

**Technische Umsetzung der digitalen
Infrarotfotografie zur Diagnostik von
Erkrankungen des Pferdeauges**

von Svenja Alicia Maier

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

**Technische Umsetzung der digitalen
Infrarotfotografie zur Diagnostik von
Erkrankungen des Pferdeauges**

von Svenja Alicia Maier

aus Karlsruhe

München 2023

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

Lehrstuhl für Pferdemedizin

Arbeit angefertigt unter der Leitung von:

Priv.-Doz. Dr. Bettina Wollanke

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

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

Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. Bettina Wollanke

Korreferent: Univ.-Prof. Dr. Rüdiger Korb

Tag der Promotion: 11. Februar 2023

Meiner Familie und meinen Freunden

INHALTSVERZEICHNIS

I.	EINLEITUNG	1
II.	LITERATURÜBERSICHT	2
1.	Strahlungsphysikalische Grundlagen	2
1.1.	Eigenschaften elektromagnetischer Strahlung	2
1.2.	Das elektromagnetische Spektrum	5
1.2.1.	Visuelles Spektrum	6
1.2.2.	Infrarote Strahlung	9
2.	Grundlagen der Infrarotfotografie	10
2.1.	Historischer Überblick	10
2.2.	Technisches Grundprinzip	10
2.3.	Darstellung verschiedener Objekte im Infrarotfoto	13
3.	Bisheriger Einsatz der Infrarotfotografie in der Medizin, Wissenschaft und Technik	16
3.1.	Humanmedizin	16
3.2.	Tiermedizin	17
3.3.	Sonstiger Einsatz	17
4.	Technische Grundlagen der digitalen Fotografie	18
4.1.	Kameratypen	18
4.1.1.	Kompaktkameras	19
4.1.2.	Bridgekameras	19
4.1.3.	Systemkameras	20
4.1.3.1.	Spiegelreflexkameras (DSLR)	20
4.1.3.2.	Spiegellose Systemkameras (DSLM)	20
4.1.3.3.	Vergleich von DSLM- und DSLR-Kameras	21
4.2.	Aufbau einer Digitalkamera	22
4.2.1.	Lichtpassage und Bildentstehung	23
4.2.2.	Wichtige Bauteile des Kameraghäuses	23
4.2.2.1.	Verschluss	23
4.2.2.2.	Filtereinheiten vor dem Bildsensor	26

4.2.2.3.	Bildsensor	27
5.	Kameraumbau	29
5.1.	Erforderlichkeit des Kameraumbaus	29
5.2.	Durchführung des Kameraumbaus	30
5.2.1.	Definierter Kameraumbau	30
5.2.2.	Undefinierter Kameraumbau	31
5.3.	IR-Filter	32
5.4.	IR-Strahlung und der Bildsensor	33
6.	Kameraeinstellungen	33
6.1.	Einzelparameter zur Einstellung der Belichtung	33
6.1.1.	Belichtungszeit	34
6.1.2.	Blendenwert	34
6.1.3.	Lichtempfindlichkeit oder ISO-Wert	35
6.1.4.	Zusammenspiel von Belichtungszeit, Blende und ISO-Wert	35
6.2.	Weitere wichtige Einzelparameter der Kameraeinstellung	36
6.2.1.	Weißabgleich	36
6.2.2.	Fokussierung	37
6.2.3.	Grafikdateiformate	39
6.2.3.1.	JPEG-Format	40
6.2.3.2.	RAW-Format	40
6.3.	Kameramodus	41
6.3.1.	Automatikmodus und Motivprogramme	41
6.3.2.	Kameramodi mit manuellen Einstellungsmöglichkeiten	41
6.3.2.1.	Blendenautomatik oder Zeitpriorität	42
6.3.2.2.	Zeitautomatik oder Blendenpriorität	42
6.3.2.3.	Manueller Modus	42
7.	Objektive	43
7.1.	Eigenschaften von Objektiven	43
7.1.1.	Brennweite und Bildwinkel	43
7.1.2.	Lichtstärke	44
7.1.3.	Mechanische und optische Qualität	45
7.1.4.	Auflösungsvermögen	45
7.1.5.	Bildstabilisator	45

7.2. Objektivtypen	46
7.2.1. Standardobjektiv oder Normalobjektiv	46
7.2.2. Weitwinkelobjektiv	46
7.2.3. Teleobjektiv	46
7.2.4. Makroobjektiv	47
8. Zusätzliche Strahlungsquellen	47
8.1. Blitzgeräte	47
8.2. Weitere Strahlungsquellen	50
8.3. Strahlungsquellen für die IR-Fotografie	50
9. Bildqualität	50
9.1. Bildausschnitt	51
9.2. Perspektive	51
9.3. Bildschärfe und Schärfentiefe	52
9.4. Auflösung	53
9.5. Belichtung	54
9.6. Farbwiedergabe	55
III. MATERIAL UND METHODEN	56
1. Technisches Equipment	56
1.1. Kamera	56
1.2. Objektiv	56
1.3. Kameraumbau	58
1.4. IR-Schraubfilter	58
1.5. Externes Blitzgerät	59
1.6. IR-Taschenlampe	60
1.7. Speichermedium	61
2. Kameraeinstellungen	61
2.1. Kameramodus	61
2.2. Belichtungszeit	62
2.3. Blende	62
2.4. ISO-Wert	62
2.5. Weißabgleich	62

2.6. Fokussierung	62
2.7. Verschlusstyp	62
2.8. Grafikdateiformat	63
3. Vergleichsfotos mit visuellem Spektrum	63
4. Aufnahmen am Pferd	63
4.1. Pferde	63
4.2. Auswahl der Fotografien	64
4.3. Umgebungshelligkeit	64
4.4. Handling der Pferde und Einsatz von Hilfspersonen	65
4.5. Perspektive	65
4.6. Qualitative Beurteilung der Fotos	65
IV. ERGEBNISSE	67
1. Versuchsreihen	67
1.1. IR-Schraubfilter	67
1.2. Externes Blitzgerät	71
1.3. Umgebungshelligkeit	78
2. Fotos von Pferdeaugen	80
2.1. Pferde ohne bekannte Augenerkrankungen	80
2.2. Ulzerationen und Narben der Kornea	91
2.3. Immunmedierte Keratitis	101
2.4. Uveitis	109
2.5. Linsentrübung	125
2.6. Iriszysten	135
V. DISKUSSION	139
1. Hintergrund und Zielsetzung	139
2. Material und Methoden	141
2.1. Technisches Equipment	141
2.2. Kameraeinstellungen	147
2.3. Vergleichsfoto mit visuellem Spektrum	151

2.4. Aufnahmen am Pferd	152
3. Ergebnisse	156
3.1. Versuchsreihen	156
3.2. Fotos von Pferdeaugen	159
4. Fazit	162
VI. ZUSAMMENFASSUNG	163
VII. SUMMARY	166
VIII. LITERATURVERZEICHNIS	169
IX. ABBILDUNGSVERZEICHNIS	176
X. DANKSAGUNG	182

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A	Aperture
APS-C-Sensor	Advanced Photo System Classic Sensor
A_v	Aperture value
BSI-Sensor	Back Side Illumination Sensor
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit
CCD-Sensor	Charge Coupled Device Sensor
cd	Candela
CFA	Color Filter Array
CMOS-Sensor	Complementary Metal-Oxid Semiconductor Sensor
dpi	dots per inch
DSLM	Digital Single-Lens Mirrorless
DSLR	Digital Single-Lens Reflex
E	Energie
ERU	Equine Rezidivierende Uveitis
FSI-Sensor	Front Side Illumination Sensor
GB	Gigabite
h	Planck'sches Wirkungsquantum
IMMK	Immunmedierte Keratitis
IR	Infrarot
J	Joule
JPEG	Joint Photographic Experts Group
K	Kelvin
km	Kilometer
λ	Wellenlänge
LED	Light-Emitting Diode
lm	Lumen
lx	Lux
L-Zapfen	Long-Zapfen
m^2	Quadratmeter
mm	Millimeter

MB	Megabite
M-Zapfen	Medium-Zapfen
nm	Nanometer
ppi	pixel per inch
S	Shutter priority
s	Sekunde
SD-Karte	Secure Digital Karte
SI	Internationales Einheitensystem
sr	Steradian
S-Zapfen	Short-Zapfen
Tv	Time value
UV	Ultraviolett
ν	Frequenz
VS	Visuelles Spektrum

I. EINLEITUNG

Sowohl in der Human- als auch in der Tiermedizin existieren Veröffentlichungen, die den Einsatz der Fotografie im nahen Infrarotbereich (IR-Fotografie) des Lichtspektrums als diagnostisches Hilfsmittel in der Augenheilkunde beschreiben. Genannte Vorteile gegenüber der Fotografie mit dem für den Menschen visuellen Lichtspektrum sind unter anderem eine verbesserte Darstellung von Kontrasten und Pigmentveränderungen im vorderen Bereich des Auges (Huerkamp, 1955, Ogg, 1958, McMullen et al., 2009, Tóth & Dikker, 2013) sowie eine verbesserte Durchsicht durch eine getrübbte Hornhaut (Dekking, 1933, Ogg, 1958, Mätthäus & Grötzsch, 1966, Cubberly, 1976, McMullen et al., 2009, Tóth & Dikker, 2013). Die bisher vorhandenen Veröffentlichungen zeigen beispielhaft die möglichen Einsatzgebiete der IR-Fotografie und geben an, dass die IR-Fotografie weiterführende diagnostische Informationen liefert und somit Potential als diagnostisches Hilfsmittel bietet.

Zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Arbeit ist das erforderliche Equipment jedoch nicht kommerziell als Set erhältlich und es existiert auch keine detaillierte Anleitung zur praktischen Umsetzung der IR-Fotografie am Tierpatienten. Es obliegt also dem Fotografierenden, eine Kamera und das weitere Equipment auszuwählen, die Kamera umbauen zu lassen und schließlich alles passend einzustellen. Ohne ein umfangreiches Wissen über den physikalischen und technischen Hintergrund ist dies mit erheblichem Aufwand verbunden, sodass die IR-Fotografie bisher nur selten in der tierärztlichen Praxis eingesetzt wird.

Ziel dieser Arbeit ist es, auf Basis des physikalischen und technischen Hintergrunds sowie anhand von Erfahrungswerten aus der Praxis, einen Leitfaden für die praktische Umsetzung der IR-Fotografie am Patienten Pferd zu erstellen. Weiterführend werden mögliche Einsatzgebiete der IR-Fotografie am Pferdeauge mittels vergleichender Fotografien mit dem IR-Spektrum und dem visuellen Spektrum demonstriert. Diese Arbeit soll somit als eine mögliche Grundlage für den zukünftigen Einsatz der IR-Fotografie am Pferd dienen.

II. LITERATURÜBERSICHT

1. Strahlungsphysikalische Grundlagen

Der Begriff „Licht“ meint im engeren Sinne, den für den Menschen sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums (Mangold, 2015). Der für diese Arbeit relevante, nahe IR-Bereich ist für den Menschen jedoch nicht sichtbar (Dorame, 2010, Mangold, 2015, Klein et al., 2020). Entsprechend wird in dieser Arbeit anstelle des im Alltag gebräuchlichen Begriffs „Infrarotlicht“ von infraroter Strahlung gesprochen.

In diesem Kapitel werden die relevanten strahlungsphysikalischen Grundlagen besprochen, welche die Basis für das Verständnis des technischen und physikalischen Hintergrunds der Fotografie im Allgemeinen sowie der speziellen Charakteristika der IR-Fotografie darstellen.

1.1. Eigenschaften elektromagnetischer Strahlung

Elektromagnetische Strahlung besitzt Eigenschaften sowohl von Wellen als auch von Teilchen. In der Quantenphysik spricht man daher vom Welle-Teilchen-Dualismus. Der Wellencharakter bezieht sich auf die synchron schwingenden elektrischen und magnetischen Felder, wohingegen der Teilchencharakter die Quantelung der elektromagnetischen Strahlung in Photonen als kleinste Energieeinheiten beschreibt (Davies, 2017, Zinth & Zinth, 2018, Falk et al., 2019, Gmelch & Reineke, 2019).

Wichtige Eigenschaften zur Beschreibung des Wellencharakters sind die Wellenlänge, die Frequenz und die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle. Die Wellenlänge ist der Abstand zweier aufeinander folgender Wellenberge und wird in Nanometern (nm) angegeben. Die Frequenz gibt die Zahl an einzelnen Wellen an, die pro Zeiteinheit einen bestimmten Punkt passieren. Die Einheit der Frequenz ist 1/Sekunde ($1/s = 1$ Hertz). Alle Arten elektromagnetischer Strahlung besitzen im Vakuum die gleiche Geschwindigkeit von etwa 300.000 Kilometer/Sekunde (km/s) (Davies, 2017, Zinth & Zinth, 2018, Falk et al., 2019, Gmelch & Reineke, 2019).

Es gilt folgender Zusammenhang: $c = \lambda \nu$.

Dabei ist: c = Ausbreitungsgeschwindigkeit;

λ = Wellenlänge;

ν = Frequenz

(Davies, 2017, Zinth & Zinth, 2018, Falk et al., 2019, Gmelch & Reineke, 2019).

Wichtig zu beachten ist, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle vom Medium, in dem die Ausbreitung erfolgt, abhängig ist. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Strahlung der Sonne ist in der Luft der Atmosphäre nur um etwa 0,28 % geringer als im Vakuum. Entsprechend kann auch für die Ausbreitung der Sonnenstrahlung in der Luft eine Näherung von 300.000 km/s angegeben werden (Falk et al., 2019).

Die oben aufgeführte Gleichung zeigt den inversen Zusammenhang zwischen der Frequenz und der Wellenlänge. Kurzwellige Strahlung hat eine hohe Frequenz, während Strahlung mit längerer Wellenlänge proportional mit der Zunahme der Wellenlänge eine geringere Frequenz aufweist (Davies, 2017, Zinth & Zinth, 2018, Falk et al., 2019, Gmelch & Reineke, 2019).

Je höher die Frequenz bzw. je kürzer die Wellenlänge einer elektromagnetischen Welle ist, desto größer ist die Energie der einzelnen Photonen (Davies, 2017, Gmelch & Reineke, 2019).

Dieser Zusammenhang wird in der Quantenphysik durch folgende Gleichung beschrieben: $E = h \nu$.

Dabei ist: E = Energie;

h = Planck'sches Wirkungsquantum;

ν = Frequenz

(Davies, 2017, Zinth & Zinth, 2018, Gmelch & Reineke, 2019).

Das Planck'sche Wirkungsquantum ist eine Konstante, die das Verhältnis von Energie und Frequenz eines Photons angibt. Sie beträgt gerundet $6,63 \times 10^{-34}$ J s (Joule x Sekunde). Die Einheit der Energie E ist entsprechend 1 Joule (1 J) (Davies, 2017, Gmelch & Reineke, 2019).

Die Energie einer Strahlungsquelle wird jedoch nicht nur von der Frequenz bzw. Energie der Einzelphotonen bestimmt, sondern hängt auch von der Größe der Amplitude, also der maximalen Auslenkung der elektromagnetischen Felder während einer Schwingungsperiode, ab (Falk et al., 2019, Gmelch & Reineke, 2019).

Dies ist im Hinblick auf die Fotografie besonders relevant für die Charakterisierung künstlicher Lichtquellen. Einige in diesem Zusammenhang aufkommende Begriffe sollen im Folgenden kurz erläutert werden. Diese Begrifflichkeiten beziehen sich auf das visuelle Lichtspektrum des Menschen (Zinth & Zinth, 2018).

Der Lichtstrom mit der SI-Einheit Lumen (lm) gibt an wie viel für das menschliche Auge wahrnehmbare elektromagnetische Strahlung eine Strahlungsquelle pro Zeiteinheit insgesamt abgibt. Diese Angabe findet man zumeist beim Kauf einer künstlichen Lichtquelle als Beschreibung für deren Helligkeit (Zinth & Zinth, 2018).

Die Lichtstärke bezieht den abgegebenen Lichtstrom auf einen bestimmten Raumwinkel und wird in der SI-Einheit Candela (cd; $1 \text{ cd} = 1 \text{ lm/sr}$) angegeben. Steradian (sr) ist die SI-Einheit für den Raumwinkel. Dabei gilt die Beziehung, dass sich die Lichtstärke proportional zum Quadrat der Amplitude der elektromagnetischen Welle verhält (Zinth & Zinth, 2018).

Die Beleuchtungsstärke demgegenüber bezieht den abgegebenen Lichtstrom nicht auf den Raumwinkel, sondern auf die angestrahlte Fläche und wird in der SI-Einheit Lux ($1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$ (Lumen / Quadratmeter)) angegeben (Zinth & Zinth, 2018).

Beim Auftreffen elektromagnetischer Strahlung auf Materie kommt es je nach Charakteristika der elektromagnetischen Strahlung und der Materie zu unterschiedlichen Wechselwirkungen. Es kann hierbei zu einer Reflexion auf der Oberfläche kommen. Diese kann gerichtet erfolgen oder als diffuse Streuung auftreten. Weitere mögliche Wechselwirkungen sind eine Transmission, also ein Hindurchtreten der Strahlung durch das Medium hinter der Grenzfläche, und eine Absorption der Strahlung und damit deren Umwandlung in eine andere Energieform wie beispielsweise thermische Energie. Auch eine Kombination genannter Vorgänge ist möglich (Davies, 2017).

1.2. Das elektromagnetische Spektrum

Das elektromagnetische Spektrum ist die Gesamtheit aller Wellenlängen an elektromagnetischer Strahlung (Davies, 2017, Gmelch & Reineke, 2019).

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über den Verlauf des elektromagnetischen Spektrums. Die beiden Skalen auf der linken Seite zeigen die Frequenz und die Wellenlänge der Strahlung. Im oberen Bereich der Abbildung sind kurzwellige, hochfrequente und damit energiereiche Strahlungen wie Gamma- und Röntgenstrahlung dargestellt. Diese gehen über in langwellige, niedrigfrequente und damit energieärmere Strahlungsbereiche wie Mikrowellen oder Radiowellen im unteren Bereich der Abbildung (Zinth & Zinth, 2018). Die Abbildung zeigt am Beispiel des Menschen sehr deutlich, dass das sichtbare Lichtspektrum nur einen sehr kleinen Ausschnitt des elektromagnetischen Spektrums ausmacht (Zinth & Zinth, 2018, Gmelch & Reineke, 2019). An den violetten Bereich des visuellen Lichtspektrums schließt sich die ultraviolette Strahlung (UV-Strahlung) an, mit Wellenlängen, die kürzer sind als 400 nm und bei etwa 10 nm beginnen. Die IR-Strahlung schließt sich an den roten Bereich des sichtbaren Lichtspektrums an und umfasst einen Wellenlängenbereich von etwa 700 nm bis 1 mm (Davies, 2017, Gmelch & Reineke, 2019).

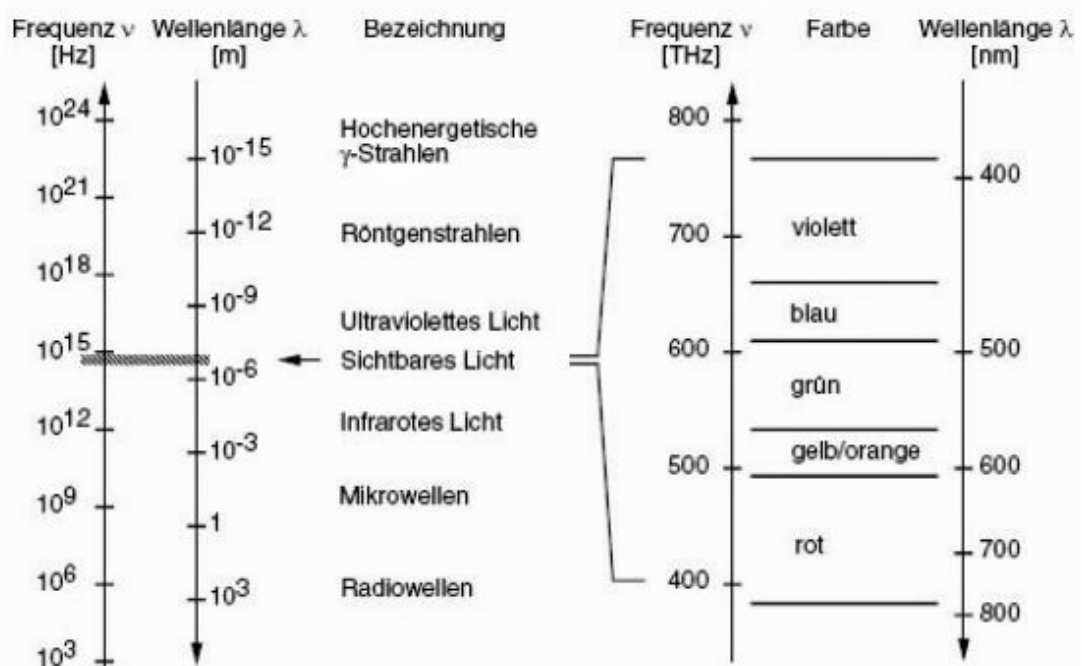


Abbildung 1: Das elektromagnetische Spektrum (Quelle: Zinth et al., 2018)

Das Spektrum der Sonnenstrahlung liegt größtenteils zwischen 225 und 3200 nm. Jedoch gelangt aufgrund von Absorptions- und Streuprozessen innerhalb der Atmosphäre nur ein Teil dieser Strahlung auf die Erdoberfläche. Kurzwellige Strahlung mit Wellenlängen von unter 320 nm wird beispielsweise größtenteils durch die Ozonschicht absorbiert. Das Resultat dieser Vorgänge ist, dass etwa die Hälfte der auf die Erdoberfläche eintreffenden Sonnenstrahlung in den sichtbaren Spektralbereich des Menschen fällt (Falk et al., 2019).

Platziert man ein Prisma in einer solchen Weise, dass nur ein schmaler Strahl von Sonnenstrahlung hindurchtritt, so kommt es aufgrund der unterschiedlichen Brechung je nach Strahlungswellenlänge zu einer Aufspaltung in die einzelnen Farben des sichtbaren Spektralbereichs auf der anderen Seite des Prismas. Violette Licht wird dabei am schwächsten gebrochen und rotes Licht am stärksten. Dazwischen liegen die Farbbereiche von blau, grün, gelb und orange. Die einzelnen Farbbereiche gehen dabei kontinuierlich ineinander über (Davies, 2017).

1.2.1. Visuelles Spektrum

Für das Verständnis der Bildentstehung in der Fotografie und im Besonderen für das Verständnis der Funktionsweise des Kamerasensors als wesentlicher Grundlage für die IR-Fotografie, liegt in diesem Unterkapitel der Schwerpunkt auf dem visuellen Spektrum und der Farbwahrnehmung des Menschen.

Der sichtbare Spektralbereich ist für jede Spezies unterschiedlich und hängt von der Art und Anzahl der für die Lichtwahrnehmung vorhandenen Sinneszellen bzw. deren Sehpigmenten ab (Davies, 2017).

Das für menschliche Augen wahrnehmbare Licht beginnt bei einer Wellenlänge von ungefähr 380 bis 400 nm und reicht bis zu einer Wellenlänge von etwa 700 bis 780 nm. Die Angaben hierzu variieren je nach Literaturquelle (Dorame, 2010, Mangold, 2015, Davies, 2017, Zinth & Zinth, 2018, Falk et al., 2019, Klein et al., 2020).

Wirbeltiere besitzen zwei verschiedene Arten von Photorezeptorzellen, die aufgrund ihrer Form als Stäbchen und Zapfen bezeichnet werden. In der Retina des Menschen befinden sich ungefähr drei Millionen Zapfen und 100 Millionen Stäbchen (Berg et al.,

2012).

Stäbchen sind für die Hell-Dunkel-Wahrnehmung verantwortlich. Sie sprechen bereits auf sehr schwache Lichtreize an und können sogar ein einzelnes Photon wahrnehmen. Das Photorezeptormolekül der Stäbchen ist das Rhodopsin, das aus dem transmembranären Protein Opsin und dem Chromophor, das heißt der lichtabsorbierenden Gruppe, 11-cis-Retinal aufgebaut ist. Das Absorptionsmaximum von Rhodopsin liegt bei etwa 500 nm und entspricht damit dem Maximum der Wellenlängenverteilung der Sonnenstrahlung (Berg et al., 2012).

In der menschlichen Netzhaut kommen drei verschiedene Typen an Zapfen vor. Diese sind für das Farbsehen verantwortlich und reagieren erst bei einer deutlich größeren Helligkeit als die Stäbchen. Die Zapfen besitzen jeweils ein zu Rhodopsin homologes Photorezeptorprotein. Das 11-cis-Retinal dient hierbei ebenfalls als Chromophor, wohingegen es sich bei dem transmembranären Protein um drei verschiedene Isoformen des Opsins handelt (Berg et al., 2012).

Diese drei verschiedenen Zapfen-Rezeptorproteine unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Absorptionsmaxima. Die Blauzapfen oder S-Zapfen haben ihr Absorptionsmaximum bei etwa 420 nm. S steht hierbei für „short“ und bezieht sich auf die kürzere Wellenlänge im Vergleich zu den anderen Zapfentypen. Das Absorptionsmaximum der Grünzapfen oder M-Zapfen, mit M für „medium“, liegt bei etwa 530 nm. Es liegt damit sehr nah am Absorptionsmaximum der Rotzapfen oder L-Zapfen, mit L für „long“, das bei etwa 560 nm liegt (Berg et al., 2012). Die genaue Angabe der Absorptionsmaxima unterscheidet sich je nach Literaturquelle.

Abbildung 2 zeigt die jeweiligen Absorptionsspektren der Zapfepigmente und stellt deren Überschneidungsbereiche dar. Hierbei fällt auf, dass besonders M- und L-Zapfen einen großen Überschneidungsbereich ihrer Absorptionsspektren aufweisen.

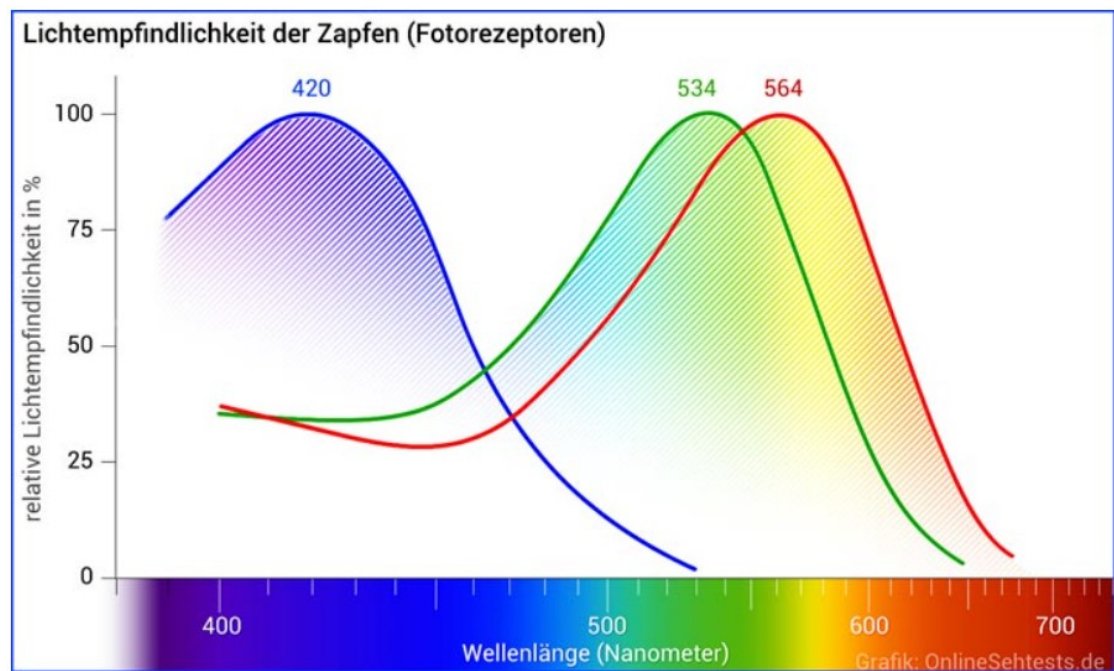


Abbildung 2: Absorptionsspektren der menschlichen Zapfen (Quelle: Mißfeldt, 2021)

Der Sinneseindruck, den wir als Farbe wahrnehmen, entsteht durch die Verrechnung der von der Netzhaut des Auges kommenden Signale im Gehirn (Mangold, 2015, Gmelch & Reineke, 2019). Werden alle drei Zapfentypen gleichmäßig erregt, so entsteht der Farbeindruck weiß (Gmelch & Reineke, 2019).

Die unterschiedlichen Zapfentypen kommen nicht gleichhäufig in der Netzhaut vor. S-Zapfen sind in einer deutlich geringeren Anzahl vertreten als M- und L-Zapfen (Curcio et al., 1991). Aufgrund dieser Verteilung der Zapfentypen und aufgrund der oben beschriebenen Lage der Absorptionsspektren der M- und L-Zapfen, dominiert im menschlichen Auge eine Absorption von Wellenlängen im grünen Bereich des Lichtspektrums. Dies ist von großer Relevanz für die Konstruktion des Kamerasensors (Mangold, 2015).

Da der Mensch drei verschiedene Zapfen-Typen besitzt, spricht man von einem trichromatischen Farbsehen. Pferde besitzen hingegen nur zwei verschiedene Zapfen-Typen mit Absorptionsmaxima im Bereich blauer und grüner Wellenlängen, bezogen auf das Farbsehen des Menschen. Beim Pferd liegt demnach ein dichromatisches Farbsehen vor und es fehlt ein spezieller Rezeptor für den Bereich längerer Wellenlängen (Tóth et al., 2010).

Weder Pferd noch Mensch können IR-Strahlung sehen. Jedoch kann über sensible

Nervenendigungen in der Haut IR-Strahlung als Wärmeempfindung wahrgenommen werden (Mangold, 2015).

Einige Fischarten, wie zum Beispiel Piranhas, und viele Insektenarten, hingegen, besitzen Sinneszellen, mit denen sie im nahen IR-Bereich sehen können (Davies, 2017). Weiterhin gibt es einige Schlangenarten, wie zum Beispiel Grubenottern oder Klapperschlangen, die mittels spezieller Organe zur Thermorezeption den entfernten IR-Bereich wahrnehmen können (Davies, 2017).

1.2.2. Infrarote Strahlung

Die Existenz der IR-Strahlung wurde von dem Astronomen William Herschel im Jahr 1800 bei einem Versuch zur Messung der Farbtemperatur entdeckt. Dabei verwendete Herschel ein Prisma, um das Sonnenlicht in die verschiedenen Spektralbereiche aufzuspalten und platzierte Thermometer in den Bereichen der unterschiedlichen Farbspektren, die von violett nach rot eine zunehmende Temperatur anzeigten. Das Kontrollthermometer, das Herschel neben das Thermometer für den roten Bereich gelegt hatte, zeigte jedoch nicht wie er erwartet hatte die Raumtemperatur an, sondern eine noch höhere Temperatur als das Thermometer im roten Bereich. Durch weitere Folgeversuche kam William Herschel zu dem Schluss, dass auf den roten Spektralbereich ein weiterer unsichtbarer Spektralbereich folgt, der die Eigenschaft aufweist, Wärme zu erzeugen (Davies, 2017, Dorame, 2010, Klein et al., 2020).

Dieser „unterhalb“ des sichtbaren roten Lichts gelegene Spektralbereich wurde entsprechend als „infra“-rotes Spektrum bezeichnet (Klein et al., 2020).

Es werden drei Bereiche innerhalb des IR-Spektrums unterschieden: der nahe, der mittlere und der entfernte IR-Bereich (Mangold, 2015, Davies, 2017, Klein et al., 2020). Je nach Literaturquelle unterscheidet sich die genaue Angabe der Wellenlängenbereiche. Der für die Fotografie relevante nahe IR-Bereich reicht von etwa 750 nm bis 1100 nm (Davies, 2017, Klein et al., 2020). Längere Wellenlängen bis etwa 2500 nm werden für Nachtsichtgeräte eingesetzt und noch längere IR-Wellenlängen im Bereich von 9000 bis 14.000 nm sind für die Verwendung von Wärmebildkameras relevant (Mangold, 2015, Davies, 2017).

Wie oben beschrieben, ist der nahe IR-Bereich im elektromagnetischen Spektrum der

Sonnenstrahlung enthalten, wobei die Qualität und Quantität der enthaltenen IR-Strahlung je nach Lichtsituation variiert (Davies, 2017).

In Kapitel 8 werden verschiedene für die Fotografie relevante künstliche Strahlungsquellen, die IR-Strahlung aussenden, aufgeführt.

2. Grundlagen der Infrarotfotografie

2.1. Historischer Überblick

Die Entwicklung der IR-Fotografie geht auf die frühen Jahre des 20. Jahrhunderts zurück (Davies, 2017). Die ersten IR-Fotos stammen von dem amerikanischen Physiker Robert W. Wood aus dem Jahr 1910 (Dorame, 2010, Klein et al., 2020).

Die ursprünglichen Einsatzbereiche der IR-Fotografie waren vor allem die Astrofotografie und die militärische Luftraumüberwachung (Klein et al., 2020). Als weitere Einsatzgebiete kamen die Landschafts- und Portraitfotografie hinzu sowie der Einsatz in der Forensik, Medizin und weitere naturwissenschaftliche oder technische Anwendungen (Davies, 2017, Klein et al., 2020).

2.2. Technisches Grundprinzip

Für die IR-Fotografie ist der nahe IR-Bereich mit Wellenlängen von 750 bis 1100 nm relevant. Diese Wellenlängen sowie Wellenlängen im UV-Bereich können neben dem visuellen Spektrum von den Bildsensoren der heutigen digitalen Kameras erfasst werden (Mangold et al., 2013, Mangold, 2015, Davies, 2017).

Vor den Bildsensor einer Kamera wird jedoch standardmäßig ein Sperrfilter eingebaut, der nur die Wellenlängen des für den Menschen sichtbaren Spektralbereichs durchlässt. Ohne diese Filter würden die Fotos einen starken Farbstich aufweisen und es würde zu einer Unschärfe im Foto kommen (Mangold, 2015, Davies, 2017).

Um die IR-Fotografie zu ermöglichen, ist es erforderlich den Sperrfilter zu entfernen und stattdessen einen Filter zu verwenden, der das visuelle Lichtspektrum des Menschen

und den UV-Bereich herausfiltert (Davies, 2017). Man bezeichnet einen solchen Filter als IR-Filter (Mangold, 2015).

Die klassische IR-Fotografie erzeugt monochrome Fotos in verschiedenen Grautönen. Bei Verwendung eines IR-Filters, der noch einen Teil des für den Menschen sichtbaren roten Spektralbereichs durchlässt, erhält man Farbakzente im Foto. Man bezeichnet dies als Farb-IR-Fotografie (Mangold, 2015, Davies, 2017).

Abbildung 3a zeigt ein Foto, das mit einer Kamera aufgenommen wurde, bei der der voreingebaute Sperrfilter entfernt wurde, sodass Wellenlängen vom UV- bis zum IR-Bereich auf den Bildsensor gelangen. Abbildung 3b zeigt ein Vergleichsfoto mit dem visuellen Lichtspektrum des Menschen und Abbildung 3c zeigt vom gleichen Motiv ein IR-Foto, für das ein 695-nm-IR-Filter verwendet wurde. Im Vergleich hierzu stellt Abbildung 3d ein monochromes Foto auf Basis des visuellen Lichtspektrums dar. Die Aufnahmen wurden alle mit der Kamera „Sony α 7R III“ und einer 50-mm-Festbrennweite als Objektiv aufgenommen.

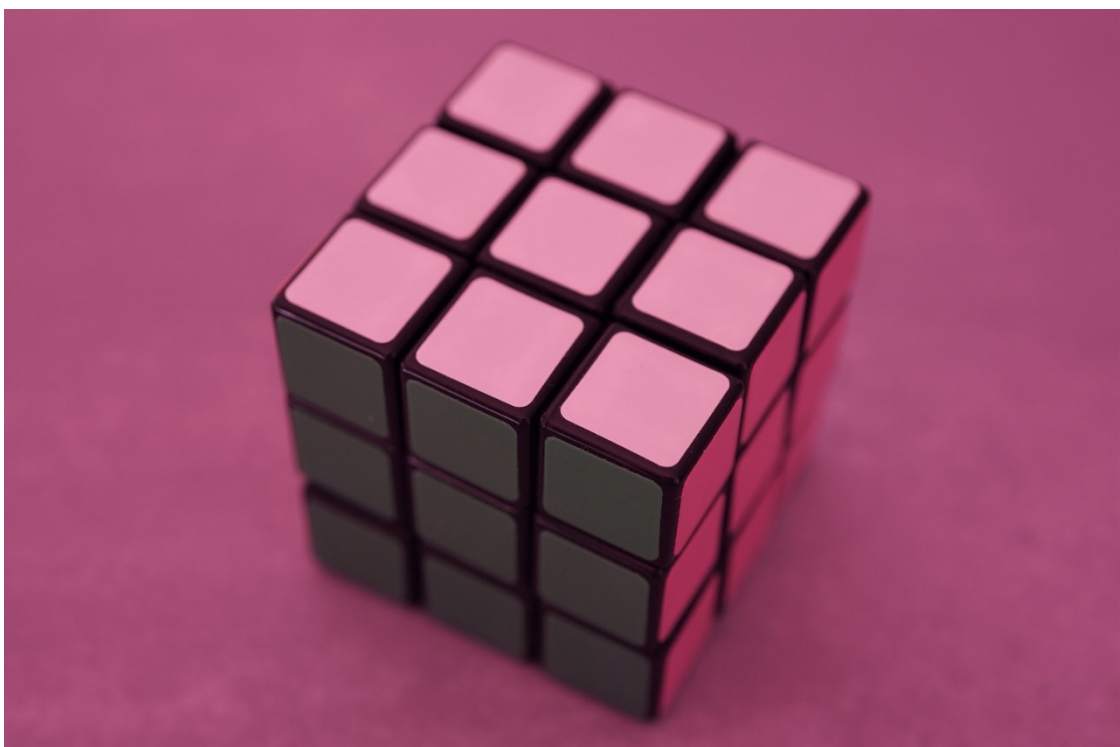


Abbildung 3a: Zauberwürfel fotografiert ohne Sperrfilter vor dem Bildsensor (Svenja Maier, 2021)

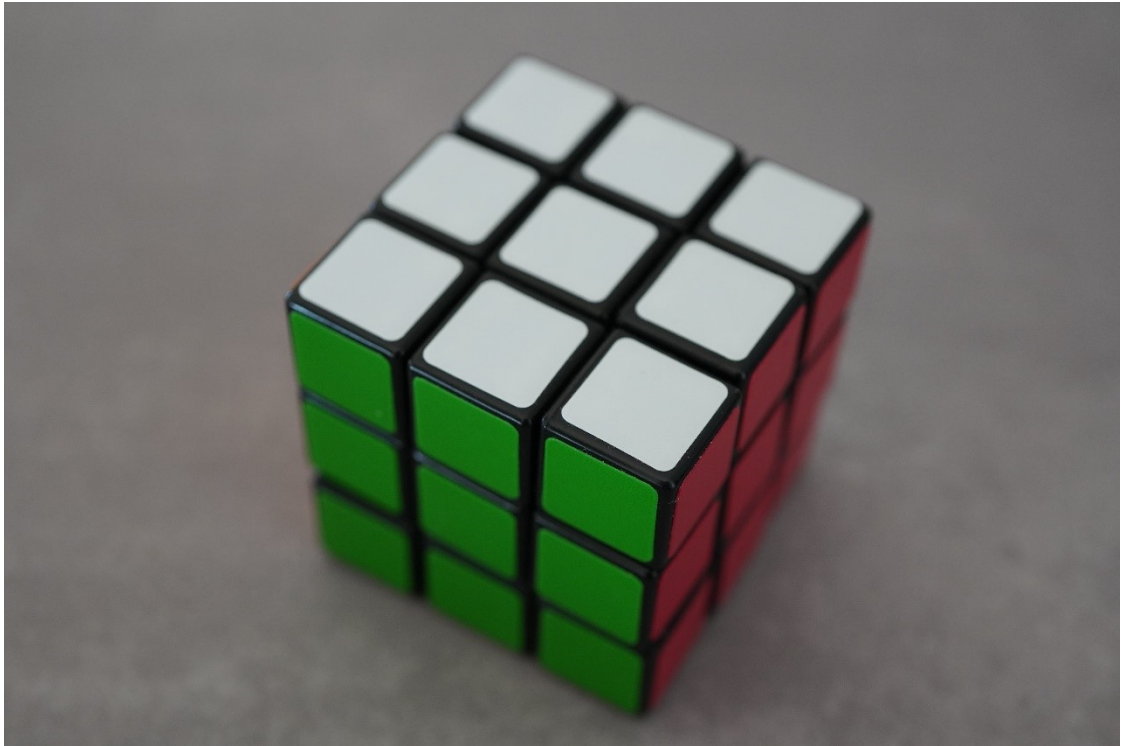


Abbildung 3b: Zauberwürfel fotografiert mit dem visuellen Lichtspektrum (Svenja Maier, 2021)



Abbildung 3c: Zauberwürfel fotografiert mit 695-nm-IR-Filter (Svenja Maier, 2021)

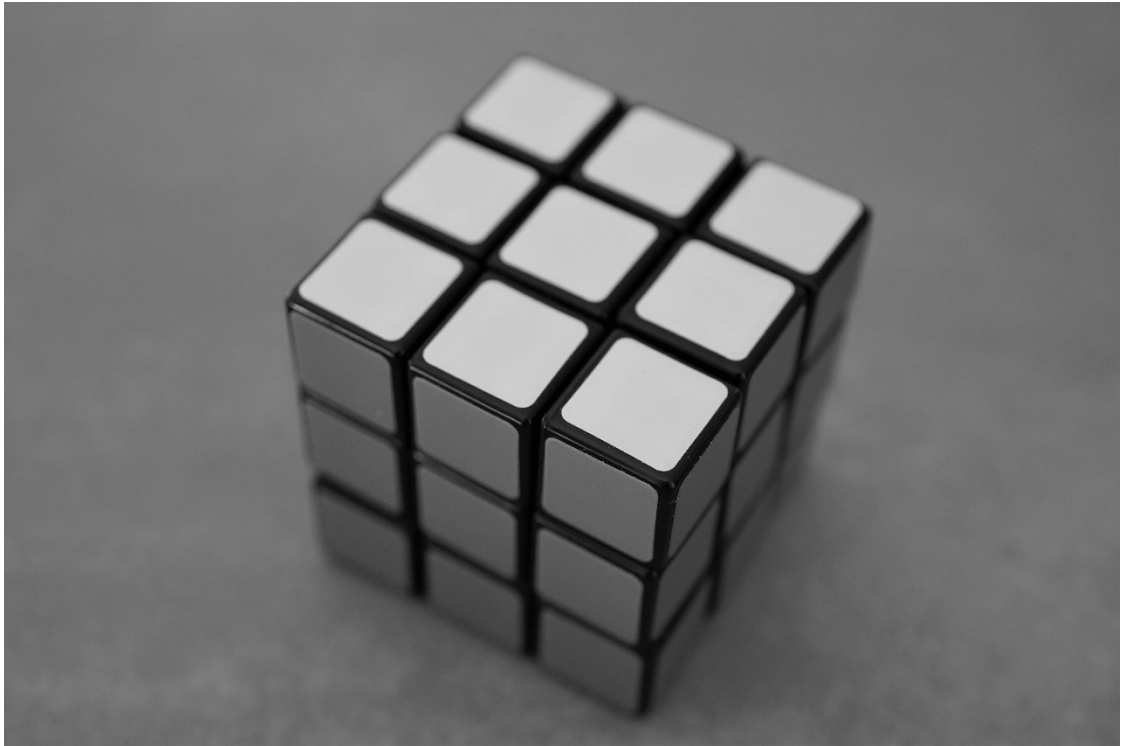


Abbildung 3d: Abbildung 3b als monochrome Aufnahme (Svenja Maier, 2021)

2.3. Darstellung verschiedener Objekte im Infrarotfoto

Wie sich verschiedene Objekte im IR-Foto darstellen, hängt davon ab wie viel IR-Strahlung jeweils absorbiert, reflektiert oder durchgelassen wird (Davies, 2017, Klein et al., 2020). Wird viel IR-Strahlung reflektiert, so erscheint ein Objekt im Foto sehr hell. Je mehr IR-Strahlung von einem Objekt absorbiert oder durchgelassen wird, desto dunkler erscheint es (Klein et al., 2020).

Im Folgenden werden einige klassische Beispiele aufgeführt.

Grüne Blätter erscheinen im IR-Foto strahlend weiß. Man bezeichnet dies auch als Wood-Effekt, benannt nach Robert W. Wood, dem Begründer der IR-Fotografie, der diesen Effekt zuerst beschrieben hat (Mangold, 2015, Davies, 2017, Klein et al., 2020). Der Wood-Effekt entsteht dadurch, dass IR-Strahlung innerhalb der Blätter umfangreich gestreut wird. Die Streuung erfolgt beispielsweise an Gaseinschlüssen im Zusammenhang mit Zellwandgrenzen (Mangold et al., 2013). Chlorophyll ist jedoch transparent für IR-Strahlung (Mangold et al., 2013, Mangold, 2015).

Die Erscheinung von Wasser ist abhängig von dessen Tiefe und Klarheit, sowie dessen Bewegung und der Konzentration an gelösten Teilchen (Klein et al., 2020). Stehendes

Süßwasser reflektiert IR-Strahlung nur in geringem Maße, sodass ein tiefes Gewässer sehr dunkel erscheint (Davies, 2017). Wasser in Bewegung und mit entsprechend höherem Gehalt an Gasblasen sowie Wasser mit einem hohen Anteil an gelösten Salzen reflektiert hingegen einen größeren Teil der IR-Strahlung und erscheint deshalb heller (Klein et al., 2020).

Für die IR-Landschaftsfotografie sind die dunkle Erscheinung des Himmels, die durch die Transmission der IR-Strahlung zustande kommt, und die aufgrund von Reflexion weiße Darstellung der Wolken sehr charakteristisch (Davies, 2017, Klein et al., 2020).

Die Abbildungen 4a und 4b zeigen klassische IR-Landschaftsaufnahmen, bei denen der Wood-Effekt deutlich wird sowie die dunkle Darstellung von Himmel und Wasser und die weiße Erscheinung der Wolken.



Abbildung 4a: IR-Landschaftsfotografie (Quelle: Lamprecht, S., 2011)



Abbildung 4b: IR-Landschaftsfotografie (Quelle: Lamprecht, S., 2012)

Wie sich Textilien oder andere künstliche Oberflächen im IR-Foto zeigen, hängt von dem verwendeten Material ab und ist unabhängig von der vom Menschen wahrgenommenen Farbe. Beispielsweise können sich unterschiedliche schwarze Anzüge je nach verwendetem Stoff in ganz verschiedenen Grautönen im IR-Bild präsentieren (Davies, 2017, Klein et al., 2020). Ein weiteres Beispiel ist auch der Zauberwürfel in Abbildung 3c. Das im Foto mit visuellem Spektrum unterschiedlich farbige Kunststoffmaterial stellt sich im IR-Foto unabhängig von der Farbe weiß dar. Es reflektiert also die IR-Strahlung.

Die menschliche Haut reflektiert IR-Strahlung mehrheitlich, sodass Haut hell und glänzend im Foto erscheint. Da IR-Strahlung etwa 2 – 3 mm tief in die Haut eindringt und desoxygeniertes Hämoglobin IR-Strahlung absorbiert, stellen sich oberflächliche Venen dunkel im IR-Foto dar (Davies, 2017, Klein et al., 2020).

3. Bisheriger Einsatz der Infrarotfotografie in der Medizin, Wissenschaft und Technik

3.1. Humanmedizin

Die überwiegende Zahl an Veröffentlichungen aus der Humanmedizin zum Einsatz von Strahlung des nahen IR-Bereichs zu diagnostischen Zwecken stammt aus dem Bereich der Augenheilkunde.

Frühe Veröffentlichungen aus den 1930er bis 1970er Jahren demonstrieren eine verbesserte Einsicht der vorderen Augenabschnitte durch IR-Fotografie bei Patienten mit einer getrübten Hornhaut (Dekking, 1933, Ogg, 1958, Matthäus & Grötzsch, 1966, Cubberly, 1976). Weiterhin wird auch eine verbesserte Darstellung von Pigmentveränderungen der vorderen Augenabschnitte und deren Differenzierung von pigmentierten Tumoren beschrieben (Huerkamp, 1955, Ogg, 1958).

Eine Studie aus dem Jahr 2015 von Shazly und Bonhomme zeigt die Verwendung einer IR-Kamera zur Darstellung von Veränderungen der Pupille und eine Studie von Yoo et al. aus dem Jahr 2019 demonstriert den Einsatz der IR-Fotografie zur Diagnose von Mikrostrabismus bei Kindern.

Aus den 1970er Jahren existieren weiterhin auch Veröffentlichungen zur Untersuchung des Augenhintergrunds mit IR-Fotografie. Hierzu wurden keine klassischen IR-Kameras, sondern mit einem IR-Filter und einem IR-empfindlichen Film modifizierte Funduskameras, eingesetzt. Der hierbei genannte Hauptvorteil ist die verbesserte Durchsicht durch Trübungen des Glaskörpers und der Netzhaut (Dallow, 1974).

Neuere Veröffentlichungen zur Untersuchung des Augenhintergrunds zeigen den erfolgreichen Einsatz von Strahlung des nahen IR-Bereichs zur Diagnostik von verschiedenen Formen der Makuladegeneration (Bandal et al., 2017) sowie von zystischem Makulaödem (Remky et al., 1999). Diese Studien verwendeten ebenfalls keine klassischen IR-Kameras, sondern ein konfokales Scanning-Laser-Ophthalmoskop (Bandal et al., 2017, Remky et al., 1999, Theelen et al., 2009).

Neben der Augenheilkunde wird Strahlung des nahen IR-Bereichs auch in weiteren Fachgebieten der Humanmedizin zur Diagnostik eingesetzt. Zumeist werden hierbei

weiterführende Techniken, wie beispielsweise die Detektion von Fluoreszenzmarkern, die Strahlung im nahen IR-Bereich emittieren, verwendet. Solche Marker können zum Beispiel in der Phlebologie eingesetzt werden, um eine erhöhte Durchlässigkeit von Blutgefäßen darzustellen (Proulx et al., 2013). Auch der Einsatz solcher Fluoreszenzmarker in der Neurologie zur Sichtbarmachung von Hirntumoren ist beschrieben (Li et al., 2017).

3.2. Tiermedizin

Die einzigen beiden Veröffentlichungen zum Einsatz der IR-Fotografie in der Tiermedizin stammen aus dem Bereich der equinen Ophthalmologie (McMullen et al., 2009, Tóth & Dikker, 2013). In diesen Veröffentlichungen werden beispielhaft die Vorteile der IR-Fotografie gegenüber Fotos mit dem für den Menschen visuellen Lichtspektrum aufgezeigt. Genannte Vorteile sind unter anderem eine verbesserte Darstellung von Oberflächenstrukturen der Iris und der Traubenkörner sowie von auftretenden Pigmentveränderungen der Iris. Als weitere Einsatzzwecke werden eine verbesserte Durchsicht durch eine getrübe Hornhaut zum Beispiel im Falle eines Glaukoms, bei immunmediierter Hornhautentzündung oder im Falle eines Hornhautulkus aufgezeigt. Weiterhin werden eine verbesserte Darstellung von Blutansammlungen in der vorderen Augenkammer, von Iris melanomen und von verschiedenen Veränderungen der Linse angesprochen.

3.3. Sonstiger Einsatz

In der Forensik findet die IR-Fotografie verschiedene Anwendungen wie zum Beispiel die Sichtbarmachung von Blutspuren auf dunklen Textilien (Sterzik et al., 2015, Sterzik & Bohnert, 2016, Davies, 2017), die Darstellung von Schmauchspuren auf dunklen Textilien (Barrera et al., 2013) oder die Sichtbarmachung von dunklen Tattoos bei Wasserleichen (Cullip et al., 2021).

Einsatzzwecke der IR-Fotografie in der Botanik sind die Detektion erkrankter Blätter (Davies, 2017) oder auch eine Analyse der Baumzusammensetzung anhand der Erscheinung der Blätter im IR-Foto (Klein et al., 2020).

Weiterhin findet die IR-Fotografie bzw. der IR-Film Einsatz bei Kameras zur

Beobachtung von Wildtieren oder bei Überwachungskameras. In solchen Kameras ist die Strahlungsquelle durch einen nur für IR-Strahlung durchlässigen Filter verdeckt, sodass die Strahlungsquelle vom Zielobjekt nicht bemerkt werden kann (Davies, 2017).

In der Kunsthistorik oder Kunstrestauration wird die IR-Fotografie eingesetzt, um versteckte Details in einem Gemälde zu entdecken und um Gemälde auf Echtheit zu prüfen (Davies, 2017). Weiterhin eignet sich die IR-Fotografie zur Sichtbarmachung nicht mehr lesbarer Schriften in alten Dokumenten (Sugawara, 2004).

4. Technische Grundlagen der digitalen Fotografie

Die digitale Fotografie bietet zahlreiche Vorteile im Vergleich zur analogen Fotografie. Zum Einen ermöglicht sie, unter Voraussetzung des Vorhandenseins ausreichend großer Speichermedien, eine unbegrenzte Zahl an Aufnahmen ohne zusätzliche Kosten, und zum Anderen ein direktes Einsehen der Aufnahmen sowie zahlreiche Möglichkeiten zur digitalen Nachbearbeitung (Hennemann, 2010).

Durch diesen enormen technischen Fortschritt ist der Einsatz der Fotografie als Mittel zur Diagnostik und Dokumentation in der Medizin sowohl preislich als auch hinsichtlich der Praktikabilität und des zeitlichen Aufwands erschwinglich geworden und spielt entsprechend eine große Rolle in der Human- und in der Tiermedizin.

Das Anfertigen „normaler“ Fotos zu Dokumentationszwecken gelingt in der Regel mit jeder herkömmlichen Digitalkamera oder Smartphonekamera mit guter Qualität und auch ohne tiefergehendes fotografisches Wissen.

Zur Umsetzung spezieller Aufnahmezwecke, wie der IR-Fotografie, ist jedoch ein grundlegendes Verständnis der Kameratechnik erforderlich, sodass eine fundierte Entscheidung für das geeignete Equipment getroffen werden kann.

4.1. Kamerateypen

Eine Digitalkamera verwendet im Vergleich zu einer Analogkamera ein digitales Speichermedium, wie zum Beispiel eine SD-Karte (Secure Digital). Die Bildinformation muss zuvor mittels eines elektronischen Bildwandlers, dem Bildsensor,

digitalisiert werden (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

In der digitalen Fotografie kommen verschiedene Kameratypen zum Einsatz, die zu unterschiedlichen Zeiten entwickelt bzw. weiterentwickelt wurden und die jeweils für unterschiedliche Aufnahmesituationen geeignet sind (Banek & Banek, 2013). Jeder dieser Kameratypen kann grundsätzlich zu einer IR-Kamera modifiziert werden (Mangold, 2015).

In diesem Kapitel sollen die gängigsten Kameratypen im Überblick vorgestellt werden.

4.1.1. Kompaktkameras

Wie der Name vermuten lässt, handelt es sich bei den Kompaktkameras um kleine, leichte Kameras, die als Einsteigermodelle und praktische Begleiter im Alltag dienen sollen. Sie besitzen ein fest verbautes Objektiv, zumeist ein Zoom-Objektiv, und viele automatische Funktionen zur Erleichterung der Bedienung. Sie sind in der Regel deutlich günstiger zu erwerben als andere Kameratypen. Nachteilig ist das Fehlen einiger Einstellungsmöglichkeiten, die zum gezielten Fotografieren erforderlich sind. Weiterhin von Nachteil sind Einschränkungen in der Bildqualität aufgrund der baulichen Merkmale, wie zum Beispiel dem lichtschwachen, integrierten Objektiv und dem vergleichsweise kleinen Sensor (Banek & Banek, 2013).

4.1.2. Bridge-Kameras

Bridge-Kameras sind Hybrid-Kameras, die die kompakte Bauweise der Kompaktkameras mit dem Funktionsumfang von Spiegelreflexkameras bzw. spiegellosen Systemkameras vereinen sollen. Von Vorteil sind also die im Vergleich zu Kompaktkameras vorhandenen manuellen Einstellungsmöglichkeiten. Doch auch Bridge-Kameras besitzen, wie Kompaktkameras, ein fest integriertes Zoom-Objektiv, das entsprechend keinen Objektivwechsel erlaubt und in speziellen Aufnahmesituationen an seine Grenzen stößt und damit den limitierenden Faktor bei diesem Kameratyp darstellt (Banek & Banek, 2013).

4.1.3. Systemkameras

Ursprünglich wurde die Bezeichnung „Systemkamera“ für alle Kameras mit Wechselobjektiv verwendet. Mittlerweile wird zwischen spiegellosen Systemkameras, die man oft nur als „Systemkamera“ bezeichnet, und Spiegelreflexkameras unterschieden (Banek & Banek, 2013).

4.1.3.1. Spiegelreflexkameras (DSLR)

Spiegelreflexkameras, in der Fachsprache bezeichnet als DSLR-Kameras (digital single-lens reflex), haben über viele Jahre den Profimarkt dominiert. Das charakteristische und namensgebende Baumerkmal dieses Kameratyps ist ein wegklappbarer Spiegel, der sich zwischen dem Objektiv und dem Bildsensor befindet (Banek & Banek, 2013). Die durch das Objektiv einfallende Strahlung trifft im nicht ausgelösten Zustand im 45°-Winkel auf den Spiegel. Dieser reflektiert die Lichtstrahlen auf die Mattscheibe des darüber gelegenen Prismensuchers. Mittels eines Pentaprismas wird das Bild in seitenkorrekter Weise gespiegelt und kann durch das Linsensystem des Sucherokulars, das sich oberhalb des Kameradisplays befindet, eingesehen werden (Haarmeyer & Westphalen, 2010). Das beschriebene Prinzip bezeichnet man als optischen Sucher. Durch das Okular hindurch blickt man direkt durch das Objektiv. Das Gesehene Bild ist rein optisch und gibt exakt die Umgebung wieder, ohne jegliche elektronische Modifikation. Beim Auslösen der Kamera klappt der Spiegel nach oben, sodass das Licht auf den Bildsensor gelangen kann (Banek & Banek, 2013).

4.1.3.2. Spiegellose Systemkameras (DSLM)

Das Feld der spiegellosen Systemkameras, oder DSLM-Kameras (digital single-lens mirrorless), ist in den letzten Jahren stark gewachsen und es gibt immer mehr Modelle für professionelle Fotografen. Der wesentliche Unterschied zu einer Spiegelreflexkamera ist das Fehlen des Spiegels und damit des optischen Suchers. Entsprechend besitzen DSLM-Kameras, wie auch die zu Beginn des Kapitels beschriebenen Kameratypen, einen elektronischen bzw. digitalen Sucher. Diese Art des Suchers berechnet alle aktuellen Kameraeinstellungen mit in die Bilddarstellung ein und stellt demnach nicht die Realität dar. Dargestellt wird hingegen wie ein in diesem

Moment aufgenommenes Foto aussehen würde. Dies ermöglicht den Vorzug direkt zu sehen, welche Auswirkungen bestimmte Anpassungen der Kameraeinstellungen auf das Bild haben werden. Weiterhin können in einem digitalen Sucher verschiedene Hilfsfunktionen eingeblendet werden, wie zum Beispiel das Histogramm oder eine Wasserwaage (Banek & Banek, 2013, *Systemkamera oder Spiegelreflex in 2022? 10 Unterschiede (DSLM vs. DSLR)*, o. D.).

4.1.3.4. Vergleich von DSLM- und DSLR-Kameras

Für viele Jahrzehnte waren Spiegelreflexkameras der Kamerateyp der Wahl für Profifotografen. Neben dem Vorhandensein einer Vielfalt an Wechselobjektiven für DSLR-Kameras waren weitere Hauptargumente gegen eine DSLM-Kamera die unzureichende Qualität des elektronischen Suchers mit Problemen wie zeitlicher Verzögerung bei der Abbildung und Unschärfe sowie eine schlechtere Funktionsweise des Autofokus im Vergleich zu DSLR-Kameras. Ein weiteres Argument war auch eine fehlende Auswahl an DSLM-Kameras mit entsprechend großen Bildsensoren wie man sie bei DSLR-Profikameras findet (*Systemkamera oder Spiegelreflex in 2022? 10 Unterschiede (DSLM vs. DSLR)*, o. D.).

Diese Argumente gehören aber aufgrund des rasanten technischen Fortschritts im Bereich der spiegellosen Systemkameras mittlerweile der Vergangenheit an (*Systemkamera oder Spiegelreflex in 2022? 10 Unterschiede (DSLM vs. DSLR)*, o. D.). Entsprechend kann der wesentliche Vorteil des elektronischen Suchers, nämlich das direkte Einsehen der Effekte der Kameraeinstellungen auf das Bild, bei den neueren Modellen mit bester Bildqualität genutzt werden. Auch die Zahl und Qualität an verfügbaren Wechselobjektiven für DSLM-Kameras nimmt immer weiter zu (Banek & Banek, 2013, *Systemkamera oder Spiegelreflex in 2022? 10 Unterschiede (DSLM vs. DSLR)*, o. D.).

Durch das Fehlen des Spiegels ergeben sich weitere Vorteile für DSLM-Kameras. Das Hochklappen des Spiegels erzeugt ein Klappgeräusch, das je nach Aufnahmesituation störend sein kann. Zudem kommt es durch die Bewegung des Spiegels auch zu Erschütterungen des Kameragehäuses, was bei bestimmten Belichtungszeiten eine Verwacklungsunschärfe im Bild erzeugen kann. Weitere Geräusche bei der Aufnahme werden durch den in DSLR-Kameras eingebauten mechanischen Verschluss erzeugt.

Bei den meisten DSLM-Kameras kann man zwischen einem mechanischen und einem elektronischen Verschluss wählen, wodurch eine komplett lautlose Fotografie ermöglicht wird. Ein weiterer Nachteil der DSLR-Kameras ist die zeitliche Verzögerung, die durch das Hochklappen des Spiegels entsteht, sodass DSLM-Kameras eine höhere Frequenz bei Serienbildaufnahmen erreichen. Durch das Fehlen des Spiegels wird zudem eine kompaktere und leichtere Bauweise für DSLM-Kameras ermöglicht (Banek & Banek, 2013, *Systemkamera oder Spiegelreflex in 2022? 10 Unterschiede (DSLM vs. DSLR)*, o. D.).

Hinsichtlich der Akkulaufzeit sind DSLR-Kameras leistungstärker, da der Bildsensor nur für den kurzen Moment einer Aufnahme aktiv ist. Bei DSLM-Kameras ist der Sensor hingegen die komplette Zeit aktiv und benötigt entsprechend mehr Energie. Aber auch in diesem Bereich hat sich die Technik deutlich weiterentwickelt und man kann auch mit DSLM-Kameras über mehrere Stunden mit dem gleichen Akku fotografieren (*Systemkamera oder Spiegelreflex in 2022? 10 Unterschiede (DSLM vs. DSLR)*, o. D.).

Ein weiterer Vergleichspunkt ist das Vorhandensein eines Bildstabilisators. Dieser hat die Funktion kleine Verwacklungen auszugleichen, die bei der Fotografie aus der Hand leicht auftreten können. Bildstabilisatoren können direkt in das Kameragehäuse, in das Objektiv oder in beides integriert sein. Die meisten DSLR-Modelle besitzen keinen integrierten Bildstabilisator, sondern erfordern ein Objektiv mit dieser Funktion. DSLM-Kameras haben hingegen zumeist einen integrierten Bildstabilisator und können somit auch mit nicht stabilisierten und dadurch günstigeren Objektiven verwendet werden (*Systemkamera oder Spiegelreflex in 2022? 10 Unterschiede (DSLM vs. DSLR)*, o. D.).

Die Anschaffungskosten für Kameramodelle dieser beiden Typen in den verschiedenen Leistungsstufen vom Einsteiger- bis zum Profimodell sind vergleichbar (*Systemkamera oder Spiegelreflex in 2022? 10 Unterschiede (DSLM vs. DSLR)*, o. D.).

4.2. Aufbau einer Digitalkamera

Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die wesentlichen Bauteile einer Digitalkamera gegeben werden, deren Funktionsweise für das Verständnis der passenden Kameraeinstellungen relevant ist oder deren jeweilige Qualität und Ausfertigung ein Kriterium für die Kaufentscheidung darstellen.

4.2.1. Lichtpassage und Bildentstehung

Durch das Objektiv werden die einfallenden Lichtstrahlen gebündelt und an die Kamera weitergeleitet. Bei einer DSLR-Kamera trifft das einfallende Licht auf den klappbaren Spiegel und wird wie oben beschrieben in den optischen Sucher geleitet. Bei DSLM-Kameras trifft das Licht direkt auf den Sensor. Vor dem Sensor befindet sich der Verschluss, der je nach Kameratyp und Phase der Aufnahme offen oder geschlossen ist. Unmittelbar vor dem Sensor befindet sich bei nicht umgebauten Kameras ein Sperrfilter, der nur einen Teil des elektromagnetischen Spektrums durchlässt (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Banek & Banek, 2013).

Das auf den Sensor auftreffende Licht wird in elektrische Spannung umgewandelt und vom Bildprozessor wird diese Spannung in digitale Werte umgerechnet und schließlich auf ein digitales Speichermedium übertragen (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

4.2.2. Wichtige Bauteile des Kameragehäuses

4.2.2.1. Verschluss

Die Aufgabe des Verschlusses ist es, den Sensor mit der eingestellten Belichtungszeit, auch Verschlusszeit genannt, zu belichten. Die Belichtung beginnt, wenn der erste Verschlussvorhang den Sensor frei gibt und wird beendet, wenn der zweite Verschlussvorhang den Sensor wieder verdeckt (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Hinsichtlich der Bauweise unterscheidet man den mechanischen vom elektronischen Verschluss. Weiterhin kann in manchen Kameramodellen ein Hybrid-Verschluss eingestellt werden (Thoma, 2022).

In den meisten Kameramodellen befindet sich ein mechanischer Verschluss, der auch als Schlitzverschluss bezeichnet wird. Bei den beiden Verschlussvorhängen handelt es sich um lichtundurchlässige Lamellen. Im Falle einer DSLR-Kamera wird beim Auslösen zunächst der Spiegel hochgeklappt, dann fährt der erste Verschlussvorhang von oben nach unten und gibt den Sensor frei. Der zweite Verschlussvorhang fährt entsprechend der eingestellten Belichtungszeit zeitversetzt und mit gleicher

Geschwindigkeit wie der erste Vorhang ebenfalls von oben nach unten, sodass der Sensor wieder verdeckt wird. Bei sehr kurzen Belichtungszeiten ist der Sensor zu keiner Zeit komplett frei und die Lamellen bilden einen Schlitz, der über den Sensor fährt (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Banek & Banek, 2013).

Die Vorteile des mechanischen Verschlusses sind die Vermeidung der im Folgenden genannten möglichen Störeffekte bei Verwendung eines elektronischen Verschlusses. Zu beachtende Nachteile des mechanischen Verschlusses sind das bei jeder Aufnahme zu hörende doppelte Klickgeräusch, das je nach Aufnahmesituation störend wirken kann, sowie die Begrenzung der maximal erreichbaren Serienbildgeschwindigkeit aufgrund der mechanisch bewegten Bauteile. Weiterhin kommt es zu einem fortwährenden Verschleiß der Bauteile, sodass die Zahl der Aufnahmen mit mechanischem Verschluss die Nutzungsdauer der Kamera begrenzt (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Sänger & Sänger, 2018, Thoma, 2022).

DSLM-Kameras und DSLR-Kameras mit Live-View-Modus bieten die Möglichkeit eines Hybrid-Verschlusses mit erstem elektronischem Vorhang und zweitem mechanischem Vorhang. Bei diesen Kameras liegt ein elektronischer Sucher vor. Der Sensor wird daher permanent belichtet. Um ein Foto aufzunehmen, muss der Sensor zunächst zurückgesetzt werden, das heißt, dass die Ladungsspeicher des Sensors durch den elektronischen Vorhang geleert werden. Der mechanische Vorhang beendet schließlich die Belichtung (Thoma, 2022).

DSLM-Kameras bieten auch die Möglichkeit einen komplett elektronischen Verschluss einzustellen. Im Menü der Kamera findet man dies zumeist unter dem Punkt „Geräuschlose Aufnahme“ (Sänger & Sänger, 2018, Thoma, 2022).

Vorteile eines elektronischen Verschlusses bzw. der Hybrid-Variante sind ein direkteres Fotografieren durch eine geringere Verzögerung beim Auslösevorgang, das Erreichen einer höheren Serienbildgeschwindigkeit als beim mechanischen Verschluss, eine Reduktion von Verwacklungen, da sich keine mechanischen Bauteile zu Beginn des Auslösens bewegen, und weiterhin eine Geräuschreduktion sowie eine Verminderung des Verschleißes (Thoma, 2022).

Relevante Nachteile betreffen vor allem den komplett elektronischen Verschluss und weniger die Hybrid-Variante. So kommt es aufgrund des zeilenweisen Auslesens des Sensors zu Verzerrungen bei Motiven, die sich schnell bewegen. Dies bezeichnet man

als „Rolling-Shutter-Effekt“. Je schneller die Auslesegeschwindigkeit des Sensors ist, desto weniger stark fällt dieser Effekt ins Gewicht (Sänger & Sänger, 2018, Thoma, 2022). Ein weiterer Nachteil des elektronischen Verschlusses ist eine mögliche Streifenbildung als Störeffekt bei Kunstlichtern (Thoma, 2022).

Je nach Verschlusstyp sind außerdem Einschränkungen bei Verwendung des integrierten Kamerablitzes bzw. eines externen Blitzgerätes zu beachten. Als Blitzsynchronzeit bezeichnet man die kürzeste Belichtungszeit, bei der die Sensoroberfläche für einen Moment vollständig frei vorliegt. Bei Einstellung dieser Belichtungszeit und Verwendung eines Blitzes erhält man ein vollständig belichtetes Foto, da der Lichtblitz des Blitzgerätes, der deutlich kürzer ist als die Belichtungszeit, den kompletten Sensor erreicht. Bei Einstellung einer kürzeren Belichtungszeit als der Blitzsynchronzeit ist ein Teil des Fotos unbelichtet, da der zweite Verschlussvorhang einen Teil des Sensors verdeckt (Banek & Banek, 2013, Sänger & Sänger, 2018). Diese Problematik ist für den Schlitzverschluss und den „Hybrid-Verschluss“ relevant und wird in Abbildung 5 demonstriert. Das gezeigte Foto wurde mit der Kamera „Sony α 7R III“ und einer Belichtungszeit von $1/400$ s aufgenommen. Die Blitzsynchronisationszeit dieser Kamera beträgt $1/250$ s (Sänger & Sänger, 2018). Der zweite Verschlussvorhang ist deshalb als schwarzer Balken in der oberen Bildhälfte zu erkennen.

Um auch bei kürzeren Verschlusszeiten blitzen zu können, ermöglichen einige Modelle von Blitzgeräten die sogenannte Kurzzeitsynchronisation. Hierbei gibt der Blitz während der gesamten Verschlusszeit sehr kurze Lichtblitze ab. Dies ist mit dem bloßen Auge nicht sichtbar. Die Kurzzeitsynchronisation verbraucht viel Energie, sodass sich die Reichweite des Blitzes deutlich verkürzt und das Motiv eventuell nicht ausreichend ausgeleuchtet wird (Sänger & Sänger, 2018).

Bei Einstellung eines vollständig elektronischen Verschlusses ist oftmals keine Verwendung eines Blitzes möglich und der Blitz wird herstellerbedingt bei Aktivierung der „Geräuschlosen Aufnahme“ deaktiviert. Dies hängt mit dem zeilenweisen Ablesen des Sensors zusammen (Sänger & Sänger, 2018, Thoma, 2022).

Je nach Aufnahmesituation ist demnach ein unterschiedlicher Verschlusstyp am besten geeignet. Wie beschrieben bietet eine DSLM-Kamera die Möglichkeit zwischen allen drei Varianten zu wählen.

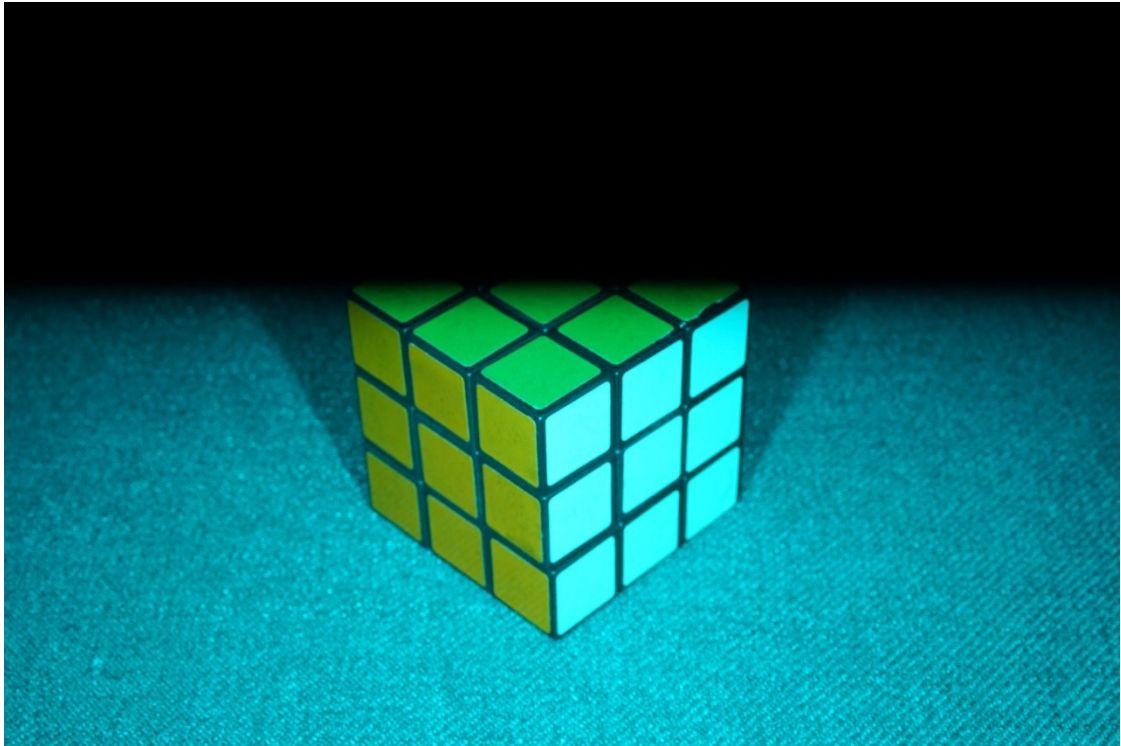


Abbildung 5: Der zweite Verschlussvorhang verhindert eine vollständige Belichtung des Bildsensors, wenn die eingestellte Belichtungszeit kürzer ist als die Blitzsynchronisationszeit bei einer Fotografie mit Blitzgerät. (Svenja Maier, 2022)

4.2.2.2. Filtereinheiten vor dem Bildsensor

Vor dem Bildsensor sind verschiedene Filtereinheiten platziert, die für die störungsfreie Funktion des Sensors und für die korrekte Bildwiedergabe erforderlich sind. Hier gibt es Variationen je nach Kamerahersteller (Davies, 2017).

Der Staubreduktions-Filter vibriert beim Ein- oder Ausschalten der Kamera und hält dadurch die Sensoroberfläche staubfrei (Davies, 2017).

Der Hotmirrorfilter sperrt die UV- und IR-Strahlung zu großen Teilen, sodass hauptsächlich Strahlung des visuellen Spektralbereichs auf den Sensor gelangt (Klein, 2020, Mangold, 2015, Lamprecht, o. D.). Dieser Sperrfilter ist erforderlich, da der Bildsensor einer modernen Digitalkamera für den Spektralbereich von etwa 350 bis 1200 nm empfindlich ist und somit auch Anteile des UV- und des nahen IR-Bereichs erfassen kann (Davies, 2017, Lamprecht, o. D.). Ohne den Hotmirrorfilter würde man ein Foto mit Farbstich und Unschärfe erhalten (Hennemann, 2020, Lamprecht, o. D.).

Dies ist in Abbildung 3a ersichtlich.

Bei fein strukturierten Motiven, die von der Kamera gerade noch aufgelöst werden können, kann es zur Entstehung eines wellenartigen Störmusters, dem sogenannten Moiré-Muster, kommen. Ein klassisches Beispiel zum Auftreten des Moiré-Musters ist die Modofotografie mit fein strukturierten Stoffen. Als Abhilfe gegen diesen Bildfehler ist in vielen Kameras ein Tiefpassfilter oder Antialiasing-Filter verbaut. Dieser wirkt wie ein Weichzeichner, wodurch als nachteiliger Begleiteffekt die Auflösung verringert wird. Aus diesem Grund verzichten manche Hersteller auf den Tiefpassfilter (Banek & Banek, 2013).

4.2.2.3. Bildsensor

Der Bildsensor befindet sich in der Bildebene der Kamera und besteht aus einem Raster aus mehreren Millionen lichtsensitiver Dioden, den Pixel (Davies, 2017). Der lichtempfindliche Bereich besteht in den heutigen Sensoren zumeist aus Silizium (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Jedes Pixel ist von einer Mikrolinse bedeckt, wodurch das Licht auf das jeweilige Pixel fokussiert wird und so dessen Sensitivität deutlich erhöht wird (Davies, 2017). Pixel können nur Helligkeitswerte erfassen und keine Wellenlängen. Ohne eine weitere Modifikation würde somit ein monochromes Bild entstehen. Um ein farbiges Bild zu erhalten, wurde die sogenannte Bayer-Matrix entwickelt, die der Pixelebene aufliegt, sodass die Strahlung nach Passage der Mikrolinse zuerst auf die Bayer-Matrix trifft und anschließend auf das Pixel bzw. die zugehörige Verdrahtung. Die Bayer-Matrix besteht aus einzelnen CFA-Farbfilmern (Color Filter Array), von denen sich jeweils einer auf einem Pixel befindet. Die CFA-Farbfilmern gibt es in den Farben Rot, Grün und Blau. Ein roter CFA-Farbfilmern lässt den roten Bereich des sichtbaren Spektrums passieren, die anderen Typen ihr Spektrum in entsprechender Weise. Die Anordnung der Filter erfolgt in 4er-Gruppen bestehend aus einem roten, einem blauen und zwei grünen CFA-Filmern. Diese Anordnung bezeichnet man als Bayer-Array (Davies, 2017, Lamprecht, o. D.). Die Bayer-Matrix besitzt doppelt so viele grüne Farbfilmern wie blaue und rote. Der Grund hierfür ist eine Bauweise in Anlehnung an die Farbwahrnehmung des menschlichen Auges, das die höchste Empfindlichkeit für den grünen Spektralbereich besitzt (siehe Kapitel II. 1.2.1.) (Davies, 2017). Aufgrund der Bayer-Matrix gelangt demnach nur ein

bestimmter Wellenlängenbereich auf ein Pixel. Das Pixel erfasst die Lichtintensität dieses Wellenlängenbereichs und wandelt diese in ein elektrisches Signal um. Die endgültige Farbe eines Pixels ergibt sich schließlich durch einen Interpolationsprozess mit benachbarten Pixeln, den man als Bayer-Demosaicing bezeichnet (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Davies, 2017).

Je nach Bauweise des Sensors befindet sich die Fotodiode oberhalb oder unterhalb einer Schicht zur Verdrahtung der Fotodioden. Bei FSI-Sensoren (Front Side Illumination) befindet sich die Diode unterhalb der Verdrahtung, sodass die Strahlung nach Passage der CFA-Filter noch die Schicht der Verdrahtung durchqueren muss. Bei BSI-Sensoren (Back Side Illumination) erreicht das Licht direkt die lichtempfindliche Fläche der Fotodiode. BSI-Sensoren haben eine deutlich höhere Sensitivität als FSI-Sensoren (*Grundlagenwissen: Bildsensoren von Digitalkameras*, 2018).

Die Gesamtzahl der Pixel auf dem Bildsensor hat neben weiteren Faktoren einen Einfluss auf die mögliche Auflösung des Fotos (Haarmeyer & Westphalen, 2010). Für die Bildqualität (siehe Kapitel II. 9.) entscheidender ist jedoch die Größe der einzelnen Pixel und die Größe des Bildsensors. Je größer ein Pixel ist, desto lichtempfindlicher ist es und desto weniger müssen dessen Signale bei schwachen Lichtverhältnissen verstärkt werden (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Gängige Sensorgrößen, die in modernen Digitalkameras eingesetzt werden, sind der Vollformatsensor mit 36 x 24 mm, der APS-C-Sensor (Advanced Photo System Classic) mit 22,3 x 14,9 mm bis 23,6 x 15,7 mm und der Micro-Four-Thirds-Sensor mit 17,3 x 13 mm (Davies, 2017, *Grundlagenwissen: Bildsensoren von Digitalkameras*, 2018). Der Begriff Vollformatsensor bezieht sich darauf, dass die Größe dieses Sensortyps der Größe des Negativs aus der Analogfotografie entspricht (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Verwendet man eine Kamera mit einem Sensor, der kleiner ist als ein Vollformatsensor, so ist der sogenannte Crop-Faktor zu beachten. Mit diesem Faktor berechnet man die effektive Brennweite des verwendeten Objektivs. Die angegebene Brennweite eines Objektivs bezieht sich auf dessen Verwendung mit einem Vollformatsensor, sodass bei einem kleineren Sensor der Crop-Faktor oder Vergrößerungsfaktor miteinbezogen werden muss. Ein APS-C-Sensor hat einen Crop-Faktor von 1,6, da die Sensorfläche um ca. 1,6 kleiner ist als die des Vollformatsensors. Ein Objektiv mit einer angegebenen Brennweite von z. B. 100 mm hat dadurch bei einer Kamera mit APS-C-Sensor die

gleiche Wirkung wie ein Objektiv mit einer Brennweite von 160 mm bei einer Vollformatkamera (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Davies, 2017).

Die technische Weiterentwicklung im Bereich der Bildsensoren ist rasant. In heutigen Digitalkameras werden vor allem sogenannte CMOS-Sensoren (Complementary Metal-Oxid Semiconductor) verwendet, deren Qualität sich in den letzten Jahren stark verbessert hat und die deshalb die sogenannten CCD-Sensoren (Charge Coupled Device) zunehmend verdrängt haben. Diese Sensortypen unterscheiden sich in der Technik zur Signalumwandlung (*Grundlagenwissen: Bildsensoren von Digitalkameras*, 2018).

5. Kameraumbau

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie eine digitale Kamera zur IR-Kamera umfunktioniert werden kann. Grundsätzlich unterscheidet man einen definierten und einen undefinierten Kameraumbau. Der Begriff „definiert“ bezieht sich hierbei auf die Art des IR-Filters (siehe Kapitel I. 5.3.) bzw. auf das Vorhandensein oder Fehlen eines IR-Filters vor dem Kamerasensor (Mangold, 2015).

5.1. Erforderlichkeit des Kameraumbaus

Aufgrund des in der Kamera verbauten Hotmirrorfilters wird ein großer Teil der IR-Strahlung bereits vor Erreichen des Sensors aus dem elektromagnetischen Spektrum entfernt. Das Ausmaß des entfernten IR-Anteils hängt von der Qualität des Hotmirrorfilters ab, sodass in neueren Kameras kaum noch IR-Strahlung den Sensor erreicht (Mangold, 2015, Lamprecht, o. D.).

Mit einem älteren Kameramodell, bei dem noch ein gewisser Anteil der IR-Strahlung den Sensor erreicht, kann die IR-Fotografie auch ohne einen Umbau gelingen. Hierzu muss ein spezieller IR-Schraubfilter vor das Objektiv angebracht werden, der nur Strahlung im IR-Bereich durchlässt. Um hierbei eine ausreichende Belichtung zu erreichen, sind jedoch Verschlusszeiten im Sekundenbereich erforderlich. Entsprechend benötigt man ein Stativ und ein unbewegliches Motiv, um verwacklungsfreie

Aufnahmen zu erzeugen. Die Bildqualität ist dennoch nicht vergleichbar mit dem Ergebnis, das mit einer umgebauten Kamera erreicht werden kann. Zudem ist die Auswahl an geeigneten Aufnahmesituationen sehr eingeschränkt (Mangold, 2015, Lamprecht, o. D.).

Um kurze Belichtungszeiten zu erreichen und somit verwacklungsfreie Fotos bei sich bewegenden Motiven und der Haltung der Kamera in der Hand, ist es erforderlich das komplette Spektrum und die komplette Intensität der Strahlung des nahen IR-Bereichs zu nutzen. Dies gelingt nur mit einer Entfernung des Hotmirrorfilters (Mangold, 2015).

5.2. Durchführung des Kameraumbaus

Es gibt in Deutschland verschiedene professionelle Anbieter, die einen solchen Kameraumbau durchführen (Mangold, 2015). Im Internet finden sich weiterhin auch Anleitungen zum selbstständigen Durchführen eines Umbaus. Hiervon ist jedoch dringend abzuraten, da der Umbau sehr komplex ist und ein großes Risiko für eine Beschädigung der Kamera besteht (Mangold, 2015, Davies, 2017).

Bei der Konvertierung einer Digitalkamera zur IR-Kamera, wird der Hotmirrorfilter entfernt und je nach Art des Umbaus durch ein anderes Bauteil ersetzt. Bei DSLR-Kameras ist zudem auch eine Kalibrierung des Autofokus auf IR-Strahlung erforderlich (Mangold, 2015, Davies, 2017, Lamprecht, o. D.).

5.2.1. Definierter Kameraumbau

Bei einem definierten Umbau wird der Hotmirrorfilter entfernt und an dessen Stelle ein neuer Filter eingesetzt. Die Kamera wird dadurch auf diesen speziellen Filter neu definiert. Für die IR-Fotografie könnte man beispielsweise einen Filter einsetzen, der nur elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge von über 700 nm durchlässt (Mangold, 2015, Davies, 2017).

Ein Vorteil dieser Art des Kameraumbaus ist es, dass man ohne weiteres Equipment, wie Schraubfilter und Adapterringe, alle vorhandenen Objektive für diese Kamera weiterhin einsetzen kann (Davies, 2017).

Bei DSLR-Kameras ist der definierte Umbau vorteilhaft, da man so den optischen

Sucher weiterhin verwenden kann. Der eingesetzte Filter befindet sich schließlich hinter dem Spiegel und hat somit keinen Einfluss auf den Strahlengang im optischen Sucher. Für eine ältere DSLR-Kamera ohne Live-View-Funktion ist somit der definierte Umbau die einzige Lösung, um ein Bild im Sucher sehen zu können (Mangold, 2015).

Der offensichtliche Nachteil dieser Art des Kameraumbaus ist die Festlegung der Kamera auf den durch den eingesetzten Filter vorgegebenen Wellenlängenbereich. Die einzige Modifikation, die hierbei noch vorgenommen werden kann, ist eine weitere Einschränkung des durchgelassenen Wellenlängenbereichs durch einen vor dem Objektiv befestigten Schraubfilter (Mangold, 2015, Lamprecht, o. D.).

5.2.2. undefinierter Kameraumbau

Im Rahmen eines undefinierten Kameraumbaus wird der Hotmirrorfilter entfernt und an dessen Stelle ein Quarzglas-Filter eingesetzt. Dieser Filter lässt das elektromagnetische Spektrum vom UV- bis zum IR-Bereich durch und erfüllt die Funktion eines Platzhalters, der die korrekte räumliche Anordnung und die Abstände der Bauteile in der Kamera aufrechterhält (Davies, 2017). Die Kamera verbleibt somit undefiniert und kann in diesem Zustand Strahlung vom UV- bis zum nahen IR-Bereich abbilden (Mangold, 2015).

Eine undefinierte Kamera kann durch das Anbringen verschiedener Schraubfilter vor dem Objektiv in unterschiedlicher Weise neu definiert werden. So kann die gleiche Kamera beispielsweise als UV-Kamera, als Kamera für das visuelle Spektrum oder als IR-Kamera eingesetzt werden. Dieser vielfältige Einsatz ist der Hauptvorteil im Vergleich zum definierten Kameraumbau (Mangold, 2015, Lamprecht, o. D.).

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, kann der optische Sucher einer DSLR-Kamera bei Anbringen eines IR-Schraubfilters am Objektiv nicht mehr verwendet werden. Das Vorhandensein des LiveView-Modus ist also eine Voraussetzung für den undefinierten Umbau einer DSLR-Kamera. Eine DSLM-Kamera kann weiterhin uneingeschränkt eingesetzt werden (Mangold, 2015, Klein, 2020, Lamprecht, o. D.).

Als Nachteil des undefinierten Umbaus kann gesehen werden, dass man bei Nutzung verschiedener Objektive, je nach deren Durchmesser, die gleichen Filtertypen gegebenenfalls mehrfach in verschiedenen Größen anschaffen muss oder dass man sich

mit entsprechenden Adapterringen behelfen muss. Somit können die Materialkosten etwas höher sein und die Nutzung des Equipments etwas umständlicher (Mangold, 2015).

5.3. IR-Filter

Ein optischer Filter lässt bestimmte Wellenlängenbereiche des elektromagnetischen Spektrums passieren und absorbiert oder reflektiert unerwünschte Wellenlängenbereiche. Das Hindurchtreten der Strahlung durch den Filter bezeichnet man als Transmission (Davies, 2017).

Mithilfe der Transmissionskurve, die im Produktdatenblatt des Filters zu finden ist, kann ein Filter näher charakterisiert werden. Transmissionskurven werden durch den Einsatz eines Spektrophotometers erzeugt und stellen auf der X-Achse die Wellenlänge, beginnend bei einer kurzen Wellenlänge, und auf der Y-Achse in der Regel die prozentuale Transmission dar (Davies, 2017).

Bei IR-Filtern handelt es sich um sogenannte Cut-on-Filter oder Longpass-Filter. Damit ist gemeint, dass die Transmissionskurve einen Übergang aufweist von einem Bereich mit keiner oder nur sehr geringer Transmission zu einem Bereich von hoher Transmission. Dieser Wechsel findet je nach Filter bei einer unterschiedlichen Wellenlänge im Bereich zwischen dem noch sichtbaren roten Anteil des visuellen Spektrums und dem nahen IR-Bereich statt. Es gibt keinen Industrie-Standard für die Angabe dieses Wertes bei IR-Filtern. Einige Hersteller geben beispielsweise die Wellenlänge an, bei der die Transmission 50 % beträgt. Solche Filter lassen entsprechend auch kürzere Wellenlängen als den angegebenen Wert zu einem geringen Anteil durch. Andere Hersteller geben stattdessen die Wellenlänge an, bei der die Transmission 0 % oder 5 % beträgt. Um Klarheit hierüber zu erhalten, sollte man die Transmissionskurve im Produktdatenblatt des Filters einsehen (Davies, 2017).

Gängige Filter für die IR-Fotografie sind der 550-nm-, der 630-nm-, der 700-nm-, der 720-nm- und der 830-nm-Filter. Auch andere Typen sind verfügbar (Lamprecht, o. D.).

Bei Filtern deren Transmissionskurve schon im sichtbaren Rotbereich beginnt, erhält man einen Farbakzent im Foto. Man spricht deshalb von „Farb-IR-Fotografie“. Bei Verwendung des 550-nm-Filters, beispielsweise, stellt sich Blattgrün in intensiven

Rottönen dar (Mangold, 2015).

Je höher die angegebene Nanometer-Zahl auf dem Filter ist, desto schwächer wird die Sättigung der im Bild zu sehenden Farben. Bei dem 830-nm-Filter erhält man ein monochromes Bild, wie es typisch ist für die klassische „Schwarz-Weiß-IR-Fotografie“. Diese Bilder zeichnen sich durch einen starken Kontrast aus, dies geht jedoch auf Kosten der für die Belichtung zur Verfügung stehenden Strahlungsmenge (Mangold, 2015, Lamprecht, o. D.).

.

5.4 IR-Strahlung und der Bildsensor

Der Bildsensor verändert sich nicht durch den Kameraumbau. Die CFA-Farbfiler der Bayer-Matrix erlauben, wie in Kapitel II. 4.2.2.3. beschrieben, jeweils die Transmission der Wellenlängenbereiche Grün, Rot oder Blau. Zudem sind alle drei CFA-Filertypen für IR-Strahlung durchlässig (Mangold, 2015).

Vereinfacht dargestellt erhält man bei einem IR-Filter, der das visuelle Spektrum komplett blockiert, ein monochromes Bild, da alle Pixel gleichermaßen belichtet werden. Bei IR-Filtern, die noch einen Teil des visuellen Spektrums durchlassen, werden die Pixel mit roten und grünen CFA-Filtern stärker aktiviert, sodass das Bild einen entsprechenden Farbstich erhält (Mangold, 2015).

6. Kameraeinstellungen

Um das bestmögliche Bildergebnis zu erreichen, ist es erforderlich die Kamera der jeweiligen Aufnahmesituation entsprechend einzustellen. In diesem Kapitel soll auf die wichtigsten Kameraeinstellungen sowie auf spezielle Aspekte der IR-Fotografie eingegangen werden.

6.1. Einzelparameter zur Einstellung der Belichtung

Die Belichtungszeit, der Blendenwert und die ISO-Einstellung bestimmen in Kombination die Bildhelligkeit (Hennemann, 2010).

6.1.1. Belichtungszeit

Die Belichtungszeit oder Verschlusszeit, ist die Zeitspanne, in der die Verschlusslamellen geöffnet sind und Strahlung auf den Sensor trifft (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Hennemann, 2010).

Bei gleichbleibender Blendeneinstellung gilt, dass sich von Stufe zu Stufe der Einstellung die auf den Sensor treffende Strahlungsmenge verdoppelt bzw. halbiert. Wechselt man zum Beispiel von einer Belichtungszeit von $1/125$ s zu einer Belichtungszeit von $1/250$ s so halbiert sich die auf den Sensor eintreffende Strahlungsmenge (Hennemann, 2010).

Als Grenze zum verwacklungsfreien Fotografieren aus der Hand wird oftmals als Faustregel der Kehrwert der Brennweite des Objektivs angegeben. Für ein 60-mm-Objektiv wäre die maximale Belichtungszeit zum Fotografieren aus der Hand demnach $1/60$ s. Dieser Wert bezieht sich auf Motive, die sich nicht bewegen. Um Bewegungen einzufrieren, sind deutlich kürzere Belichtungszeiten erforderlich. Zur Fotografie in der Dunkelheit sind Belichtungszeiten von mehreren Sekunden bis in den Minutenbereich die Regel. Hierfür ist ein Stativ erforderlich (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

6.1.2. Blendenwert

Die Blende befindet sich im Objektiv und besteht aus Lamellen, die fächerförmig übereinander liegen. Je nach Stellung der Lamellen ergibt sich dadurch eine größere oder kleinere Öffnung. Die Blende wird durch die Wahl des Blendenwerts in den Kameraeinstellungen elektronisch gesteuert (Hennemann, 2010). Welche Blendenwerte möglich sind, hängt von dem verwendeten Objektiv ab (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Der Blendenwert ergibt sich aus dem Verhältnis der Brennweite des Objektivs zum Durchmesser der Blendenöffnung in Millimetern (Hennemann, 2010). Würde man bei einem 100-mm-Objektiv einen Blendenwert von 8 einstellen, so hätte die Blendenöffnung einen Durchmesser von 12,5 mm. Würde man bei gleichem Objektiv einen Blendenwert von 4 einstellen, so hätte die Blendenöffnung einen Durchmesser von 25 mm. Aus diesem Beispiel wird ersichtlich, dass ein kleiner Blendenwert einer

großen Blendenöffnung entspricht und dass je größer der Blendenwert gewählt wird, desto enger die Blendenöffnung wird (Hennemann, 2010).

Wie für die Belichtungszeit, so gilt auch für den Blendenwert, dass sich die auf den Sensor treffende Strahlungsmenge von Stufe zu Stufe verdoppelt bzw. halbiert (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Hennemann, 2010).

Der eingestellte Blendenwert ist nicht nur für die einfallende Strahlungsmenge, sondern auch für die Schärfentiefe (vgl. Kap. 9) des Fotos relevant. Bei einem hohen Blendenwert, wie zum Beispiel 16, besitzt die Blende eine kleine Öffnung und das Foto hat eine hohe Schärfentiefe. Eine hohe Schärfentiefe bedeutet, dass Vordergrund und Hintergrund scharf abgebildet sind. Dies ist besonders bei Landschaftsaufnahmen erwünscht. Bei einem kleinen Blendenwert, wie zum Beispiel 4, besitzt die Blende demgegenüber eine große Öffnung und das Foto zeigt eine geringe Schärfentiefe. Dies ist unter anderem bei Portraitaufnahmen und Makroaufnahmen sinnvoll, um das Motiv scharf abzubilden und den Hintergrund unscharf (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Hennemann, 2010).

6.1.3. Lichtempfindlichkeit oder ISO-Wert

Der ISO-Wert bestimmt die Lichtempfindlichkeit des Bildsensors. Eine Verdopplung des ISO-Wertes bewirkt eine Verdopplung der Lichtempfindlichkeit des Bildsensors. Für das Fotografieren bei Tageslicht ist ein ISO-Wert von 100 ein geeigneter Standardwert (Hennemann, 2010).

Um die Lichtempfindlichkeit zu erhöhen, kommt es zu einer Verstärkung der Signale des Bildsensors, damit kommt es jedoch auch zu einer Verstärkung von Störsignalen. Den durch einen hohen ISO-Wert bedingten Bildfehler bezeichnet man als Bildrauschen. Je kleiner der Bildsensor, desto kleiner sind die einzelnen Pixel, und desto schneller kommt es bei einer Erhöhung des ISO-Werts zum Auftreten von Bildrauschen (Hennemann, 2010). Das Bildrauschen zeigt sich durch eine verstärkte Körnung im Foto (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

6.1.4. Zusammenspiel von Belichtungszeit, Blende und ISO-Wert

Verschiedene Kombinationen an Belichtungszeit, Blende und ISO-Wert können die

gleiche Bildhelligkeit erreichen. Jedoch unterscheiden sich diese Kombinationen je nach Einstellung deutlich in ihrer Bildwirkung (Hennemann, 2010).

Kriterien, um eine passende Belichtungszeit auszuwählen, sind die Schnelligkeit der Bewegung des Motivs, die Umgebungshelligkeit und ob spezielle Effekte, wie Bewegungsunschärfe, erzeugt werden sollen. Für die Auswahl eines passenden Blendenwerts ist neben der Umgebungshelligkeit vor allem die erwünschte Schärfentiefe relevant (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Für die bestmögliche Bildqualität ist es sinnvoll, zunächst die Möglichkeiten, die durch die Einstellung von Belichtungszeit und Blende gegeben sind, auszuschöpfen, und erst im Anschluss den ISO-Wert zu erhöhen (Hennemann, 2010). Eine solche Situation ist zum Beispiel die Fotografie eines sich bewegenden Motivs bei geringer Umgebungshelligkeit und ohne die Möglichkeit ein Blitzlicht einzusetzen. In diesem Fall kann die Belichtungszeit nur so lang gewählt werden, dass keine unerwünschte Bewegungsunschärfe entsteht. Durch ein Weitstellen der Blende kann die Bildhelligkeit noch erhöht werden. Dies reicht in der beschriebenen Situation jedoch oftmals nicht aus, sodass nur eine Erhöhung des ISO-Werts eine Unterbelichtung verhindert (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

6.2. Weitere wichtige Einzelparameter der Kameraeinstellung

6.2.1. Weißabgleich

Die Funktion des Weißabgleichs ist es, die Farben im Foto, unabhängig von der Lichtquelle, korrekt wiederzugeben (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Um verschiedenen Lichtquellen einen Zahlenwert zuzuordnen, wurde die sogenannte Farbtemperatur eingeführt. Diese bezieht sich auf die Strahlung, die ein fiktiver schwarzer Körper bei der entsprechenden Temperatur abgeben würde und wird in der Einheit Kelvin (K) angegeben. Ein solcher Körper würde bei etwa 3000 K ein orange-gelbliches Licht abgeben, wie dies beim Sonnenaufgang und Sonnenuntergang zu finden ist. Bei etwa 5200 K würde der schwarze Körper farblose Strahlung abgeben. Dieser Wert ist dem Tageslicht zugeordnet (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Für die Fotografie mit visuellem Spektrum eignet sich der automatische Weißabgleich

der Kamera in der Regel sehr gut und liefert bei vielen Lichtsituationen eine korrekte Farbwiedergabe. Für spezielle, sich nicht ändernde Lichtverhältnisse kann alternativ auch ein jeweils dafür vorhandener, spezieller Weißabgleich im Kameramenu eingestellt werden. Beispielsweise gibt es je nach Kameramodell Voreinstellungen für Kerzenlicht, Kunstlicht, Tageslicht, bewölkten Himmel und weitere (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Davies, 2017). Weiterhin gibt es auch die Möglichkeit den Weißabgleich für eine bestimmte Situation manuell einzustellen. Hierzu muss eine weiße Referenzfläche oder eine Graukarte fotografiert werden, anhand derer die Kamera die Farbtemperatur ermittelt (Haarmeyer & Westphalen, 2010, McMullen et al., 2021).

Bei der IR-Fotografie funktioniert der automatische Weißabgleich der meisten Kameras nicht korrekt und die Fotos erscheinen mit einem violett bis rötlichen Farbstich. In diesen Fällen ist es erforderlich, einen manuellen Weißabgleich in der Kamera vorzunehmen. Dieser bleibt dann für alle aufgenommenen IR-Fotos voreingestellt und es entfällt bei den meisten Kameramodellen eine sonst erforderliche Nachbearbeitung der Fotos. Für viele Motive in der IR-Fotografie eignet sich grünes Gras als Referenzfläche zur Einstellung des manuellen Weißabgleichs (Davies, 2017).

6.2.2. Fokussierung

Im Gegensatz zur Belichtung und Farbwiedergabe kann die Fokussierung, also die eingestellte Schärfebene, im Nachhinein nicht mehr korrigiert werden (Haarmeyer & Westphalen, 2010). Im Rahmen der Fokussierung werden die Linsensysteme im Objektiv so bewegt, dass eine Ebene im Bild scharf gestellt wird. Je geringer die Schärfentiefe (vgl. Kapitel II. 9.3.) gewählt wird, desto exakter sollte diese Schärfebene eingestellt werden (Banek & Banek, 2013).

An vielen Objektiven findet man seitlich einen Schalter, um zwischen einer manuellen Scharfstellung und dem Autofokus wählen zu können (Hennemann, 2010, Banek & Banek, 2013).

Die manuelle Fokussierung eignet sich besonders für Motive mit einer wenig strukturierten Oberfläche, für die Makrofotografie und für Aufnahmen mit einem Stativ. In den genannten Situationen stößt der Autofokus mitunter an seine Grenzen (Banek & Banek, 2013). Für viele weitere Aufnahmesituationen liefert der Autofokus jedoch sehr gute Ergebnisse und ermöglicht eine hohe Geschwindigkeit beim Scharfstellen

(Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Je nach Kameramodell funktioniert das Scharfstellen des Autofokus auf unterschiedliche Weise. Weiterhin gibt es verschiedene Einstellungen zur Autofokus-Steuerung, die innerhalb der Kameraeinstellungen getroffen werden können (Banek & Banek, 2013).

Man unterscheidet das Prinzip des Phasendetektionsautofokus und des Kontrastautofokus zur Scharfstellung eines Motivs. Diese Verfahren werden kontinuierlich weiter entwickelt und es gibt mittlerweile auch Hybrid-Varianten, mit dem Ziel, die Vorteile beider Verfahren zu kombinieren (Banek & Banek, 2013).

Beim Phasendetektionsautofokus wird der Schärfepunkt durch ein Zusammenspiel mehrerer speziell hierfür vorhandener Sensoren ermittelt. Diese Sensoren erhalten einen Teil der Strahlung aus dem durch das Objektiv eintreffenden Strahlenbündel. Durch einen jeweils unterschiedlichen Blickwinkel auf das Motiv kann der Schärfepunkt durch die Abweichung der Einzelbilder errechnet werden (Haarmeyer & Westphalen, 2010). Der Phasendetektionsautofokus benötigt nur eine Messung, um die Entfernung zu ermitteln und ist deshalb besonders schnell und eignet sich gut für Actionfotos und das Nachverfolgen von sich bewegenden Motiven. Er ist jedoch in manchen Aufnahmesituationen ungenauer als der Kontrastautofokus. Den Phasendetektionsautofokus findet man unter anderem bei DSLR-Kameras bei Verwendung des optischen Suchers (Banek & Banek, 2013).

Der Kontrastautofokus funktioniert nach dem Prinzip, dass ein Motiv bei scharfer Fokussierung den höchsten Kontrast aufweist. Die Fokussierung wird durch den Kontrastautofokus im Sinne einer Messreihe so lange überprüft, bis das Motiv den größtmöglichen Kontrast erreicht hat (Haarmeyer & Westphalen, 2010). Hierzu sind mindestens zwei Messungen erforderlich. Die Daten werden dabei direkt vom Bildsensor übernommen, sodass im Vergleich zum Phasendetektionsautofokus mehr Informationen vorliegen und der Schärfepunkt präziser ermittelt werden kann, jedoch auch mehr Rechenleistung erbracht werden muss (Banek & Banek, 2013). Durch die enorme technische Weiterentwicklung hat die Geschwindigkeit des Kontrastautofokus deutlich zugenommen und es gibt mittlerweile auch Kameramodelle, bei denen der Kontrastautofokus schneller ist als der Phasendetektionsautofokus bei der Einstellung des Einzelautofokus (Kirchheim, 2016). Den Kontrastautofokus findet man vor allem bei DSLM-Kameras und bei DSLR-Kameras im LiveView-Modus (Haarmeyer &

Westphalen, 2010).

Bei beiden Autofokus-Typen erfolgt die Scharfstellung über bestimmte im Sucher angezeigte Bildbereiche, die sogenannten Autofokus-Messfelder. Die Messfelder für den Phasendetektionsautofokus sind im Bereich der Bildmitte lokalisiert, wohingegen der Kontrastautofokus die gesamte Bildfläche nutzen kann (Banek & Banek, 2013).

Zur Fokussierung verwendet der Autofokus Motivelemente, die sich in einem aktivierten Autofokus-Messfeld befinden. In der Standardeinstellung wählt der Autofokus die aktivierten Messfelder selbstständig aus. Es gibt jedoch auch die Möglichkeit in der Messfeld-Steuerung die Messfelder manuell vorzugeben, sodass der Fokus in einen bestimmten Bildbereich gelegt werden kann. Bei neueren Kameramodellen geht dies besonders schnell über den Touchscreen des Kameradisplays (Banek & Banek, 2013). Man unterscheidet hierbei die Einzelfeldmessung und die dynamische Mehrfeldmessung. Bei der Einzelfeldmessung wird manuell ein Messfeld ausgewählt und die Kamera fokussiert nur auf ein Objekt in diesem Messfeld. Bei der dynamischen Mehrfeldmessung wird ebenfalls ein Messfeld vorgegeben, jedoch verfolgt der Autofokus das fokussierte Objekt, falls dieses das ursprüngliche Messfeld verlässt und aktiviert dadurch selbstständig weitere Messfelder (Hennemann, 2020).

Innerhalb der Kameraeinstellungen kann zwischen verschiedenen Autofokus-Steuerungen gewählt werden. Bei einem Einzelaufokus stellt die Kamera bei Druck auf den Auslöser bis zum ersten Druckpunkt scharf und behält diese Einstellung solange, bis der Auslöser komplett durchgedrückt oder losgelassen wird, bei. Der Einzelaufokus ist geeignet für statische oder sich nur langsam bewegende Motive. Für sich schneller bewegende Motive eignet sich der kontinuierliche Autofokus. Hierbei fokussiert der Autofokus ständig nach, sobald der erste Druckpunkt gehalten wird. Der kontinuierliche Autofokus ist in der Regel mit einer dynamischen Mehrfeldmessung gekoppelt (Hennemann, 2010).

6.2.3. Grafikdateiformate

Im Kameramenü können verschiedene Dateiformate zum Abspeichern der Fotos gewählt werden. Diese unterscheiden sich in der Dateigröße, der Menge der übermittelten Bildinformationen und den Möglichkeiten zur Nachbearbeitung

(Haarmeyer & Westphalen, 2010).

6.2.3.1. JPEG-Format

Das nach seinen Entwicklern benannte JPEG-Format (Joint Photographic Experts Group) ist ein gängiges Dateiformat für Bilddateien. Durch ein Kompressionsverfahren wird beim Abspeichern eines Bildes die Dateigröße verringert, sodass möglichst viele Bilder auf eine Speicherkarte passen (Hennemann, 2010).

Bei diesem Kompressionsvorgang gehen Bildinformationen verloren, wodurch die Bildqualität und die Möglichkeiten zur Nachbearbeitung reduziert werden (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Hennemann, 2010). Falls man Bilddateien im JPEG-Format speichern möchte, kann hierbei im Kameramenü ein unterschiedliches Maß an Kompression und damit eine unterschiedliche Dateigröße gewählt werden. Je stärker die Kompression, desto verpixelter erscheint das Foto. Dies ist besonders bei einer stärkeren Vergrößerung im Ausgabemedium von Nachteil (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Ein weiterer wichtiger Vorteil des JPEG-Formats, neben dessen reduzierter Dateigröße, ist dessen hohe Kompatibilität mit verschiedenen Software-Programmen und Betriebssystemen (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

6.2.3.2. RAW-Format

Das RAW-Format ist ein kameraspezifisches Format für Rohdaten. Die Bezeichnung kommt von dem englischen Wort „raw“ für „roh“. Im RAW-Format werden die Informationen des Bildsensors verlustfrei gespeichert, sodass eine umfassende Weiterbearbeitung möglich ist. Für die Bearbeitung ist eine spezielle Software, ein sogenannter RAW-Konverter, erforderlich. Am Ende der Bearbeitung kann die Bilddatei in einem anderen Format, zum Beispiel als JPEG-Datei, gespeichert werden, sodass das Bild auch in anderen Software-Programmen geöffnet werden kann (Hennemann, 2010).

Nachteilig am RAW-Format sind die große Dateigröße sowie das zeitintensivere Handling mit einer Bearbeitung im RAW-Konverter und einem Speichern als JPEG-Datei (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Um zwischen den beiden Möglichkeiten, die Bilddatei direkt im JPEG-Format zu nutzen oder zuvor eine Nachbearbeitung im RAW-Konverter durchzuführen, wählen zu können, gibt es auch eine kombinierte Einstellungsmöglichkeit im Kameramenü, bei der das Bild sowohl im JPEG- als auch im RAW-Format gespeichert wird. Dies ist sehr praktikabel, kostet jedoch viel Speicherplatz (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

6.3. Kameramodus

Es gibt verschiedene Kameramodi, die jeweils eine unterschiedliche Zahl an Variablen zur Einstellung ermöglichen bzw. automatisch einstellen (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Sänger & Sänger, 2018).

6.3.1. Automatikmodus und Motivprogramme

Im Automatikmodus passt die Kamera automatisch alle Einstellungen an die entsprechende Belichtungssituation an. Es gibt hierbei keine Möglichkeit zu einer manuellen Einstellung der Kamera, sodass dieser Modus nicht für speziellere Aufnahmesituationen, wie beispielsweise einer längeren Belichtung bei schwachen Lichtverhältnissen, geeignet ist. Der Automatikmodus soll auch Einsteigern ermöglichen in vielen Aufnahmesituationen ein gutes Bildergebnis zu erreichen (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Sänger & Sänger, 2018, McMullen et al., 2021).

Je nach Kameramodell gibt es weiterhin verschiedene Modi mit bestimmten Voreinstellungen für definierte Aufnahmesituationen, wie zum Beispiel Sportaufnahmen, Landschaftsfotografie oder Portraits. Diese Motivprogramme sollen eine vereinfachte Kamerabedienung ermöglichen und bieten ebenfalls kaum individuelle Möglichkeiten zur Kameraeinstellung (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

6.3.2. Kameramodi mit manuellen Einstellungsmöglichkeiten

Die nachfolgend beschriebenen Modi unterscheiden sich hinsichtlich der Einstellungsmöglichkeiten von Blende und Belichtungszeit. Gemeinsam ist ihnen, dass sie weitere manuelle Einstellungsmöglichkeiten bieten, die dem Automatikmodus und den Motivprogrammen fehlen. So können unter anderem der Autofokuspunkt, der ISO-

Wert, der Weißabgleich, der Blitz und die Art der Belichtungsmessung manuell eingestellt werden (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

6.3.2.1. Blendenautomatik oder Zeitpriorität

In diesem Modus kann die Belichtungszeit manuell eingestellt werden und die Kamera stellt automatisch eine dazu passende Blende ein. Geeignet ist dieser Modus besonders für sich bewegende Motive, um mit einer kurzen Belichtungszeit die Bewegung einzufrieren. Weiterhin können hiermit gezielt Wischeffekte bei Bewegungen erzeugt werden (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Sänger & Sänger, 2018, McMullen et al., 2021).

Je nach Kamerahersteller wird dieser Modus anders bezeichnet und abgekürzt. Dies soll hier beispielhaft für die großen Hersteller Canon und Sony gezeigt werden. Bei Canon findet man auf dem Moduswahlrad die Abkürzung „Tv“ für „Time Value“ und der Modus heißt Blendenautomatik (Haarmeyer & Westphalen, 2010). Bei Kameras von Sony zeigt das Moduswahlrad „S“ für „Shutter Priority“ und der Modus heißt Zeitpriorität (Sänger & Sänger, 2018).

6.3.2.2. Zeitautomatik oder Blendenpriorität

In diesem Modus kann der Blendenwert manuell eingestellt werden und die Kamera passt die Belichtungszeit daran an. Geeignet ist dieser Modus, um die Schärfentiefe gezielt zu beeinflussen (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Sänger & Sänger, 2018, McMullen et al., 2021).

Bei Kameras von Canon wird dieser Modus als „Av“ für „Aperture Value“ abgekürzt und als Zeitautomatik bezeichnet (Haarmeyer & Westphalen, 2010). Bei Sony zeigt das Moduswahlrad „A“ für „Aperture“ und man spricht von der Blendenpriorität (Sänger & Sänger, 2018).

6.3.2.3. Manueller Modus

Wie der Name vorgibt, können im manuellen Kameramodus, der auf dem Moduswahlrad der Kamera als „M“ abgekürzt wird, die Blende und Belichtungszeit und

auch sonst alle Parameter manuell eingestellt werden. Dies ermöglicht dem Fotografen speziellen Aufnahmesituationen gerecht zu werden, setzt jedoch fundierte Kenntnisse über die Funktionsweise der Kamera voraus (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Sänger & Sänger, 2018).

7. Objektive

Das Objektiv bildet das fotografierte Objekt auf dem Sensor der Kamera ab. Das Angebot an Objektiven ist sehr groß und es gibt verschiedene Objektivtypen mit unterschiedlichen Leistungsmerkmalen. Ein Überblick hierüber ist erforderlich, um das passende Objektiv für die gewünschte Aufnahmesituation auszuwählen (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Hennemann, 2010).

Bei DSLR- und DSLM-Kameras hat man die Möglichkeit einen Objektivwechsel durchzuführen, wohingegen bei Kompaktkameras das Objektiv fest integriert ist (Hennemann, 2010).

7.1. Eigenschaften von Objektiven

7.1.1. Brennweite und Bildwinkel

Die Brennweite gibt den Abstand vom Brennpunkt, also dem Punkt, in dem alle parallel einfallenden Strahlen gebündelt werden, und der bildseitigen Hauptebene in Millimetern an (Hennemann, 2010).

Um welchen Typ von Objektiv es sich handelt, wird durch dessen Brennweite charakterisiert. Die relevantesten Objektivtypen hinsichtlich dieser Einteilung sind Standardobjektive, Teleobjektive und Weitwinkelobjektive (siehe Kapitel II. 7.2.) (Hennemann, 2010).

Ist das jeweilige Objektiv auf eine bestimmte Brennweite festgelegt, so bezeichnet man dieses Objektiv als Festbrennweite. Besitzt das Objektiv einen Zoomring und kann einen bestimmten Brennweitenbereich abdecken, so handelt es sich um ein

Zoomobjektiv. Man findet also zum Beispiel Weitwinkel-Festbrennweiten und Weitwinkel-Zoomobjektive. In gleicher Weise gilt dies auch für die anderen Objektivtypen (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Die Brennweite ist verantwortlich für den Bildwinkel. Der Bildwinkel ist das kegelförmige Sichtfeld des Objektivs (Banek & Banek, 2013). Mit zunehmender Brennweite verkleinert sich der Bildwinkel, sodass man mit einer langen Brennweite auch ein weit entferntes Motiv bildfüllend abbilden kann. Ein Objektiv mit kurzer Brennweite hat demgegenüber einen großen Bildwinkel und kann somit nah gelegene Motive komplett abbilden (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Wie in Kapitel II. 4.2.2.3. beschrieben, muss der Crop-Faktor je nach Sensorgröße, berücksichtigt werden, um die effektive Brennweite zu berechnen (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

7.1.2. Lichtstärke

Die Lichtstärke eines Objektivs beschreibt die maximale Blendenöffnung in Bezug auf die Brennweite (Banek & Banek, 2013).

Je lichtstärker ein Objektiv ist, desto weiter kann dessen Blende bei der jeweiligen Brennweite geöffnet werden. Ein lichtstarkes Objektiv erreicht bei geringer Umgebungshelligkeit aufgrund der größeren Blendenöffnung einen größeren Strahlungseinfall als ein lichtschwaches Objektiv. So wird in dunklerer Umgebung eine kürzere Belichtungszeit ermöglicht und es können bei abnehmender Helligkeit noch länger verwacklungsfreie Aufnahmen aus der Hand erstellt werden (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Bei Zoomobjektiven kann die Lichtstärke von der eingestellten Brennweite abhängen und somit variabel sein. Entsprechend wird die Lichtstärke bei Zoomobjektiven als Bereich angegeben, beginnend mit der Lichtstärke bei der kleinsten Brennweite bis zur Lichtstärke bei der größten Brennweite. Die Lichtstärke nimmt in einem solchen Fall mit zunehmender Brennweite ab (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Banek & Banek, 2013).

Weiterhin ermöglicht ein lichtstarkes Objektiv auch Aufnahmen mit einer besonders geringen Schärfentiefe, dies ist zum Beispiel bei Portraitaufnahmen erwünscht

(Haarmeyer & Westphalen, 2010, Banek & Banek, 2013).

Je größer die Lichtstärke ist, desto teurer ist zumeist auch der Kaufpreis des Objektivs (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Banek & Banek, 2013).

7.1.3. Mechanische und optische Qualität

Die mechanische und die optische Qualität eines Objektivs beschreiben die Qualität der Bauteile. Die mechanische Qualität bezieht sich zum Beispiel auf die Metall- oder Kunststoffringe, die die Linsen halten, sowie auf die Gewinde, die zur Bewegung der Linsengruppen erforderlich sind. Eine hohe Qualität der Werkstoffe ist erforderlich, um über einen langen Benutzungszeitraum eine exakte Bewegung der Bauteile zu gewährleisten. Die optische Qualität beschreibt demgegenüber die Qualität der verwendeten Gläser und die Konstruktion der Linsen. Die optische Qualität ist unter anderem dafür relevant, dass bestimmte in Objektiven auftretende Abbildungsfehler verhindert werden (Banek & Banek, 2013).

7.1.4. Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen eines Objektivs beschreibt dessen Fähigkeit detaillierte Strukturen trennscharf abzubilden. Ermittelt wird das Auflösungsvermögen durch die Fotografie eines zunehmend feiner werdenden Strichrasters und die Angabe erfolgt in Linien pro Millimeter. Ein Sensor mit einer großen Zahl an Pixeln kann nur ein hochauflösendes Bild erzeugen, wenn auch das Objektiv ein hohes Auflösungsvermögen besitzt (Banek & Banek, 2013).

7.1.5. Bildstabilisator

Viele Objektive besitzen einen integrierten Bildstabilisator, der Verwacklungsunschärfe beim Fotografieren aus der Hand ausgleichen soll. Hierdurch wird die mögliche Belichtungszeit verlängert (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

7.2. Objektivtypen

7.2.1. Standardobjektiv oder Normalobjektiv

Das Standardobjektiv oder Normalobjektiv besitzt eine Brennweite von 50 mm in Bezug auf eine Kamera mit Vollformatsensor. Dies entspricht ungefähr dem Blickwinkel des menschlichen Auges, der etwa 46° beträgt (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Hennemann, 2010, Banek & Banek, 2013).

Häufig eingesetzte Objektive sind Standard-Zoomobjektive, sogenannte Kit-Objektive, mit einem Brennweitenbereich von etwa 18 bis 55 mm, die einen breiten Einsatzbereich vom Weitwinkel bis in den leichten Telebereich besitzen und oft beim Kauf einer Kamera im Zubehör miteinbegriffen sind (Banek & Banek, 2013).

7.2.2. Weitwinkelobjektiv

Objektive mit kleineren Brennweiten als 50 mm, bezogen auf den Vollformatsensor, bezeichnet man als Weitwinkelobjektive, weil der Bildwinkel im Vergleich zum Standardobjektiv vergrößert wird (Hennemann, 2010).

Diese Objektive eignen sich besonders für die Architekturfotografie, die Landschaftsfotografie oder für Aufnahmen in Innenräumen (Hennemann, 2010).

Ein Nachteil bzw. ein spezielles Charakteristikum von Weitwinkelaufnahmen sind perspektivische Verzerrungen, die bei geringem Abstand zum Motiv besonders deutlich werden (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Banek & Banek, 2013).

7.2.3. Teleobjektiv

Objektive mit einer Brennweite von über 50 mm, bei einer Kamera mit Vollformatsensor, bezeichnet man als Teleobjektive. Teleobjektive besitzen einen kleineren Bildwinkel als ein Normalobjektiv und ermöglichen es dadurch weit entfernte Motive formatfüllend abzubilden (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Banek & Banek, 2013).

Teleobjektive mit Brennweiten im Bereich von 70 bis 120 mm eignen sich hervorragend

für die Portraitfotografie, da man einen ausreichenden Abstand zum Motiv einhalten kann, um Verzerrungen zu vermeiden und je nach Einstellung den Effekt eines verschwommenen Hintergrunds erzeugen kann. Super-Teleobjektive mit Brennweiten von über 300 mm werden für weit entfernte Motive eingesetzt, zum Beispiel im Sport oder bei der Fotografie von Tieren in der Wildnis (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

7.2.4. Makroobjektiv

Makroobjektive sind Spezialobjektive, die durch eine Verringerung der Naheinstellgrenze einen sehr geringen Abstand zum Motiv ermöglichen. Die Naheinstellgrenze bezieht sich auf den Abstand der Sensorebene der Kamera zum Motiv. Makroobjektive können einen Abbildungsmaßstab von bis zu 1:1 erreichen. Dies bedeutet, dass ein Objekt in der Größe, die es in der Realität besitzt, auch auf dem Bildsensor abgebildet wird. Es gibt Makroobjektive mit Brennweiten im Bereich von 50 bis 200 mm. Mit zunehmender Brennweite verlängert sich die Naheinstellgrenze (Banek & Banek, 2013).

Makroobjektive eignen sich für die Fotografie kleiner Motive aus der Nähe. Bei einer längeren Brennweite sind sie auch für die Portraitfotografie geeignet (Banek & Banek, 2013).

8. Zusätzliche Strahlungsquellen

Zusätzliche Strahlungsquellen sind erforderlich, wenn die in der Umgebung vorhandene Strahlung nicht ausreicht, um eine ausreichende Belichtung bei der gewünschten Belichtungszeit zu erreichen (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

8.1. Blitzgeräte

Verschiedene Blitzgeräte unterscheiden sich in ihrer Bauweise und in ihrer Leistungsfähigkeit. Entsprechend muss ein für den jeweiligen Einsatzzweck geeignetes Gerät ausgewählt werden (McMullen et al., 2021).

Ein Blitzgerät erzeugt kurze Lichtblitze bei einer Farbtemperatur von etwa 6000 K (McMullen et al., 2021). Ein solcher Lichtblitz hat eine Länge von 1/500 bis 1/40.000 s, ist sehr hell und gerichtet (Banek & Banek, 2013). Die Intensität der Strahlung des Blitzlichts nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab. Demnach erhält ein Motiv in 2 m Entfernung nur ein Viertel der Strahlung, die ein Motiv in einer Entfernung von 1 m erhält. Die Reichweite hinsichtlich einer ausreichenden Beleuchtung des Motivs liegt dementsprechend auch bei leistungsfähigen Blitzgeräten in einem Bereich weniger Meter (Banek & Banek, 2013, McMullen et al., 2021).

Zur genaueren Charakterisierung der Leistungsfähigkeit eines Blitzgeräts gibt es die sogenannte Leitzahl. Diese gibt bezogen auf den jeweiligen Blendenwert an, in welcher Entfernung Motive noch ausreichend belichtet werden können. Die Leitzahl errechnet sich aus dem Produkt des Abstands vom Blitzgerät zum Motiv in Metern und dem Blendenwert. Je größer die Leitzahl ist, desto leistungsfähiger ist das Blitzgerät (Banek & Banek, 2013).

Ein Blitzgerät mit der Leitzahl 30 hat bei einer eingestellten Blende von 4, entsprechend der genannten Formel, eine Reichweite von 7,5 m. Bei einer Blende von 16 beträgt die Reichweite nur noch 1,9 m. Je kleiner die Blendenöffnung bzw. je höher der Blendenwert ist, desto geringer ist die Reichweite eines Blitzlichts. Die Angabe der Leitzahl bezieht sich zumeist auf den ISO-Wert 100 und gibt die Reichweite des Blitzlichts in Metern an bei einer Blendenöffnung von 1. Um verschiedene Blitzgeräte zu vergleichen, muss darauf geachtet werden, dass die angegebenen Leitzahlen auf den gleichen ISO-Wert bezogen sind (Banek & Banek, 2013).

Bei der Fotografie mit einem Blitzgerät ist außerdem zu beachten, dass der minimale Abstand zweier Aufnahmen von der Zeit abhängt, die das Blitzgerät benötigt, um die Kondensatoren wieder aufzuladen und so die Spannung aufzubauen, die erforderlich ist, um die maximale Blitzleistung zu erbringen (Haarmeyer & Westphalen, 2010, McMullen et al., 2021). Der Zeitraum hierfür ist abhängig vom verwendeten Gerät und der eingestellten Leistung (McMullen et al., 2021).

Für die Fotografie mit einem Blitzgerät ist weiterhin die Blitzsynchronzeit (siehe Kapitel II. 4.2.2.1.) relevant. Dies ist die kürzest mögliche Belichtungszeit, um den kompletten Sensor bei voller Blitzleistung gleichmäßig zu belichten (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Sänger & Sänger, 2018). Mit verringerter Reichweite ist bei manchen Modellen an externen Blitzgeräten auch die sogenannte

Kurzzeitsynchronisation möglich (siehe Kapitel II. 4.2.2.1.) (Sänger & Sänger, 2018).

Es gibt verschiedene Typen an Blitzgeräten: den kamerainternen Blitz und verschiedene Varianten an externen Blitzgeräten (McMullen et al., 2021). Der kamerainterne Blitz ermöglicht lediglich eine frontale Belichtung mit harten Schatten und ist besonders bei längeren Objektiven nicht geeignet, da der untere Bildbereich so nicht ausreichend belichtet wird (Haarmeyer & Westphalen, 2010). Externe Blitzgeräte haben zumeist eine deutlich höhere Leistungsfähigkeit als der kamerainterne Blitz und bieten zudem verschiedene manuelle Einstellungsmöglichkeiten. Weiterhin gibt es auch die Möglichkeit verschiedene externe Blitze in Kombination zu nutzen (Haarmeyer & Westphalen, 2010). Profikameras haben oftmals keinen kamerainternen Blitz. Über einen Blitzschuh können Aufsteckblitze unterschiedlicher Leistungsfähigkeit auf der Kamera angebracht werden (Banek & Banek, 2013). Weiterhin können am Filtergewinde des Objektivs sogenannte Ringblitze montiert werden. Diese ermöglichen eine schattenfreie, gleichmäßige Ausleuchtung des Motivs. Es gibt Modelle mit einer rund um das Objektiv verlaufenden durchgehenden Blitzröhre sowie Modelle, die speziellen Makroblitze, mit zwei getrennten Blitzröhren, die links und rechts angeordnet sind und sich individuell einstellen lassen, wodurch das Bild mehr Tiefe erlangt als beim klassischen Ringblitz (Banek & Banek, 2013, McMullen et al., 2021).

Nachteile, die sich beim Einsatz eines Blitzgeräts ergeben können, sind ein ausgeprägter, harter Schatten durch die gerichtete Belichtung, eine Überbelichtung nah gelegener Motive und eine Unterbelichtung weiter entfernt gelegener Motive, eine flächige Wirkung mit Strukturverlust im Bild, der Rote-Augen-Effekt, sowie eine störende Mischlichtsituation bei andersfarbigem Umgebungslicht (Banek & Banek, 2013). Durch die gezielte Auswahl eines passenden Blitzgeräts für die jeweilige Aufnahmesituation, durch die Kombinationen mehrerer Blitzgeräte und durch den Einsatz von zusätzlichem Equipment, wie zum Beispiel einem Diffusor-Aufsatz zur Erzeugung weicheren Lichts, fallen diese Nachteile weniger stark ins Gewicht (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

8.2. Weitere Strahlungsquellen

Dauerlicht sorgt im Gegensatz zu Blitzlicht für eine durchgehende Beleuchtung. Hierdurch kann die Lichtsituation besser eingeschätzt und gesteuert werden. Es gibt

viele verschiedene Arten an Dauerlichtquellen, angefangen bei einfachen Kunstlichtlampen aus dem Alltag bis hin zu teuren Studiobleuchtungsanlagen, die in der Fotografie eingesetzt werden können (Hennemann, 2010).

8.3 Strahlungsquellen für die IR-Fotografie

Das Tageslicht ist sehr variabel hinsichtlich der Qualität und Quantität der enthaltenen IR-Strahlung. Für Aufnahmesituationen, die eine konstante Belichtung erfordern oder wenn nur eine kurze Belichtungszeit zur Verfügung steht, ist das Tageslicht keine geeignete Strahlungsquelle (Davies, 2017).

In diesem Fall gibt es die Möglichkeit Kunstlichtquellen, die Strahlung im nahen IR-Bereich aussenden, als zusätzliche Strahlungsquellen einzusetzen. Blitzgeräte enthalten oftmals Xenon-Röhren, die einen hohen IR-Anteil aussenden und daher sehr gut zur Belichtung von IR-Aufnahmen mit einer kurzen Belichtungszeit geeignet sind. Weiterhin gibt es auch LED-Leuchten (Light-emitting diode), die Strahlung im IR-Bereich aussenden. Halogen-Lampen enthalten ebenfalls einen hohen Anteil an IR-Strahlung, nachteilig ist jedoch deren starke Hitzeentwicklung bei längerem Betrieb (Davies, 2017).

9. Bildqualität

Je nach Art der Fotografie und Zielsetzung gibt es unterschiedliche Kriterien, die herangezogen werden können, um die Bildqualität zu beurteilen bzw. zu definieren. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die relevantesten dieser Kriterien sowie die jeweiligen Einflussgrößen hinsichtlich der Auswahl der Technik oder der Kameraeinstellung.

9.1. Bildausschnitt

Unter dem Bildausschnitt versteht man den Ausschnitt der Realität, der im Foto wiedergegeben wird. Die Zielsetzung ist es, das Motiv in sinnvoller und optisch

ansprechender Weise zu präsentieren. Ein in der Fotografie weit verbreitetes Prinzip ist beispielsweise die Anwendung des Goldenen Schnitts, bei dem Flächen oder Strecken im Bild im Verhältnis von etwa 5:3 aufgeteilt werden, wodurch ein besonders harmonischer Bildeindruck entsteht. Für eine Fotografie zu Dokumentationszwecken oder bei der Produktfotografie sollte das Motiv jedoch ins Zentrum des Bilds gerückt werden und störende Details am Rand oder im Hintergrund, wenn möglich, vermieden werden (Hennemann, 2010).

Der Bildausschnitt wird durch die Nähe des Fotografen zum Motiv und die Brennweite des Objektivs bestimmt. Eine Korrektur des Bildausschnitts kann durch ein Zuschneiden im Rahmen der digitalen Bildnachbearbeitung erfolgen (Hennemann, 2010).

9.2. Perspektive

Die Perspektive beschreibt in der Fotografie die Position des Fotografen in Relation zum Motiv. Bei der Normal- oder Zentralperspektive befinden sich Motiv und Kamera auf gleicher Höhe und das Motiv wird frontal abgebildet. Durch einen Wechsel der Perspektive ergibt sich die Möglichkeit spezielle Details des Motivs verstärkt in den Fokus zu rücken und weitere Elemente des Motivs, die zuvor nicht oder nur eingeschränkt sichtbar waren, darzustellen. Ein Abweichen von der Zentralperspektive führt immer zu einer perspektivischen Verzerrung. Befindet sich die Kamera unterhalb der Höhe des Motivs und wird nach oben ausgerichtet, so spricht man von der Froschperspektive. Das Gegenteil hiervon ist die Vogelperspektive, bei der sich die Kamera oberhalb der Höhe des Motivs befindet und nach unten ausgerichtet wird. Neben diesen drei genannten gängigsten Perspektivtypen kann je nach Motiv jegliche Art von seitlicher oder schräger Position zum Motiv eingenommen werden (Hennemann, 2010, Groer, 2017).

Die Perspektive wird einzig und allein durch die Position des Fotografen im Verhältnis zum Motiv beeinflusst. Eine Veränderung der Brennweite beeinflusst lediglich den Bildausschnitt und hat keinen Einfluss auf die Perspektive (Hennemann, 2010).

9.3. Bildschärfe und Schärfentiefe

Unter der Bildschärfe versteht man die Unterscheidbarkeit von Bilddetails. Die

Schärfeebene oder Fokusebene in einem Bild entspricht der maximalen Schärfe. Die Lage der Schärfeebene hängt von der Einstellung des Entfernungsrings am Objektiv ab. Diese Einstellung kann manuell oder durch den Autofokus vorgenommen werden. Mit zunehmender Entfernung von der Schärfeebene werden die Bilddetails immer unschärfer abgebildet. Aus physikalischer Sicht ist also nur die Schärfeebene selbst vollkommen scharf abgebildet. Das menschliche Auge erkennt jedoch auch Bereiche, die aus physikalischer Sicht nicht vollkommen scharf abgebildet sind, bis zu einem gewissen Ausmaß noch als scharf an. Den Bereich, der durch das menschliche Auge als scharf empfunden wird, bezeichnet man als Schärfentiefe oder Tiefenschärfe (Hennemann, 2010, Banek & Banek, 2013). Im Nahbereich erstreckt sich der Bereich der Schärfentiefe hauptsächlich vor der fokussierten Ebene und weniger dahinter. Je weiter weg jedoch fokussiert wird, desto mehr verlagert sich die Lage des Bereichs der Schärfentiefe hinter die Schärfeebene (Banek & Banek, 2013).

Die Wahl der passenden Schärfentiefe hängt von der Intention des Fotos ab. Eine geringe Schärfentiefe eignet sich beispielsweise, um den Hintergrund bewusst unscharf abzubilden und den Blick des Betrachters auf das Motiv im Vordergrund zu lenken. Dies wird oft in der Portraitfotografie eingesetzt. Eine höhere Schärfentiefe ist erwünscht, wenn das Ziel ist, einen möglichst großen Bereich des Motivs scharf abzubilden. Beispiele hierfür sind die Landschafts- und die Architekturfotografie (Hennemann, 2010).

Die Schärfentiefe eines Fotos wird durch das Objektiv, die Kamera, die Kameraeinstellungen und die Entfernung des Fotografen zum Motiv beeinflusst. Je größer die Brennweite des Objektivs ist, desto geringer wird die Schärfentiefe des Fotos. Eine Kamera mit größerem Sensorformat erzeugt bei sonst gleichen Einstellungen eine geringere Schärfentiefe als eine Kamera mit kleinerem Sensorformat. Bei der Wahl der Kameraeinstellungen ist die Wahl des Blendenwerts entscheidend. Je weiter offen die Blende ist, das heißt, je kleiner der Blendenwert eingestellt ist, desto geringer ist die Schärfentiefe des Fotos. Andersherum entspricht ein hoher Blendenwert einer engen Blendenöffnung und einer höheren Schärfentiefe. Auch durch die Entfernung der Kamera zum Motiv wird die Schärfentiefe beeinflusst. Je näher fokussiert wird, desto geringer wird die Schärfentiefe (Hennemann, 2010).

Es gibt verschiedene mögliche Ursachen für eine fehlende Bildschärfe. Neben einer falschen Fokussierung, einem technischen Defekt, oder einer Verschmutzung der Linse

oder Filter, spielen vor allem die Verwacklungs- und Bewegungsunschärfe eine maßgebliche Rolle (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Bei der Fotografie aus der Hand muss bedacht werden, dass es durch die Eigenbewegung des Körpers des Fotografen stets zu leichten Erschütterungen der Kamera kommt. Wie in Kapitel II. 6.1.1. beschrieben, gilt als Faustregel in der Fotografie, dass die eingestellte Verschlusszeit nicht länger als der Kehrwert der Brennweite des Objektivs sein sollte. Bei längeren Belichtungszeiten als diesem Grenzwert kommt es in der Regel zu einer Verwacklungsunschärfe. Je länger die Brennweite ist, desto kürzer ist die maximale Belichtungszeit zum Fotografieren aus der Hand. Dies liegt daran, dass sich bei einer größeren Brennweite aufgrund des größeren Abbildungsmaßstabs kleinere Verschiebungen in der Kamera deutlicher auswirken (Banek & Banek, 2013).

Bei der Aufnahme von sich bewegenden Motiven muss die Relation von der Geschwindigkeit der Bewegung und der eingestellten Verschlusszeit der Kamera berücksichtigt werden. Neben der Geschwindigkeit des Motivs spielen aber auch Faktoren wie dessen Farben, Umriss oder die Richtung der Bewegung eine Rolle. Ist die Verschlusszeit zu lang eingestellt, so kommt es zur Bewegungsunschärfe im Foto. Es sind dann keine klaren Konturen erkennbar, sondern es entstehen mehrere ineinander übergehende Abbilder des Motivs und damit ein Wischeffekt (Banek & Banek, 2013).

9.4. Auflösung

Es gibt keine einheitliche Definition für den Begriff „Auflösung“ in der Fotografie (Banek & Banek, 2013). In Bezug auf den Kamerasensor und die Datenverarbeitung zur Erzeugung einer Bilddatei, kann die Auflösung als ein Maß für die Dichte der Bildpunkte, der Pixel, und deren Anordnung im zweidimensionalen Bild im Verhältnis von Breite und Höhe beschrieben werden (Hennemann, 2010, Banek & Banek, 2013). In Bezug auf das Objektiv wird die Auflösung als dessen Fähigkeit, kleine Strukturen getrennt voneinander abzubilden, definiert (siehe Kapitel II. 7.1.4.) (Banek & Banek, 2013). Bei der Darstellung eines digitalen Bilds am Monitor oder im Druck beschreibt der Begriff die Verteilung der Bildpunkte auf einer bestimmten Länge des Ausgabemediums. Man spricht hierbei auch von einer relativen Auflösung, die in ppi (pixel per inch) oder dpi (dots per inch) angegeben wird (Haarmeyer & Westphalen,

2010, Hennemann, 2010, Banek & Banek, 2013). Eine gute Auflösung im Ausgabemedium ist erreicht, wenn die Farbübergänge fließend dargestellt werden und keine Abstufungen zu erkennen sind. Je nach Ausgabemedium unterscheidet sich die hierzu erforderliche Zahl an Pixeln pro Fläche (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Eine hohe Auflösung im Hinblick auf den Sensor bzw. die Bilddatei hat den Vorteil, dass nach Zuschnitt des Bildes in vielen Fällen noch eine ausreichende Zahl an Pixeln zur Verfügung steht, um eine gute Auflösung im Ausgabemedium zu erreichen (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

9.5. Belichtung

Eine korrekte Belichtung ist ein wesentliches Kriterium für die Bildqualität. Sowohl eine Über- als auch eine Unterbelichtung führen zu einem Strukturverlust im Foto. Die Helligkeit kann zwar im Rahmen der Nachbearbeitung noch zu einem gewissen Grad angepasst werden, der Qualitätsverlust hinsichtlich der Bildinformation kann jedoch nicht mehr rekonstruiert werden (Sänger & Sänger, 2018).

Grobe Abweichungen der Helligkeit kann der Fotograf auch ohne Hilfsmittel auf dem Kameradisplay erkennen. Liegt jedoch nur eine geringe Abweichung von der korrekten Belichtung vor, so eignet sich das sogenannte Histogramm, das auch als Tonwertkurve bezeichnet wird, als Hilfsmittel zur Beurteilung der Qualität der Belichtung (Hennemann, 2010).

Das Histogramm stellt die Helligkeitsverteilung im Bild graphisch dar. Die x-Achse zeigt die Helligkeitswerte und die y-Achse zeigt die Anzahl der Bildpunkte, die dem entsprechenden Helligkeitswert entsprechen (Hennemann, 2010, Sänger & Sänger, 2018). Dazu wird das Bild in 256 Graustufen umgewandelt, wobei der Wert 0 reinem Schwarz und der Wert 255 reinem Weiß entspricht. Die x-Achse reicht dementsprechend von 0 zu 255 (Haarmeyer & Westphalen, 2010). Pro Foto können vier verschiedene Histogramme angezeigt werden: das Graustufen-Histogramm oder RGB-Histogramm als Mittelwert für alle drei Farbkanäle und jeweils ein eigenes Histogramm für den Rot-, Grün- und Blaukanal (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Hennemann, 2010, Sänger & Sänger, 2018). Bei einer korrekten Belichtung befinden sich keine oder nur eine geringe Zahl an Bildpunkten an der linken und rechten Grenze des Histogramms. Ein zentraler Hügel der Kurve zeigt eine gleichmäßig mittelhelle Aufnahme. Befindet

sich ein Peak an der linken Seite des Histogramms, so ist das Foto unterbelichtet. Ein Peak auf der rechten Seite zeigt eine Überbelichtung an (Sänger & Sänger, 2018).

9.6. Farbwiedergabe

Die korrekte Farbwiedergabe ist ebenfalls ein wichtiges Kriterium für die Bildqualität. Die Farbwiedergabe wird durch den Weißabgleich (siehe Kapitel 6.2.1) geregelt. Bei der Nachbearbeitung kann ein Farbstich notfalls korrigiert werden. Dies ist im RAW-Format verlustfrei möglich (Hennemann, 2010).

III. MATERIAL UND METHODEN

1. Technisches Equipment

1.1. Kamera

Die Hauptkriterien zur Auswahl der Kamera waren der Kameratyp und die Qualität des Bildsensors. Weitere Kriterien waren der Verschlusstyp und der Verkaufspreis.

Auf Basis dieser Überlegungen wurde eine DSLM-Kamera mit Vollformat-Sensor nach dem Bautyp eines BSI-Sensors neu gekauft. Die erworbene Kamera bietet die Möglichkeit der Einstellung eines mechanischen, eines elektronischen oder eines Hybrid-Verschlusses. Als Kamera wurde die „Sony α 7RIII“ für einen Kaufpreis von 2899,16 € ausgewählt (Kaufdatum: 08.09.2019). Der Preis umfasst bereits den Kameraumbau.

1.2. Objektiv

Die Kriterien zur Auswahl des Objektivs waren die Brennweite, die Lichtstärke, die Kompatibilität mit der ausgewählten Kamera, das Vorhandensein eines Bildstabilisators, die Möglichkeit den Autofokus zu nutzen und der Verkaufspreis.

Anhand dieser Betrachtungen wurde das Objektiv „Sony SEL 50 mm/2,8 1:1 Makro“ für einen Kaufpreis von 504,20 € neu gekauft (Kaufdatum: 08.09.2019). Das Objektiv besitzt eine Festbrennweite von 50 mm, einen minimalen Blendenwert von 2,8, einen großen Abbildungsmaßstab von bis zu 1:1, einen optischen Bildstabilisator und die Möglichkeit zwischen manuellem Fokus und Autofokus zu wechseln.



Abbildung 6a: Ansicht von schräg oben



Abbildung 6b: Blick auf das Display

Abbildung 6a, b: Die „Sony α 7RIII“ mit dem Objektiv „Sony SEL 50 mm/2,8 1:1 Makro“ (Svenja Maier, 2022)

1.3. Kameraumbau

Es gibt in Deutschland zwei bekannte professionelle Anbieter (Stand: August 2022), die den Umbau einer Digitalkamera zu einer IR-Kamera für den nahen IR-Bereich durchführen. Die Kosten hierfür sind abhängig vom Kameramodell und der Art des Umbaus.

Die Entscheidung, ob ein definierter oder undefinierter Kameraumbau durchgeführt werden soll, wurde im Hinblick auf die Eignung der Kamera für den gewünschten Zweck sowie den Umfang an Variationsmöglichkeiten beim Einsatz der Kamera entschieden.

Es wurde ein undefinierter Umbau durch Herrn Sven Lamprecht (<https://irrecams.de>) durchgeführt. Die umgebaute Kamera kann also Strahlung vom UV- bis zum nahen IR-Bereich erfassen und wird durch einen Schraubfilter am Objektiv neu definiert.

1.4. IR-Schraubfilter

Zur Auswahl eines geeigneten IR-Schraubfilters wurden drei verschiedene, in der IR-Fotografie häufig eingesetzte Filter verglichen: der „Heliopan Filter RG 695 55 mm“ (695-nm-Filter) mit einer Cut-on-Wellenlänge von 695 nm für 63,03 € (Kaufdatum: 08.09.2019), der „Hoya Infrarotfilter R 72 58 mm“ (720-nm-Filter) mit einer Cut-on-Wellenlänge von 720 nm für 54,15 € (Kaufdatum: 03.06.2019) und der „Optic Makario LP2 830 62D“ (830-nm-Filter) mit einer Cut-on-Wellenlänge von 830 nm für 164 € (Kaufdatum: 03.06.2019). Bei der Cut-on-Wellenlänge beginnt die Transmission von Strahlung, sodass entsprechend der Transmissionskurve des jeweiligen Filters die volle Transmission erst bei einer um etwa 30 nm längeren Wellenlänge erreicht wird.

Mit diesen Filtern wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der alle Kameraeinstellungen, das Umgebungslicht und das Motiv unverändert blieben und nur der verwendete Filter variierte. Als Motiv wurde ein Pferdeauge gewählt und die Fotografien wurden im Schatten unter freiem Himmel aufgenommen. Anhand des Ergebnisses wurde der am besten geeignete IR-Filter für die Aufnahmen am Pferd ausgewählt. Das Equipment wurde entsprechend der Angaben im jeweiligen Abschnitt eingestellt. Die für die Belichtung relevanten Einstellungen waren: Belichtungszeit 1/250 s, Blendenwert 16 und ISO-Wert 100. Es wurde der in Kapitel III. 1.5. genannte

Ringblitz in der Leistungsstufe 50 % eingesetzt. Die Fotos wurden hinsichtlich ihrer Farbwiedergabe und der Bildhelligkeit verglichen. Zur Beurteilung der Bildhelligkeit wurde das Graustufen-Histogramm hinzugezogen.

Für die im Ergebnisteil befindlichen Fotos von Patienten wurde aufgrund des Resultats dieser Versuchsreihe der 695-nm-Filter eingesetzt.



Abbildung 7: Drei verschiedene IR-Schraubfilter. Von links nach rechts: 695-nm-Filter; 720-nm-Filter; 830-nm-Filter (Svenja Maier, 2022)

1.5. Externes Blitzgerät

Zur optimalen Ausleuchtung des Motivs wurde ein externes Blitzgerät eingesetzt. Die Kriterien für die Auswahl des Blitzgeräts waren dessen Bautyp, die Kompatibilität mit der Kamera und dem Objektiv, die Leistungsfähigkeit und der Verkaufspreis.

Es wurde der Ringblitz „Metz Mecablitz 15 MS-1 digital“ für 265,99 € (Kaufdatum: 29.08.2019) verwendet. Die Leitzahl dieses Blitzgeräts beträgt für ISO 100 15.

Mit diesem Blitzgerät wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der die Leistungsstufen des Blitzgeräts variiert wurden: 1/32, 1/16, 1/8, 1/4, 1/2 und volle Leistung. Die Kameraeinstellungen, das Motiv und die Umgebung waren für alle Aufnahmen konstant und wurden, wie im Versuch zur Auswahl des IR-Schraubfilters beschrieben, gewählt. Die Fotos wurden mit Hilfe des Graustufen-Histogramms hinsichtlich der Bildhelligkeit verglichen.

Für die an den Patienten durchgeführten Aufnahmen wurde aufgrund der Ergebnisse die

Leistungsstufe 1/2 verwendet.



Abbildung 8: Der „Metz Mecablitz 15 MS-1 digital“ mit Anschlusskabel zur Verbindung mit der Kamera (Svenja Maier, 2022)

1.6. IR-Taschenlampe

Zur Unterstützung des Fokussierens und der Wahl des Bildausschnitts wurde eine zusätzliche Strahlungsquelle mit IR-Anteil eingesetzt. Diese Strahlungsquelle sollte leicht zu handhaben und praktikabel sein und es ermöglichen, das Auge soweit auszuleuchten, dass man bei Blick durch den Sucher bzw. auf das Display einen Bildausschnitt auswählen kann und das Fokussieren erleichtert wird.

Hierzu wurde die IR-LED-Taschenlampe „Nightfox XB10“ mit einer Leistung von 5 Watt und dimmbarer Helligkeit für 59,99 € (Kaufdatum: 21.07.2021) neu gekauft. Diese Taschenlampe strahlt eine Wellenlänge von 850 nm aus. Die Taschenlampe wurde bei ungefähr mittlerer Helligkeitsstufe eingesetzt.



Abbildung 9: Die IR-LED-Taschenlampe „Nightfox XB10“ (Svenja Maier, 2022)

1.7. Speichermedium

Es wurde die SD-Karte „SanDisk Extreme SDXC 64 GB“ mit einer Speicherkapazität von 64 GB (Gigabyte) und einer Lesegeschwindigkeit von 90 MB/s (Megabyte pro Sekunde) verwendet. Diese wurde für 22,76 € neu gekauft (Kaufdatum: 12.05.2019).

2. Kameraeinstellungen

Die Kameraeinstellungen wurden anhand der physikalischen und technischen Gesetzmäßigkeiten festgelegt.

2.1. Kameramodus

Die zur Verfügung stehenden Kameramodi wurden hinsichtlich der einstellbaren Parameter verglichen und so der passende Modus für die IR-Fotos am Pferdepatienten ausgewählt.

Es wurde der manuelle Modus verwendet.

2.2. Belichtungszeit

Zur Einstellung der Belichtungszeit wurde die Blitzsynchronzeit sowie das Auftreten von Bewegungs- und Verwacklungsunschärfe beachtet.

Die verwendete Belichtungszeit betrug 1/250 s.

2.3. Blende

Um eine optimale Schärfentiefe zu erhalten, wurde der maximale Blendenwert dieses Objektivs von 16 eingestellt.

2.4. ISO-Wert

Im Hinblick auf die bestmögliche Bildqualität wurde der ISO-Wert 100 verwendet.

2.5. Weißabgleich

Gemäß der Anleitung im Kamerahandbuch der ausgewählten Kamera wurde einmalig nach Erhalt der Kamera ein manueller Weißabgleich durchgeführt. Als Referenzfläche wurde grünes Gras verwendet.

2.6. Fokussierung

Für die Aufnahmen am Pferd wurde, im Hinblick auf ein sich bewegendes Motiv, ein kontinuierlicher Autofokus mit dynamischer Mehrfeldmessung verwendet.

2.7. Verschlusstyp

Der Verschlusstyp wurde anhand dessen Lautstärke bzw. der Menge an Geräuschen beim Auslösevorgang sowie dessen Verfügbarkeit bei gleichzeitiger Verwendung eines

Blitzgeräts ausgewählt.

Es wurde ein Hybrid-Verschluss verwendet, also ein Verschluss mit erstem elektronischem und zweitem mechanischem Verschlussvorhang.

2.8. Grafikdateiformat

Die Kriterien hinsichtlich der Entscheidung welches Grafikdateiformat im Kameramenü eingestellt wird, waren die Bildqualität, die Möglichkeiten zur weiteren Bearbeitung und die Option der sofortigen Verwendbarkeit.

Es wurde die kombinierte Einstellungsmöglichkeit für das JPEG- und RAW-Format eingestellt. Letztlich wurden jedoch nur die JPEG-Dateien verwendet.

3. Vergleichsfotos mit visuellem Spektrum

Neben den IR-Fotos wurden Vergleichsfotos mit visuellem Spektrum (VS-Fotos) angefertigt.

Die Entscheidung in welcher Weise die VS-Fotos angefertigt werden, wurde anhand theoretischer Überlegungen in Bezug auf die Praktikabilität und die Bildqualität sowie durch ein Ausprobieren in der Praxis getroffen.

Die VS-Fotos wurden mit dem Smartphone „Samsung Galaxy S20“ und der App „OpenCamera“ aufgenommen.

4. Aufnahmen am Pferd

4.1. Pferde

Im Zeitraum von Dezember 2019 bis Oktober 2022 wurden durch die Verfasserin die Augen zahlreicher Pferde fotografiert. Die Aufnahmen erfolgten unter Einverständnis

der verantwortlichen tierärztlichen Kolleginnen und Kollegen und der Tierbesitzer/innen mit dem Ziel der Veröffentlichung.

Folgende Kliniken und Praxen haben diese Arbeit unterstützt: Zentrum für Pferdeaugenheilkunde (Herr Dr. Stefan Gesell-May), Pferdeklinik Stephansmühle (Frau Yvonne Dziubek), Tierarztpraxis Sabrina Schoss (Frau Sabrina Schoss), Pferdeklinik Duisburg (Frau Dr. Kathrin Rasch) und Pferdeklinik Salzhofen (Herr Dr. Kai Klingelhöfer). Weiterhin hat der Tiergnadenhof Jungendfarm in Duisburg (Frau Renate Zolopa) zahlreiche Pferde zur Verfügung gestellt.

Zu diesen Pferden wurde eine Anamnese hinsichtlich des Vorliegens, des Verlaufs und der Therapie von Augenerkrankungen eingeholt. Die Augen wurden weiterhin durch die Verfasserin mittels des direkten Ophthalmoskops „Heine Beta 200 LED“ untersucht.

4.2. Auswahl der Fotografien

Im Ergebnisteil findet sich eine Auswahl an Fotografien von 28 verschiedenen Pferden.

6 dieser Pferde hatten keine bekannten Augenerkrankungen und zeigten verschiedene physiologische Variationen.

Die weiteren 22 Pferde hatten verschiedene pathologische Veränderungen an den Augen: 3 Pferde mit Korneaulkus; 1 Pferd mit Bindehautflap aufgrund eines Ulkus; 1 Pferd mit kornealer Narbe; 3 Pferde mit immunmediierter Keratitis (IMMK); 1 Pferd mit nicht diagnostizierter kornealer Trübung; 4 Pferde mit unterschiedlichen Formen einer Uveitis; 1 Pferd mit Uveitis und Sekundärglaukom; 1 Pferd mit Glaukom unbekannter Ursache, 1 Pferd mit Uveitis, Linsluxation und Katarakt; 4 Pferde mit Linsentrübung und 2 Pferde mit Iriszysten.

4.3. Umgebungshelligkeit

Um den Einfluss unterschiedlicher Lichtverhältnisse in der Umgebung zu evaluieren, wurden Fotos des gleichen Auges, mit unveränderten Einstellungen des Equipments, unter freiem Himmel in der Sonne, unter freiem Himmel im Schatten sowie im abgedunkelten Stall angefertigt. Das Equipment wurde, wie im Vorfeld beschrieben, eingestellt.

Die meisten Aufnahmen für diese Arbeit entstanden gemeinsam mit dem VS-Foto im Stallgebäude.

4.4. Handling der Pferde und Einsatz von Hilfspersonen

Die meisten Pferde wurden unsediert in ihrer Box oder auf der Stallgasse mit einer Hilfsperson fotografiert. Die Hilfsperson hatte die Aufgabe das Pferd am Halfter zu fixieren. Die Verfasserin und Fotografin leuchtete mit der IR-LED-Taschenlampe in der linken Hand das Auge an, um fokussieren zu können, und löste mit der Kamera in der rechten Hand die Aufnahme aus. In der Regel hielten die Pferde ihre Augen selbstständig weit genug offen. In manchen Fällen wurden die Lider vorsichtig mit den Fingern aufgehoben. In solchen Fällen wurde die IR-LED-Taschenlampe von der Hilfsperson übernommen.

Falls ein Pferd für eine andere Untersuchung oder Behandlung sediert werden musste, so wurden die Aufnahmen bevorzugt am sedierten Pferd durchgeführt. Keines der Pferde wurde extra für die IR-Fotografie sediert.

Es gab nur wenige Einzelfälle, bei denen aufgrund von nervösem Verhalten oder starker Schmerzhaftigkeit am Auge kein Bild zu Stande kam.

Von den 28 Pferden in dieser Arbeit wurden 23 Pferde unsediert und mit nur einer Hilfsperson fotografiert. 3 Pferde wurden in Sedierung und 2 Pferde in Vollnarkose fotografiert.

4.5. Perspektive

Von allen Augen wurde eine frontale Gesamtansicht aufgenommen. Um spezielle Veränderungen im Auge gezielt deutlicher darzustellen, wurden bei einigen Patienten weiterhin Aufnahmen aus verschiedenen seitlichen und schrägen Perspektiven aufgenommen.

4.6. Qualitative Beurteilung der Fotos

Die wichtigsten Kriterien für die qualitative Beurteilung der angefertigten Fotos waren

die Bildschärfe, die Lage der Schärfeebene, die Belichtung sowie die Farbwiedergabe. Weitere Aspekte waren die Perspektive und der Bildausschnitt.

Die erste Bewertung der Fotos und die Entscheidung, ob noch weitere Aufnahmen an dem jeweiligen Pferd erforderlich sind, erfolgte bei einer vergrößerten Betrachtung der gemachten Fotos durch den Sucher der Kamera. Die endgültige Selektion der Fotos erfolgte bei Betrachtung auf einem Laptop-Display mit 4K-Auflösung.

In der Regel waren etwa 4-5 Aufnahmen pro Pferd erforderlich.

IV. ERGEBNISSE

1. Versuchsreihen

1.1. IR-Schraubfilter



Abbildung 10a-1: 695-nm-Filter

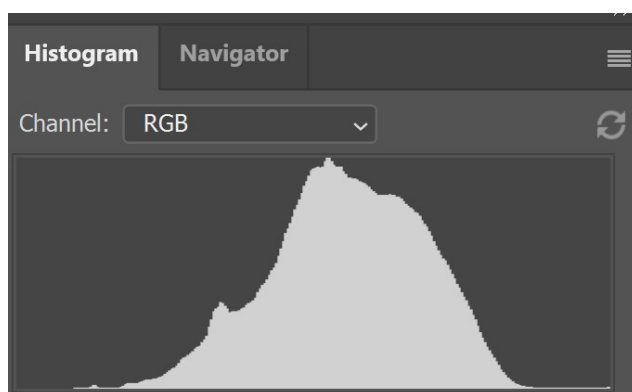


Abbildung 10a-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 10a-1



Abbildung 10b-1: 720-nm-Filter

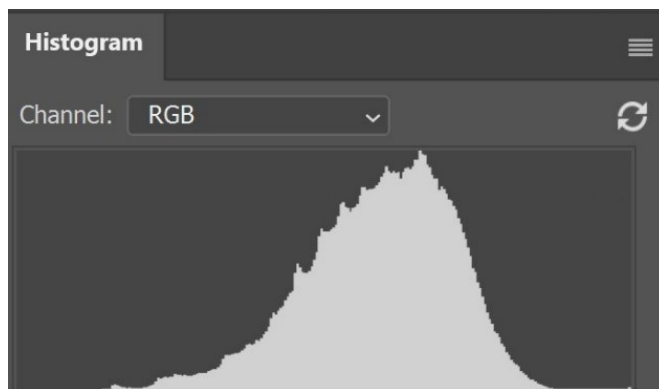


Abbildung 10b-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 10b-1



Abbildung 10c-1: 830-nm-Filter

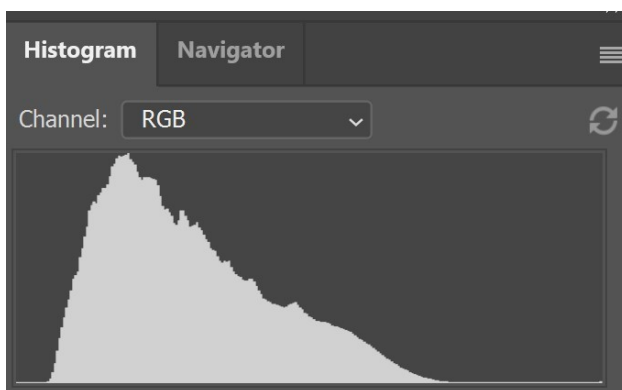


Abbildung 10c-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 10c-1

Abbildung 10a-c: IR-Fotos des rechten Auges einer 11-jährigen Haflinger-Stute bei Einsatz drei verschiedener IR-Schraubfilter und sonst konstanten Bedingungen. Zu jedem der Fotos ist das entsprechende Graustufen-Histogramm als Screenshot aus Adobe Photoshop abgebildet. (Svenja Maier, 2022)

Die Fotos, die mit dem 695- und dem 720-nm-Filter aufgenommen wurden, zeigen mit den ausgewählten Einstellungen des Equipments eine korrekte Belichtung. Dies wird bei beiden Aufnahmen durch das jeweilige Graustufen-Histogramm (siehe Kapitel II. 9.5.) bestätigt. Der mittig gelegene Peak zeigt eine gleichmäßige mittelhelle Belichtung.

Weiterhin zeigen beide Aufnahmen eine gute Detailerkennbarkeit bei Vergrößerung im scharf gestellten Bildbereich.

Das Graustufen-Histogramm des mit dem 830-nm-Filter aufgenommenen Fotos zeigt eine deutliche Verschiebung des Peaks nach links. Dies weist auf eine Unterbelichtung hin. Das Foto erscheint daher dunkel und bei einer stärkeren Vergrößerung ist die Detailerkennbarkeit im Vergleich zu den Fotos mit den anderen Filtern verschlechtert.

Neben der Bildhelligkeit unterscheiden sich die Fotos im Farbton. Das Foto mit dem 830-nm-Filter ist rein schwarz-weiß. In den anderen beiden Aufnahmen, besonders in der Aufnahme mit dem 695-nm-Filter, zeigt sich ein leichter Rotstich. Dieser betrifft vor allem das umgebende Fell und hat keinen merklichen Einfluss auf die Darstellung des Auges selbst.

1.2. Externes Blitzgerät



Abbildung 11a-1: 1/32 Leistung

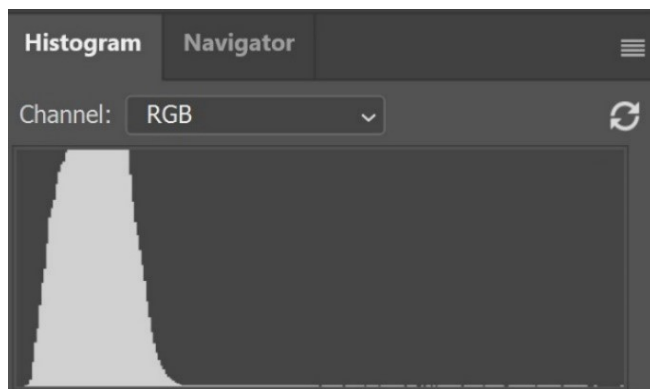


Abbildung 11a-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 11a-1



Abbildung 11b-1: 1/16 Leistung

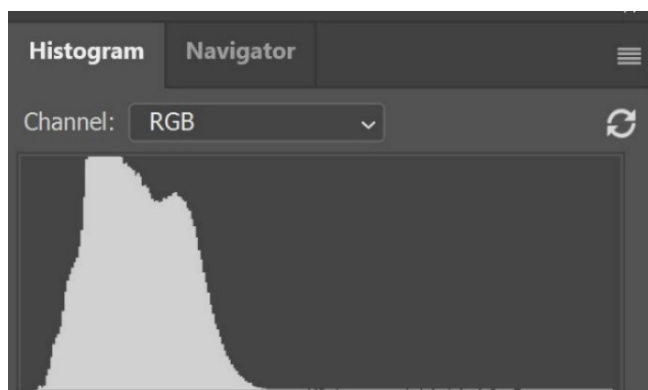


Abbildung 11b-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 11b-1



Abbildung 11c-1: 1/8 Leistung

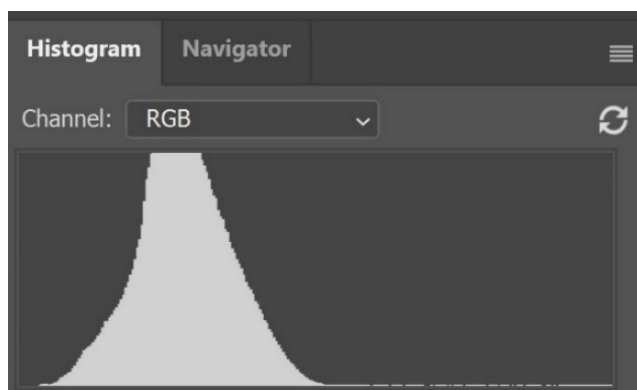


Abbildung 11c-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 11c-1



Abbildung 11d-1: 1/4 Leistung

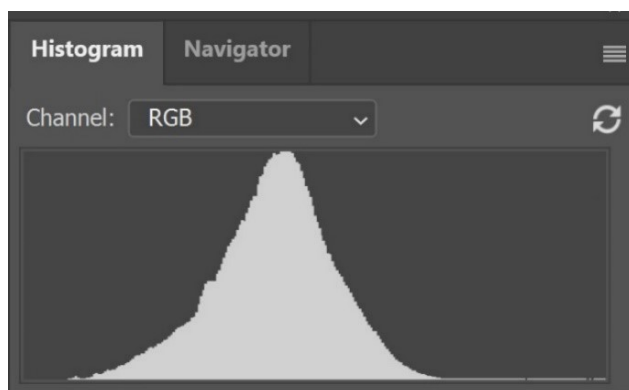


Abbildung 11d-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 11d-1



Abbildung 11e-1: 1/2 Leistung

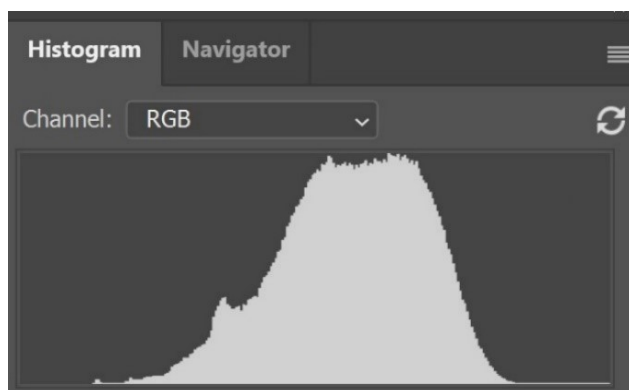


Abbildung 11e-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 11e-1



Abbildung 11f-1: Volle Leistung

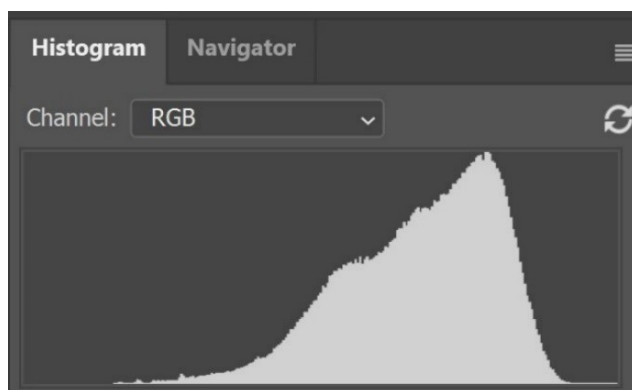


Abbildung 11f-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 11f-1

Abbildung 11a-f: IR-Fotos des rechten Auges einer 11-jährigen Haflingerstute mit einer Zunahme der eingestellten Blitzleistung von a zu f bei sonst konstanten Bedingungen. Zu jedem der Fotos ist das entsprechende Graustufen-Histogramm als Screenshot aus Adobe Photoshop abgebildet. (Svenja Maier, 2022)

Entsprechend der Zunahme der Blitzleistung nimmt die Bildhelligkeit von Abbildung 11a-1 nach 11f-1 zu. Dies zeigt sich an den Graustufen-Histogrammen durch eine zunehmende Verschiebung des Peaks von links nach rechts.

Die Aufnahmen mit der 1/32-, 1/16- und 1/8-Blitzleistung sind deutlich unterbelichtet. Die Fotos erscheinen dunkel mit schlechter Detailerkennbarkeit und die Peaks der Graustufen-Histogramme befinden sich linksseitig der Mitte.

Die Aufnahme mit der 1/4-Blitzleistung erscheint grenzwertig dunkel. Die Detailerkennbarkeit ist etwas verbessert und der Peak des Graustufen-Histogramms nur noch geringgradig links der Mitte verschoben.

Das Foto mit der 1/2-Blitzleistung zeigt eine korrekte Belichtung mit einer guten Detailerkennbarkeit. Das Graustufen-Histogramm hat einen breiten Peak im Bereich mittlerer Helligkeit.

Abbildung 11f-1 mit voller Blitzleistung erscheint im Fellbereich geringgradig überbelichtet. Auch das Graustufen-Histogramm mit dem etwas nach rechts verschobenen Peak zeigt hier eine leichte Überbelichtung. Die okulären Strukturen sind jedoch gut erkennbar.

Mit den gewählten Kameraeinstellungen und dem 695-nm-Filter erhält man mit dem „Metz Mecablitz 15 MS-1 digital“ bei der Hälfte der maximalen Leistung die beste Belichtung. Auch mit der vollen Blitzleistung wird eine korrekte Belichtung des Auges erreicht.

1.3. Umgebungshelligkeit



Abbildung 12a: Unter freiem Himmel bei direkter Sonneneinstrahlung



Abbildung 12b: Unter freiem Himmel im Schatten



Abbildung 12c: Im abgedunkelten Stall

Abbildung 12a-c: IR-Fotos des rechten Auges einer 11-jährigen Haflinger-Stute bei wechselnder Umgebungshelligkeit und sonst konstanten Bedingungen. (Svenja Maier, 2022)

Die Aufnahmen zeigen, dass die Bildhelligkeit bei Verwendung eines externen Blitzgeräts und einer kurzen Belichtungszeit in der IR-Fotografie unabhängig von der Umgebungshelligkeit ist. Weiterhin hat die Umgebungshelligkeit keinen Einfluss auf das Auftreten von Reflexionen im Bild.

Von Abbildung 12a, die in der Mittagssonne aufgenommen wurde, über Abbildung 12b, die im Schatten fotografiert wurde, bis hin zu Abbildung 12c, die im abgedunkelten Stall entstanden ist, nimmt die Größe der Pupille der fotografierten Stute entsprechend der Umgebungshelligkeit immer weiter zu. Die verwendete IR-LED-Taschenlampe zur Unterstützung des Autofokus hat somit keinen Einfluss auf die Größe der Pupille.

2. Fotos von Pferdeaugen

2.1. Pferde ohne bekannte Augenerkrankungen

Fall 1

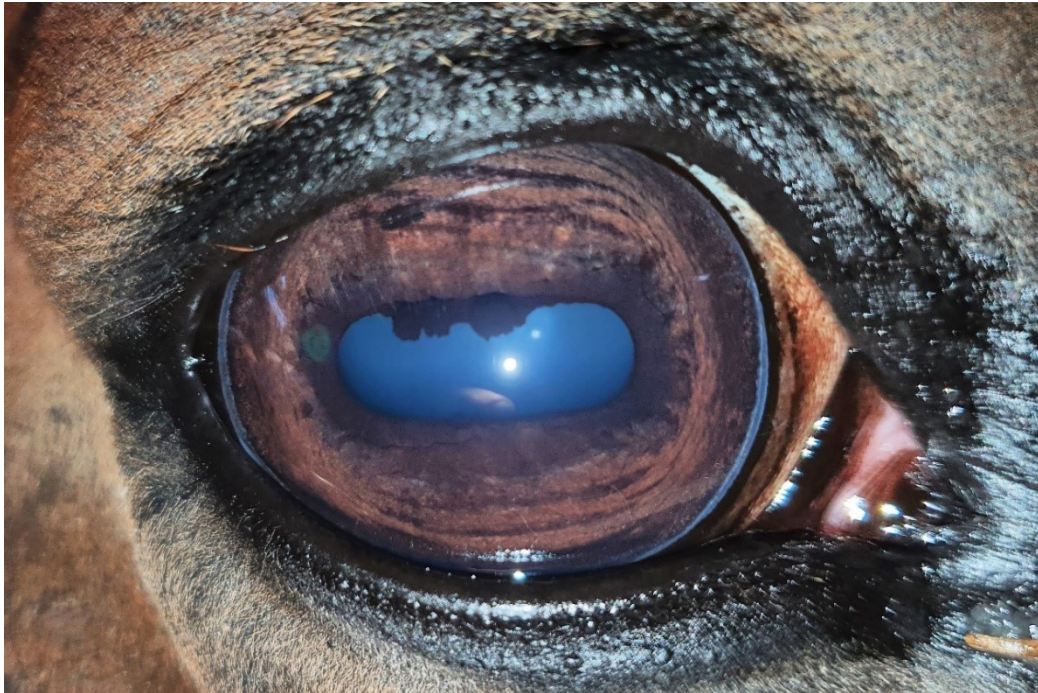


Abbildung 13a: VS-Foto; Frontalansicht

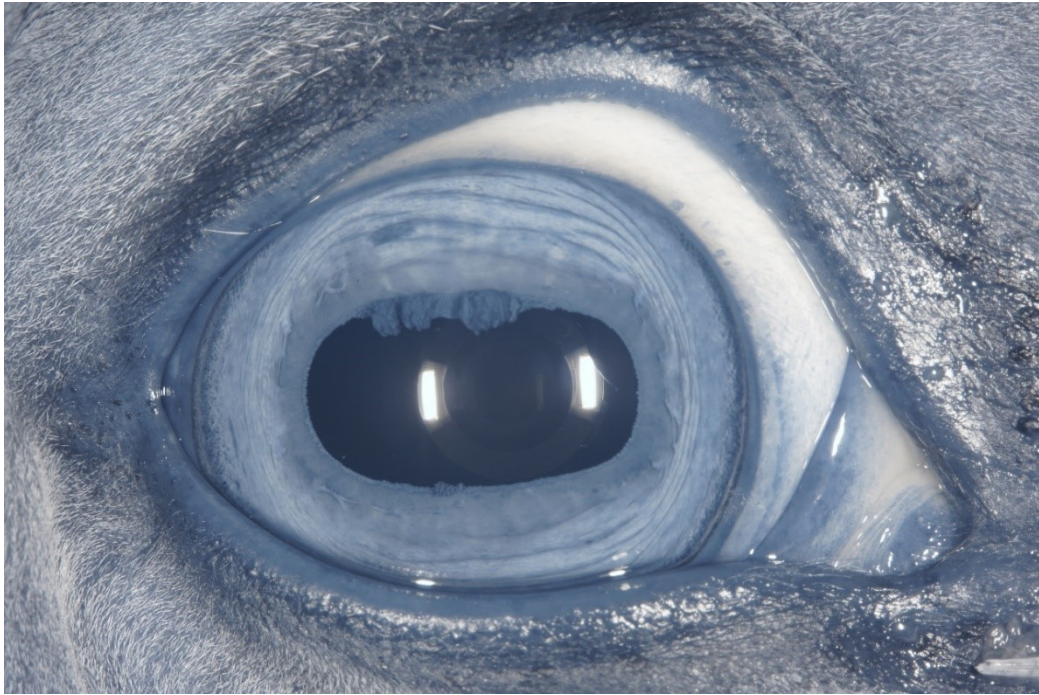


Abbildung 13b: IR-Foto; Frontalansicht

Abbildung 13a,b: Rechtes Auge einer 12-jährigen Freiberger-Mix-Stute ohne bekannte Erkrankungen der Augen. (Svenja Maier, 2021)

Das IR-Foto zeigt das für die “Schwarz-Weiß-IR-Fotografie” typische monochrome Erscheinungsbild.

Die braune Iris stellt sich im IR-Foto in verschiedenen Graustufen dar. Stärker pigmentierte Bereiche der Iris sind dadurch klarer abgrenzbar als im VS-Foto. Weiterhin sind die Umrisse und die Oberflächenstruktur der Granula iridica im IR-Foto besser zu erkennen.

Die Pupille erscheint im IR-Foto eines gesunden Auges schwarz. Im Zentrum der Pupille zeigt sich die Reflexion des Ringblitzes.

Fall 2

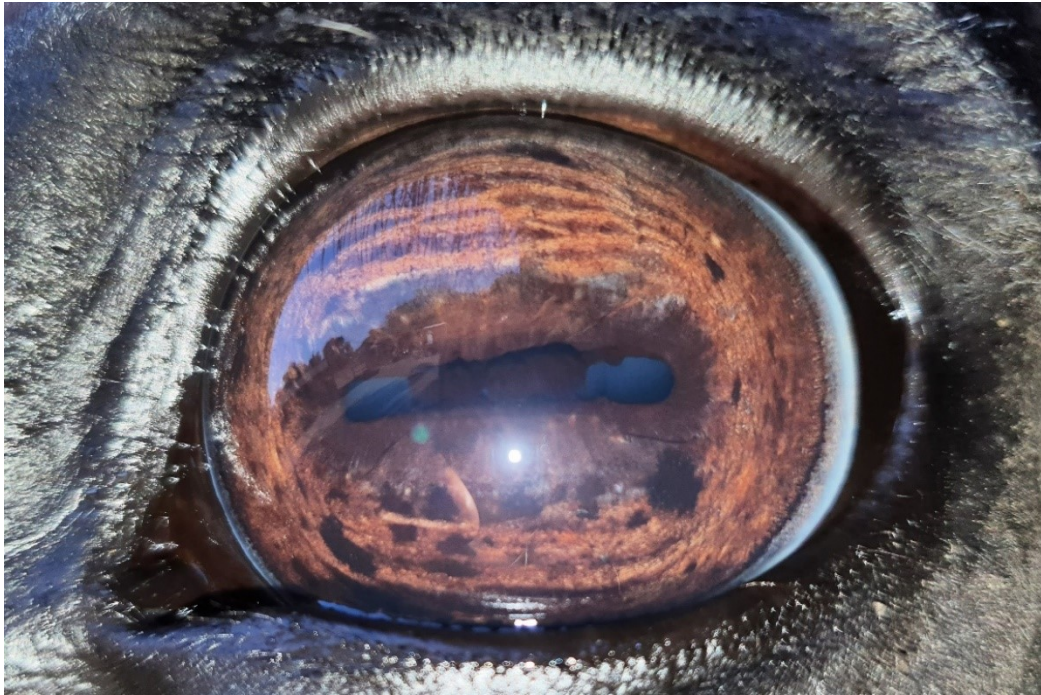


Abbildung 14a: VS-Foto des linken Auges; Frontalansicht



Abbildung 14b: IR-Foto des linken Auges; Frontalansicht

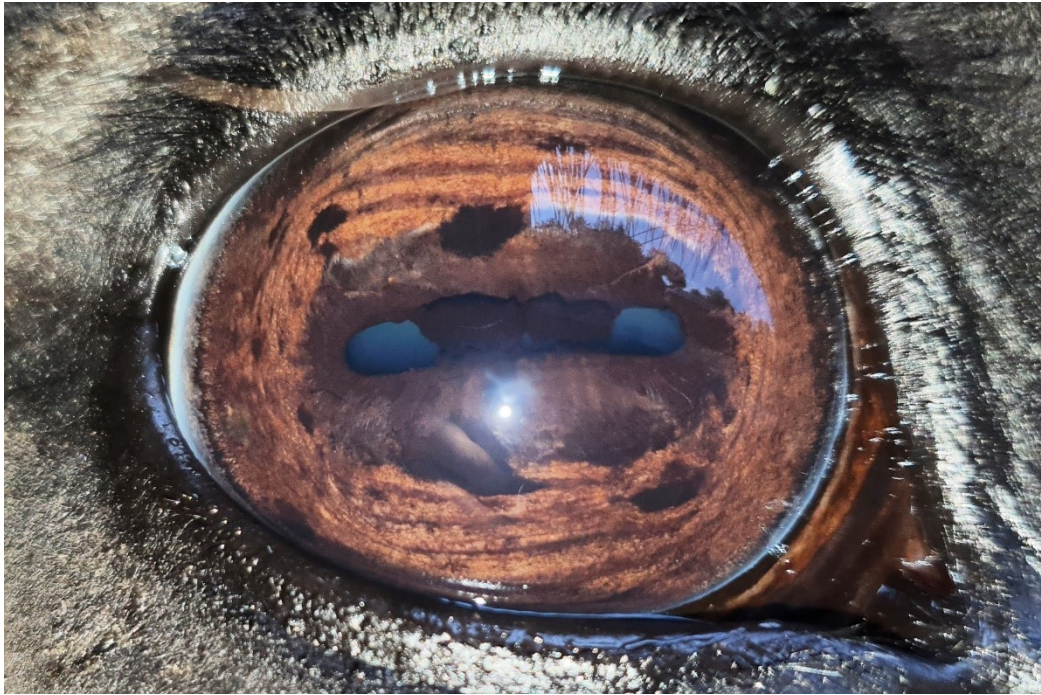


Abbildung 14c: VS-Foto des rechten Auges; Frontalansicht



Abbildung 14d: IR-Foto des rechten Auges; Frontalansicht

Abbildung 14a-d: Beide Augen einer 24-jährigen Friesen-Stute ohne bekannte Erkrankungen der Augen. (Svenja Maier, 2021)

Auch in diesen Beispielen eines gesunden Pferdes zeigen sich die stärkere Kontrastierung der Iris sowie die verbesserte Erkennbarkeit der Granula iridica im IR-Foto.

Die Bereiche stärkerer Pigmentierung der Iris heben sich im IR-Foto deutlicher hervor als im VS-Foto.

Fall 3



Abbildung 15a: VS-Foto; Frontalansicht

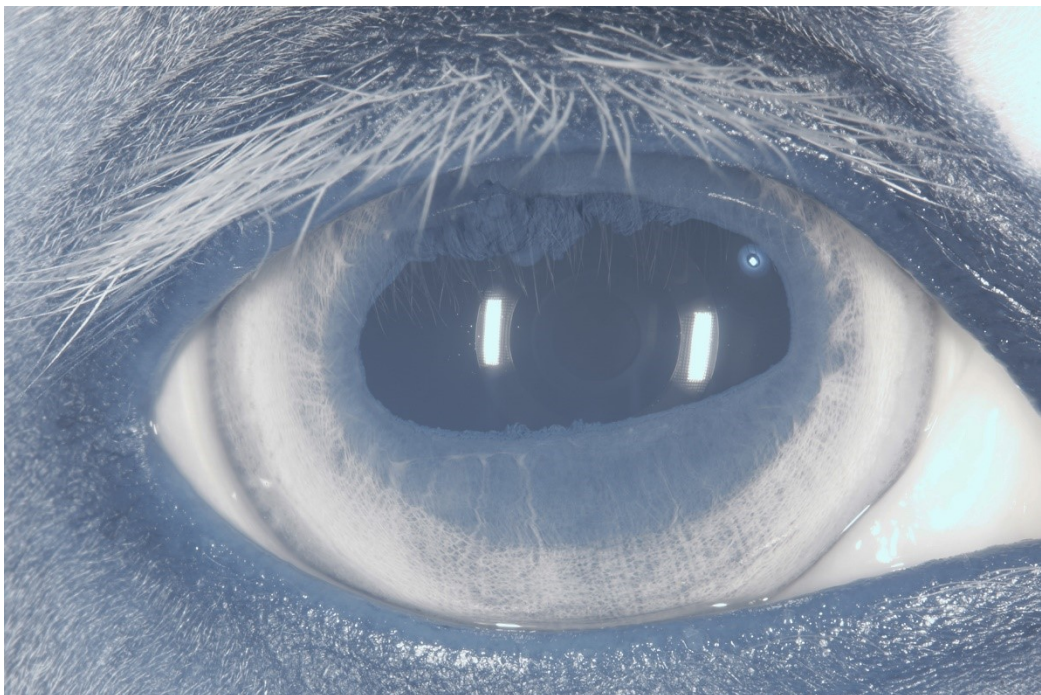


Abbildung 15b: IR-Foto; Frontalansicht

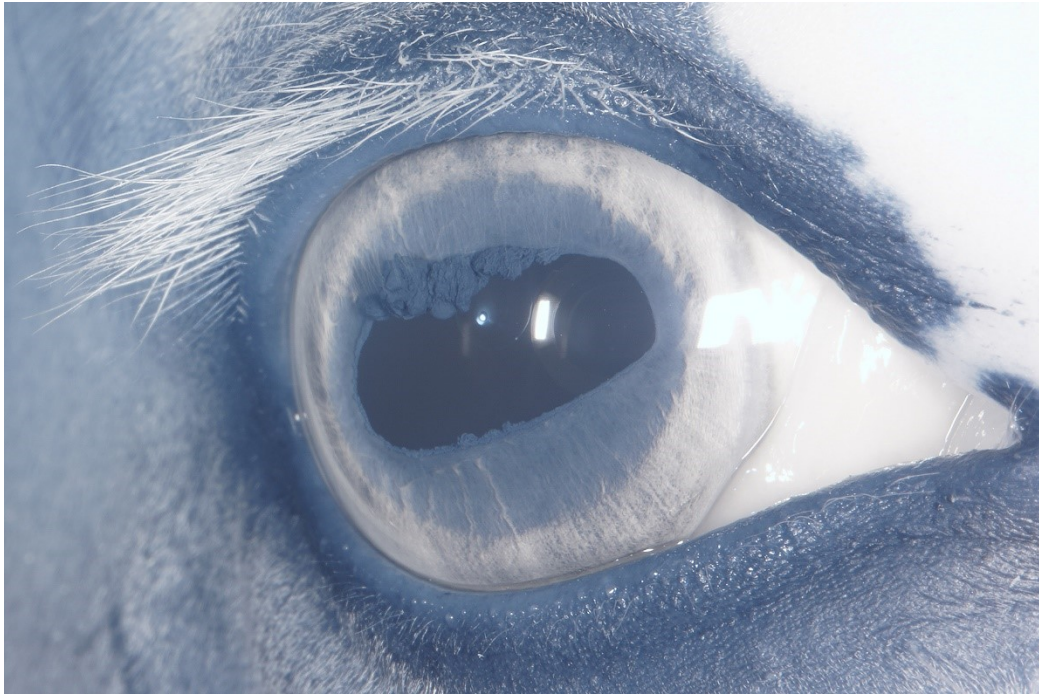


Abbildung 15c: IR-Foto; schräge Ansicht

Abbildung 15a-c: Rechtes Auge eines 2-jährigen Quarter-Horse-Wallachs mit heterochromer Iris und ohne bekannte Erkrankungen der Augen. (Svenja Maier, 2021)

Die im VS-Foto erkennbare bläuliche Färbung der Iris stellt sich im IR-Foto in hellen Grautönen dar. Die Granula iridica heben sich, wie bereits in den vorherigen Beispielen demonstriert, im VS-Foto kaum von der Umgebung ab und erscheinen einheitlich dunkel. Im IR-Foto sind die Umrisse und die Oberflächenstruktur hingegen gut erkennbar.

Abbildung 15c wurde von einer rostroventrolateralen Position aufgenommen und zeigt die Granula iridica aus einer anderen Perspektive, wodurch ihre Dreidimensionalität deutlicher wird.

Fall 4

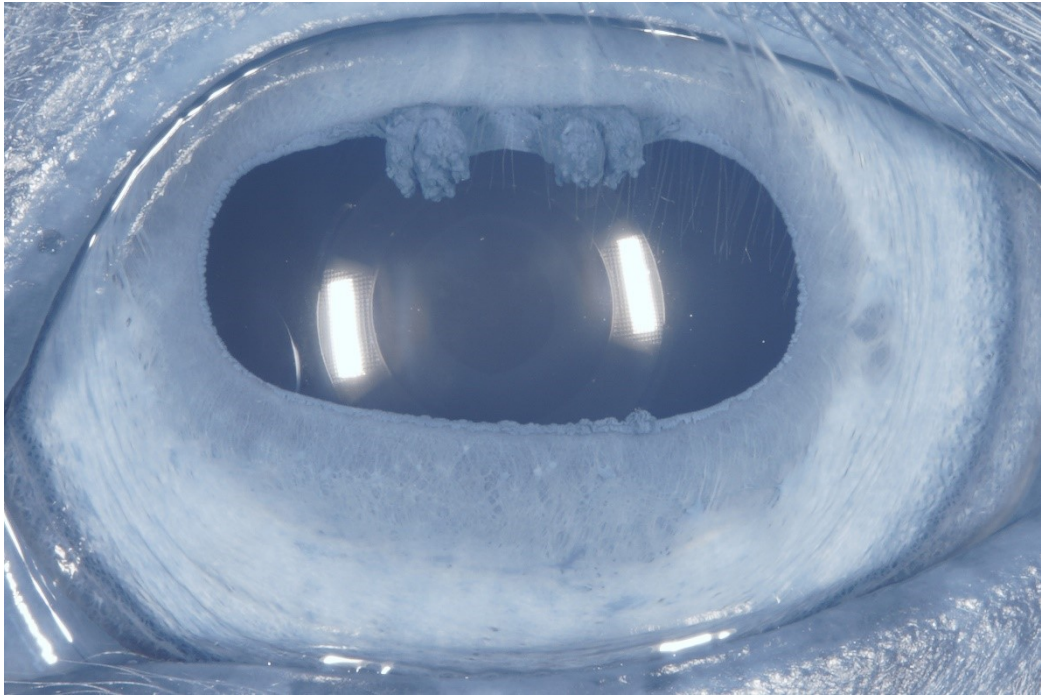


Abbildung 16a: IR-Foto des linken Auges; Frontalansicht

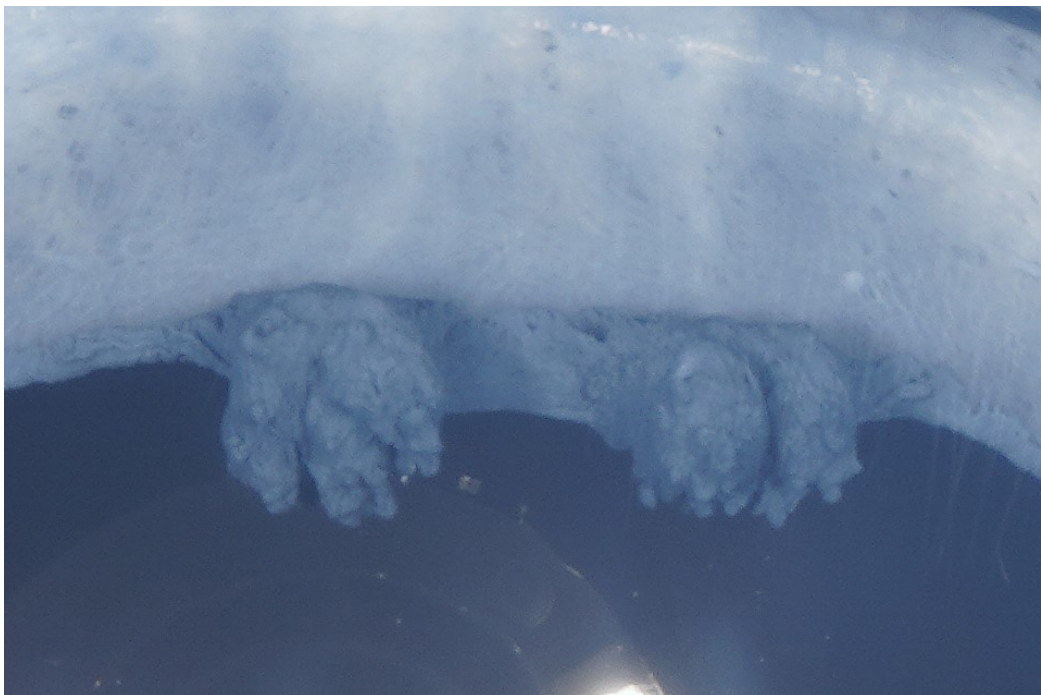


Abbildung 16b: IR-Foto des linken Auges; Detailansicht der Granula iridica

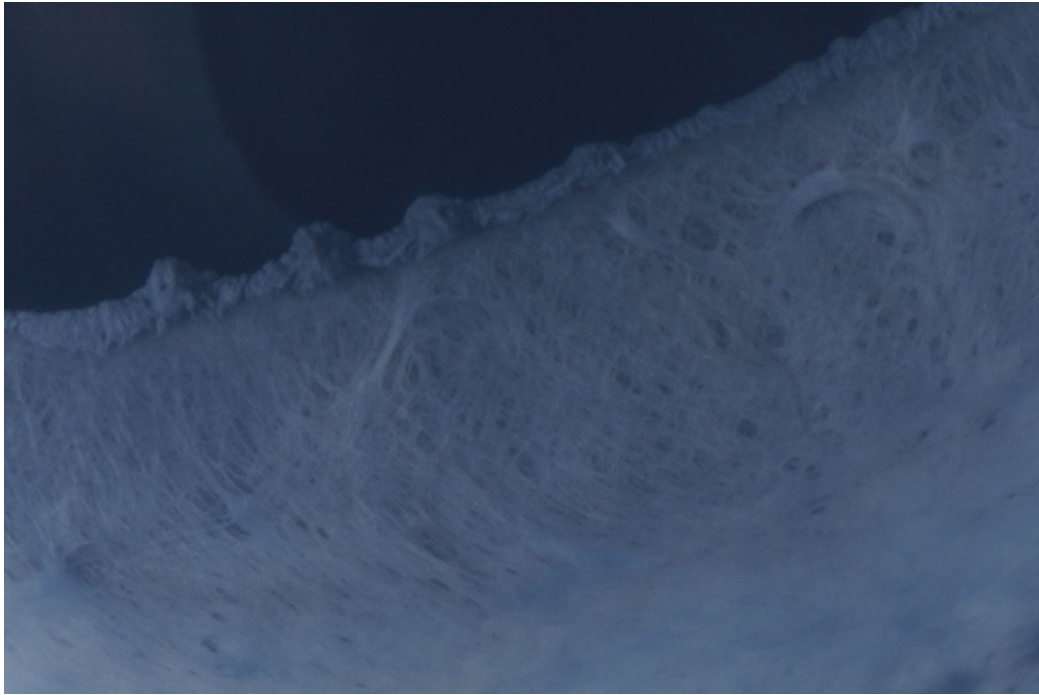


Abbildung 16c: IR-Foto des rechten Auges; Detailansicht der ventralen Iris

Abbildung 16a-c: IR-Fotos des linken und rechten Auges einer 29-jährigen Paso-Peruano-Stute ohne bekannte Erkrankungen der Augen. (Svenja Maier, 2019)

Die Aufnahmen 16b und 16c demonstrieren die hohe Auflösung, die mit dem eingesetzten Equipment erreicht werden kann. Die Oberflächenstruktur der Iris und der Granula iridica sind bis ins Detail erkennbar.

Fall 5

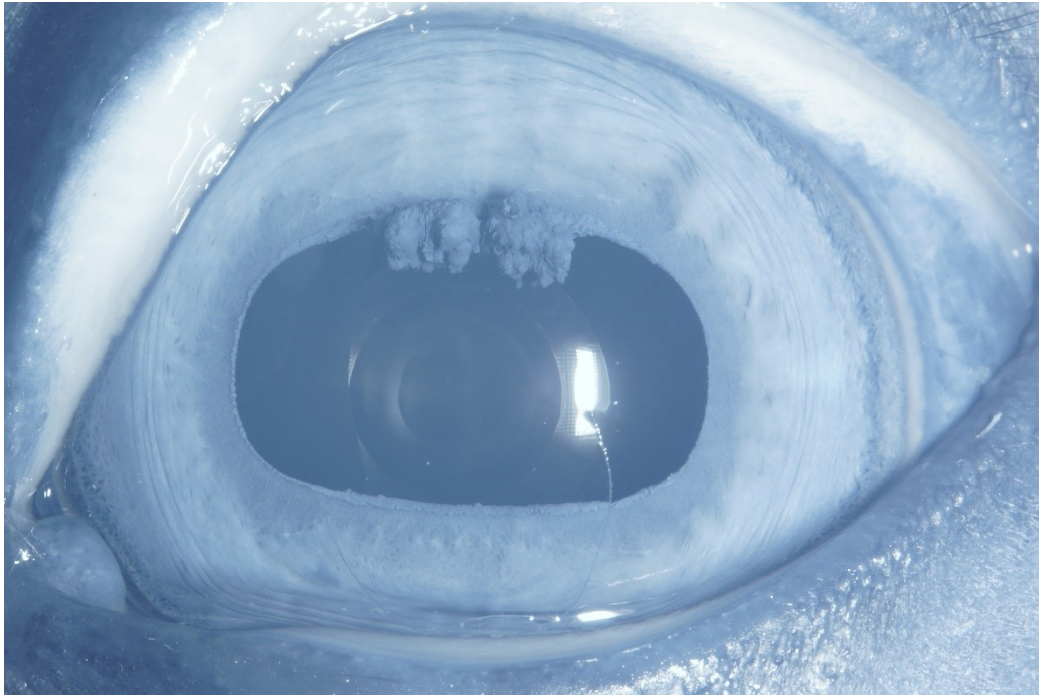


Abbildung 17a: IR-Foto des linken Auges; Frontalansicht



Abbildung 17b: IR-Foto des linken Auges; Detailansicht der Granula iridica



Abbildung 17c: IR-Foto des rechten Auges; schräge Ansicht

Abbildung 17a-c: IR-Fotos des linken und rechten Auges eines 22-jährigen Welsh-Pony-Wallachs ohne bekannte Erkrankungen der Augen. (Svenja Maier, 2021)

Abbildung 17b ist ein weiteres Beispiel für die kontrastreiche, detaillierte Darstellung der Granula iridica im IR-Foto. Pathologische Veränderungen, die mit einer Veränderung der Oberflächenstruktur einhergehen, können dadurch frühzeitig erkannt werden.

Abbildung 17c zeigt durch die veränderte Perspektive den Ansatzbereich der Granula iridica. Weiterhin wird in dieser Aufnahme der Angulus iridocornealis nasovenal sichtbar.

2.2. Ulzerationen und Narben der Kornea

Fall 6

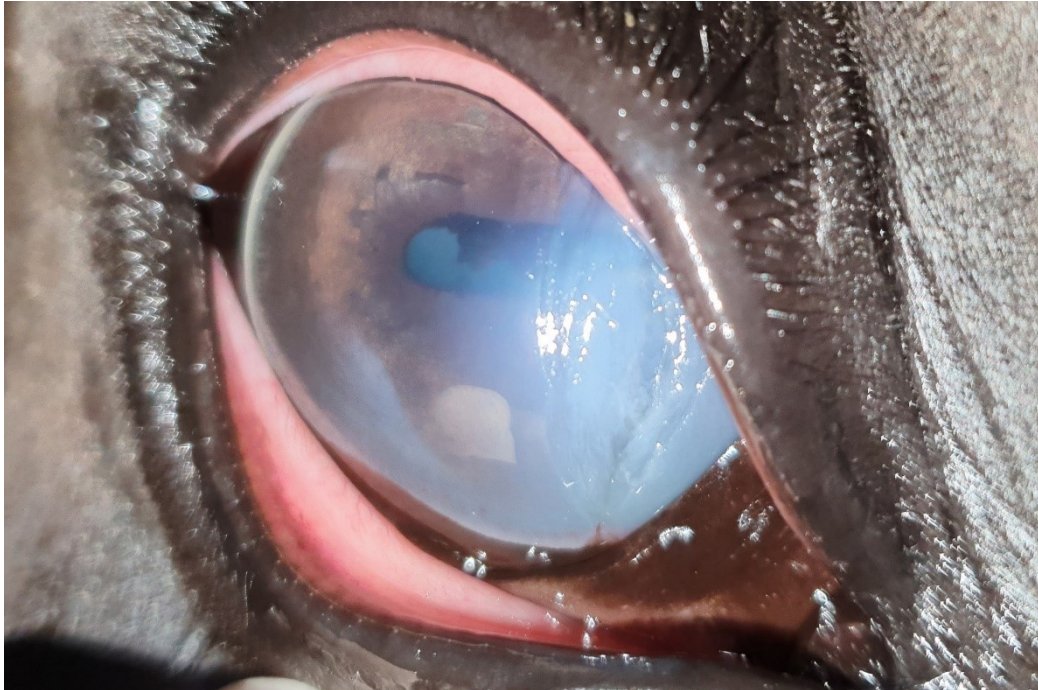


Abbildung 18a: VS-Foto; Frontalansicht

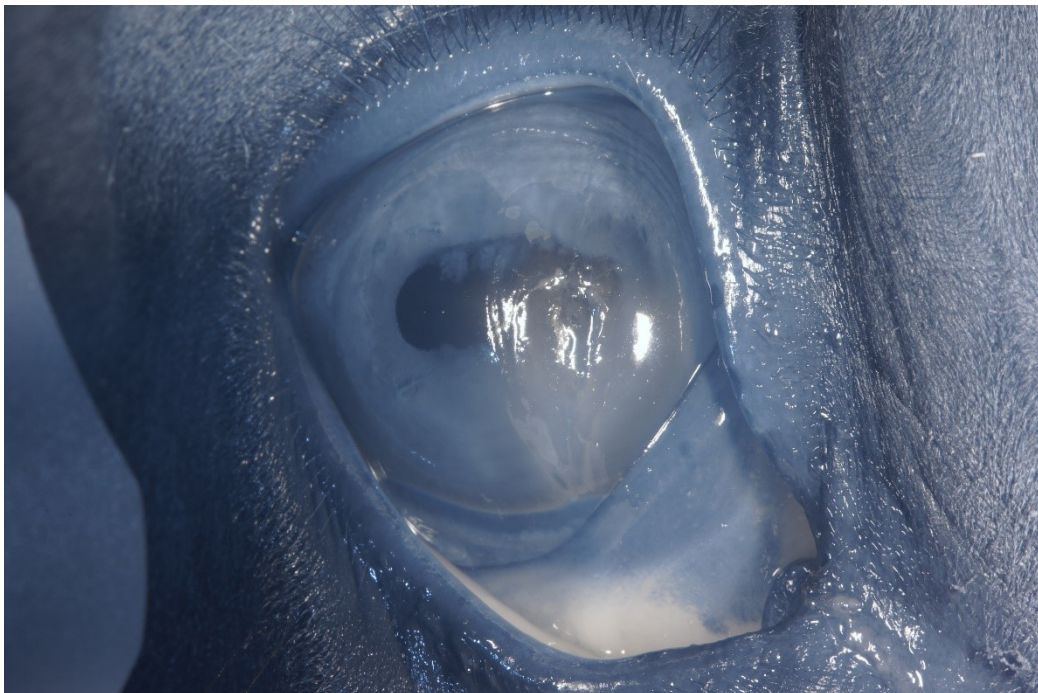


Abbildung 18b: IR-Foto; Frontalansicht

Abbildung 18a,b: Rechtes Auge einer 7-jährigen Warmblut-Stute mit stromalem Ulkus im nasalen Bereich der Kornea. (Svenja Maier, 2021)

Der Ulkusbereich und dessen Umgebung sind ödematisiert und dadurch nicht durchsichtbar im VS-Foto. Im IR-Foto sind der Umriss der Pupille im Ganzen sowie weitere Teile der Iris sichtbar.

Die Aufnahmen wurden am unsedierten, schmerzhaften Pferd durchgeführt, sodass nur sehr vorsichtig manipuliert werden konnte und kein vollständiges Aufhalten der Augenlider möglich war.

Fall 7



Abbildung 19a: VS-Foto; Frontalansicht

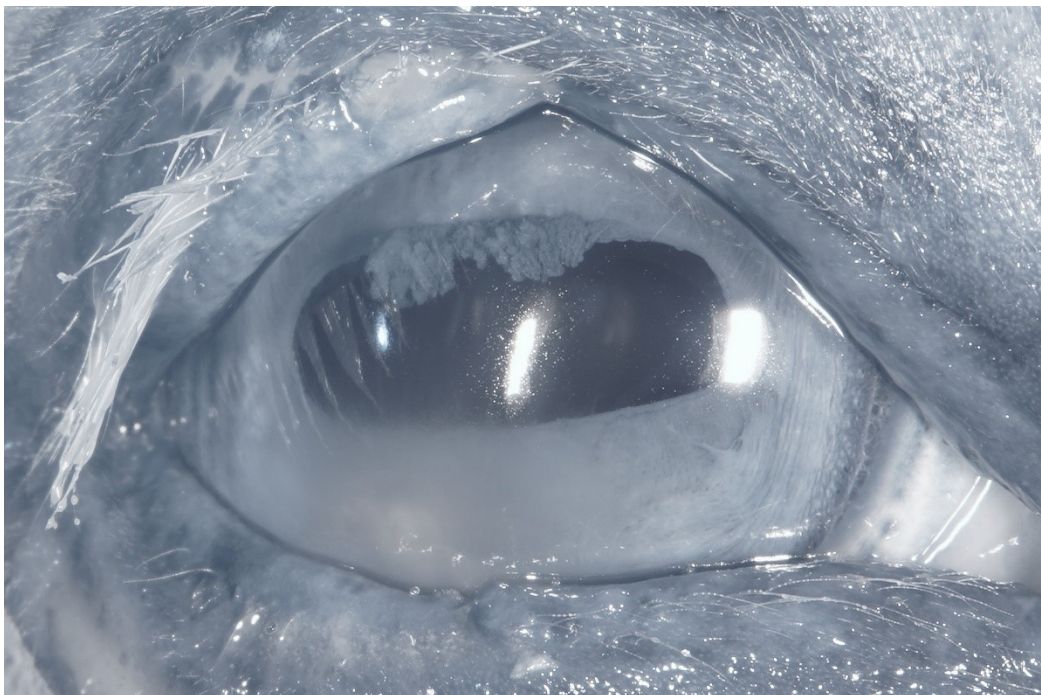


Abbildung 19b: IR-Foto; Frontalansicht

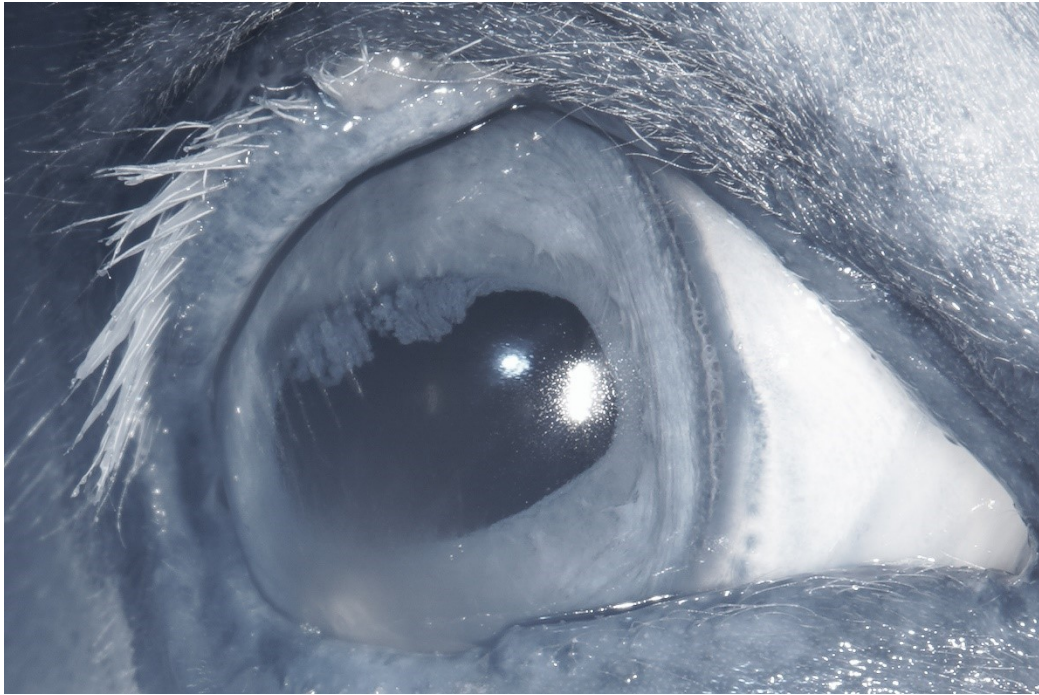


Abbildung 19c: IR-Foto; schräge Ansicht

Abbildung 19a-c: Rechtes Auge eines 16-jährigen Islandpony-Wallach mit stromalem Ulkus im ventralen Bereich der Kornea. Der Ulkus befindet sich in fortschreitender Heilung. (Svenja Maier, 2021)

Im VS-Foto ist das ventrale Drittel der Kornea trüb und man erkennt einen starken einsprossenden Blutgefäßsaum. Wie auch im Beispiel zuvor erscheint die Trübung der Kornea im IR-Foto deutlich transparenter. Das Zentrum des Ulkus zeigt sich im IR-Foto in einem helleren Grauton als die Umgebung.

In Abbildung 19c kann aufgrund der veränderten Perspektive von nasal ausgehend ein größerer Abschnitt der Iris eingesehen werden als in der Frontalansicht in Abbildung 19b.

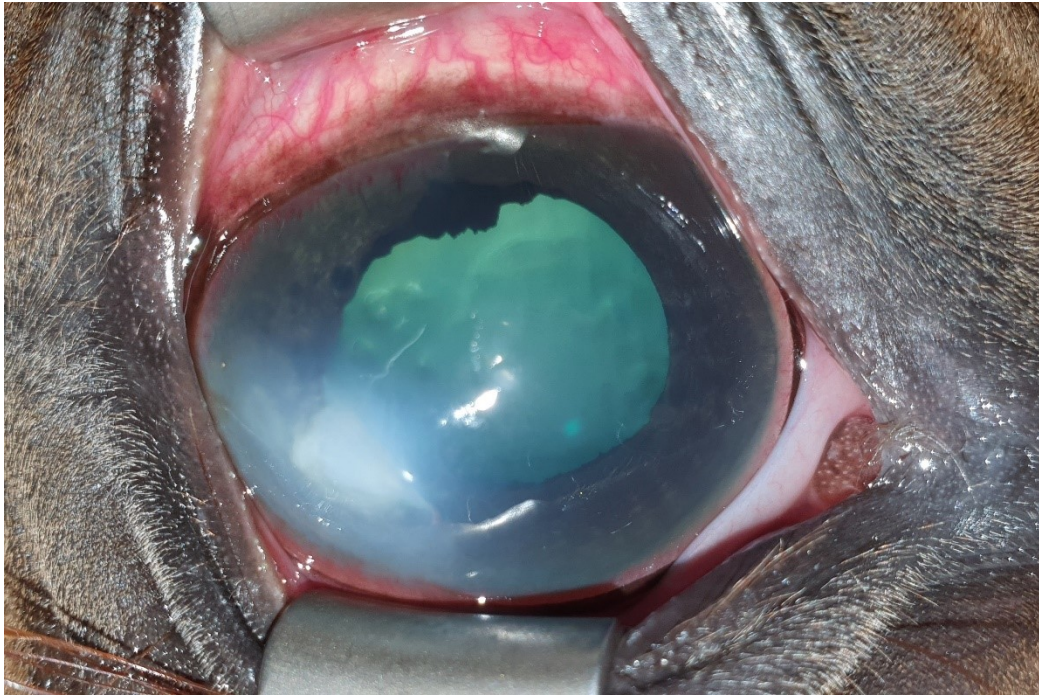
Fall 8

Abbildung 20a: VS-Foto; Frontalansicht

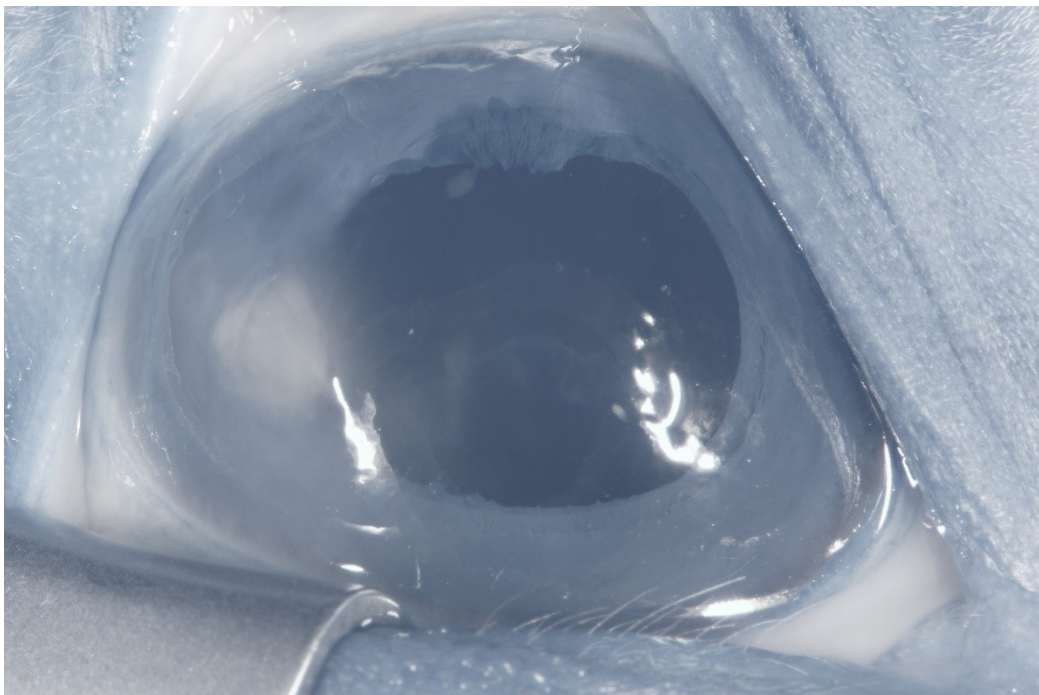


Abbildung 20b: IR-Foto; Frontalansicht

Abbildung 20a,b: Rechtes Auge einer 4-Monate-alten Warmblut-Stute mit einem stark einschmelzenden, stromalen Korneaukulus im temporalen Bereich der Kornea. (Svenja Maier, 2021)

Die Fotos wurden im OP-Saal aufgenommen, kurz bevor ein Bindehautflap aufgenäht wurde.

Der einschmelzende Korneabereich stellt sich im IR-Foto als umrissener hellgrauer Bereich dar. Im VS-Foto ist auch die Umgebung des Ulkus diffus bläulich trüb. Wie in den anderen Beispielen ist diese Trübung im IR-Foto transparenter.

Beide Aufnahmen erscheinen leicht unscharf und schwammig. Dies zeigt sich besonders an der diffusen Reflexion des Blitzlichts. Das Auge wurde im Vorfeld mehrfach gespült.

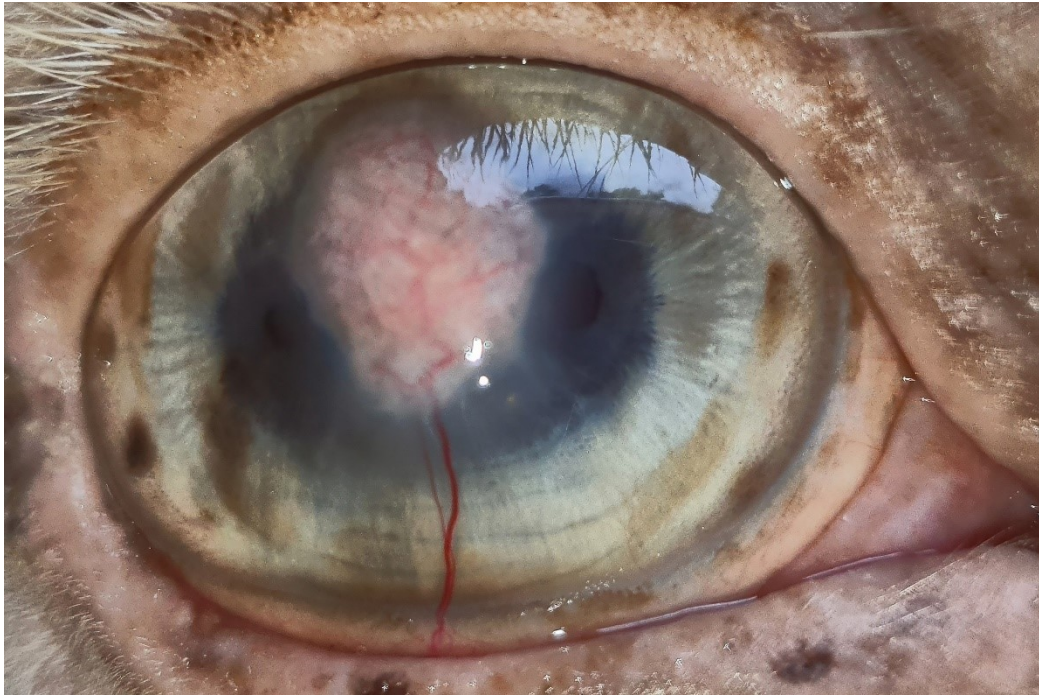
Fall 9

Abbildung 21a: VS-Foto; Frontalansicht

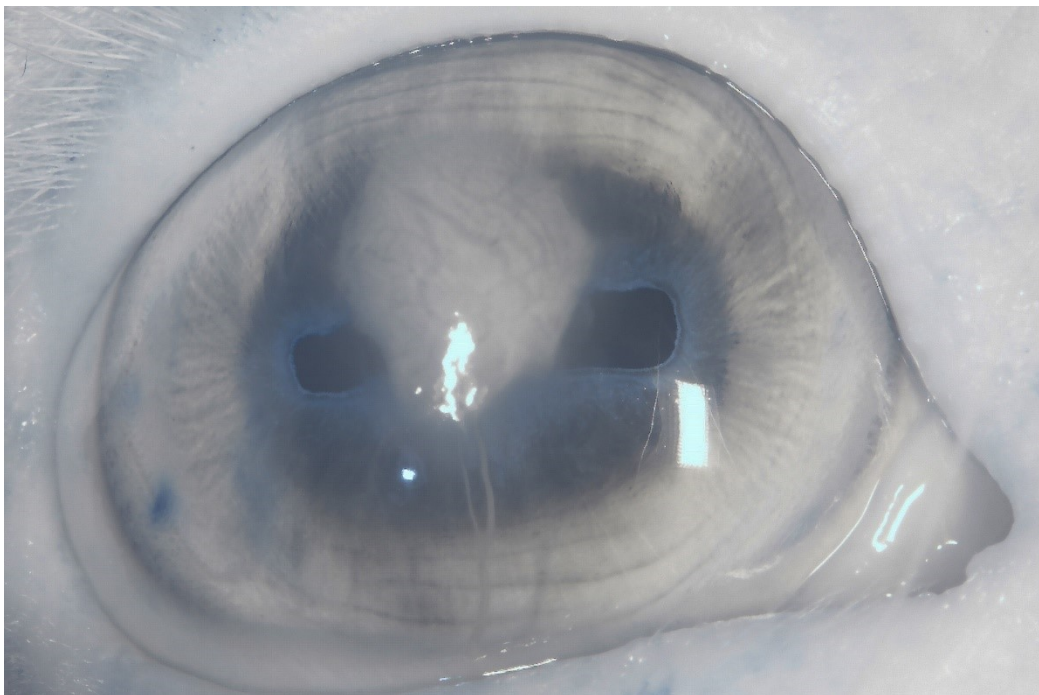


Abbildung 21b: IR-Foto; Frontalansicht

Abbildung 21a,b: Rechtes Auge eines 12-jährigen PRE-Hengstes mit heterochromer Iris. Der Bindehautflap wurde etwa 12 Monate vor der Aufnahme des Fotos zur Versorgung eines Korneaukulus aufgebracht. (Svenja Maier, 2021)

Im IR-Foto sind die Struktur der Iris und die Umrisse der Pupille besser erkennbar als im VS-Foto. Zudem ist die leichte Trübung der Kornea ventral des Bindehautflaps im IR-Foto etwas transparenter und ermöglicht so den Blick auf die darunter gelegene Iris. Der Bindehautflap erscheint in hellen Grautönen und die Gefäße zeichnen sich als feine graue Linien im IR-Foto ab.

Fall 10



Abbildung 22a: VS-Foto; schräge Ansicht



Abbildung 22b: IR-Foto; schräge Ansicht

Abbildung 22a,b: Rechtes Auge eines 13-jährigen Haflinger-Wallachs mit narbiger Trübung der Kornea infolge eines Korneaabszesses. (Svenja Maier, 2021)

Die narbige Trübung im Zentrum der Kornea erscheint im VS-Foto dicht und undurchsichtbar. Im IR-Foto ist diese Trübung nur noch schemenhaft zu erkennen, sodass die Iris und die Umrandung der Pupille vollständig einsehbar sind.

Zudem zeigen sich im IR-Foto weitere Veränderungen, die sonst nur bei seitlicher Einsicht im Rahmen der Augenuntersuchung sichtbar sind. Die fokalen grauen Punkte im Zentrum der Pupille sind Pigmentablagerungen auf der Linsenvorderfläche. Weiterhin zeigt sich nasoventral eine posteriore Synechie.

2.3. Immunmedierte Keratitis

Fall 11



Abbildung 23a: VS-Foto; Frontalansicht



Abbildung 23b: IR-Foto; Frontalansicht

Abbildung 23a,b: Rechtes Auge eines 21-jährigen Islandpony-Wallachs mit immunmediierter Keratitis (IMMK). (Svenja Maier, 2021)

Im VS-Foto zeigen sich von nasoventral mehrere lange, geschlängelte und in ihrem Endbereich stark arborisierte Blutgefäße. Die von dorsal einsprossenden Gefäße sind in dieser Aufnahme aufgrund der Position des Oberlids nicht erkennbar. Die Kornea zeigt sich im VS-Foto nasal und zentral diffus trüb.

Im IR-Foto stellen sich die Blutgefäße als feine graue Linien dar. Der Verzweigungsbereich der Blutgefäße stellt sich in einem ähnlichen Grauton wie die Blutgefäße in diffuser Weise dar und hebt sich dadurch gut von der schwarz erscheinenden Pupille ab. Die Iris ist im IR-Foto vollständiger einsehbar als im VS-Foto.

Fall 12

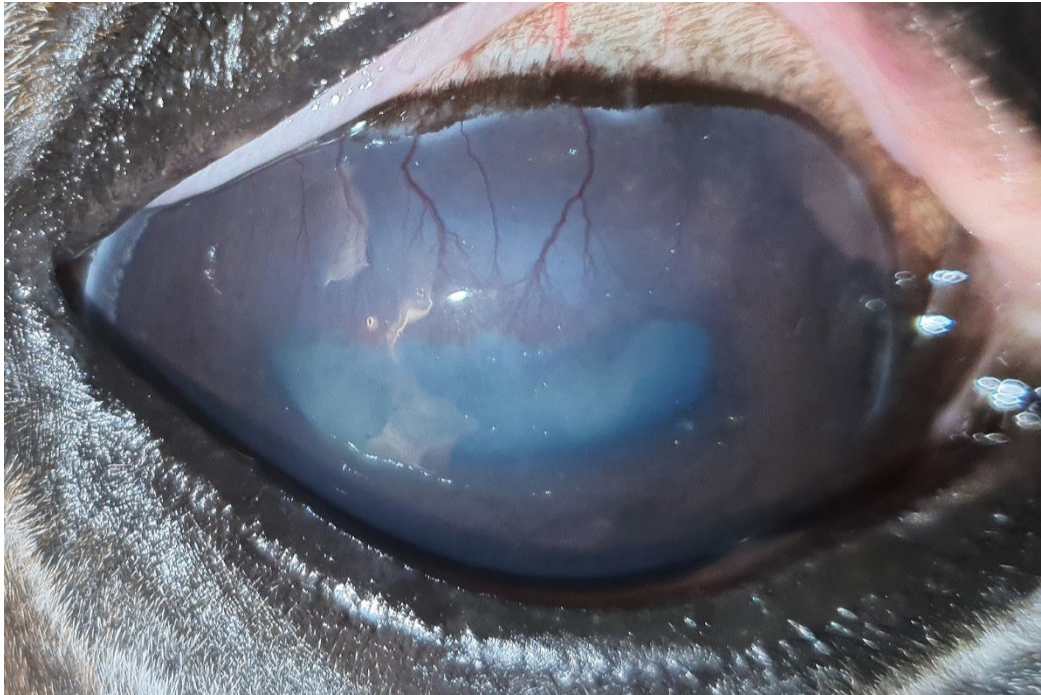


Abbildung 24a: VS-Foto; Frontalansicht

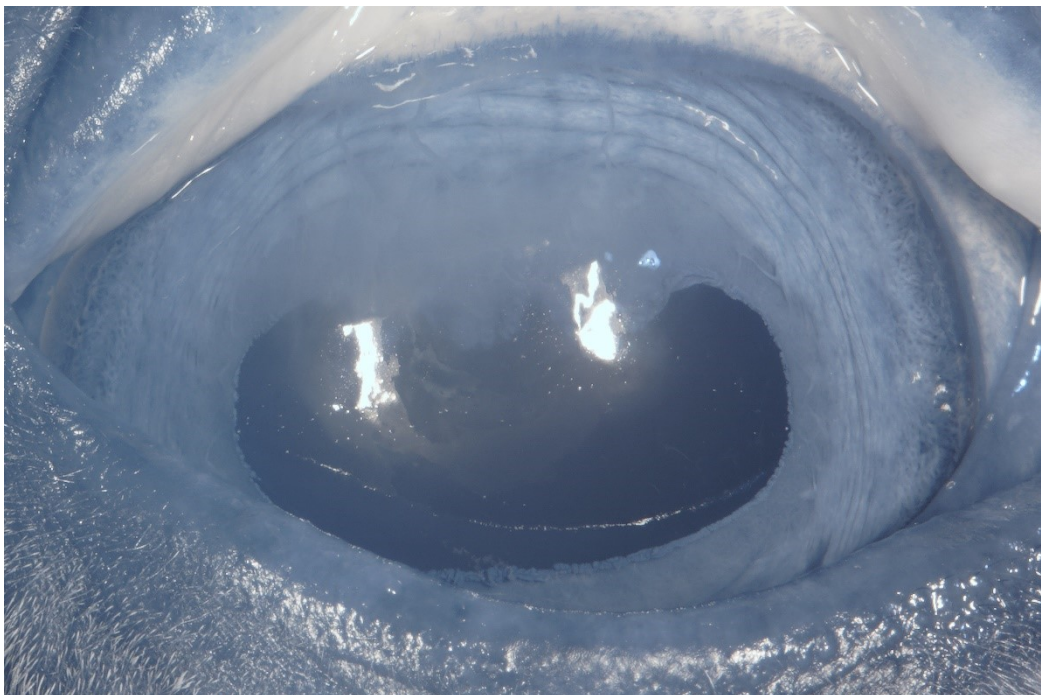


Abbildung 24b: IR-Foto; Frontalansicht

Abbildung 24a,b: Rechtes Auge einer 22-jährigen Deutschen-Reitpony-Stute mit IMMK. (Svenja Maier, 2021)

Im VS-Foto zeigen sich von dorsal einsprossende lange, verzweigte Blutgefäße, in deren Umgebung die Kornea diffus leicht getrübt ist.

Wie im vorherigen Beispiel stellen sich die Blutgefäße im IR-Foto als feine graue Linien dar. In dem Bereich der stärksten Aufzweigung der Gefäße wirkt das IR-Foto einheitlich grau. Die Granula iridica und die angrenzende Iris sind dadurch nur schemenhaft zu erkennen. Die Iris in Limbusnähe ist im dorsalen Bereich jedoch gut einsehbar.

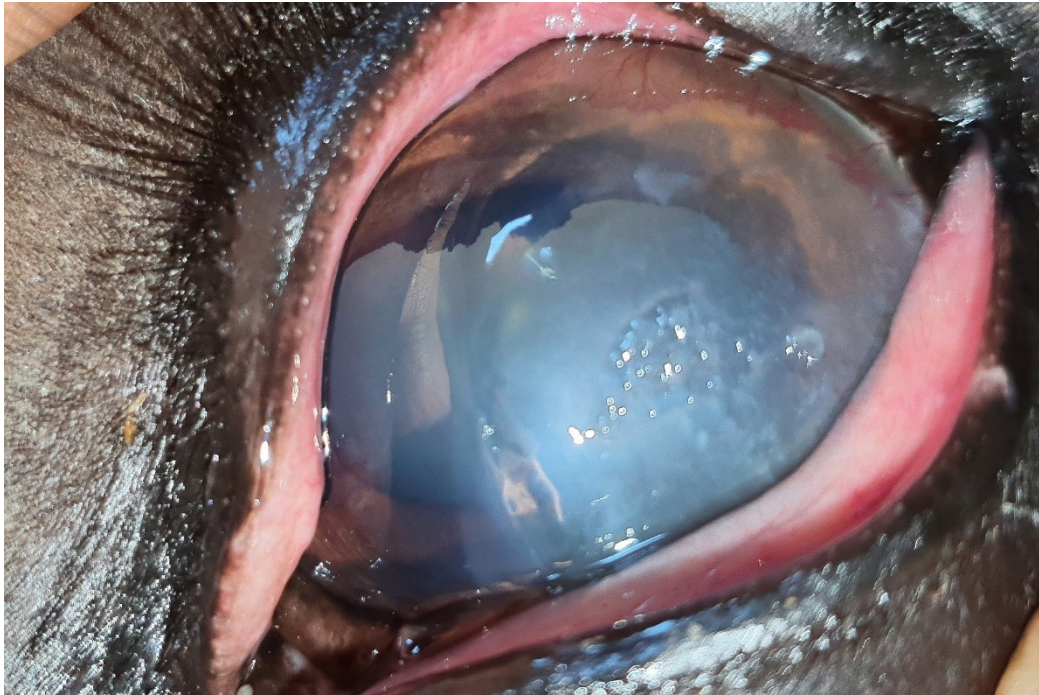
Fall 13

Abbildung 25a: VS-Foto; Frontalansicht

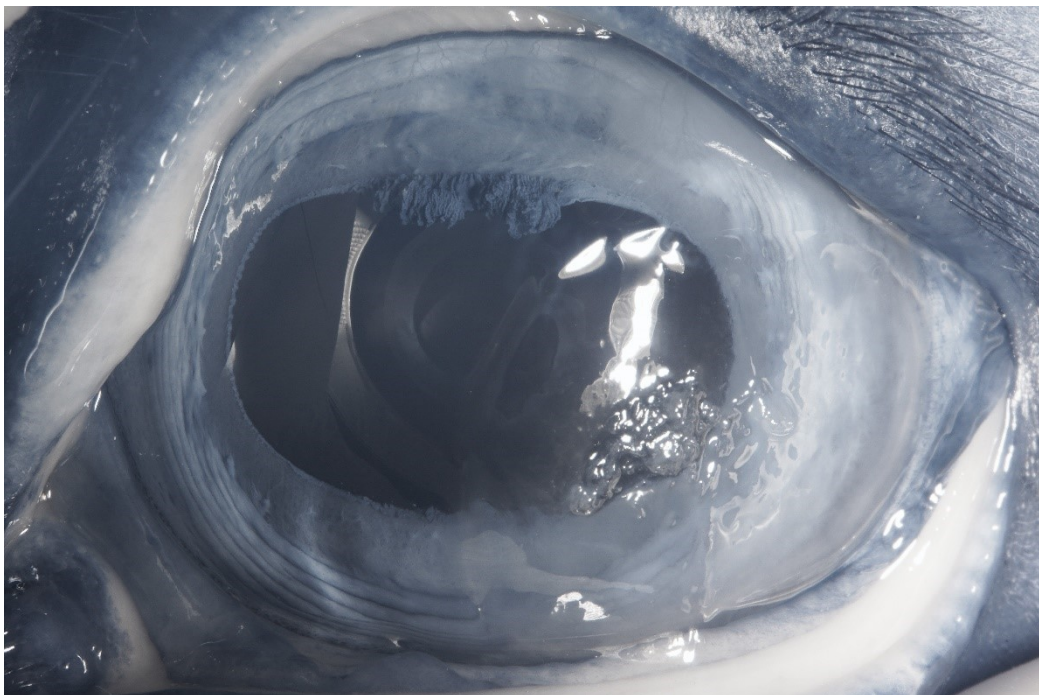


Abbildung 25b: IR-Foto; Frontalansicht

Abbildung 25a,b: Linkes Auge eines 16-jährigen Warmblut-Wallachs, der etwa eine Woche vor der Aufnahme eine Keratektomie aufgrund von IMMK erhalten hatte. (Svenja Maier, 2021)

Im VS-Foto erscheint die Kornea zentroventrotemporal diffus trüb und uneben. Im IR-Foto ist diese Trübung deutlich transparenter, sodass die Iris besser einsehbar ist. Der uneben wirkende Bereich der Kornea reflektiert das Blitzlicht in diffuser Weise. Die von dorsotemporal einsprossenden Blutgefäße stellen sich, wie auch in den Aufnahmen zuvor sichtbar, im IR-Foto als feine graue Linien dar.

Fall 14

Abbildung 26a: VS-Foto; Frontalansicht



Abbildung 26b: IR-Foto; Frontalansicht

Abbildung 26a,b: Rechtes Auge eines 16-jährigen Shetlandpony-Wallachs mit chronisch-persistierender zentrotemporaler Trübung der Kornea und Verdachtsdiagnose einer IMMK. (Svenja Maier, 2021)

Die im VS-Foto sichtbare Trübung kann im IR-Foto nicht mehr nachvollzogen werden.
Die Iris ist vollständig einsehbar.

2.4. Uveitis

Fall 15

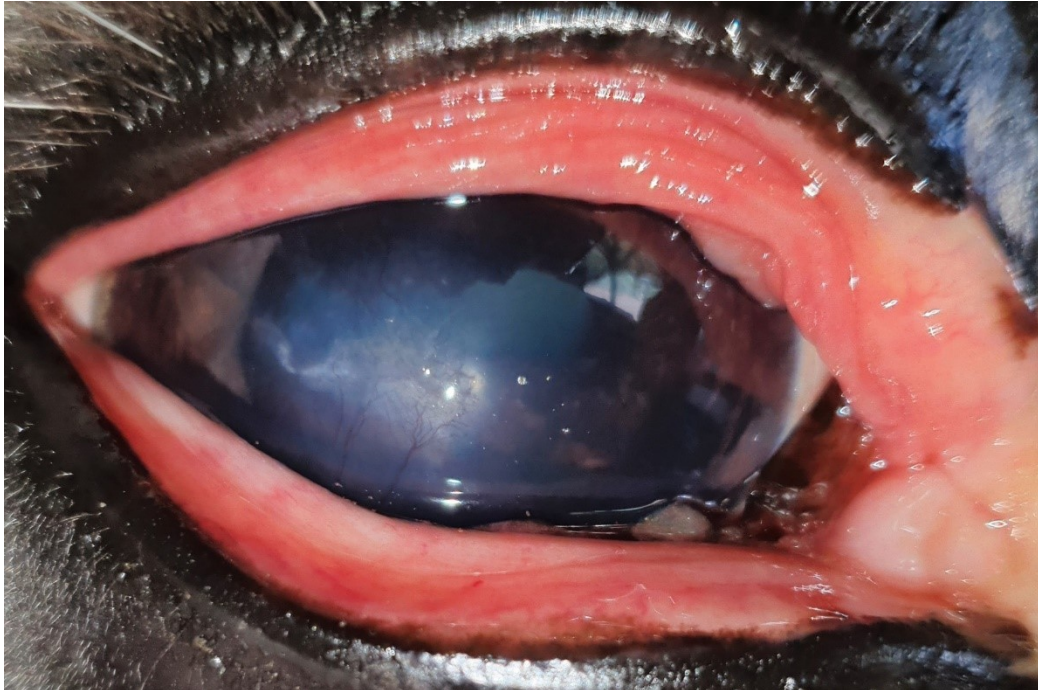


Abbildung 27a: VS-Foto; Frontalansicht

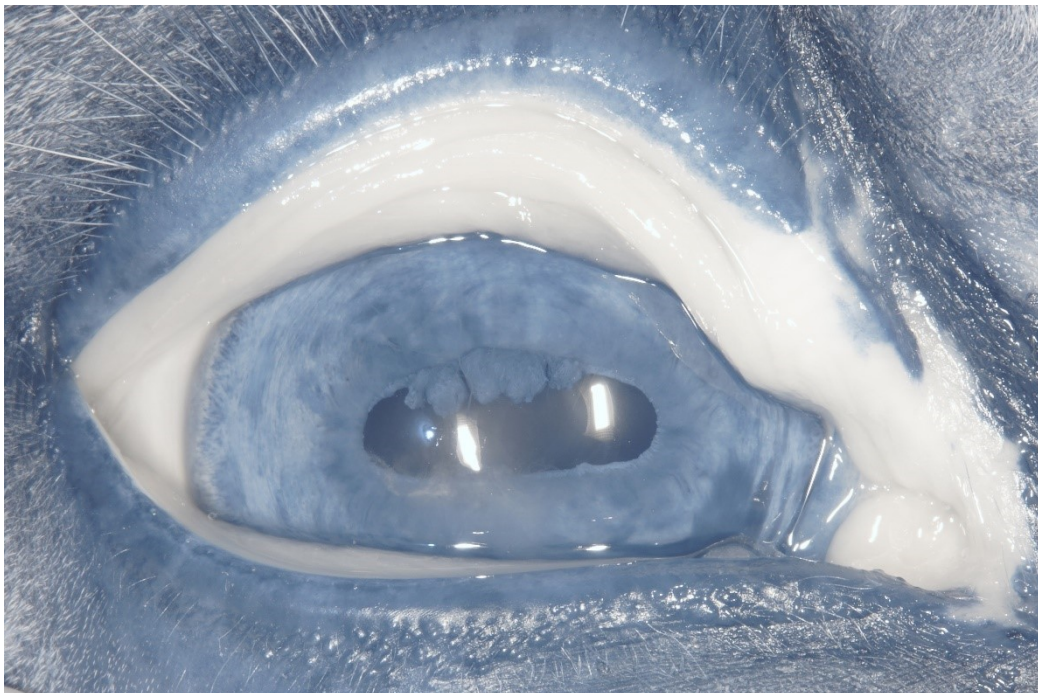


Abbildung 27b: IR-Foto; Frontalansicht

Abbildung 27a,b: Rechtes Auge eines 22-jährigen Knabstrupper-Wallachs mit Tigerscheckenuveitis. (Svenja Maier, 2021)

Im VS-Foto zeigen sich eine stark hyperämische Konjunktiva sowie lange einsprossende Blutgefäße von ventrotemporal mit einer umgebenden geringgradigen Trübung der Kornea. Die Iris und die Granula iridica sind nur als Umrisse zu erkennen.

Im IR-Foto stellt sich die gerötete Konjunktiva weiß dar. Der getrübe Bereich der Kornea ist nahezu vollständig transparent und die Iris und die Granula iridica sind gut einsehbar. Die Granula iridica zeigen eine beginnende Atrophie.

Fall 16

Abbildung 28a: VS-Foto; Frontalansicht

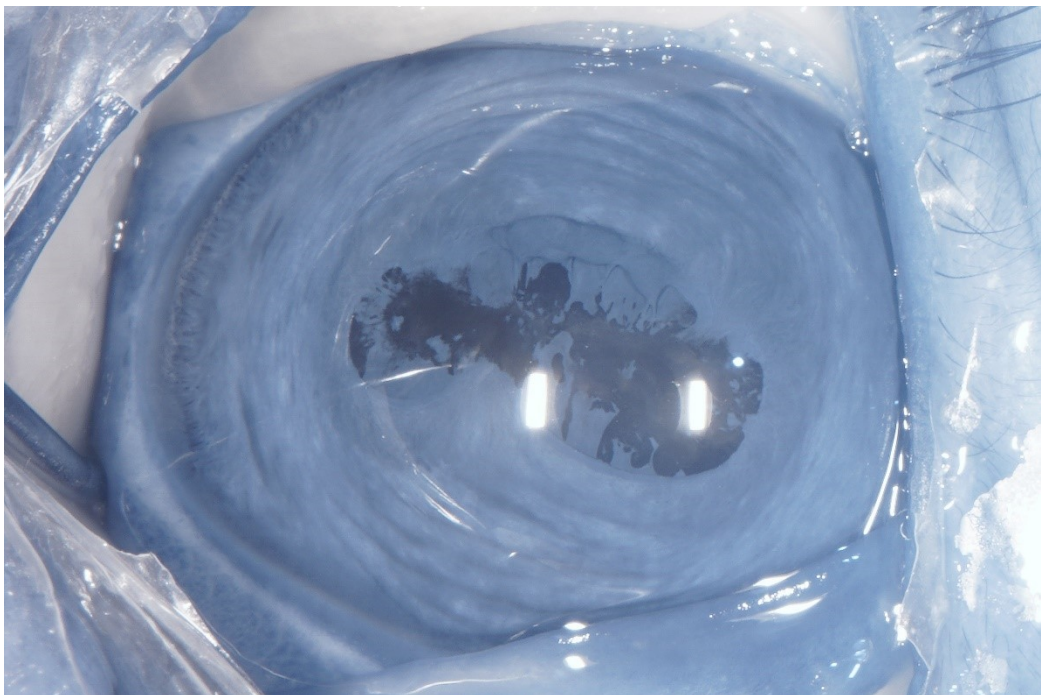


Abbildung 28b: IR-Foto; Frontalansicht

Abbildung 28a,b: Rechtes Auge eines 18-jährigen Warmblut-Wallachs mit equiner rezidivierender Uveitis (ERU) in fortgeschrittenem Stadium. (Svenja Maier, 2021)

Das IR-Foto wurde im OP-Saal vor der Durchführung einer Vitrektomie aufgenommen.

Durch posteriore Synechien, also Verklebungen der Iris mit der Linsenvorderfläche, ist die ovale Form der Pupille verloren gegangen. Die Iris stellt sich im Sinne einer Hyperpigmentation im VS-Foto einheitlich dunkel dar. Die Irisoberfläche und die Überreste der Granula iridica können hier nicht näher differenziert werden.

Im IR-Foto kann durch feine Kontrastunterschiede das Oberflächenrelief genannter Strukturen gut erkannt werden.

Der im VS-Foto stark gelbe Fundusreflex erscheint im IR-Foto schwarz.

Fall 17



Abbildung 29a: VS-Foto des linken Auges; Frontalansicht

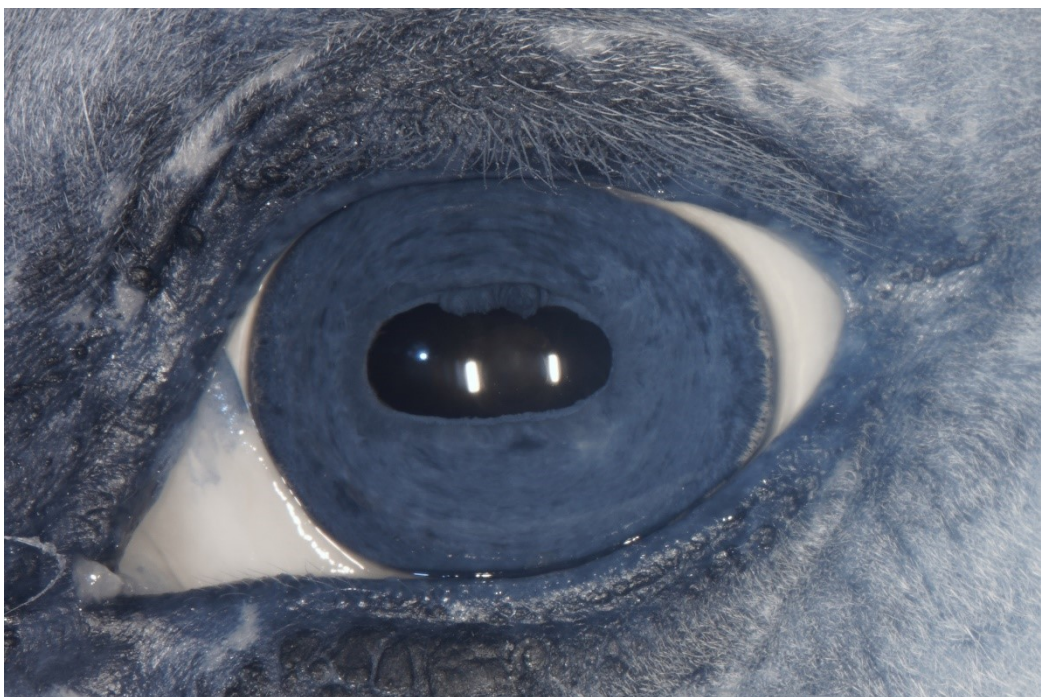


Abbildung 29b: IR-Foto des linken Auges; Frontalansicht

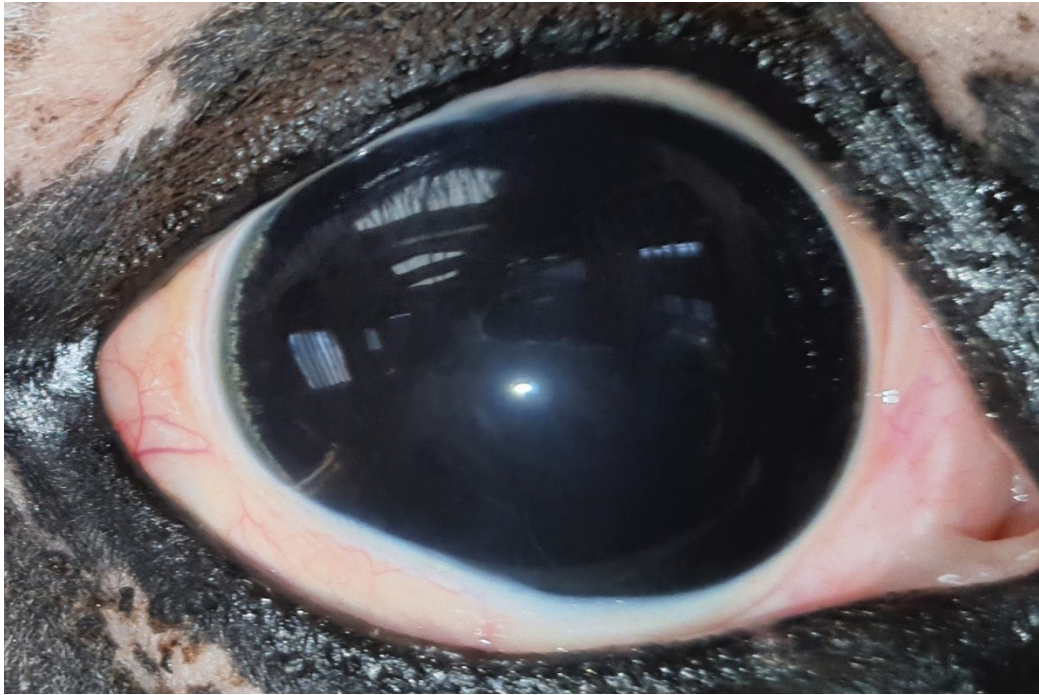


Abbildung 29c: VS-Foto des rechten Auges; Frontalansicht

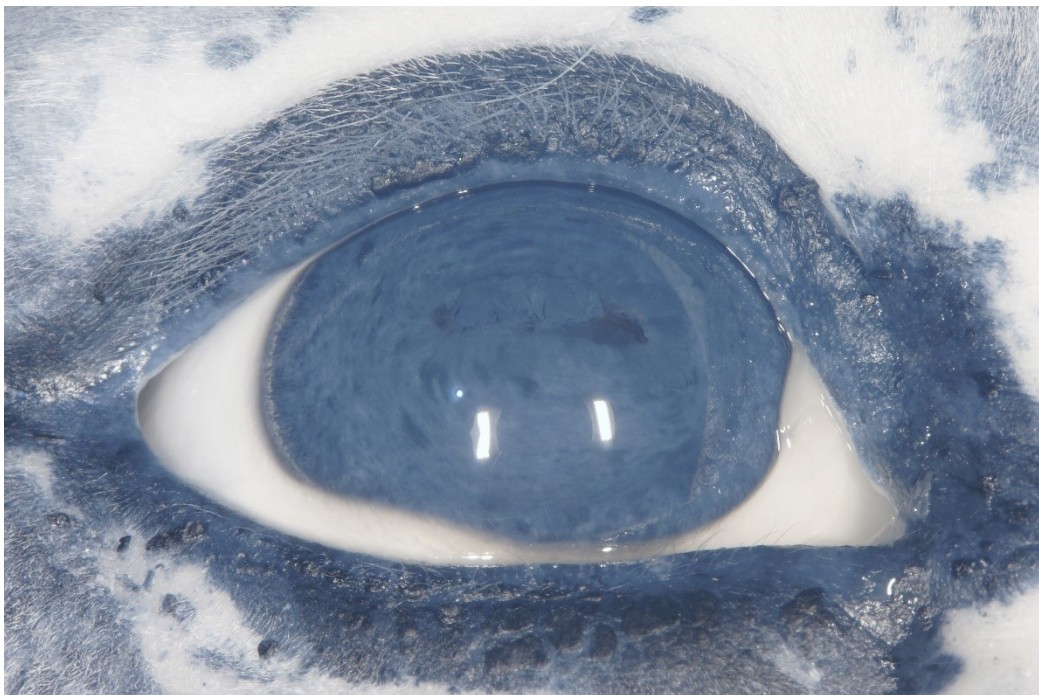


Abbildung 29d: IR-Foto des rechten Auges; Frontalansicht

Abbildung 29a-d: Beide Augen eines 11-jährigen Deutschen-Reitpferd-Wallachs mit Tigerscheckenuveitis in beiden Augen. (Svenja Maier, 2021)

Beide Augen zeigen im VS-Foto eine deutliche Irishyperpigmentation und eine vermehrt gerötete sklerale Konjunktiva.

Im VS-Foto des linken Auges fällt zudem der gelblich-grüne Fundusreflex mit schlierig-trüben Verdichtungen im Bereich des Glaskörpers auf. Diese Schlieren wurden durch die Untersuchung mit der Spaltlampe im Bereich des Glaskörpers lokalisiert. Im IR-Foto des linken Auges erkennt man diffuse graue Bereiche innerhalb der ansonsten schwarz erscheinenden Pupille. Diese können als Entsprechung der Veränderungen im Glaskörper gesehen werden.

Durch eine flächige posteriore Synechie liegt im rechten Auge ein weitgehender Verlust der Pupillenöffnung vor.

Die IR-Fotos zeigen weiterhin deutlich die Oberflächenstruktur der Iris sowie die Atrophie der Granula iridica des linken Auges.

Fall 18



Abbildung 30a: VS-Fotos des linken Auges; Frontalansicht

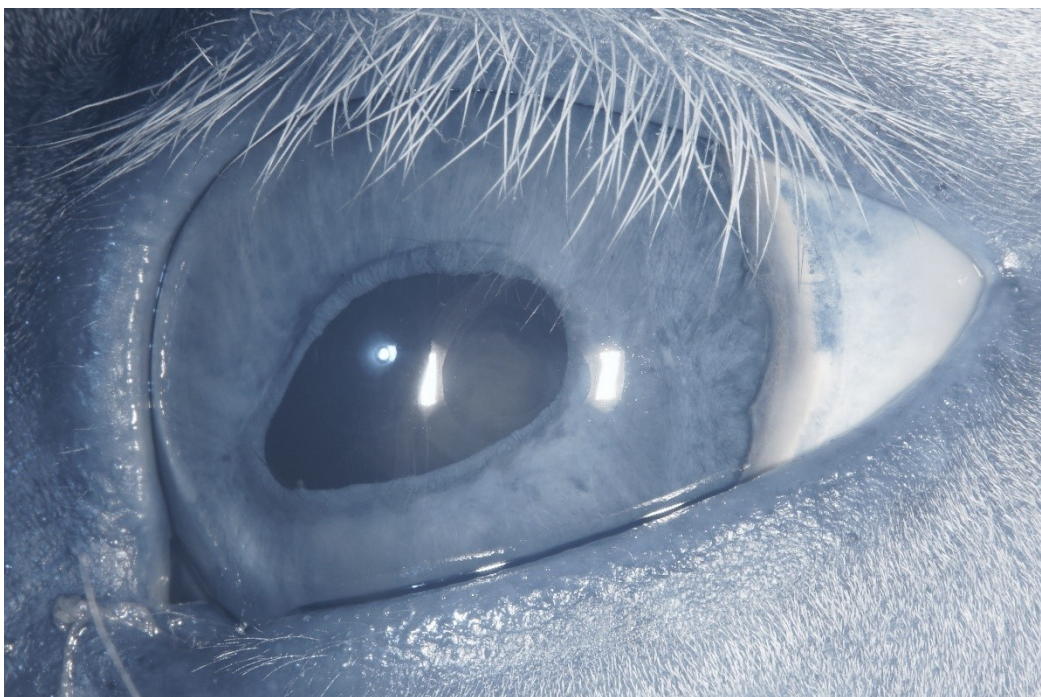


Abbildung 30b: IR-Foto des linken Auges; schräge Ansicht

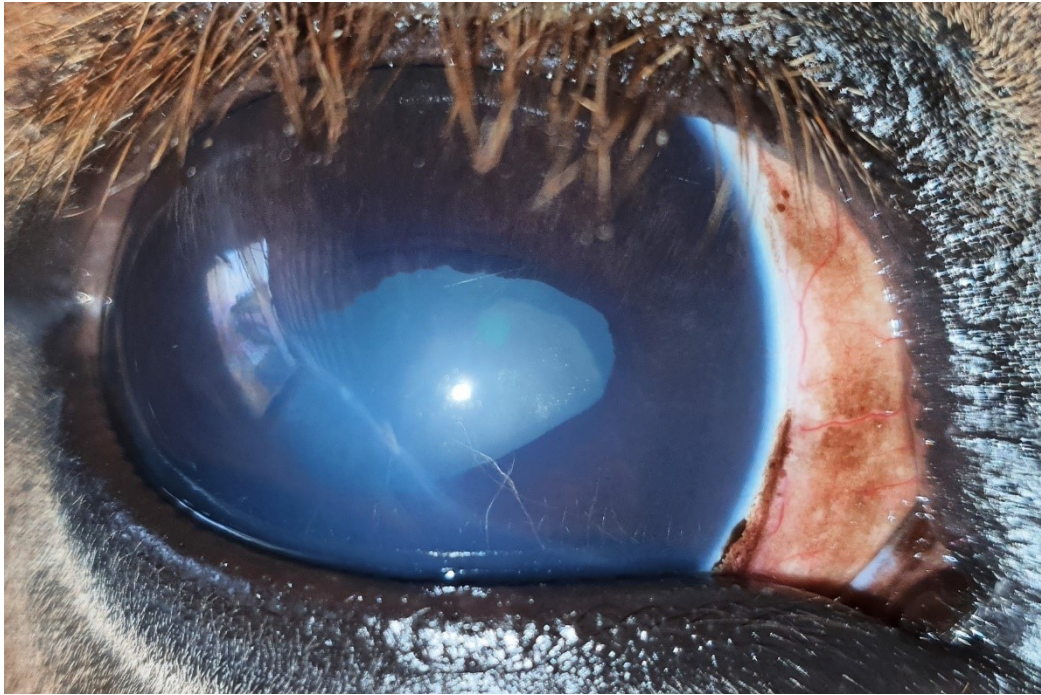


Abbildung 30c: VS-Foto des rechten Auges; schräge Ansicht

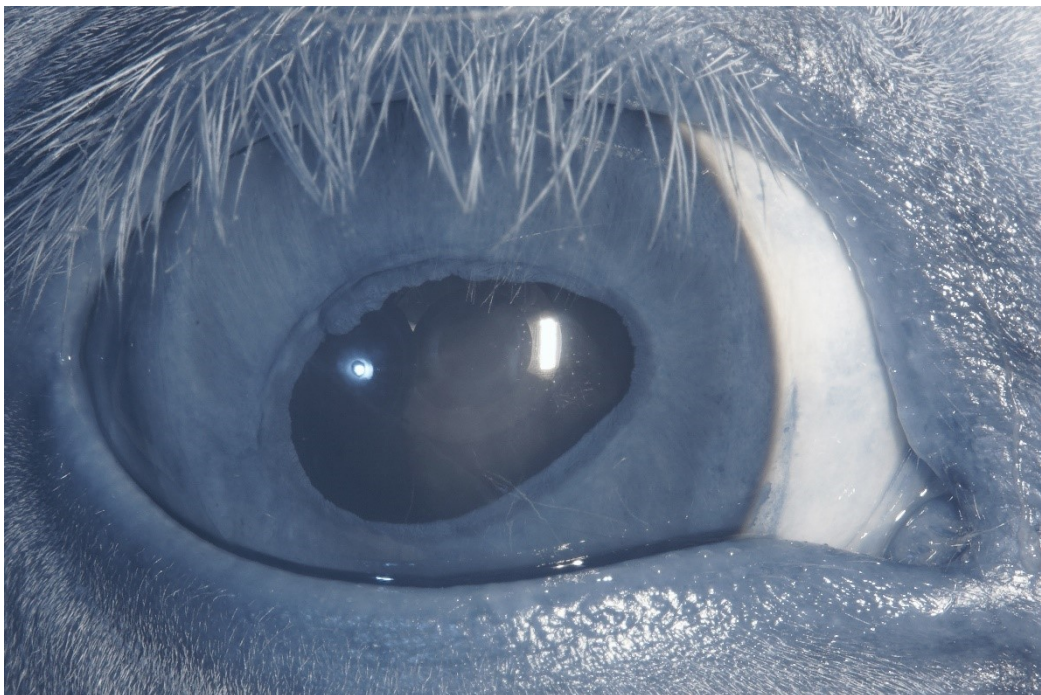


Abbildung 30d: IR-Foto des linken Auges; schräge Ansicht

Abbildung 30a-d: Beide Augen einer 15-jährigen Kaltblut-Stute mit ERU und infolgedessen einem Sekundärglaukom und einer maturen Katarakt mit Linsenluxation. (Svenja Maier, 2021)

Die Kornea beider Augen zeigt im VS-Foto lineare weiße Striae, diese sind im IR-Foto nur bei starker Vergrößerung auszumachen und erscheinen nahezu transparent.

Die Linsenluxation und die Katarakt stellen sich im VS-Foto ebenfalls deutlicher dar als im IR-Foto. Im VS-Foto hebt sich die verdichtete, weißlich erscheinende Linse gut sichtbar von der sonst bläulich erscheinenden Pupille ab. Im IR-Foto stellt sich der entsprechende Bereich in einem helleren Grauton als die schwarze Pupille dar.

Weitere Befunde, die im VS- und IR-Foto dargestellt werden können, sind die Irishyperpigmentation, die unsymmetrische Pupillenöffnung und der verdichtet erscheinende Angulus iridocornealis.

Die Struktur der Iris und die Atrophie der Granula iridca zeigen sich im IR-Foto deutlicher als im VS-Foto.

Fall 19



Abbildung 31a: VS-Foto; Frontalansicht

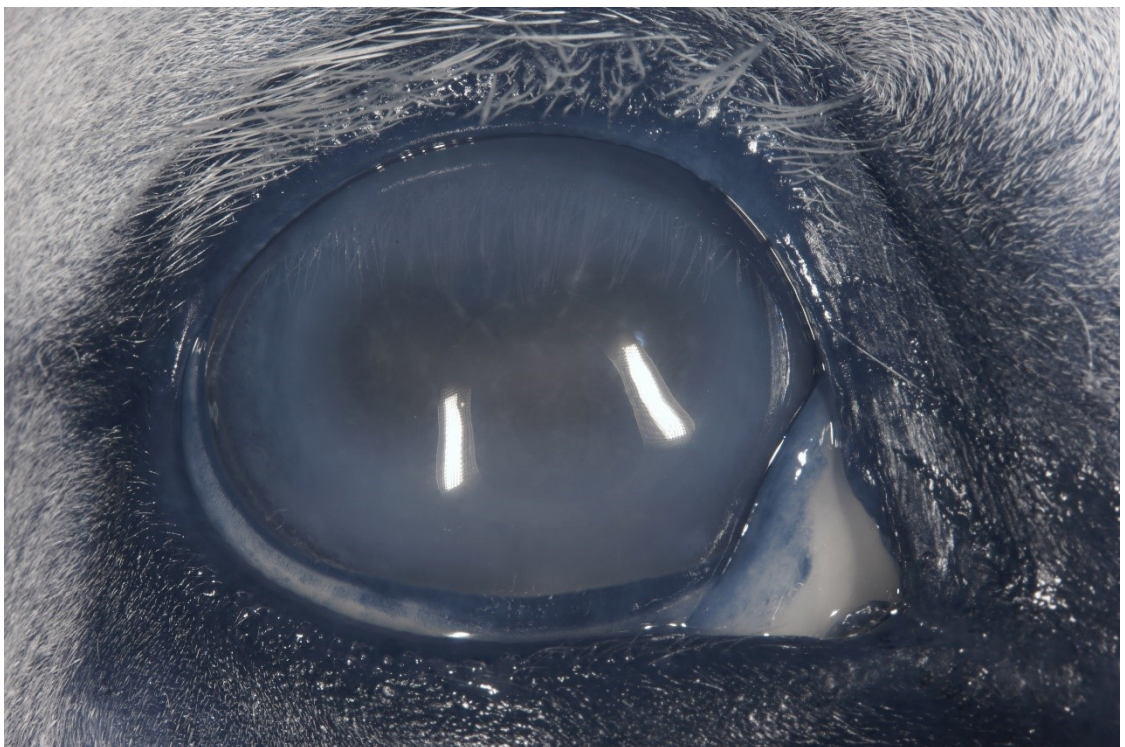


Abbildung 31b: IR-Foto; Frontalansicht

Abbildung 31a,b: Rechtes Auge einer 4-jährigen Warmblut-Stute mit akuter Uveitis und

hochgradigem Hypopyon. (Svenja Maier, 2021)

Im VS-Foto ist die vordere Augenkammer nahezu komplett mit Fibrin gefüllt. Die dahinter gelegenen Strukturen sind nicht einsehbar.

Im IR-Foto ist der Blick auf die Iris und die Pupillenöffnung frei, auch wenn sich diese Strukturen unscharf darstellen.

Fall 20



Abbildung 32a: VS-Foto; Frontalansicht

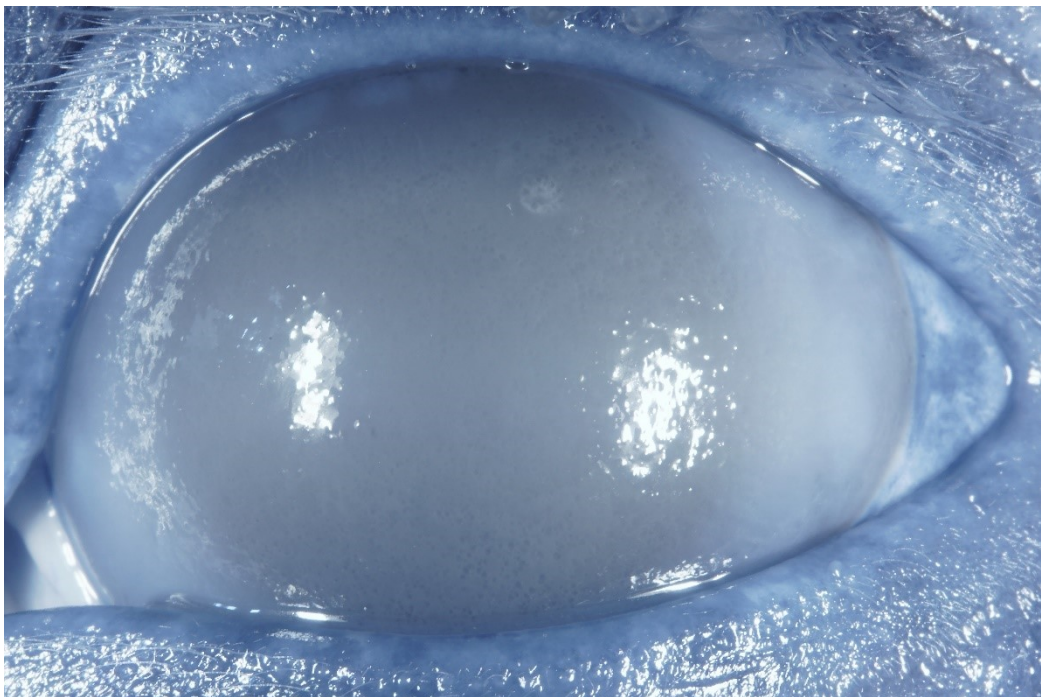


Abbildung 32b: IR-Foto; Frontalansicht

Abbildung 32a,b: Linkes Auge eines Warmblut-Wallachs unbekanntes Alters mit ERU und Sekundärglaukom. (Svenja Maier, 2021)

Der Umriss der weit geöffneten Pupille ist in beiden Aufnahmen nur schemenhaft zu erkennen. Das IR-Foto liefert in diesem Fall keine weiteren Informationen in Bezug auf das Augeninnere.

In beiden Aufnahmen fällt die diffuse Reflexion des Blitzlichts auf. Bei einer gesunden, glatten Kornea stellt sich die Reflexion im Gegensatz hierzu scharf umrissen dar.

Fall 21

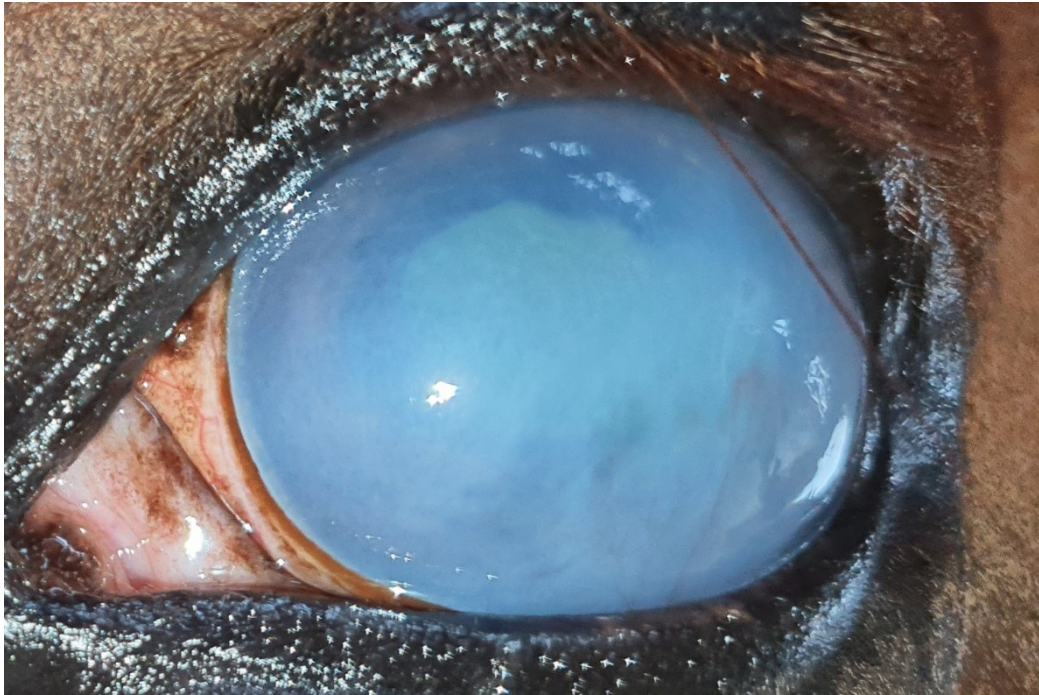


Abbildung 33a: VS-Foto; Frontalansicht

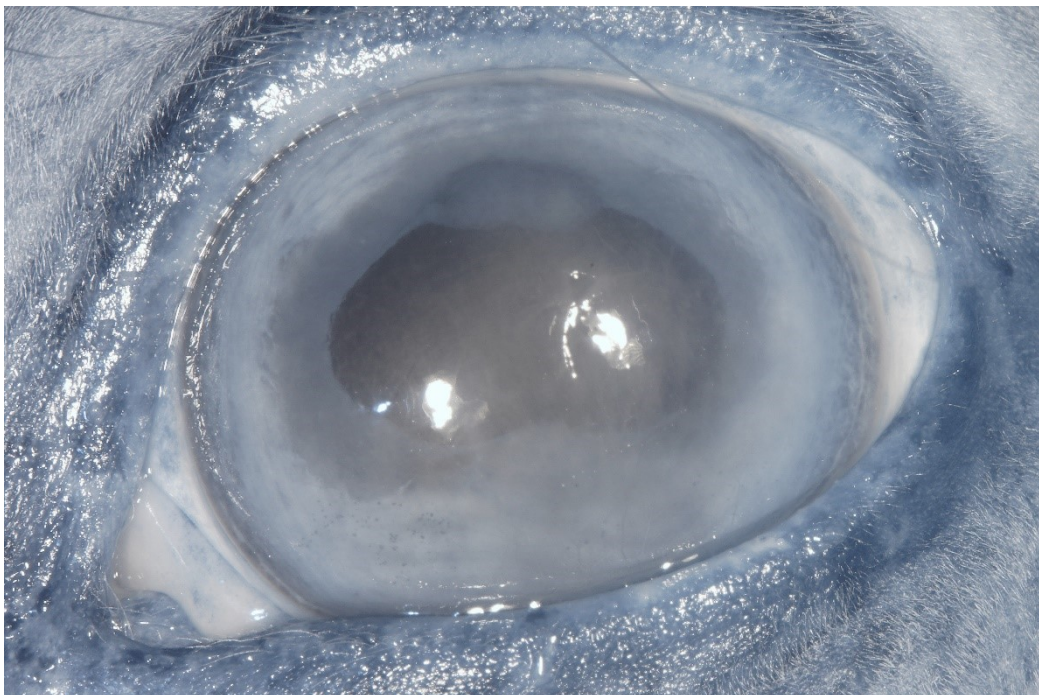


Abbildung 33b: IR-Foto; Frontalansicht

Abbildung 33a,b: Linkes Auge eines 15-jährigen Warmblut-Wallachs mit ERU und Sekundärglaukom. (Svenja Maier, 2021)

Die Kornea erscheint im VS-Foto diffus bläulich trüb. Die dahinter gelegenen Strukturen sind nur schemenhaft erkennbar.

Im IR-Foto ist die Kornea deutlich transparenter. Der Umriss der Pupille und die Iris sind gut zu erkennen. Die Oberfläche der Granula iridica wirkt glatter, im Sinne einer Atrophie, im Vergleich zum normalen Erscheinungsbild.

2.5. Linsentrübung

Fall 22



Abbildung 34a: VS-Foto; Frontalansicht



Abbildung 34b: IR-Foto; schräge Ansicht

Abbildung 34a,b: Rechtes Auge eines 26-jährigen Pony-Mix-Wallachs mit altersbedingter Linsentrübung. (Svenja Maier, 2021)

Im VS-Foto erscheint die Pupille bläulich mit einer weißlichen, verwaschen wirkenden Aufhellung im Zentrum.

Im IR-Foto stellt sich die Linsentrübung in verschiedenen Grautönen in der sonst schwarzen Pupille dar und ist diesem Fall deutlicher zu erkennen.

Fall 23

Abbildung 35a: VS-Foto; Frontalansicht

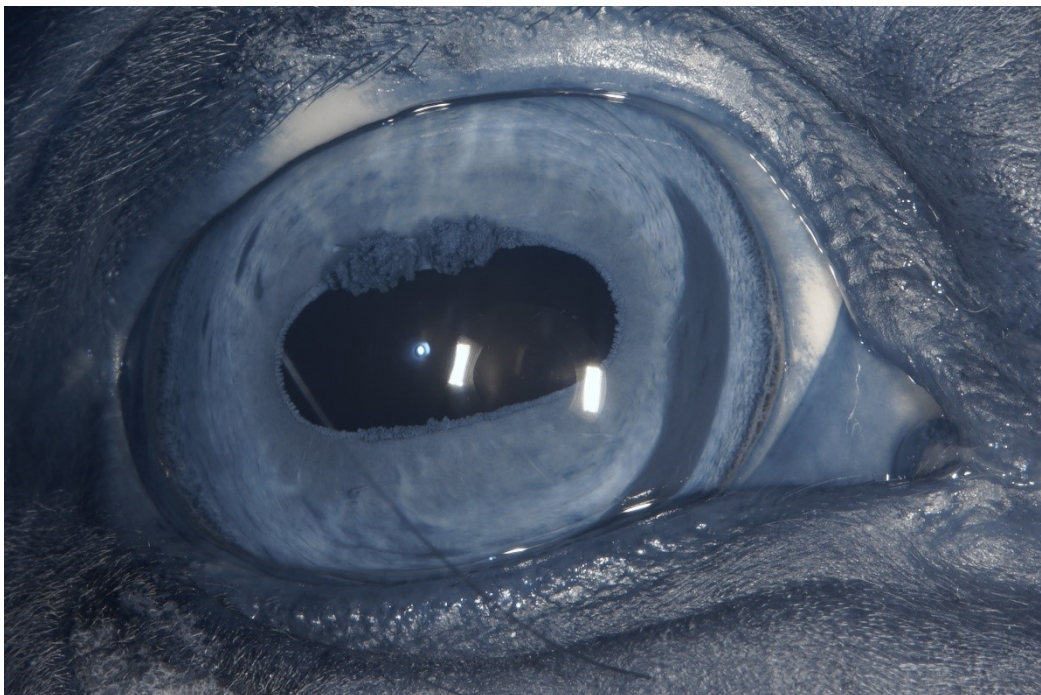


Abbildung 35b: IR-Foto; schräge Ansicht

Abbildung 35a,b: Rechtes Auge einer 20-jährigen Warmblut-Stute mit altersbedingter geringgradiger Linsentrübung und starker fokaler länglicher Pigmentierung der Iris im nasalen Bereich. (Svenja Maier, 2021)

Wie im Beispiel zuvor stellt sich die Linsentrübung im VS-Foto als weißliche Verfärbung in der sonst bläulichen Pupille und im IR-Foto als Abstufung zur schwarzen Pupille in einem helleren Grauton dar.

Der große Irisnävus kann im IR-Foto deutlicher von der Umgebung abgegrenzt werden als im VS-Foto.

Fall 24



Abbildung 36a: VS-Foto des linken Auges; schräge Ansicht

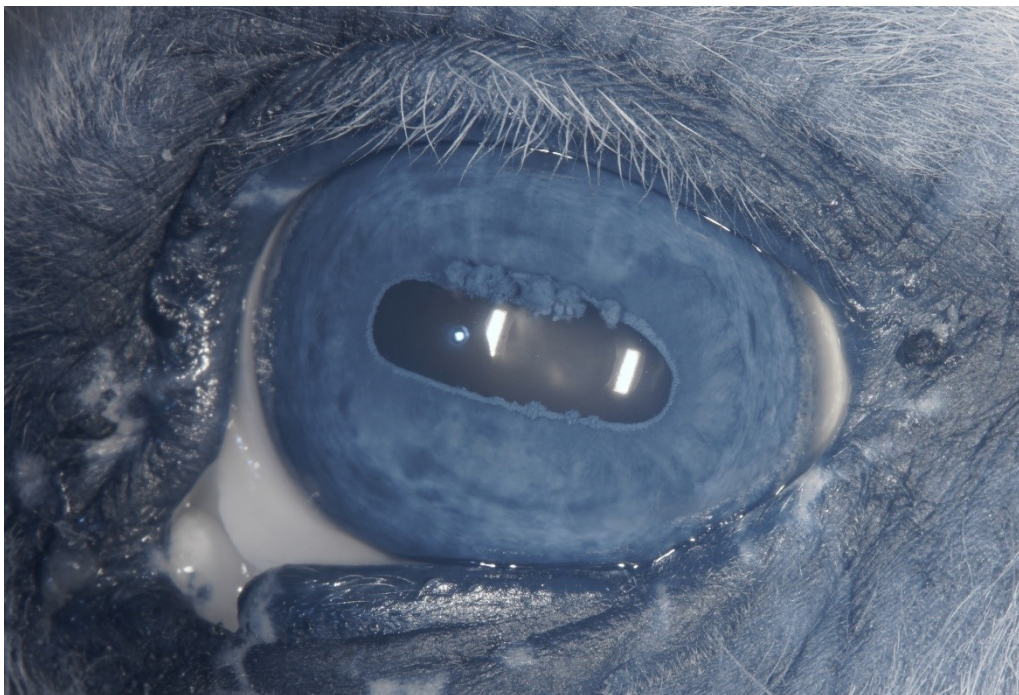


Abbildung 36b: IR-Foto des linken Auges; Frontalansicht

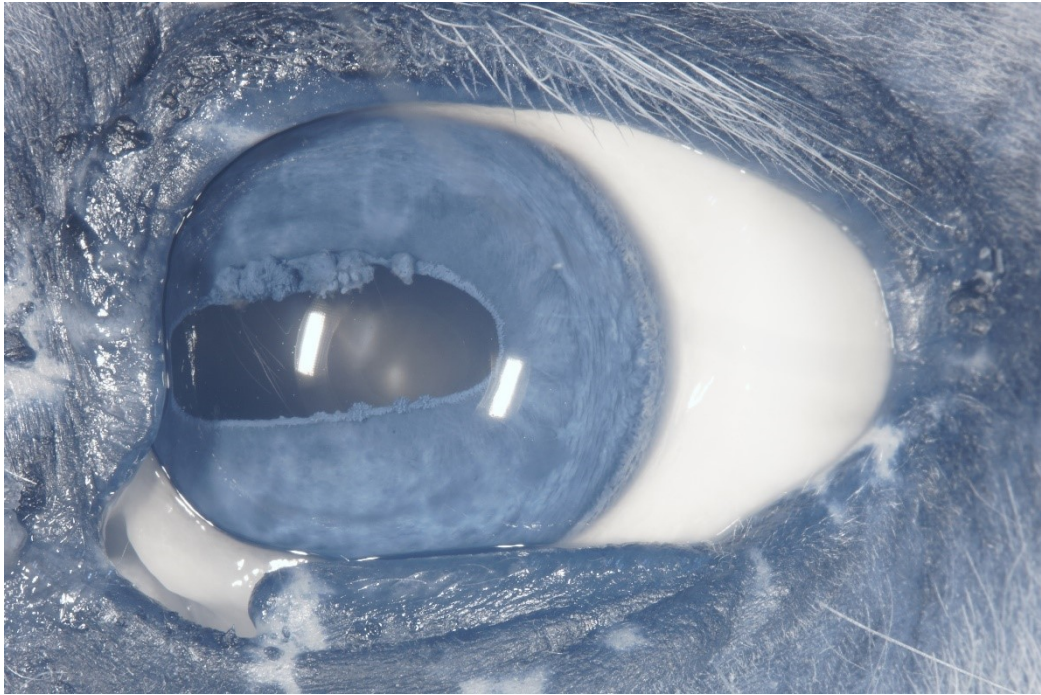


Abbildung 36c: IR-Foto des linken Auges; schräge Ansicht

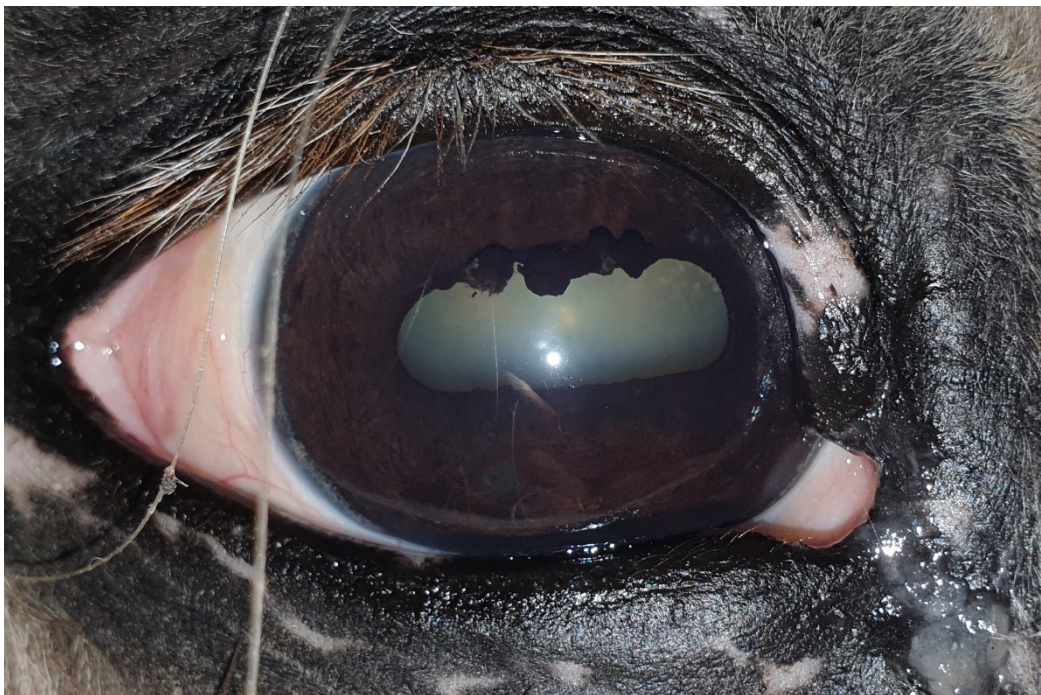


Abbildung 36d: VS-Foto des rechten Auges; Frontalansicht

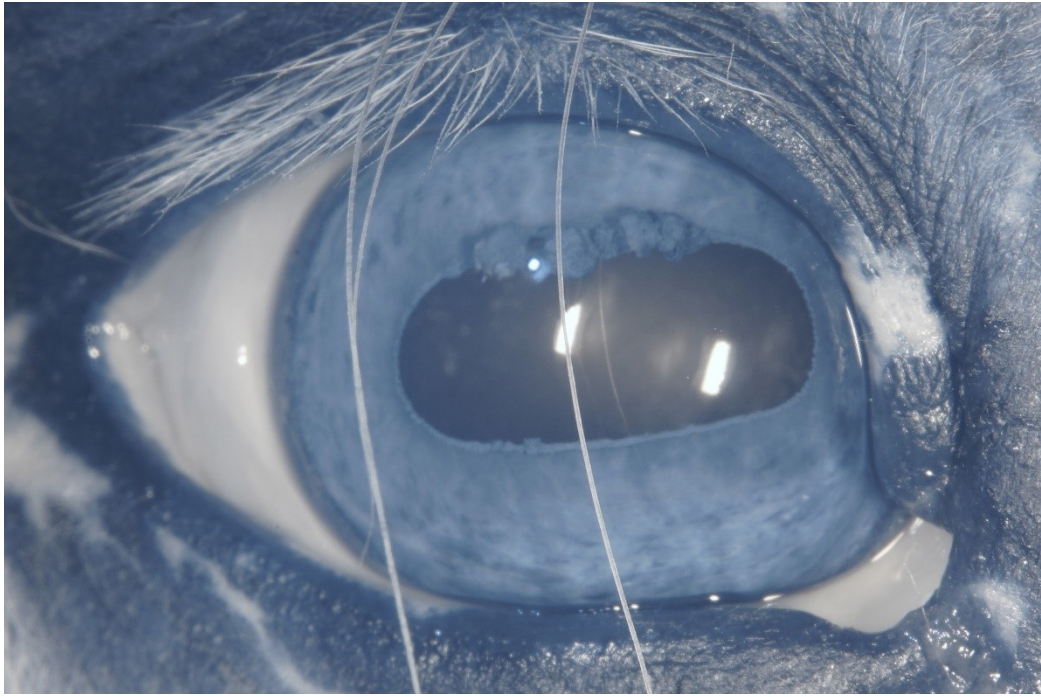


Abbildung 36e: IR-Foto des rechten Auges; Frontalansicht

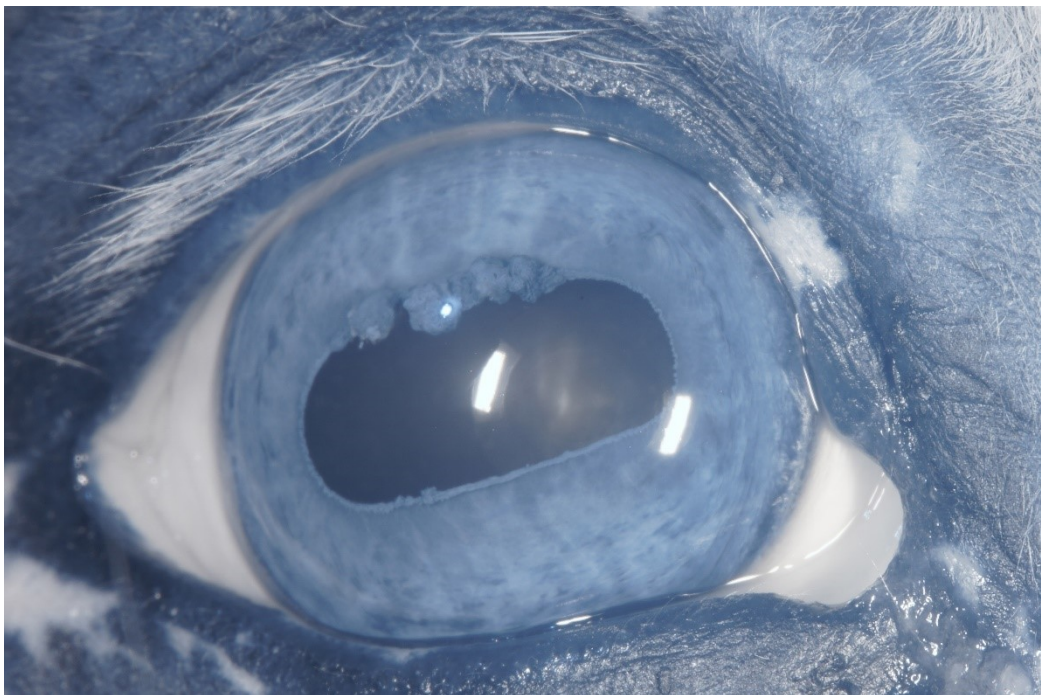


Abbildung 36f: IR-Foto des rechten Auges; schräge Ansicht

Abbildung 36a-f: Beide Augen einer 26-jährigen Shetlandpony-Stute mit Menschaugen und altersbedingter Linsentrübung. (Svenja Maier, 2021)

Die beidseitige Linsentrübung stellt sich in den VS-Fotos nur undeutlich dar. In den IR-Fotos sind deutlich aufgehellte Bereiche in der sonst schwarzen Pupille sichtbar. Pro Auge sind hier jeweils zwei IR-Fotos dargestellt. Eines der Fotos zeigt eine Frontalansicht des Auges und das andere Foto eine schräge Ansicht. Je nach Ansicht ist das Ausmaß an aufgehellten Bereichen unterschiedlich groß.

Fall 25



Abbildung 37a: VS-Foto; Frontalansicht



Abbildung 37b: IR-Foto; Frontalansicht

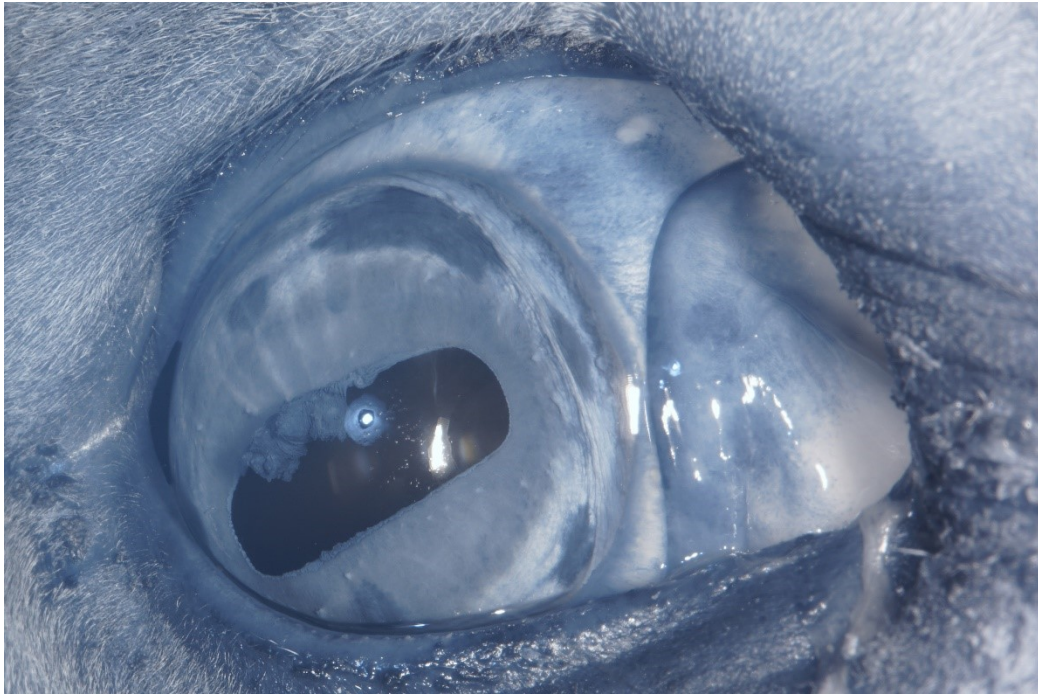


Abbildung 37c: IR-Foto; schräge Ansicht

Abbildung 37a-c: Rechtes Auge eines 29-jährigen Westphalen-Wallachs mit altersbedingter Linsentrübung und mehreren Irisnävi. Der Wallach hatte vor mehreren Jahren eine Lidoperation, sodass der Lidschluss nasal unvollständig ist. (Svenja Maier, 2021)

Die Linsentrübung zeigt sich in diesem Fall im schräg aufgenommenen IR-Foto am besten.

2.6. Iriszysten

Fall 26



Abbildung 38a: VS-Foto; Frontalansicht

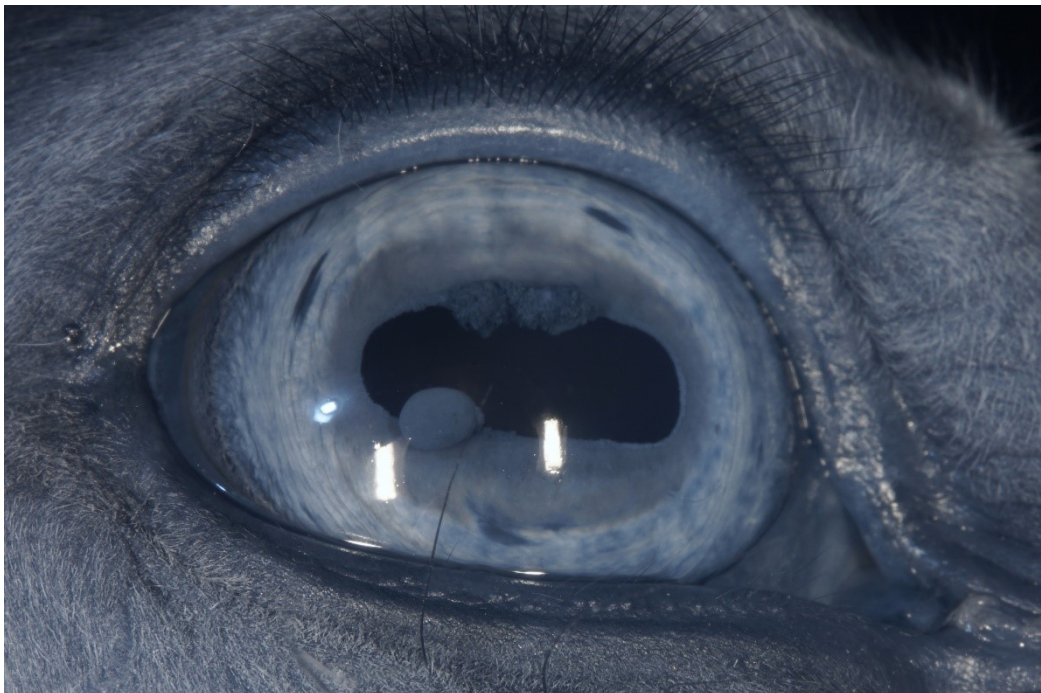


Abbildung 38b: IR-Foto; Frontalansicht

Abbildung 38a,b: Rechtes Auge eines 25-jährigen Hannoveraner-Wallachs mit Iriszyste. (Svenja Maier, 2022)

Die Konturen der Iriszyste am ventrotemporalen Bereich des Pupillarrands sind im IR-Foto besser zu erkennen als im VS-Foto.

Fall 27

Abbildung 39a: VS-Foto; Frontalansicht

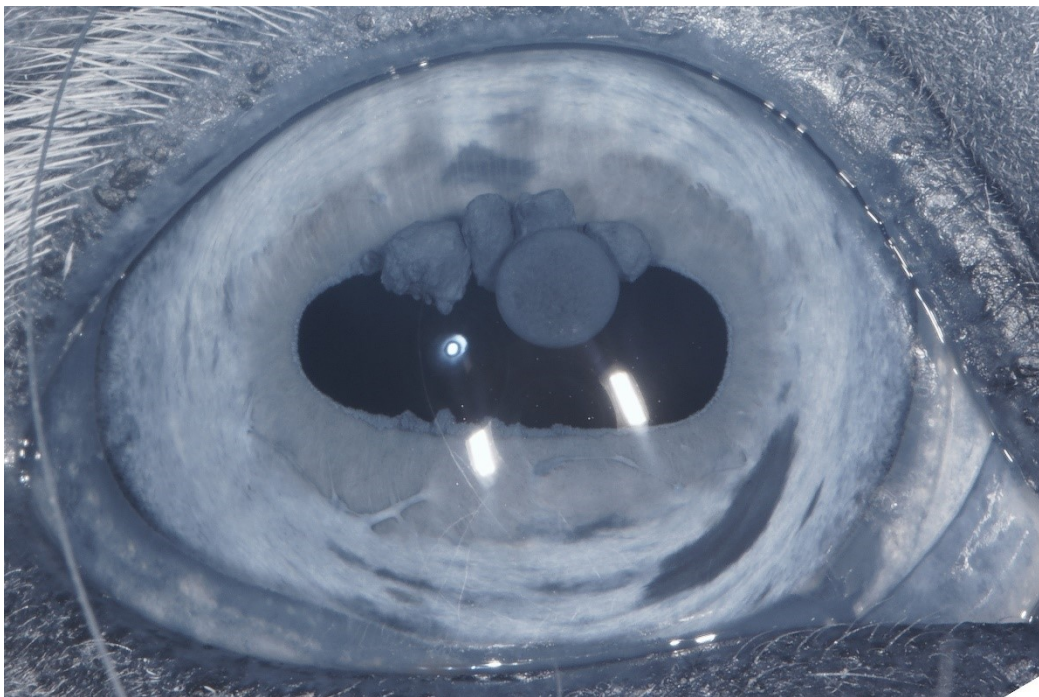


Abbildung 39b: IR-Foto; Frontalansicht

Abbildung 39a,b: Rechtes Auge eines 16-jährigen Warmblut-Wallachs mit einer Iriszyste im Bereich der Granula iridica und einem Irisnävus im ventronasalen Bereich der Iris. (Svenja Maier, 2021)

Im IR-Foto kann die Kontur der Zyste deutlich besser von der Umgebung abgegrenzt werden. Die weitere Oberflächenstruktur der Granula iridica ist ebenfalls im Detail sichtbar und kann im IR-Foto gut dokumentiert werden.

V. DISKUSSION

1. Hintergrund und Zielsetzung

Die Entwicklung der IR-Fotografie geht auf den Beginn des 20. Jahrhunderts zurück (Davies, 2017). Erste Einsatzzwecke waren vor allem die Astrofotografie und die militärische Luftraumüberwachung (Klein et al., 2020). Weitere Einsatzgebiete in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen und in der Medizin kamen neben einem vielfältigen künstlerischen Einsatz hinzu (Davies, 2017, Klein et al., 2020).

Für die IR-Fotografie ist der sogenannte nahe IR-Bereich relevant. Dieser schließt sich an den Rotbereich des sichtbaren Lichtspektrums des Menschen an und ist demnach unsichtbar für den Menschen, wie auch für das Pferd und viele andere Tierspezies. Der nahe IR-Bereich umfasst einen Wellenlängenbereich der Strahlung von etwa 750 bis 1100 nm (Mangold, 2015).

Die Sensoren moderner Digitalkameras können Strahlung vom UV- bis zum nahen IR-Bereich erfassen. Um Farbstiche und Unschärfe in den Fotos zu vermeiden und die Darstellung an die Farbwahrnehmung des Menschen zu adaptieren, sind Sperrfilter vor dem Bildsensor verbaut, die nur den visuellen Spektralbereich des Menschen durchlassen. Die Hotmirrorfilter in heutigen Digitalkameras reflektieren nahezu die gesamte IR-Strahlung (Mangold, 2015, Davies, 2017).

Kameras für die IR-Fotografie sind nicht kommerziell erhältlich. Um eine Kamera als IR-Kamera einsetzen zu können, muss der Hotmirrorfilter durch einen professionellen Kameraumbau entfernt werden und die Kamera schließlich durch einen IR-Filter, der nur Strahlung im IR-Bereich durchlässt, gezielt neu definiert werden (Mangold, 2015, Davies, 2017).

In der klassischen IR-Fotografie werden die Motive in verschiedenen Grautönen abgebildet. Wie sich ein Objekt im IR-Foto darstellt, hängt davon ab, wie die IR-Strahlung mit dem jeweiligen Material oder Gewebe interagiert. Wird die IR-Strahlung zum großen Teil reflektiert, so erscheint ein Objekt im Foto in einem hellen Grauton bis

hin zu Weiß. Je mehr IR-Strahlung absorbiert oder durchgelassen wird, desto dunkler erscheint das Motiv (Klein et al., 2020).

Erste Veröffentlichungen zum Einsatz der IR-Fotografie zur Diagnostik von Augenerkrankungen in der Humanmedizin stammen aus den 1930er bis 1970er Jahren. Neben der Ophthalmologie kamen später auch weitere Einsatzbereiche wie die Dermatologie oder die forensische Medizin hinzu (siehe Kapitel II. 3.1., 3.3.).

In der Tiermedizin gibt es zwei Veröffentlichungen aus dem Bereich der Pferdeophthalmologie, die den Einsatz der IR-Fotografie als diagnostisches Hilfsmittel bei verschiedenen Augenerkrankungen beispielhaft beschreiben (siehe Kapitel II. 3.2.).

Die Fotos in der Veröffentlichung von Tóth und Dikker aus dem Jahr 2013 wurden mit dem „Night-Shot-Modus“ einer Kamera von Sony erstellt. In diesem Modus wird der Sperrfilter mechanisch weggeklappt, sodass Aufnahmen bei Dunkelheit mit einer verkürzten Belichtungszeit ermöglicht werden. Solche Kameras werden jedoch nicht mehr produziert, da bei der Verwendung des „Night-Shot-Modus“ bei Tageslicht auch Kleidung transparenter erscheint (Mangold, 2015). Weiterhin bietet sich hierbei nicht der gleiche Umfang an Einstellungsmöglichkeiten wie bei einer umgebauten IR-Kamera.

Für die Veröffentlichung von McMullen et al., 2009, wurde eine umgebaute digitale Kamera verwendet. Es finden sich hierbei aber keine weiteren Angaben hinsichtlich des eingesetzten Equipments.

Ziel dieser Arbeit war es, auf Basis des physikalischen und technischen Hintergrunds, Kriterien für die Auswahl und Einstellung eines geeigneten technischen Equipments zu erstellen. Weiterhin sollten Anhaltspunkte für die praktische Umsetzung am Pferdepatienten gegeben werden und schließlich der diagnostische Mehrwert bzw. die Grenzen des Einsatzes der IR-Fotografie anhand von IR-Fotos von Pferdeaugen dargestellt werden.

2. Material und Methoden

2.1. Technisches Equipment

Kamera

Als Kamera wurde die DSLM-Kamera „Sony α 7RIII“ verwendet.

Die wichtigsten Gründe für die Auswahl einer DSLM-Kamera, also einer spiegellosen Systemkamera, und keiner DSLR-Kamera, also einer Spiegelreflexkamera, für die Aufnahmesituation am Pferd waren die Vermeidung des Klappgeräuschs des Spiegels und die kompaktere, leichtere Bauweise einer DSLM-Kamera (Banek & Banek, 2013). Je geräuschärmer die Aufnahme erfolgt, desto geringer ist der Stressfaktor für das fotografierte Tier. Eine kompakte und leichte Bauweise ist angenehmer für die Fotografie aus der Hand.

Der Einsatz einer DSLM-Kamera bietet weitere Vorteile im Vergleich zu einer DSLR-Kamera, wie zum Beispiel die Vermeidung von Mikroerschütterungen durch das Hochklappen des Spiegels bei längeren Belichtungszeiten, eine höhere erreichbare Serienbildfrequenz sowie die Möglichkeit die Auswirkungen der Kameraeinstellungen auf das Foto direkt durch den elektronischen Sucher zu sehen (*Systemkamera oder Spiegelreflex in 2022? 10 Unterschiede (DSLM vs. DSLR)*, o. D.). Dies ist in Kapitel II. 4.1.3.4. ausführlich beschrieben. Diese genannten Vorteile sind für die IR-Fotografie am Pferdeauge jedoch nicht relevant.

Durch die enorme technische Weiterentwicklung hat die Qualität von DSLM-Kameras stark zugenommen. Gründe, die gegen den Kauf einer DSLM-Kamera gesprochen haben, wie eine ungenügende Qualität des elektronischen Suchers oder eine unzureichende Funktionsweise des Autofokus gehören mittlerweile der Vergangenheit an (*Systemkamera oder Spiegelreflex in 2022? 10 Unterschiede (DSLM vs. DSLR)*, o. D.).

Ein maßgeblicher Aspekt für die Bildqualität des Fotos ist die Qualität des Bildsensors der Kamera. Ein großer Bildsensor und große Einzelpixel sind hierbei die wesentlichen Kriterien für eine hohe Qualität des Bildsensors. Die Zahl der Einzelpixel bestimmt

gemeinsam mit dem Objektiv die Bildauflösung. Jedoch führt eine hohe Zahl an Pixeln auf Kosten der Pixelgröße zu einer Zunahme an Bildstörungen (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Die ausgewählte Kamera besitzt einen Vollformatsensor mit etwa 42,4 effektiven Megapixeln. Der Vollformatsensor ist der größte Typ der standardmäßig verbauten Bildsensoren (Davies, 2017), sodass auch bei einer hohen Zahl an Pixeln in der Regel noch eine ausreichende Größe der Einzelpixel ermöglicht wird.

Bei Verwendung eines Vollformatsensors besitzt das Objektiv die angegebene Brennweite und es muss kein Crop-Faktor miteinberechnet werden (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Bei dem Bildsensor der „Sony α 7RIII“ handelt es sich weiterhin um einen BSI-Sensor (siehe Kapitel 4.2.2.3.). Dieser besitzt aufgrund der Platzierung der Verdrahtung unterhalb der Pixelebene eine deutlich höhere Sensitivität als ein FSI-Sensor (*Grundlagenwissen: Bildsensoren von Digitalkameras*, 2018).

Gemäß des Produktdatenblatts der Kamera besitzt die „Sony α 7RIII“ einen Hybrid-Autofokus, der die Vorteile des Phasendetektionsautofokus und des Kontrastautofokus kombiniert (siehe Kapitel II. 6.2.2.).

Das wichtigste Kriterium für die Auswahl der Kamera ist nach Auffassung der Verfasserin die Qualität des Bildsensors. Letztlich sind verschiedene Kameramodelle vorstellbar, um IR-Fotos am Pferdeauge von hoher Qualität aufzunehmen.

Objektiv

Ausgewählt für die Aufnahmesituation am Pferdeauge wurde das Objektiv „Sony SEL 50 mm/2,8 1:1 Makro“, das mit seinem Anschluss vom Typ „Sony E-Mount“ auf der ausgewählten Kamera montiert werden kann.

Es handelt sich dabei um ein Makroobjektiv mit einer Festbrennweite von 50 mm. Als Makroobjektiv erlaubt dieses Objektiv einen geringen Abstand zum Motiv von minimal 0,16 m. Dies ist auf dem Tubus des Objektivs sowie im Produktdatenblatt abzulesen. Diese Naheinstellgrenze bezieht sich auf den Abstand der Sensorebene der Kamera zum Motiv (Banek & Banek, 2013). Bei Fotografie mit der Naheinstellgrenze erreicht dieses Objektiv einen Abbildungsmaßstab von 1:1. Dies bedeutet, dass ein Motiv in seiner

realen Größe auch auf dem Bildsensor abgebildet wird und dadurch kleine Details des Motivs in großer Auflösung dargestellt werden können (Banek & Banek, 2013). Je geringer der Abstand zum Motiv gewählt wird, desto geringer wird jedoch auch die Schärfentiefe des Fotos (Hennemann, 2010).

Für die Fotografie am Pferdeauge ist ein Abstand von 0,16 m und ein Abbildungsmaßstab von 1:1 nicht geeignet. Ein Vollformatsensor besitzt eine Größe von 36 x 24 mm (Davies, 2017) und ist demnach nicht groß genug, um das Pferdeauge in voller Größe abzubilden. Weiterhin würde bei einem Abstand der Sensorebene zum Motiv von 0,16 m die Vorderfläche des Objektivs nur noch wenige Zentimeter vom Auge entfernt sein. Dies wird nicht von jedem Pferd toleriert. Zudem führt ein geringer Abstand zum Motiv zu einer Verringerung der Schärfentiefe. Am Pferdeauge soll jedoch eine möglichst große Schärfentiefe erreicht werden, um möglichst viele okuläre Strukturen scharf abzubilden. Der Abbildungsmaßstab kann gemäß der Angabe auf dem Tubus des Objektivs auf bis zu 1:4 verringert werden. Dies entspricht einem Abstand der Sensorebene zum Motiv von 0,28 m und ist gut geeignet für die Fotografie am Pferd.

Der minimal einstellbare Blendenwert dieses Objektivs beträgt 2,8. Es handelt sich demnach um eine lichtstarke Objektiv, das auch bei einer geringen Umgebungshelligkeit noch eine ausreichende Belichtung des Bildsensors durch die große Blendenöffnung ermöglicht (Haarmeyer & Westphalen, 2010). Da für die Erhöhung der Schärfentiefe ein höherer Blendenwert als 2,8 eingesetzt wurde (siehe Kapitel V. 2.2.), hat dieses Kriterium eine untergeordnete Relevanz zur Auswahl des Objektivs für diese Aufnahmesituation.

Weiterhin besitzt das gewählte Objektiv einen integrierten optischen Bildstabilisator, wodurch die beim Fotografieren aus der Hand potenziell entstehende Verwacklungsunschärfe ausgeglichen werden kann (Haarmeyer & Westphalen, 2010). Dies ist für die Fotografie beweglicher Motive aus der Hand von großer Relevanz.

Am Tubus des Objektivs befindet sich ein Schalter, um zwischen dem manuellen Fokus und dem Autofokus wählen zu können. Dies ist ein wichtiges Kriterium für die Auswahl des Objektivs (siehe Kapitel V. 2.2.).

Eine hohe Qualität des Objektivs ist maßgeblich für die Bildqualität des Fotos.

Kameraumbau

Die „Sony α 7RIII“ wurde durch einen professionellen Anbieter zu einer undefinierten Kamera umgebaut. Der Hotmirrorfilter wurde dabei entfernt und ein Quarzglas als Platzhalter eingesetzt. Durch das Aufbringen eines Schraubfilters am Objektiv kann die Kamera dadurch auf vielfältige Wellenlängen, vom UV- bis zum nahen IR-Bereich, neu definiert werden (Mangold, 2015).

Die Entscheidung für den undefinierten Umbau wurde aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der Kamera getroffen. Dadurch war es unter anderem möglich, verschiedene IR-Schraubfilter im Einsatz zu vergleichen.

Im Gegensatz hierzu wird die Kamera bei einem definierten Umbau durch einen im Austausch für den Hotmirrorfilter in der Kamera verbauten IR-Filter auf einen bestimmten Wellenlängenbereich neu definiert (Mangold, 2015).

Möchte man die Kamera nur für einen bestimmten Einsatzzweck nutzen, so bietet der definierte Umbau den Vorteil, dass die vorhandenen Objektive weiterhin eingesetzt werden können, ohne dass zusätzliches Equipment, wie für den Objektivdurchmesser passende Schraubfilter oder Adapterringe, erworben werden müssen (Mangold, 2015).

IR-Schraubfilter

Es wurden drei verschiedene IR-Schraubfilter hinsichtlich der resultierenden Bildhelligkeit und Farbwiedergabe verglichen (siehe Kapitel III. 1.4., Kapitel IV. 1.1. und Kapitel V. 3.1.). Die Filter hatten eine Cut-on-Wellenlänge von 695 nm, 720 nm und 830 nm und wurden ausgewählt, da es sich um häufig eingesetzte Filter-Typen in der IR-Fotografie handelt.

Der ausgewählte Filter sollte eine ausreichende Bildhelligkeit bei den gewählten Einstellungen für die Belichtungszeit und den Blendenwert (siehe Kapitel V. 2.2.) ermöglichen. Weiterhin sollten keine störenden Farbstiche im Bild vorhanden sein.

Da aufgrund der Bildergebnisse (siehe Kapitel V. 3.1.) der 695-nm-Filter für die weiteren Aufnahmen ausgewählt wurde, wurde kein weiterer Filter mit einer Cut-on-Wellenlänge zwischen dem 720- und dem 830-nm-Filter in die Versuchsreihe integriert.

Blitzgerät

Um eine ausreichende Belichtung der Fotos bei der erforderlichen kurzen Belichtungszeit von 1/250 s (siehe Kapitel V. 2.2.) zu erreichen, war der Einsatz eines externen Blitzgeräts erforderlich. Verwendet wurde der Ringblitz „Metz Mecablitz 15 MS-1 digital“. Die passende Leistungsstufe des Blitzgeräts wurde in einer Versuchsreihe (siehe Kapitel III. 1.5., Kapitel IV. 1.2. und Kapitel V. 3.1.) ermittelt.

Die Leitzahl des „Metz Mecablitz 15 MS-1 digital“ beträgt 15 für den ISO-Wert 100, gemäß dessen Produktdatenblatt. Bei dem eingestellten Blendenwert von 16 (siehe Kapitel V. 2.2.) beträgt die Reichweite des Blitzgeräts für eine volle Ausleuchtung des Motivs etwa 0,9 m (Formel zur Berechnung siehe Kapitel II. 8.1.). Bei der Fotografie der Pferdeaugen beträgt der Abstand von Kamera und Motiv etwa 0,3 m. Die Reichweite dieses Blitzgeräts ist folglich ausreichend.

Der Ringblitz wurde ausgewählt, um das Motiv gleichmäßig ausleuchten zu können und wurde auf Empfehlung des professionellen Fotografen Herr Sven Lamprecht (<https://irrecams.de>) ausgewählt.

Eine Alternative wäre der Einsatz eines Makroblitzes mit zwei getrennten Blitzröhren gewesen, wodurch das Foto mehr Tiefe erhalten soll. Das durch McMullen et al., 2021, beschriebene eher flache Erscheinungsbild von Fotos am Tierauge bei Verwendung eines Ringblitzes, konnte in dieser Arbeit nicht bestätigt werden.

IR-Taschenlampe

Als zusätzliche Dauerlichtquelle wurde die IR-LED-Taschenlampe „Nightfox XB10“ eingesetzt. Diese Taschenlampe strahlt IR-Strahlung mit einer Wellenlänge von 850 nm aus.

Der Einsatz dieser Taschenlampe war erforderlich, um einen passenden Bildausschnitt wählen zu können und sollte zusätzlich das Fokussieren unterstützen. Durch das Anbringen eines IR-Schraubfilters vor dem Objektiv und durch die enge Blendenöffnung (siehe Kapitel III. 2.3.) erreicht selbst bei hellem Tageslicht nur wenig Strahlung den Bildsensor und bei Blick durch den Sucher bzw. auf das Kameradisplay erscheint das Bild schwarz. Bei Anleuchten des zu fotografierenden Auges mit der IR-LED-Taschenlampe ist das Auge im Sucher hingegen gut zu erkennen und der

Bildausschnitt kann passend gewählt werden. Weiterhin steht dem Autofokus neben dem kamerainternen Autofokus-Hilfslicht zusätzliche Strahlung zur Fokussierung zur Verfügung. Die IR-LED-Taschenlampe alleine, ohne Einsatz eines Blitzgeräts, reicht, nach Erfahrung der Verfasserin, nicht aus, um ein ausreichend belichtetes Foto zu erhalten. Entsprechend wurden Blitzgerät und Taschenlampe in Kombination eingesetzt.

Der Einsatz einer IR-LED-Taschenlampe zur IR-Fotografie am Pferd wurde nach Kenntnis der Verfasserin im Rahmen dieser Arbeit erstmalig für diese Indikation beschrieben.

LED-Lampen geben Strahlung einer definierten Wellenlänge ab und erhitzen sich bei der Benutzung kaum (Davies, 2017). Die von einer IR-LED-Taschenlampe abgegebene Strahlung wird von Pferden nicht gesehen und ist dadurch kein zusätzlicher Stressfaktor für den Patienten. Entsprechend eignen sich solche Lampen gut als Dauerlichtquelle für die IR-Fotografie am Pferdeauge.

Durch den Einsatz der IR-LED-Taschenlampe konnte die Zahl erforderlicher Aufnahmen deutlich reduziert werden. Ohne Verwendung einer IR-LED-Taschenlampe dauert das Fokussieren des Autofokus deutlich länger und der Bildausschnitt muss letztlich blind gewählt werden.

Neben der Reflexion, die durch das Blitzgerät entsteht, wird auch durch eine IR-LED-Taschenlampe ein Reflexion im Foto erzeugt. Diese stellt sich zumeist als kleiner heller Fleck im Bereich der Pupille dar.

Die eingesetzte Taschenlampe hat eine Leistung von 5 W und ist in ihrer Helligkeit dimmbar. Die Taschenlampe wurde bei ungefähr mittlerer Helligkeit eingesetzt. Dadurch wurde das Auge gerade ausreichend erhellt.

Die bisherige Ausführung bezieht sich auf den Einsatz einer DSLM-Kamera, einer sonstigen Kamera mit elektronischem Sucher oder einer DSLR-Kamera mit undefiniertem Kameraumbau und Schraubfilter vor dem Objektiv.

Bei Einsatz einer DSLR-Kamera mit definiertem Kameraumbau, also mit IR-Filter direkt vor dem Bildsensor, sieht man bei Verwendung des optischen Suchers eine Abbildung der Realität ohne eine Modifikation durch einen elektronischen Sucher. Bei einer solchen Kamera kann demnach auch ohne ein weiteres Hilfsmittel der Bildausschnitt gewählt und fokussiert werden.

Speichermedium

Als Speichermedium wurde eine SD-Karte mit 64 GB Speicherplatz und einer Lesegeschwindigkeit von 90 MB/s eingesetzt. Dies ermöglichte das Abspeichern mehrerer Hundert Fotos, selbst in der maximal möglichen Dateigröße, und war für den gewünschten Einsatzzweck ausreichend.

2.2. Kameraeinstellungen

Kameramodus

Um sowohl die Belichtungszeit als auch den Blendenwert manuell einstellen zu können, wurde der manuelle Kameramodus gewählt.

Die anderen Modi mit teilweise manuellen Einstellungsmöglichkeiten ermöglichen es nur jeweils einen dieser Parameter manuell einzustellen und passen den anderen Wert entsprechend der Belichtungsmessung automatisch an. Der manuelle Modus bietet außerdem insgesamt den größten Umfang an manuellen Einstellungsmöglichkeiten und damit den größten Freiraum für den Fotografierenden (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Sänger & Sänger, 2018).

Belichtungsparameter: Belichtungszeit, Blendenwert, ISO-Wert

Aufgrund der Verwendung eines externen Blitzgeräts konnten die Belichtungszeit, der Blendenwert und der ISO-Wert so eingestellt werden, dass es für die Bildqualität optimal ist. Diese Parameter mussten entsprechend nicht zur Anpassung der Bildhelligkeit modifiziert werden, da durch das Blitzgerät, unabhängig von diesen Parametern, eine optimale Belichtung des Motivs erreicht werden konnte.

Als Belichtungszeit wurde $1/250$ s eingestellt. Diese Zeitspanne entspricht der Blitzsynchronzeit (siehe Kapitel II. 4.2.2.1.). Dies ist die kürzest mögliche Belichtungszeit, die bei Einsatz eines Blitzgeräts eine vollständige Belichtung des Bildsensors ermöglicht. Bei Einstellung einer noch kürzeren Belichtungszeit würde der zweite Verschlussvorhang einen Teil des Bildsensors verdecken (Haarmeyer &

Westphalen, 2010). Zur Vermeidung von Bewegungsunschärfe aufgrund von minimalen Bewegungen des Pferds und zur Vermeidung von Verwacklungsunschärfe durch das Halten der Kamera in der Hand wurde keine längere Belichtungszeit eingestellt als die 1/250 s. Je länger die gewählte Belichtungszeit ist, desto größer ist das Risiko des Auftretens dieser Arten der Unschärfe. Für ein bewegungsloses Motiv wird der Kehrwert der Brennweite des verwendeten Objektivs als Grenzwert zum Fotografieren aus der Hand beschrieben (Banek & Banek, 2013). Für das verwendete 50-mm-Objektiv wäre der Grenzwert der Belichtungszeit demnach 1/50 s. Da es sich nicht um ein statisches Motiv handelt, muss eine kürzere Belichtungszeit in dieser Aufnahmesituation verwendet werden.

Um eine möglichst große Schärfentiefe zu erreichen und damit möglichst viele Strukturen des Auges scharf abzubilden, wurde die kleinstmögliche Blendenöffnung und damit der größtmögliche Blendenwert des verwendeten Objektivs von 16 eingestellt.

Der ISO-Wert gibt die Lichtempfindlichkeit des Bildsensors an (siehe Kapitel II. 6.1.3.). Ist ausreichend Strahlung zur Belichtung des Bildsensors vorhanden, so sollte ein niedriger ISO-Wert gewählt werden, da sich bei einer Erhöhung des ISO-Werts auch Störsignale, die zum Störeffekt des Bildrauschens, also einer körnigen Erscheinung des Fotos führen, verstärken. Ein geeigneter Standard-Wert ist ein ISO-Wert von 100 (Hennemann, 2010). Dieser Wert wurde für die Aufnahmen in dieser Arbeit verwendet.

Weißabgleich

Es wurde einmalig mit dem aufgeschraubten 695-nm-IR-Filter ein manueller Weißabgleich durchgeführt. Dies erfolgte entsprechend des Kamerahandbuchs. Als Referenzfläche wurde grünes Gras verwendet, da dieses IR-Strahlung reflektiert und dadurch im IR-Foto weiß erscheint (Davies, 2017). Mit diesem gespeicherten Profil für den Weißabgleich wurden alle Aufnahmen durchgeführt. Es sind keine unerwünschten Farbstiche in den Fotos aufgetreten.

Grünes Gras eignet sich als Referenzfläche zur Einstellung des manuellen Weißabgleichs, da es IR-Strahlung weitgehend vollständig reflektiert und daher im IR-Foto weiß erscheint. Der manuelle Weißabgleich ist erforderlich, da der automatische Weißabgleich in der IR-Fotografie in der Regel einen Farbstich im Foto erzeugt (Davies,

2017).

Fokussierung

Die Fokussierung bestimmt die Lage der Schärfenebene im Foto. Eine korrekte Fokussierung hat eine große Relevanz für die Bildqualität bzw. für die Verwendbarkeit eines Fotos zur Dokumentation eines bestimmten Aspekts und kann nicht nachträglich korrigiert werden (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Zur Fotografie am stehenden Pferd wurde ein kontinuierlicher Autofokus mit dynamischer Mehrfeldmessung eingesetzt (siehe Kapitel II. 6.2.2.). Das aktivierte Autofokus-Messfeld befand sich in der Bildmitte, sodass die Kamera auf den Bereich des Pferdeauges, im besten Fall auf den Bereich der Iris oder der Granula iridica, fokussiert. Ein kontinuierlicher Autofokus fokussiert ständig nach und ist deshalb, im Gegensatz zu einem Einzelautofokus, für sich bewegende Motive geeignet (Hennemann, 2010). Bei der dynamischen Mehrfeldmessung wechselt der Autofokus selbstständig das aktivierte Messfeld, falls das fokussierte Objekt das Messfeld verlässt (Hennemann, 2010).

Der Nachteil der Verwendung des Autofokus ist eine weniger genaue Steuerbarkeit der Lage der Schärfenebene im Foto. So kann es vorkommen, dass, statt auf der Iris, die Schärfenebene im Bereich der Wimpern des Pferdes lokalisiert ist. Aufgrund der großen Schärfentiefe durch den hohen eingestellten Blendenwert von 16 (siehe Kapitel V. 2.2.) stellen sich die okulären Strukturen in Fall der Fokussierung auf die Wimpern dennoch ausreichend scharf dar.

Bei Verwendung des manuellen Fokus kann durch die Einstellung des Entfernungsrings am Objektiv die Lage der Schärfenebene exakt auf die gewünschte Struktur festgelegt werden (Banek & Banek, 2013). Dies ist nur an einem bewegungslosen Motiv möglich, da das Fokussieren von Hand einige Sekunden in Anspruch nimmt. Im Falle der Fotografie von Pferdeaugen wäre ein Einsatz des manuellen Fokus bei Pferden in Allgemeinanästhesie möglich.

Verschlusstyp

Die „Sony α 7R III“ bietet die Möglichkeit zwischen einem mechanischen, einem

elektronischen und einem Hybrid-Verschluss mit erstem elektronischem und zweitem mechanischem Verschlussvorhang zu wählen.

Bei Einsatz eines Blitzgerätes ist es herstellerbedingt nicht möglich den komplett lautlosen, elektronischen Verschluss einzustellen. Dies hängt mit dem zeilenweisen Auslesen des Bildsensors bei einem elektronischen Sucher zusammen (Sänger & Sänger, 2018, Thoma, 2022).

Entsprechend konnte in dieser Arbeit zwischen dem mechanischen und dem Hybrid-Verschluss gewählt werden. Ein mechanischer Verschluss erzeugt beim Aufnahmevorgang ein doppeltes Klickgeräusch, wohingegen ein Hybrid-Verschluss nur ein einfaches Klicken bei Schluss des zweiten mechanischen Verschlussvorhangs erzeugt (Thoma, 2022). Um eine möglichst ruhige Aufnahmesituation zu erreichen, wurde zur Fotografie am Pferd ein Hybrid-Verschluss verwendet.

Weitere Vorteile des Hybrid-Verschlusses sind der verminderte Verschleiß mechanischer Bauteile im Vergleich zu einem mechanischen Verschluss, sowie die Vermeidung von Mikroerschütterungen durch die Bewegung des ersten mechanischen Verschlussvorhangs (Thoma, 2022).

Bildstörungen, die je nach Aufnahmesituation bei einem elektronischen Verschluss auftreten können, wie der „Rolling-Shutter-Effekt“ bei sich schnell bewegenden Motiven oder eine Streifenbildung bei Kunstlichtern, haben bei Verwendung eines Hybrid-Verschlusses eine geringere Relevanz (siehe Kapitel II. 4.2.2.1.) (Thoma, 2022). In der Aufnahmesituation am Pferdeauge spielen diese Effekte keine Rolle.

Grafikdateiformat

Im Kameramenü wurde die kombinierte Einstellungsmöglichkeit für das JPEG- und das RAW-Format, bei der die Kamera die Fotos in beiden Formaten abspeichert, eingestellt.

Dies erfolgte vor dem Hintergrund, dass potenziell auftretende Farbstiche oder Abweichungen der Bildhelligkeit im RAW-Format ohne Qualitätsverlust nachträglich korrigiert werden können (Hennemann, 2010).

Mit der verwendeten 64-GB-SD-Karte war ausreichend Platz für mehrere Hundert Fotos in dieser Weise. Aufgrund geeigneter Kameraeinstellungen sind die genannten Abweichungen jedoch nicht aufgetreten und die Fotos wurden direkt im JPEG-Format

verwendet.

Das JPEG-Format zeigt eine hohe Kompatibilität mit anderen Ausgabemedien, sodass Fotos direkt übertragen und verwendet werden können. Da es sich um ein Kompressionsformat handelt und dadurch Bildinformationen beim Abspeichern verloren gehen, sollte darauf geachtet werden, dass im Kameramenü die geringst mögliche Kompression für das JPEG-Format eingestellt wird (Haarmeyer & Westphalen, 2010, Hennemann, 2010).

Das RAW-Format enthält die Rohdaten eines Fotos und ermöglicht dadurch eine umfangreiche Nachbearbeitung mit optimaler Bildqualität. Es benötigt jedoch viel Speicherplatz und Kapazität zur Datenverarbeitung. Weiterhin ist eine spezielle Software, ein sogenannter RAW-Konverter, erforderlich, um RAW-Dateien zu öffnen (Haarmeyer & Westphalen, 2010).

Wenn sicher gestellt ist, dass die verwendeten Kameraeinstellungen zu dem gewünschten Bildergebnis führen, so erscheint es demnach für den Klinik- oder Praxisalltag am praktikabelsten, direkt im JPEG-Format zu fotografieren. Hierbei sollte, wie beschrieben, die geringst mögliche Kompression, also die höchste Qualitätsstufe, eingestellt werden.

2.3. Vergleichsfoto mit visuellem Spektrum

IR-Fotos und VS-Fotos liefern unterschiedliche Informationen und sollten deshalb bei Aufnahmen für medizinische oder wissenschaftliche Zwecke vergleichend angefertigt werden.

Die im Alltag praktikabelste Option zur Aufnahme eines Vergleichsfotos mit visuellem Spektrum ist die Verwendung einer Smartphone-Kamera. Für viele Aufnahmesituationen liefern Smartphones gute Bildergebnisse mit ausreichender Qualität, um sogar in vergrößernden Wiedergabemedium, wie zum Beispiel einer Bildschirmpräsentation, gezeigt zu werden.

Die VS-Fotos für diese Arbeit wurden mit dem Smartphone „Samsung Galaxy S20“ und der App „OpenCamera“ aufgenommen. Die verwendete App bietet die Möglichkeit mittels eines Hilfslichts gezielt das Auge auszuleuchten. Die Empfehlung zur Verwendung dieser App stammt von Herrn Tim Knott (Head of the Ophthalmology

Team, Equine Eye Clinic, Wotton-Under-Edge, England), der sich intensiv mit der Fotografie tierischer Augenpatienten mit Smartphone-Kameras beschäftigt. Für iPhones empfiehlt Herr Knott die App „Procamera“ (Knott, o. D.).

Neben der schnellen Einsatzbereitschaft sind weitere Vorteile der Verwendung eines Smartphones, dass Bilddateien schnell an Kollegen verschickt oder in Datenbanken übertragen werden können.

Um eine optimale Bildqualität zu erreichen, ist jedoch der Einsatz einer weiteren Profikamera für die VS-Fotos zu empfehlen. Nachteilig sind hierbei die zusätzlichen Anschaffungskosten für das Equipment und der weniger praktikable Einsatz im Vergleich zum Smartphone.

Die Verwendung einer undefinierten Kamera für das IR- und das VS-Foto ist nicht zu empfehlen. Der Wechsel der Schraubfilter kostet Zeit und erhöht das Risiko einer Verschmutzung des Equipments. Weiterhin muss das Profil des manuellen Weißabgleich bei jedem Wechsel umgestellt werden und es kann bei der Verwendung einer DSLR-Kamera zu Problemen mit dem Autofokus kommen, da dieser beim Kameraumbau auf infrarote Strahlung neu kalibriert wird.

Entsprechend ist es sinnvoll entweder ein Smartphone mit hochwertiger Kamera oder eine separate professionelle Kamera für die VS-Fotos zu verwenden.

2.4. Aufnahmen am Pferd

Zur Verfügung gestellte Pferde

Für diese Arbeit wurden gesunde Pferde und Pferde mit unterschiedlichen pathologischen Veränderungen am Auge fotografiert. Diese wurden von verschiedenen Kliniken und Praxen und einem Pferdegnadenhof zur Verfügung gestellt.

Auswahl der Fotografien

Aus dem Pool an Fotografien wurden Beispiele mit verschiedenen physiologischen Variationen und pathologischen Veränderungen am Auge ausgewählt, mit dem Ziel, den Nutzen und die Grenzen der IR-Fotografie in der Pferdeophthalmologie möglichst

umfassend zu zeigen.

Unterteilt wurden die Fotos in folgende Gruppen: Pferde ohne bekannte Augenerkrankungen; Ulzerationen und Narben der Kornea; IMMK; Uveitis; Linsentrübungen; Iriszysten.

Ein limitierender Faktor war die Verfügbarkeit von Patienten mit seltener auftretenden Veränderungen. So findet sich zum Beispiel kein Fall eines Irismelanoms und kein Patient mit Hyphäma in dieser Arbeit.

Umgebungshelligkeit

Um zu ermitteln, ob die Umgebungshelligkeit einen Effekt auf das IR-Foto hat, wurde eine Versuchsreihe mit Aufnahmen in der Mittagssonne, unter freiem Himmel im Schatten sowie im abgedunkelten Stall durchgeführt. Die Kameraeinstellungen wurden wie im Vorfeld beschrieben gewählt und als Motiv wurde ein Pferdeauge verwendet.

Bei VS-Fotos hat die Umgebungshelligkeit einen wesentlichen Einfluss auf das Foto. Bei zu starker Umgebungshelligkeit kommt es zu vielfältigen Reflexionen und das Foto ist in der Regel nicht zur medizinischen Dokumentation einsetzbar.

Die Sonnenstrahlung enthält IR-Strahlung und IR-Fotos können bei ausreichender Belichtung des Sensors durch eine entsprechend lang eingestellte Belichtungszeit bzw. eine entsprechend große Blendenöffnung nur mit der Sonnenstrahlung alleine, ohne zusätzliche Strahlungsquellen, angefertigt werden.

Mit dieser Versuchsreihe sollte demnach geprüft werden, ob die Umgebungshelligkeit bei den hier gewählten Einstellungsparametern mit einer Belichtungszeit von 1/250 s und einem Blendenwert von 16 eine Relevanz für das Foto hat.

Handling von Pferden und Einsatz von Hilfspersonen

In den meisten Fällen wurden die Aufnahmen am unsedierten Pferd mit einer Hilfsperson durchgeführt.

Um eine verwacklungsfreie IR-Aufnahme zu erhalten, muss das zu fotografierende Pferd seinen Kopf für einige Sekunden komplett still halten. Diese Zeit ist erforderlich, um die IR-LED-Taschenlampe und die Kamera zu positionieren, auf den Bereich der

Iris oder der Granula iridica zu fokussieren und schließlich die Aufnahme auszulösen. Weiterhin ist es erforderlich, dass der Patient das Auge weit genug offen hält, sodass möglichst große Bereiche der Iris und in jedem Fall natürlich die zu dokumentierende pathologische Veränderung auf dem Foto abgebildet werden können.

Pferde mit nicht oder nur wenig schmerzhaften Augenerkrankungen, die zudem noch in einem entspannten Gemütszustand sind, halten die Augen häufig von alleine weit genug offen und den Kopf für eine ausreichende Zeit in einer ruhigen Position. Hilfreich kann es auch sein, wenn eine weitere Person, die seitlich vor dem Pferd positioniert ist, zum Beispiel durch ein Schnipsen der Finger, die Aufmerksamkeit des Pferdes auf sich zieht. Dies gibt dem Fotografierenden im besten Fall die Möglichkeit ein unsediertes Pferd ohne weitere Manipulation am Auge und ohne Stress für das Tier zu fotografieren.

Bei unruhigen Pferden oder Pferden, die aufgrund von Schmerzhaftigkeit einen Blepharospasmus zeigen, führt eine Umsetzung am unsedierten Pferd oftmals nicht zum gewünschten Ergebnis. In einigen Fällen kann eine Leitungsanästhesie der sensiblen und motorischen Nerven der Lider Abhilfe verschaffen und ein manuelles Aufhalten der Augenlider ermöglichen sowie das Abwehrverhalten mindern. Falls ein Pferd im unsedierten Zustand nicht fotografiert werden kann, so ist es sinnvoll die IR-Fotografie mit anderen Untersuchungen oder Behandlungen zu kombinieren, für deren Durchführung das Pferd unabhängig der Fotos sediert werden muss.

Keines der Pferde in dieser Arbeit wurde speziell für die IR-Fotografie sediert. Eine Sedierung belastet das Herz-Kreislauf-System der Tiere, verursacht zusätzliche Kosten für den Tierbesitzer und erfordert Personen zur Nachbetreuung des Tieres. Da es sich bei der IR-Fotografie um ein mögliches zusätzliches diagnostisches Verfahren und nicht um eine erforderliche medizinische Maßnahme handelt, wurde auf eine Sedierung für diese Indikation verzichtet.

Perspektive

Als Standard-Aufnahme wurde eine Frontalansicht des gesamten Auges angefertigt. Der Strahlengang verläuft hierbei parallel zur Längsachse des Auges und die Kameravorderfläche wird parallel zur Irisvorderfläche ausgerichtet. Diese Aufnahme eignet sich als Übersichtsaufnahme zur Dokumentation und stellt bei vollständig offener Lidstellung alle einsehbaren Strukturen des vorderen Augenabschnitts dar. Bei den

meisten Pferden war die frontale Gesamtansicht die einzige durchgeführte Aufnahme.

Seitliche und schräge Positionen können sinnvoll sein, um bestimmte Strukturen, wie zum Beispiel die Granula iridica, gezielt in den Fokus zu setzen oder von einer seitlichen Ansicht ausgehend darzustellen. Sollte es aufgrund einer Lidschwellung oder Schmerzhaftigkeit des Auges nicht möglich sein, die Augenlider ausreichend weit aufzuhalten, so kann es durch eine Ausrichtung der Kamera von schräg unten nach schräg oben gelingen, schräg unter das Oberlid zu fotografieren und so noch weitere Bereiche der Iris abzubilden.

Qualitative Beurteilung der Fotos

Die Entscheidung, ob noch weitere Fotos von dem jeweiligen Pferd erforderlich sind, erfolgte durch eine Betrachtung der Fotos durch den Sucher der Kamera. Die endgültige Auswahl der Fotos wurde durch die Betrachtung auf einem Laptop-Display mit hoher Auflösung durchgeführt. Die Kriterien hierzu waren die Bildschärfe und die Lage der Schärfeebene, die Belichtung, die Farbwiedergabe sowie die Perspektive und der Bildausschnitt.

Die häufigste Ursache für ein Aussortieren der Fotos war das Auftreten von Bewegungsunschärfe durch eine Bewegung des Patientenkopfes oder durch ein plötzliches Schließen der Augenlider im Moment der Aufnahme. Bei Aufnahmen, für die das Auge durch die Fotografin selbst aufgehalten wurde, kam es außerdem aufgrund übertragener Bewegungen vom Pferd auf die Hand zu Erschütterungen der Kamera und dadurch immer wieder zu einer Verwacklungsunschärfe im Bild. Diese Probleme lassen sich bei der Fotografie unседierter Pferde nicht vermeiden.

Eine weitere Ursache für ein Verwerfen von Fotos war eine Unterbelichtung bedingt durch ein Nichtauslösen des Blitzgeräts. Das Nichtauslösen des Blitzes ist technisch bedingt und tritt auf, wenn der zeitliche Abstand zwischen zwei Aufnahmen kürzer ist als die erforderliche Ladezeit des Blitzgeräts. Die Ladezeit verlängert sich je höher die Blitzleistung eingestellt ist und verlängert sich weiterhin bei einer Abnahme des Ladezustands der Batterien. Entsprechend ist es sinnvoll, soweit dies für die Bildqualität nicht erforderlich ist, nicht die volle Blitzleistung einzustellen und darauf zu achten immer Ersatzbatterien dabei zu haben. Nach Erfahrung der Verfasserin beträgt die Ladezeit des verwendeten Ringblitzes der Firma Metz bei halber Blitzleistung und

vollen Batterien etwa 1 s.

Mit der zuvor beschriebenen Technik, dem manuell durchgeführten Weißabgleich und den gewählten Kameraeinstellungen entstanden alle Aufnahmen ohne störende Farbstiche.

Die Fotos, die die Kriterien von Schärfe und Belichtung erfüllten, wurden im Patientenordner dauerhaft digital gespeichert und hiervon jeweils die besten Exemplare hinsichtlich des Bildausschnitts und der Perspektive ausgewählt. Bei der am häufigsten durchgeführten Aufnahmeperspektive, der Zentralperspektive, ist es das Ziel möglichst viel von der Irisvorderfläche abzubilden und bestenfalls auch den Bereich des Limbus darzustellen. Bei dieser Übersichtsaufnahme ist es weiterhin wichtig, dass die korrekte Perspektive, also eine frontale Ausrichtung der Kamera zur Irisvorderfläche so gut wie möglich eingehalten wird. So wird eine gleichmäßige Ausleuchtung des Auges und eine vollständige fotografische Dokumentation erreicht. Bei Fotos aus einer anderen Perspektive war das Entscheidungskriterium die beste Darstellung der in den Fokus gerückten okulären Struktur oder Veränderung.

Die in den meisten Fällen benötigten 4-5 Aufnahmen pro Pferd sind nach Auffassung der Verfasserin eine gute Quote am unsedierten Pferd. Die Durchführung dieser Anzahl an Aufnahmen dauert nur wenige Minuten und ist somit zeitlich problemlos in den Klinik- oder Praxisalltag zu integrieren.

3. Ergebnisse

3.1. Versuchsreihen

IR-Schraubfilter

Die Aufnahmen mit dem 695- und dem 720-nm-Filter zeigen eine korrekte Belichtung ohne Bildbereiche mit einer Über- oder Unterbelichtung. Dies zeigt sich bei einer Betrachtung der Fotos im Gesamten und weiterhin durch das Graustufen-Histogramm, das die Helligkeitsverteilung im Foto darstellt (siehe Kapitel II. 9.5.). Bei beiden Fotos

findet sich ein breiter Peak im Bereich von Grautönen mittlerer Helligkeit. Bei einer vergrößerten Ansicht zeigen beide Aufnahmen eine gute Detailerkennbarkeit des scharf gestellten Bereichs.

Die Aufnahme mit dem 830-nm-Filter ist hingegen unterbelichtet und zeigt eine verschlechterte Detailerkennbarkeit im Vergleich zu den anderen Fotos. Die Unterbelichtung wird auch durch den links gelegenen Peak des Histogramms deutlich.

Die Bildsensoren moderner Digitalkameras erfassen Wellenlängen bis etwa 1100 nm (Mangold, 2015). Bei der Verwendung des 830-nm-Filters ist der Wellenlängenbereich, der den Bildsensor erreicht also um mehr als 25 % schmaler als bei den anderen beiden Filtern. Dies hat in diesem Fall zu einer Unterbelichtung geführt. Eine mögliche Korrektur wäre eine Erhöhung der eingesetzten Blitzleistung. Hiervon wurde abgesehen, da mit den anderen beiden Filtern eine korrekte Belichtung erreicht werden konnte und es entsprechend nicht nötig ist den Patienten mit einem noch helleren Blitzlicht zu konfrontieren.

Eine korrekte Belichtung ist ein wesentliches Kriterium für die Bildqualität, da sowohl eine Über- als auch eine Unterbelichtung in einem Strukturverlust im Foto, also einer verschlechterten Detailerkennbarkeit, resultieren (Sänger & Sänger, 2018). Ein Histogramm hilft dabei, verschiedene Fotos hinsichtlich ihrer Bildhelligkeit zu vergleichen und ermöglicht es, bei einem Blick auf die Histogramm-Anzeige am Kameradisplay, direkt zu erkennen, ob eine korrekte Belichtung vorliegt, ohne das Foto auf einem größeren Bildschirm betrachtet zu haben.

Der sichtbare Rotbereich des visuellen Spektrum des Menschen reicht je nach Quelle bis zu einem Bereich von 700 bis 780 nm (Dorame, 2010, Mangold, 2015, Davies, 2017, Zinth & Zinth, 2018, Falk et al., 2019, Klein et al., 2020). Der 695-nm-Filter und potenziell auch der 720-nm-Filter lassen demnach noch einen geringen Teil des sichtbaren roten Spektralbereichs durch. Der enge Abstand dieser beiden Filter hinsichtlich der Cut-on-Wellenlänge wurde gewählt, da in diesem Wellenlängenbereich der Übergang zur reinen „Schwarz-Weiß-Infrarotfotografie“ stattfindet. Vor allem das Foto mit dem 695-nm-Filter zeigt im Fellbereich des Pferdes einen geringgradigen Rotstich. Dieser ist bei dem Foto mit dem 720-nm-Filter kaum mehr nachvollziehbar. Das Auge selbst wird jedoch ohne Farbstich wiedergegeben.

Dieser Rotstich entsteht durch den Anteil des sichtbaren Rotbereichs, der auf die Bayer-

Matrix trifft und nur durch die roten CFA-Farbfilter hindurchtreten kann. Die dahinter gelegenen Pixel werden entsprechend mehr aktiviert als die Pixel, die blauen oder grünen CFA-Farbfiltern zugeordnet sind. IR-Strahlung tritt durch alle CFA-Filter gleichmäßig durch (Mangold, 2015).

Der 830-nm-Filter, hingegen, erzeugt rein monochrome Fotos und wird für die klassische „Schwarz-Weiß-Infrarot-Fotografie“ eingesetzt (Mangold, 2015). Dies wurde mit dem entsprechenden Foto (siehe Abbildung 10c-1) in dieser Arbeit bestätigt.

Hinsichtlich der Bildhelligkeit und der Farbwiedergabe des Augenbereichs sind der 695-nm- und der 720-nm-Filter geeignet, um für die Fotografie am Pferd eingesetzt zu werden. Ausgewählt wurde der 695-nm-Filter, mit dem Gedanken, die erforderliche Helligkeit der zusätzlichen Strahlungsquellen möglichst niedrig halten zu können.

Externes Blitzgerät

Die verfügbaren Leistungsstufen des Ringblitz „Metz Mecablitz 15 MS-1 digital“ reichen von 1/32-Blitzleistung bis zur vollen Blitzleistung. Von Stufe zu Stufe kommt es zu einer Verdopplung bzw. Halbierung der Blitzleistung. In der durchgeführten Belichtungsreihe sind die Fotos mit einer 1/32-, 1/16-, 1/8- und 1/4-Blitzleistung bei den gewählten Kameraeinstellungen (siehe Kapitel V. III. 2.) unterbelichtet. Die Bildhelligkeit nimmt hierbei mit steigender Blitzleistung zu. Die Aufnahme mit voller Blitzleistung zeigt eine leichte Überbelichtung im Fellbereich des Pferdes und die Aufnahme mit halber Blitzleistung erscheint korrekt belichtet mit hoher Detailerkennbarkeit des scharf gestellten Augenbereichs bei Vergrößerung.

Die Belichtung der Fotos wurde durch die Betrachtung der Gesamtfotos auf einem hochauflösenden Bildschirm, durch den Vergleich der Fotos und der Graustufen-Histogramme untereinander, sowie durch die Betrachtung der Augenbereiche in Vergrößerung zur Evaluierung der Detailerkennbarkeit, bewertet.

Das ermittelte Ergebnis bezieht sich auf das verwendete Equipment und die hier gewählten Einstellungen. Bei einer Veränderung dieser Gegebenheiten muss die Belichtungsreihe wiederholt werden.

Bei der Durchführung der Belichtungsreihe ist weiterhin zu beachten, dass der Abstand von der Kamera zum Motiv und der gewählte Bildausschnitt bei allen Aufnahmen

möglichst identisch sein müssen, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Der Grund hierfür ist, dass die Intensität der Strahlung des Blitzgeräts mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt (Banek & Banek, 2013).

Umgebungshelligkeit

Die durchgeführten Aufnahmen bei unterschiedlicher Umgebungshelligkeit demonstrieren, dass bei den hier verwendeten Kameraeinstellungen die Umgebungshelligkeit keinen Einfluss auf die Bildhelligkeit hat. Die Bildhelligkeit wird bei einer so kurzen Belichtungszeit, wie den eingestellten 1/250 s, nur durch das verwendete Blitzgerät und in geringgradigem Umfang durch die eingesetzte IR-LED-Taschenlampe beeinflusst. Die einzigen Reflexionen im Bild stammen vom externen Blitzgerät und der IR-LED-Taschenlampe und unterscheiden sich in ihrem Ausmaß nicht bei den verschiedenen Fotos.

Die Umgebungshelligkeit hat zwar keinen Einfluss auf die Bildhelligkeit, jedoch beeinflusst sie die Weite der Pupille des Pferdeauges, da diese auf die Sonnenstrahlung, nicht aber auf die IR-Strahlung reagiert. In der Mittagssonne ist die Pupille eng gestellt, im abgedunkelten Stall ist die Pupillenöffnung deutlich größer. Im Gegensatz hierzu bewirkt das bei der VS-Fotografie zur Fokussierung verwendete Hilfslicht eine Verengung der Pupille. Mit der IR-Fotografie kann folglich leichter evaluiert werden, ob bzw. in welchem Ausmaß eine Miosis vorliegt. Weiterhin kann die Linse im IR-Foto ohne Gabe von Mydriatika vollständiger dargestellt werden als im VS-Foto.

3.2. Fotos von Pferdeaugen

Im Kapitel IV. 2. finden sich die IR-Fotos und die vergleichend angefertigten VS-Fotos von 27 verschiedenen Pferden. 5 dieser Pferde hatten keine bekannten Erkrankungen an den Augen. Anhand dieser Beispiele wurde das typische Erscheinungsbild von IR-Fotos sowie die Darstellung verschiedener physiologischer Variationen im IR-Foto demonstriert. Die anderen 22 Pferde zeigten unterschiedliche pathologische Veränderungen an den Augen.

Die erstellten IR-Fotos haben ein monochromes Erscheinungsbild von nahezu weiß bis nahezu schwarz und stellen somit das Auge in verschiedenen Graustufen dar. Je mehr

IR-Strahlung eine Struktur reflektiert, desto heller stellt sie sich im IR-Foto dar. Je mehr IR-Strahlung eine Struktur absorbiert, desto dunkler erscheint diese (Klein et al., 2020).

Im IR-Foto stellen sich die Iris und die Granula iridica deutlich kontrastreicher dar als im VS-Foto. Entsprechend können Pigmentveränderungen besser erkannt und von der Umgebung abgegrenzt werden. Dies ist zum Beispiel für die Beobachtung von Irisnävi relevant.

Weiterhin ist durch diese kontrastreichere Darstellung die Oberflächenstruktur der Iris und der Granula iridica im IR-Foto detailgenauer dargestellt. Im VS-Foto erscheinen die Granula iridica meist einheitlich dunkel und das Oberflächenrelief ist kaum erkennbar. Diese verbesserte Detailerkennbarkeit im IR-Foto ermöglicht zum Beispiel eine Früherkennung von Iriszysten oder eine verbesserte Erkennbarkeit einer Irisatrophie, wie sie als pathologische Veränderung des Auges bei ERU auftritt.

Aufgrund der größeren Wellenlänge der IR-Strahlung im Vergleich zur Strahlung des visuellen Spektrums des Menschen ist IR-Strahlung in der Lage eine getrübe Kornea zu passieren. Durch ein IR-Foto wird so in vielen Fällen einer Korneatrübung die Einsicht in das Auge ermöglicht. Dies spielt bei verschiedenen Erkrankungen eine Rolle. Fall 6, 7 und 8 demonstrieren die verbesserte Durchsicht bei einem kornealen Ödem in Zusammenhang mit einem Ulkus der Kornea. Fall 9 zeigt die größere Transparenz einer Trübung in der Umgebung eines Bindehautflaps im IR-Foto und Fall 10 zeigt sehr deutlich eine verbesserte Durchsicht durch eine narbige Trübung der Kornea. Auch bei einer Trübung der Kornea in Zusammenhang mit IMMK ermöglicht das IR-Foto einen besseren Blick auf die dahintergelegenen Strukturen. Ebenso sind die Umrisse der oft langen Blutgefäße bei diesem Krankheitsbild im IR-Foto klarer erkennbar. Weiterhin erscheint eine auftretende Korneatrübung in Zusammenhang mit einer Uveitis im IR-Foto transparenter als im VS-Foto. Ein Beispiel hierfür ist Fall 15. Fall 20 und 21 zeigen Patienten mit einem Sekundärglaukom aufgrund von ERU. Bei Fall 21 zeigt das IR-Foto eine deutlich verbesserte Transparenz und ermöglicht einen Blick auf die Iris und die Granula iridica. Bei Fall 20 ergibt das IR-Foto keine Verbesserung im Vergleich zum VS-Foto. Hier scheint das korneale Ödem so stark ausgeprägt zu sein, dass die IR-Fotografie an ihre Grenzen stößt.

Wie bereits in Zusammenhang mit der IMMK bei Fall 11, 12 und 14 erwähnt, ermöglicht die IR-Fotografie weiterhin eine verbesserte Darstellung von Blutgefäßen in der Kornea und erleichtert eine Abgrenzung des Aufzweigungsbereichs der Blutgefäße

vom umgebenden Korneaödem. Hierdurch ist eine verbesserte Verlaufsdokumentation möglich.

Fall 19 zeigt eindrücklich die Durchsicht durch ein Fibrinkoagel bei einem Pferd mit hochgradigem Hypopyon. Im VS-Foto ist die Pupille hingegen nicht einsehbar. Durch das IR-Foto wird es folglich ermöglicht, den Grad der Miosis bei einem solchen Patienten zu beurteilen und die Frequenz der Atropingabe passend einzustellen.

Trübungen der Linse stellen sich im IR-Foto als Bereiche hellerer Grautöne innerhalb der ansonsten schwarzen Pupille dar. Fall 22, 23, 24 und 25 zeigen Pferde mit altersbedingter Linsentrübung und Fall 18 ein Pferd mit beidseitiger Katarakt. Zur besseren Darstellung der Veränderungen der Linse ist das Anfertigen von Fotos aus unterschiedlicher Perspektive sinnvoll. Dies ist auch sinnvoll um die Reflexion des Blitzlichts von den tatsächlich vorhandenen Veränderungen abzugrenzen.

Die in den VS-Fotos von Fall 18 gut erkennbaren Striae der Kornea sind im IR-Foto nahezu transparent und nur bei genauerer Betrachtung in Vergrößerung erkennbar.

Bei Anfertigung von IR-Fotos in dunkler Umgebung kann die Weite der Pupille ohne Einfluss von Umgebungslicht beurteilt werden. Dies ist zur Beurteilung des Grads der Miosis bei Patienten mit Uveitis relevant. Weiterhin ermöglicht dies eine Darstellung größerer Bereiche der Linse. Die Fotos der Patienten wurden alle in einem Stallgebäude aufgenommen. Jedoch waren die Boxen nicht in allen Fällen ausreichend dunkel. Deshalb zeigen die IR-Fotos von Fall 2, 9 und 25 eine verengte Pupille im IR-Foto.

Fall 8 demonstriert weiterhin, dass die Fotos vor einem potenziellen Ausspülen der Augen oder einem Einbringen von Augenmedikamenten aufgenommen werden sollten, da es dadurch zur Entstehung von Unschärfe im Bild kommen kann.

Zudem sollten die Fotos hinsichtlich der Lokalisation der Blitzreflexion kontrolliert werden. In manchen Aufnahmen werden Bereiche der Iris oder der Granula iridica dadurch überlagert. Gegebenenfalls sollte eine entsprechende Aufnahme wiederholt werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen und ergänzen die Ergebnisse von Mc Mullen et al., 2009, und Tóth und Dikker, 2013, hinsichtlich des diagnostischen Mehrwerts der IR-Fotografie am Pferdeauge.

4. Fazit

Diese Arbeit stellt einen umfassenden Leitfaden für die technische Umsetzung der IR-Fotografie am Pferdeauge dar. Ein solcher Leitfaden existiert bisher nicht. Hierdurch wird es tierärztlichen Kliniken und Praxen ermöglicht, geeignetes Equipment und passende Einstellungen für diese Indikation auszuwählen und so die IR-Fotografie in den Untersuchungsgang von Augenpatienten zu integrieren.

Mit der ausgearbeiteten Methodik gelingt es, IR-Fotos von hoher Qualität mit geringem Zeitaufwand am wachen Pferd durchzuführen.

IR-Fotos liefern bei vielen Augenerkrankungen einen diagnostischen Mehrwert im Vergleich zum VS-Foto. Die wichtigsten Vorteile der IR-Fotografie sind eine verbesserte Darstellung von Pigmentveränderungen und Veränderungen des Oberflächenreliefs der Iris und der Granula iridica, sowie eine Transmission durch Trübungen der Kornea unterschiedlichster Art, wodurch eine Einsicht auf die dahinter gelegenen okulären Strukturen ermöglicht wird. Neben Trübungen der Kornea können auch Fibrinablagerungen in der vorderen Augenkammer durch IR-Strahlung durchdrungen werden, sodass eine Beurteilung der Pupille möglich wird. Weitere Einsatzmöglichkeiten sind die Darstellung des Verlaufs von Blutgefäßen in der Hornhaut oder eine Dokumentation von Linsentrübungen.

Aufgrund des diagnostischen Mehrwerts eignet sich die IR-Fotografie dazu, in den Untersuchungsgang von Augenpatienten routinemäßig integriert zu werden. Hierbei sollten immer ein IR- und ein VS-Foto im Vergleich angefertigt werden.

Im Rahmen weiterführender Arbeiten könnte die Darstellung einzelner Krankheitsbilder im IR-Foto anhand einer größeren Patientenzahl untersucht werden.

VI. ZUSAMMENFASSUNG

Einleitung

Die IR-Fotografie findet Einsatz in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen, der medizinischen Diagnostik sowie in der Kunst. Für die IR-Fotografie ist der nahe IR-Bereich mit Strahlungswellenlängen von etwa 750 bis 1100 nm relevant. Dieser schließt sich an den Rotbereich des für den Menschen visuellen Spektralbereichs an.

Die Bildsensoren moderner Digitalkameras können Strahlung des nahen IR-Bereichs erfassen. Um eine Digitalkamera als IR-Kamera nutzen zu können, muss der vor dem Bildsensor befindliche Hotmirrorfilter, der die Transmission der IR-Strahlung zum Bildsensor verhindert, durch einen professionellen Kameraumbau entfernt werden. Die Kamera wird schließlich durch einen IR-Filter, der nur Strahlung im IR-Bereich durchlässt, als IR-Kamera neu definiert.

In der Tiermedizin gibt es zwei Veröffentlichungen, die den Einsatz der IR-Fotografie als diagnostisches Hilfsmittel in der Pferdeophthalmologie anhand von Beispielen beschreiben. Eine genaue Anleitung für die technische Umsetzung existiert bisher nicht.

Ziel dieser Arbeit war es, Kriterien für die Auswahl und Einstellung eines geeigneten technischen Equipments zur IR-Fotografie am Pferd zu erstellen. Weiterhin sollen Anhaltspunkte für die praktische Umsetzung am Pferdepatienten gegeben werden und schließlich der diagnostische Mehrwert bzw. die Grenzen des Einsatzes der IR-Fotografie anhand von Beispielaufnahmen dargestellt werden.

Material und Methoden

Die Auswahl des technischen Equipments sowie der passenden Einstellungen erfolgte anhand von theoretischen Überlegungen auf der Basis des physikalischen und technischen Hintergrunds. Weiterhin wurden drei Versuchsreihen zum Vergleich verschiedener IR-Filter, zur Auswahl der geeigneten Leistungsstufe des externen Blitzgeräts sowie zur Überprüfung des Einflusses der Umgebungshelligkeit auf das Foto durchgeführt.

Folgendes Equipment wurde ausgewählt: die DSLM-Kamera „Sony α 7RIII“, das

Makroobjektiv „Sony SEL 50 mm/2,8 1:1 Makro“, der 695-nm-IR-Schraubfilter „Heliopan Filter RG 695 55 mm“, der Ringblitz „Metz Mecablitz 15 MS-1 digital“ und die IR-LED-Taschenlampe „Nightfox XB10“.

Die Kamera wurde durch einen professionellen Anbieter zu einer undefinierten Kamera umgebaut und durch einen IR-Schraubfilter vor dem Objektiv als IR-Kamera neu definiert. Das Blitzgerät wurde mit der Hälfte der Maximalleistung eingesetzt. Die IR-LED-Taschenlampe diente als Unterstützung zur Wahl des Bildausschnitts und des Fokussierens.

Folgende technische Einstellungen wurden gewählt: der manuelle Kameramodus, eine Belichtungszeit von 1/250 s, ein Blendenwert von 16, ein ISO-Wert von 100, der manuelle Weißabgleich, der kontinuierliche Autofokus mit dynamischer Mehrfeldmessung und der Hybrid-Verschluss. Der manuelle Weißabgleich wurde mit grünem Gras als Referenzfläche durchgeführt. Als Speicherformat wurde das JPEG-Format verwendet.

Zum Vergleich wurden VS-Fotos mit dem Smartphone „Samsung Galaxy S20“ und der App „OpenCamera“ aufgenommen.

Im Ergebnisteil befinden sich Beispielaufnahmen von 28 Pferden, die verschiedene physiologische Variationen sowie pathologische Veränderungen an den Augen ausweisen. 23 Pferde wurden unsediert in ihrer Box fotografiert, 3 Pferde waren aus einem anderen Grund sediert und 2 Pferde befanden sich in Vollnarkose.

Es waren etwa 4-5 Fotos pro Pferd erforderlich, um ein qualitativ gutes Foto zu erhalten. Der häufigste Grund für ein Aussortieren von Fotos war eine durch Kopfbewegungen des Pferdes verursachte Bildunschärfe.

Ergebnisse

Die Versuchsreihen zeigten, dass sowohl der 695-nm- als auch der 720-nm-IR-Filter für den Einsatz am Pferdeauge geeignet sind. Die beste Belichtung wurde durch die halbe Maximalleistung des Blitzgeräts erreicht. Die Umgebungshelligkeit hatte bei den gewählten Einstellungen keinen erkennbaren Einfluss auf die Bildhelligkeit. Die IR-Fotografie in einem abgedunkelten Raum ist jedoch geeignet, um den Grad einer Miosis abzuschätzen und um die Linse in größerem Umfang abzubilden.

Im IR-Foto stellt sich das Auge in verschiedenen Grautönen und deutlich kontrastreicher

dar als im VS-Foto. Dadurch können Pigmentveränderungen der Iris besser abgegrenzt und dokumentiert werden. Weiterhin wird das Oberflächenrelief im IR-Foto deutlich detailreicher dargestellt. Dies ermöglicht eine Früherkennung von Iriszysten und eine verbesserte Erkennbarkeit einer Atrophie der Granula iridica. Weiterhin sind Trübungen der Kornea bis zu einem gewissen Grad im IR-Foto transparent, sodass die Einsicht auf die dahinter gelegenen Strukturen ermöglicht wird. Dies ist zur Untersuchung von Patienten mit Korneauktus, Uveitis, Glaukom, IMMK oder narbigen Trübungen der Kornea hilfreich. Auch Fibrinablagerungen in der vorderen Augenkammer sind im IR-Foto teilweise transparent, wodurch eine Beurteilung der Weite der Pupille bei einem Hypopyon ermöglicht wird. Blutgefäße in der Kornea zeigen sich im IR-Foto als gut abgrenzbare graue Linien, und sind dadurch besser dokumentierbar als im VS-Foto. Linsentrübungen zeigen sich im IR-Foto als Aufhellungen in der ansonsten schwarzen Pupille. Zur Darstellung von Linsentrübungen kann es erforderlich sein, Fotos aus verschiedenen Perspektiven anzufertigen, um weitere Teile der Linse abzubilden und um die Veränderungen der Linse von den Reflexionen des Blitzlichts abzugrenzen.

Die IR-Fotografie ermöglicht es nicht, starke Trübungen der Kornea zu durchdringen. Weiterhin sind Striae der Kornea, die im VS-Foto klar sichtbar sind, im IR-Foto nahezu transparent.

Zur Vermeidung von Unschärfe sollten die Fotos im Vorfeld einer Medikamenteneingabe in den Bindehautsack oder eines Ausspülens des Auges angefertigt werden.

Fazit

Die in dieser Arbeit erläuterten Kriterien ermöglichen die Auswahl eines für die IR-Fotografie am Pferd geeigneten technischen Equipments und der passenden Einstellungen. Sind diese Kriterien erfüllt, so können IR-Fotos hoher Qualität mit nur geringem Zeitaufwand am wachen Pferd durchgeführt werden.

Durch die längere Strahlungswellenlänge interagiert IR-Strahlung in anderer Weise mit den okulären Strukturen als das für den Menschen sichtbare Licht. Aus diesem Grund unterscheiden sich IR-Fotos von VS-Fotos und liefern bei vielen Augenerkrankungen einen diagnostischen Mehrwert. Entsprechend eignet sich die IR-Fotografie dazu, routinemäßig in den Untersuchungsgang von Augenpatienten integriert zu werden.

VII. SUMMARY

Introduction

IR photography is used in various scientific disciplines, medical diagnostics as well as in art. For IR photography, the near IR range with radiation wavelengths of 750 to 1100 nm is relevant. This is adjacent to the red range of the spectral range that is visual to humans.

The image sensors of modern digital cameras can detect radiation in the near IR range. In order to use a digital camera as an IR camera, the hotmirror filter located in front of the image sensor, which prevents the transmission of IR radiation to the image sensor, must be removed by professional camera construction. The camera is finally redefined as an IR camera by adding an IR filter that only transmits radiation in the IR range.

In veterinary medicine, there are two publications that describe the use of IR photography as a diagnostic tool in equine ophthalmology using examples. Detailed instructions for the technical implementation do not exist yet.

The aim of this work was to establish criteria for the selection and adjustment of suitable technical equipment for IR photography on horses. Furthermore, indications for the practical implementation on the horse patient shall be given and finally the diagnostic added value or the limits of the use of IR photography shall be shown by means of example photographs.

Materials and methods

The selection of the technical equipment as well as the suitable settings was based on theoretical considerations on the basis of the physical and technical background. Furthermore, three series of experiments were conducted to compare different IR filters, to select the appropriate power level of the external flash unit, and to check the influence of the ambient brightness on the photo.

The following equipment was selected: the DSLM camera "Sony α 7RIII", the macro lens "Sony SEL 50 mm/2.8 1:1 macro", the 695 nm IR screw-on filter "Heliopan Filter RG 695 55 mm", the ring flash "Metz Mecablitz 15 MS-1 digital" and the IR LED

flashlight "Nightfox XB10".

The camera was converted to an undefined camera by a professional vendor and redefined as an IR camera by adding a screw-in IR filter in front of the lens. The flash was used at half the maximum power. The IR LED flashlight was used to assist in framing selection and focusing.

The following technical settings were chosen: manual camera mode, an exposure time of 1/250 s, an aperture value of 16, an ISO value of 100, manual white balance, continuous autofocus with dynamic multi-field metering, and hybrid shutter. Manual white balance was performed with green grass as the reference surface. JPEG format was used as the storage format.

For comparison, VS photos were taken with the smartphone "Samsung Galaxy S20" and the app "OpenCamera".

In the results section, there are sample photographs of 28 horses showing different physiological variations as well as pathological changes in the eyes. 23 horses were photographed unsedated in their stalls, 3 horses were sedated for another reason, and 2 horses were under general anesthesia.

It took about 4-5 photos per horse to get a good quality photo. The most common reason for rejecting photos was image blur caused by head movements of the horse.

Results

The series of experiments showed that both the 695-nm and 720-nm IR filters were suitable for use on the horse's eye. The best exposure was obtained by using half the maximum power of the flash unit. Ambient brightness had no discernible effect on image brightness at the selected settings. However, IR photography in a darkened room is suitable for estimating the degree of miosis and for imaging the lens to a greater extent.

In the IR photo, the eye presents in different shades of gray and much higher contrast than in the VS photo. Thus, pigment changes of the iris can be better delineated and documented. Furthermore, the surface relief is shown in much greater detail in the IR photo. This allows early detection of iris cysts and improved recognition of atrophy of the granula iridica. Opacities of the cornea are transparent to a certain degree in the IR photo, allowing insight into the structures behind them. This is useful for examining

patients with corneal ulcer, uveitis, glaucoma, IMMK, or scarring opacities of the cornea. Fibrin deposits in the anterior chamber of the eye are also partially transparent in the IR photograph, allowing assessment of pupil width in hypopyon. Blood vessels in the cornea show up as well-defined gray lines in the IR photo, and are thus easier to document than in the VS photo. Lens opacities show up in the IR photo as brightenings in the otherwise black pupil. To image lens opacities, it may be necessary to take photos from different perspectives to image more parts of the lens and to differentiate the changes in the lens from the reflections of the flash.

IR photography does not allow penetration of severe opacities of the cornea. Furthermore, striae of the cornea that are clearly visible in the VS photograph are nearly transparent in the IR photograph.

To avoid blurring, photographs should be taken prior to drug administration into the conjunctival sac or washout of the eye.

Conclusion

The criteria explained in this doctoral thesis allow the selection of suitable technical equipment and settings for IR photography on the horse. If these criteria are met, IR photographs of high quality can be performed on the awake horse with only a small expenditure of time.

Due to the longer radiation wavelength, IR radiation interacts with ocular structures in a different way than light visible to humans. For this reason, IR photographs differ from VS photographs and provide added diagnostic value in many ocular diseases. Accordingly, IR photography is suitable to be routinely integrated into the examination process of ocular patients.

VIII. LITERATURVERZEICHNIS

Badal, J., Biarnés, M. & Monés, J. (2017a). Performance characteristics of multicolor versus blue light and infrared imaging in the identification of reticular pseudodrusen. *International Ophthalmology*. <https://doi.org/10.1007/s10792-017-0448-z>

Badal, J., Biarnés, M. & Monés, J. (2017b). Performance characteristics of multicolor versus blue light and infrared imaging in the identification of reticular pseudodrusen. *International Ophthalmology*. <https://doi.org/10.1007/s10792-017-0448-z>

Banek, C. & Banek, G. (2013). *Fotografieren lernen: Band 1: Die technischen Grundlagen: Kameras, Objektive und Zubehör* (2., akt. Aufl.). dpunkt.verlag GmbH.

Barrera, V., Fliss, B., Panzer, S. & Bolliger, S. A. (2018). Gunshot residue on dark materials: a comparison between infrared photography and the use of an alternative light source. *International Journal of Legal Medicine*, 133(4), 1115–1120. <https://doi.org/10.1007/s00414-018-1965-7>

Berg, J. M., Stryer, L., Tymoczko, J. L., Held, A., Lange, C., Mahlke, K., Maxam, G., Seidler, L., Zellerhoff, N., Häcker, B. & Jarosch, B. (2012). *Stryer Biochemie* (7. Aufl.). Springer Spektrum.

Cawley, E. P. (1954). Infrared Spectroscopic Studies of Pigmented Skin Tumors. *Archives of Dermatology*, 70(6), 748. <https://doi.org/10.1001/archderm.1954.01540240054006>

Cubberly, M. G. (1976). Infrared photography as a diagnostic tool in ophthalmology. *Journal of the Biological Photographic Association*, 44, 80–85.

Cullip, M., Tran, V. C. & Ball, C. G. (2021). Tattoo visualization using cross-polarized lighting and infrared photography. *Forensic Science, Medicine and Pathology*, 17(2), 350–353. <https://doi.org/10.1007/s12024-020-00347-9>

- Curcio, C. A., Allen, K. A., Sloan, K. R., Lerea, C. L., Hurley, J. B., Klock, I. B. & Milam, A. H. (1991). Distribution and morphology of human cone photoreceptors stained with anti-blue opsin. *The Journal of Comparative Neurology*, 312(4), 610–624. <https://doi.org/10.1002/cne.903120411>
- Dallow, R. L. (1974a). Color Infrared Photography of the Ocular Fundus. *Archives of Ophthalmology*, 92(3), 254–258. <https://doi.org/10.1001/archopht.1974.01010010262020>
- Dallow, R. L. (1974b). Penetration of Retinal and Vitreous Opacities in Diabetic Retinopathy. *Archives of Ophthalmology*, 92(6), 531. <https://doi.org/10.1001/archopht.1974.01010010545019>
- Davies, A. (2017). *Digital Ultraviolet and Infrared Photography (Applications in Scientific Photography)* (1. Aufl.) [E-Book]. Routledge.
- Dekking, H. M. (1933). Infrarot-Photographie des Auges. *Albrecht von Graefes Archiv für Ophthalmologie*, 130(3), 373–374. <https://doi.org/10.1007/bf01855525>
- Dorame, K. (2015). *Mastering Infrared Photography: Capture Invisible Light with a Digital Camera* (1. Aufl.) [E-Book]. Amherst Media.
- Falk, D. (2019). *Seeing the Light: Optics in Nature, Photography, Color, Vision, and Holography* (1 akt. Aufl.) [E-Book]. Echo Point Books & Media.
- Falk, D., Brill, D. & Stork, D. (2019). *Seeing the Light: Optics in Nature, Photography, Color, Vision, and Holography* (1 akt. Aufl.) [E-Book]. Echo Point Books & Media.
- Gmelch, M. & Reineke, S. (2019). *Durchblick in Optik: Mit Phänomenen, Formeln und Fragen zum Verständnis* (1. Aufl.) [E-Book]. Springer Spektrum.
- Groer, M. (2017). *Die kleine Fotoschule: Grundlagen und Fotopraxis*. (2. Aufl.) [E-Book]. Humboldt.

Grundlagenwissen: Bildsensoren von Digitalkameras. (2018, 29. April). Dkamera. <https://www.dkamera.de/news/grundlagenwissen-zu-den-bildsensoren-von-digitalkameras/> (Besuch der Seite: 02.08.22)

Haarmeyer, H. & Westphalen, C. (2010). *Canon EOS 550D. Das Kamerahandbuch: Ihre Kamera im Praxiseinsatz (Galileo Design)* (1. Aufl.). Galileo Design.

Hennemann, M. (2010). *Digitale Fotografie - Der Meisterkurs* (1. Aufl.). Markt+Technik Verlag.

Huerkamp, B. (1955). Die Infrarot-Photographie in der Differentialdiagnostik von Pigmentveränderungen des vorderen Augenabschnittes. *Berichte der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft*, 56, 322.

Kirchheim, B. (2016, 2. Oktober). *Vor- und Nachteile der verschiedenen Autofokus-Systeme.* Digitalkamera. https://www.digitalkamera.de/Fototipp/Vor-_und_Nachteile_der_verschiedenen_Autofokus-Systeme/10079.aspx (Besuch der Website: 08.08.22)

Klein, L., Vandegrift, S. & Klein, K. (2020). *Infrared Photography: Digital Techniques for Brilliant Images (Pro Photo Series)* (2. Aufl.) [E-Book]. Amherst Media.

Knott, T. (o. D.). *The Ideal App? Theyeyephone.* <http://www.theeyephone.com/what-app.html> (Besuch der Website: 25.08.2022)

Lamprecht, S. (o. D.). *Infrarot Umbau – Technik erklärt.* Irrecams. <https://irrecams.de/infrarot-umbau-technik-erklart/> (Besuch der Website: 02.08.22)

Lamprecht, S. (2011). Infrarot-Galerie. Irrecams. <https://irrecams.de/wp-content/uploads/2021/01/IR205942-Developed-in-UFRaw.jpg> (Besuch der Website: 26.09.21; Verwendung der Abbildung mit schriftlicher Genehmigung des Urheberrechtsinhabenden)

Lamprecht, S. (2012). Infrarot-Galerie. Irrecams. https://irrecams.de/wp-content/uploads/2021/01/IMG_P9395-1024x681.jpg (Besuch der Website: 26.09.21; Verwendung der Abbildung mit schriftlicher Genehmigung des Urheberrechtsinhabenden)

Li, S., Johnson, J., Peck, A. & Xie, Q. (2017). Near infrared fluorescent imaging of brain tumor with IR780 dye incorporated phospholipid nanoparticles. *Journal of Translational Medicine*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s12967-016-1115-2>

Mangold, K. (2015). *Digitale Infrarotfotografie (mitp Edition Profifoto)* (2. Aufl.). mitp.

Mangold, K., Shaw, J. A. & Vollmer, M. (2013). The physics of near-infrared photography. *European Journal of Physics*, 34(6), S51–S71. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/34/6/s51>

Matthäus, W. & Grötzsch, K. (1966). Infrarotphotographie als diagnostisches Hilfsmittel in der Ophthalmologie. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*, 148, 723-728.

Mißfeldt, M. (2021). *Netzhaut (Retina) im Auge*. Onlineseh-tests. <https://www.onlineseh-tests.de/auge/netzhaut-retina.php> (Besuch der Website: 19.09.21; Verwendung der Abbildung mit schriftlicher Genehmigung des Urheberrechtsinhabenden)

McMullen Jr., R. J., Clode, A. B. & Gilger, B. C. (2009). Infrared digital imaging of the equine anterior segment. *Veterinary Ophthalmology*, 12(2), 125–131. <https://doi.org/10.1111/j.1463-5224.2008.00688.x>

McMullen, R. J., Millichamp, N. J., Pirie, C. G. (2021). Digital Ophthalmic Photography. In K. N. Gelatt, G. Ben-Shlomo, D. V. H. Hendrix, T. J. Kern, C. E. Plummer (Hrsg.), *Veterinary Ophthalmology* (6. Aufl., S. 815-875). Wiley-Blackwell.

Moramarco, A., Giustini, S., Nofroni, I., Mallone, F., Miraglia, E., Iacovino, C., Calvieri, S. & Lambiase, A. (2017). Near-infrared imaging: an in vivo, non-invasive diagnostic tool in neurofibromatosis type 1. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 256(2), 307–311. <https://doi.org/10.1007/s00417-017-3870-z>

Ofri, R. (2014). Optics and Physiology of Vision. In K. N. Gelatt (Hrsg.), *Essentials of Veterinary Ophthalmology* (3. Aufl., S. 55-65). Wiley-Blackwell.

Ogg, A. J. (1958). EXAMINATION OF THE EYE WITH INFRA-RED RADIATION. *British Journal of Ophthalmology*, 42(5), 306–310. <https://doi.org/10.1136/bjo.42.5.306>

Proulx, S. T., Luciani, P., Alitalo, A., Mumprecht, V., Christiansen, A. J., Huggenberger, R., Leroux, J. C. & Detmar, M. (2013). Non-invasive dynamic near-infrared imaging and quantification of vascular leakage in vivo. *Angiogenesis*, 16(3), 525–540. <https://doi.org/10.1007/s10456-013-9332-2>

Remky, A., Beausencourt, E., Hartnett, M. E., Trempe, C. L., Arend, O. & Elsner, A. E. (1999). Infrared imaging of cystoid macular edema. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 237(11), 897–901. <https://doi.org/10.1007/s004170050383>

Sänger, K. & Sänger, C. (2018). *Sony Alpha 7R III: Das umfangreiche Praxisbuch zu Ihrer Kamera!: Für bessere Fotos von Anfang an!* (1. Aufl.) [E-Book]. BILDNER Verlag.

Shazly, T. A. & Bonhomme, G. R. (2015). A simple infrared-augmented digital photography technique for detection of pupillary abnormalities. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 253(3), 487–490. <https://doi.org/10.1007/s00417-014-2924-8>

Sterzik, V. & Bohnert, M. (2016). Reconstruction of crimes by infrared photography. *International Journal of Legal Medicine*, 130(5), 1379–1385. <https://doi.org/10.1007/s00414-016-1343-2>

Sterzik, V., Panzer, S., Apfelbacher, M. & Bohnert, M. (2015). Searching for biological traces on different materials using a forensic light source and infrared photography. *International Journal of Legal Medicine*, 130(3), 599–605. <https://doi.org/10.1007/s00414-015-1283-2>

Sugawara, S. (2004). Comparison of Near Infrared Light Photography and Middle Infrared Light Photography for Deciphering Obliterated Writings. *Journal of Forensic Sciences*, 49(6), 1–4. <https://doi.org/10.1520/jfs2003422>

Systemkamera oder Spiegelreflex in 2022? 10 Unterschiede (DSLM vs. DSLR). (o. D.). Sonntagmorgen. <https://www.sonntagmorgen.com/systemkamera-oder-spiegelreflexkamera/> (Besuch der Website: 27.07.22)

Theelen, T., Berendschot, T. T. J. M., Hoyng, C. B., Boon, C. J. F. & Klevering, B. J. (2009). Near-infrared reflectance imaging of neovascular age-related macular degeneration. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 247(12), 1625–1633. <https://doi.org/10.1007/s00417-009-1148-9>

Thoma, M. (2022, 07. Juli). *Mechanischer oder elektronischer Verschluss? Den Kameraverschluss in 5 Lektionen verstehen*. Journal.markusthoma. <https://journal.markusthoma.com/mechanischer-elektronischer-verschluss/> (Besuch der Website: 27.07.22)

Tóth, J. & Dikker, L. (2013). Diagnostic value of infrared imaging in equine ophthalmology. *Pferdeheilkunde Equine Medicine*, 29(6), 700–706. <https://doi.org/10.21836/pem20130602>

Tóth, J., Hollerrieder, J. & Sótónyi, P. (2010). *Augenheilkunde beim Pferd: Atlas und Lehrbuch* (1. Aufl.). Schattauer.

Yoo, Y. J., Yang, H. K., Seo, J. M., Kim, K. G. & Hwang, J. M. (2019). Infrared photographs with a selective wavelength filter to diagnose small-angle esotropia in young children. *Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 257(3), 645–650. <https://doi.org/10.1007/s00417-019-04240-2>

Zinth, W. & Zinth, U. (2018). *Optik: Lichtstrahlen – Wellen – Photonen (De Gruyter Studium)* (5., überarbeitete Aufl.) [E-Book]. De Gruyter.

IX. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<i>Abbildung 1: Das elektromagnetische Spektrum</i>	5
<i>Abbildung 2: Absorptionsspektren der menschlichen Zapfen</i>	8
<i>Abbildung 3a: Zauberwürfel fotografiert ohne Sperrfilter vor dem Bildsensor</i>	11
<i>Abbildung 3b: Zauberwürfel fotografiert mit dem visuellen Lichtspektrum</i>	12
<i>Abbildung 3c: Zauberwürfel fotografiert mit 695-nm-IR-Filter</i>	12
<i>Abbildung 3d: Abbildung 3b als monochrome Aufnahme</i>	13
<i>Abbildung 4a: IR-Landschaftsfotografie</i>	14
<i>Abbildung 4b: IR-Landschaftsfotografie</i>	15
<i>Abbildung 5: Der zweite Verschlussvorhang verhindert eine vollständige Belichtung des Bildsensors, wenn die eingestellte Belichtungszeit kürzer ist als die Blitzsynchronisationszeit bei einer Fotografie mit Blitzgerät</i>	26
<i>Abbildung 6a, b: Die „Sony α7RIII“ mit dem Objektiv „Sony SEL 50 mm/2,8 1:1 Makro“</i>	57
<i>Abbildung 6a: Ansicht von schräg oben</i>	57
<i>Abbildung 6b: Blick auf das Display</i>	57
<i>Abbildung 7: Drei verschiedene IR-Schraubfilter. Von links nach rechts: 695-nm-Filter; 720-nm-Filter; 830-nm-Filter</i>	59
<i>Abbildung 8: Der „Metz Mecablitz 15 MS-1 digital“ mit Anschlusskabel zur Verbindung mit der Kamera</i>	60
<i>Abbildung 9: Die IR-LED-Taschenlampe „Nightfox XB10“</i>	61
<i>Abbildung 10a-c: IR-Fotos des rechten Auges einer 11-jährigen Haflinger-Stute bei Einsatz drei verschiedener IR-Schraubfilter und sonst konstanten Bedingungen. Zu jedem der Fotos ist das entsprechende Graustufen-Histogramm als Screenshot aus Adobe Photoshop abgebildet</i>	67
<i>Abbildung 10a-1: 695-nm-Filter</i>	67
<i>Abbildung 10a-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 10a-1</i>	67
<i>Abbildung 10b-1: 720-nm-Filter</i>	68
<i>Abbildung 10b-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 10b-1</i>	68
<i>Abbildung 10c-1: 830-nm-Filter</i>	69
<i>Abbildung 10c-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 10c-1</i>	69
<i>Abbildung 11a-f: IR-Fotos des rechten Auges einer 11-jährigen Haflingerstute mit</i>	

<i>einer Zunahme der eingestellten Blitzleistung von a zu f bei sonst konstanten Bedingungen. Zu jedem der Fotos ist das entsprechende Graustufen-Histogramm als Screenshot aus Adobe Photoshop abgebildet.....</i>	71
Abbildung 11a-1: 1/32 Leistung.....	71
Abbildung 11a-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 11a-1.....	71
Abbildung 11b-1: 1/16 Leistung.....	72
Abbildung 11b-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 11b-1.....	72
Abbildung 11c-1: 1/8 Leistung.....	73
Abbildung 11c-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 11c-1.....	73
Abbildung 11d-1: 1/4 Leistung.....	74
Abbildung 11d-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 11d-1.....	74
Abbildung 11e-1: 1/2 Leistung.....	75
Abbildung 11e-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 11e-1.....	75
Abbildung 11f-1: Volle Leistung.....	76
Abbildung 11f-2: Graustufen-Histogramm von Abbildung 11f-1.....	76
Abbildung 12a-c: IR-Fotos des rechten Auges einer 11-jährigen Haflinger-Stute bei wechselnder Umgebungshelligkeit und sonst konstanten Bedingungen.....	78
Abbildung 12a: Unter freiem Himmel bei direkter Sonneneinstrahlung.....	78
Abbildung 12b: Unter freiem Himmel im Schatten.....	78
Abbildung 12c: Im abgedunkelten Stall.....	79
Abbildung 13a,b: Rechtes Auge einer 12-jährigen Freiberger-Mix-Stute ohne bekannte Erkrankungen der Augen.....	80
Abbildung 13a: VS-Foto; Frontalansicht.....	80
Abbildung 13b: IR-Foto; Frontalansicht.....	81
Abbildung 14a-d: Beide Augen einer 24-jährigen Friesen-Stute ohne bekannte Erkrankungen der Augen.....	82
Abbildung 14a: VS-Foto des linken Auges; Frontalansicht.....	82
Abbildung 14b: IR-Foto des linken Auges; Frontalansicht.....	82
Abbildung 14c: VS-Foto des rechten Auges; Frontalansicht.....	83
Abbildung 14d: IR-Foto des rechten Auges; Frontalansicht.....	83
Abbildung 15a-c: Rechtes Auge eines 2-jährigen Quarter-Horse-Wallachs mit heterochromer Iris und ohne bekannte Erkrankungen der Augen.....	85
Abbildung 15a: VS-Foto; Frontalansicht.....	85
Abbildung 15b: IR-Foto; Frontalansicht.....	85

<i>Abbildung 15c: IR-Foto; schräge Ansicht</i>	86
<i>Abbildung 16a-c: IR-Fotos des linken und rechten Auges einer 29-jährigen Paso-Peruano-Stute ohne bekannte Erkrankungen der Augen</i>	87
<i>Abbildung 16a: IR-Foto des linken Auges; Frontalansicht</i>	87
<i>Abbildung 16b: IR-Foto des linken Auges; Detailansicht der Granula iridica</i>	87
<i>Abbildung 16c: IR-Foto des rechten Auges; Detailansicht der ventralen Iris</i>	88
<i>Abbildung 17a-c: IR-Fotos des linken und rechten Auges eines 22-jährigen Welsh-Pony-Wallachs ohne bekannte Erkrankungen der Augen</i>	89
<i>Abbildung 17a: IR-Foto des linken Auges; Frontalansicht</i>	89
<i>Abbildung 17b: IR-Foto des linken Auges; Detailansicht der Granula iridica</i>	89
<i>Abbildung 17c: IR-Foto des rechten Auges; schräge Ansicht</i>	90
<i>Abbildung 18a,b: Rechtes Auge einer 7-jährigen Warmblut-Stute mit stromalem Ulkus im nasalen Bereich der Kornea</i>	91
<i>Abbildung 18a: VS-Foto; Frontalansicht</i>	91
<i>Abbildung 18b: IR-Foto; Frontalansicht</i>	91
<i>Abbildung 19a-c: Rechtes Auge eines 16-jährigen Islandpony-Wallach mit stromalem Ulkus im ventralen Bereich der Kornea. Der Ulkus befindet sich in fortschreitender Heilung</i>	93
<i>Abbildung 19a: VS-Foto; Frontalansicht</i>	93
<i>Abbildung 19b: IR-Foto; Frontalansicht</i>	93
<i>Abbildung 19c: IR-Foto; schräge Ansicht</i>	94
<i>Abbildung 20a,b: Rechtes Auge einer 4-Monate-alten Warmblut-Stute mit einem stark einschmelzenden, stromalen Korneaulkus im temporalen Bereich der Kornea</i>	95
<i>Abbildung 20a: VS-Foto; Frontalansicht</i>	95
<i>Abbildung 20b: IR-Foto; Frontalansicht</i>	95
<i>Abbildung 21a,b: Rechtes Auge eines 12-jährigen PRE-Hengstes mit heterochromer Iris. Der Bindehautflap wurde etwa 12 Monate vor der Aufnahme des Fotos zur Versorgung eines Korneaulkus aufgebracht</i>	97
<i>Abbildung 21a: VS-Foto; Frontalansicht</i>	97
<i>Abbildung 21b: IR-Foto; Frontalansicht</i>	97
<i>Abbildung 22a,b: Rechtes Auge eines 13-jährigen Haflinger-Wallachs mit narbiger Trübung der Kornea infolge eines Korneaabszesses</i>	99
<i>Abbildung 22a: VS-Foto; schräge Ansicht</i>	99
<i>Abbildung 22b: IR-Foto; schräge Ansicht</i>	99

<i>Abbildung 23a,b: Rechtes Auge eines 21-jährigen Islandpony-Wallachs mit immunmediierter Keratitis (IMMK).....</i>	<i>101</i>
<i>Abbildung 23a: VS-Foto; Frontalansicht.....</i>	<i>101</i>
<i>Abbildung 23b: IR-Foto; Frontalansicht.....</i>	<i>101</i>
<i>Abbildung 24a,b: Rechtes Auge einer 22-jährigen Deutschen-Reitpony-Stute mit IMMK.....</i>	<i>103</i>
<i>Abbildung 24a: VS-Foto; Frontalansicht.....</i>	<i>103</i>
<i>Abbildung 24b: IR-Foto; Frontalansicht.....</i>	<i>103</i>
<i>Abbildung 25a,b: Linkes Auge eines 16-jährigen Warmblut-Wallachs, der etwa eine Woche vor der Aufnahme eine Keratektomie aufgrund von IMMK erhalten hatte....</i>	<i>105</i>
<i>Abbildung 25a: VS-Foto; Frontalansicht.....</i>	<i>105</i>
<i>Abbildung 25b: IR-Foto; Frontalansicht.....</i>	<i>105</i>
<i>Abbildung 26a,b: Rechtes Auge eines 16-jährigen Shetlandpony-Wallachs mit chronisch-persistierender zentrotemporaler Trübung der Kornea und Verdachtsdiagnose einer IMMK.....</i>	<i>107</i>
<i>Abbildung 26a: VS-Foto; Frontalansicht.....</i>	<i>107</i>
<i>Abbildung 26b: IR-Foto; Frontalansicht.....</i>	<i>107</i>
<i>Abbildung 27a,b: Rechtes Auge eines 22-jährigen Knabstrupper-Wallachs mit Tigerscheckenuveitis.....</i>	<i>109</i>
<i>Abbildung 27a: VS-Foto; Frontalansicht.....</i>	<i>109</i>
<i>Abbildung 27b: IR-Foto; Frontalansicht.....</i>	<i>109</i>
<i>Abbildung 28a,b: Rechtes Auge eines 18-jährigen Warmblut-Wallachs mit equiner rezidivierender Uveitis (ERU) in fortgeschrittenem Stadium.....</i>	<i>111</i>
<i>Abbildung 28a: VS-Foto; Frontalansicht.....</i>	<i>111</i>
<i>Abbildung 28b: IR-Foto; Frontalansicht.....</i>	<i>111</i>
<i>Abbildung 29a-d: Beide Augen eines 11-jährigen Deutschen-Reitpferd-Wallachs mit Tigerscheckenuveitis in beiden Augen.....</i>	<i>113</i>
<i>Abbildung 29a: VS-Foto des linken Auges; Frontalansicht.....</i>	<i>113</i>
<i>Abbildung 29b: IR-Foto des linken Auges; Fontalansicht.....</i>	<i>113</i>
<i>Abbildung 29c: VS-Foto des rechten Auges; Frontalansicht.....</i>	<i>114</i>
<i>Abbildung 29d: IR-Foto des rechten Auges; Frontalansicht.....</i>	<i>114</i>
<i>Abbildung 30a-d: Beide Augen einer 15-jährigen Kaltblut-Stute mit ERU und infolgedessen einem Sekundärglaukom und einer maturen Katarakt mit Linsenluxation.....</i>	<i>116</i>

<i>Abbildung 30a: VS-Fotos des linken Auges; Frontalansicht</i>	116
<i>Abbildung 30b: IR-Foto des linken Auges; schräge Ansicht</i>	116
<i>Abbildung 30c: VS-Foto des rechten Auges; schräge Ansicht</i>	117
<i>Abbildung 30d: IR-Foto des linken Auges; schräge Ansicht</i>	117
<i>Abbildung 31a,b: Rechtes Auge einer 4-jährigen Warmblut-Stute mit akuter Uveitis und hochgradigem Hypopyon</i>	119
<i>Abbildung 31a: VS-Foto; Frontalansicht</i>	119
<i>Abbildung 31b: IR-Foto; Frontalansicht</i>	119
<i>Abbildung 32a,b: Linkes Auge eines Warmblut-Wallachs unbekanntes Alters mit ERU und Sekundärglaukom</i>	121
<i>Abbildung 32a: VS-Foto; Frontalansicht</i>	121
<i>Abbildung 32b: IR-Foto; Frontalansicht</i>	121
<i>Abbildung 33a,b: Linkes Auge eines 15-jährigen Warmblut-Wallachs mit ERU und Sekundärglaukom</i>	123
<i>Abbildung 33a: VS-Foto; Frontalansicht</i>	123
<i>Abbildung 33b: IR-Foto; Frontalansicht</i>	123
<i>Abbildung 34a,b: Rechtes Auge eines 26-jährigen Pony-Mix-Wallachs mit altersbedingter Linsentrübung</i>	125
<i>Abbildung 34a: VS-Foto; Frontalansicht</i>	125
<i>Abbildung 34b: IR-Foto; schräge Ansicht</i>	125
<i>Abbildung 35a,b: Rechtes Auge einer 20-jährigen Warmblut-Stute mit altersbedingter geringgradiger Linsentrübung und starker fokaler länglicher Pigmentierung der Iris im nasalen Bereich</i>	127
<i>Abbildung 35a: VS-Foto; Frontalansicht</i>	127
<i>Abbildung 35b: IR-Foto; schräge Ansicht</i>	127
<i>Abbildung 36a-f: Beide Augen einer 26-jährigen Shetlandpony-Stute mit Menschenaugen und altersbedingter Linsentrübung</i>	129
<i>Abbildung 36a: VS-Foto des linken Auges; schräge Ansicht</i>	129
<i>Abbildung 36b: IR-Foto des linken Auges; Frontalansicht</i>	130
<i>Abbildung 36c: IR-Foto des linken Auges; schräge Ansicht</i>	130
<i>Abbildung 36d: VS-Foto des rechten Auges; Frontalansicht</i>	130
<i>Abbildung 36e: IR-Foto des rechten Auges; Frontalansicht</i>	131
<i>Abbildung 36f: IR-Foto des rechten Auges; schräge Ansicht</i>	131
<i>Abbildung 37a-c: Rechtes Auge eines 29-jährigen Westphalen-Wallachs mit</i>	

<i>altersbedingter Linsentrübung und mehreren Irisnävi. Der Wallach hatte vor mehreren Jahren eine Lidoperation, sodass der Lidschluss nasal unvollständig ist..</i>	133
Abbildung 37a: VS-Foto; Frontalansicht.....	133
Abbildung 37b: IR-Foto; Frontalansicht.....	133
Abbildung 37c: IR-Foto; schräge Ansicht.....	134
Abbildung 38a,b: Rechtes Auge eines 25-jährigen Hannoveraner-Wallachs mit Iriszyste.....	135
Abbildung 38a: VS-Foto; Frontalansicht.....	135
Abbildung 38b: IR-Foto; Frontalansicht.....	135
Abbildung 39a,b: Rechtes Auge eines 16-jährigen Warmblut-Wallachs mit einer Iriszyste im Bereich der Granula iridica und einem Irisnävus im ventronasalen Bereich der Iris.....	137
Abbildung 39a: VS-Foto; Frontalansicht.....	137
Abbildung 39b: IR-Foto; Frontalansicht.....	137

X. DANKSAGUNG

Mein besonderer Dank gilt Frau Priv.-Doz. Dr. Bettina Wollanke für die Annahme meines Themenvorschlags, für die stets freundliche und konstruktive Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit sowie für deren Korrektur.

Im Weiteren danken möchte ich Herrn Dr. Stefan Gesell, Frau Yvonne Dziubek, Frau Sabrina Schoss und Frau Dr. Kathrin Rasch für ihr Interesse an meinem Projekt und für die Bereitstellung von Patienten.

Danken möchte ich auch Herrn Dr. Kai Klingelhöfer dafür, meine Begeisterung für die Ophthalmologie geweckt zu haben und mich auf das Paper zur IR-Fotografie von Richard McMullen aufmerksam gemacht zu haben, wodurch die Idee zu dieser Doktorarbeit entstanden ist.

Ein großes Dankeschön gilt auch Herrn Sven Lamprecht für die umfangreiche Beratung hinsichtlich des am besten geeigneten technischen Equipments und für den Umbau meiner Kamera.

Und natürlich geht auch ein großer Dank an meine Familie und meine Freunde für ihre bedingungslose Unterstützung. Vielen Dank an Reinhard und Brigitta für das Kontrolllesen meiner Arbeit. Vielen Dank an Miriam für die tägliche Motivation in der Endphase des Schreibens. Herzlichen Dank an meine Mutter, dafür mir den Rücken frei gehalten zu haben. Und vielen herzlichen Dank an Stephan für die Motivation zum Fertigstellen dieser Arbeit, das Kontrolllesen und die ganze Unterstützung rundherum.