessen. Die Linsendicke variiert zwi-

schen $17,8 \pm 0,9$ mm bei Holsteiner Friesen und $19,2 \pm 1,1$ mm bei den Jersey-Rindern. Die Glaskörperstrecke ist bei Holsteiner Friesen trotz der insgesamt größeren Bulbuslänge mit $14,6 \pm 0,9$ mm kleiner als bei den Jersey-Rindern mit $16,2 \pm 0,4$ mm (Potter et al. 2008).

Beim Vogel sind 3 grundsätzlich verschiedene Augenformen zu unterscheiden, die flache Form, die bei den meisten Vögeln vorkommt, die Kegelform, die bei Greifvögeln und Krähen vorkommt und die Tubusform bei Eulenvögeln (Lawton 2002). Kornea- und Fundusregion sind dabei ähnlich, die Unterschiede liegen im Bereich der Ziliarregion zwischen Ora serrata und Annulus conjunktivalis. Die Größe des Augapfels variiert von 8 mm beim Kiwi bis zu 50 mm beim Strauß (Korbel 1991).

2.3.1.3 Einfluss der Augenseite auf die biometrischen Daten

Sowohl Cottrill et al. (1989), Gaiddon et al. (1991) als auch Lohmann (1994) und Tuntivanich et al. (2007) finden in ihren Untersuchungen keine statistisch relevanten Unterschiede bei der Vermessung von rechten und linken Augen bei Hunden. Untersuchungen an Mini-Pferden zeigen ebenfalls keinen signifikanten Unterschied rechter und linker Augen (Plummer et al. 2003). Fernandes et al. (2003) zeigen vergleichbare Daten für rechte und linke Augen von Rhesusaffen und auch beim Seidenaffen gibt es keine signifikanten Seitenunterschiede (Graham und Judge 1999).

2.3.1.4 Einfluss des Geschlechts auf die biometrischen Daten

Zwischen der axialen Bulbuslänge von männlichen und weiblichen Hunden sehen sowohl Cottrill et al. (1989) als auch Gaiddon et al. (1991) keinen signifikanten Unterschied. Auch die Untersuchungen von Lohmann (1994) und Tuntivanich et al. (2007) zeigen keinen Einfluss des Geschlechts auf die axiale Bulbuslänge. Schiffer et al. (1982) finden in ihren Messungen einen signifikanten Unterschied zwischen männlichen und weiblichen Tieren, wobei die Augen von Rüden in der axialen Bulbuslänge deutlich größer sind als die von Hündinnen. In der Untersuchung von Plummer et al. (2003) zu biometrischen Daten von Mini-Pferden wird ebenfalls kein Unterschied zwischen männlichen und weiblichen Tieren gefunden. Bei Frettchen zeigt sich ein Unterschied der Linsendicke hinsichtlich des Geschlechts, wobei der Autor darauf hinweist, dass dieser auch vom Gewicht der Tiere abhängig ist, welches bei männlichen Tieren größer ist als bei weiblichen. Die anderen biometrischen Werte zeigen keine statistisch signifikante Korrelation (Hernández-Guerra und Rodilla 2007).

Meerschweinchen weisen keine geschlechtsspezifischen Unterschiede hinsichtlich der biometrischen Daten auf (Zhoua et al. 2006).

Untersuchungen an Rhesusaffen zeigen längere axiale Bulbuslängen bei männlichen Tieren (Fernandes et al. 2003).

2.3.1.5 Einfluss der Größe und des Gewichts auf die biometrischen Daten

Lohmann (1994) findet einen signifikanten Unterschied in den biometrischen Daten von Hunden verschiedener Gewichtsklassen. Bei der Einteilung der Hunde in Tiere mit weniger als 5 kg Körpermasse, 6 - 15 kg Körpermasse, 16 - 30 kg Körpermasse, 31 - 50 kg Körpermasse und über 50 kg Körpermasse zeigt sich jeweils ein Anstieg von axialer Bulbuslänge, Vorderkammertiefe und Linsendicke von einer Gewichtsguppe zur nächsten. Dieser Anstieg verläuft allerdings nicht linear. So ist der Anstieg der Werte vor allem von der Gewichtsguppe der Hunde unter 5 kg Körpermasse zu der Gruppe der Hunde mit einem Gewicht von 6 - 15 kg Körpermasse besonders hoch. Gaiddon et al. (1991) finden einen signifikanten Unterschied in der axialen Bulbuslänge von großen und kleinen Hunden. Die Bulbuslänge ist bei großen Rassen länger, die Korneakurvatur hingegen zeigt flachere Werte.

Bei Kaninchen wird kein Zusammenhang zwischen Gewicht und Augengröße gefunden (Prince 1964).

2.3.1.6 Einfluss des Intraokular drucks auf die biometrischen Daten

Die Reduktion des Augeninnendrucks um 4 - 5 mmHg mit Hilfe von drucksenkenden Augentropfen zeigt keine signifikanten Auswirkungen auf die Größe oder die Wachstumsgeschwindigkeit der Augen von jungen Kaninchen (Nastri et al. 1985).

Experimentelle Drucksteigerungen um bis zu 32 mmHg an enukleierten Augen von Kamelen führen zu keiner signifikanten Veränderung der biometrischen Daten (Osuobeni und Hamidzada 1999).

Lohmann (1994) weist nach, dass glaukomatöse Augen eine hochsignifikant längere axiale Bulbuslänge aufweisen als gesunde. Alle als Glaukom eingestuft Augen leiden unter einem Augeninnendruck von mindestens 25 mmHg. Die Vorderkammer der betroffenen Augen ist vertieft, die Linsendicke herabgesetzt. Es besteht kein Zusammenhang zwischen der axialen Bulbuslänge und der Höhe des Intraokular drucks.

2.3.1.7 Einfluss der Refraktion auf die biometrischen Daten

Die Anforderungen an die Refraktion sind tierartspezifisch sehr unterschiedlich. So sind bei einigen Tieren im Ruhezustand die Augen auf die Nähe eingestellt und damit myop, bei der Mehrzahl der Tierarten fokussiert das Auge in Ruhe auf die Ferne (Ott 2006).

Die Studie von Vilupuru und Glasser (2003), bei der die Augen von Rhesusaffen untersucht werden, ergibt einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Refraktion und biometrischen Daten. Fernandes et al. (2003) untersuchen ebenfalls die Refraktion von Rhesusaffen. Dabei stellen sie fest, dass die interindividuellen Unterschiede der einzelnen Tiere ab einem Alter von 15 Jahren stark zunehmen. Bei älteren Tieren kommen sowohl Hyperopie als auch Myopie vermehrt vor.

Bei Spitzhörnchen weisen Norton et al. (2006) nach, dass eine zunehmende Glaskörperstrecke eine bestehende Hyperopie vermindert. Zunehmende Glaskörperstrecken an zunächst emmetropen Augen resultieren in Myopie (McBrien und Norton 1992).

2.3.2 Funktionelle Biometrie

2.3.2.1 Implantation von Kunstlinsen

Gaiddon et al. (1991) berechnen die optimale Stärke für Intraokularlinsen beim Hund. Dazu erfassen sie mit Hilfe des A-Modus Verfahren die biometrischen Daten des Hundeauges und bestimmen die korneale Krümmung anhand der Keratometrie. Dabei stellen sie fest, dass eine Stärke von 40 Dioptrien erforderlich ist. Die zugrunde gelegte Formel lautet

$$P = N/L - C - NK/N - KC$$

Dabei steht P für die zur Emmetropisation benötigte Dioptrienzahl, N für den refraktiven Index des Kammerwassers und Vitreus (1,336), L für die axiale Bulbuslänge in mm, K für die korneale Krümmung in Dioptrien und C für die postoperative Vorderkammertiefe in mm (angenommen bei Implantation der Kunstlinse).

Die korneale Krümmung in Dioptrien wird von ihnen beim Hund mit Werten von $39,94 \pm 2,61$ gemessen.

Davidson et al. (1993) können bei Hunden, denen verschieden starke Intraokularlinsen implantiert werden feststellen, dass bei Linsen von 14,5 Dioptrien bis 38 Dioptrien die Refraktion mit der hohen Dioptrienzahl am besten korrigiert wurde. Sie erreichen eine Refraktion von 0,5 bis 2,5 Dioptrien und in keinem Fall eine Überkorrektur.

Mit Intraokularlinsen von 40 Dioptrien können die meisten Hunde auf bis zu 1 bis 2 Dioptrien emmetropisiert werden (Davidson 2001).

Die okulären Dimensionen des Pferdes werden von McMullen und Gilger (2006) untersucht. Sowohl die axiale Bulbuslänge als auch die Korneakurvatur-Messungen sollen die Errechnung der benötigten Brechkraft von einzusetzenden Intraokularlinsen ermöglichen. Dazu werden die mit A-Modus gemessene axiale Bulbuslänge, die mit einem Keratometer gemessene korneale Krümmung und die geschätzte postoperative Vorderkammertiefe in die theoretische Binkhorst- und Retzlaff-Gleichung eingesetzt. Die durchschnittliche axiale Bulbuslänge beträgt $39,23 \text{ mm} \pm 1,26 \text{ mm}$, die Vorderkammertiefe $5,63 \pm 0,86 \text{ mm}$, die Linsendicke $11,75 \pm 0,8 \text{ mm}$. Die postoperative Vorderkammertiefe berechnen sie, indem sie die präoperative Vorderkammer mit der Hälfte der Linsendicke addieren. Zusätzlich kalkulieren sie die Vorderkammer 2 mm anterior und 2 mm posterior des ursprünglichen Linsenzentrums, um den Einfluss der Position der Intraokularlinse zu berechnen. Je nach eingesetztem Wert erhalten sie als Wert für die einzusetzende Linse mit der theoretischen Formel nach Binkhorst eine Dioptrienzahl von $29,91 \pm 2,5$ Dioptrien bei Berechnungen mit dem Zentrum der Linse, bei Berechnungen mit einer Position 2 mm vor dem Linsenzentrum $27,13 \pm 2,27$ Dioptrien, bei Berechnungen mit einer Position 2 mm hinter dem Linsenzentrum $33,18 \pm 2,78$ Dioptrien. Die Ergebnisse bei Einsetzen derselben Werte in die theoretische Gleichung nach Retzlaff unterscheiden sich nur wenig. Insgesamt wird eine ungefähr benötigte Dioptrienzahl von 30 Dioptrien für Pferde angenommen.

2.3.2.2 Akkommodation

Die Akkommodationsfähigkeit bei Tieren ist artspezifisch sehr unterschiedlich. Amphibisch lebende Tiere zeigen eine extreme Akkommodationsfähigkeit der Linse, da die Brechkraft der Kornea bei Eintritt ins Wasser wegen der geringen Unterschiede der Lichtleitung von Wasser und Kornea stark nachlässt. Tiere, die nachtaktiv sind, zeigen wenig Akkommodationsfähigkeit der Augen, da sie in der Regel lediglich im näheren Umfeld sehen können. Tiere die sowohl nachtaktiv als auch tagaktiv sind, zeigen hingegen eine sehr hohe Akkommodationsfähigkeit (Ott 2006).

Schachar et al. (2007) untersuchen bei Vertebraten den Zusammenhang von Linsendimension und möglicher Akkommodation. Ihre Ergebnisse zeigen, dass Linsen, die dünn sind und einen großen äquatorialen Durchmesser zeigen, stärker akkommodationsfähig sind als dicke, kurze Linsen.

Vilupuru und Glasser (2003) untersuchen die Akkommodation bei Rhesusaffen. Dazu führen sie parallel zur Stimulation der Akkommodation Messungen des vorderen Augenabschnittes mit dem A-Modus-Ultraschallverfahren durch. Es ergeben sich relativ höhere Veränderungen der Augenabschnitte bei stärkerer Akkommodation. Wie in der Humanmedizin finden auch sie eine Vergrößerung der Linsendicke mit Verschiebung des Linsenzentrums nach vorne. Damit verbunden ergibt sich eine flachere Vorderkammer. Die Veränderung der Linsendicke ist stärker als die der Vorderkammer.

Die Akkommodationsfähigkeit bei dieser Spezies lässt, ähnlich wie beim Menschen, mit zunehmendem Alter nach. In einer Studie wird eine Verringerung der Bewegung von Linse und Ziliarkörper festgestellt. Auch die Geschwindigkeit der Ziliarkörperbewegung lässt mit dem Alter nach. Die Verringerung der Linsenbewegung könnte eine Konsequenz des Verlustes an Elastizität und Verhärtung der Linse sein. Die Autoren vermuten jedoch eine Komponente außerhalb der Linse und gehen davon aus, dass die nachlassende Aktivität des Ziliarkörpers für die Presbyopie mitverantwortlich ist (Croft et al. 1998).

2.3.2.3 Emmetropisation

Graham und Judge (1999) stellen fest, dass bei Tieren die Augen zum Zeitpunkt der Geburt hyperop sind. Erst durch die weitere Entwicklung werden die Refraktionsfehler korrigiert. Zhoua et al. (2006) zeigen, dass die Emmetropisation beim Meerschweinchen im Verlauf des Wachstums vor allem durch die Anpassung der Glaskörperstrecke erfolgt. Dies geschieht zum größten Teil während der ersten drei Lebenswochen, danach verlangsamt sich der Prozess deutlich. Die Korrelation zwischen Linsendicke und axialer Bulbuslänge lässt die Autoren vermuten, dass die Linsendicke das Wachstum des Bulbus bestimmt. Das Wachstum des Glaskörpers nimmt den größten Teil des Gesamtwachstums des Auges ein und reguliert damit die Emmetropisation.

Howlett und McFadden (2007) führen die Emmetropisation auch auf die Vergrößerung des Auges zurück, sehen den entscheidenden Punkt aber in der resultierenden abnehmenden Hornhautkrümmung. Kurz nach der Geburt liegt die Refraktion noch bei 227 Dioptrien. Sie reduziert sich innerhalb der ersten 100 Tage durch das Wachstum auf 19,7 Dioptrien.

Bei Spitzhörnchen stellen Norton et al. (2006) fest, dass die Emmetropisation abhängig ist von der Stimulation durch optische Reize. Bleiben optische Reize aus, wie zum Beispiel bei der Haltung in Dunkelheit, verlängert sich das Auge stärker als normal und eine Myopie entsteht.

2.3.2.4 Myopie

Bei Augen von Affen, Küken und Spitzhörnchen, die in frühen Entwicklungsstadien keine visuellen Reize bekommen, kann man feststellen, dass der Augapfel sich verlängert und eine Myopie entwickelt (Wiesel und Raviola 1977, McBrien et al. 1993, Norton et al. 2006). Diese Verlängerung der axialen Bulbuslänge wird vor allem durch die Verlängerung der Glaskörperstrecke bewirkt. Als Ursache wird eine dauerhafte Akkommodation vermutet. Dieser Effekt wird bei Küken durch die Gabe von Zykloplegika, wie Atropin, aufgehalten. Hierbei wird jedoch festgestellt, dass neben der Glaskörperstrecke auch die vorderen Augenabschnitte langsamer wachsen. Es wird vermutet, dass eine Veränderung von retinalen Neurotransmittern, die das Wachstum des Auges beeinflussen, verantwortlich ist (McBrien et al. 1993).

2.3.2.5 Hyperopie

Bei Meerschweinchen stellen Zhoua et al. (2006) fest, dass die Augen nach der Geburt zunächst eine Hyperopie aufweisen. Im Verlauf der ersten drei Lebenswochen emmetropisieren die Augen sehr stark, danach verläuft die Veränderung der Refraktion deutlich langsamer. Die Emmetropisation wird vor allem durch die Verlängerung der Glaskörperstrecke bewirkt. Der Endzustand mit + 3,27 Dioptrien wird von den Autoren als aufgrund der Käfighaltung eintretende Myopie betrachtet, die durch die mangelnde Weitsicht und häufige Akkommodation im Nahbereich auftritt. Eine parallele Korrelation zwischen Zunahme der Linsendicke und der axialen Bulbuslänge während der ersten fünf Wochen lässt vermuten, dass das Linsenwachstum das Wachstum der axialen Bulbuslänge bestimmt.

2.3.2.6 Einfluss von Medikamenten auf biometrische Daten

Bei Kaninchen werden Versuche zum Wachstum der Augen bei intraokulärer Hypotonie angestellt. Drucksenkende Augentropfen (Timolol-Maleat) werden zweimal täglich verabreicht. Das Wachstum der Augen ist trotz dieser medikamentellen Drucksenkung um 4 - 5 mmHg unverändert im Vergleich zu nicht behandelten Augen (Nastri et al. 1985).

Bei Primaten kann festgestellt werden, dass bei mangelndem Visus eine Verlängerung der axialen Bulbuslänge entsteht, die vor allem auf einer Verlängerung der Glaskörperstrecke basiert und zu einer Myopie führt. Dieser Effekt der Verlängerung der Bulbuslänge wird durch die Gabe von Apomorphin-Augentropfen verhindert. Die Autoren vermuten, dass retinales Dopamin mit dem Wachstum des Auges eng verknüpft ist und daher die Gabe von Dopamin-Rezeptor-Agonisten das Wachstum hemmt (Iuvone et al. 1991).

2.3.3 Biometrie am pathologisch veränderten Auge

2.3.3.1 Mikrophthalmus

Mikrophthalmien treten in Verbindung mit einer Fehlentwicklung des primären optischen Vesikels auf. Bei Schweinen und Hunden ist diese Veränderung häufig, bei ersteren oft als Folge von Vitamin-A-Mangel der Muttersau. Die Gabe von Griseofulvin bei trächtigen Hündinnen und Katzen kann zum Mikrophthalmus führen. Bei Hunden ist er meist Teil der Collie Eye Anomaly, einer erblichen Erkrankung der britischen Hütehunde. Bei Rindern ist ein erblicher Mikrophthalmus bekannt. Bei allen Spezies sind häufig multiple okuläre Anomalien vergesellschaftet und stehen im Verdacht, erblich zu sein (Slatter 2001). Bei Inzucht-Linien von schwarzen Mäusen wird das Auftreten von Mikrophthalmus mit einer Häufigkeit von 12 % gesehen (Smith et al. 1994). Bei Zwergschnauzern wird die Erblichkeit eines mit Katarakt vergesellschafteten Mikrophthalmus vermutet (Shastry und Reddy 1994). Der Australian Shepherd weist eine Mikrophthalmie kombiniert mit Kolobomen auf. Der Erbgang wird hier als unvollständig penetrierend rezessiv festgestellt (Gelatt et al. 1981). Der Mikrophthalmus beim Pferd kann sonographisch diagnostiziert werden. Die Vermessung des betroffenen Auges wird mit der Gegenseite oder altersgleichen Fohlen verglichen (Scotty et al. 2004).

2.3.3.2 Phthisis bulbi

Gründe für eine Phthisis bulbi bei Hund und Katze können primäre oder sekundäre Glaukome, starke intraokuläre Entzündungen, perforierende Verletzungen oder stumpfe Traumata sein (Mould 2002). Bei lang andauerndem Glaukom kann als Folge des Drucks auf den Ziliarkörper dieser atrophieren. Die Zerstörung des Ziliarkörpers kommt einerseits aufgrund des direkten Drucks, aber auch durch die druckbedingte Ischämie zustande. Es wird weniger Kammerwasser produziert, eine Hypotension entsteht. Eine Phthisis bulbi entsteht (Bedford 1980).

Die Phthisis bulbi nach rezidivierender Uveitis beim Pferd wird von Scotty et al. (2004) sonographisch anhand reduzierter Vorderkammertiefe und Glaskörperstrecke diagnostiziert. Grahn und Cullen (2000) finden die Phthisis bulbi bei Pferden häufig nach phakoklastischer Uveitis. Gelatt (2001) beschreibt die Phthisis als häufigen Zustand bei älteren Pferden, der nach Trauma, chronischer Uveitis oder Glaukom auftritt. Alle diese Umstände nehmen Einfluss auf die Produktion des Kammerwassers und können so zu einer Verkleinerung des Bulbus führen.

2.3.3.3 Linsenveränderungen

Katarakt

Katarakte beim Hund werden nach dem Zeitpunkt ihrer Entstehung als kongenital, juvenil oder senil bezeichnet. Die Lokalisation des Transparenzverlustes ist entscheidend für die Zuordnung zu einer kapsulären, subkapsulären, kortikalen oder nukleären Katarakt. Die Ätiologie kann mitunter nicht geklärt werden (erblich bedingt, metabolisch, traumatisch oder toxisch).

Das Reifestadium sollte als wichtige Information in der Diagnose festgehalten werden. Eine incipiente Katarakt zeigt nur eine geringgradige Trübung der Linse ohne nennenswerte Einschränkung des Visus. Dies ist in der Regel das Anfangsstadium einer Katarakt. Bei der immaturen Katarakt kann der Fundus noch eingesehen werden, dieses Stadium ist aber schon weiter fortgeschritten und zieht Visuseinschränkungen nach sich. Ein Anschwellen der Linse ist hier möglich (Slatter 2001b).

Das Auftreten von Katarakt bei Hunden ist unabhängig vom Geschlecht. Grundsätzlich nimmt das Auftreten von Linsentrübungen mit dem Alter zu. Dabei treten zunächst kortikale Trübungen auf, später dann nukleäre. Ein Unterschied zum Auftreten von Katarakt bei Hunden konnte in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Lebensspanne der Rassen gefunden werden. Bei Hunderassen, die durchschnittlich älter werden, tritt die Linsentrübung später im Leben auf. Diese Veränderungen sind unabhängig von erblichen Kataraktformen. Bei Hunderassen, die eine erbliche Form der Katarakt aufzeigen, verläuft die Kurve, die das Auftreten von Katarakt in Abhängigkeit vom Alter zeigt, deutlich unterschiedlich mit früherem Beginn. Kortikale Katarakte treten bei Hunden durchschnittlich mit $10,8 \pm 3$ Jahren auf, nukleäre Katarakte erst mit $13,6 \pm 3$ Jahren (Williams et al. 2004). Die Häufigkeit von Katarakten generell und altersbedingten Linsentrübungen ist vergleichbar mit der beim Menschen. Bei Glatthaar Fox Terriern, Havanesern, Bichon Frisé, Boston Terrier, Zwergpudeln, Silky Terriern und Zwergschnauzern treten Katarakte insgesamt häufiger auf als bei anderen Rassen. Das Vorkommen von rassebedingten Katarakten ist in Nordamerika der Hauptgrund für Visusbeeinträchtigungen und Blindheit beim Hund (Gelatt und MacKay 2005).

Der Hund ist besonders anfällig für die Kataraktbildung bei Diabetes mellitus. Bei Erstvorstellung von diabetischen Hunden haben bereits 60 % eine Linsentrübung entwickelt. Im Lauf der Erkrankung nimmt der Prozentsatz der von Katarakt betroffenen Patienten weiter zu. Die Energieversorgung der Linse läuft hauptsächlich über die anaerobe Glykolyse. Bei ansteigendem Zuckergehalt in der Linse ist der begrenzte Vorrat an dem limitierenden Enzym Hexoki-

nase bald verbraucht. Es kommt dann zur Umschaltung auf den Sorbitol-Zyklus, der normalerweise nur 5 % der Glukose verarbeitet. Durch das Enzym Aldose-Reduktase werden Polyole gebildet, die nicht gut durch Zellmembranen diffundieren können. Es kommt zur Akkumulation in der Linse, zum osmotischen Gradienten und nachfolgend zum Wassereinstrom. Die Linse schwillt an und trübt sich gleichzeitig ein (Martin 1999).

Bei kataraktösen Augen zeigen sich keine Veränderungen hinsichtlich der gesamten axialen Bulbuslänge und der Vorderkammertiefe. Incipiente Katarakte haben eine verringerte Linsendicke zur Folge. Bei der immaturen Katarakt ist die Linsendicke der Augen ebenfalls deutlich geringer als bei gesunden Augen. Bei Augen mit maturer Katarakt zeigt sich eine vergrößerte Linsendicke. Die Linsendicke nimmt im Verlauf der hypermaturen Katarakt wieder signifikant ab. Insgesamt zeigen die Augen mit kataraktös veränderten Linsen größere Standardabweichungen (Lohmann 1994).

Williams (2004) findet eine signifikante Zunahme der Linsendicke bei Hunden mit diabetischer Katarakt. Die Vorderkammertiefe ist dementsprechend geringer. Diesen Umstand nimmt der Autor als Ursache für mögliche Drucksteigerungen bei diabetischer Katarakt an. Bei immatur getrübbten Linsen findet er lediglich einen Trend zu dünneren Linsen und tieferer Vorderkammer, diese Unterschiede sind in seiner Untersuchung aber nicht signifikant. Ebenfalls nicht signifikant ist der Trend zu dickeren Linsen und flacherer Vorderkammer bei maturer Katarakt. Die axiale Bulbuslänge findet er nur bei jungen Hunden mit kongenitaler Katarakt geringer als bei gesunden Augen, die Katarakt hat aber offensichtlich keinen direkten Einfluss auf die axiale Bulbuslänge. Generell ist der Einfluss des Alters auf die Linsendicke nachvollziehbar. Mit zunehmendem Alter nimmt die Linsendicke zu.

Mikrophakie

Bei Hunden tritt die Mikrophakie zusammen mit anderen okulären Missbildungen auf. So kommen kongenitale Katarakte und Mikrophthalmien beim Zwergschnauzer gemeinsam mit Mikrophakien vor (Gelatt et al. 1983). Bei Dobermännern wird die Mikrophakie zusammen mit der Mikrophthalmie gesehen (Peiffer und Fischer 1983).

2.3.3.4 Glaukom

Grundsätzlich finden sich beim Hund, ähnlich wie beim Menschen, zwei Typen von Glaukomen, das Primärglaukom und das Sekundärglaukom. Das Primärglaukom basiert auf einer Abflussstörung des Kammerwassers. Dabei kann der iridokorneale Winkel verengt und/ oder das Ligamentum pectinatum dysplastisch angelegt sein. Nur selten und nur bei wenigen Ras-

sen wie dem Beagle, Pudel und Elchhund tritt das Offenwinkelglaukom auf. Die hohe Prävalenz der Primärglaukome bei einigen Rassen lässt eine genetische Basis vermuten. Zu den gefährdeten Rassen gehören der Amerikanische Cocker Spaniel, Basset Hound, Chow Chow, Shar-Pei, Boston Terrier, Drahthaarterrier, Norwegischer Elchhund, Sibirian Husky, Cairn Terrier und Zwergpudel. Dabei wird bei den meisten Rassen ein gehäuftes Auftreten der Erkrankung bei weiblichen Tieren festgestellt (Gelatt und MacKay 2004). Bei Samojeden sehen Ekestén und Torrang (1995) die Gefahr des Primärglaukoms mit zunehmendem Alter aufgrund der abnehmenden Vorderkammertiefe. Diese wird durch das kontinuierliche Wachstum der Linse bedingt.

Sekundärglaukome sind Folge von Linsenluxationen, Uveitiden, Neoplasien, Linsenschwellungen oder traumatischen Einflüssen (Bedford 1980). Beim Sekundärglaukom handelt es sich um eine für den Hund häufige Erkrankung. Mit Augenerkrankungen vorgestellte Hunde leiden zu 6,9 % unter einem Sekundärglaukom. Häufige Gründe für das Sekundärglaukom sind Uveitis und Linsenluxationen. Während weder Alter noch Geschlecht einen Einfluss auf die Häufigkeit nehmen, sind die Unterschiede der Rassen sehr deutlich. Parson Russell Terrier, Pudel, Boston Terrier, Cocker Spaniel, Rhodesian Ridgebacks und Australian Cattle Dogs sind im Vergleich zur sonstigen Population besonders häufig betroffen (Johnsen et al. 2006). Gelatt und MacKay (2004b) finden in 81 % aller Sekundärglaukome eine Katarakt als Ursache. Auch sie finden einige Rassen als prädisponiert, so den Amerikanischen Cocker Spaniel, Boston Terrier, Pudel, Englische Springer Spaniel, Bichon Frisé und Labrador Retriever. Die nächsthäufige Ursache bei ihrer Untersuchung ergibt die Linsenluxation, gefolgt von Uveitis nach Katarakt-Operation oder ohne bekannte Ursache, Einblutungen ins innere Auge und Neoplasien.

2.3.3.5 Buphthalmus

Ein anhaltend erhöhter Augeninnendruck zerstört die elastische Natur der Augapfels und führt zur Vergrößerung des Bulbus (Bedford 1980, Mould 2002). Vor allem bei jungen Tieren erfolgt die Ausdehnung des Bulbus relativ schnell (Mould 2002).

Lohmann (1994) sieht in ihren Untersuchungen einen hochsignifikanten Anstieg der axialen Bulbuslänge bei Augen mit Glaukom. Die Vorderkammertiefe ist ebenfalls tiefer als bei gesunden Hundeaugen, wobei diese Unterschiede nur schwach signifikant sind. Die Linsendicke glaukomatöser Augen liegt unter denen gesunder Augen, dieser Unterschied ist aber nicht signifikant.

Bei Kaninchen ist ein erblich bedingtes Glaukom bekannt, dass zu einer Vergrößerung der Bulbi führt (Gelatt 2001).

Bei Fohlen kommt in seltenen Fällen ein kongenitales Glaukom vor, dessen Folge ein Buphthalmus ist (Gelatt 2001). Bei Pferden kann eine Vergrößerung des Auges durch Glaukom ebenfalls durch Ultraschall diagnostiziert werden (Scotty et al. 2004).

2.4 A-Modus-Ultraschallverfahren am Katzenauge

2.4.1 Anatomische Biometrie

Rose et al. (1974) ermitteln bei ihren Messungen an Katzenaugen mittels A-Modus eine durchschnittliche axiale Bulbuslänge von 20,43 mm mit Variationen von 19,5 bis 22 mm. Gilger et al. (1998b) ermittelt die biometrischen Daten der Augen von 25 Katzen mit dem A-Modus. Dabei ist die axiale Bulbuslänge $20,98 \pm 0,57$ mm, die Vorderkammertiefe $4,97 \pm 0,57$ mm, die Linsendicke $7,89 \pm 0,19$ mm.

2.4.1.1 Einfluss des Wachstums auf die biometrischen Daten

Die axiale Bulbuslänge erreicht im Alter von sechs Monaten die Werte von erwachsenen Tieren. In diesem Alter ist die volle Funktionsfähigkeit und Sehschärfe gegeben (Thorn et al. 1976). Die axiale Bulbuslänge von Katzenwelpen im Alter von einem Monat liegt bei etwa 13 mm. Der Bulbus verlängert sich auf 20 - 22 mm im Alter von sechs Monaten. In dieser Zeit ist das Wachstum von Korneadicke mit 29 ± 11 %, Linsendicke mit 30 ± 9 % und Glaskörperstrecke mit 20 ± 7 % relativ moderat. Das Wachstum der Vorderkammerstrecke ist mit 183 ± 53 % der entscheidende Anteil an der Zunahme der axialen Bulbuslänge (Hendrickson und Rosenblum 1985).

Moodie et al. (2001) messen die zentrale Korneadicke mithilfe von Ultraschall-Biomikroskopie und ermitteln Werte von $0,567 \pm 0,012$ mm für erwachsene Katzen. Ein Wachstum der Korneadicke stellen die Autoren während der ersten 4 Lebensmonate fest.

2.4.1.2 Einfluss der Rasse auf die biometrischen Daten

In den Untersuchungen von Gilger et al. (1998b) werden lediglich gemischtrassige Tiere untersucht. Dabei ist unklar, welchen Rassen die Mischlinge entstammen. Nach der zur Verfügung stehenden Literatur liegt keine Untersuchung vor, die rasseabhängige Unterschiede der biometrischen Daten von Katzenaugen untersucht.

2.4.1.3 Einfluss der Augenseite auf die biometrischen Daten

Die Auswertung der Untersuchung von Hendrickson und Rosenblum (1985), bei der biometrische Daten von fünf Katzenwelpen erhoben werden, die ohne Beeinflussung durch Medi-

kamente oder Operationen aufwachsen, zeigt minimale Unterschiede der axialen Bulbuslänge beider Augen. Die Differenz geht nicht über 1/10 mm hinaus.

Gilger et al. (1998, 1998b) finden keine signifikanten Unterschiede bei der Vermessung beider Augen in zwei unterschiedlichen Studien. Dabei werden einmal 25 Katzen und einmal 8 Katzen untersucht. Auch der Vergleich beider Seiten von Katzenaugen durch Rose et al. (1974) zeigt keine Unterschiede.

2.4.1.4 Einfluss des Geschlechts auf die biometrischen Daten

Nach der zur Verfügung stehenden Literatur liegt keine Untersuchung vor, die geschlechtsabhängige Unterschiede der biometrischen Daten von Katzenaugen untersucht.

2.4.1.5 Einfluss der Größe und des Gewichts auf die biometrischen Daten

Nach der zur Verfügung stehenden Literatur liegt keine Untersuchung vor, die gewichtsabhängige Unterschiede der biometrischen Daten von Katzenaugen untersucht.

2.4.1.6 Einfluss des Intraokulardrucks auf die biometrischen Daten

Purnell und Sokollu (1962) stellen fest, dass die axiale Bulbuslänge abhängig vom Intraokulardruck ist. Dazu verändern sie experimentell den Augeninnendruck von enukleierten Augen und stellen dann Vermessungen der axialen Bulbuslänge an. Die stärksten Veränderungen der Bulbuslänge stellen sie im niedrigen Druckbereich von 5 bis 15 mmHg fest. Die Veränderungen bei Druckschwankungen im Normbereich der Katze von 5 bis 20 mmHg liegen für die axiale Bulbuslänge bei maximal 35 µm.

2.4.1.7 Einfluss der Refraktion auf die biometrischen Daten

Hendrickson und Rosenblum (1985) finden, dass die Vorderkammertiefe der Abschnitt des Auges ist, der prozentual am meisten Wachstum während der ersten sechs Monate aufweist. Daraus schließen sie, dass die Vorderkammertiefe den größten Einfluss auf die Regulation der Refraktion während des Wachstums hat. Die zweitwichtigste Komponente, die Glaskörperstrecke, ist für die Feinjustierung verantwortlich. In der Untersuchung von Rose et al. (1974) wird gezeigt, dass sowohl hyperope als auch myope Augen die gleiche durchschnittliche Bulbuslänge von 20,44 mm bzw. 20,45 mm aufweisen. Die Autoren gehen davon aus, dass die Länge des Augapfels nicht entscheidend ist für die Refraktion, sondern die Veränderung der Krümmung der brechenden Medien, insbesondere der Linse.

Gilger et al. (1998) untersuchen die Refraktion von Katzen mit Hilfe der Skiaskopie und finden heraus, dass die durchschnittliche Refraktion bei $0,12 \pm 0,18$ Dioptrien liegt. Damit sind die Augen fast emmetrop.

Belkin et al. (1977) finden in ihrer Untersuchung von Katzen mit unterschiedlichen Akkommodationsanforderungen kaum emmetrope Augen. Katzen, die in Käfigen gehalten werden, zeigen zu 75 % eine Myopie mit durchschnittlich $-0,8$ Dioptrien. Straßenkatten hingegen weisen in 87,5 % der Fälle eine Hyperopie mit durchschnittlich $1,4$ Dioptrien auf. Die axiale Bulbuslänge ist auch hier gleich.

2.4.2 Funktionelle Biometrie

2.4.2.1 Implantation von Kunstlinsen

Zur Errechnung der nach Kataraktoperationen benötigten Intraokularlinsen erfassen Gilger et al. (1998) bei 25 lebenden gemischtrassigen Katzen und 10 Augen von euthanasierten Katzen sowohl die biometrischen Längen der Katzenaugen als auch die korneale Krümmung. Sie ermitteln $20,91 \pm 0,53$ mm für die axiale Bulbuslänge, $5,07 \pm 0,36$ mm für die Vorderkammertiefe und $7,77 \pm 0,23$ mm für die Linsendicke. In den Augen der toten Katzen werden signifikant niedrigere Werte gemessen.

Um die für die Humanmedizin gebräuchlichen theoretischen Formeln zur Errechnung der benötigten postoperativen Linsenstärke anwenden zu können, ermitteln sie die kornealen Krümmungen und postoperative Vorderkammertiefe. Dabei ergeben sich Werte von $38,93 \pm 0,73$ für die korneale Krümmung.

Moodie et al. (2001) berechnen die korneale Krümmung bei Katzen in verschiedenem Alter, beginnend mit Welpen im Alter von neun Wochen. Die korneale Krümmung beträgt zunächst $54,51 \pm 1,02$ Dioptrien. In den nächsten drei Monaten nimmt die Krümmung stark ab bis auf $44,96 \pm 0,90$ Dioptrien. Danach folgt ein langsamer Abfall bis zum Alter von 12 - 15 Monaten auf einen Wert von $39,9 \pm 0,42$ Dioptrien. Die Autoren entwickeln eine theoretische Formel, um die korneale Krümmung als Funktion des Alters wiederzugeben:

$$K = 39,83 + 26,87 \exp(-0,074 w)$$

Dabei entspricht K der kornealen Krümmung in Dioptrien und w dem Alter der Katzen in Wochen.

Die postoperative Vorderkammertiefe wird von Gilger et al. (1998) in ihrer Studie berechnet, indem sie den Abstand von der Kornea zur hinteren Linsenkapsel messen. Für die einzuset-

zende Intraokularlinse werden dann 2 mm Dicke wieder hinzugerechnet. In einem zweiten Ansatz werden zur Ermittlung der postoperativen Vorderkammertiefe in die Augen von euthanasierten Tieren Intraokularlinsen implantiert und danach die resultierende Vorderkammertiefe gemessen. Je nach verwendetem Wert ist die berechnete Dioptrienzahl für die Intraokularlinse stark verschieden.

Gilger et al. (1998) nutzen zur Berechnung der Intraokularlinse drei verschiedene gebräuchliche theoretische Gleichungen aus der Humanmedizin (nach Binkhorst 1978, Retzlaff et al. 1990 und Hoffer 1993). Während bei Einsetzen der Werte mit der vorhergesagten Vorderkammertiefe in die theoretischen Formeln eine Dioptrienzahl von 73 bis 76 Dioptrien je nach verwendeter Formel herauskommt, wird bei Einsetzen der tatsächlich postoperative gemessenen Vorderkammertiefe eine Dioptrienzahl von 53 bis 55 Dioptrien errechnet.

In einer weiteren Studie berechnen Gilger et al. (1998) experimentell die benötigte Dioptrienzahl. Sie untersuchen nochmals die biometrischen Daten von Katzenaugen, also die axiale Bulbuslänge, Vorderkammertiefe und die korneale Krümmung. Die Refraktion der Katzenaugen wird vor der Operation mit Hilfe der Skiaskopie gemessen.

Dann setzen die Autoren experimentell Intraokularlinsen mit verschiedenen Dioptrienzahlen ein und die Refraktion postoperativ wird wieder gemessen.

Dabei zeigt sich, dass eine 52,8 Dioptrien-Linse am ehesten eine Emmetropisation der Augen erreicht. Den Unterschied zu der in der ersten Studie mit errechneter Vorderkammertiefe vorausgesagten Dioptrienzahl von 73 bis 76 erklären die Autoren durch ein Schrumpfen der Linsenkapsel um die neu eingesetzte Intraokularlinse. Dieser Prozess zusammen mit einer folgenden Fibrose der Kapsel verringert die postoperative Vorderkammertiefe. Dadurch wird eine niedrigere Dioptrienzahl benötigt, wie sie mit der postoperativ ermittelten Vorderkammertiefe berechnet wird.

Den deutlichen Unterschied zur benötigten Linse bei Hunden erklären die Autoren durch die deutlich tiefere prä- und postoperative Vorderkammertiefe. Damit liegt die Intraokularlinse bei Katzen näher an der Retina und muss das Licht deutlich stärker bündeln, um ein scharfes Abbild auf der Kornea zu erzeugen.

Hinsichtlich der Dicke der vorderen Linsenkapsel weisen Bernays und Peiffer (2000) nach, dass die Kapsel mit zunehmendem Alter auch an Dicke zunimmt. Das Wachstum ist deutlich schneller und stärker als bei der menschlichen Linsenkapsel.

2.4.2.2 Akkommodation

Die Akkommodation bei der Katze verläuft ohne Veränderung in der vorderen Krümmung der Linse. Vielmehr akkommodieren Katzen durch eine Verlagerung der Linse nach anterior. Diese Verlagerung kann bei maximaler Akkommodation bis zu 0,8 mm ausmachen (Hughes 1973). Hendrickson und Rosenblum (1985) sehen in ihren Untersuchungsergebnissen, die sich mit der Bulbuslänge bei Visuseinschränkungen befassen, eine Bestätigung für die These, dass durch Akkommodation der Bulbus verlängert wird.

Die Stärke der Akkommodationsfähigkeit ähnelt der des Menschen (Hendrickson und Rosenblum 1985).

2.4.2.3 Emmetropisation

Die Untersuchung von Hendrickson und Rosenblum (1985), bei der biometrische Daten in Abhängigkeit von der Akkommodationsfähigkeit gemessen werden zeigt, dass das okuläre Wachstum ein selbstregulierender Prozess ist, der durch visuelle Reize und intakte Akkommodation stimuliert wird. Auch Gollender und Thorn (1979) gehen davon aus, dass die Akkommodation bei Katzen und Primaten Grundvoraussetzung für ein normales Wachstum des Auges ist. Rose et al. (1974) finden bei ihrer Untersuchung von Straßenkatzen und in Käfigen gehaltenen Katzen insgesamt nur sehr wenige emmetrope Tiere.

2.4.2.4 Myopie

Bei artifiziellem Verschluss der Lidspalte im Welpenalter wird eine spätere Myopie festgestellt. Dieser Unterschied in der Refraktion zu unbehandelten Augen liegt in veränderter Vorderkammerstrecke und Glaskörperstrecke begründet. Die axialen Dimensionen sind bei einigen Tieren vergrößert, bei anderen vermindert. Die Linsendicke ist während der anatomischen Entwicklung nicht betroffen. Das Fehlen eines visuellen Feedbacks während der Entwicklung führt zu schlecht reguliertem Wachstum des Auges (Gollender und Thorn 1979). Kirby et al. (1982) beobachten eine regelmäßige Zunahme der axialen Bulbuslänge im Vergleich zum anderen Auge, wenn bei Katzenwelpen ein Auge verschlossen wird. Hendrickson und Rosenblum (1985) zeigen, dass bei Katzenwelpen, bei denen durch eine Keratotomie ein starker Akkommodationsbedarf herbeigeführt wird, ebenfalls die axiale Bulbuslänge stärker wächst als bei unbehandelten Welpen.

Rose et al. (1974) finden heraus, dass 70 % der Katzen, die in Käfigen gehalten werden, eine Myopie zeigen. Diese liegt bei $-0,62 \pm 0,242$ D. Sie führen dies auf die häufige Akkommodation dieser Katzen zurück.

2.4.2.5 Hyperopie

Bei Straßenkatzen stellen Rose et al. (1974) fest, dass 90 % der Tiere eine Hyperopie von $1,145 \pm 0,181$ Dioptrien aufweisen. In Vergleich zu der bei in Käfigen gehaltenen Katzen zu 70 % auftretenden Myopie führen sie dies auf die deutlich geringere Akkommodation dieser Tiere zurück.

Eine Hyperopie wird auch bei Katzen festgestellt, wenn im Verlauf des Wachstums die Fähigkeit zur Akkommodation durch Medikamente oder operative Eingriffe eingeschränkt wird (Hendrickson und Rosenblum 1985).

2.4.2.6 Einfluss von Medikamenten auf biometrische Daten

Bei Katzenwelpen, die lokal mit Atropin-Augentropfen behandelt werden und bei denen dadurch die Akkommodation unterdrückt wird, kann ein vermindertes Wachstum der axialen Bulbuslänge festgestellt werden (Hendrickson und Rosenblum 1985).

2.4.3 Biometrie am pathologisch veränderten Auge

2.4.3.1 Mikrophthalmus

Die Mikrophthalmie bei Katzen ist selten beschrieben. Bei einem Wurf Europäisch Kurzhaar wird die Mikrophthalmie zusammen mit anderen okulären Missbildungen gesehen (Glaze und Gelatt 1999). Gleichzeitig mit einem Mikrophthalmus treten häufig Katarakte auf. Betroffen sind Perserkatzen und Europäisch Kurzhaar (Gelatt 2001). Dunnet (1981) beschreibt die Mikrophthalmie bei Katzenwelpen als häufigen Befund, bei adulten Tieren aber als selten.

2.4.3.2 Phthisis bulbi

Bei Katzen können Sklerarupturen nach heftigem stumpfen Trauma zur starken Reduzierung des Intraokularsdrucks und letztendlich zur Phthisis führen (Mould 2002). Auch nach perforierenden Verletzungen wird die Schrumpfung des Augapfels bei Katzen beobachtet (Gelatt 2001). Die Phthisis bulbi nach einer Verletzung des Auges wird von Woog et al. (1983) beschrieben, ohne dass genaue biometrische Daten angegeben werden.

2.4.3.3 Linsenveränderungen

Katarakt

Katarakte treten bei Katzen generell seltener auf als bei Hunden (Glaze und Gelatt 1999, Peterson-Jones 2002). Bei der Katze treten vor allem sekundäre Kataraktformen auf, das heißt, eine ursächliche Erkrankung geht der Linsentrübung voraus. Dabei kann es sich um Traumata, Entzündungen des Innenauges, Linsenluxationen oder Glaukome handeln (Glaze und Gelatt 1999).

Auch als Folge einer falschen Fütterung von Katzenwelpen werden Kataraktformationen beobachtet. Eine niedrige Arginin-Konzentration im Serum führt vermutlich zu Kataraktbildungen (Remillard et al. 1993). Katarakte treten mit zunehmendem Alter gehäuft auf. Das Durchschnittsalter für das Auftreten von Katarakten bei Katzen liegt bei $12,7 \pm 3,4$ Jahren. Dabei sind neben frühen Formen der Katarakt aufgrund von kongenitalen Veränderungen, Traumata oder Entzündungen zunächst kortikale Trübungen nachweisbar in einem mittleren Alter von $14,9 \pm 3,7$ Jahren, dann folgen nukleäre Katarakte in einem Durchschnittsalter von $16,5 \pm 3,2$ Jahren und posterior subkapsuläre Trübungen mit $17,4 \pm 4,6$ Jahren. Hinsichtlich des Geschlechts ist kein signifikanter Unterschied feststellbar.

Die Kataraktformation tritt bei Katzen später auf als bei Hunden, gemessen an der längeren Lebensdauer aber im gleichen Verhältnis dazu.

Die Kataraktformen stellen sich meist als feine, oft streifenförmige Trübungen dar und reifen selten zur murenen Form heran (Williams und Heath 2006).

Die diabetische Katarakt kommt bei Katzen im Vergleich zu Hunden sehr viel seltener vor, obgleich es sich bei Diabetes mellitus um eine häufige Erkrankung von erwachsenen Katzen mit einer Tendenz zu älteren Tieren handelt. Die Entwicklung der diabetischen Katarakt bei der Katze verläuft wesentlich langsamer als beim Hund. Eine mögliche Erklärung für das seltene Vorkommen liegt in der Aldose-Reduktase-Aktivität, die bei Katzen deutlich geringer ist (Thoresen et al. 2002). Auch Richter et al. (2002) vertreten die Hypothese, dass der geringe Gehalt an Aldose-Reduktase in den Linsen älterer Katzen die Ursache für seltenere Katarakte bei dieser Spezies ist. Weiterhin zeigen Williams und Heath (2006), dass die Charakteristik von diabetischer Katarakt sich deutlich von der beim Hund unterscheidet. Sie vermuten Unterschiede in der biochemischen Entwicklung der Katarakt. Die Trübungen sind deutlich dezentrisch und ähneln eher denen beim Menschen als den typischen Veränderungen bei Hunden. Sie weisen nach, dass in einer breiten Population von Katzen mit Diabetes mellitus alle Tiere ein gewisses Maß an Linsentrübung zeigen. Die Trübungen sind in 56 % der Fälle fortge-

schritteneren Trübungen im hinteren Kortex oder polar posterior gelegen. Die anderen Katzen zeigen nur sehr geringförmige Trübungen. Die Autoren führen diesen Umstand als mögliche Ursache für die frühere Einschätzung anderer Studien an, dass Katarakte bei diabetischen Katzen nicht häufig vorkommen. Eventuell werden feine Trübungen ohne gesonderte ophthalmologische Untersuchung schlichtweg nicht diagnostiziert.

Mit durchschnittlich $5,6 \pm 1,9$ Jahren erkranken diabetische Katzen deutlich früher an Katarakt als gesunde Tiere.

Eine weitere Auffälligkeit in dieser Untersuchung ist das vermehrte Vorkommen von Katarakten bei Katzen, die aufgrund verschiedener Grunderkrankungen wie Niereninsuffizienz, chronischem Durchfall oder Erbrechen mehrere Phasen von Dehydration durchlaufen haben. Die Trübungen in diesen Fällen ähneln den typisch altersbedingten Katarakten. Die Autoren vermuten daher, dass die Dehydratation die normalerweise ablaufenden Alterserscheinungen lediglich beschleunigt.

Mikrophakie

Angeborene Linsendefekte bei Katzen sind sehr selten. Bei 2 Siamkatzen wird eine Mikrophakie beschrieben, die zu einer Überdehnung und Zerreißung der Zonulafasern führt. Als Folge kommt es zu einer Luxation der Linse nach anterior (Molleda et al. 1995). Aguirre und Bistner (1973) beschreiben ebenfalls eine Siamkatze und eine Europäisch Kurzhaarkatze, die ein Mikrophakie aufweisen. Auch bei diesen Tieren kommt es nach Überdehnung der Zonulafasern zu einer Luxation der veränderten Linse.

2.4.3.4 Glaukom

Das generelle Vorkommen von Glaukomen bei der Katze ist im Verhältnis zu anderen Spezies gering (Martin 1982, Wilcock et al. 1990, Glaze und Gelatt 1999). In den USA zählt das Glaukom aber zu einem der meisthäufigsten Gründe für irreversible Blindheit bei Katzen (Czederpiltz et al. 2005).

In der Untersuchung von Blocker und van der Woerd (2001) finden die Autoren mehr betroffene männliche als weibliche Tiere. In dieser Studie werden Tiere mit Glaukom verschiedenster Rassen erfasst, ohne dass eine bestimmte Prädisposition herausgefunden wird. Bei 44 % der Tiere mit normalem Intraokulardruck bei Erstvorstellung stellen sie einen Buphthalmus fest. Auch eine flache Vorderkammer gehört zu häufigen Befunden. Nur wenige der befundeten Glaukome werden als Primärglaukom diagnostiziert.

Kongenitale Glaukome können ein- oder beidseitig auftreten und sind Folge von Entwicklungsstörungen der Abflusswege des Kammerwassers (Glaze und Gelatt 1999). Auffällig ist die sehr niedrige Anzahl von Primärglaukomen, die in der Literatur beschrieben werden. Auch in der Untersuchung von Wilcock et al. (1990) kann nur bei einem sehr geringen Prozentsatz von Katzen mit Glaukom ein Primärglaukom festgestellt werden. Die Siamkatze scheint allerdings eine Prädisposition für Primärglaukome aufzuzeigen (Brown et al. 1994, Glaze 2005).

Auch für die Burmakatze wird das Primärglaukom beschrieben. Bei betroffenen Katzen dieser Rasse können Hampson et al. (2002) einen engen irido-kornealen Winkel aufzeigen, von dem sie annehmen, dass er den Grund für die Abflussstörung des Kammerwassers bildet. Im späten Stadium der Erkrankung erfolgt eine Vergrößerung des Augapfels durch den dauerhaft erhöhten Augeninnendruck.

Jacobi und Dubielzig (2008) weisen bei ihrer Untersuchung zum Primärglaukom bei der Katze keine veränderten irido-kornealen Winkel nach. In ihrem Patientengut mit der Diagnose Primärglaukom kommen neben Burmakatzen auch Europäische Kurzhaarkatzen vor.

Trost et al. (2007) beschreiben bei einer Europäisch Kurzhaarkatze mit Primärglaukom das Ligamentum pectinatum als dysplastisch bei offenem Kammerwinkel und erkennen damit die Ursache im iridokornealen Winkel des mit Primärglaukom betroffenen Tieres. Eine auch beim Menschen beschriebene Form, unter den Tieren aber für die Katze besondere Form des Glaukoms ist das maligne Glaukom. Bei dieser Erkrankung wird das Kammerwasser fehlgeleitet und gelangt in den Glaskörper. Es wird eine Durchlässigkeit der Hyaloid-Membran vermutet. Eventuell handelt es sich dabei um kurze Phasen der Durchlässigkeit im Sinne eines Einweg-Ventils. Zwinkern oder sonstiges Zusammendrücken der Augenlider könnten als Auslöser genügen. Durch das vermehrte Volumen des Glaskörpers werden die Linse und das Irisdiaphragma nach anterior verlagert, es resultiert eine flache Vorderkammer und ein erhöhter Intraokulardruck. Weibliche Tiere sind von dieser Erkrankung häufiger betroffen als männliche Tiere (Czederpiltz et al. 2005).

Sekundärglaukome treten meist als Folge von intraokulären Neoplasien oder chronischen vorderen Uveitiden auf. Eine Obstruktion des Kammerwinkels durch Entzündungszellen, Verklebungen der Iris und Kollaps des irido-kornealen Winkels behindern den Abfluss des Kammerwassers. Eine schnelle Vergrößerung des Bulbus führt dann häufig zu sekundären Verlagerungen der Linse (Wilcock et al. 1990, Dietrich 2005). Dieser Buphthalmus wird häu-

fig übersehen, da die Orbita und die Lider den vergrößerten Bulbus teilweise verdecken (Glaze und Gelatt 1999, Blocker und van der Woerd 2001).

2.4.3.5 Buphthalmus

Katzen mit Glaukom zeigen bei Erstvorstellung häufig einen Buphthalmus. Die ersten Anzeichen von Glaukomen sind bei dieser Spezies so gering, dass die Tiere erst sehr spät vorgestellt werden und die axiale Bulbuslänge schon vergrößert ist (Martin 1982, Wilcock et al. 1990). Die Ausdehnung des Bulbus durch Überdehnung erfolgt bei Katzen eher als bei Hunden (Mould 2002).

2.5 Physik des Ultraschalls

2.5.1 Grundlagen des Ultraschalls

Mechanische Wellen, die oberhalb der Hörgrenze von 20 kHz liegen, werden als Ultraschallwellen bezeichnet. Ultraschallwellen sind Longitudinalwellen, denn die einzelnen Teilchen schwingen längs der Ausbreitungsrichtung der Schallwelle. Die Kenngrößen einer Schallwelle sind:

- die Amplitude
- die Frequenz, d.h. die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, mit der Einheit Hertz (Hz)
- die Wellenlänge, d.h. der minimale Abstand der Punkte gleicher Phase
- die Ausbreitungsgeschwindigkeit, die von dem zu durchdringenden Medium und von Druck und Temperatur abhängig ist (Cartee et al. 1995)

Der Zusammenhang der einzelnen Faktoren lässt sich in einer Gleichung darstellen:

$$f \cdot \lambda = c$$

Dabei steht f für die Frequenz, λ für die Wellenlänge und c für die Schallgeschwindigkeit.

Die Wellenlänge gibt einen Hinweis auf die Detailerkennbarkeit. Strukturen, die kleiner sind als die verwendete Wellenlänge, sind nicht mehr darstellbar (Wessels und Weber 1984, Gladisch 1992, Delorme und Debus 2005).

Der diagnostisch genutzte Bereich liegt ungefähr zwischen 2 und 12 MHz. Der Erzeugung von Ultraschallwellen liegt der piezoelektrische Effekt zugrunde. Er wurde 1880 von den Geschwistern Curie entdeckt. Bestimmte polar gebaute Kristalle mit polykristalliner Struktur, z.B. Quartz oder Titanate, haben die Eigenschaft, sich bei Anlegen einer Spannung zu verformen. Dieser Kristall gibt dann Schallwellen einer bestimmten Frequenz in den Körper ab. Diesen Vorgang nennt man den umgekehrten piezoelektrischen Effekt. Wird eine Wechselspannung angelegt, gibt der Kristall sehr kurze Impulse ab (Gladisch 1992, Zentner 1994, Goddard 1995).

Da Intervalle zwischen dem Aussenden von Ultraschallwellen entstehen, kann der Sendekristall zwischen dem Aussenden auch als Empfänger von reflektierten Schallwellen aus dem Körper fungieren. Die auftretenden Echos verursachen eine Verformung des Kristalls, wodurch aufgrund der Eigenschaften des Kristalls ein elektrisches Signal entsteht. Die in der

medizinischen Diagnostik verwendeten Kristallelemente werden als Wandler oder Transducer bezeichnet (Hittmair 1997). Das empfangene Signal wird auf Stärke und Herkunftsort hin analysiert und auf einem Bildschirm wiedergegeben.

Wird der Schallkopf an die Körperoberfläche gelegt, können sich die Schallwellen im Körper ausbreiten. Diese Ausbreitung verläuft je nach dem spezifischen akustischen Widerstand eines Gewebes mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Die zurückkehrenden Schallwellen geben Aufschluss über die Lage und Echogenität der beschallten Strukturen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Geweben ist bekannt, daher kann mit Hilfe der Laufzeit auf die einfache Entfernung der reflektierenden Grenzflächen zurückgeschlossen werden. Die Formel für die Laufzeit lautet

$$t = 2 s / v$$

Dabei steht t für die Laufzeit, s für Sekunden und v für die Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Geweben.

Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Luft ist mit 330 m/s sehr niedrig, die in Knochen mit 3360 m/s sehr hoch. Die übrigen Gewebe des Körpers haben alle eine Schallausbreitungsgeschwindigkeit von durchschnittlich 1540 m/s und unterscheiden sich nur marginal (Zentner 1994).

Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit kann aufgrund der Dichte und der Kompressionsfähigkeit berechnet werden:

$$v = \sqrt{1 / \chi * e}$$

Dabei steht v für die Ausbreitungsgeschwindigkeit, χ für die Dichte und e für die Kompressionsfähigkeit.

Jansson und Kock (1962) untersuchen die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschall in okulären Geweben. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Ultraschalls in der Linse beträgt $1640,5 \pm 1,2 \text{ m/s}$, für den Glaskörper $1532,4 \pm 0,5 \text{ m/s}$.

Auch für das Kammerwasser wird eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von 1532 m/s vorausgesetzt (Shawn und McQuown 1975). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Kornea ist fast gleich zu der in Kammerwasser und Glaskörper und braucht, auch aufgrund der geringen Dicke der Kornea, nicht berücksichtigt zu werden (Francois und Goes 1968). Thijssen et al. (1985) stellen fest, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschall und die Impedanz in den okulären Geweben bei Mensch und Tier nahezu identisch ist. Gilger et al. (1998) unterstellen für ihre biometrischen Messungen an Katzen die Ausbrei-

tungsgeschwindigkeiten, die in den verschiedenen Gewebetypen des Auges für den Mensch bekannt sind.

Durchläuft eine Schallwelle ein Gewebe, wird sie durch verschiedene Mechanismen geschwächt. Art und Ausmaß der Schwächung hängen vom durchlaufenen Gewebe ab. Daher können Veränderungen der Schallwellen beim Durchlaufen eines Gewebes zur Charakterisierung des Gewebes herangezogen werden. Von den schwächenden Mechanismen, Absorption, Streuung und Reflexion ist vor allem der letztgenannte aussagekräftig in Hinblick auf anatomisch-morphologische Rückschlüsse (Wessels und Weber 1984, Delorme und Debus 2005). Die schwächenden Mechanismen werden im Folgenden vorgestellt.

2.5.1.1 Reflexion

Je größer der Unterschied hinsichtlich Dichte und Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen den schallleitenden Strukturen des Auges ist, an deren Grenzflächen das Echo entsteht, desto höher ist der reflektierte Anteil der ausgesandten Schallwelle und damit die Intensität des zurücklaufenden Echos. Als Maß für die Härte eines Mediums dient die akustische Impedanz. Dieser akustische Widerstand ist direkt proportional der Dichte und der Schallausbreitungsgeschwindigkeit des Mediums:

$$z = p * c$$

Dabei steht z für die akustische Impedanz, p für die Dichte und c für die Schallleitfähigkeit (Wessels und Weber 1984, Gladisch 1992, Delorme und Debus 2005).

Gewebe oder Strukturen können nur dann eindeutig voneinander abgegrenzt werden, wenn sie unterschiedliche Impedanzwerte haben.

Wird die gesamte oder nahezu die gesamte Intensität reflektiert, wie beim Übergang von Geweben mit sehr unterschiedlicher Impedanz, z.B. Weichteilgewebe zu Luft, dann kann keine nennenswerte Ultraschallenergie mehr die Grenzfläche transmittieren. Gewebe hinter dieser Grenzfläche kann nicht mehr dargestellt werden, man spricht von einem Schallschatten. Da Luft aufgrund des hohen Impedanzunterschieds zu Gewebe ein starker Reflektor ist, muss bei der Ankopplung eines Ultraschallsenders an einen Patienten darauf geachtet werden, dass keine Luft zwischen Schallsender und Patient gelangt (Wessels und Weber 1984, Delorme und Debus 2005).

Steht die Grenzfläche senkrecht zur einfallenden Schallquelle, kehrt das Echo ohne Ablenkung zum empfangenden Kristall zurück. Sobald Grenzflächen schräg zu den einfallenden

Schallwellen stehen, kommt es nicht nur zur Reflexion der Schallwellen, sondern auch zur Ablenkung (Brechung) und damit nur zu einem Empfang eines Teils der Information. Das entstehende Signal ist dann deutlich abgeschwächt (Delorme und Debus 2005). Der Reflektionsfaktor R ist eine Relativgröße und gibt die Unterschiede bezüglich der Dichte p und der Ausbreitungsgeschwindigkeit c an der Grenzfläche zwei aufeinander treffender Medien wieder:

$$R = z_2 - z_1 / z_2 + z_1$$

Dabei steht R für den Reflektionsfaktor, z_1 für die akustische Impedanz des ersten Mediums und z_2 für die akustische Impedanz des zweiten Mediums (Wessels und Weber 1984).

Erfolgt die Reflexion an Grenzflächen, deren Verlauf schräg zur Wellenausbreitungsrichtung ist, hängt der Reflektionsfaktor zusätzlich vom Einfallswinkel und dem Winkel, unter dem die Ausbreitung der Schallwelle im zweiten Medium erfolgt, ab.

Die Formel verändert sich wie folgt:

$$R = (z_2 * \cos \alpha_1 - z_1 * \cos \alpha_2 / z_2 * \cos \alpha_1 + z_1 * \cos \alpha_2)^2$$

Insgesamt ergibt sich, dass im Wesentlichen die senkrecht zur Wellenausbreitungsgeschwindigkeit liegenden Grenzflächen zum Aufbau des Ultraschallbildes beitragen (Wessels und Weber 1984, Fritsch und Gerwing 1993).

2.5.1.2 Brechung

Der Anteil der Schallwellen, der an einer Grenzfläche nicht reflektiert wird, zeigt in dem der Grenzfläche folgenden Gewebe mit anderer Ausbreitungsgeschwindigkeit eine Richtungsänderung. Diese wird sowohl von dem Einfallswinkel der Wellen als auch von der Schallgeschwindigkeit bestimmt (Delorme und Debus 2005). Der Reflexionswinkel entspricht dem Einfallswinkel. Der Anteil des reflektierten Ultraschalls ist umso größer, je mehr der Einfallswinkel sich 90 Grad nähert. Der spiegelnd reflektierte Anteil der Sendeenergie geht für die Diagnostik verloren. Bei einem Einfallswinkel kleiner als 90 Grad wird ein Teil der Sendeenergie in das zweite Medium abgelenkt (Gladisch 1992).

2.5.1.3 Streuung

Unter der Streuung von Schallwellen an einer Grenzfläche versteht man eine ungerichtete Reflexion. Die Ultraschallwellen werden teilweise abgelenkt. Grenzflächen in natürlichen Organismen weisen Rauigkeiten oder Unebenheit auf, sodass die Reflexion einer Schallwelle mit einer ungerichteten Streuung kombiniert auftritt (Wessels und Weber 1984).

Die Streuung ist abhängig von der Schallfrequenz. Haben die Grenzflächen der Reflektoren die Größe der Wellenlänge oder sind sie noch kleiner, können die zugehörigen Strukturen, z.B. einzelne Zellen oder kleinste Blutgefäße, nicht mehr aufgelöst werden. Sie streuen jedoch den Ultraschall. Durch die komplexe Überlagerung der vielen in einem Gewebe entstehenden schwachen Echos entsteht ein sichtbares Muster, die so genannte Echostruktur oder Textur eines Gewebes (Delorme und Debus 2005).

2.5.1.4 Absorption

Bei jeder Interaktion mit dem zu durchdringenden Gewebe entsteht ein Energieverlust. Es treten Reibungskräfte auf, die die schwingenden Teilchen abbremsen und so die Amplitude der Welle verringern (Fritsch und Gerwing 1993).

Die in Schwingung versetzten Moleküle des Gewebes wandeln einen Teil ihrer Bewegungsenergie in Wärme um. Der Prozess der Absorption ist stark materialabhängig. Er ist z.B. in Wasser sehr gering, in Knochen aber sehr hoch.

Mit steigender Frequenz nimmt die Absorption beinahe proportional zu. Als Folge nimmt das Penetrationsvermögen von Ultraschallwellen mit steigender Frequenz ab. Somit können mit hochfrequenten Ultraschallwellen nur relativ oberflächliche Gewebe dargestellt werden, das Auflösungsvermögen nimmt aber zu (Delorme und Debus 2005).

Auch mit steigender Entfernung zur Quelle nimmt die Schwächung der Schallwelle zu. Daraus ergibt sich, dass ähnliche Grenzflächen in unterschiedlicher Entfernung zur Schallquelle unterschiedlich dargestellt werden. Die so genannte Tiefenverstärkung der Ultraschall-Geräte gleicht diese Verfälschung der Echogramme aus.

Der Zusammenhang zwischen Entfernung, Frequenz und Absorptionseigenschaft des Mediums lässt sich in einer Formel zusammenfassen:

$$A = A_0 * e^{-\beta s}$$

Dabei steht A für die Schallwellenamplitude, A_0 für den Ausgangswert der Schallwellenamplitude, β für den Absorptionskoeffizient und s für die Wegstrecke (doppelt zu berechnen für den Weg zwischen Grenzfläche und Empfänger) (Wessels und Weber 1984).

2.5.1.5 Auflösungsvermögen

Ein wichtiger Punkt hinsichtlich der Darstellung von durchschalltem Gewebe ist das Auflösungsvermögen. Es spielt vor allem beim B-Modus eine große Rolle. Die axiale Auflösung entspricht dem kleinsten Abstand zwischen zwei Objektpunkten in Richtung der Schallwelle,

die noch als getrennte Punkte wiedergegeben werden (Fritsch und Gerwing 1993). Der bestimmende Parameter dabei ist die Echoimpulsdauer, die, technisch bedingt, mindestens das 2-fache der Wellenlänge beträgt. Somit verbessert sich die axiale Auflösung mit zunehmender Schallfrequenz. Diese verbesserte Auflösung geht mit starker Absorption und Streuung einher, so dass bei hohen Frequenzen die Eindringtiefe abnimmt.

Die laterale Auflösung beschreibt das Auflösungsvermögen quer zur Ausbreitungsrichtung des Ultraschalls und ist mit zirka 4 mm um den Faktor 4 größer als die axiale Auflösung (Zentner 1994, Cartee et al. 1995). Während das axiale Auflösungsvermögen konstant bleibt, ändert sich die laterale Auflösung in Abhängigkeit von der Entfernung zum Ultraschallschwinger. Ihr bestes Auflösungsvermögen erreicht sie im Bereich der Fokuszone (Wessels und Weber 1984).

2.5.1.6 Schallköpfe

Die Ultraschallwellen müssen mechanisch oder elektronisch über das Gewebe bewegt werden. Die dazu benutzten Schallköpfe bestehen aus zahlreichen piezoelektrischen Wandlern. Um alle Echos auseinanderzuhalten und diagnostisch verwerten zu können, sind die Impulse so kurz, dass das Echo bereits verarbeitet wird, bevor ein weiterer Impuls ausgesandt wird. Der Schallkopf wirkt somit nur 0,1 % der Untersuchungszeit als Sender, die restlichen 99,9 % ist er auf Empfang geschaltet. Je nach Anordnung der piezoelektrischen Wandler unterscheidet man Linear-, Sektor- oder Konvex-Schallköpfe (Hittmair 1997).

Linear-Schallköpfe

Linear-Schallköpfe bestehen aus 60 bis 256 nebeneinander liegenden Kristallen. Kleine Kristallgruppen werden abwechselnd aktiviert und erzeugen ein rechteckiges Blickfeld. (Barr 1992, Gladisch 1992, Goddard 1995). Das Blickfeld ist demzufolge direkt unter der Ankopplungsfläche breit und erleichtert die Identifizierung von Strukturen und deren anatomischen Lage. Nachteilig ist die große notwendige Ankopplungsfläche auf der Haut (Barr 1992, Gladisch 1992). Die Bildqualität ist in allen Abbildungstiefen etwa gleich gut (Gladisch 1992).

Konvex-Schallköpfe

Hierbei handelt es sich um Linear-Schallköpfe, deren Ankopplungsfläche gekrümmt ist. Es entsteht ein leicht divergierendes Blickfeld. Die Ankopplungsfläche dieser Schallköpfe ist

kleiner, damit aber auch das Blickfeld im Nahbereich. Die laterale Auflösung nimmt mit zunehmender Eindringtiefe relativ schnell ab (Barr 1992).

Sektor-Schallköpfe

Sektor-Schallköpfe erzeugen ein fächerförmiges Blickfeld. Mechanische Sektor-Schallköpfe bestehen aus einem oder wenigen Kristallen. Sie werden durch einen Motor bewegt und senden eine Schallwelle fächerförmig aus. Die Kristalle können entweder um eine Achse rotieren oder ein einziger Kristall pendelt hin und her (Barr 1992). Ein notwendiger Bestandteil ist eine Wasservorlaufstrecke. Diese Flüssigkeit im Applikator stellt ein Polster zwischen Schallquelle und Haut dar, ohne das eine Ankopplung nicht möglich wäre. Dieser Wasservorlauf kann aber auch Ursache für störende Mehrfachechos sein. Der Zeilenabstand in der Tiefe nimmt zu, was eine schlechtere laterale Auflösung bedingt. Die Abbildung im Nahbereich ist notwendigerweise schlecht (Gladisch 1992). Bei Phased-Array-Sektor-Schallköpfen liegt eine Gruppe von fest eingebauten Einzelkristallen vor, die elektronisch kurz nacheinander aktiviert werden und so einen Schallstrahl fächerförmig aussenden. Diese Schallköpfe sind den mechanischen überlegen, da die Auflösung besser ist, keine Abnutzung von beweglichen Teilen erfolgt und kein Vibrationsgefühl auftritt.

Sektor-Schallköpfe sind klein und leicht zu handhaben, die benötigte Ankopplungsfläche ist klein. Sie liefern jedoch auch ein kleineres Blickfeld. Das Nahfeld ist kaum beurteilbar (Barr 1992).

2.6 Ultraschallverfahren

Die medizinische Ultraschalldiagnostik verwendet heute nahezu ausschließlich die Methode des Impuls-Echo-Verfahrens, die auf den physikalischen Grundlagen des piezoelektrischen Effekts beruht. Ein kurzer Ultraschallimpuls wird ausgesendet und anschließend werden die reflektierten Echos empfangen. Die Umsetzung des Impuls-Echo-Verfahrens erfolgt in ein- und zweidimensionalen Bildverfahren, dem A-Modus, B-Modus und M-Modus (Wessels und Weber 1984).

2.6.1 A-Modus-Verfahren

Das A-Modus-Verfahren ist die einfachste Umsetzung des Puls-Echo-Prinzips. Ein einzelner Ultraschallsender sendet einen kurzen Ultraschallimpuls aus und schaltet dann auf Empfang um. Es handelt sich um ein Zeit-Amplituden-Signal (Wessels und Weber 1984). Die Intensität des Echos, die Amplitude, korreliert mit der elektrischen Spannung, in die die reflektierten Schallwellen umgewandelt werden. Das reflektierte Echo wird auf einem Oszilloskop auf einer Zeitachse dargestellt. Unter Annahme einer konstanten Schallgeschwindigkeit im untersuchten Gewebe wird diese Zeitachse in eine Tiefenachse umgerechnet. Das A-Bild zeigt also die Intensitätsverteilung der reflektierten Echos entlang des Schallbündels (Delorme und Debus 2005).

Das A-Modus-Verfahren findet vor allem in der Ophthalmologie Anwendung. Hier liegt seine Bedeutung neben der diagnostischen Relevanz hauptsächlich in der Anwendung bei biometrischen Untersuchungen. Der Begriff „A-Modus“, auch gebräuchlich sind die Begriffe „A-Scan“ oder „A-Bild“, stammt aus dem angelsächsischen Sprachgebrauch und leitet sich von „amplitude modulation“ ab.

Die Amplituden charakterisieren den Übergang von zwei Gewebearten mit unterschiedlicher Impedanz (akustischer Widerstand der Gewebe), dabei ist der Ausschlag umso höher, je stärker der Impedanzsprung ist (Grehn 2003).

Die Höhe der Amplituden wird weiterhin vom Verhältnis der Wellenlänge zur Grenzoberfläche und von der zur Grenzfläche möglichst lotrechten Schallrichtung bestimmt. Am Abstand der Amplituden kann letztlich der Abstand der Reflektionsflächen voneinander abgelesen werden (Delorme und Debus 2005).

Als Reflektionsflächen im gesunden Auge fungieren Kornea, vordere und hintere Linsenkapself, Retina, Skleravorderwand und Sklerarückwand. Die zuletzt genannten drei Strukturen

bilden gemeinsam das Rückwandecho. Für die Messung der Bulbuslänge bzw. ihrer Teilstrecken ist nur das Netzhautecho relevant (Nover und Grote 1965).

Flüssigkeiten wie Kammerwasser, Glaskörper oder auch die klare, ungetrübte Linse wirken nicht echogen, so dass die graphische Darstellung hier auf der Nulllinie verläuft. Ebenfalls reflektierend können Fremdkörper und knöcherne oder verkalkte Gewebe wirken, so dass auch hier ein Ausschlag erfolgt, der diagnostisch auswertbar ist (Rochels 1984).

Das Echogramm eines gesunden Auges hat bei axialer Untersuchungsrichtung einen charakteristischen Verlauf. Bei der hier angewendeten Ankopplung des Schallkopfes an die Kornea verschmilzt das schallkopfbedingte Initialecho mit dem Korneaecho. Anschließend stellt sich die Vorderkammer als Nulllinie dar, darauf folgend die Linsenvorderkapsel mit einer Amplitude, die Linse selbst als echofreie Struktur und damit als Nulllinie und die Linsenhinterkapsel wieder als Amplitude. Der beim gesunden Auge reflexfreie Glaskörper schließt sich als echofreie Struktur und somit im Verlauf der Nulllinie an. Den Abschluss des Echogramms schließlich bildet das steil ansteigenden Rückwandecho, bestehend aus Retina, Skleravorderwand und Sklerarückwand (Nover und Grote 1965). Das Schema eines Auges mit Entsprechung von anatomischen Gegebenheiten und Darstellung im A-Modus Verfahren erläutert das Prinzip (Abbildung 1).

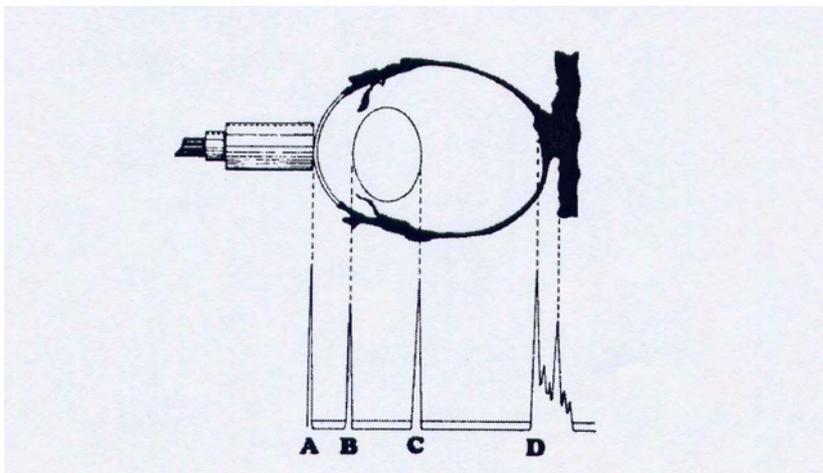


Abbildung 1: Schematische Darstellung des A-Modus-Verfahrens nach Rubin und Koch (1968), dargestellt ist die Ankopplung des Ultraschallkopfes an das Auge und die Entsprechung der empfangenen Information auf dem Monitor

A: Korneaecho

B: Echo der vorderen Linsenkapsel

C: Echo der hinteren Linsenkapsel

D: Retinaecho

Die Kriterien eines guten Bildes sind hohe vordere und hintere Linsen-Echos und ein hohes und steiles Retina-Echo. Binkhorst (1978) betont vor allem die Bedeutung des letzteren. Francois und Goes (1981) nennen Kriterien für eine gute Ankopplung in Richtung der optischen Achse:

1. die Linsen-Echos müssen maximal getrennt sein
2. das hintere Linsen-Echo muss maximal eingestellt und fast so hoch wie das vordere Linsen-Echo und das Kornea-Echo sein
3. der Anstieg der Echos muss perpendicular zur Grundlinie sein
4. die Glaskörperdimension vom hinteren Linsen-Echo zur internen retinalen Membran soll maximal sein, während das hintere Linsen-Echo maximal bleibt

Coleman und Carlin (1967) betonen die Notwendigkeit der Anwendung eines dünnen Echostrahls, da ansonsten aufgrund der Krümmung des Auges Echos von den mehr anterior gelegenen Positionen der Krümmung das Echo des Scheitels der Krümmung verbergen und dadurch kürzere Messungen als der Wirklichkeit entsprechend erzielt werden.

2.6.2 B-Modus-Verfahren

Der B-Modus ist eine Weiterentwicklung des Amplituden Verfahrens. Hier wird eine Helligkeitsverteilung entlang des Schallbündels auf dem Monitor dargestellt. Der Begriff B-Modus ist abgeleitet von „brightness modulation“ (englisch) = Helligkeits-Modulation (Wessels und Weber 1984). Jedem Amplitudenwert wird ein Helligkeitswert (Grauwert) zugeordnet. Dabei reichen die Helligkeitswerte von schwarz über verschiedenste Graustufen zu weiß. Der Schallkopf enthält viele Piezokristalle, die elektronisch gesteuert werden. Neben Richtung und Laufzeit des Schallpulses und der Intensität des Echos wird die Lokalisation der angesteuerten Kristalle am Schallkopf registriert. Es wird ein Schnittbild erzeugt, wobei aus der Laufzeit des Pulses für jedes Echo unter Annahme einer konstanten Schallgeschwindigkeit die Ursprungstiefe berechnet wird. An der entsprechenden Position auf dem Bildschirm erscheint der zugehörige Grauwert als Bildpunkt. Ein starker Reflektor wie z.B. Knochen erzeugt ein starkes Echo und somit einen sehr hellen Punkt, ein schwacher Reflektor erzeugt ein schwaches Echo, das durch einen dunklen Punkt abgebildet wird (Delorme und Debus 2005).

2.6.3 M-Modus-Verfahren

Die Intensität der Echos entlang der Schallwelle wird in Grauwerte umgewandelt und wie bei einem Serienbild im zeitlichen Verlauf erfasst. So lassen sich Bewegungen anatomischer Strukturen bzw. von reflektierenden Grenzflächen, z.B. Herzklappen, darstellen. Der Begriff M-Modus leitet sich von „motion“ (englisch) = Bewegung ab. Dieses Verfahren wird vor allem in der Kardiologie eingesetzt (Delorme und Debus 2005). Dort können Bewegungsabläufe der Herzklappen, Vorhöfe und Ventrikel exakt dargestellt werden (Wessels und Weber 1984).

3 Material und Methoden

3.1 Technische Voraussetzungen

3.1.1 Ultraschallgerät

Die vorliegenden Untersuchungen wurden mit dem Ultrascan® Digital B™ System IV (Firma Cooper Vision) durchgeführt. Dieses Gerätesystem wurde speziell für die ophthalmologische Ultraschalldiagnostik entwickelt. Es besteht aus einer Schaltkonsole mit Kontrollmonitor, einer separaten alphanumerischen Tastatur und A- und B-Bildschallköpfen. Das Gerät erfasst automatisch den Abstand vorgewählter Echos und gibt die Strecke numerisch in Millimetern an. Der Ultraschall wird durch direkten Kontakt mit der Kornea durch das Auge geleitet. Die an den Grenzflächen entstehenden Echos werden vom Schallkopf empfangen, geräteintern ausgewertet und auf dem Monitor dargestellt.

3.1.1.1 Technische Daten

Ultraschallfrequenz	10 Mhz
Auflösungsvermögen	axial bis zu 0,2 mm transversal bis zu 0,2 mm
Eindringtiefe	65 mm
Bildverfahren	A, B und Vektor A
Empfängerempfindlichkeit	< 3 μ V RMS bei einer Bandbreite von 5 MHz
Dynamikbereich des Digitizers	36 dB linear 60 dB logarithmisch
Dynamikbereich des Empfängers	> 100 dB
Digitale Biometrie	Systemeigene elektronische Messgenauigkeit: 0,02 mm, klinische Messgenauigkeit: 0,1 mm, Messbereich: 1 - 55 mm

3.1.1.2 Dokumentation der Echogramme

Das bei der Messung entstandene Echobild wird sofort im Anschluss an die Messung mit einem dem Ultraschallsystem angeschlossenen Thermografikdrucker auf speziellem Thermopapier ausgedruckt. Auf den gedruckten Echogrammen ist das auf dem Monitor eingefrorene Bild im Maßstab 1:1 wiedergegeben.

3.2 Patientendaten

In der Anamnese der zu untersuchenden Patienten wurden folgende Daten ermittelt und dokumentiert:

1. Alter
2. Rasse
3. Geschlecht
4. Körpergewicht

Alter

Das Alter der Katzen wurde anhand ihres Geburtsdatums ermittelt. Bei Fundtieren wurde das Alter aufgrund der Befunde der klinischen Untersuchung geschätzt. Als Kriterien wurden der Zahnstatus, die Sklerosierung der Linse, der Zustand von Knochenfugen auf vorhandenen Röntgenbildern und der allgemeine Habitus der Tiere herangezogen.

Rasse

Die Rassezugehörigkeit wurde nach Angaben der Besitzer und anhand des Exterieurs dokumentiert. Bei der statistischen Auswertung wird aufgrund des häufigen Auftretens ein besonderes Augenmerk auf die Rasse Europäisch Kurzhaar gerichtet. Im Vergleich dazu werden Katzen, deren Rassestandard ein im Verhältnis großes Auge bei insgesamt kurzem Schädel (brachycephal) vorschreibt, als Gruppe gegenübergestellt. Weiterhin werden besonders großrahmige Katzen zusammengefasst und die Dimensionen des Auges mit denen der Europäisch Kurzhaar verglichen.

Geschlecht

Die Zugehörigkeit zu einem Geschlecht wurde anhand der klinischen Untersuchung getroffen. Eine Kastration der Tiere wurde bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt.

Körpermasse

Die Körpermasse der untersuchten Tiere wurde im Rahmen der klinischen Untersuchung mit Hilfe einer analogen Tierwaage ermittelt und befundet.

3.3 Klinische Untersuchung

Vor Durchführung der Messungen wurde jedes Tier einer allgemeinen und ophthalmologischen Untersuchung unterzogen. Nach der Aufnahme des Signalements und der Anamnese erfolgte eine klinische Untersuchung des Tieres. Die ophthalmologische Untersuchung umfasste zunächst die Untersuchung im Raumlicht und die Überprüfung der Pupillenreaktion mit einer punktförmigen Lichtquelle (Diaskleralkegel). Weiterhin wurden folgende Untersuchungstechniken angewendet:

Spaltlampenmikroskopie

Mit Hilfe der Kowa SL 14 Handspaltlampe (Firma Kowa, Japan) wurden die vorderen Augenabschnitte untersucht. Die Vergrößerung durch die Spaltlampe ermöglichte eine detailgenaue Untersuchung der Lider, Kornea, Vorderkammer, Linse und vorderen Abschnitte des Glaskörpers. Durch Einstellung des Spaltlichtes konnten Trübungen des Kammerwassers oder der Linse identifiziert und lokalisiert werden.

Ophthalmoskopie

Die Untersuchung des Augenhintergrundes erfolgte mit der direkten Ophthalmoskopie. Dazu wurde ein Diaskleralkegel verwendet. Anschließend wurde mit einem Kopfbandophthalmoskop (Omega 100, Firma Heine) die indirekte Ophthalmoskopie durchgeführt.

Tonometrie

Zur Überprüfung des Augeninnendrucks wurde ein Applanationstonometer (Tonopen XL, Firma Oculab, Glendale USA) angewendet. Zur Vorbereitung erfolgte die Applikation eines Tropfens Lokalanästhetikum (Proxymetacainhydrochlorid - Proparakain-POS, Firma Ursapharm, Saarbrücken) in die Augen.

3.4 Durchführung der Messungen

Alle Messungen wurden zur Vermeidung einer Beeinflussung durch zirkadiane Veränderungen am Vormittag in der Zeit zwischen 9.00 Uhr und 12.00 Uhr durchgeführt. Zur Durchführung der Messungen wurden die Katzen auf dem Untersuchungstisch platziert. Die Tiere waren in sitzender Haltung der Untersucherin zugewandt. Der Kopf der Katzen wurde von einer Hilfsperson gehalten. Die Lider wurden dabei gespreizt, ohne dass äußere Druckeinwirkungen auf den Bulbus entstanden. Fünf Minuten vor Beginn der Messungen wurde den Katzen zweimal im Abstand von einer Minute jeweils ein Tropfen eines Lokalanästhetikums (Proxy-metacainhydrochlorid- Proparacain-POS, Firma Ursapharm, Saarbrücken) in den Konjunktivalsack appliziert. Um eine luftfreie Ankopplung des Schallkopfes an der Kornea zu gewährleisten, wurde Methylzellulosegel (Methocel, Firma Dispers GmbH, Germering) auf den Schallkopf aufgebracht. Dann wurde der Schallkopf mit seiner gesamten Schallfläche dem Korneascheitel aufgesetzt. Dabei wurde besonders darauf geachtet, keinerlei Impression der Kornea zu verursachen. Die senkrecht zum Korneascheitel verlaufende Stellung des Schallkopfes wurde visuell kontrolliert, um ein schnelleres Auffinden der optischen Achse zu erlauben. Die exakte Übereinstimmung der akustischen Achse des Schallkopfes und der optischen Achse des Auges wurde anhand der Qualität der Echos auf dem angeschlossenen Kontrollmonitor festgestellt. Die Kriterien hierfür waren eine maximale Trennung der Linsenechos, eine maximale, nur wenig flachere Darstellung des hinteren Linsenechos im Vergleich zum vorderen Linsenecho, der perpendikuläre Verlauf der Echos von der Grundlinie und eine maximale Glaskörperdimension bei maximalem hinteren Linsenecho.

Nach Einfrieren des Bildes wurden die Teilstrecken des Auges geräteintern berechnet. Dabei wurden folgende biometrischen Messungen durchgeführt:

Bulbuslänge:	Abstand von der Korneavorderfläche bis zur Retinainnenfläche
Vorderkammertiefe:	Abstand von der Korneavorderfläche bis zur vorderen Linsenkapsel
Linsendicke:	Abstand von der Linsenvorderkapsel bis zur Linsenhinterfläche

Die Länge der Glaskörperstrecke, entsprechend dem Abstand von der hinteren Linsenfläche bis zur Retinainnenfläche, ergab sich aus der Differenz von Bulbuslänge und Vorderkammertiefe plus Linsendicke.

3.5 Eigene Messungen

Mit der oben beschriebenen Methode wurden im Zeitraum von drei Jahren an der Klinik für Kleintiere, Chirurgie, der Justus-Liebig-Universität Gießen die Augen von 220 Katzen vermessen. Die Katzen entstammten ausschließlich dem Patientengut der Klinik. Tiere, die eine ophthalmologische Erkrankung aufwiesen, wurden von den Untersuchungen ausgeschlossen. Ebenso wurden Katzen, bei denen aufgrund gravierender Störungen des Allgemeinbefindens, wie z.B. Dehydratation oder Kachexie eine pathologische Veränderung der Teilstrecken des Auges nicht ausgeschlossen werden konnte, nicht mit in die Untersuchung miteinbezogen. Nur Augen, die bei der vorhergehenden ausführlichen Untersuchung als gesund bewertet wurden, gelangten in die Auswertung. Bei einigen Katzen konnte aufgrund des Fehlens eines Bulbus nur ein Auge untersucht werden. Bei sehr unruhigen Patienten kam es vor, dass aufgrund mangelnder Kooperation nur die Auswertung eines Auges möglich war.

3.6 Patientengut

Die Gesamtzahl der in die Auswertung einbezogenen untersuchten Katzen beträgt 220. Insgesamt konnten dabei 397 Augen untersucht und ausgewertet werden.

Bei 177 Katzen konnten beide Augen in die Untersuchung miteinbezogen werden. Bei 14 Katzen wurde nur das linke Auge und bei 29 Tieren wurde nur das rechte Auge untersucht. Insgesamt wurden 206 rechte Augen und 191 linke Augen untersucht.

Bei den adulten Tieren ab 12 Monaten wurden 157 Katzen untersucht. Davon wurden bei 120 Katzen die Daten von beiden Augen ausgewertet. Es konnten 144 rechte und 133 linke Augen, insgesamt also 277 Augen untersucht werden.

3.6.1 Altersverteilung

Die untersuchten Katzen waren zwischen 1 Monat und 178 Monate alt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Altersverteilung.

Tabelle 1: Übersicht der Altersverteilung aller untersuchten Katzen (n = 220) mit arithmetischem Mittelwert, Standardabweichung, Minima und Maxima

	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Alter der untersuchten Katzen in Monaten	220	43,27	43,76	1	178

Dabei steht n für den Stichprobenumfang, \bar{x} für den arithmetischen Mittelwert, s für die Standardabweichung, x_{\min} für den kleinsten vorkommenden Wert und x_{\max} für den größten vorkommenden Wert.

Da die Auswertung hinsichtlich der statistischen Kennwerte und die Untersuchung auf mögliche Zusammenhänge mit Geschlecht, Gewicht, Rasse und Intraokulardruck ausschließlich anhand der Daten adulter Tiere erfolgt, wird eine Übersicht der Altersverteilung adulter Katzen dargestellt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Übersicht der Altersverteilung adulter untersuchten Katzen (n = 157) mit arithmetischem Mittelwert, Standardabweichung, Minima und Maxima

	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Alter der untersuchten Katzen in Monaten	157	58,73	42,96	12	178

Dabei steht n für den Stichprobenumfang, \bar{x} für den arithmetischer Mittelwert, s für die Standardabweichung, x_{\min} für den kleinsten vorkommenden Wert und x_{\max} für den größten vorkommenden Wert.

3.6.2 Geschlechtsverteilung

Von den untersuchten Katzen waren 97 männlich und 123 weiblich. Im folgenden wird die Verteilung innerhalb der Rassen, einmal für alle Katzen zusammen (Tabelle 3), und einmal nur für die adulten Tiere (Tabelle 4), tabellarisch aufgelistet.

Tabelle 3: Aufstellung der Geschlechtsaufteilung sämtlicher untersuchter Katzen ($n = 220$), getrennt nach Rassen

	weiblich	männlich
Europäisch Kurzhaar	69	92
brachycephale Katzen	22	14
großrahmige Katzen	2	6
sonstige Rassen	4	11
gesamt	97	123

Bei den adulten Tieren zeigte sich folgende Geschlechterverteilung:

Tabelle 4: Aufstellung der Geschlechtsaufteilung sämtlicher adulter untersuchten Katzen ($n = 157$), getrennt nach Rassen

	weiblich	männlich
Europäisch Kurzhaar	42	72
brachycephale Katzen	15	10
großrahmige Katzen	1	5
sonstige Rassen	3	9
gesamt	61	96

3.6.3 Gewichtsverteilung

Das Gewicht der untersuchten Tiere reicht von 0,45 kg Körpermasse bis 7 kg Körpermasse (Tabelle 5).

Tabelle 5: Gewichtsverteilung aller untersuchter Katzen (n = 220) mit arithmetischem Mittelwert, Standardabweichung, Minima und Maxima

	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Gewicht der untersuchten Katzen in kg KM	220	3,45	1,4	0,45	7

Dabei steht kg für Kilogramm, KM für Körpermasse, n für den Stichprobenumfang, \bar{x} für den arithmetischen Mittelwert, s für die Standardabweichung, x_{\min} für den kleinsten vorkommenden Wert und x_{\max} für den größten vorkommenden Wert.

Es erfolgt eine gesonderte Darstellung der Verhältnisse bei adulten Tieren (Tabelle 6).

Tabelle 6: Gewichtsverteilung bei den adulten Katzen (n = 157) mit arithmetischem Mittelwert, Standardabweichung, Minima und Maxima

	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Gewicht der untersuchten Katzen in kg KM	157	4,14	0,84	2,5	7

Dabei steht kg für Kilogramm, KM für Körpermasse, n für den Stichprobenumfang, \bar{x} für den arithmetischen Mittelwert, s für die Standardabweichung, x_{\min} für den kleinsten vorkommenden Wert und x_{\max} für den größten vorkommenden Wert.

3.6.4 Rasseverteilung

Die 220 untersuchten Katzen gehörten 19 verschiedenen Rassen an. Bei der statistischen Auswertung wurde die Rasse Europäisch Kurzhaar aufgrund des gehäufteten Vorkommens gesondert untersucht. Die anderen Rassen wurden aufgrund ähnlicher anatomischer Verhältnisse in Rassegruppen zusammengefasst. Dabei wurden brachycephale (kurzköpfige) Rassen in eine Gruppe zusammengeführt. Katzen mit einem im Vergleich zur Europäischen Hauskatze besonders großrahmigen Körperbau wurden in einer anderen Gruppe zusammengefasst. Tiere anderer Rassen wurden in einer dritten Gruppe ausgewertet.

Die Übersicht über die Zugehörigkeit der untersuchten Katzen wird in Tabelle 7 gegeben.

Tabelle 7: Aufstellung der Rasseverteilung und Rassegruppierung aller untersuchten Katzen (n = 220)

Rassengruppen	Anzahl	Rasse	Anzahl
Europäisch Kurzhaar	161	Europäisch Kurzhaar	161
Brachycephale Katzen	36	Perser	17
		Perser-Mischling	2
		Britisch Kurzhaar	3
		Britisch Kurzhaar-Mischling	10
		Exotic Shorthair	4
Großrahmige Katzen	8	Maine Coon	5
		Maine Coon-Mischling	1
		Norwegische Waldkatze	1
		Sibirische Katze	1
Andere Rassen	15	Russisch Blau	2
		Türkisch Angora	1
		Abessinier	1
		Ägyptisch Mau	1
		Heilige Birma	1
		Burma	1
		Devon Rex	2
		Siam	1
		Somali	5

Tabelle 8 zeigt die Aufteilung der Rassen für die adulten Tiere.

Tabelle 8: Aufstellung der Rasseverteilung und Rassegruppierung aller adulten untersuchten Katzen (n = 157)

Rassengruppen	Anzahl	Rasse	Anzahl
Europäisch Kurzhaar	114	Europäisch Kurzhaar	114
Brachycephale Katzen	25	Perser	11
		Perser-Mischling	1
		Britisch Kurzhaar	2
		Britisch Kurzhaar-Mischling	10
		Exotic Shorthair	1
Großrahmige Katzen	6	Maine Coon	4
		Maine Coon-Mischling	1
		Norwegische Waldkatze	0
		Sibirische Katze	1
Andere Rassen	12	Russisch Blau	2
		Türkisch Angora	1
		Abessinier	0
		Ägyptisch Mau	0
		Heilige Birma	1
		Burma	1
		Devon Rex	1
		Siam	1
		Somali	5

3.7 Statistische Auswertung

Die Erfassung und Auswertung der Daten erfolgte auf den Rechnern im lokalen Rechnernetzwerk (LAN) der Arbeitsgruppe Biomathematik und Datenverarbeitung des Fachbereichs Veterinärmedizin der Justus-Liebig-Universität Gießen. Die statistischen Auswertungen wurden unter Verwendung des Statistikprogrammpakets BMDP/ Dynamic, Release 7.0, (DIXON, 1993) durchgeführt. Die graphischen Abbildungen wurden auf einem Personalcomputer mit dem Programm Microsoft Office Excel 2003 erzeugt.

Zur Beschreibung der Daten wurden der Stichprobenumfang (n), die arithmetischen Mittelwerte (\bar{x}), Standardabweichung (s), Minima (x_{\min}) und Maxima (x_{\max}) berechnet und tabellarisch wiedergegeben.

Zur statistischen Prüfung der Beziehung zwischen dem Alter und den Messgrößen wurden mit dem Programm BMDP6D Punktwolken / Korrelationsdiagramme erzeugt. Da der Zusammenhang in allen Fällen nicht-linear war, wurde im Anschluss eine nicht-lineare Regressionsgleichung mit dem Programm BMDP3R angepasst und die Parameter eines Wachstumsmodells geschätzt.

Der Zusammenhang zwischen der Gesamtlänge des Auges und dem Gewicht wurde mittels einer Regressionsanalyse mit dem Programm BMDP6D analysiert. Auch die Korrelation zwischen der gesamten Bulbuslänge und den einzelnen Abschnitten des Auges wurde mit diesem Programm analysiert und mittels einer linearen Regressionsgleichung dargestellt.

Die Daten der Tiere, deren Augen unter Beachtung der Exponentialfunktion als ausgewachsen angesehen werden konnten, wurden mit dem Programm BMDP2V einer 3-faktoriellen Kovarianzanalyse (mit Messwiederholung im Faktor "Seite") auf die Einflussfaktoren Rasse und Geschlecht als qualitative Faktoren und Gewicht und Intraokulardruck als quantitative Faktoren hin untersucht. Dabei wurden die Katzen der Rassegruppen Europäisch Kurzhaar und brachycephale Katzen in die Untersuchung miteinbezogen. Die Katzen der anderen Rassegruppen wurden aufgrund der geringen Fallzahlen bei diesen Analysen nicht berücksichtigt. Da nicht von allen Katzen beide Augen vermessen werden konnten, wurde die Untersuchung mit dem Programm BDMP5V unter Anwendung des Wald-Tests wiederholt. Bei der Bewertung der statistischen Signifikanzen wurde das Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ zugrunde gelegt, d.h. Ergebnisse mit $p \leq 0,05$ wurden als statistisch signifikant angesehen. Zusätzlich wird der exakte p-Wert angegeben.

4 Ergebnisse

4.1 Einfluss des Wachstums auf die biometrischen Daten

Der Zusammenhang zwischen dem Alter der Katzen und den Messgrößen axiale Bulbuslänge, Vorderkammertiefe, Linsendicke und Glaskörperstrecke wurde untersucht.

Es ergab sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen den Messgrößen und dem Alter, der durch die nicht-lineare Regressionsgleichung

$$Y = E - A * e^{-b * x} + \varepsilon$$

wiedergegeben werden konnte. Dabei werden die Symbole Y für die Messgröße, E für den mittleren Endwert der Messungen, A für den mittleren Anstieg nach der Geburt bis zum mittleren Endwert, e für die Euler'sche Zahl, b für den logarithmischen Steigungskoeffizient, x für das Alter der Tiere in Monaten und ε für die Zufallsabweichung verwendet.

In Abbildung 2 werden die Messwerte der axialen Bulbuslänge in Abhängigkeit vom Alter als Punktwolke gemeinsam mit der jeweils errechneten Kurve der Exponentialfunktion dargestellt.

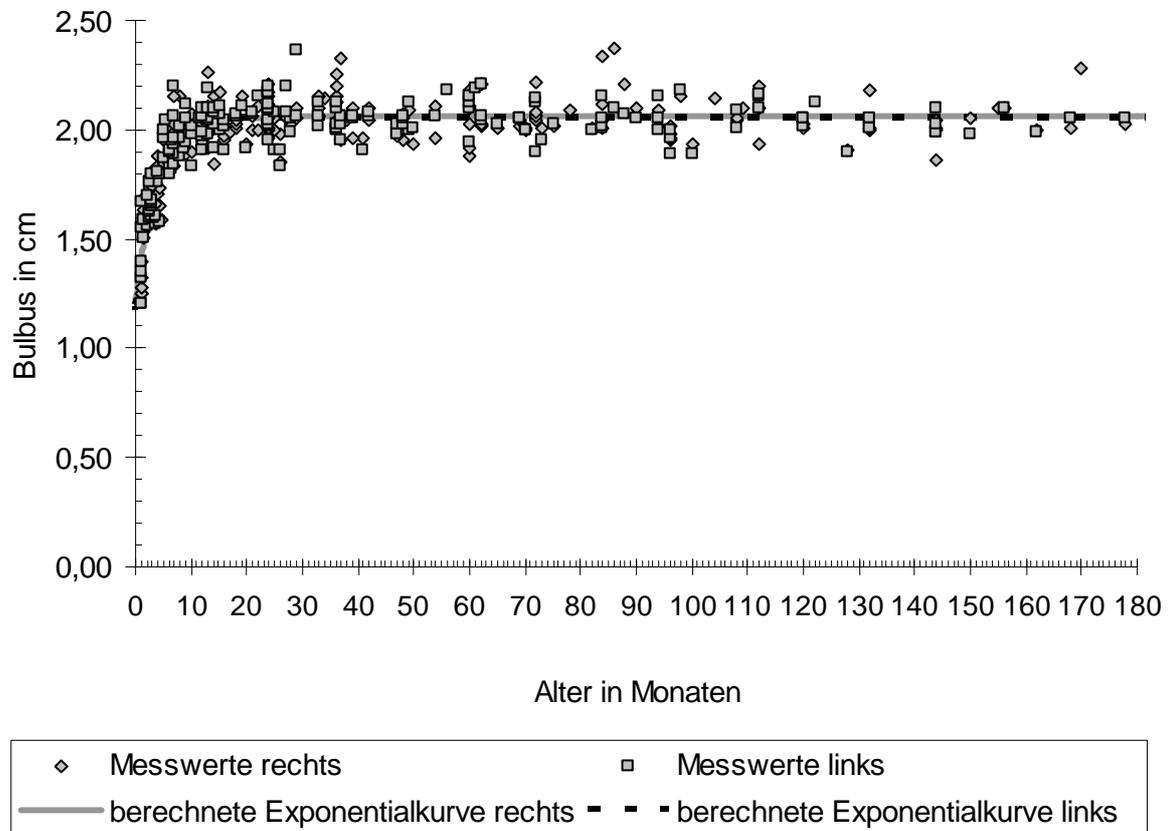


Abbildung 2: Abhängigkeit zwischen der axialen Bulbuslänge in Zentimetern (cm) und dem Alter - dargestellt sind die einzelnen Messwerte rechter und linker Augen aller untersuchten Katzen (n = 220) in Abhängigkeit vom Alter der Katzen in Monaten sowie die Kurven der für das Wachstum der Bulbuslänge berechneten Exponentialfunktionen rechter und linker Augen

Die graphische Darstellung zeigt das abnehmend exponentielle Wachstum der axialen Bulbuslänge bei zunehmendem Alter. Die Messwerte liegen dicht an oder auf der berechneten Kurve der Regressionsgleichung, es zeigt sich, dass die Regressionsgleichung das Wachstum sehr gut beschreibt.

Dabei sind die berechneten Exponentialkurven für rechte und linke Augen nahezu identisch und es kommt daher zu einer Überlagerung der beiden Kurven.

Zur genaueren Betrachtung des Wachstumsverlaufs wird die Kurve detailliert für die ersten 15 Monate dargestellt (Abbildung 3).

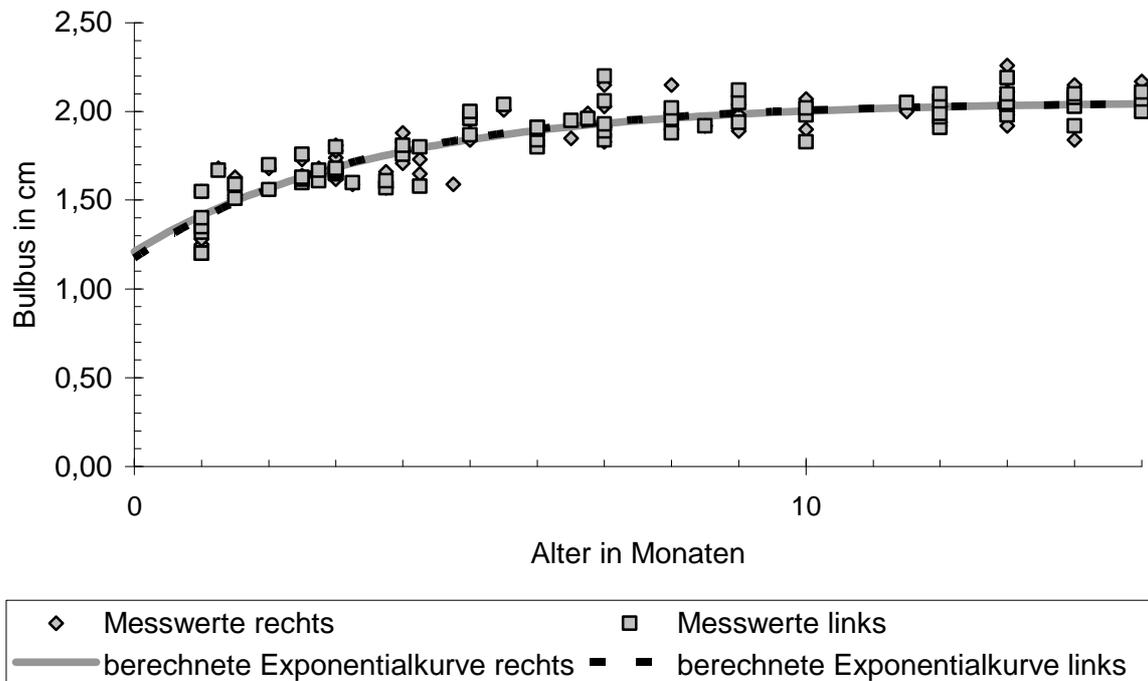


Abbildung 3: Abhängigkeit zwischen der axialen Bulbuslänge in Zentimetern (cm) und dem Alter - dargestellt sind die einzelnen Messwerte rechter und linker Augen in Abhängigkeit vom Alter der Katzen in Monaten bis zum Alter von 15 Monaten (n = 82) sowie die Kurven der für das Wachstum der Bulbuslänge berechneten Exponentialfunktionen rechter und linker Augen, ebenfalls bis zum Alter von 15 Monaten

Eine Annäherung an circa 99 % des mittleren Endwertes, quasi gleichbedeutend mit dem Erreichen der Plateauphase der Exponentialkurve, wird bei der axialen Bulbuslänge mit 12 Monaten erreicht. Das Wachstum des Auges ist somit mit Abschluss des ersten Lebensjahrs beendet.

Abbildung 4 zeigt das Wachstum der Vorderkammertiefe bei zunehmendem Alter.

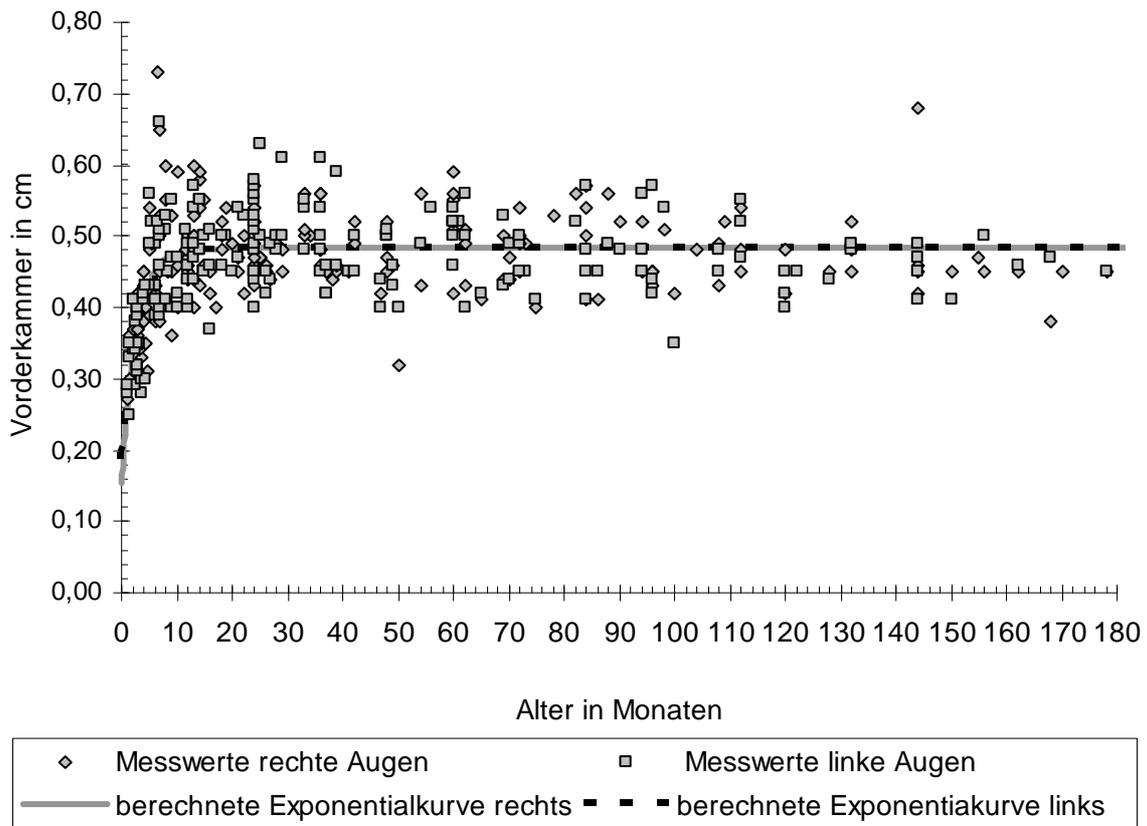


Abbildung 4: Abhängigkeit zwischen der Vorderkammertiefe in Zentimetern (cm) und dem Alter - dargestellt sind die einzelnen Messwerte rechter und linker Augen aller untersuchter Katzen (n = 220) in Abhängigkeit vom Alter der Katzen in Monaten sowie die Kurven der für das Wachstum der Vorderkammertiefe berechneten Exponentialfunktionen rechter und linker Augen

Hier zeigt sich, ähnlich wie bei der axialen Bulbuslänge, das abnehmend exponentielle Wachstum der Vorderkammer. Das Wachstum rechter und linker Augen ähnelt einander auch bei der Vorderkammertiefe, sodass sich die berechneten Exponentialkurven für rechte und linke Augen wieder überlagern.

Abbildung 5 gibt das Wachstumsverhalten der Linse bei rechten und linken Katzenaugen wieder.

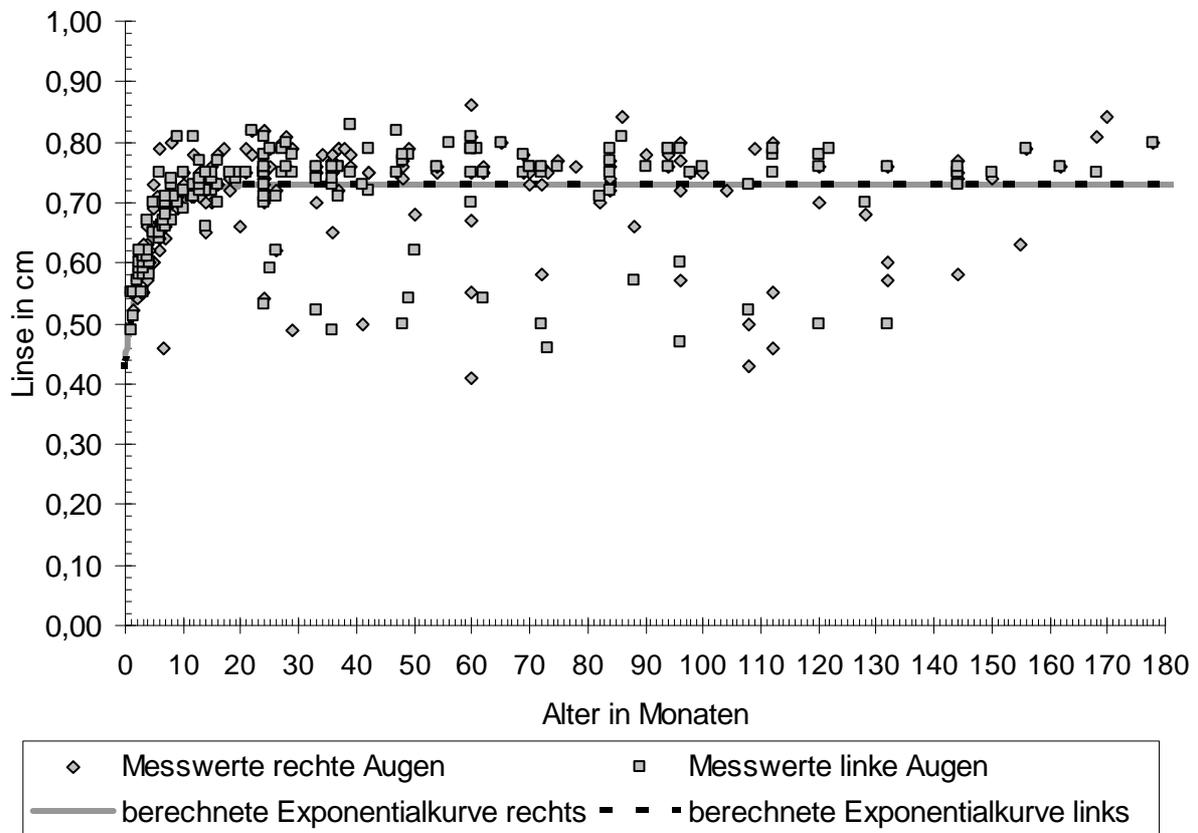


Abbildung 5: Abhängigkeit zwischen der Linsendicke in Zentimetern (cm) und dem Alter - dargestellt sind die einzelnen Messwerte rechter und linker Augen aller untersuchten Katzen (n = 220) in Abhängigkeit vom Alter der Katzen in Monaten sowie die Kurven der für das Wachstum der Linsendicke berechneten Exponentialfunktionen rechter und linker Augen

Das abnehmend exponentielle Wachstum zeigt sich bei der Linsendicke ebenso wie bei der Glaskörperstrecke (Abbildung 6). Auch die Überlagerung der Kurven für rechte und linke Augen findet sich bei beiden Teilstrecken wieder.

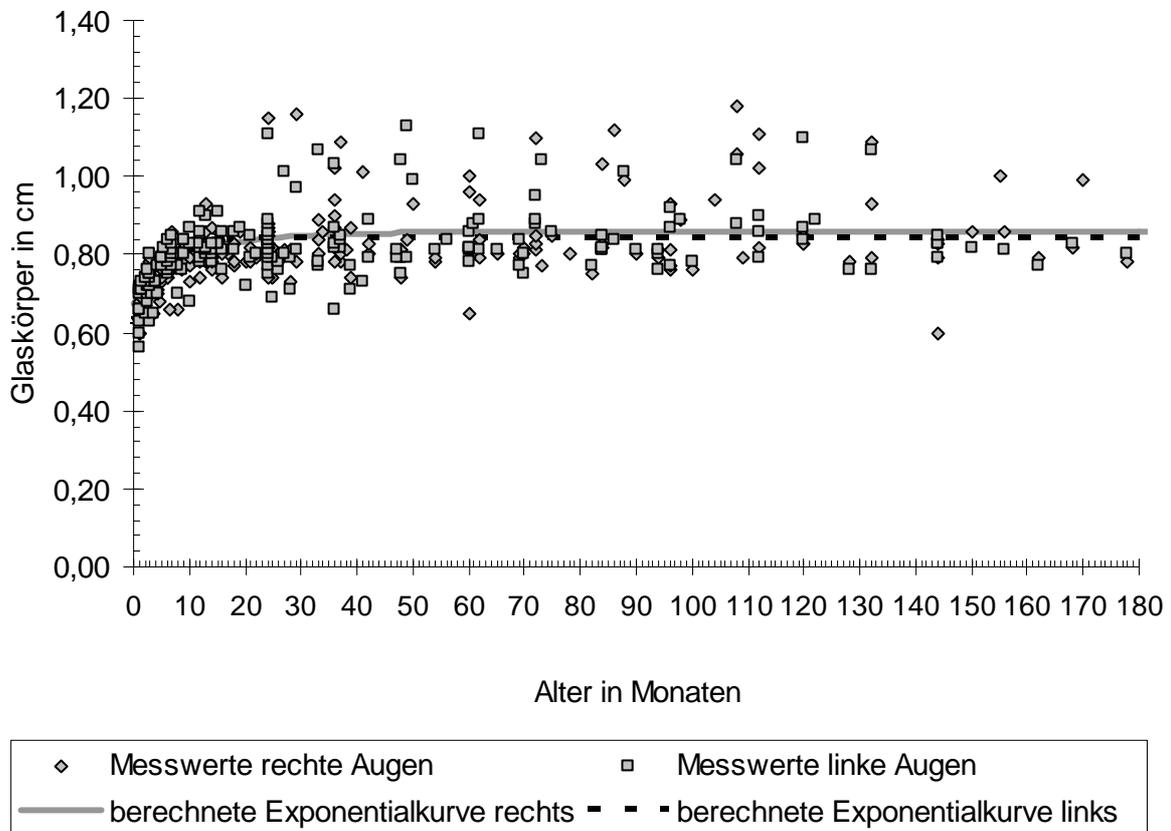


Abbildung 6: Abhängigkeit zwischen der Glaskörperstrecke in Zentimetern (cm) und dem Alter - dargestellt sind die einzelnen Messwerte rechter und linker Augen aller untersuchten Katzen (n = 220) in Abhängigkeit vom Alter der Katzen in Monaten sowie die Kurven der für das Wachstum der Glaskörperstrecke berechneten Exponentialfunktionen rechter und linker Augen

Die Zunahme der axialen Bulbuslänge vom Zeitpunkt der Geburt bis zum Erreichen des durchschnittlichen Endwertes bei adulten Tieren beträgt gemittelt über beide Augen 72,6 %. Dabei trägt das enorme Wachstum der Vorderkammertiefe um durchschnittlich 187,2 % aufgrund der an der axialen Bulbuslänge nur gering beteiligten Vorderkammertiefe insgesamt gesehen nur wenig bei. Der größte Augenabschnitt, der Glaskörper, wächst um durchschnittlich 31,1 %. Die Zunahme der Linsendicke spiegelt mit durchschnittlich 67,4 % am ehesten das Gesamtwachstum des Auges wider.

Das Gesamtwachstum des Auges ist nach dem ersten Lebensjahr abgeschlossen. Die Annäherung an circa 99 % des mittleren Endwertes, quasi gleichbedeutend mit dem Erreichen der Plateauphase der Exponentialkurve, wird bei der axialen Bulbuslänge mit 12 Monaten erreicht.

Bei den einzelnen Messgrößen ist die Konstante b und damit die Steilheit der Anstiegsphase der Funktionskurve unterschiedlich. Damit ergibt sich, dass die Sättigungswerte bzw. die Annäherung an den Endwert zu verschiedenen Zeitpunkten erreicht wurde. Die Vorderkammer dehnt sich sehr schnell auf spätere Dimensionen aus, die Linse folgt der Entwicklung nur leicht verzögert und der Glaskörper erreicht als letzte Teilstrecke seine endgültige Größe.

Sowohl bei der graphischen Auswertung der Linsendicke beider Augen als auch bei der Glaskörperstrecke zeigen sich einige Werte, die von der sonstigen Verteilung der Messwerte abweichen. Dabei handelt es sich bei der Linsendicke um Werte, die deutlich kleiner sind als der Durchschnitt, der bei Europäisch Kurzhaar bei 0,733 cm für rechte Augen und 0,735 cm für linke Augen und bei brachycephalen Katzen bei 0,702 cm für rechte Augen und 0,710 cm für linke Augen liegt. Bei der Glaskörperstrecke sind es Werte, die deutlich höher liegen als die durchschnittlichen Werte für Europäisch Kurzhaar mit 0,841 cm für rechte Augen und 0,834 cm für linke bzw. 0,883 cm für rechte Augen von brachycephalen Katzen und 0,880 cm für deren linke Augen. Die Untersuchung der jeweiligen Messgrößen und der dazugehörigen Patienten zeigt den Zusammenhang von Linsendicke und Glaskörperstrecke. Bei den meisten Katzen ergänzen sich eine dünne Linse und eine lange Glaskörperstrecke zu einem insgesamt durchschnittlich langen Auge. Bei den wenigen Patienten, wo entweder nur eine dünne Linse oder nur eine lange Glaskörperstrecke vorliegt, resultiert ein insgesamt relativ kurzer oder langer Bulbus im Vergleich zu den Durchschnittswerten von 2,050 cm für rechte und 2,048 cm für linke Augen von Europäisch Kurzhaar und 2,093 cm für rechte Augen von brachycephalen und 2,085 cm für deren linke Augen.

In Tabelle 9 werden die Messgrößen von Katzen mit auffälligen Werten wiedergegeben.

Tabelle 9: Tabellarische Übersicht der erhobenen Daten und Messwerte der Teilstrecken der Augen von Katzen mit auffälligen Messgrößen (n = 30) bei der Linsendicke und/ oder der Glaskörperstrecke, auffällige Werte sind grau unterlegt

I.-Nr.	Rasse	Alter in Monaten	Geschlecht	Gewicht in kg	Bulbus rechts in cm	Vorderkammer rechts in cm	Linse rechts in cm	Glas-körper rechts in cm	Bulbus links in cm	Vorderkammer links in cm	Linse links in cm	Glas-körper links in cm
32	T. A.	132	m	7,00	2,01	0,48	0,60	0,93	2,05	0,48	0,50	1,07
141	EKH	120	m	4,80	2,03	0,48	0,70	0,85	2,05	0,45	0,50	1,10
153	Perser	108	w	4,20	2,05	0,49	0,50	1,06	2,01	0,45	0,52	1,04
110	Siam	96	m	4,80	1,98	0,45	0,77	0,76	1,89	0,42	0,60	0,87
215	EKH	96	m	3,20	1,95	0,45	0,57	0,93	1,96	0,57	0,47	0,92
114	BKH	88	w	5,20	2,21	0,56	0,66	0,99	2,07	0,49	0,57	1,01
67	EKH	73	w	3,10	2,01	0,49	0,75	0,77	1,95	0,45	0,46	1,04
165	EKH	72	w	4,00	2,06	0,49	0,76	0,81	1,90	0,45	0,50	0,95
162	Perser	62	m	5,00	2,21	0,51	0,76	0,94	2,21	0,56	0,54	1,11
29	M. C.	49	m	5,50	*	*	*	*	2,13	0,46	0,54	1,13
217	EKH	48	m	4,40	2,07	0,52	0,74	0,81	2,05	0,51	0,50	1,04
106	EKH	36	w	4,50	2,15	0,56	0,65	0,94	2,00	0,48	0,49	1,03
213	EKH	33	m	3,50	2,15	0,50	0,76	0,89	2,13	0,54	0,52	1,07
3	EKH	25	m	3,40	2,00	0,47	0,79	0,74	1,91	0,63	0,59	0,69
37	B.-M.	24	w	5,10	2,21	0,52	0,54	1,15	2,20	0,56	0,53	1,11
209	EKH	144	w	5,00	1,86	0,68	0,58	0,60	2,10	0,49	0,76	0,85
221	BKH	132	m	6,20	2,18	0,52	0,57	1,09	*	*	*	*
101	EKH	108	w	4,30	2,04	0,43	0,43	1,18	2,09	0,48	0,73	0,88
22	EKH	112	m	5,00	1,93	0,45	0,46	1,02	2,16	0,55	0,75	0,86
167	Perser	112	m	4,80	2,20	0,54	0,55	1,11	2,15	0,47	0,78	0,90
52	EKH	72	m	4,20	2,22	0,54	0,58	1,10	*	*	*	*
146	E. Sh.	60	m	3,20	2,03	0,52	0,55	0,96	*	*	*	*
130	EKH	60	m	3,50	1,92	0,51	0,41	1,00	2,10	0,50	0,79	0,81
58	EKH	41	m	2,90	1,96	0,45	0,50	1,01	1,91	0,45	0,73	0,73
194	EKH	29	m	4,20	2,10	0,45	0,49	1,16	2,36	0,61	0,78	0,97
100	Hl. Bir.	27	m	5,00	*	*	*	*	2,20	0,44	0,75	1,01
49	EKH	84	m	4,50	2,34	0,57	0,74	1,03	*	*	*	*
82	EKH	86	m	5,30	2,37	0,41	0,84	1,12	2,10	0,45	0,81	0,84
173	EKH	36	m	4,00	2,25	0,48	0,75	1,02	*	*	*	*
2	EKH	37	m	3,70	2,33	0,45	0,79	1,09	2,06	0,46	0,76	0,84

Es steht BKH für Britisch Kurzhaar, B.-M. für Britisch Kurhaar-Mischling, cm für Zentimeter, EKH für Europäisch Kurzhaar, E. Sh. für Exotic Shorthair, Hl. Bir. für Heilige Birma, I.-Nr. für Identifizierungs-Nummer, kg für Kilogramm, m für männlich, M. C. für Maine Coon, T. A. für Türkisch Angora, w für weiblich und * für fehlende Messwerte.

Bei den Patienten, die auffällige Werte zeigen, kann kein gemeinsames Kriterium wie Rasse, Geschlecht oder Gewicht gefunden werden. Bis auf wenige Ausnahmen finden sich die auffälligen Werte einseitig. Dabei sind rechte und linke Augen in etwa gleich häufig betroffen.

Um den grundsätzlichen Zusammenhang der einzelnen Teilstrecken des Auges mit der axialen Gesamtlänge näher zu untersuchen, wurde mit dem Programm BMDP6D jeweils der Zusammenhang von Vorderkammertiefe, Linsendicke und Glaskörperstrecke mit der axialen Bulbuslänge analysiert und eine Regressionsgerade berechnet. Abbildung 7 zeigt jeweils die Messwerte der Vorderkammertiefe in Abhängigkeit von der Bulbuslänge bei adulten Katzen als Punktwolke und die berechnete Regressionsgerade.

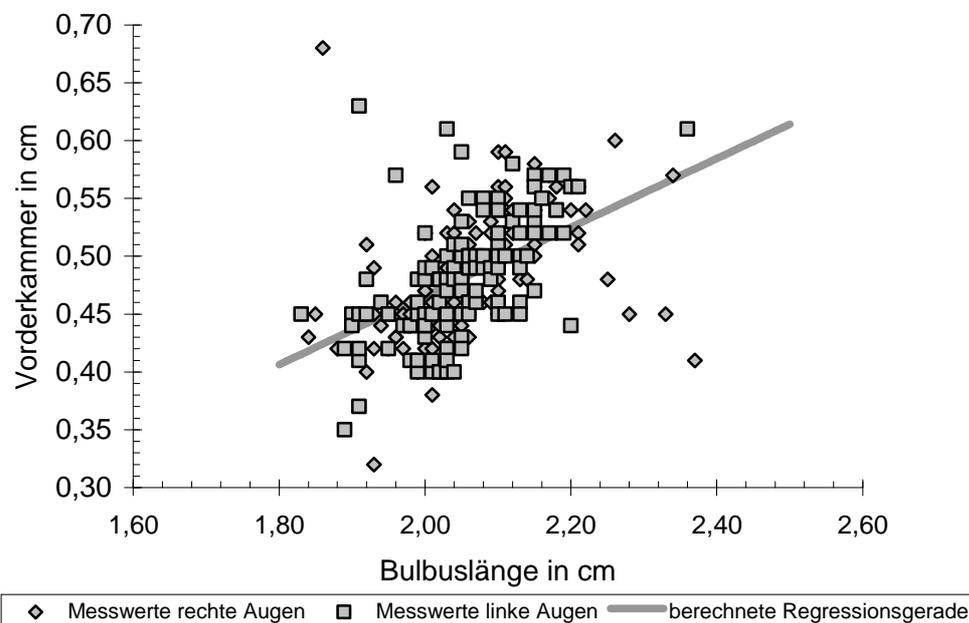


Abbildung 7: Graphische Darstellung der Korrelation von Vorderkammertiefe zu Bulbuslänge in Zentimetern (cm) - dargestellt sind die Messwerte der Vorderkammertiefe von adulten Katzen (n = 157) in Abhängigkeit von der Bulbuslänge zusammen mit der für den Zusammenhang berechneten Regressionsgeraden

Es zeigt sich, dass Vorderkammertiefe und Bulbuslänge in einem linearen Zusammenhang stehen. Der Regressionskoeffizient beträgt $b = 0,3$. Die Werte zeigen eine gewisse Streuung um die berechnete Regressionsgerade, einzelne Werte weichen relativ stark von ihr ab.

Abbildung 8 zeigt die Korrelation von Linsendicke und Bulbuslänge.

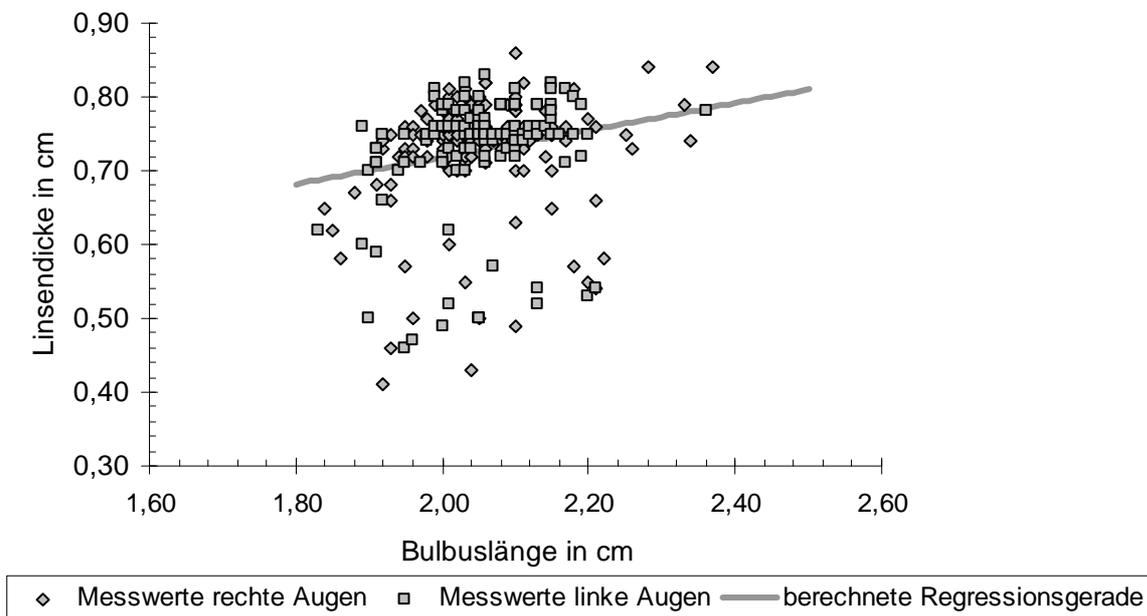


Abbildung 8: Graphische Darstellung des Zusammenhangs von Linsendicke und Bulbuslänge in Zentimetern (cm) - dargestellt sind die Messwerte der Linsendicke aller adulten untersuchten Katzen (n = 157) in Abhängigkeit von der Bulbuslänge zusammen mit der für den Zusammenhang berechneten Regressionsgeraden

Die Messwerte gruppieren sich um die berechnete Regressionsgerade. Der Regressionskoeffizient liegt bei $b = 0,18$. Abweichungen nach oben gibt es kaum, aber einige Messwerte weichen deutlich nach unten ab. Bei diesen Messwerten handelt es sich um die Daten der Tiere, die auch schon bei der Auswertung der Wachstumskurve auffielen.

Abbildung 9 zeigt bei den Daten der Glaskörperstrecke ebenfalls eine Annäherung an die berechnete Regressionsgerade. Der Regressionskoeffizient liegt hier bei $b = 0,18$. Hier weichen einige Messwerte, entsprechend auch der Auswertung der Glaskörperstrecke beim Wachstum, nach oben ab.

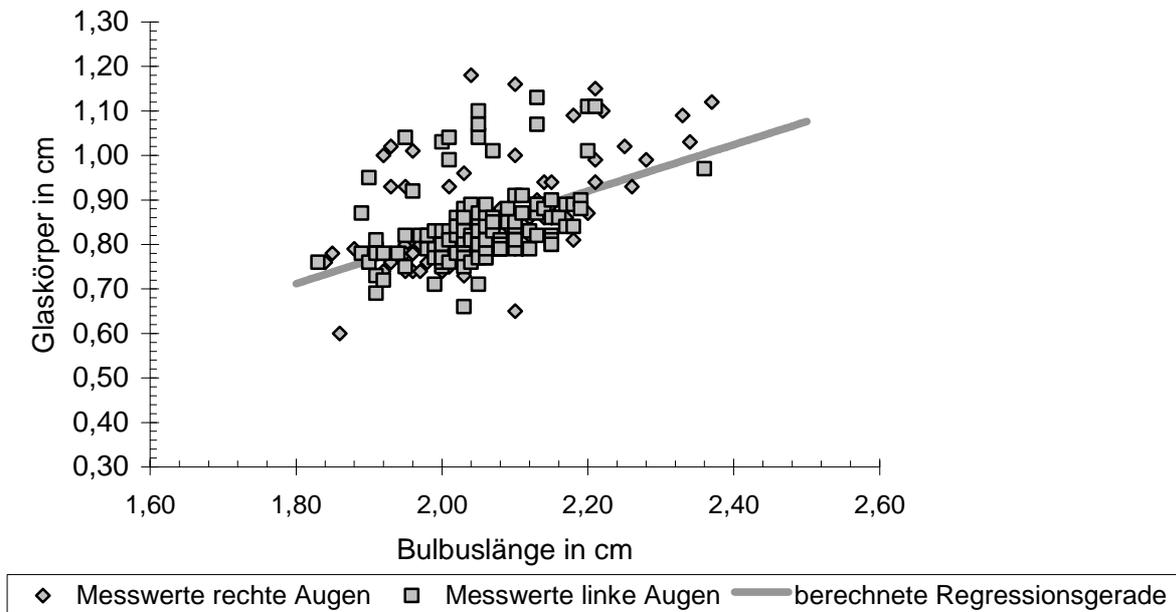


Abbildung 9: Graphische Darstellung der Korrelation von Glaskörper zu Bulbuslänge in Zentimetern (cm) - dargestellt sind die Messwerte der Glaskörperstrecke aller adulter untersuchten Katzen ($n = 157$) in Abhängigkeit von der Bulbuslänge zusammen mit der für den Zusammenhang berechneten Regressionsgeraden

Die Verteilung um die berechnete Regressionsgerade wird durch den Korrelationskoeffizient für Vorderkammer und Bulbuslänge mit $r = 0,501$ und den Korrelationskoeffizient für Glaskörper und Bulbuslänge mit $r = 0,486$ wiedergegeben. Die Teilstrecken Vorderkammer und Glaskörper stehen also in ähnlich direktem Zusammenhang mit der axialen Ausdehnung des Bulbus.

Der Korrelationskoeffizient von Linsendicke und Bulbuslänge zeigt mit $r = 0,196$ den deutlich geringeren Zusammenhang.

4.2 Einfluss der Rasse auf die biometrischen Daten

Die 3-faktorielle Varianzanalyse zeigt mit $p = 0,015$ für die axiale Bulbuslänge, $p = 0,024$ für die Vorderkammertiefe und $p = 0,0054$ für die Glaskörperstrecke deutlich signifikante Unterschiede für die einzelnen Rassen. Lediglich die Linsendicke zeigt mit $p = 0,24$ keine Beeinflussung durch die Rassezugehörigkeit. Die Ergebnisse des Wald-Tests sind mit $p = 0,17$ für die axiale Bulbuslänge, $p = 0,036$ für die Vorderkammertiefe, $p = 0,30$ für die Linsendicke und $p = 0,19$ für die Glaskörperstrecke nicht so eindeutig.

Da für die Rassegruppen der großrahmigen Katzen und sonstigen Rassen die Fallzahlen sehr gering sind, wurde die Analyse in der Gegenüberstellung der beiden zahlenmäßig größten Gruppen, den Europäisch Kurzhaarkatzen und den brachycephalen Katzen, wiederholt.

Hier zeigt sich mit $p = 0,012$ ein signifikanter Zusammenhang zwischen den Rassegruppen und der axialen Bulbuslänge. Im Wald-Test wird die auffällige Korrelation durch einen p-Wert von 0,066 wiedergegeben. Abbildung 10 zeigt die Unterschiede der Rassegruppen.

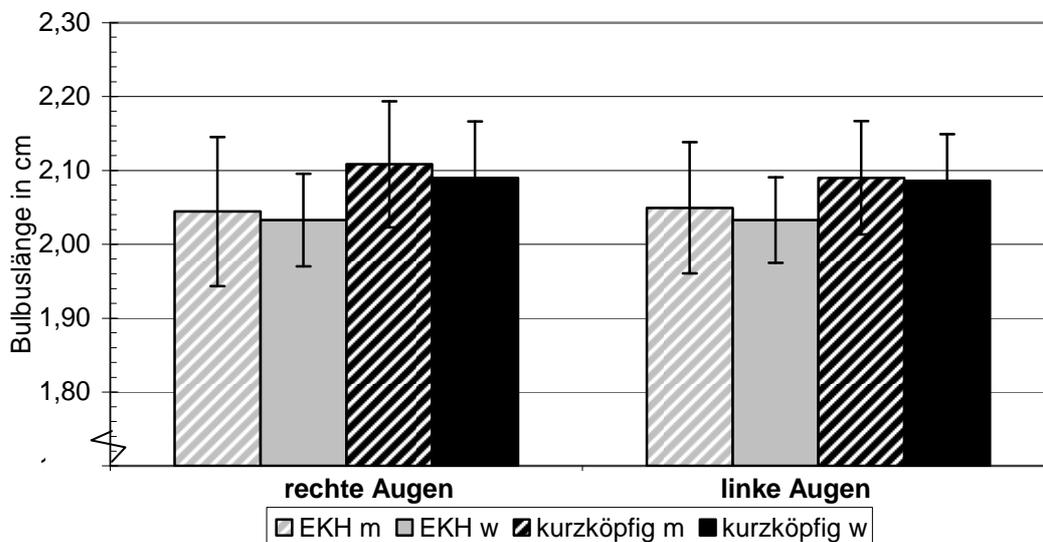


Abbildung 10: Graphische Darstellung des Vergleichs der Bulbuslänge in Zentimetern (cm) bei EKH (Europäisch Kurzhaar) ($n = 114$) und brachycephalen Katzen ($n = 25$) - dargestellt sind die durchschnittlichen Messwerte adulter Katzen und die dazugehörige Fehlervarianz für EKH und brachycephale Katzen, jeweils nach Geschlecht getrennt (m = männlich, w = weiblich), rechte und linke Augen sind dargestellt

Die Darstellung zeigt sowohl für rechte als auch für linke Augen, dass die axiale Bulbuslänge bei brachycephalen Katzen länger ist als bei Europäisch Kurzhaar. Es zeigen sich geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Geschlechtern, die Wechselwirkung von Rasse und Geschlecht zeigt in der 3-faktoriellen Kovarianzanalyse aber mit $p = 0,85$ ebenso wenig signifikante Unterschiede der Messwerte wie die Wechselwirkung von Rasse und Seite mit $p = 0,46$ sowie Rasse, Seite und Geschlecht mit $p = 0,63$.

Für die Vorderkammertiefe kann mit $p = 0,0065$ ein sehr deutlicher statistisch relevanter Zusammenhang nachgewiesen werden. Auch der Wald-Test zeigt mit einem p-Wert von 0,013 die Signifikanz der Rassenunterschiede (Abbildung 11).

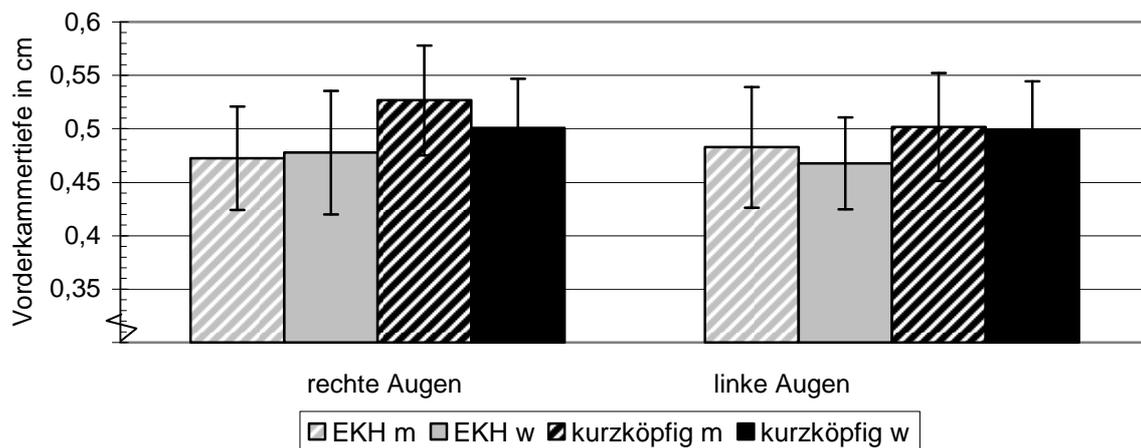


Abbildung 11: Graphische Darstellung des Vergleichs der Vorderkammertiefe bei EKH (Europäisch Kurzhaar) ($n = 114$) und brachycephalen Katzen ($n = 25$) - dargestellt sind die durchschnittlichen Messwerte und die dazugehörige Fehlervarianz für die Vorderkammertiefe für EKH und brachycephale Katzen, jeweils nach Geschlecht getrennt, rechte und linke Augen sind dargestellt

Die Abbildung zeigt die deutlich tiefere Vorderkammer bei brachycephalen Katzen im Vergleich zu Europäisch Kurzhaar. Die tiefere Vorderkammer bei brachycephalen Katzen im Vergleich zu Europäisch Kurzhaar ist sowohl für rechte als auch für linke Augen nachvollziehbar. Die 3-faktorielle Kovarianzanalyse zeigt weder in der Wechselwirkung von Rasse

und Geschlecht mit $p = 0,69$ noch in der Wechselwirkung von Rasse und Seite mit $p = 0,3$ sowie Rasse, Seite und Geschlecht mit $p = 0,12$ signifikante Unterschiede der Messwerte.

Der Vergleich der Linsendicke zeigt mit $p = 0,22$ in der Varianzanalyse und $p = 0,069$ im Wald-Test keine signifikanten Unterschiede bei den einzelnen Rassegruppen. Die 3-faktorielle Kovarianzanalyse zeigt außerdem weder in der Wechselwirkung von Rasse und Geschlecht noch in der Wechselwirkung von Rasse und Seite sowie Rasse, Seite und Geschlecht signifikante Unterschiede der Messwerte der Linsendicke.

Die Werte der Glaskörperstrecke weisen mit $p = 0,064$ in der Varianzanalyse und $p = 0,05$ im Wald-Test eine statistische Auffälligkeit auf, die an der Grenze zur statistisch festgelegten Signifikanz liegt. Wechselwirkungen von Seite und Rasse, Geschlecht und Rasse sowie Seite, Geschlecht und Rasse haben auch hier keinen Einfluss. Abbildung 12 zeigt die graphische Darstellung des Rassevergleichs der Glaskörperstrecke.

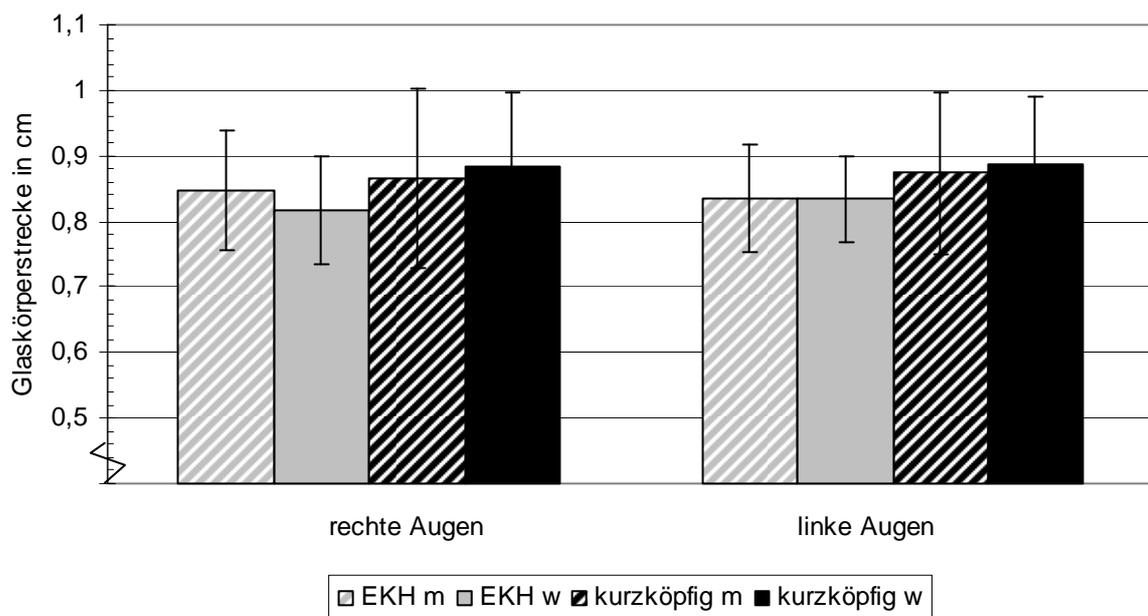


Abbildung 12: Graphische Darstellung des Vergleichs der Glaskörperstrecke bei EKH (Europäisch Kurzhaar) ($n = 114$) und brachycephalen Katzen ($n = 25$) - dargestellt sind die durchschnittlichen Messwerte und die dazugehörige Fehlervarianz für die Glaskörperstrecke für EKH und brachycephale Katzen, jeweils nach Geschlecht getrennt (m = männlich, w = weiblich), rechte und linke Augen sind dargestellt

Die Abbildung zeigt, dass die rassespezifischen Differenzen zwar nachvollziehbar, aber nicht sehr deutlich ausgeprägt sind.

In Tabelle 10 werden die biometrischen Daten für Augen der verschiedenen Rassegruppen wiedergegeben:

Tabelle 10: Datenbeschreibung der Rohdaten der durchschnittlichen Messwerte in Zentimetern (cm) und Standardabweichung der biometrischen Daten der Teilstrecken des Katzenauges für Katzen der Rasse Europäisch Kurzhaar (n = 114) und brachycephale Rassen (n = 25), jeweils für rechte und linke Augen

	Europäisch Kurzhaar	Standard-abweichung	brachycephal	Standard-abweichung
Bulbuslänge rechts in cm	2,050	0,095	2,093	0,074
Bulbuslänge links in cm	2,048	0,079	2,085	0,065
Vorderkammer rechts in cm	0,476	0,052	0,509	0,048
Vorderkammer links in cm	0,479	0,053	0,495	0,050
Linse rechts in cm	0,733	0,077	0,702	0,096
Linse links in cm	0,735	0,078	0,710	0,093
Glaskörper rechts in cm	0,841	0,092	0,883	0,130
Glaskörper links in cm	0,834	0,075	0,880	0,105

Daraus lassen sich beschreibend die gemeinsamen Mittelwerte für die Teilstrecken des Auges von Europäisch Kurzhaar und brachycephalen Katzen über beide Seiten gewichtet mitteln (Tabelle 11).

Tabelle 11: beschreibende Mittelwerte der biometrischen Daten der Teilstrecken des Katzenauges von Europäisch Kurzhaar (n = 114) und brachycephalen Katzen (n = 25) in Zentimetern (cm)

	Europäisch Kurzhaar	brachycephale Rassen
Bulbus in cm	2,049	2,089
Vorderkammer in cm	0,477	0,503
Linse in cm	0,734	0,705
Glaskörper in cm	0,838	0,881

Tabelle 12 zeigt die Bulbuslänge von weiblichen Katzen mit einem Mindestalter von 12 Monaten für alle Rassen mit Angabe des Stichprobenumfangs, der arithmetischen Mittelwerte, Standardabweichungen, kleinsten und größten gemessenen Werten. Die Rohdaten, getrennt nach Rasse und Geschlecht, werden dargestellt.

Tabelle 12: Datenbeschreibung der Rohdaten der Bulbuslänge weiblicher Tiere mit einem Mindestalter von 12 Monaten (n = 61), dargestellt sind arithmetischer Mittelwert, Standardabweichung, Minima und Maxima für die einzelnen Rassegruppen und für rechte und linke Augen getrennt

Bulbuslänge rechts in cm	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	39	2,034	0,065	1,860	2,200
brachycephale Katzen	15	2,085	0,074	2,000	2,210
großrahmige Katzen	0	-	-	-	-
sonstige Rassen	3	2,060	0,036	2,030	2,100

Bulbuslänge links in cm	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	37	2,037	0,061	1,890	2,190
brachycephale Katzen	13	2,086	0,063	2,010	2,200
großrahmige Katzen	1	2,050	0,000	2,050	2,050
sonstige Rassen	3	2,023	0,067	1,980	2,100

Dabei stehen die Symbole cm für Zentimeter, n für den Stichprobenumfang, \bar{x} für den arithmetischen Mittelwert, s für die Standardabweichung, x_{\min} für den kleinsten vorkommenden Wert und x_{\max} für den größten vorkommenden Wert.

Tabelle 13 zeigt die Bulbuslänge von männlichen Katzen mit einem Mindestalter von 12 Monaten für alle Rassen mit Angabe des Stichprobenumfangs, der arithmetischen Mittelwerte, Standardabweichungen, kleinsten und größten gemessenen Werten.

Tabelle 13: Datenbeschreibung der Rohdaten der Bulbuslänge männlicher Tiere mit einem Mindestalter von 12 Monaten (n = 96) - dargestellt sind arithmetischer Mittelwert, Standardabweichung, Minima und Maxima für die einzelnen Rassegruppen und für rechte und linke Augen getrennt

Bulbuslänge rechts in cm	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	67	2,059	0,109	1,840	2,370
brachycephale Katzen	9	2,107	0,077	2,010	2,210
großrahmige Katzen	4	2,038	0,063	1,960	2,110
sonstige Rassen	7	1,994	0,097	1,850	2,150

Bulbuslänge links in cm	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	58	2,056	0,089	1,910	2,360
brachycephale Katzen	7	2,081	0,736	2,000	2,210
großrahmige Katzen	5	2,068	0,050	2,000	2,130
sonstige Rassen	9	2,007	0,117	1,830	2,200

Dabei stehen die Symbole cm für Zentimeter, n für den Stichprobenumfang, \bar{x} für den arithmetischen Mittelwert, s für die Standardabweichung, x_{\min} für den kleinsten vorkommenden Wert und x_{\max} für den größten vorkommenden Wert.

Tabelle 14 gibt Aufschluss über die Vorderkammertiefe von weiblichen Katzen mit einem Mindestalter von 12 Monaten für alle Rassen mit Angabe des Stichprobenumfangs, der arithmetischen Mittelwerte, Standardabweichungen, kleinsten und größten gemessenen Werten.

Tabelle 14: Datenbeschreibung der Rohdaten der Vorderkammertiefe weiblicher Tiere mit einem Mindestalter von 12 Monaten (n = 61) - dargestellt sind arithmetischer Mittelwert, Standardabweichung, Minima und Maxima für die einzelnen Rassegruppen und für rechte und linke Augen getrennt

Vorderkammer rechts in cm	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	39	0,474	0,057	0,400	0,680
brachycephale Katzen	15	0,495	0,045	0,450	0,570
großrahmige Katzen	0	-	-	-	-
sonstige Rassen	3	0,463	0,023	0,450	0,510

Vorderkammer links in cm	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	37	0,467	0,043	0,350	0,570
brachycephale Katzen	13	0,499	0,045	0,450	0,580
großrahmige Katzen	1	0,450	0,000	0,450	0,450
sonstige Rassen	3	0,463	0,047	0,440	0,590

Dabei stehen die Symbole cm für Zentimeter, n für den Stichprobenumfang, \bar{x} für den arithmetischen Mittelwert, s für die Standardabweichung, x_{\min} für den kleinsten vorkommenden Wert und x_{\max} für den größten vorkommenden Wert.

Tabelle 15 gibt Aufschluss über die Vorderkammertiefe von männlichen Katzen mit einem Mindestalter von 12 Monaten für alle Rassen mit Angabe des Stichprobenumfangs, der arithmetischen Mittelwerte, Standardabweichungen, kleinsten und größten gemessenen Werten.

Tabelle 15: Datenbeschreibung der Rohdaten der Vorderkammertiefe männlicher Tiere mit einem Mindestalter von 12 Monaten (n = 96) - dargestellt sind arithmetischer Mittelwert, Standardabweichung, Minima und Maxima für die einzelnen Rassegruppen und für rechte und linke Augen getrennt

Vorderkammer rechts in cm	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	67	0,477	0,482	0,320	0,600
brachycephale Katzen	9	0,532	0,046	0,440	0,590
großrahmige Katzen	4	0,483	0,032	0,450	0,510
sonstige Rassen	7	0,476	0,033	0,450	0,540

Vorderkammer links in cm	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	58	0,487	0,058	0,370	0,630
brachycephale Katzen	7	0,487	0,060	0,400	0,560
großrahmige Katzen	5	0,518	0,066	0,440	0,590
sonstige Rassen	9	0,466	0,029	0,420	0,500

Dabei stehen die Symbole cm für Zentimeter, n für den Stichprobenumfang, \bar{x} für den arithmetischen Mittelwert, s für die Standardabweichung, x_{\min} für den kleinsten vorkommenden Wert und x_{\max} für den größten vorkommenden Wert.

In Tabelle 16 sind die Linsendicken von weiblichen Katzen mit einem Mindestalter von 12 Monaten für alle Rassen mit Angabe des Stichprobenumfangs, der arithmetischen Mittelwerte, Standardabweichungen, kleinsten und größten gemessenen Werten angegeben.

Tabelle 16: Datenbeschreibung der Rohdaten der Linsendicke weiblicher Tiere mit einem Mindestalter von 12 Monaten (n = 61) - dargestellt sind arithmetischer Mittelwert, Standardabweichung, Minima und Maxima für die einzelnen Rassegruppen und für rechte und linke Augen getrennt

Linse rechts in cm	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	39	0,742	0,066	0,430	0,820
brachycephale Katzen	15	0,704	0,088	0,500	0,820
großrahmige Katzen	0	-	-	-	-
sonstige Rassen	3	0,780	0,036	0,740	0,810

Linse links in cm	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	37	0,732	0,078	0,460	0,800
brachycephale Katzen	13	0,699	0,095	0,520	0,810
großrahmige Katzen	1	0,750	0,000	0,750	0,750
sonstige Rassen	3	0,780	0,026	0,750	0,800

Dabei stehen die Symbole cm für Zentimeter, n für den Stichprobenumfang, \bar{x} für den arithmetischen Mittelwert, s für die Standardabweichung, x_{\min} für den kleinsten vorkommenden Wert und x_{\max} für den größten vorkommenden Wert.

In Tabelle 17 sind die Linsendicken von männlichen Katzen mit einem Mindestalter von 12 Monaten für alle Rassen mit Angabe des Stichprobenumfangs, der arithmetischen Mittelwerte, Standardabweichungen, kleinsten und größten gemessenen Werten angegeben.

Tabelle 17: Datenbeschreibung der Rohdaten der Linsendicke männlicher Tiere mit einem Mindestalter von 12 Monaten (n = 96) - dargestellt sind arithmetischer Mittelwert, Standardabweichung, Minima und Maxima für die einzelnen Rassegruppen und für rechte und linke Augen getrennt

Linse rechts in cm	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	67	0,728	0,083	0,410	0,840
brachycephale Katzen	9	0,698	0,114	0,550	0,860
großrahmige Katzen	4	0,765	0,024	0,750	0,800
sonstige Rassen	7	0,701	0,069	0,600	0,770

Linse links in cm	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	58	0,736	0,079	0,470	0,830
brachycephale Katzen	7	0,730	0,092	0,540	0,820
großrahmige Katzen	5	0,714	0,099	0,540	0,790
sonstige Rassen	9	0,684	0,091	0,500	0,760

Dabei stehen die Symbole cm für Zentimeter, n für den Stichprobenumfang, \bar{x} für den arithmetischen Mittelwert, s für die Standardabweichung, x_{\min} für den kleinsten vorkommenden Wert und x_{\max} für den größten vorkommenden Wert.

Tabelle 18 zeigt die biometrischen Daten der Glaskörperstrecke von weiblichen Katzen mit einem Mindestalter von 12 Monaten für alle Rassen mit Angabe des Stichprobenumfangs, der arithmetischen Mittelwerte, Standardabweichungen, kleinsten und größten gemessenen Werten.

Tabelle 18: Datenbeschreibung der Rohdaten der Glaskörperstrecke weiblicher Tiere mit einem Mindestalter von 12 Monaten (n = 61) - dargestellt sind arithmetischer Mittelwert, Standardabweichung, Minima und Maxima für die einzelnen Rassegruppen und für rechte und linke Augen getrennt

Glaskörper rechts in cm	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	39	0,818	0,079	0,600	1,180
brachycephale Katzen	15	0,886	0,111	0,790	1,150
großrahmige Katzen	0	-	-	-	-
sonstige Rassen	3	0,817	0,075	0,730	0,860

Glaskörper links in cm	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	37	0,837	0,077	0,710	1,110
brachycephale Katzen	13	0,888	0,104	0,780	1,110
großrahmige Katzen	1	0,850	0,000	0,850	0,850
sonstige Rassen	3	0,780	0,0608	0,710	0,820

Dabei stehen die Symbole cm für Zentimeter, n für den Stichprobenumfang, \bar{x} für den arithmetischen Mittelwert, s für die Standardabweichung, x_{\min} für den kleinsten vorkommenden Wert und x_{\max} für den größten vorkommenden Wert.

Tabelle 19 zeigt die biometrischen Daten der Glaskörperstrecke von männlichen Katzen mit einem Mindestalter von 12 Monaten für alle Rassen mit Angabe des Stichprobenumfangs, der arithmetischen Mittelwerte, Standardabweichungen, kleinsten und größten gemessenen Werten.

Tabelle 19: Datenbeschreibung der Rohdaten der Glaskörperstrecke männlicher Tiere mit einem Mindestalter von 12 Monaten (n =96) - dargestellt sind arithmetischer Mittelwert, Standardabweichung, Minima und Maxima für die einzelnen Rassegruppen und für rechte und linke Augen getrennt

Glaskörper rechts in cm	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	67	0,855	0,097	0,740	1,160
brachycephale Katzen	9	0,877	0,157	0,650	1,110
großrahmige Katzen	4	0,790	0,047	0,740	0,850
sonstige Rassen	7	0,817	0,059	0,760	0,930

Glaskörper links in cm	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	58	0,833	0,081	0,660	1,100
brachycephale Katzen	7	0,864	0,115	0,770	1,110
großrahmige Katzen	5	0,836	0,168	0,710	1,130
sonstige Rassen	9	0,857	0,110	0,750	1,070

Dabei stehen die Symbole cm für Zentimeter, n für den Stichprobenumfang, \bar{x} für den arithmetischen Mittelwert, s für die Standardabweichung, x_{\min} für den kleinsten vorkommenden Wert und x_{\max} für den größten vorkommenden Wert.

4.3 Einfluss der Augenseite auf die biometrischen Daten

Die arithmetischen Mittelwerte der axialen Bulbuslänge, Vorderkammertiefe, Linsendicke und Glaskörperstrecke der adulten Katzen zeigen im Vergleich rechter und linker Augen keine signifikanten Differenzen. In die Auswertung wurden die Daten der beiden größten Rassegruppen, Europäisch Kurzhaar und brachycephale Katzen, einbezogen. Der p-Wert für den Vergleich der Bulbuslänge beträgt $p = 0,72$, der für die Vorderkammertiefe $p = 0,37$, der p-Wert für die Linsendicke liegt bei $p = 0,89$ und der für die Glaskörperstrecke bei $p = 0,73$. Mit der 3-faktoriellen Kovarianzanalyse wurde untersucht, ob der Faktor der Seite bei bestimmten Rassegruppen oder bei einem bestimmten Geschlecht einen nachweisbaren Einfluss auf die Messwerte hat. Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. Auch der Wald-Test zeigt mit p-Werten von $p = 0,74$ für die axiale Bulbuslänge, $p = 0,22$ für die Vorderkammer, $p = 0,68$ für die Linse und $p = 0,92$ für den Glaskörper keine Signifikanz.

Abbildung 13 zeigt den Seitenvergleich der Teilstrecken des Auges.

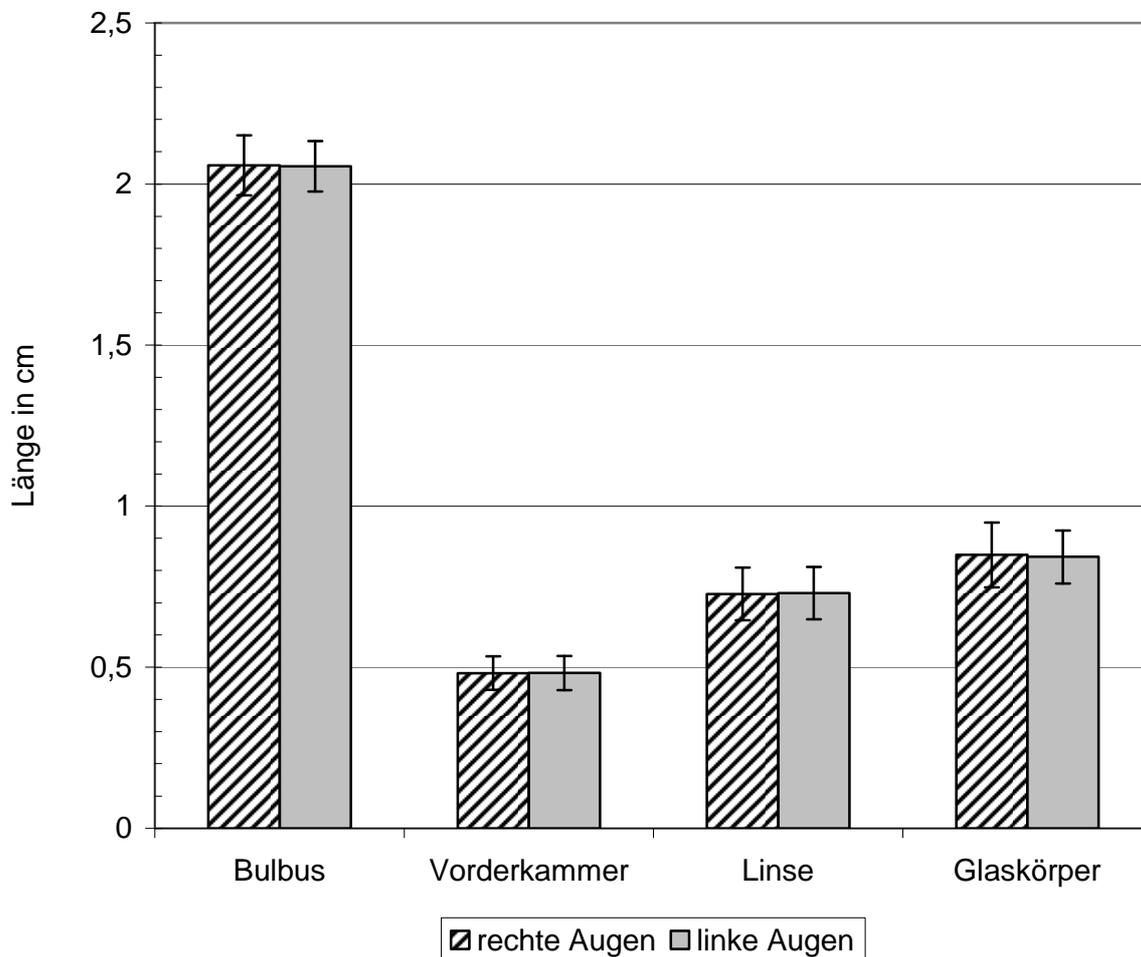


Abbildung 13: Graphische Darstellung des Vergleichs der Messgrößen in Zentimetern (cm) für rechte und linke Augen adulter brachycephaler Katzen und Europäisch Kurzhaarkatzen (n = 139) - dargestellt sind die durchschnittlichen Messwerte der Teilstrecken des Auges mit der dazugehörigen Fehlervarianz im Vergleich rechter und linker Augen

Die Abbildung zeigt in der Gegenüberstellung der Augenseiten der Teilstrecken des Katzenauges, dass keine auffälligen Differenzen zwischen rechts und links bestehen. Auch die Standardabweichungen rechter und linker Augen sowie deren Teilstrecken sind sehr ähnlich.

4.4 Einfluss des Geschlechts auf die biometrischen Daten

Der Zusammenhang des Geschlechts der Katzen mit den Messgrößen wurde mit Hilfe einer 3-faktoriellen Kovarianzanalyse untersucht. Als Datenbasis wurden die Messwerte der beiden größten Rassegruppen, der Europäischen Kurzhaarkatzen und der brachycephalen Katzen mit einem Stichprobenumfang von $n = 139$ herangezogen. Die Varianzanalysen zur Untersuchung der Beziehung der Messgrößen zum Geschlecht der untersuchten Tiere zeigen mit $p = 0,80$ für die axiale Bulbuslänge, $p = 0,47$ für die Vorderkammertiefe, $p = 0,85$ für die Linsendicke und $p = 0,72$ für die Glaskörperstrecke keine Signifikanz. Die Miteinbeziehung der unvollständigen Daten mithilfe des Wald-Tests zeigt p-Werte von $p = 0,58$ für die Bulbuslänge, $p = 0,22$ für die Vorderkammertiefe, $p = 0,88$ für die Linsendicke und $p = 0,75$ für den Glaskörper. Somit liegt kein signifikanter Zusammenhang zwischen den biometrischen Daten und dem Geschlecht vor.

Auch eine Wechselwirkung von Geschlecht und Augenseite sowie Geschlecht und Rasse kann durch die 3-faktorielle Kovarianzanalyse ausgeschlossen werden.

4.5 Einfluss der Größe und des Gewichts auf die biometrischen Daten

Die Beziehung der Messgrößen zur Körpermasse der Tiere wurde im Rahmen der 3-faktoriellen Kovarianzanalyse mit dem Programm BMDP2V untersucht. Die Unterschiede in der Körpergröße bei Katzen sind, außer bei den als solche bezeichneten großrahmigen Katzen, insgesamt sehr gering. Die Untersuchung bezieht sich daher ausschließlich auf die quantitative Einflussgröße des Gewichts.

Die Daten der beiden größten Rassegruppen, Europäisch Kurzhaar und brachycephale Katzen, ($n = 139$) wurden dabei ausgewertet. Es ergab sich mit einem p-Wert von $p = 0,016$ ein deutlich signifikanter Zusammenhang bei der axialen Bulbuslänge. Der Regressionskoeffizient liegt bei $b = 0,024$. Betrachtet man die Europäischen Kurzhaarkatzen für sich, liegt der Regressionskoeffizient bei $b = 0,02$, bei den brachycephalen Katzen liegt er bei $b = 0,056$.

Bei der Untersuchung der Vorderkammertiefe konnte mit einem p-Wert von $p = 0,91$ kein Zusammenhang zwischen dieser Messgröße und der Körpermasse festgestellt werden. Auch die Linsendicke zeigt mit $p = 0,88$ keine Beeinflussung durch die Körpermasse der Tiere. Der für die Zunahme der axialen Bulbuslänge bei zunehmender Körpermasse entscheidende Augenabschnitt ist der Glaskörper. Hier ist mit $p = 0,027$ ein sehr deutlich signifikanter Zusammenhang erkennbar. Der Regressionskoeffizient beträgt $b = 0,023$. Für die Zunahme des Glaskörpers bei steigendem Gewicht ergibt sich für Europäische Kurzhaarkatzen gesondert berechnet ein Regressionskoeffizient von $b = 0,014$. Für brachycephale Katzen liegt der Regressionskoeffizient bei $b = 0,066$.

Die p-Werte des Wald-Tests liegen mit $p = 0,0047$ für die axiale Bulbuslänge und $p = 0,015$ für die Glaskörperstrecke ebenfalls deutlich über der Signifikanzgrenze. Ebenso wie bei der 3-faktoriellen Varianzanalyse mit vollständigen Daten sind die p-Werte im Wald-Test für die Vorderkammertiefe mit $p = 0,88$ und $p = 0,81$ für die Linsendicke nicht signifikant.

Die Regressionsanalyse, die mit dem Programm BMDP6D durchgeführt wurde, zeigt mit der Regressionsgleichung

$$Y = 1,9702 + 0,01962 * x$$

exemplarisch den linearen Anstieg der Bulbuslänge bei steigender Körpermasse für die Rasse Europäisch Kurzhaar (Abbildung 14).

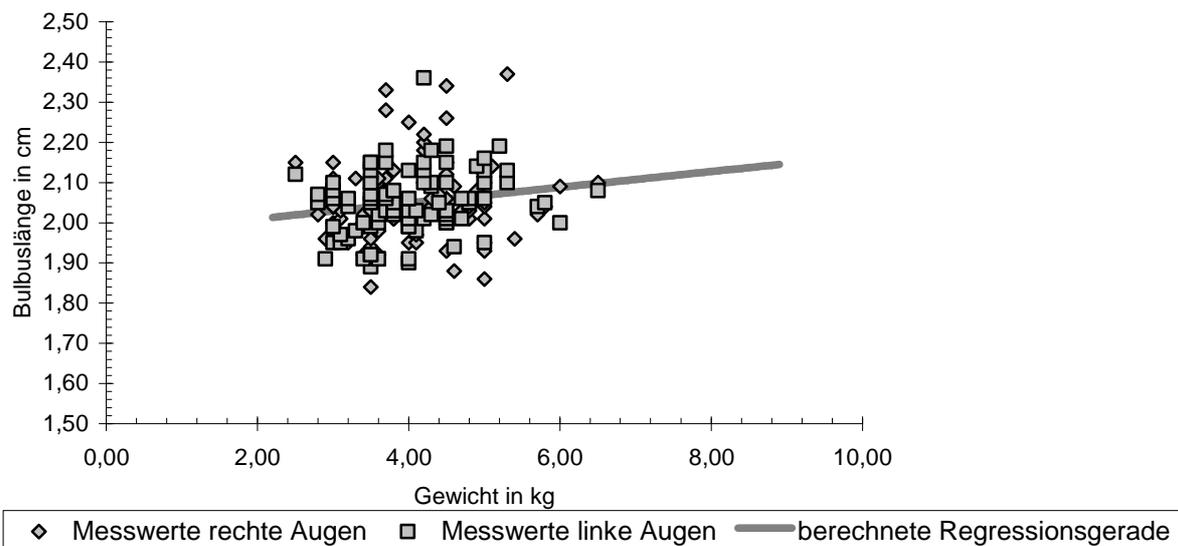


Abbildung 14: Graphische Darstellung des Zusammenhangs von Bulbuslänge und Körpergewicht bei Katzen der Rasse Europäisch Kurzhaar (n = 114) - dargestellt sind die Messwerte für die Bulbuslänge von rechten und linken Katzenaugen in Zentimetern (cm) in Abhängigkeit vom Gewicht der Katzen in Kilogramm (kg) sowie die für den Zusammenhang berechnete lineare Regressionsgerade

Die durchschnittliche Körpermasse der Katzen in Abhängigkeit von Rasse und Geschlecht wird in Tabelle 20 wiedergegeben.

Tabelle 20: Durchschnittliche Körpermasse der adulten Katzen der verschiedenen Rassegruppen (n = 157), wiedergegeben werden arithmetischer Mittelwert, Standardabweichung, Minima und Maxima

Körpermasse in kg	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	114	4,032	0,75	2,5	6,5
brachycephale Katzen	25	4,372	0,82	3	6,2
großrahmige Katzen	6	5,483	0,46	5	6,3
sonstige Rassen	12	4,067	1,18	3	7

Dabei stehen die Symbole kg für Kilogramm, n für den Stichprobenumfang, \bar{x} für den arithmetischen Mittelwert, s für die Standardabweichung, x_{\min} für den kleinsten vorkommenden Wert und x_{\max} für den größten vorkommenden Wert.

4.6 Einfluss des Intraokularsdrucks auf die biometrischen Daten

Die Varianzanalyse zur Untersuchung des Zusammenhangs der Messdaten mit dem gemessenen Intraokularsdruck ergab für die beiden größten Rassegruppen Europäisch Kurzhaar und brachycephale Katzen ($n = 139$) mit $p = 0,23$ für die axiale Bulbuslänge, $p = 0,23$ für die Vorderkammertiefe, $p = 0,94$ für die Linsendicke und $p = 0,63$ für die Glaskörperstrecke keinen signifikanten Zusammenhang. Die p-Werte im Wald-Test mit $p = 0,18$ für die axiale Bulbuslänge, $p = 0,43$ für die Vorderkammertiefe, $p = 0,71$ für die Linsendicke und $p = 0,67$ für die Glaskörperstrecke zeigen ähnliche Ergebnisse. Der durchschnittliche Intraokularsdruck in Abhängigkeit von der Rassegruppe und dem Geschlecht wird in Tabelle 21 wiedergegeben.

Tabelle 21: Intraokularsdruck der verschiedenen Rassegruppen für Katzen mit einem Mindestalter von 12 Monaten - die Ergebnisse werden für rechte ($n = 151$) und linke ($n = 139$) Augen mit arithmetischem Mittelwert, Standardabweichung, Minima und Maxima wiedergegeben

Intraokularsdruck rechts in mmHg	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	111	15,82	4,29	8	29
brachycephale Katzen	24	14,17	3,73	7	22
großrahmige Katzen	5	15,60	3,29	12	19
sonstige Rassen	11	13,09	5,32	8	25

Intraokularsdruck links in mmHg	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
Europäisch Kurzhaar	100	14,97	4,24	7	26
brachycephale Katzen	21	14,24	4,29	8	25
großrahmige Katzen	6	16,83	4,49	10	23
sonstige Rassen	12	14,42	5,40	9	29

Dabei stehen die Symbole mmHg für Millimeter Quecksilbersäule, n für den Stichprobenumfang, \bar{x} für den arithmetischen Mittelwert, s für die Standardabweichung, x_{\min} für den kleinsten vorkommenden Wert und x_{\max} für den größten vorkommenden Wert.

5 Diskussion

5.1 Einfluss des Wachstums auf die biometrischen Daten

Das menschliche Auge wächst in den ersten drei Lebensjahren um 1,4 mm pro Jahr, vom dritten bis zum sechsten Lebensjahr 0,4 mm pro Jahr, danach verlangsamt sich das Wachstum bis zum 15. Lebensjahr auf 0,1 mm pro Jahr (Francois und Goes 1981).

Beim Hund zeigt sich ebenfalls ein rascheres Wachstum der Augen zu Beginn des Lebens, allerdings bezieht sich diese Phase hier auf mehrere Monate statt auf Jahre. Dies ist vermutlich auf die kürzere Lebensspanne des Hundes zurückzuführen, so dass die Relationen insgesamt vergleichbar sind. Sowohl Ekesten und Torrang (1995) als auch Tuntivanich et al. (2007) können ein rasches Wachstum von Hundeaugen in den ersten Lebensmonaten nachweisen. Während Tuntivanich et al. (2007) eine Annäherung an die Plateauphase der Wachstumskurve bereits ab der 20. Woche verzeichnet, sieht Lohmann (1994) das Erreichen der Plateauphase in ihrer Untersuchung abhängig von der Gewichtsklasse der Hunde erst mit 1 Jahr bzw. 1,39 Jahren.

Unabhängig voneinander wird in der vorliegenden Arbeit bei der Katze die gleiche nichtlineare Regressionsgleichung zur Beschreibung des Wachstums der Augen gefunden wie von Lohmann (1994) für das Wachstum von Hundeaugen. Dies zeigt, dass Hunde- und Katzenaugen sich hinsichtlich des Wachstums sehr ähnlich verhalten. Die Steigungskoeffizienten für die Exponentialkurve und die mittleren Endwerte sind unterschiedlich, aber das Grundprinzip eines sehr raschen Wachstumsanstieges in den ersten Lebensmonaten und eine Abflachung des Wachstums danach bis zum Erreichen der Plateauphase ist identisch.

Das Erreichen der Plateauphase wird in der vorliegenden Arbeit, ähnlich wie Lohmann (1994) es bei Hunden beobachtet, mit etwa einem Jahr gesehen. Damit unterscheidet sich das Ergebnis von anderen Studien, die das Wachstum der Katzenaugen mit sechs Monaten als weitgehend abgeschlossen betrachten (Thorn et al. 1976, Hendrickson und Rosenblum 1985). Es ist denkbar, dass diese Studien, genau wie jene, die das Wachstum von Hundeaugen als mit fünf Monaten größtenteils abgeschlossen sehen (Tuntivanich et al. 2007), den Abschluss des Wachstums anders definieren. In beiden Arbeiten wird die Annäherung an die Plateauphase nicht näher definiert, während bei Lohmann (1994) und in der vorliegenden Arbeit von der Annäherung an die Plateauphase erst dann gesprochen wird, wenn die Werte circa 99 % des mittleren Endwertes erreichen.

Da Hendrickson und Rosenblum (1985) das Wachstum von Katzenaugen nur während der ersten sechs Lebensmonate untersuchen, sind die Ergebnisse ihrer Studie nur bedingt mit der Untersuchung des Wachstums des Auges im ersten Lebensjahr der vorliegenden Arbeit vergleichbar. Ähnlich zu der Untersuchung dieser Arbeit ist aber das Ergebnis, dass die Vorderkammer ein extremes Wachstum zeigt. Die Werte von Hendrickson und Rosenblum (1985) und die der vorliegenden Arbeit sind mit 183 ± 53 % bzw. 187,19 % sehr ähnlich. In beiden Auswertungen zeigt sich, dass die Linsendicke ein stärkeres Wachstum zeigt als die Glaskörperstrecke. Hendrickson und Rosenblum (1985) zeigen ein Wachstum von 30 ± 9 % für die Linsendicke und ein Wachstum von 20 ± 7 % für die Glaskörperstrecke. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, die sich auf den Wachstumsbereich des ersten Lebensjahres beziehen, zeigen ein Wachstum von 67,4 % für die Linsendicke und 31,1 % für die Glaskörperstrecke. Die ähnlichen Werte zum Wachstum der Vorderkammertiefe könnten darin begründet liegen, dass diese besonders früh wächst. Dies wird in der vorliegenden Arbeit anhand einer auffälligen Steilheit der Anstiegskurve der berechneten Exponentialfunktion zum Wachstum der Vorderkammer und des hohen Wertes des Steigungskoeffizienten der Regressionsgleichung gezeigt. Dadurch ist auch schon nach sechs Monaten ein relativ hoher Wert erreicht. Bei Linsendicke und Glaskörperstrecke liegt der Grund für die abweichenden Zahlen wohl im verkürzten Beobachtungszeitraum von Hendrickson und Rosenblum (1985).

Auffällig bei Betrachtung der Wachstumskurven in der vorliegenden Arbeit ist vor allem die flache Kurve im Anstieg der Glaskörperstrecke. Daraus lässt sich folgern, dass der Glaskörper als letzter Augenabschnitt seine endgültige Größe erreicht. Dieser Punkt könnte die Theorie von Hendrickson und Rosenblum (1985) untermauern, dass der Glaskörper für die Feinjustierung der Refraktion verantwortlich ist. Diese muss, um eine nach dem Auswachsen der anderen Abschnitte noch bestehende Fehlsichtigkeit auszugleichen, folgerichtig als letztes erfolgen.

Die Verkürzung der axialen Bulbuslänge, die beim Menschen im Alter gesehen wird, kann in der vorliegenden Arbeit für Katzen nicht nachgewiesen werden. Keine der Autorin bekannte Studie aus der Veterinärmedizin stellt eine Verkürzung der biometrischen Daten beim Tier in höherem Alter fest. Eventuell hängt dies mit der deutlich kürzeren Lebensspanne der Haustiere im Vergleich zum Menschen zusammen. Touzeau et al. (2003) beobachten eine Abnahme der Vorderkammer von 0,1 - 0,2 mm pro Jahrzehnt an Alterszunahme beim Menschen. Die Verkürzung der axialen Bulbuslänge pro Jahrzehnt messen Wong et al. (2001) mit 0,31 mm. Sowohl Hunde als auch Katzen leben nach Erreichen des Erwachsenenalters in der Regel

nicht länger als 1 bis 1,5 Jahrzehnte. Möglicherweise ist die Verkürzung des Bulbus beim Tier daher nicht nachvollziehbar. Es ist aber auch denkbar, dass die schlechte Akkommodationsfähigkeit beim Menschen im Alter die Verkürzung des Bulbus bedingt. Die axiale Bulbuslänge verlängert sich bei Akkommodation geringgradig (Nurispahic et al. 2008). Fällt die Akkommodation aufgrund der fortschreitenden Verhärtung der Linse bei Nukleusklerose weg, könnte dies die Verkürzung des Bulbus mit bedingen. Bei der Katze wird die Linsenkrümmung im Gegensatz zum Mensch aber zur Akkommodation nicht verformt, sondern die Linsenebene wird nach vorne verlagert (Hughes 1973). Dieser Mechanismus funktioniert vermutlich altersunabhängig auch bei einer altersbedingten Verhärtung der Linse. Dies könnte erklären, warum bei Katzen keine Abnahme der axialen Bulbuslänge mit fortschreitendem Alter nachweisbar ist.

Vereinzelt werden auffällige Werte gemessen, die die Linsendicke oder die Glaskörperstrecke betreffen. Dabei weichen die Werte der Linsendicke nach unten ab, die niedrigste gemessene Linsendicke liegt bei 0,410 mm im Vergleich zu 0,702 - 0,735 mm der durchschnittlich gemessenen Linsenwerte. Die Glaskörperstrecke wird im Extremfall deutlich vergrößert mit 1,160 mm im Vergleich zu 0,841- 0,880 mm der durchschnittlichen Messungen ermittelt. Diese vereinzelt auftretenden auffälligen Werte können nicht ursächlich erklärt werden. Die betroffenen Tiere zeigen keine gemeinsamen Kriterien, die eine Zuordnung des Phänomens erlauben. Interessanterweise findet Lohmann (1994) ganz ähnliche Werte bei Hunden. Auch dort findet sie auffällig dünne Linsen. Da sie keine Werte für die Glaskörperstrecke ermittelt hat, folgert sie aus der gleich bleibenden Bulbuslänge und der unveränderten Vorderkammertiefe, dass der Glaskörper die Werte wohl kompensieren muss. Dies kann in der vorliegenden Arbeit für Katzenaugen nachgewiesen werden. Bei den meisten Tieren ergänzen sich eine dünne Linse und eine verlängerte Glaskörperstrecke zu einem durchschnittlich langen Bulbus. Ob bei den Tieren eine Fehlsichtigkeit vorliegt, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden. Es wäre auch denkbar, dass ein höherer Brechungsindex, z.B. eine veränderte Krümmung der Kornea, einen zumindest teilweisen Ausgleich für die veränderte Brechkraft der Linse bietet. Eine weitere Untersuchung mit Keratometrie und Skiaskopie von betroffenen Hunden und Katzen könnte weiteren Aufschluss geben.

Der grundsätzliche Zusammenhang der einzelnen Teilstrecken des Auges mit der axialen Gesamtlänge des Bulbus wird untersucht. Der Korrelationskoeffizient für den Zusammenhang von Vorderkammer und Bulbuslänge ist mit $r = 0,501$ geringgradig größer als der für den Zusammenhang von Glaskörper und Bulbuslänge mit $r = 0,486$. Der Korrelationskoeffizient

für den Zusammenhang der Linsendicke mit der Bulbuslänge hingegen ist mit $r = 0,196$ deutlich geringer. Es lässt sich also ableiten, dass die Vorderkammertiefe, obgleich insgesamt deutlich kleiner als der Glaskörper, sogar geringgradig mehr mit der axialen Bulbuslänge korreliert als der Glaskörper.

5.2 Einfluss der Rasse auf die biometrischen Daten

Die Untersuchungen von Fanny et al. (2007) zeigen Unterschiede der Bulbusdimensionen zwischen schwarzafrikanischen und weißen Menschen. Die Autoren stellen daraufhin die Frage, ob schwarzafrikanische Menschen aufgrund einer flacheren Vorderkammer eher zu Glaukomen neigen könnten. Sie regen an, zu untersuchen, ob für die unterschiedlichen Bevölkerungsgruppen der Patienten unterschiedlich beschaffene Kunstlinsen nötig sein könnten. Diese Überlegungen scheinen auf die Tierwelt durchaus übertragbar.

Verlässliche rassespezifische statistische Kennwerte für die Teilstrecken des Auges sind zudem wichtig für die Beurteilung von Augen im Wachstum und bei der Fragestellung, ob ein pathologischer Prozess, wie ein Mikrophthalmus oder ein Glaukom besteht.

Bei Rindern sind die Teilstrecken des Auges rassespezifisch unterschiedlich (Potter et al. 2008). Cottrill et al. (1989) stellen Unterschiede bei Untersuchungen der axialen Bulbuslänge von Hunden zwar nicht rassespezifisch, aber für Tiere mit unterschiedlichen Kopfformen, nämlich dolichocephalen (langköpfigen) und mesocephalen (normalköpfigen) Hunden, fest. Brachycephale (kurzköpfige) Hunde werden nicht untersucht. Derartige Untersuchungen gibt es bei Katzen nach der zur Verfügung stehenden Literatur bisher nicht. Gilger et al. (1998) stellen fest, dass noch keine Untersuchungen zu brachycephalen Katzen vorliegen. Sie halten dies aber für nötig, um herauszufinden, ob Unterschiede der Augen gegenüber sonstigen Rassekatzen mit relativ homogenem Erscheinungsbild bestehen. Ihre Überlegungen gehen dahin, ob brachycephale Katzen eventuell andere Kunstlinsen, sowohl hinsichtlich der Größe, als auch der Dioptrienzahl, benötigen als Katzen mit normaler Schädelform.

In dieser Arbeit werden Katzen mit relativ einheitlichen anatomischen Gegebenheiten hinsichtlich der Kopfform in Gruppen zusammengefasst. Tatsächlich zeigt sich ein signifikanter Unterschied. Katzen, deren Kopfform eine kurze Nase und ein damit eher prominentes Auge mit flacher Orbita zeigen (in dieser Untersuchung als brachycephale Katzen zusammengefasst), zeigen signifikant größere Augen als normalköpfige Katzen. Die Unterschiede liegen in der axialen Bulbuslänge mit 2,093 cm für rechte und 2,085 cm für linke Augen von brachycephalen Tieren und 2,050 cm für rechte Augen und 2,048 cm für linke Augen von Europäisch Kurzhaar. Auch die Vorderkammertiefe ist mit 0,509 cm für rechte Augen und 0,495 für linke Augen bei den brachycephalen Katzen deutlich größer als bei Europäisch Kurzhaar mit 0,476 cm für rechte Augen und 0,479 cm für linke Augen. Die Linsendicke ist nicht signifikant verschieden für die Rassegruppen. Die Glaskörperstrecke ist bei den brachycephalen

Katzen wieder größer mit 0,883 cm für rechts und 0,880 cm für links im Gegensatz zu 0,841 cm für rechte Augen und 0,834 cm für linke Augen von Katzen mit normaler Schädelform. Damit ergibt sich ein bis auf die Linsendicke relativ symmetrisch größeres Auge bei den brachycephalen Katzen. Ob beide Rassegruppen emmetrop sind, ist bislang nicht bekannt.

Bisherige Untersuchungen zur Größe von Katzenaugen, wie die von Rose et al. (1974) und die von Gilger et al. (1998b) stützen sich auf sehr kleine Fallzahlen von 23 bzw. 25 Tieren. Hendrickson und Rosenblum (1985) untersuchen insgesamt 29 Katzen. Nur 5 davon unterliegen keiner chirurgischen oder medikamentellen Beeinflussung der Augen. Die vorliegende Arbeit hat die Ergebnisse mit einer weitaus größeren Datenbasis unterlegt. Zur Untersuchung des Wachstums werden insgesamt 220 Katzen in die Studie miteinbezogen. Die Beeinflussung der biometrischen Daten durch die Rasse wird bei 157 adulten Katzen untersucht. Weiterhin werden die Daten der 139 adulten Tieren der beiden größten Rassegruppen, Europäisch Kurzhaar und brachycephale Katzen, gesondert hinsichtlich Rasse, Geschlecht, Körpermasse und Intraokulardruck, analysiert. Gilger et al. (1998b) sprechen in ihren Ergebnissen von gemischtrassigen Tieren, ohne diese näher zu präzisieren. Die Ergebnisse kommen denen dieser Arbeit, die brachycephale Tiere betreffen, mit 20,98 mm im Vergleich zu 20,89 mm in der vorliegenden Studie sehr nahe. Es ist daher zu vermuten, dass es sich bei den gemischtrassigen Tieren in der Studie von Gilger et al. um Katzen handelt, bei denen brachycephale Typen eingekreuzt sind.

Die Bulbusgröße der Katzen aus der Untersuchung von Gilger et al. (1998b) ist deutlich größer als die von Rose et al. (1974). Die Werte der letzteren Untersuchung ähneln mit 20,43 mm denen der vorliegenden Arbeit hinsichtlich Tieren der Rasse Europäisch Kurzhaar mit 20,49 mm. Da die Rassezugehörigkeit in der Arbeit von Rose et al. (1974) nicht näher spezifiziert wird, ist es wahrscheinlich, dass es sich um die weitaus häufigste Katzenrasse Europäisch Kurzhaar handelt.

Die Vorderkammertiefe ist bei Katzen rassespezifisch unterschiedlich tief. Sie ist mit durchschnittlich 4,77 mm bis 5,03 mm deutlich größer als die des Menschen mit durchschnittlich $3,04 \pm 0,19$ mm bei Männern und bei Frauen $2,71 \pm 0,27$ mm (Francois und Goes 1981). Dieser Punkt ist besonders bemerkenswert, da die Bulbuslänge des Menschen mit durchschnittlich $23,4 \pm 1,17$ mm bei Männern und bei Frauen mit $23,32 \pm 0,93$ mm (Francois und Goes 1981) deutlich größer ist als die von Hund oder Katze. Die Vorderkammer der Katze ist somit proportional gesehen deutlich tiefer als die des Menschen, aber auch als die des Hundes mit Werten von minimal 3,20 mm bis maximal 4,57 mm (Lohmann 1994).

Sowohl in der Humanmedizin (Francois und Goes 1981, Lim et al. 2006, Lan et al. 2007, Ramani et al. 2007), als auch in der Veterinärmedizin (Ekestén und Torrang 1995) wird eine flache Vorderkammer als Prädisposition für Glaukome angesehen. Es ist denkbar, dass die tiefe Vorderkammer bei Katzen der Grund dafür ist, dass Glaukome bei dieser Spezies im Vergleich zu Mensch und Hund so selten vorkommen. Dabei ist die Vorderkammertiefe für Europäisch Kurzhaar zwar flacher als die für brachycephale Katzen, aber immer noch deutlich tiefer als von Hund oder Mensch und birgt daher vermutlich kaum Gefahren für ein primäres Glaukom.

Die tiefe Vorderkammer und damit verbunden die weit hinten gelegene Brechungsebene bedingt vermutlich die Notwendigkeit einer dickeren Linse, um die Fokussierung der Lichtstrahlen auf der Retina zu ermöglichen. Die großen Unterschiede in der Linsendicke von $4,03 \pm 0,46$ mm bei Männern und bei Frauen $4,19 \pm 0,41$ mm (Francois und Goes 1981) zu minimal 7,05 mm bis maximal 7,34 mm in der vorliegenden Studie bei Katzen werden hierdurch erklärt. Das Fehlen von signifikanten Differenzen in der Linsendicke zwischen den einzelnen Rassegruppen deutet erneut darauf hin, dass der letztendliche Ausgleich der Refraktion weniger über die Linse, als vielmehr über die Glaskörperstrecke erfolgt.

Die Implantation von Kunstlinsen findet zunehmend auch bei Katzen Anwendung. Eine Untersuchung zur Berechnung der benötigten Dioptrienzahl bei verschiedenen Katzenrassen liegt bislang nicht vor. Weitere Untersuchungen hinsichtlich der Refraktion, wie z.B. die Keratometrie, werden nötig sein um zu zeigen, ob für Katzen der verschiedenen Rassegruppen unterschiedliche Kunstlinsen implantiert werden sollten.

5.3 Einfluss der Augenseite auf die biometrischen Daten

Bei menschlichen Patienten werden unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der Differenzen beider Augen eines Patienten ermittelt. Während in einer Studie von Kurtz et al. (2004) an Kindern keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, zeigt eine Studie von Rajan et al. (2008) bei 24 % der erwachsenen Patienten Abweichungen der Augen voneinander von mehr als 0,3 mm. Sie finden heraus, dass die Differenzen zwischen den Augen eines Patienten umso größer sind, je größer die axiale Bulbuslänge des größeren Auges ist. Eine Angabe, ob besonders die Augen einer Seite betroffen sind, wird nicht gemacht. Da in der Studie von Kurtz et al. (2004) ausschließlich Kinder untersucht werden, könnte aufgrund der insgesamt geringen Bulbuslänge bei denselben die Differenz zwischen den Augen noch gering sein. Studien von Wong et al. (2001, 2001b) zeigen allerdings auch bei erwachsenen Patienten keine signifikanten Unterschiede beider Augen.

Die Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit zeigen ebenfalls keinen signifikanten Unterschied der Messwerte rechter und linker Augen. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Cottrill et al. (1989), Gaiddon et al. (1991), Lohmann (1994), Tuntivanich et al. (2007) an Hundeaugen, Plummer et al. (2003) an Mini-Pferden, Fernandes et al. (2003) an Rhesusaffen und Graham und Judge (1999) an Seidenaffen überein.

Hendrickson und Rosenblum (1985) zeigen in ihrer Untersuchung an Katzen minimale Unterschiede in der Vermessung beider Seiten, die nicht über 1/10 mm hinausgehen. Auch Gilger et al. (1998) sehen in ihren Untersuchungen von Katzen keine signifikanten Differenzen beider Seiten.

Auch der Vergleich beider Seiten von Katzenaugen durch Rose et al. (1974) zeigt keine signifikanten Unterschiede.

5.4 Einfluss des Geschlechts auf die biometrischen Daten

Die Untersuchungen dieser Arbeit zeigen, dass kein signifikanter Zusammenhang zwischen Geschlecht und den Messgrößen besteht. In Studien der Humanmedizin werden regelmäßig signifikante Unterschiede zwischen den Bulbusdimensionen von Männern und Frauen gefunden. Die Differenzen sind bei Kindern kurz nach der Geburt noch nicht vorhanden (Gernet 1964), entwickeln sich aber schon bei Schulkindern (Zadnik et al. 2003). Die geringere Vorderkammertiefe und Glaskörperstrecke resultieren hier ebenso wie bei erwachsenen Menschen in einem insgesamt kürzeren Bulbus (Wong et al. 2001, Fanny et al. 2007). Larsen (1979) vermutet die Erklärung der Zusammenhänge darin, dass männliche Probanden größer sind und über einen größeren Kopf verfügen.

Cottrill et al. (1989) weisen in ihrer Studie ähnliches für den Hund nach. Hunde mit dolichocephalem Kopftyp haben längere Augen als solche mit mesocephalem Kopftyp. Lohmann (1994) gruppiert ihre Patienten zwar nicht nach Kopfgröße, weist in ihrer Arbeit für Hunde aber ebenso wie die vorliegende Arbeit für Katzen nach, dass eine zunehmende Körpermasse auch zunehmende biometrische Daten für das Auge bedeuten. Eventuell wurde bei den Arbeiten aus der Humanmedizin der Faktor des Körpergewichts, der die Kopfgröße in der Regel mit beeinflusst und bei männlichen Probanden sicherlich höher liegt als bei weiblichen, nicht beachtet.

Eine ähnliche Vermutung hegen Hernández-Guerra und Rodilla (2007), wenn sie bei Frettchen einen geschlechtsspezifischen Unterschied der Linsendicke feststellen. Auch sie nehmen an, dass das höhere Gewicht der männlichen Tiere der entscheidende Faktor ist.

5.5 Einfluss der Größe und des Gewichts auf die biometrischen Daten

Beim Menschen wird schon beim Baby ein signifikanter Einfluss auf die axialen Bulbuslänge durch das Gewicht gesehen. Die Linsendicke ist allerdings durch das Körpergewicht nicht beeinflusst (Blomdahl 1979).

Wong et al. (2001b) zeigen in ihrer Untersuchung auf, dass große und schwere Menschen längere axiale Bulbuslängen aufweisen als kleinere und leichtere. Cottrill (1989) weist in seiner Studie ähnliches für den Hund nach. Hunde mit dolichocephalem Kopftyp haben längere Augen als solche mit mesocephalem Kopftyp. Die dolichocephalen Hunde seiner Untersuchung zeigen gleichzeitig ein höheres Körpergewicht. Daher scheint nicht eindeutig, ob die Bulbuslänge von der Kopfform oder der Körpermasse der Tiere abhängt. Lohmann (1994) weist in ihrer Arbeit für Hunde ebenso wie die vorliegende Arbeit für Katzen nach, dass eine zunehmende Körpermasse auch zunehmende biometrische Daten für das Auge bedeuten. Die Unterschiede in der Körpergröße bei Katzen sind, außer bei den als solche bezeichneten großrahmigen Katzen, insgesamt sehr gering. Die Untersuchung bezieht sich daher ausschließlich auf die quantitative Einflussgröße des Gewichts.

Der Zusammenhang von Gewicht und Bulbuslänge wird durch eine lineare Regression charakterisiert. Der Regressionskoeffizient von $b = 0,024$ für Europäische Kurzhaarkatzen und brachycephale Katzen zeigt, dass bei Zunahme der Körpermasse um 1 Kilogramm die axiale Bulbuslänge um 0,24 mm ansteigt. Betrachtet man allein die brachycephalen Katzen, so zeigt sich mit $b = 0,056$ ein noch stärkerer Anstieg der axialen Bulbuslänge mit steigendem Gewicht als bei den Europäischen Kurzhaarkatzen mit $b = 0,02$. Der entscheidende Anteil des Bulbus ist dabei die Glaskörperstrecke mit einem Regressionskoeffizienten von $b = 0,066$ für brachycephale Katzen und $b = 0,014$ für Europäische Kurzhaarkatzen. Für die beide Rassegruppen gemeinsam ergibt sich der Regressionskoeffizient $b = 0,023$. Vorderkammertiefe und Linsendicke verändern sich nicht signifikant.

Bei Hunden beschreibt Lohmann (1994) die gleichen Verhältnisse und ermittelt ebenso wie die Autorin die lineare, nicht proportionale Regressionsgleichung zur Beschreibung des Verhältnisses von Körpergewicht und Messgrößen.

Sie findet bei erwachsenen Hunden der Gewichtsklasse von 6 bis 15 kg durchschnittliche Bulbuslängen von 20,01 mm bis 20,30 mm. Bei Hunden der Gewichtsklasse von 16 bis 20 kg liegen die Bulbuslängen zwischen 21,17 mm und 21,56 mm. Damit liegen die Messungen an

erwachsenen Katzenaugen mit 20,49 cm für Europäisch Kurzhaar bis 20,89 cm für brachycephale Katzen in dieser Studie zwischen diesen Werten. Katzen, die von der Körpermasse mit minimal 3,73 kg für weibliche Europäisch Kurzhaarkatzen bis maximal 5,5 kg für männliche großrahmige Katzen unter dem Gewicht der gemessenen Hunde liegen, weisen ein größeres Auge als die Hunde der Gewichtsklasse von 6 bis 15 kg auf. Es lässt sich also zusammenfassen, dass Katzen im Vergleich zu Hunden ein relativ größeres Auge haben. Dies könnte auf die höheren Anforderungen an das Auge der nachtaktiven Katze zurückzuführen sein.

Ähnlich verhält es sich mit der Vorderkammertiefe, die mit durchschnittlich 4,77 mm bis 5,03 mm je nach Rassegruppe sogar über den Durchschnittswerten der schwersten Hunde der Untersuchung von Lohmann (1994) liegt. Allerdings zeigt die Vorderkammertiefe in der vorliegenden Arbeit keine signifikante Beeinflussung durch das Gewicht. Die Tatsache, dass normalerweise die Vorderkammertiefe noch enger mit der axialen Bulbuslänge der Augen korreliert ist als die Glaskörperstrecke, bei der Gewichtszunahme aber unverändert bleibt, könnte darin begründet liegen, dass so stärkere Refraktionsschwankungen vermieden werden. Wenn, wie vermutet, die Vorderkammertiefe die Refraktion hauptsächlich beeinflusst und der Glaskörper nur die Feinjustierung übernimmt, sind Verschiebungen in der Glaskörperstrecke vermutlich nicht mit einer so starken Refraktionsänderung verbunden wie es Schwankungen der Vorderkammertiefe wären.

Die kleineren Refraktionsänderungen können vermutlich, ebenso wie in der Humanmedizin (Wong et al. 2001b, Wu et al. 2007), durch die gleichzeitig erfolgende Abflachung der Kornea bei der Vergrößerung des Bulbus kompensiert werden.

5.6 Einfluss des Intraokular drucks auf die biometrischen Daten

In der vorliegenden Arbeit wird kein statistischer Zusammenhang zwischen den biometrischen Daten und dem Intraokular druck gesehen. Dies könnte damit zusammenhängen, dass alle untersuchten Tiere ophthalmologisch gesund sind. Die Variationen des Augeninnendrucks sind mäßig. Alle Messwerte dieser Kategorie liegen im Normbereich von 9 - 31 mmHg (Miller et al. 1991) oder knapp darunter bei 7 mmHg. Anstiege der biometrischen Daten weisen beim Menschen auf glaukomatöse Veränderungen hin und werden als Monitor des Glaukoms betrachtet (Tarkannen et al. 1983, Law et al. 2001). Die Veränderungen der Bulbuslänge sind also hier erst bei pathologisch veränderten Werten des Intraokular drucks zu vermerken. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt Lohmann (1994) bei ihrer Untersuchung an Hunden. Sie zeigt einen hochsignifikanten Zuwachs der axialen Bulbuslänge bei an Glaukom erkrankten Augen. Dass keine direkte Korrelation mit dem exakten Wert des Intraokular drucks und der axialen Bulbuslänge nachweisbar ist, sieht sie in der Chronizität der Erkrankung begründet. Ihrer Meinung nach kommt es durch die lang anhaltende Drucksteigerung zu einer irreversiblen und dann druckunabhängigen Ausdehnung der Augenhäute. Da sie nur eine schwach signifikante Zunahme der Vorderkammertiefe und eine Abflachung der Linse verzeichnet, muss der Zunahme der Glaskörperstrecke, die in ihrer Arbeit nicht untersucht wurde, der entscheidende Anteil an der Zunahme der Bulbuslänge zufallen.

Purnell und Sokollu (1962) stellen Veränderungen der Bulbuslänge von Katzen bei verändertem Intraokular druck fest. Die Studien finden an enukleierten Augen unter experimentellen Bedingungen statt. Es ist denkbar, dass totes Gewebe weniger den Tonus aufrechterhält oder der lebende Organismus auf einen erhöhten Intraokular druck mit einer physiologischen Gegenreaktion reagiert, die eine vorschnelle Ausdehnung des Bulbus zunächst verhindert. Es erscheint unwahrscheinlich, dass die Veränderungen im niedrigen Druckbereich, die von den Autoren als am stärksten beschrieben werden, dauerhafte Veränderungen der Bulbusdimension am lebenden Tier auslösen sollten. Schließlich wird von Del Sole et al. (2007) ein zirkadianer Rhythmus mit physiologischen Schwankungen für Katzen hinsichtlich des Augeninnendrucks aufgezeigt. Dabei werden zwischen 9 Uhr und 12 Uhr die niedrigsten Werte gemessen, in der Nacht zwischen 21 Uhr und 6 Uhr morgens die höchsten Werte. Die Schwankungen betragen durchschnittlich 4 mmHg und können sowohl bei gesunden Augen als auch bei Augen mit Grunderkrankungen wie Uveitis oder Glaukom nachvollzogen werden.

Eine Untersuchung an lebenden Organismen, die bei Schwankungen des Intraokularsdrucks innerhalb des Normbereichs eine Beeinflussung der biometrischen Daten nachweist, liegt nach der zur Verfügung stehenden Literatur weder im Human- noch im Veterinärbereich vor. Katzen mit Glaukom, bei denen analog zu den Ergebnissen bei Mensch (Gernet und Hollwich 1968, Francois und Goes 1981, Bluth 1983, Law et al. 2001) und Hund (Lohmann 1994) eine Veränderung der biometrischen Daten zu erwarten wäre, sind in der vorliegenden Studie nicht integriert. Eine gesonderte Untersuchung von betroffenen Tieren könnte diese Zusammenhänge beleuchten.

Untersuchungen zu biometrischen Daten von Katzen mit Glaukom sind der Autorin nicht bekannt. Die im Vergleich zu Mensch und Hund bei der Katze sehr selten auftretenden Glaukome (Trost et al. 2007) könnten ein Grund dafür sein. In einem Fallreport spricht Trost et al. (2007) von einem vergrößerten Bulbus bei einer Katze mit einem Augeninnendruck von 53 mmHg. Eine exakte Vermessung des Bulbus wird aber nicht beschrieben.

In der Untersuchung von Blocker und van der Woerd (2001), die 82 Katzen mit 93 vom Glaukom betroffenen Augen umfasst, wird zwar der Buphthalmus als ein Symptom von 44 % der Tiere bei Erstvorstellung beschrieben, eine biometrische Vermessung findet aber auch hier nicht statt. Auch die flache Vorderkammer, die von den Autoren in einigen Fällen gefunden wird, wird nicht näher spezifiziert.

Es besteht weiterhin weder in der vorliegenden Literatur noch in der vorliegenden Untersuchung ein Hinweis darauf, dass ein innerhalb des Normbereichs liegender besonders niedriger Augeninnendruck eine Verminderung oder auffällig geringe biometrischen Daten nach sich zieht. Natri et al. (1985) zeigen, dass eine Verminderung des Intraokularsdrucks um 4 - 5 mmHg durch drucksenkende Augentropfen keinen Einfluss auf die Wachstumskurve der Augen von Kaninchen hat.

5.7 Einfluss der Refraktion auf die biometrischen Daten

Die Bestimmung der Refraktion war nicht Ziel dieser Arbeit. Es bestehen aber enge Zusammenhänge zwischen den Dimensionen des Bulbus und der Refraktion, weswegen dieses Thema zumindest diskutiert werden soll. Vor allem die Glaskörperstrecke beeinflusst beim Menschen die Refraktion stark, wobei myope Augen eine erhöhte Distanz, hypermetrope Augen eine erniedrigte Distanz zwischen Linsenhinterfläche und Netzhautinnenfläche zeigen (Jansson 1963, Gernet 1967, Francois und Goes 1968, Touzeau et al. 2003, Wong et al. 2010).

Rose et al. (1974) und Belkin et al. (1977) gehen davon aus, dass die Refraktion von Katzenaugen hauptsächlich von der Krümmung der brechenden Medien, insbesondere der Linse, bestimmt wird. Sie schließen dies daraus, dass hyperope und myope Augen keine signifikanten Unterschiede in der Bulbuslänge aufweisen.

Hendrickson und Rosenblum (1985) hingegen vermuten, dass die Tiefe der Vorderkammer bei Katzen den größten Einfluss auf die Refraktion hat. Sie folgern diese These aus dem prozentual größten Wachstum der Vorderkammer. Die zweitwichtigste Komponente, und damit für die Feinjustierung verantwortlich, ist ihrer Meinung nach der Glaskörper. Gollender und Thorn (1979) stellen fest, dass bei fehlender visueller Stimulation die Vorderkammer und der Glaskörper von Katzen unregelmäßiges Wachstum zeigen, nicht aber die Linse. Auch Zhoua et al. (2006) sehen beim Meerschweinchen den Glaskörper als Regulierungsstelle für die Emmetropisation an.

Dies unterstützt, ebenso wie die vorliegende Untersuchung, die These von Hendrickson und Rosenblum (1985). Der Glaskörper ist der Abschnitt des Auges, der als letztes seine endgültige Länge erreicht. Damit ist die Regulation je nach den bestehenden Bedürfnissen nur noch durch ihn gegeben. Das Linsenwachstum ist schon vorher abgeschlossen. Eine aktive Emmetropisation ist daher mit einer Veränderung der Linse nicht möglich, da noch nicht alle Teilstrecken des Auges ausgewachsen sind. Das Verhältnis der Teilstrecken zur Bulbuslänge scheint entscheidend für die Refraktion. Für die Humanmedizin weisen Jansson (1963), Gernet (1967), Francois und Goes (1968) und Touzeau et al. (2003) den Zusammenhang zwischen Refraktion und Glaskörperstrecke nach. Rose et al. (1974) und Belkin et al. (1977) untersuchen beim Vergleich der myopen und hyperopen Augen von Katzen aber nur die Gesamtlänge des Auges und stellen die Teilstrecken nicht gegenüber. Eine derartige genaue Untersuchung könnte Gewissheit geben.

Die Refraktion nach Implantation von Kunstlinsen ist ein weiterer Punkt, der die Wichtigkeit der Biometrie am Auge unterstreicht. Gilger et al. (1998) gehen davon aus, dass durch neue Züchtungen bei Katzen die Anzahl der zu implantierenden Kunstlinsen ansteigen wird.

Ott (2006) zeigt, dass je nach Anforderungen und Lebensumfeld die Refraktion des Auges von unterschiedlichen Tierarten im Ruhezustand sehr unterschiedlich sein kann. Die Untersuchungen von Belkin et al. (1977) finden die Mehrzahl der Katzen, die in Käfighaltung leben, myop. Diese Tiere fokussieren so gut wie nicht in die Ferne, da sie keinerlei Notwendigkeit und Möglichkeit dazu haben. Das Auge reagiert offensichtlich darauf und entwickelt sich anders als das Auge von Straßenkatzen. Diese Ergebnisse könnten Anlass sein zu überlegen, welche Endrefraktion für die zu operierenden Katzen gewünscht ist. Es scheint unter Umständen sinnvoll, für Tiere, die im Haushalt leben, kein emmetropes, sondern ein leicht myopes Auge anzustreben, da dieses für die Anforderungen eher geeignet ist. Da die Untersuchungsergebnisse von Gilger et al. (1998) wiederum ein eher homogenes Bild von relativ emmetropen Augen zeigen, scheinen weitere Auswertungen der Refraktion von Katzen, insbesondere unter Berücksichtigung der Lebensverhältnisse, notwendig.

Die Anzahl von Katzen, die an einer Katarakt operiert werden, liegt noch deutlich unter der von Hunden. Selbst für diese wird eine Standardlinse implantiert, ohne für den individuellen Patienten eine Berechnung anzustellen. Zur Berechnung der optimalen Linsenstärke für standardisierte Kunstlinsen bei Katzen liegen bislang sehr wenige Daten vor. Die vorliegende Arbeit kann wichtige Grundlagendaten für die Berechnung der optimalen Standardlinse für Katzen bieten. Es scheint anhand der vorliegenden Daten eventuell notwendig, die benötigte Dioptrienzahl für Kunstlinsen auch von der Rasse oder zumindest von der Kopfform der Tiere abhängig zu machen. Zur weiteren Bestimmung der rassespezifischen Unterschiede ist eine Bestimmung der individuellen Refraktion notwendig.

6 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, mit Hilfe des A-Modus-Ultraschallverfahrens die statistischen Kennwerte der Bulbuslänge und der einzelnen Teilabschnitte des Auges bei der Katze zu ermitteln. Dazu wurden 220 Katzen ophthalmologisch untersucht. Dann wurden die axiale Bulbuslänge und die Teilstrecken des Auges mit Hilfe des A-Modus Ultraschallverfahrens vermessen. Der Zusammenhang der Daten mit den qualitativen Faktoren Rasse und Geschlecht sowie den quantitativen Faktoren Gewicht und Intraokulardruck wurde analysiert. Außerdem wurde geprüft, ob ein Unterschied hinsichtlich der Augenseite besteht.

Zunächst wurde ermittelt, ab welchem Alter das Katzenauge ausgewachsen ist. Die Auswertung der Daten ergab einen signifikanten Zusammenhang zwischen den Messgrößen axiale Bulbuslänge, Vorderkammertiefe, Linsendicke und Glaskörperstrecke und dem Alter der Tiere. Dieser konnte durch die nicht-lineare Regressionsgleichung

$$Y = E - A * e^{-b * x} + \epsilon$$

wiedergegeben werden. Dabei werden die Symbole Y für die Messgröße, E für den mittleren Endwert der Messungen, A für den mittleren Anstieg nach der Geburt bis zum mittleren Endwert, e für die Euler'sche Zahl, b für den logarithmischen Steigungskoeffizient, x für das Alter der Tiere in Monaten und ϵ für die Zufallsabweichung verwendet.

Die anhand dieser Gleichung erstellte Wachstumskurve zeigt das abnehmend exponentiell verlaufende Wachstum der Katzenaugen. Bei der Auswertung der Kurve wurde deutlich, dass Katzenaugen erst ab einem Alter von circa 1 Lebensjahr als ausgewachsen angesehen werden können. Diese Erkenntnis ist sowohl für die Einschätzung pathologischer Prozesse, als auch für die Implantation von Kunstlinsen erheblich.

Der Zusammenhang der einzelnen Teilstrecken mit der Gesamtlänge des Auges wurde untersucht. Dabei zeigte sich, dass der Korrelationskoeffizient für Vorderkammer und Bulbuslänge mit $r = 0,501$ geringgradig größer ist als der für Glaskörper und Bulbuslänge mit $r = 0,486$. Beide Teilstrecken stehen also in ähnlich direktem Zusammenhang mit der axialen Ausdehnung des Bulbus, während die Linsendicke mit einem deutlich niedrigeren Korrelationskoeffizient von $r = 0,196$ wenig Auswirkung auf die axiale Bulbuslänge hat.

Die Augenseite hat keinen Einfluss auf die biometrischen Daten des Katzenauges. Dies wurde mit einer 3-faktoriellen Kovarianzanalyse bewiesen. Auch bei bestimmten Rassegruppen oder einem bestimmten Geschlecht sind rechte und linke Augen statistisch gesehen immer gleich groß.

Ebenfalls mit einer 3-faktoriellen Kovarianzanalyse wurde der Zusammenhang des Geschlechts mit den biometrischen Daten der Katzenaugen geprüft. Für keine der Teilstrecken des Auges wurde ein statistisch bedeutsamer Zusammenhang festgestellt.

Bei erwachsenen Tieren konnte anhand der 3-faktoriellen Kovarianzanalyse festgestellt werden, dass die Kenngrößen signifikant abhängig von der Zugehörigkeit zur Rasse sind. Zur statistischen Auswertung wurden Katzen mit anatomischen Gemeinsamkeiten in Gruppen zusammengefasst. Die Gegenüberstellung von Europäisch Kurzhaar und brachycephalen Katzen zeigte signifikante Unterschiede der biometrischen Daten. Die relevanten Teilstrecken sind hier vor allem die Vorderkammertiefe mit einer Signifikanz von $p = 0,0065$ und die axiale Bulbuslänge mit $p = 0,012$. Die Glaskörperstrecke ist zwar nicht statistisch signifikant, aber doch mit $p = 0,064$ auffällig abhängig von der Rassengruppe. Einzig die Linsendicke zeigt keine Beeinflussung durch die Rassezugehörigkeit. Grundsätzlich sind die Augen der brachycephalen Tiere größer als die der Rasse Europäisch Kurzhaar. Dabei sind sämtliche Teilstrecken außer der Linsendicke größer als die der Europäisch Kurzhaar. Die Linsendicke ist zwar im arithmetischen Mittel bei den brachycephalen Katzen kleiner als bei den Europäisch Kurzhaar, diese Unterschiede sind aber nicht statistisch signifikant.

Die mittlere Bulbuslänge rechter Augen liegt für Europäisch Kurzhaar bei 2,050 cm mit einer Standardabweichung von 0,095, für Katzen der brachycephalen Rassen bei 2,093 cm mit einer Standardabweichung von 0,074. Die mittleren Bulbuslängen der linken Augen weichen mit 2,048 cm und einer Standardabweichung von 0,079 für Europäisch Kurzhaar und 2,085 cm mit einer Standardabweichung von 0,065 für brachycephale Tiere von den Werten der rechten Seite kaum ab. Rechte und linke Vorderkammertiefe von Katzen der Rasse Europäisch Kurzhaar sind mit 0,476 cm und 0,479 cm (Standardabweichung 0,052 und 0,053) ebenfalls fast identisch. Die Vorderkammertiefe brachycephaler Katzen liegt für rechte Augen bei 0,509 cm mit einer Standardabweichung von 0,048 und für linke Augen bei 0,495 cm mit einer Standardabweichung von 0,05. Auch bei der Linsendicke sind die Daten für rechte Augen für Europäisch Kurzhaar mit 0,733 cm und einer Standardabweichung von 0,077 und für linke Augen mit 0,735 cm mit einer Standardabweichung von 0,078 nicht signifikant different. Für brachycephale Katzen liegt die Linsendicke rechter Augen bei 0,702 cm mit einer Standardabweichung von 0,096 und für linke Augen bei 0,710 cm mit einer Standardabweichung von 0,093. Die Glaskörperstrecke rechts für Europäisch Kurzhaar wurde mit 0,841 cm bei einer Standardabweichung von 0,092 und für links mit 0,834 cm und einer Standardabweichung von 0,075 ermittelt. Brachycephale Rassen zeigen eine Glaskörperstrecke von 0,883 cm und

einer Standardabweichung von 0,13 rechts und 0,880 cm mit einer Standardabweichung von 0,11 links.

Die Differenzen zwischen den Rassen sind relevant für die Einschätzung krankheitsbedingter Veränderungen der Größenverhältnisse am Auge. Auch für die zunehmend an Bedeutung gewinnende Implantation von Kunstlinsen ist es wichtig, fundierte Kenngrößen für die unterschiedlichen Rassegruppen zu haben. Die Berechnung der benötigten Dioptrienzahl von Kunstlinsen setzt die Kenntnis der biometrischen Daten voraus.

Es zeigte sich durch die Analyse mittels einer 3-faktoriellen Kovarianzanalyse ein Zusammenhang zwischen den Messwerten der axialen Bulbuslänge sowie der Glaskörperstrecke und der Körpermasse der Tiere. Dabei sind die Glaskörperstrecke und die axiale Bulbuslänge umso größer, je schwerer das Tier ist. Der lineare Anstieg der Bulbuslänge mit zunehmendem Gewicht wird durch eine Regressionsgleichung beschrieben. Der Regressionskoeffizient $b = 0,024$ zeigt an, dass mit zunehmender Körpermasse um 1 Kilogramm die axiale Bulbuslänge um 0,24 mm zunimmt. Vorderkammertiefe und Linsendicke bleiben von der Körpermasse unbeeinflusst.

Anhand einer Varianzanalyse konnte geklärt werden, dass Veränderungen des Intraokular-drucks innerhalb der Norm keine Veränderung der biometrischen Teilstrecken des Katzenauges bedingen.

7 Summary

It was the aim of this thesis to determine the length of the eye globe and the parts of the cat's eye with the help of a-mode ultrasound. 220 cats underwent an ophthalmologic examination. Then the axial length and the length of the parts of the eye were analysed with a-mode ultrasound. These data were matched with the qualitative factors race and sex and the quantitative factors body weight and intraocular pressure. Furthermore right and left eyes were compared. First it had to be defined at what age the cat's eye can be considered as mature. The data revealed a strong correlation between the length of the eye, the length of the anterior chamber, the thickness of the lens, the depth of the vitreous body and the age of the animal. This could be shown through a nonlinear regression function.

If E is the mean final value of the measurements, A is the mean increase after birth until the final values are reached, e is Euler's constant, b is the coefficient of the logarithmical increase, x is the age of the animal in months and ε is the random deviation, then Y , the actual measurement can be described as $Y = E - A * e^{-b * x} + \varepsilon$.

The curve based on this function shows the decreasing exponential growth of the cat eye. In the evaluation of the curve it becomes apparent that cat's eyes can only be considered to be fully grown at approximately 1 year of age. This result is relevant for the valuation of pathological processes as well as for implantation of intraocular lenses. The correlation of the single parts of the eye globe with the total length of the globe was investigated. The outcome of the analysis revealed that the coefficient of correlation for the depth of the anterior chamber and the axial length with $r = 0,501$ is slightly higher than that for the depth of the vitreous chamber and the axial length with $r = 0,486$. Both parts of the eye are almost identical correlated with the axial length of the eye, whereas the thickness of the lens has a much lower coefficient of correlation with $r = 0,196$ and is therefore not so relevant for the axial length. The three-way analysis of covariance proved that there is no statistically significant difference between right and left eyes. Even within certain breeds or groups of breeds and given sex, right and left eyes are statistically identical. The same statistical methods were used to assess the correlation of sex with the biometric data. There was no significant correlation between the sex of the animal and any part of the eye.

In adult cats it could be proved that there is a significant correlation between the mean values of the eye and the breed. For statistical purpose, breeds with similar anatomic conditions were grouped together. The comparison of European shorthair cats and brachycephalic breeds

showed significant differences of the biometric values. The relevant parts are most notably the depth of the anterior chamber with $p = 0,0065$ and the axial length with $p = 0,0120$. The depth of the vitreous chamber showed no significant relevance within the breeds but with $p = 0,064$ a certain dependency could be seen. Solely on the thickness of the lens the breed had no impact. Basically, the eyes of brachycephalic cats are bigger than that of European short hair cats. All parts of the eye except the lens thickness are bigger. The mean values of the lens thickness in brachycephalic cats are smaller, but the analysis shows no statistical significance. The mean values for axial length of right eyes in European shorthair cats are 2,050 cm with a standard deviation of 0,095. For cats of brachycephalic breeds the mean values are 2,093 with a standard deviation of 0,074. The mean axial length of left eyes in European shorthair cats with 2,048 cm and a standard deviation of 0,079 are almost similar to the right eyes. The same is true for brachycephalic breeds, where the mean values for axial length in left eyes are 2,085 cm with a standard deviation of 0,065. Anterior chamber depths of right and left eyes in European shorthair cats with 0,476 cm and 0,479 cm (standard deviation 0,052 and 0,053) are also almost identical. The anterior chamber depth of right eyes in brachycephalic cats is 0,509 cm with a standard deviation of 0,048 and for right eyes the mean values are 0,495 cm with a standard deviation of 0,05. There is no significant difference between right and left eyes in European shorthair cats where the lens thickness is concerned, with mean values of 0,733 cm and a standard deviation of 0,077 for right eyes and 0,735 cm for left eyes with a standard deviation of 0,078. In brachycephalic cats the lens thickness for right eyes is 0,702 cm with a standard deviation of 0,096 and for left eyes it is 0,710 cm with a standard deviation of 0,093. The vitreous chamber in European shorthair cats for right eyes was measured to be 0,841 cm with a standard deviation of 0,092 and for left eyes it was found to be 0,834 cm with a standard deviation of 0,075. Brachycephalic cats were shown to have a vitreous chamber of 0,883 cm with a standard deviation of 0,13 in right eyes and 0,880 cm with a standard deviation of 0,11 in left eyes.

The differences between the breeds are important for the valuation of pathologic changes that concern the proportions of the eye. It is also necessary to have well-founded data for the different breeds regarding the increasing significance of the implantation of intraocular lenses. The calculation of the required dioptrien for intraocular lenses is impossible without the knowledge about this biometric data.

The analysis of the data revealed a statistically significant correlation between the values of axial length, the vitreous chamber depth and the weight of the animals. The heavier the animal, the greater the vitreous chamber depth and the greater the axial length. The ascent of the axial length with increasing weight can be characterised by a linear regression function. The regression coefficient of $b = 0,024$ shows that with an increasing body weight of 1 kilogram the axial length of the eye increases by 0,24 mm.

Anterior chamber depth and lens thickness are not influenced by the body weight.

On the basis of an analysis of variance it could be clarified that a change of intraocular pressure within normal ranges does not account for changes in the biometric data.

8 Literaturverzeichnis

Aguirre, G.D.; Bistner, S.I. (1973)

Microphakia with lenticular luxation and subluxation in cats

Vet Clin North Am Small Anim Pract, **68**(5):498-500

Arranz-Marquez, E.; Teus, M.A. (2004)

Relation between axial length of the eye and hypotensive effect of latanoprost in primary open angle glaucoma

Br J Ophthalmol, **88**:635-637

Awerbach, M. (1900)

Zur Dioptrik der Augen bei verschiedenen Refraktionen

Moscow 1900, Zitat Michel Nagel Jahresbericht Ophthalmologie, **31**:652

Babel, J.; Psilas, K.; Itin, W. (1969)

Mesures échographiques de l'épaisseur du cristallin dans les cataractes unilatérales

Ultrasonographia medica:547-551

Verlag der Wiener Medizinischen Akademie, Wien

Baker, P.S.; Tasman, W. (2008)

Myopia in adults with retinopathy of prematurity

Am J Ophthalmol, **145**(6):1090-1094

Bansal, S.; Quah, S.A.; McOptom, T.T.; Batterbury, M. (2008)

Biometric calculation of intraocular lens power for cataract surgery following pupil dilatation

Clin Experiment Ophthalmol, **36**(2):156-158

Barr, F. (1992)

Grundlagen des diagnostischen Ultraschalls. In: Ultraschalldiagnostik bei Hund und Katze:1-19

Verlag Gustav Fischer, Stuttgart, Jena, New York

Bedford, P.G.C. (1980)

The clinical and pathological features of canine glaucomas

Vet Rec, **107**(3):53-58

Belkin, M.; Yinon, U.; Rose, L.; Reisert, I. (1977)

Effect of visual environment on refractive error of cats

Doc Ophthalmol, **42**(2):433-437

Bernays, M.E.; Peiffer, R.L. (2000)

Morphologic alterations in the anterior lens capsule of canine eyes with cataract

Am J Vet Res, **61**:1517-1519

Bhagwandien, A.C.E.; Cheng, Y.Y.Y.; Wolfs, R.C.W.; van Meurs, J.C.; Luyten, P.M. (2006)

Relationship between retinal detachment and biometry in 4263 cataractous eyes

Ophthalmology, **113**:643-649

Binkhorst, R.D. (1976)

Pitfalls in the determination of intraocular lens power without ultrasound

Ophthalmic Surg, **7**:69-82

Binkhorst, R.D. (1978)

Determination of intraocular lens power

Current concepts in cataract surgery:175-182

Emery, Mosby, St. Louis

Blazer, S.; Zimmer, E.Z.; Mezer, E.; Bronshtein, M. (2006)

Early and late onset fetal microphthalmia

Am J Obstet Gynecol, **194**(5):1354-1359

Blocker, T.; Van der Woerdt, A. (2001)

The feline glaucomas: 82 cases (1995-1999)

Vet Ophthalmol, **4**:81-85

Blomdahl, S. (1979)

Ultrasonic measurements of the eye in the newborn infant

Acta Ophthalmol, **57**:1048-1056

Bluth, K. (1983)

Ultrasonic biometry in congenital glaucoma

Ophthalmic Ultrasonography:267-275

Dr. W. Junk, Den Haag

Bolz, M.; Prinz, A.; Drexler, W.; Findl, O. (2007)

Linear relationship of refractive and biometric lenticular changes during accommodation in emmetropic and myopic eyes

Br J Ophthalmol, **91**:360-365

Brown, A.; Munger, R.; Peiffer, R.L. (1994)

Congenital glaucoma and iridoschisis in a siamese cat

Veterinary and Comparative Ophthalmology, **4**:121-124

Buschmann, W. (1963)

Technische Fortschritte in der ophthalmologischen Ultraschalldiagnostik

Wiss Z Ernst Moritz Arndt Univ, Greifswald **1**:59

Buschmann, W. (1966)

Einführung in die ophthalmologische Ultraschalldiagnostik

Thieme, Leipzig, **33**:1-17

Buschmann, W.; Bluth, K. (1974)

Regelmäßige echographische Messung der Achsenlänge des Auges zur Kontrolle der Druckregulierung bei Hydrophthalmie

Klin Mbl Augenheilk, **165**: 878-886

Cankaya, A.B.; Teberik, P.; Acaroglu, G. (2009)

Alterations in anterior chamber depth in primary open-angle glaucoma patients during latanoprost therapy

Acta Ophthalmol, noch nicht in gedruckter Form veröffentlicht (online)

Cartee, R.E.; Selcer, B.A.; Hudson, J.A. (1995)

Practical veterinary ultrasound:1-14

Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore

Cashwell, L.F.; Martin, C.A. (1999)

Axial length decrease accompanying successful glaucoma filtration surgery

Ophthalmology, **106**:2307-2311

Coleman, D.J. (1969)

Ophthalmic biometry using ultrasound

Int Ophthalmol Clin, **9**:667-683

Coleman, D.J. (1975)

Ultrasonic tomography in the evaluation of cataract

Cataract and abnormalities of the lens:148-153

Grune and Stratton Verlag, New York

Coleman, D.J.; Carlin, B. (1967)

A new system for visual axis measurements in the human eye using ultrasound

Arch Ophthal, Chicago, **77**:124-127

Collins, E.T. (1890)

Roy Lond Ophthal Hosp Rep, **13**:81

Cottrill, N.B.; Banks, W.J.; Pechman, R.D. (1989)

Ultrasonographic and biometric evaluation of the eye and orbit of dogs

Am J Vet Res, **50**:898-903

Croft, M.A.; Kaufman, P.L.; Crawford, K.S.; Neider, M.W.; Glasser, A.; Bitto, L.Z.

(1998)

Accommodation dynamics in aging rhesus monkeys

Am J Physiol, **275**:1885-1897

Czederpiltz, J.M.C.; La Croix, N.C.; Van der Woerd, A.; Bentley, E.; Dubielzig, R.R.; Murphy, C.J.; Miller, P.E. (2005)

Putative aqueous humor misdirection syndrome as a cause of glaucoma in cats: 32 cases (1997-2003)

J Am Vet Med Assoc, **227**:1434-1441

Damji, K.F.; Chialant, D.; Shah, K.; Kulkarni, S.V.; Ross, E.A.; Al-Ani, A.; Hodge, W.G. (2009)

Biometric characteristics of eyes with exfoliation syndrome and occludable as well as open angles and eyes with primary open-angle glaucoma

Can J Ophthalmol, **44**(1):70-75

Davidson, M.G. (2001)

Towards a better canine intraocular lens

Vet Ophthalmol, **4**:1

Davidson, M.G.; Murphy, C.J.; Hellkamp, A.S.; Olivero, D.K.; Brinkmann, M.C.; Campbell, L.H. (1993)

Refractive state of aphakic and pseudophakic eyes of dogs

Am J Vet Res, **54**:174-177

Del Sole, M.; Sande, P.H.; Bernades, J.M.; Aba, M.A.; Rosenstein, R.E. (2007)

Circadian rhythm of intraocular pressure in cats

Vet Ophthalmol, **10**:155-161

Delmarcell, Y.; Francois, J. ; Goes, F. (1976)

Biometrie oculaire clinique

Bull Soc Belge Ophtal, **172**:601-608

Delorme, S.; Debus, J. (2005)

Sonographie:2-23

Thieme-Verlag, Stuttgart

Dietrich, U. (2005)

Feline glaucomas

Clin Tech Small Anim Pract, **20**:108-116

Drexler, W.; Findl, O.; Schmetterer, L.; Hitzenberger, C.K.; Fercher, A.F. (1998)

Eye elongation during accommodation in humans: differences between emmetropes and myopes

Invest Ophthalmol Vis Sci, **39**:2140-2147

Duke-Elder, Sir S. (1958)

The eye of birds

System of ophthalmology, Volume 1:397-427

H. Kimpton, London

Dunnet, R.L. (1981)

Microphthalmia in cats

N Z Vet J, **29**(3):38

Dziedzyc, J.; Hager, D.A.; Millichamp, N.J. (1987)

Two-dimensional real-time ocular ultrasonography in the diagnosis of ocular lesions in dogs

Ultrasonography, **23**:501-508

Eisenberg, H.M. (1985)

Ultrasonography of the eye and orbit

Vet Clin North Am Small Anim Pract, **15**:1263-1274

Ekesten, B.; Torrang, I. (1995)

Age-related changes in ocular distances in normal eyes of samoyeds

Am J Vet Res, **56**:127-133

Fanny, A.; Ouattara, A.; Aka, J.; Coulibaly, F.; Gbé, K.; Boulibaly, S.; Konan-Touré, M.L.; Adjorlolo, C. (2007)

Ocular biometric values of the black african patient and theoretical consideration of the role of these values in various pathologies: analysis of 325 eyes

J Fr Ophtalmol, **30**:68-72

Fernandes, A.; Bradley, D.V.; Tigges, M.; Tigges, J.; Herndon, J.G. (2003)

Ocular measurements throughout the adult life span of rhesus monkeys

Invest Ophthalmol Vis Sci, **44**:2373-2380

Franceschetti, A.; Gernet, H. (1965)

Über optische Größen bei leichter und hoher Myopie auf Grund echographischer Befunde

Graefe`s Arch Ophthal, **168**:1-16

Franceschetti, A.; Luyckx, J. (1965)

Die wahrscheinliche Größe des Emmetropisationseffektes der Linse, berechnet auf Grund der Ultraschallechographie von Anisometropien

5. wissenschaftliche Sitzung B, Heidelberg

Francois, J.; Goes, F. (1968)

Oculometry in emmetropia and ametropia

Ultrasonographia medica:473-515

Verlag der Wiener Medizinischen Akademie, Wien

Francois, J.; Goes, F. (1971)

Echographic study of the lens-thickness as a function of the axial eye length in emmetropic eyes of same age

Oculometry, **120**:531-537

Francois, J.; Goes, F. (1981)

Ocular biometry, introductory lecture

Doc Ophthalmol, **29**:135-164

Fritsch, R.; Gerwing, M. (1993)

Sonographie bei Hund und Katze:3-13

Enke Verlag, Stuttgart

Gaiddon, J.; Rosolen, S.G.; Steru, L.; Cook, C.S.; Peiffer, R. (1991)

Use of biometry and keratometry for determining optimal power for intraocular lens implants in dogs

Am J Vet Res, **52**:781-783

Garner, L.F.; Yap, M.K.H. (1997)

Changes in ocular dimensions and refraction with accommodation

Ophthal Physiol Opt, **17**:12-17

Gelatt, K.N. (2001)

Color atlas of Veterinary Ophthalmology:268

Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore

Gelatt, K.N.; MacKay, E.O. (2004)

Prevalence of the breed-related glaucomas in pure-bred dogs in North America

Vet Ophthalmol, **7**:97-111

Gelatt, K.N.; MacKay, E.O. (2004b)

Secondary glaucomas in the dog in North America

Vet Ophthalmol, **7**:245-259

Gelatt, K.N.; MacKay, E.O. (2005)

Prevalence of primary breed-related cataracts in the dog in North America

Vet Ophthalmol, **8**:101-111

Gelatt, K.N.; Powell, N.G.; Huston, K. (1981)

Inheritance of microphthalmia with coloboma in the Australian Shepherd dog

Am J Vet Res, **42**:1686-1690

Gelatt, K.N.; Samuelson, D.A.; Barrie, K.P.; Das, N.D.; Wolf, E.D.; Bauer, J.E.; Andresen, T.L. (1983)

Biometry and clinical characteristics of congenital cataract and microphthalmia in the miniature schnauzer

J Am Vet Med Assoc, **183**:99-102

Gernet, H. (1963)

Zur Längenmessung des Auges am Lebenden

Graefe's Arch Ophthal, **166**:402-411

Gernet, H. (1964)

Achsenlänge und Refraktion lebender Augen von Neugeborenen

Graefe's Arch Ophthal, **166**:530-536

Gernet, H. (1965)

Klinische Ultraschalluntersuchungen an Emmetropen - Emmetropisation und Akkommodationsbreite

Wiss Z Humboldt-Univ, Berlin, **14**:201-204

Gernet, H. (1967)

Ultraschall-Biometrie des Auges

Klin Mbl Augenheilk, **151**:853-871

Gernet, H. (1968)

Über Refraktion und Achsenlänge

118. Tagung des Vereins Rhein-Westfälischer Augenärzte, Wuppertal

Gernet, H. (1971)

Oculometrie zur Erkennung von Anomalien der Bulbusdimension

Ultrasonographia medica:455-466

Verlag der Wiener Medizinischen Akademie, Wien

Gernet, H.; Hollwich, F. (1968)

Oculometrie des kindlichen Glaukoms

69. Tagung Dtsch Ophthal Ges, Heidelberg

Gilger, B.C.; Davidson, M.G.; Colitz, C.M.H. (1998)

Experimental implantation of posterior chamber prototype intraocular lenses for the feline eye

Am J Vet Res, **59**(10):1339-1343

Gilger, B.C.; Davidson, M.G.; Howard, P.B. (1998b)

Keratometry, Ultrasonic biometry and prediction of intraocular lens power in the feline eye

Am J Vet Res, **59**(2):131-134

Gladisch, R. (1992)

Praxis der abdominellen Ultraschalldiagnostik:2-16

Schattauer, Stuttgart

Glaze, M.B. (2005)

Congenital and hereditary ocular abnormalities in cats

Clin Tech Small Anim Pract, **20**(2):74-82

Glaze, M.B.; Gelatt, K.N. (1999)

Feline ophthalmology. In: Vet Ophthalmol, 3rd edn:997-1052

Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore

Goddard, P.J. (1995)

Veterinary ultrasonography:21-41

Verlag CAB International, Aberdeen

Goldmann, H. (1940)

Spaltlampenphotographie und -photometrie

Ophthalmologica, Basel, **98**:257-270

Goldmann, H. (1941)

Eine Methode zur Volumenbestimmung der Vorderkammer des lebenden Menschen

Ophthalmologica, Basel, **102**:7-12

Gollender, M.; Thorn, F. (1979)

Development of axial ocular dimensions following eyelid suture in the cat

Vision Res, **19**:221-223

Gonzalez, E.M.; Rodriguez, A.; Garcia, I. (2001)

Review of ocular ultrasonography

Vet Radiol & Ultrasound, **42**:485-495

Graham, B.; Jugde, S.J. (1999)

Normal development of refractive state and ocular component dimensions in the marmoset (*Callithrix jacchus*)

Vision Res, **39**:177-187

Grahn, B.H.; Cullen, C.L. (2000)

Equine phacoclastic uveitis: the clinical manifestations, light microscopic findings, and therapy of 7 cases

Can Vet J, **41**:376-382

Grehn, F. (2003)

Augenheilkunde, 28.Auflage:37-52

Springer-Verlag, Berlin

Guthoff, R.F. (2003)

Anophthalmus und Mikrophthalmus

Ophthalmologie, **100**:501

Hampson, E.; Smith, R.; Bernays, M.E. (2002)

Primary glaucoma in Burmese cats

Aust Vet J, **80**:672-680

Hansen, L. (2007)

Augenheilkunde systematisch, 2.Auflage:189-284

Uni-Med Verlag, Bremen

Heim, M. (1941)

Photometrische Bestimmung der Tiefe und des Volumens der menschlichen Vorderkammer

Ophthalmologica, Basel, **102**:193-220

Hendrickson, P.; Rosenblum, W. (1985)

Accommodation demand and deprivation in kitten ocular development

Invest Ophthalmol Vis Sci, **26**:343-349

Hernández-Guerra, A.M.; Rodilla, V. (2007)

Ocular biometry in the adult anesthetized ferret (*Muustela putorius furo*)

Vet Ophthalmol, **10**:50-52

Hittmair, K. (1997)

Ultraschall in der Kleintierpraxis:11-18

Enke Verlag, Stuttgart

Hoffer, K.J. (1993)

The Hoffer Q formula: a comparison of theoretic and regression formulas

J Cataract Refract Surg, **19**(6):700-712

Howlett, M.H.C.; McFadden, S.A. (2007)

Emmetropization and schematic eye models in developing pigmented guinea pigs

Vision Res, **47**(9):1178-1190

Hughes, A. (1973)

Observing accommodation in the cat

Vision Res, **13**(2):481-482

Iuvone, P.M.; Tigges, M.; Stone, R.A.; Lambert, S.; Laties, A.M. (1991)

Effects of apomorphine, a dopamin receptor agonist, on ocular refraction and axial elongation in a primate model of myopia

Invest Ophthalmol Vis Sci, **32**(5):1674-1677

- Jacobi, S.; Dubielzig, R.R. (2008)
Feline primary open angle glaucoma
Vet Ophthalmol, **11**:162-165
- Jansson, F. (1963)
Measurement of intraocular distances by ultrasound and comparison between optical and ultrasonic determinations of the depth of the anterior chamber
Acta Ophthalmol, **41**:25-61
- Jansson, F.; Kock, E. (1962)
Determination of the velocity of ultrasound in the human lens and vitreous
Acta Ophthalmol, **40**:421-433
- Jivrajka, R.; Shamma, M.C.; Boenzi, T.; Swearingen, M.; Shamma, H.J. (2008)
Variability of axial length, anterior chamber depth, and lens thickness in the cataractous eye
J Cataract Refract Surg, **34**:289-294
- Johnsen, D.A.J.; Maggs, D.J.; Kass, P.H. (2006)
Evaluation of risk factors for development of secondary glaucoma in dogs: 156 cases (1999-2004)
J Am Vet Med Assoc, **229**:2270-2274
- Kaskaloglu, M. (1985)
Echographic findings in eyes with traumatic cataract
Am J Ophthalmol, **99**(4):469
- Kenney, A.H.; Hagmann, R.E.; Fratello, C.J. (1995)
Dictionary of Ophthalmic Optics
Butterworth-Heinemann, Boston
- Kirby, A.W. ; Sutton, L. ; Weiss, H. (1982)
Elongation of cat eyes following neonatal lid suture
Invest Ophthalmol Vis Sci, **22**:274-277

- Kiss, B.; Findl, O.; Menapace, R.; Wirtitsch, M.; Petternel, V.; Drexler, W.; Rainer, G.; Gerogopoulos, M.; Hitzenberger, C.K.; Fercher, A.F. (2002)
Refractive outcome of cataract surgery using partial coherence interferometry and ultrasound biometry
J Cataract Refract Surg, **28**:230-234
- Korbel, R. (1991)
Zum derzeitigen Stand der Ornithoophthalmologie
Tierärztl Prax, **19**:497-507
- Kriechbaum, K.; Findl, O.; Koepl, C.; Menapace, R.; Drexler, W. (2005)
Stimulus-driven versus pilocarpine-induced biometric changes in pseudophakic eyes
Ophthalmology, **112**:453-459
- Kurtz, D.; Manny, R.; Hussein, M. (2004)
Variability of the ocular component measurement in children using a-scan ultrasonography
Optom Vis Sci, **81**:35-42
- Lan, Y.W.; Hsieh, J.W.; Hung, P.-T. (2007)
Ocular biometry in acute and chronic angle-closure glaucoma
Ophthalmologica, **221**:388-394
- Lang, G.K. (2000)
Augenheilkunde, 2.Auflage:237-255
Georg-Thieme-Verlag, Stuttgart
- Larsen, J.S. (1979)
Axial length of the emmetropic eye and its relation to the head size
Acta Ophthalmol, **57**:76-83
- Law, S.K.; Bui, D.; Caprioli, J. (2001)
Serial axial length measurements in congenital glaucoma
Am J Ophthalmol, **132**:926-928

Lawton, M.P.C. (2002)

Exotic Species

in BSAVA Manual of Small Animal Ophthalmology:285-295

British Small Animal Veterinary Association, Gloucester

Leighton, D.A.; Tomlinson, A. (1972)

Changes in axial length and other dimensions of the eyeball with increasing age

Acta Ophthalmol, **50**:815-826

Lim, M.; Lim, L.; Gazzard, G.; Husain, R.; Chan, Y.-H.; Seah, S.; Aung, T. (2006)

Lens opacity, thickness, and position in subjects with acute primary angle closure

J Glaucoma, **15**:260-263

Lohmann, B. (1994)

Biometrie am Hundeauge mit Hilfe des A-Modus Ultraschallverfahrens

Inaugural-Dissertation

Justus-Liebig-Universität, Giessen

Markowitz, S.N.; Morin, J.D. (1985)

The ratio of lens thickness to axial length for biometric standardization in angle-closure glaucoma

Am J Ophthalmol, **99**:400-402

Martin, C.L. (1982)

Feline ophthalmologic diseases

Mod Vet Practice, **63**:209-213

Martin, C.L. (1999)

Ocular manifestation of systemic disease. In: Vet Ophthalmol, 3rd edn:1422-1424

Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore

McBrien, N.A.; Moghaddam, H.O.; Reeder, A.P. (1993)

Atropine reduces experimental myopia and eye enlargement via a nonaccommodative mechanism

Invest Ophthalmol Vis Sci, **34**:205-215

McBrien, N.A.; Norton, T.T. (1992)

The development of experimental myopia and ocular component dimensions in monocularly lid-sutured tree shrews (*Tupaia belangeri*)

Vision Res, **32**(5):843-852

McMullen, R.; Gilger, B.C. (2006)

Keratometry, biometry and prediction of intraocular lens power in the equine eye

Vet Ophthalmol, **9**:357-360

Merkel, F.; Orr, A.W. (1892)

Das Auge des Neugeborenen an einem schematischen Durchschnitt erläutert

Anatom Hefte, **3**:271

Miller, P.E.; Pickett, J.P.; Majors, L.J. (1991)

Evaluation of two applanation tonometers in cats

Am J Vet Res, **52**:1917-1921

Molleda, J.M.; Martin, E.; Ginel, P.J.; Novales, M.; Moreno, P.; Lopez, R. (1995)

Microphakia associated with lens luxation in the cat

J Am Anim Hosp Assoc, **31**(3):209-212

Moodie, K.L.; Hashizume, N.; Houston, D.L.; Hoopes, P.J.; Demidenko, E.; Trembly, B.S.; Davidson, M.G. (2001)

Postnatal development of corneal curvature and thickness in the cat

Vet Ophthalmol, **4**:267-272

Mould, J.R.B. (2002)

The orbit and globe

in BSAVA Manual of Small Animal Ophthalmology:60-78

British Small Animal Veterinary Association, Gloucester

Mundt, G.H.; Hughes, W.F. (1956)

Ultrasonics in ocular diagnosis

Am J Ophthalmol, **41**:488-498

- Narváez, J.; Zimmerman, G.; Stulting, D.; Chang, D.H. (2006)
Accuracy of intraocular lens power prediction using the Hoffer Q, Holladay 1, Holladay 2, and SRK/T formulas
J Cataract Refract Surg, **32**:2050-2053
- Nastri, G.; Cennamo, G.; Caruso, C. (1985)
Attempt to arrest eye growth by means of ocular hypotony
Metab Pediatr Syst Ophthalmol, **8**:162-164
- Nemeth, G.; Vajas, A.; Tsorbatzoglou, A.; Kolozsvari, B.; Modis, L.; Berta, A. (2007)
Assessment and reproducibility of anterior chamber depth measurement with anterior segment optical coherence tomography compared with immersion ultrasonography
J Cataract Refract Surg, **33**:443-447
- Németh, J.; Fekete, O.; Pesztenlehrer, N. (2003)
Optical and ultrasound measurement of axial length and anterior chamber depth for intraocular lens power calculation
J Cataract Refract Surg, **29**:85-88
- Nirankari, M.S.; Maudgal, M.C. (1959)
Microphakia
Br J Ophthalmol, **43**:314-316
- Norton, T.T.; Amedo, A.O.; Siegwart, J.T. (2006)
Darkness causes myopia in visually experienced tree shrews
Invest Ophthalmol Vis Sci, **47**(11):4700-4707
- Nover, A.; Grote, W. (1965)
Über die Bestimmung der Achsenlänge des menschlichen Auges mit Ultraschall am Lebenden
Graefe's Arch Ophthal, **168**:405-418

- Nurispahic, A.; Kotliar, K.; Lanzl, I. (2008)
Messung der Akkommodation mittels optischer Biometrie
Der Ophthalmologe, **105**:369-375
- Ohlhorst, D.; Nawaiseh, I.; Trier, H.G. (1991)
Indikation zur Ultraschalldiagnostik des Auges und seiner Anhangsgebilde
Augenärztl Fortbild, **14**:83-97
- Oksala, A.; Varonen, E.R. (1964)
Analysis of echoes from the rear eye-wall with the aid of experimental research.I.
The sound beam directed to the rear eye-wall past the lens
Acta Ophthalmol, **42**:616-628
- Olsen, T. (2007)
Calculation of intraocular lens power: a review
Acta Ophthalmol, **85**:472-485
- Olson, R.J.; Kolodner, H. (1981)
Intraocular lens implantation in cats
Ann Ophthalmol, **13**:975-977
- Ossoinig, K.C. (1969)
Routine ultrasonography of the orbit
Int Ophthalmol Clin, **9**:613
- Ostrin, L.; Kasthurirangan, S.; Win-Hall, D.; Glasser, A. (2006)
Simultaneous measurements of refraction and a-scan biometry during accommodation in humans
Optom Vis Sci, **83**:657-665
- Osuobeni, E.P.; Hamidzada, W.A. (1999)
Ultrasonographic determination of the dimensions of ocular components in enucleated eyes of the one-humped camel (*Camelus dromedarius*)
Res Vet Sci, **67**:123-127

Ott, M. (2006)

Visual accommodation in vertebrates: mechanisms, physiological response and stimuli

J Comp Physiol A, **192**:97-111

Pallikaris, I.; Gruber, H. (1981)

Determination of sound velocity in different forms of cataract

Doc Ophthalmol Proc Ser, **29**:165-169

Panek, W.C.; Christensen, R.E.; Lee, D.A.; Fazio, D.T.; Fox, L.E.; Scott, T.V. (1990)

Biometric variables in patients with occludable anterior chamber angles

Am J Ophthalmol, **110**:185-188

Peiffer, R.L.; Fischer, C.A. (1983)

Microphthalmia, retinal dysplasia, and anterior segment dysgenesis in a litter of Doberman Pinschers

J Am Vet Med Assoc, **183**:875-878

Peterson-Jones, S. (2002)

The lens

in BSAVA Manual of Small Animal Ophthalmology:204-219

British Small Animal Veterinary Association, Gloucester

Plummer, C.E.; Ramsey, D.T.; Hauptmann, J.G. (2003)

Assessment of corneal thickness, intraocular pressure, optical corneal diameter, and axial globe dimensions in miniature horses

Am J Vet Res, **64**:661-665

Potter, T.J.; Hallowell, G.D.; Bowen, I.M. (2008)

Ultrasonographic anatomy of the bovine eye

Vet Radiol Ultrasound, **49**:172-175

Pourfour du Petit, F.P. (1723)

Mémoires sur les yeux gelés dans lesquels on détermine la grandeur des chambres qui renferment l'humeur aqueuse

Mem Acad Roy Sci:38-54

Prince, J.H. (1964)

The rabbit in eye research:12-13

Charles C. Thomas, Springfield

Purnell, E.W.; Sokollu, A. (1962)

Ultrasonic measurements of eye length

Acta Ophthalmol, **40**:219-222

Rajan, M.S.; Bunce, C.; Tuft, S. (2008)

Interocular axial length difference and age-related cataract

J Cataract Refract Surg, **34**:76-79

Rajan, M.S.; Keilhorn, I.; Bell, J.A. (2002)

Partial coherence laser interferometry versus conventional ultrasound biometry in intraocular lens power calculations

Eye, **16**:552-556

Ramani, K.K.; Mani, B.; Ronnie, G.; Joseph, R.; Lingam, V. (2007)

Gender variation in ocular biometry and ultrasound biomicroscopy of primary angle closure suspects and normal eyes

J Glaucoma, **16**:122-128

Raymond, S.; Favilla, I.; Santamaria, L. (2009)

Comparing ultrasound biometry with partial coherence interferometry for intraocular lens power calculations: a randomized study

Invest Ophthalmol Vis Sci, **50**(6):2547-2552

Remillard, R.L.; Pickett, J.P.; Thatcher, C.D. (1993)

Comparison of kittens fed queen's milk with those fed milk replacers

Am J Vet Res, **54**:901-907

Retzlaff, J.A.; Sanders, D.R.; Kraff, M.C. (1990)

Development of the SRK/T intraocular lens implant power calculation formula

J Cataract Refract Surg, **16**(3):333-340

Richter, M.; Guscetti, F.; Spiess, B. (2002)

Aldose reductase activity and glucose-related opacities in incubated lenses from dogs and cats

Am J Vet Res, **63**:1591-1597

Rochels, R. (1984)

Ophthalmologische Sonographie Augapfel

Ultraschalldiagnostik, Lehrbuch und Atlas:1-27

Ecomed Verlag, Landsberg

Rose, L.; Yinon, U.; Belkin, M. (1974)

Myopia induced in cats deprived of distance vision during development

Vision Res, **14**:1029-1032

Rubin, L.F.; Koch, S.A. (1968)

Ocular diagnostic ultrasonography

J Am Vet Med Assoc, **153**:1706

Rushton, R.H. (1938)

The clinical measurements of the axial length of the living eye

Tr Ophthal Soc UK, **58**:136-142

Sampaolesi, R.; Caruso, R. (1982)

Ocular echometry in the diagnosis of congenital glaucoma

Arch Ophthalmol, **100**:574-577

Saunte, O.H. (1905)

Linsmaalinger

Akad AvH Odense

- Schachar, R.A.; Pierscionek, B.K.; Abolmaali, A.; Le, T. (2007)
The relationship between accommodative amplitude and the ratio of central lens thickness to its equatorial diameter in vertebrate eyes
Br J Ophthalmol, **91**:812-817
- Schiffer, S.P.; Rantanen, N.W.; Leary, G.A.; Bryan, G.M. (1982)
Biometric study of the canine eye, using A-mode ultrasonography
Am J Vet Res, **43**:826-830
- Scotty, N.C.; Cutler, T.J.; Brooks, D.E.; Ferrel, E. (2004)
Diagnostic ultrasonography of equine lens and posterior segment abnormalities
Vet Ophthalmol, **7**:127-139
- Shastry, B.S.; Reddy, V.N. (1994)
Studies on congenital hereditary cataract and microphthalmia of the miniature schnauzer dog
Biochem Biophys Res Commun, **203**:1663-1667
- Shawn, D.; McQuown, M.D. (1975)
Ocular and orbital echography
Radiol Clin North Am, **8**:523-541
- Shum, P.J.-T.; Ko, L.-S.; Ng, C.-L.; Lin, S.-L. (1993)
A biometric study of ocular changes during accommodation
Am J Ophthalmol, **115**:76-81
- Slatter, D. (2001)
Fundamentals of Veterinary Ophthalmology:21-33
W.B. Saunders Company, Philadelphia
- Slatter, D. (2001b)
Fundamentals of Veterinary Ophthalmology:381-410
W.B. Saunders Company, Philadelphia

Smith, P. (1912)

Glaucoma problems

Ophthalmic Rev, **31**:1-8

Smith, R.S.; Roderick, T.H.; Sundberg, J.P. (1994)

Microphthalmia and associated abnormalities in inbred black mice

Lab Anim Sci, **44**(6):551-60

Sorsby, A.; Leary, A.; Richards, M.J.; Chaston, J. (1963)

Ultrasonographic measurement of the components of ocular refraction in life. II.

Clinical procedures

Vision Res, **3**:499-505

Stadtfeld, A. (1898)

Den menneskelige Lenses optiske konstanter, en fysiologisk undersogelse

First Edition, C.A. Reitzel, Kopenhagen

Straub, M. (1909)

Über die Ätiologie der Brechungsanomalien des Auges und den Ursprung der Emmetropie

Graefe's Arch Ophthal, **70**:1-3

Tarkannen, A.; Uusitalo, R.; Mianowicz, J. (1983)

Ultrasonographic biometry in congenital glaucoma

Acta Ophthalmol, **61**:618-623

Taylor, A.; Moeller, S. (2000)

Fat cat(aract)

Am J Clin Nutr, **72**:1417-1418

Thijssen, J.M.; Mol, H.J.M.; Timmer, M.R. (1985)

Acoustic parameters of ocular tissues

Ultrasound in Med & Biol, **11**:157-161

Thoresen, S.I.; Bjerkas, E.; Aleksandersen, M.; Peiffer, R.L. (2002)

Diabetes mellitus and bilateral cataracts in a kitten

J Feline Med Surg, **4**:115-122

Thorn, F.; Gollender, M; Erickson, P. (1976)

The development of the kitten's visual optics

Vision Res, **27**:1145-1150

Tomlinson, A. ; Philips, C. (1970)

Applanation tension and axial length of the eyeball

Br J Ophthalmol, **54**:548

Touzeau, O.; Allouch, C.; Borderie, V.; Kopito, R.; Laroche, L. (2003)

Corrélation entre la réfraction et la biométrie oculaire

J Fr Ophtalmol, **26**:355-363

Trost, K.; Peiffer, R.L.; Nell, B. (2007)

Goniodysgenesis associated with primary glaucoma in an adult european short-haired cat

Vet Ophthalmol, **10**:3-7

Tuntivanich, N.; Peterson-Jones S.; Steibel, J.P.; Johnson, C.; Forcier, J.Q. (2007)

Postnatal development of canine axial globe length measured by b-scan ultrasonography

Vet Ophthalmol, **10**:2-5

Velez-Montoya, R.; Shusterman, E.M.; Lopez-Miranda, M.J.; Mayorquin-Ruiz, M.; Salcedo-Villanueva, G.; Quiroz-Mercado, H.; Morales-Canton, V. (2010)

Comparison of the biometric values obtained by two different a-mode ultrasound devices (Eye Cubed vs. PalmScan): a transversal, descriptive, and comparative study
BMC Ophthalmol, **10**:8

Vilupuru, A.S.; Glasser, A. (2003)

Dynamic accommodative changes in Rhesus Monkey eyes assessed with A-scan ultrasound biometry
Optom Vis Sci, **80**:383-394

Von Helmholtz, H. (1866)

Handbuch der physiologischen Optik
Leopold Voss, Leipzig

Von Hippel, E. (1898)

Über das normale Auge des Neugeborenen
Graefe's Arch Ophthal, **45**:286-312

Von Jaeger (1861)

Über die Einstellungen des dioptrischen Apparates im menschlichen Auge:10-12
L.W. Seidel u. Sohn, Wien und V. Masson, Paris

Von Pflügh, A. (1909)

Die Fixierung der Wirbeltierlinsen, insbesondere der Linse des neugeborenen Menschen
Klin Mbl Augenheilk, **47**:1-14

Weekers, R.; Delmarcelle, Y.; Luyckx, J. (1975)

Biometrics of the crystalline lens
Cataract and Abnormalities of the lens:134-147
Grane & Stratton Incorporation, New York

Wessels, G.; Weber, P. (1984)

Physikalische Grundlagen. In: Braun, B.; Günther, R.; Schwert, W.B.: Ultraschall-
diagnostik. Lehrbuch und Atlas:1-30

Ecomed Verlag, Landsberg

Wiesel, T.N.; Raviola, E. (1977)

Myopia and eye enlargement after neonatal lid fusion in monkeys

Nature, **266**:66-68

Wilcock, B.P.; Peiffer, R.L.; Davidson, M.G. (1990)

The causes of glaucoma in cats

Vet Pathol, **27**:35-40

Williams, D. (2004)

Lens morphometry determined by B-mode ultrasonography of the normal and cata-
ractous canine lens

Vet Ophthalmol, **7**:91-95

Williams, D.L.; Heath, M.F. (2006)

Prevalence of feline cataract: results of a cross-sectional study of 2000 normal ani-
mals, 50 cats with diabetes and one hundred cats following dehydrational crises

Vet Ophthalmol, **9**:341-349

Williams, D.L.; Heath, M.F.; Wallis, C. (2004)

Prevalence of canine cataract: preliminary results of a cross-sectional study

Vet Ophthalmol, **7**:29-35

Wilson, M.E.; Trivedi, R.H.; Burger, B.M. (2009)

Eye growth in the second decade of life: implications for the implantation of a multi-
focal intraocular lens

Trans Am Ophthalmol Soc, **107**:120-124

- Wong, H.B.; Machin, D.; Tan, S.B.; Wong, T.Y.; Saw, S.M. (2010)
Ocular component growth curves among singaporean children with different refractive error status
Invest Ophthalmol Vis Sci, **51**(3):1341-1347
- Wong, T.Y.; Foster, P.J.; Johnson, G.J.; Seah, S.K.L. (2003)
Refractive errors, axial ocular dimensions, and age-related cataracts: the Tanjong Pagar survey
Invest Ophthalmol Vis Sci, **44**:1479-1485
- Wong, T.Y.; Foster, P.J.; Ng, T.P.; Tielsch, J.M.; Johnson, G.J.; Seah, S.K.L. (2001)
Variations in ocular biometry in an adult chinese population in Singapore: the Tanjong Pagar survey
Invest Ophthalmol Vis Sci, **42**:73-80
- Wong, Y.T.; Foster, P.J.; Johnson, G.J.; Klein, B.E.K.; Seah, S.K.L. (2001b)
The relationship between ocular dimensions and refraction with adult stature: the Tanjong Pagar survey
Invest Ophthalmol Vis Sci, **42**:1237-1242
- Woog, J.; Albert, D.M.; Gonder, J.R.; Carpenter, J.J. (1983)
Osteosarcoma in a phthisical feline eye
Vet Pathol, **20**:209-214
- Wu, H.M.; Gupta, A.; Newland, H.S.; Selva, D.; Aung, T.; Casson, R.J. (2007)
Association between stature, ocular biometry and refraction in an adult population in rural Myanmar: the Meiktila eye study
Clin Experiment Ophthalmol, **35**:834-839
- Xie, R.; Zhou, X.T.; Lu, F.; Chen, M.; Xue, A.; Chen, S.; Qu, J. (2009)
Correlation between myopia and major biometric parameters of the eye: a retrospective clinical study
Optom Vis Sci, **86**(5):503-508

Yamamoto, Y.; Namiki, M.B.; Kato, M. (1960)

A study on the measurement of ocular axial length by ultrasonic echography

Acta Soc Ophthal Jap, **64**:1333-1341

Zadnik, K.; Manny, R.E.; Yu, J.A.; Mitchell, G.L.; Cotter, S.A.; Quiralte, J.C.; Shipp,

M.; Friedman, N.E.; Kleinstejn, R.N.; Walker, T.W.; Jones, L.A.; Moeschberger,

M.L.; Mutti, D.O. (2003)

Ocular component data in schoolchildren as a function of age and gender

Optom Vis Sci, **80**:226-236

Zeeman, W.P.C. (1911)

Linsemessungen und Emmetropisation

Graefe's Arch Ophthal, **78**:93-128

Zentner, J. (1994) in:

Zoller, W.G.; Gresser, U.; Zöllner, N.

Einführung in die Ultraschalldiagnostik:6-13

Karger, Basel

Zetterström, C.; Syrén-Nordqvist, S. (1996)

Ocular axial length in children with unilateral congenital cataract

Acta Ophthalmol, **74**:220-223

Zhou, X.; Qua, J.; Xie, R.; Wang, R.; Jianga, L.; Zhao, H.; Wena, J.; Lu, F.

(2006)

Normal development of refractive state and ocular dimensions in guinea pigs

Vision Res, **46**: 2815-2823

9 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. M. Kramer für die Überlassung des Themas und die Unterstützung bei der Anfertigung der Dissertation. Seine freundliche und motivierende Kritik und besonders die zügigen Korrekturen waren Grundlage für die Fertigstellung der Arbeit.

Ich danke Herrn Failing und Frau Sparenberg von der Arbeitsgruppe Biomathematik für die statistische Aufbereitung der Daten und die geduldige Betreuung bei stets neu auftretenden Fragestellungen.

Meiner Freundin und Kollegin Nina Müller danke ich besonders für die Hilfe bei der Untersuchung der Vierbeiner und die stete moralische Stütze, selbst in härtesten Zeiten.

Meiner Familie danke ich für ihre große Geduld und Unterstützung, wenn Mami mal wieder am Computer arbeiten musste. Ein besonderes Dankeschön an meinen Freund Klaus Schütz, der wann immer möglich die Kinderbetreuung übernahm, auch wenn wieder einmal eins der Kinder just in meiner aktivsten Schaffensphase krank wurde.

Meinen Eltern danke ich, dass sie mich immer glauben ließen, dass alles, was man sich wünscht, zu schaffen ist.

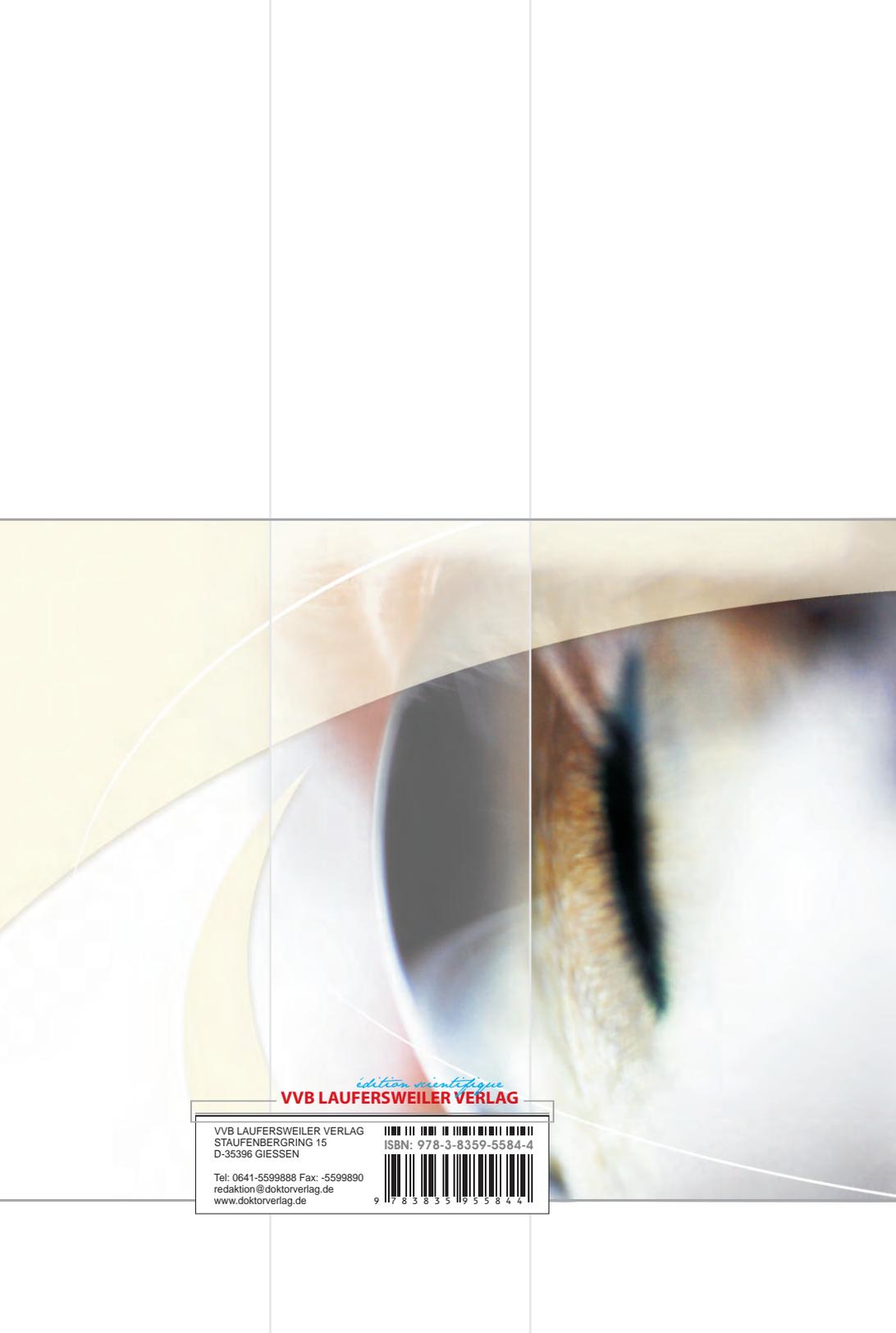
Erklärung gemäß §10 Absatz 5 der Promotionsordnung Veterinärmedizin vom 06.02.2002 der Justus-Liebig-Universität Gießen

Ich erkläre:

Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.

Gießen, 2010

Birgit Koerschgen



édition scientifique

VVB LAUFERSWEILER VERLAG

VVB LAUFERSWEILER VERLAG
STAUFENBERGRING 15
D-35396 GIESSEN

Tel: 0641-5599898 Fax: -5599890
redaktion@doktorverlag.de
www.doktorverlag.de

ISBN: 978-3-8359-5584-4



9 783835 193584