Vergleichende Untersuchungen über Produktions- und Tierschutzparameter bei Masthühnern bei Haltung unter einem konstanten und einem diskontinuierlichen Lichtintensitätsprogramm

von Patricio Sebastián Asencio Schmidt

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Tierärztlichen Fakultät der

Ludwig-Maximilians-Universität

München

Vergleichende Untersuchungen über Produktions- und Tierschutzparameter bei Masthühnern bei Haltung unter einem konstanten und einem diskontinuierlichen Lichtintensitätsprogramm

von Patricio Sebastián Asencio Schmidt

aus Osorno

München 2020

Aus dem Zentrum für Klinische Tiermedizin der Tierärztlichen Fakultät

der Ludwig-Maximilians-Universität München

Klinik für Vögel, Kleinsäuger, Reptilien und Zierfische

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

Mitbetreuung durch: Dr. Noreen Baas und Priv. Doz. Dr. Monika Rinder

Gedruckt mit Genehmigung der Tierärztlichen Fakultät

der Ludwig-Maximilians-Universität München

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Reinhard K. Straubinger, Ph. D.
Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. Rüdiger T. Korbel
Korreferent: Priv.-Doz. Dr. Elke Rauch

Tag der Promotion: 25.Juli 2020

Für meine liebe Elizabeth

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I
Abkürzungsverzeichnis V
1 Einleitung 1
2 Literaturübersicht 4
2.1 Visuelle Perzeption der Vögel 4
2.1.1 Sichtbares Licht 5
2.1.2 Das Sehvermögen 7
2.1.3 Lichtempfindlichkeit und Lichtperzeption des Huhnes 8
2.1.4 Transmissionsgrad der Augenmedien 9
2.1.5 Transmissionsgrad der Öltröpfchen 11
2.1.6 Absorptionsgrad der Sehpigmente 12
2.2 Photorezeptoren der aviären Netzhaut 13
2.2.1 Einzelzapfen 13
2.2.2 Doppelzapfen 15
2.2.3 Stäbchen 16
2.3 Farbperzeption und Helligkeitswahrnehmung des Huhnes 17
2.3.1 Farbperzeption des Huhnes 17
2.3.2 Helligkeitswahrnehmung und Lichtintensität 22
2.4 Extra-retinale Bestrahlungsdetektion und zirkadiane Rhythmik 28
2.4.1 Endogene Rhythmen und deren Beeinflussung durch Licht 29
2.4.2 Melatoninproduktion bei Vögeln 30
2.4.3 Melatonin und Wachstumsregulation 31
2.4.4 Muskelwachstum bei Vögeln 31
2.5 Lichtmanagement in der Broilermast 33
2.5.1 Parameter der Masthühnerproduktion und Tierschutz 33
2.5.1.1 Produktionsparameter 34
2.5.1.2 Tierschutzparameter 35
2.5.2 Photoperiode in der Wirtschaftsgeflügelhaltung und deren Auswirkungen auf die Masthühnerproduktion und den Tierschutz 38
2.5.2.1 Photoperiode und Produktionsparameter 40
2.5.2.2 Photoperiode und Tierschutzparameter 43

2.5.3 Wellenlänge in der Wirtschaftsgeflügelhaltung und deren Auswirkungen auf die Masthühnerproduktion und den Tierschutz 46
2.5.3.1 Wellenlänge und Produktionsparameter 48
2.5.3.2 Wellenlänge und Tierschutzparameter 50
2.5.4 Lichtintensität in der Wirtschaftsgeflügelhaltung und deren Auswirkungen auf die Masthühnerproduktion und den Tierschutz 52
2.5.4.1 Lichtintensität und Produktionsparameter 53
2.5.4.2 Lichtintensität und Tierschutzparameter 57
2.6 Gesetzliche Grundlagen 59
2.6.1 Nationales Recht 60
2.6.2 Bundeseinheitliche Leitlinien für die gute betriebliche Praxis zur Haltung von Masthühnern. Stand 1. Juni 2012 61
3 Material und Methoden 62
3.1 Gesamtziel 62
3.2 Spezifische Ziele 62
3.3 Tiere, Material und Methoden 63
3.3.1 Tiere und Aufzuchtverfahren 63
3.3.2 Stallbau, Lüftung- und Heizungssystem 65
3.3.3 Einstreu 65
3.3.4 Futter, Wasser und Versorgungseinrichtungen 65
3.3.5 Lichtverhältnisse 66
3.4 Datenerfassung 67
3.4.1 Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit 68
3.4.2 Einstreuqualität 68
3.4.3 Lichtintensität und Lichtspektrum 69
3.4.4 Produktionsparameter und Mortalität 73
3.4.5 Tierschutzparameter 74
3.5 Statistische Auswertung 77
4 Ergebnisse 79
4.1 Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit 79
4.2 Einstreuqualität 82
4.3 Lichtintensität und Lichtspektrum 84
4.4 Produktionsparameter und Mortalität 86
4.4.1 Körpermasse 87

4.4.2 Futteraufnahme 88
4.4.3 Futterverwertung 90
4.4.4 Mortalität 91
4.5 Tierschutzparameter 95
4.5.1 Pododermatitis 95
4.5.2 „Hock burn“ 95
4.5.3 Kontaktdermatitis an der Brust 95
4.5.4 Verkratzungen 96
5 Diskussion 98
5.1 Kontrolle der Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Einstreuqualität 98
5.1.1 Lufttemperatur 98
5.1.2 Luftfeuchtigkeit 99
5.1.3 Einstreuqualität 100
5.2 Lichtverhältnisse 102
5.2.1 Lichtintensität 102
5.2.2 Lichtspektrum 105
5.3 Lichtintensität und deren Auswirkung auf Produktionsparameter und Mortalität 107
5.3.1 Körpermasse 107
5.3.2 Futteraufnahme 111
5.3.3 Futterverwertung 113
5.3.4 Mortalität 114
5.4 Lichtintensität und deren Auswirkung auf Tierschutzparameter 117
5.4.1 Pododermatitis 117
5.4.2 „Hock burn“ 118
5.4.3 Kontaktdermatitis an der Brust 119
5.4.4 Verkratzungen 120
5.5 Schlussfolgerungen aus den vergleichenden Untersuchungen über Produktions- und Tierschutzparameter bei Masthühnern bei Haltung unter einem konstanten und einem diskontinuierlichen Lichtintensitätsprogramm 121
6 Zusammenfassung 123
7 Summary 125
8 Resumen 127
9 Literaturverzeichnis 129

10 Anhang..... 159
10.1 Abbildungsverzeichnis..... 159
10.2 Tabellenverzeichnis..... 161
10.3 Danksagung 163

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	=	Abbildung
Cd	=	Candela
C-Lux	=	Corrected Lux, Einheit der Beleuchtungsstärke nach der Wahrnehmung des Haushuhnes
CT	=	Farbtemperatur (Color temperature)
D	=	Dunkelheit
FA	=	Futteraufnahme
FV	=	Futterverwertung
HKV	=	Herz-Kreislauf-Versagen
IS	=	internationales Einheitensystem
K	=	Kelvin, SI-Einheit
KM	=	Körpermasse
KWI	=	Key Welfare Indicators
L	=	Licht
LIAG	=	lichtinduziertes aviäres Glaukom
Lm	=	Lumen
Lm/m^2	=	Lumen pro Quadratmeter, SI-Einheit
Lux	=	SI-Einheit der Beleuchtungsstärke nach der menschlichen Wahrnehmung
LWS	=	Long-wave-sensitive
Lx	=	Lux, SI-Einheit
MWS	=	Medium-wave-sensitive
Nm	=	Nanometer, SI-Einheit
OCT	=	Optische Kohärenztomographie
SWS	=	Short-wave-sensitive
UV	=	Ultraviolett
V	=	Violett
W	=	Watt, SI-Einheit
W/m^2	=	Watt pro Quadratmeter, SI-Einheit

1 Einleitung

In der modernen Geflügelindustrie wird die Aufzucht von Masthühnern (*Gallus gallus domesticus*) hauptsächlich in geschlossenen Stallungen unter kontrollierten Umgebungsbedingungen durchgeführt, in denen verschiedene Aspekte des Lichts (Lichtspektrum, Photoperiode und Lichtintensität) reguliert werden können.

Die Lichtintensität ist ein wichtiger Managementfaktor, der die Leistung und das Tierwohl des Geflügels durch die Modulation von Verhalten und physiologischen Prozessen beeinflussen kann. Lichtintensität ist eine Funktion der spektralen Leistungsabgabe von Leuchtmitteln und der spektralen Perzeption, mit der die Wellenlängen aufgenommen werden (Nuboer et al., 1992; Prescott & Wathes, 1999b). Haushühner (*Gallus gallus domesticus*) unterscheiden sich erheblich in ihrer spektralen Empfindlichkeit vom Menschen (Bowmaker & Knowles, 1977; Govardovskiĭ & Zueva, 1977; Nuboer, Coemans, & Vos, 1992; Osorio et al., 1999a; Osorio et al., 1999b; Prescott & Wathes, 1999b). Die spektrale Empfindlichkeit beeinflusst wahrscheinlich die Perzeption von Farbe und Helligkeit (Lewis & Morris, 1998, 2000; Nuboer et al., 1992; Prescott & Wathes, 1999b). Aus diesem Grund können bei Menschen verschiedene Lichtquellen die gleiche Intensität erzeugen, wohingegen sie von Hühnern unterschiedlich wahrgenommen werden.

Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass eine hohe Lichtintensität die Aktivität von Vögeln erhöht und das Auftreten von Beinschwächen und Hautveränderungen an den Sohlenballen und Intertarsalgelenken während der Wachstumsperiode reduziert (Boshouwers & Nicaise, 1987; Cherry & Barwick, 1962; Deep, et al., 2010; 2013; Newberry et al., 1988). Hingegen wurde eine geringe Lichtintensität mit einer verringerten Gesamtaktivität, Bewegungs- und Stehfähigkeit sowie einer geringeren Inzidenz aggressiven Verhaltens in Verbindung gebracht (Buyse et al., 1996; Kristensen et al., 2004; 2006a; Prayitno et al., 1997b). Während stichhaltige Beweise vorliegen, dass eine hohe Lichtintensität das Verhalten und das Wohlbefinden von Masthühnern positiv beeinflusst, zeigen nur einige wenige Untersuchungen signifikante Auswirkungen auf die Produktionsparameter. Körpermasse, Futteraufnahme und Futterverwertung blieben bei einer Lichtintensität zwischen 5 und 200 Lux unbeeinflusst (Blatchford et al., 2009; Deep et al., 2010; Lien et al., 2007; Newberry et al., 1988). Durch zu niedrige Lichtintensitäten (< 5 Lux) bei der Aufzucht von Masthühnern konnten negative Effekte auf die Uniformität der Körpermasse, ein geringeres Mastendmasse, eine höhere Mortalität und eine niedrigere Wachstumsrate festgestellt werden (Deep et al., 2013; Lien et al., 2007).

Das Lichtregime in der Aufzucht von Masthühnern unterliegt strengen nationalen und internationalen Richtlinien, Verordnungen und Gesetzen. In Deutschland stellt seit 2009 der Abschnitt 4 der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (TierSchNutztV, 2006 zuletzt geändert am 30.06.2017) die Grundlage für das Halten von konventionell aufgezogenen Masthühnern dar. Dieser Abschnitt diente der Umsetzung der Richtlinie 2007/43/EG des Rates vom 28. Juni 2007 mit Mindestvorschriften zum Schutz von Masthühnern (Richtlinie 2007/43/EG des Rates). Angaben zum Lichtregime und der Lichtintensität werden hier insbesondere in den §§ 18 und 19 gemacht. Bei anderen Haltungsformen (extensive Bodenhaltung, Freilandhaltung, ökologische Haltung) müssen zusätzlich die Anforderungen der Verordnung (EG) 543/2008 der Kommission vom 16. Juni 2008 Anhang V (Verordnung EG Nr. 543/2008), Verordnung (EG) 834/2007 des Rates vom 28. Juni 2007 (Verordnung EG Nr. 834/2007), Verordnung (EG) 889/2008 der Kommission vom 5. September 2008 (Verordnung EG Nr. 889/2008) sowie die Vorschriften der einzelnen Bioverbände, wie zum Beispiel Demeter (Demeter, 2018), Bioland (Bioand, 2019) oder Naturland (Naturland, 2019), Anwendung finden.

Allgemein ist vorgeschrieben, dass ab dem 7. Tag nach der Einstallung bis 3 Tage vor dem geplanten Schlachttermin ein kontinuierliches Lichtintensitäts-Regime mit einer Photophase von mindestens 20 Lux gewährleistet sein muss (TierSchNutztV, 2006 zuletzt geändert am 30.06.2017). Währen der Skotophase kann eine künsliche Lichtquelle zur Orientierung mit einer Lichtintensität von maximal 0,5 Lux toleriert werden (BMELV, 2012). Eine Regulierung der Lichtintensität nach unten darf nur nach tierärztlicher Indikation erfolgen. Dem gegenüber empfehlen jedoch die verschiedenen Managementguides der einzelnen Zuchtunternehmen bereits ab dem 7 Aufzuchttag eine schrittweise Regulierung der Lichtintensität auf 5 - 10 Lux, um Tierschutz- und Produktionsparameter zu verbessern (Arbor Acres, 2018; Aviagen, 2018; Cobb-Vantress, 2018; Hubbard, 2016). Dennoch sind Schwankungen der Lichtintensität während der Aufzuchtperiode heutzutage noch nicht hinreichend untersucht (Kristensen et al., 2004; 2006a; Schneeganß, 2018).

In früheren Studien wurde die Auswirkung unterschiedlicher konstanter Lichtintensitätsniveaus auf die Gesundheit, das Verhalten, die Tierschutzparameter und die Produktivität von Masthühnern untersucht (Blatchford et al., 2009; Boshouwers & Nicaise, 1987; Buyse et al., 1996; Cherry & Barwick, 1962; Deep, et al., 2010; 2013; Kristensen et al., 2004; 2006a; Lien et al., 2007; Newberry et al., 1988; Prayitno et al., 1997). Bisher erforschten jedoch nur wenige Studien den Effekt der diskontinuierlichen Lichtintensität während der Aufzuchtperiode von Masthühnern (Kristensen et al., 2004; 2006a; Schneeganß, 2018; Weise, 2007). In diesem Zusammenhang ist es das Ziel der vorliegenden Untersuchung, die

Auswirkung zweier unterschiedlicher Beleuchtungsprogramme mit konstanter und diskontinuierlicher Lichtintensität auf Produktions- und Tierschutzparameter bei Masthühnern zu vergleichen, um zur Identifizierung eines tiergerechten Lichtintensitätsprogramms bei der intensiven Masthühneraufzucht unter künstlichen Lichtbedingungen beizutragen.

2 Literaturübersicht

2.1 Visuelle Perzeption der Vögel

Vögel haben möglicherweise eines der aufwendigsten visuellen Systeme aller Tiere (Goldsmith, 1991; Walls, 1942). In anatomischer Hinsicht scheint sich die Bedeutung des Sehens in dem relativ großen Volumen der Augäpfel widerzuspiegeln, die einen erheblichen Teil des Vogelkopfes ausmachen. So ist bei Vögeln 50 % oder mehr des Schädelvolumens durch die Augen belegt. Im Vergleich hierzu stellen die Augen des Menschen weniger als 5 % des Schädelvolumens dar (Waldvogel, 1990). Die Bulbi der Vögel können größer als jene eines viel größeren Säugetiers sein. Bei einigen Spezies ist der Bulbus sogar größer als das Gehirn des Vogels (Burton, 2008; Garamszegi et al., 2002). Ursächlich hierfür ist eine direkte Beziehung zwischen Augengröße und Sehschärfe (Kiltie, 2000). Obwohl eine Erhöhung der Augenmasse eine Gewichtszunahme impliziert, was einen Nachteil für den Flug darstellt, hat die hohe Priorität des Sehsinns dazu geführt, dass Vögel verschiedene Augentypen entwickelten, die einen großen Durchmesser mit einem großen Sehfeld der Netzhaut aber mit reduziertem Gewicht aufweisen (Garamszegi et al., 2002). Dabei werden drei Grundformen der Augäpfel, flach, konisch sowie tubulär unterschieden (siehe Abbildung 1), welche auf die Ökologie der verschiedenen Vogelarten abgestimmt sind (Walls, 1942). Hier seien beispielsweise nachtaktive Vögel wie Eulen genannt, deren größere Länge des axialen Durchmessers des Auges im Vergleich zum sagittalen oder koronaren Durchmesser den Bulbi eine tubuläre Form verleiht. Die resultierende Verlängerung des Abstandes zwischen Linse und Retina führt zu einer Vergrößerung des abzubildenden Objektes auf der Retina. Auf diese Weise kann das Auge die niedrige Helligkeit besser nutzen und maximiert so das Auflösungsvermögen bei dunklen Lichtverhältnissen. Bei tagaktiven Vögeln, die eine hohe räumliche Auflösung bei Fernsicht benötigen (z.B. Raubvögel), führt die gleiche oder ähnliche Länge aller Durchmesser des Auges eine konische Form des Bulbus herbei. Bei Vogelspezies wie dem Huhn, dessen Nahrungssuche auf die Bodenebene beschränkt ist, stellt eine flache Augenform die geeignete Anpassung dar, da sie dem Vogel ein hervorragendes Nahsehen ermöglicht (Walls, 1942).

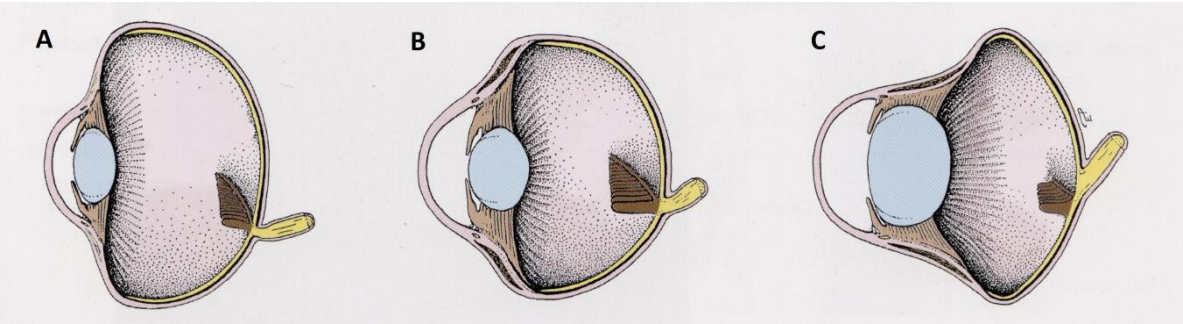

Abbildung 1: Bulbusformen der Vögel; a) flach b) konisch c) tubulär (Reese et al., 2016).

Die Entwicklung eines solch komplexen Systems stellt aus funktionaler Sicht teilweise eine Anpassung an die Flugfähigkeit der Vögel dar (Walls, 1942). Die hohe Geschwindigkeit der Bewegung der Vögel im Flug erfordert ein visuelles System mit hohem zeitlichen Auflösungsvermögen, großer Sehschärfe und schneller Akkomodation (Cuthill et al., 2000; Walls, 1942). Zudem sind auch viele andere Verhaltensweisen, wie die Nahrungssuche, die Feindvermeidung, das Sozialverhalten und vielfältige intraspezifische Wechselwirkungen in der Hauptsache optisch vermittelt. Dabei sind die spektrale Wahrnehmung und das Farbunterscheidungsvermögen von großer Bedeutung (Bennett & Cuthill, 1994; Bennett et al., 1997; Cuthill et al., 2000; Honkavaara et al., 2002; Jacobs, 1992; Osorio & Vorobyev, 2008). Kenntnisse zu all diesen Spezialanpassungen sind derzeit von großem wissenschaftlichen Interesse, da sie es erlauben, das Verhalten der Vögel hinsichtlich bestimmter visueller Reize besser zu verstehen und die Auswirkungen verschiedener Aspekte des Lichts auf ihre Gesundheit und das Wohlbefinden beurteilen zu können.

2.1.1 Sichtbares Licht

Die Sonne bestrahlt die Erdoberfläche mit einem breiten elektromagnetischen Wellenspektrum. Das Sehen der meisten Lebewesen basiert auf sichtbarem Licht, das ein bestimmter Bereich innerhalb des elektromagnetischen Spektrums ist (Maxwell, 1865). Dieser Bereich umfasst bei den meisten Lebewesen die Energie eines schmalen Spektralbands zwischen 400 bis 700 nm (Dartnall et al., 1983; Gibson, 1940; Jainski, 1938; Jacobs, 1992; Nuboer et al., 1992; Prescott & Wathes, 1999b). Elektromagnetische Wellen charakterisieren sich durch die Energie der Photonen, die sie zusammensetzen. So ist die Energie eines Photons umso größer, je kleiner die Wellenlänge ist (Planck, 1914). Bei Anordnung nach zunehmender Wellenlänge befinden sich am Anfang des Lichtspektrums die kurzwelligen und damit energiereichen violetten

Strahlen, während am Ende die langwelligen roten Strahlen stehen. Die Wellenlängen werden also in verschiedene Bereiche, die durch einen Farbnamen bezeichnet werden, eingeordnet. Auf diese Weise werden sechs Spektralbereiche des Lichts definiert, die sogenannten Spektralfarben (Philips Lighting, 1988).

380 - 435 nm = Violett
435 - 500 nm = Blau
500 - 565 nm = Grün
565 - 600 nm = Gelb
600 - 630 nm = Orange
630 - 780 nm = Rot

Während bei vielen Tierarten das sichtbare Licht den Bereich zwischen 400 und 700 nm umfasst, sind bei einigen Spezies verschiedene Anpassungen entstanden, die die Erweiterung dieses Bereichs ermöglichen (Bowmaker et al., 1997; Bowmaker & Knowles, 1977; Cuthill et al., 2000; Govardovskiĭ & Zueva, 1977; Hart, 2002; Honigmann, 1921; Jacobs, 1992; Korbel et al., 1998; Walls, 1942; Wortel et al., 1987). Die Fähigkeit verschiedener Spezies zur Perzeption im Ultraviolettbereich (320 - 380 nm) ist ein Beispiel dafür. Der erste Nachweis über diese Fähigkeit wurde von Kühn (1924) erbracht, der beobachtete, dass Bienen ein ultraviolettes Muster der Blumen als Führung zum Nektar verwenden. Im Jahr 1980 richtete Goldsmith (1980) drei Kolibriarten (*Arquíloco alexandri, Lampornis clemenciae* und *Eugenes fulgens*) zur Farbunterscheidung von Nahrungsmitteln ab, die mittels eines Lichts von 370 nm, das nach Goldsmith (1980) von einem menschlichen Beobachter nicht wahrgenommen werden kann, gekennzeichnet wurden. Durch diese Untersuchung wurde bewiesen, dass Vögel die Fähigkeit zur Perzeption im Ultraviolettbereich besitzen und darüber hinaus, dass sie diese Fähigkeit auf eine funktionelle Weise verwenden können. Sie beruht auf einem vierten Zapfentyp, welchen die Retina der Vögel aufweist. Dieser ermöglicht eine spektrale Wahrnehmung von kürzeren Wellenlängen in der Nähe des Ultraviolettbereichs, also einem Teil des Spektrums, den der Mensch nicht wahrnehmen kann (Bowmaker et al., 1997; Govardovskiĭ & Zueva, 1977; Hart, 2002; Korbel et al., 1998; Nuboer, 1986; Nuboer et al., 1992; Prescott & Wathes, 1999a; Yokoyama, 2000).

2.1.2 Das Sehvermögen

Das Sehvermögen besteht aus zwei unterschiedlichen physiologischen und psychophysikalischen Prozessen (Boyton, 1960; Hecht, 1930; Helmholtz, 1852; Jameson, 2005; Nuboer, 1986; Young, 1802). Die Aufnahme des Lichts erfordert in einem ersten Schritt das Vorhandensein von photonenempfindlichen Substraten, den sogenannten Photopigmenten, die mit der Energie der elektromagnetischen Strahlung interagieren können. Diese Pigmente befinden sich in den verschiedenen lichtempfindlichen Zellen der Netzhaut, die jeweils für bestimmte Bereiche des sichtbaren Lichtspektrums empfindlich sind (Young, 1802; Helmholtz, 1852). Dieser Primärprozess ist bekannt als "spektrale Empfindlichkeit", in dem die photochemische Transduktion stattfindet, also die Umwandlung von Lichtsignalen in neuronale Informationen (Hecht, 1942; Boyton, 1960; Brown & Wald, 1964; Nuboer, 1986). Anschließend wird diese Information als Nervenimpuls an spezifische Bereiche des Gehirns geleitet, wo sie im visuellen Cortex verarbeitet werden. Die Aufnahme, Verarbeitung und Interpretation von visuellen Reizen im Gehirn werden als „Lichtwahrnehmung“ (auch Lichtperzeption) bezeichnet (Boyton, 1960; Hecht, 1930; Hering, 1878; 1905; 1964; Jameson, 2005; Nuboer, 1986). So bilden die Erregungsmuster der Rezeptorzellen die Grundlage für die komplexe Weiterverarbeitung in Netzhaut und Gehirn, die schließlich zur Lichtwahrnehmung führt. Gemäß dieser Definition sind also nicht alle auf die Retina einfallenden Lichtreize Wahrnehmungen, sondern nur diejenigen, die auf das Verhalten eines Subjekts einwirken (Goldstein, 2010; Jameson, 2005; Jones et al., 2007).

Die Empfindlichkeit und die Perzeption des Lichts können durch verschiedene Verfahren untersucht werden, die sich als molekulare, spektrophotometrische, elektrophysiologische und psychophysische Methoden einordnen lassen (Bowmaker et al., 1997; Bowmaker & Knowles, 1977; Govardovskiĭ & Zueva, 1977; Hart, 2002; Yokoyama, 2000). Die erste Methode basiert auf der molekularen Analyse der Gene, die für das Farbensehen verantwortlich sind, die sogenannten Opsin-Gene. Sie verwendet eine DNA-Sequenzierung, um zu bestimmen, welche Art von Opsinen in der Netzhaut der untersuchten Spezies vorhanden sind. Jedoch bedeutet die Anwesenheit eines Gens nicht notwendigerweise die richtige Herstellung und/oder Aktivierung des entsprechenden Proteins (Gerl & Morris, 2008).

Die spektrophotometrische Untersuchung ermöglicht es zu erklären, ob ein bestimmtes Verhalten, das von einem visuellen Reiz ausgelöst wird, mit einem spezifischen Photorezeptor verbunden ist oder ob es sich um eine komplexe Wechselwirkung zwischen verschiedenen Arten von Photorezeptoren handelt (Govardovskiĭ & Zueva, 1977). Mittels dieser Methode können die spektralen

Absorptionseigenschaften der Sehpigmente und der Durchlässigkeitsgrad der okulären Medien gemessen werden. Dafür wird ein modifiziertes optisches Mikroskop verwendet, bei dem ein schmaler Lichtstrahl (ca. 2 x 2 µm im Querschnitt) mit bekannter Anfangsintensität und Wellenlänge eine Sehzelle durchdringt. Durch Absorption nimmt die Lichtintensität ab und wird nach dem Durchgang durch die Probe mittels eines photoelektrischen Geräts gemessen. Auf diese Weise ist es möglich, den Absorptions- (Absorption = 1 - Transmission) und Transmissionsgrad (Transmission = 1 - Absorption) eines Gewebes zu berechnen (Hart, 2001b; Håstad et al., 2009).

Andererseits kann durch ein elektrophysiologisches Verfahren wie beispielsweise ein Elektroretinogramm die Netzhautfunktion untersucht werden. Dabei werden Lichtreize appliziert und die darauf von der Netzhaut gebildeten elektrischen Potenziale mittels mehrerer Elektroden aufgezeichnet. Diese Potenziale spiegeln die elektrische Aktivität der Zapfen und Stäbchen sowie der Bipolarzellen wider (Cornwall et al., 2000).

Die oben genannten Methoden erfassen jedoch nur retinale Prozesse und können daher keine Informationen über die Verarbeitung und Interpretation der visuellen Reize, die im visuellen Cortex stattfinden, liefern. Im Gegensatz dazu kann die Lichtperzeption direkt durch psychophysische Methoden (Verhaltenstest) untersucht werden. Diese ermöglichen es, die visuelle Informationsverarbeitung im Gehirn eines Individuums durch Quantifizierung seiner motorischen Reaktionen auf Veränderungen physikalischer Lichtparameter, wie die Wellenlänge und die Lichtintensität, zu erfassen (Kristensen et al., 2007; Prayitno et al., 1997b; Prescott & Wathes, 1999b). Auf diese Weise kann die visuelle Perzeption des Individuums eindeutig bestimmt werden (Nuboer et al., 1992; Prescott & Wathes, 1999b). Unter Verwendung dieser Verfahren ist es möglich, die spektrophotometrischen Eigenschaften der Augengewebe und der Netzhautpigmente verschiedener Tierarten zu bestimmen und weiterhin festzustellen, ob sie an der visuellen Perzeption beteiligt sind.

2.1.3 Lichtempfindlichkeit und Lichtperzeption des Huhnes

Die Lichtempfindlichkeit wird vom Grad der Transmission der Augenmedien und vom Grad der Absorption der Photopigmente in Sehzellen bestimmt (Håstad et al., 2009; Lind et al., 2013). Bevor das Licht die Retina erreicht, muss es eine Reihe unterschiedlicher Gewebe durchdringen, welche als Filter wirken, indem sie die Durchdringung bestimmter Wellenlängen begrenzen (Piatigorsky, 2001). Von besonderer Bedeutung ist die Transmission der Hornhaut, der Linse und des Glaskörpers, deren Durchsichtigkeit die optischen

Bedingungen für die Vision schaffen (Piatigorsky, 2001; Tsukahara et al., 2014; Walls, 1942). Darüber hinaus sind bei allen Klassen von Wirbeltieren, besonders bei denen, die ein primär tagaktives Verhalten zeigen, in den lichtempfindlichen Zellen kleine sphärische Organellen zu finden, die als Öltröpfchen bekannt sind (Walls, 1942). Ihre Pigmentierung wirkt für bestimmte Wellenlängen des Lichts als zusätzlicher Filter (Bowmaker et al., 1997; Bowmaker & Knowles, 1977; Govardovskiĭ & Zueva, 1977). Diesbezüglich wurden unterschiedliche Arten von lichtempfindlichen Pigmenten und Öltröpfchen in der Netzhaut von verschiedenen Vogelarten identifiziert. Diese Strukturen weisen charakteristische Absorptions- und Transmissionseigenschaften innerhalb eines Bereichs zwischen 320 und 700 nm auf (Bowmaker et al., 1997; Bowmaker & Knowles, 1977; Govardovskiĭ & Zueva, 1977; Hart, 2002).

2.1.4 Transmissionsgrad der Augenmedien

Die Hornhaut, die Linse und der Glaskörper sind die einzigen durchsichtigen Gewebe des Auges (Piatigorsky, 2001). Die Besonderheit dieser Medien bei Vögeln besteht in der Transmission des Lichts mit Wellenlängen ab dem ultravioletten Bereich. So ist die Durchlässigkeit dieser Strukturen für Wellenlängen bis zu 340 nm gegeben, damit sie nicht die Funktion der UV-lichtempfindlichen Netzhautrezeptoren stören (Govardovskiĭ & Zueva, 1977; Lind et al., 2013; Reese et al., 2016; Tsukahara et al., 2014).

Die Hornhaut (*Cornea*) ist ein transparentes und avaskuläres Gewebe an der Augenvorderseite, das durch seine Wölbung für die Brechung der Lichtstrahlen sorgt. Ähnlich wie bei anderen Wirbeltieren und analog zum Säugetier ist die Hornhaut des Vogels in fünf Schichten angeordnet (*Epithelium corneae externum, Membrana limitans superficialis, Substantia propria corneae, Lamina limitans profunda, Epithelium corneae internum*), jedoch ist sie bei Vögeln wesentlich dünner als bei anderen Tiergruppen (Jones et al., 2007; Reese et al., 2016). Relevant für die spektrale Empfindung ist die Durchlässigkeit der Hornhaut für die unterschiedlichen Wellenlängen. Der Transmissionsgrad bei Hühnern liegt bei Wellenlängen von 800 nm bis 340 nm in Bereichen über 50 %, nimmt aber bei Wellenlängen von 360 nm bis 320 nm ab (Tsukahara et al., 2014). Die Transparenz der Hornhaut beruht auf einer regelmäßigen ultrastrukturellen Anordnung von Kollagenfasern des Stromas und den Eigenschaften des Proteinandteils der Epithelzellen, also des wasserlöslichen Proteins, das bei Vögeln strukturelle und enzymatische Aufgaben erfüllt (Jester et al., 2005). Bisher wurden bei Hühnern die folgenden Protein-Enzyme in den Keratinozyten und Epithelzellen der Hornhaut identifiziert: Transketolase, α-Enolasae, Glycerinaldehyd-3-phosphat-Dehydrogenase (G3PDH), Lactatdehydrogenase, Pyruvatkinase, Proteindisulfidisomerase sowie Annexin II

(Jester et al., 2005). Peptidyl-Prolyl-cis-trans-Isomerase (Cyclophilin) oder ein Homolog davon ist in den Hornhaut-Epithelzellen des Vogels reichlich, bei anderen Tieren wie Säugetieren und Fischen jedoch nicht vorhanden, was darauf hindeutet, dass solche Proteine hoch Taxon-spezifisch sind (Cuthbertson et al., 1992).

Die Augenlinse (*Lens crystallina*) ist ein lichtdurchlässiger, halbkugelförmiger Körper, der sich hinter der Iris befindet (Reese et al., 2016). Die Form der Linse hängt von der Ökologie der verschiedenen Vogelarten ab. Bei nachtaktiven Vögeln und bei Wasservögeln ist die Augenlinse sphärisch, wohingegen die Linse tagaktiver Vögel, und somit auch bei Hühnern, eine flache Form aufweist (Korbel, 1994). Die Linse ist für die Brechung des einfallenden Lichts verantwortlich, indem sie das Licht durch eine Formänderung an der Hinterseite des Auges bündelt. Der Vorderteil der Linse besteht aus kubischen Zellen, der hintere Teil wird aus Faserzellen gebildet. Die Hauptstrukturbestandteile der Linse sind wasserlösliche Proteine, welche auch als Crystalline bezeichnet werden. Sie machen zwischen 20 und 60 % des Nassgewichts der Linse aus (Wistow & Piatigorsky, 1988). Der Transmissionsgrad der Hühnerlinse nimmt graduell von 390 nm auf 320 nm ab und liegt bei 320 nm noch über 50 % (Tsukahara et al., 2014). Die optischen Eigenschaften der Linse hängen von den Proteinbestandteilen ab, welches zu ihrem Brechungsindex beitragen. Dieser Proteinbestandteil ist analog zur Hornhaut hoch Taxon-spezifisch, wobei das δ-Crystallin das gemeinsame Protein der Linse von Vögeln und Reptilien darstellt (Cuthbertson et al., 1992).

Der Glaskörper (*Corpus vitreum*) liegt im Inneren des Auges als eine Art kugelförmige, durchsichtige Struktur, die die gesamte Hinterkammer des Bulbus ausfüllt (Reese et al., 2016). Er ist vor allem für die Erhaltung der Augapfelform zuständig. Der Glaskörper ist gefäßlos und besteht aus einer gelförmigen, transparenten, extrazellulären Substanz (99 % aus Wasser), die als *Humor vitreus* bezeichnet wird (Frewein & Sinowatz 1992; Reese et al., 2016). Die kortikalen Bereiche des Glaskörpers werden bei erwachsenen Säugetieren und Vögeln von einem festen Gewebe mit einer einheitlichen Zellpopulation, den sogenannten Hyalozyten, gebildet. Nur der Bereich in der Nähe des blinden Fleckes enthält eine andere Art von Bindegewebe, welches von Fibrozyten gebildet wird (Balazs et al., 1964). Bei Hühnern, Puten und Tauben besteht der Glaskörperteil direkt hinter der Linse aus einem festen Gel, während der Teil nahe der Netzhaut flüssig ist, wodurch die Diffusion von Nährstoffen vom *Pecten oculi* zur Retina erleichtert wird (Korbel, 1994; Korbel et al., 2001; Reese et al., 2016) und die schwingenden Bewegungen des Augenfächers ermöglicht werden (Balazs et al.,1959). Dieser Unterschied in der Konsistenz des Glaskörpers basiert möglicherweise auf der größeren Menge an Hyaluronsäure in dem Bereich nahe der Linse (Balazs et al., 1959). Zusätzlich ist die Konzentration von wasserlöslichen Proteinen im Glaskörper bei allen Tierarten sehr gering

(etwa 1 % der Konzentration im Serum), was darauf hinweist, dass es eine klare Grenze zwischen dem Glaskörper und dem Blutgefäßsystem gibt (Balazs et al., 1959). Der Transmissionsgrad des Glaskörpers beträgt bei Vögeln ebenso wie bei Säugetieren bei Wellenlängen von bis zu 300 nm etwa 50 % (Tsukahara et al., 2014).

2.1.5 Transmissionsgrad der Öltröpfchen

Im distalen Ende (Ellipsoid) des inneren Segmentes von Zapfenzellen der Wirbeltiere (außer bei Knochenfischen und Plazentatieren) befinden sich stark lichtbrechende sphärische Organellen, die sogenannten Öltröpfchen (Walls, 1942). Die geometrische Anordnung von Öltröpfchen und Sehpigmenten bedingt, dass das einfallende Licht zunächst die Öltröpfchen im inneren Segment durchdringt, bevor es das Sehpigment im äußeren Segment erreicht. Folglich wird die effektive spektrale Empfindlichkeit eines Photorezeptors durch das Produkt aus dem Verhältnis der spektralen Durchlässigkeit des Öltröpfchens und dem Absorptionsgrad des Sehpigments bestimmt (Hart, 2001a). Auf diese Weise dienen die Öltröpfchen als Filter, indem sie die maximale Empfindlichkeit der Zapfen hin zu längeren Wellenlängen verschieben (Partridge, 1989). Durch die Filterwirkung der Öltröpfchen wird eine Verringerung der Überlappung der spektralen Empfindlichkeitsbereiche nebeneinanderliegender Klassen von Zapfen, somit eine Verbesserung der Farbdiskriminierung erreicht (Hart, 2001a). Die Öltröpfchen bestehen fast ausschließlich aus neutralen Lipiden und Pigmenten (Arteni et al., 2019; Bowmaker et al., 1997; Reese et al., 2016). Bei den beteiligten Pigmenten handelt es sich um verschiedene Carotinoide. Aus Hühnernetzhäuten wurden bisher Galloxanthin, Astaxanthin, Lutein, Zeaxanthin und Ɛ-Carotene extrahiert (Arteni et al., 2019). Die Art und Dichte der Carotinoide in jedem Öltropfentyp bestimmen seine spektrale Durchlässigkeit, sie können durch das sogenannte λ_{cut} eingeordnet werden (Bowmaker et al., 1997; Hart, 2001a; Yokoyama, 2000). λ_{cut} bezeichnet die Wellenlänge des Abschnitts bei dem Wert der minimalen gemessenen Durchlässigkeit durch die tangentiale Linie der spektralen Transmissionskurve des Öltröpfchens bei halbmaximaler gemessener Durchlässigkeit. Es ist die theoretische Wellenlänge, unterhalb derer kein Licht kürzerer Wellenlängen durch das Öltröpfchen übertragen wird (Lipetz, 1984). Auf diese Weise sind sechs Arten von Öltröpfchen charakterisiert worden. Vier von ihnen (mit R, Y, C und T bezeichnet) sind mit den Einzelzapfen assoziiert, während sich die Tropfen des P- und des A-Typs im Doppelzapfens befinden (Arteni et al., 2019; Bowmaker et al., 1997; Partridge, 1989). In Einzelzapfen ist das langwellige Pigment bzw. long wavelength opsin (LWS-Pigment) mit einem roten Öltröpfchen (R-Typ), das mittelwellige Pigment (MWS-Pigment) mit einem gelben Öltröpfchen (Y-Typ) und das kurzwelige Pigment (SWS2-Pigment) mit

einem hellen Öltröpfchen (C-Typ) verbunden, welches UV-Licht absorbieren kann. Das Sehpigment SWS1 ist mit einem absolut transparenten Öltröpfchen (T-Typ) assoziiert, welches keine wesentliche Absorption im sichtbaren Spektrum der Vögel zeigt (Arteni et al., 2019; Bowmaker et al., 1997). In Doppelzapfen ist das LWS Pigment in der Hauptkomponente mit dem blassen Öltröpfchen („Pale“ P-Typ) assoziiert. Darüber hinaus gibt es ein A-Öltröpfchen (A-Typ), das sich eventuell im Nebenkompartiment des Doppelzapfens befindet (Bowmaker et al., 1997; Bowmaker & Knowles, 1977; Hart et al., 1998). Bei Hühnern wurden durch Mikrospektrophotometrie die R-, Y- und C- Öltröpfchen identifiziert, deren λ_{cut} etwa 560 - 580 nm, 500 - 540 nm und 410 - 450 nm betragen (Arteni et al., 2019; Bowmaker et al., 1997; Okano et al., 1995). Bei den Öltröpfchen vom T-Typ wurde keine signifikante Absorption im Bereich von 330 - 800 nm festgestellt (Arteni et al., 2019; Bowmaker et al., 1997). Die Öltröpfchen vom P-Typ im Hauptkompartiment des Doppelzapfens besitzen ein λ_{cut} von ca. 450 nm (Arteni et al., 2019; Bowmaker et al., 1997; Bowmaker & Knowles, 1977). Das Öltropfchen des A-Typs besitzt eine größere Absorptionsabweichung, deren Werte bei etwa 480, 450 and 430 nm liegen, und ein λ_{cut} unter 420 nm (Bowmaker et al., 1997; Bowmaker & Knowles, 1977; Hart et al., 1998).

2.1.6 Absorptionsgrad der Sehpigmente

Die lichtempfindlichen Photopigmente bestehen aus einem großen Proteinanteil, dem sogenannten Opsin, einem Mitglied einer Familie der G-Protein-gekoppelten Transmembranrezeptoren, die aus etwa 350 Aminosäuren zusammengesetzt sind (Walls, 1942; Bowmaker, 2008). Sie bilden eine heptahelicale Transmembranstruktur, die an ein Chromophor kovalent gebunden ist. Der Chromophor der Photopigmente der meisten terrestrischen Wirbeltiere ist 11-cis-Retinal, ein Aldehyd von Vitamin A1 (Bowmaker, 2008). Wenn ein Photon auf den Chromophor trifft, isomerisiert die übertragene Energie das Molekül zur all-trans-Konfiguration. Dies ändert die räumliche Struktur des Opsins (primäre photochemische Reaktion) und löst den Prozess der visuellen Signaltransduktion in den Photorezeptoren aus (Wald, 1951; Wald et al., 1950).

Bisher wurden bei verschiedenen Vogelarten die Aminosäuresequenzen von fünf retinalen Sehpigmenten herausgefunden (Hart, 2001a; Okano et al., 1992; Yokoyama, 2000). Diese Aminosäuresequenzen bedingen die Tertiärstruktur des Opsins, dessen Formgebung die spektrale Empfindlichkeit des Chromophors definiert. Dieser Prozess ist als bathochromer Effekt bekannt und stellt eine Abnahme der erforderlichen Energie für die Photonenabsorption dar (Hart, 2001a; Kliger et al, 1977). Je nach Verhältnis zum Absorptionsmaximum (λ_{max} = 1 - Transmittanz) des Sehpigments verschiedener Tierarten lassen sie

sich in fünf Gruppen einteilen, welche als SWS1, SWS2, RH1, RH2 und M/LWS bezeichnet werden (Hart, 2001a; Yokoyama, 2000; Bowmaker et al., 1997; Bowmaker & Knowles, 1977). Bei Vögeln entsprechen sie den UVS/VS (UV- und Violett- sensitiv), SWS (sensitiv im kurzwelligen Bereich), MWS RH2 (sensitiv im mittleren Wellenlängenbereich für photopisches Sehen), MWS RH1 (sensitiv im mittleren Wellenlängenbereich für skotopisches Sehen) und LWS Sehpigmenten (sensitiv im längeren Wellenlängenbereich) (Bowmaker et al., 1997; Hart, 2001a; Okano et al., 1992; Yokoyama, 2000). Genduplikationen gefolgt von Aminosäuresubstitutionen sind die Basis für die funktionelle Differenzierung der Sehpigmente (Yokoyama, 2000). Bei Hühnern wurden durch Mikrospektrophotometrie und Elektroretinogramm Zapfenpigmente VS, SWS, MWS und LWS identifiziert, deren λ_{max} Absortion etwa 418, 455, 507 und 569 nm betragen (Bowmaker et al., 1997; Govardovskiĭ & Zueva, 1977; Hart, 2001a).

2.2 Photorezeptoren der aviären Netzhaut

2.2.1 Einzelzapfen

Einzelzapfen sind konische Photorezeptoren, die am Tageslicht (photopisches Sehen) sowie am Farbensehen beteiligt sind (Walls, 1942; Yau, 1994). Bei Vögeln sind sie empfindlich für einen Wellenlängenbereich, der an den Ultraviolettbereich angrenzt und bis zum roten Teil des Lichtspektrums reicht (Bowmaker et al., 1997; Bowmaker & Knowles, 1977; Govardovskiĭ & Zueva, 1977; Hart, 2001a). Sie sind aus einem Außen- und einem Innensegment aufgebaut. In letzterem konzentrieren sich distal die Mitochondrien, während sich proximal (Myoid) die übrigen Organellen befinden (Walls, 1942). Sie sind weniger empfindlich auf Licht als Stäbchen und erlangen daher ihre Empfindlichkeit gegenüber hellem Licht schneller nach der Exposition zurück (Baylor & Hodgkin, 1973; Nakatani & Yau, 1989; Shapley & Enroth-Cugell, 1984; Yau, 1994). Die Einzelzapfen werden nach ihrem eingelagerten Sehpigment als SWS1-, SWS2-, RH1-, RH2- und M/LWS-Zapfen bezeichnet (Bowmaker et al., 1997; Hart, 2001a; Yokoyama, 2000).

SWS1- (UVS- und VS-) Zapfen: Die größte interspezifische Variation bei λ_{max} der aviären Sehpigmente kommt in den Einzelzapfen mit transparenten (T-Typ) Öltröpfchen vor, die für UV- oder Violettlicht sensitiv sind (Bowmaker et al., 1997; Bowmaker & Knowles, 1977; Hart, 2001a; Govardovskiĭ & Zueva, 1977). Beide Sehpigmente stammen aus dem SWS1-Pigment (Yokoyama, 2000) und sind in der Regel violettsensitiv, wenn ihre λ_{max} bei über 400 nm liegt und ultraviolettsensitiv, wenn ihre λ_{max} unter

400 nm beträgt (Hart, 2001a). Das Sehpigment in dieser Zapfenart hat ein λ_{max} zwischen 415 und 426 nm bei Gänse- und Hühnervögeln (Bowmaker et al., 1997; Okano et al., 1995). Es ist interessant, dass der SWS1-Zapfen des Huhnes ein ähnliches λ_{max} aufweist wie die „Blue" SWS-Zapfen von Menschen und anderen Primaten (λ_{max} etwa 420 nm), aber nur die Vögel UV-Licht wahrnehmen können. Dies erklärt sich daraus, dass bei Vögeln alle Augenmedien für UV-Strahlen durchlässig sind, sodass ihre Lichtempfindlichkeit nur durch das λ_{max} des eingelagerten Sehpigments und durch die Durchlässigkeit des T-Typ Öltröpfchens bedingt werden (Lind et al., 2013). Im Gegensatz hierzu agieren die Augenmedien der Primaten als UV-Licht-Absorber (Douglas & Marshall, 1999; Lind et al., 2013; Norren & Johannes, 1974). Die funktionelle UV-Perzeption des Huhnes wurde durch psychophysische Untersuchungen ermittelt (Canton, 2010; Prescott & Wathes, 1999b). Mittels dieser Verfahren wurde von Prescott und Wathes (1999b) herausgefunden, dass die untere Grenze der Perzeption des Huhnes ca. 360 nm beträgt. Andererseits stellte Canton (2010) einen Wahrnehmungsbereich zwischen 378 und 491 nm fest. Anhand dieser Untersuchungsergebnisse lässt sich festhalten, dass Hühner eine funktionelle UV-Perzeption besitzen.

SWS2-Zapfen: Ein weiteres Sehpigment der Vogelnetzhaut befindet sich in den kurzwelligen empfindlichen SWS2-Einzelzapfen, die ein λ_{max} von ca. 430 bis 463 nm zeigen (Bowmaker et al., 1997; Hart, 2001a). Dieser Zapfentyp enthält ein farbloses Öltröpfchen (C-Typ), das kurze Wellenlängen unter 450 nm absorbiert. Bei Hühnern verleiht die kombinierte Wirkung des λ_{max} des Pigments und λ_{cut} des Öltröpfchens dem SWS2-Zapfen eine spektrale Empfindlichkeit von etwa 455 nm (Okano et al., 1995). Canton (2010) stellte durch eine psychophysische Untersuchung fest, dass Hühner Wellenlängen zwischen 402 und 491 nm wahrnehmen. Diese Daten deuten darauf hin, dass eine gewisse Überlappung zwischen den Empfindlichkeitsbereichen der Sehzellen des SWS1-Typs und des SWS2-Typs des Haushuhnes besteht.

MWS RH2-Zapfen: In diesem Zapfentyp befindet sich das Sehpigment MWS, dessen λ_{max} etwa 497 – 509 nm beträgt (Bowmaker et al., 1997; Hart, 2001a). Es ist hervorzuheben, dass das Maximum der spektralen Empfindlichkeit der MWS RH2-Zapfen ähnlich ist wie bei dem eingelagerten Sehfarbstoff der Stäbchen (Rhodopsin), deren λ_{max} bei 500 - 509 nm liegt (Siehe Tabelle 1) (Hart, 2001a). Diese Tatsache suggeriert, dass möglicherweise an einem Punkt der Evolution der Photopigmente der Sehfarbstoff RH1 (Rhodopsin) aus dem Zapfenpigment RH2 entstand (Bowmaker, 2008; Okano et al., 1992). Bei Hühnern wurde von Prescott und Wathes (1999b) ein Wahrnehmungsbereich von etwa 525 bis 575 nm festgestellt. Canton (2010) erfasste einen breiteren Bereich von 463 bis 602 nm. Außerdem befindet sich in diesem Bereich bei 600 nm eine Verringerung der Wahrnehmung, die, wie bei Menschen, möglicherweise einen

Opponent-Prozess (Siehe Kapitel 2.3) darstellt (Nuboer, 1986; Prescott & Wathes, 1999b).

LWS-Zapfen: Dieser Einzelzapfen enthält ein LWS-Sehpigment, das sich auch in beiden Segmenten des Doppelzapfens befindet, jedoch weicht die Funktionalität beider Sehzellen deutlich voneinander ab (Bowmaker et al., 1997). In der LWS-Sehzelle ist das jeweils eingelagerte Sehpigment (λ_{max} 570 – 585 nm) mit einem R-Öltröpfchentyp (λ_{cut} 570 nm) verbunden. Dies bedeutet, dass die maximale Empfindlichkeit des Zapfens von der Durchlässigkeit des R-Öltröpfchens bedingt wird, statt vom Sehfarbstoff, da es den Höchstwert der Empfindlichkeit des Zapfens hin zu längeren Wellenlängen als das λ_{max} des eingelagerten Sehpigments verschiebt, was zu einer Lichtempfindlichkeit von etwa 610 nm führt (Bowmaker et al., 1997; Hart, 2001a). Somit wird der Überlappungsgrad der Empfindlichkeit zwischen MWS- und LWS-Sehpigmenten verringert und infolgedessen die Farberkennung und der Farbkontrast verbessert (Vorobyev et al., 1998). Durch psychophysische Untersuchungen wurde ein Wahrnehmungsbereich zwischen 602 und 689 nm bei der Rotlichtperzeption des Huhnes festgestellt (Canton, 2010). Außerdem ist die Rotlichtperzeption des Huhnes deutlich höher als beim Menschen (Prescott & Wathes, 1999b).

2.2.2 Doppelzapfen

Der größte Photorezeptortyp der aviären Netzhaut wird von den Doppelzapfen gebildet, die etwa einen Anteil von 50 – 60 % aller Photorezeptorzellen der Vogelretina darstellen (Bowmaker & Knowles, 1977). Die Doppelzapfen bestehen aus zwei Bestandteilen: Die größere Haupt- und die kleinere Nebenkomponente (Bowmaker et al., 1997). Diese Sehzellen kommen bei Amphibien, Reptilien, Vögeln, einer Art von Monotremata und Marsupialia vor, fehlen jedoch bei Plazentatieren (Walls, 1942).

LWS-Doppelzapfen: Die Doppelzapfen besitzen ein LWS-Sehpigment in beiden Bestandteilen, welches aber nur in der Hauptkomponente mit einem P-Typ Öltröpfchen verbunden ist, während es in der Nebenkomponente eventuell mit einem A-Öltröpfchentyp vorkommt (Bowmaker et al., 1997; Bowmaker & Knowles, 1977; Hart et al., 1998). Die P-Öltröpfchen wirken bei kurzen Wellenlängen wie ein Filter, aber sie verschieben nicht die spektrale Wahrnehmung der Zapfen hin zu längeren Wellenlängen, dies im Unterschied zum LWS-Einzelzapfentyp, bei dem die spektrale Wahrnehmung durch die Durchlässigkeit des R-Öltröpfchens bedingt wird (Bowmaker et al., 1997; Hart, 2001a). Der Absorptionsgrad des P-Öltröpfchens ist sehr unterschiedlich, was zeigt, dass es aus einer Mischung verschiedener karotinoider Pigmente besteht (Bowmaker et al., 1997). Die Pigmentierung variiert dabei je nach

topographischer Lage des P-Öltröpfchens auf der Netzhaut (Bowmaker & Knowles, 1977; Hart et al., 1998). Die Variation der P-Typ-Tröpfchenpigmentierung erfolgt allmählich und bildet einen dorso-ventralen oder posteiodorsal-anteroventralen Gradienten. Öltröpfchen mit dazwischenliegendem λ_{cut} befinden sich in der zentralen Retina (Hart et al., 1998; Hart, 2001b).

Bei Hühnern wurde durch spektrophotometrische Untersuchungen festgestellt, dass das λ_{max} des Sehpigments in beiden Komponenten des Doppelzapfens 570 nm beträgt und dass 50 % der Transmission (λT50) des P-Öltröpfchens bei etwa 450 nm liegen (Bowmaker et al., 1997; Bowmaker & Knowles, 1977). Im Gegensatz dazu zeigt das A-Öltröpfchen drei Absorptionsmaxima, die bei 483, 451 und 425 nm liegen (Bowmaker & Knowles, 1977). In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die Doppelzapfen nicht an der Perzeption einer bestimmten Farbe beteiligt sind, sondern möglicherweise an anderen visuellen Funktionen wie der Bewegungsdetektion (Goldsmith & Butler, 2005; Hart, 2001a; Hart & Hunt, 2007). Jedoch liegen aktuell keine ausreichenden Beweise für diese Hypothese vor, und deshalb ist die Hauptfunktion der Doppelzapfen noch unklar (Rubene et al., 2010; Goldsmith & Butler, 2005; Hart & Hunt, 2007).

2.2.3 Stäbchen

Stäbchen sind längliche Sehzellen, die das Sehen in der Dämmerung/Nacht (skotopisches Sehen) ermöglichen (Walls, 1942). Im Vergleich zu Zapfen sind sie für die Farberkennung wenig geeignet, jedoch bis zu 100-fach lichtempfindlicher (Baylor & Hodgkin, 1973; Nakatani & Yau, 1989; Shapley & Enroth-Cugell, 1984; Yau, 1994). Aufgrund dessen, dass nur ein Stäbchentyp in der Vogelnetzhaut vorkommt, können sie sich nicht an der Farbdiskriminierung beteiligen, wie Zapfen, bei denen die Outputs der unterschiedlichen Typen verglichen werden können, um chromatische Informationen wahrzunehmen (photopisches Sehen) (Okano et al., 1995).

MWS RH1-Stäbchen: Das in die Stäbchen der Vögel eingelagerte Pigment ist das RH1 Opsin, eine Form des Sehpigments Rhodopsin, dessen λ_{max} etwa 500 - 509 nm beträgt (Bowmaker, 2008; Bowmaker et al., 1997; Bowmaker & Knowles, 1977; Hart, 2001a). Das Sehpigment RH1 Opsin der Wirbeltiere entwickelte sich aus dem MWS-Zapfenpigment nach der Aufspaltung der Urform des Opsins in die fünf Opsin-Typen der Zapfen (SWS1, SWS2, RH2, MWS, LWS) (Bowmaker, 2008; Okano et al., 1992).

Das RH1-Pigment ist instabil gegenüber Licht und die Absorption eines Photons verursacht eine Änderung der Raumkonfiguration des Rhodopsins, die als

„Bleichung“ bezeichnet wird (Brown & Wald, 1964; Hecht, 1942; Yau, 1994). Das ist der Grund, warum die Stäbchen nicht zum photopischen Sehen beitragen können. In dunkler Umgebung wird Rhodopsin durch Enzyme in seine ursprüngliche Form umgewandelt (Brown & Wald, 1964; Hecht, 1942).

Tabelle 1: Zapfen auf der Netzhaut des Haushuhnes (*Gallus gallus domesticus*). Fünf Arten von Zapfen mit visuellen Pigmenten, verbundenen Öltröpfchen, entsprechenden λ_{max} und λ_{cut}-Werten und resultierenden spektralen Empfindlichkeiten.

Zapfen	λ_{max} des Sehpigments (nm)	verbundenes Öltröpfchen	λ_{cut} des Öltröpfchens (nm)	Resultierende spektrale Empfindlichkeit des Zapfens (λ_{max} in nm)
SWS 1	419[a]	T-type	---[a,b]	415[d]
SWS 2	455[a,d]	C-Type	410-450[a,b]	455[d]
MWS	508[a,d]	Y-Type	500-540[a,b]	508[d]
LWS	570[a,d]	R-Type	560-580[a,b]	606[c]
Doppelzapfen*	569[a]	P-Type	497[c]**	533[c]

a) Bowmarker et al. (1997), b) Hart (2001a), c) Bowmaker & Knowles (1977), d) Okano et al. (1995) und Okano et al. (1989). *Hauptkomponente, **λT_{50} die Wellenlänge, bei der 50 % Transmission erfolgt.

2.3 Farbperzeption und Helligkeitswahrnehmung des Huhnes

2.3.1 Farbperzeption des Huhnes

Ein Auge mit n Zapfen-Typen (Spektralrezeptoren) kann n Abtastwerte des Spektrums wahrnehmen, so dass Lichter durch einen Punkt in einem n-dimensionalen Rezeptorraum dargestellt werden. Um diese Netzhautinformationen vollständig zu verwenden und so ein n-chromatisches Sehen zu ermöglichen, muss die nachfolgende neuronale Kodierung n Freiheitsgrade beibehalten (Osorio et al., 1999b). In diesem Zusammenhang sind zwei nicht-exklusive Theorien akzeptiert, die die Trichromasie beim Menschen erklären: Die trichromatische Theorie von Young (1802) und Helmholtz (1852) und die Opponent-Prozess-Theorie (Gegenfarbtheorie) von Hering (1878, 1905, 1964).

Die trichromatische Theorie des Farbsehvermögens schlägt vor, dass für alle wahrnehmbaren Wellenlängen die drei Arten von Zapfen in unterschiedlichen

Graden stimuliert werden, was zu unterschiedlichen Aktivitätsmustern führt, die vom Gehirn verarbeitet und interpretiert werden können. Jede Wellenlänge wird daher im Nervensystem durch ein eigenes Aktivitätsmuster in den drei Rezeptormechanismen dargestellt (Goldstein, 2010). Die Dimensionalität des Farbraums kann durch Farbmischungsexperimente geschätzt werden (Osorio et al., 1999b). Der daraus resultierende dreidimensionale Farbraum, welcher beim Menschen zu finden ist, wird als Farbdreieck dargestellt, dessen drei Ecken, unter der Annahme, dass das weiße Licht gleichmäßig von den drei Zapfenpigmenten absorbiert wird, den drei Arten von Pigmenten SWS 1, MWS und LWS entsprechen (Abbildung 2). Das weiße Licht wird in der Mitte des Farbdreiecks positioniert, so dass die Längen der drei Senkrechten identisch zueinander sind (R, G und B im Farbdreieck). Jede von Menschen wahrnehmbare Wellenlänge kann so als ein Punkt irgendwo im Dreieck entsprechend der relativen Stimulation der drei Arten von einzelnen Zapfen dargestellt werden (Okano et al., 1995; Yoshizawa, 1994). Hier sind die Absorptionsspektren der drei Arten von Zapfenpigmenten (Rot, Grün und Blau) an den Peaks normalisiert worden (Okano et al., 1995).

Burkhardt (1989) und Goldsmith (1994) schlugen vor, diese Theorie auf Tetrachromasie zu erweitern. Im Fall des tetrachromatischen Farbsehens von Hühnervögeln kann jedes Farblicht als ein Punkt in einem Farbtetraeder platziert werden. Hier wurden die Absorptionsspektren der vier Arten von Zapfenpigmenten bei den Absorptionsmaxima normalisiert (Abbildung 2). Sowohl für das Farbdreieck als auch für das Farbtetraeder entspricht der Abstand von einem Punkt im Farbraum zu jeder Seite der relativen Absorption des am entgegengesetzten Apex dargestellten visuellen Pigments (Okano et al., 1995; Yoshizawa, 1994).

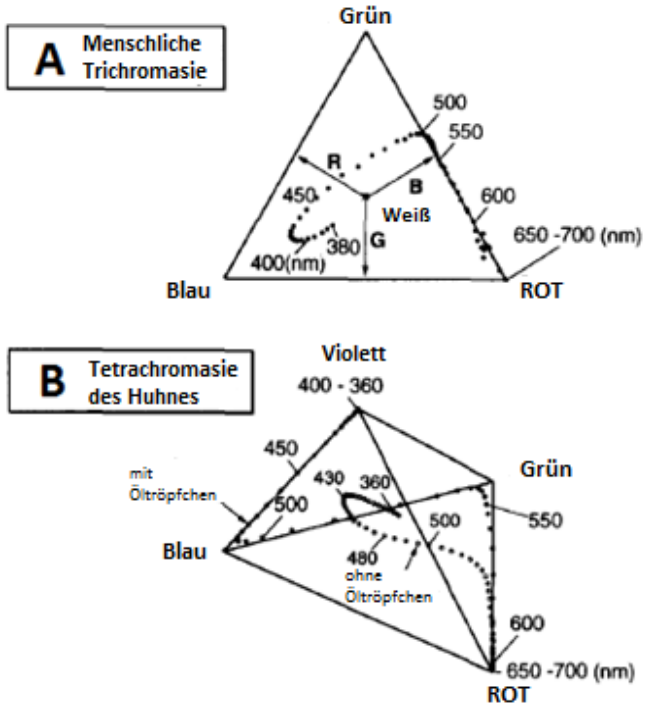

Abbildung 2: Chromatizitätsdiagramme für menschliche Trichromasie und Tetrachromasie des Huhnes (Modifiziert von Okano et al., 1995).
A) Farbdreieck für die menschliche Trichromasie, das auf der Grundlage der normalisierten Absorptionsspektren von menschlichen Zapfenpigmenten ausgelegt ist. Die geschlossenen Kreise repräsentieren monochromatische Lichtstrahlen in Intervallen von 5 nm und die Abstände R, B und G sind äquidistant, so dass der Mittelpunkt dem weißen Licht entspricht.
B) Farbtetraeder für die Tetrachromasie des Huhnes, welches auf der Grundlage der normalisierten Absorptionspektren der Zapfenpigmente des Huhnes ausgelegt ist. Offene Kreise repräsentieren monochromatisches Licht in 5 nm-Intervallen ohne das Filtern von Öltröpfchen, während geschlossene Kreise dasselbe mit der Filterung von Öltröpfchen darstellen.

Die trichromatische Theorie beschreibt die Vorgänge, welche am Anfang des Sehsystems, also in den Rezeptoren der Netzhaut, geschehen. Nach dieser Theorie verursacht jede Wellenlänge eine unterschiedliche Reaktion in den drei verschiedenen Arten von Zapfen und ist die Empfindlichkeit von mindestens drei Wellenlängen erforderlich, um eine beliebige Farbe erkennen zu können (Goldstein, 2010; Osorio et al., 1999b). Es gibt jedoch einige Farbwahrnehmungen, die die trichromatische Theorie nicht erklären kann. Diese Farbwahrnehmungen wurden von Ewald Hering durch die Opponenten- oder Gegenfarbtheorie des Farbensehens erklärt (Hering, 1878; 1905; 1964). Diese Theorie beschreibt Ereignisse, welche zu einem späteren Zeitpunkt im visuellen System ablaufen und die durch die Aktivität gegensätzlicher Mechanismen

verursacht werden. Diese werden als Blau-Gelb- und Rot-Grün-Mechanismus bezeichnet. Ein dritter Mechanismus dient der Unterscheidung zwischen Schwarz und Weiß, welche auf der Stärke der Beleuchtung basiert. Der Schwarz (-) Weiß (+) Mechanismus reagiert positiv auf weißes Licht und negativ auf die Abwesenheit von Licht. Rot (+) Grün (-) reagiert positiv auf Rot und negativ auf Grün und Blau (-) Gelb (+) reagiert negativ auf Blau und positiv auf Gelb (Abbildung 3).

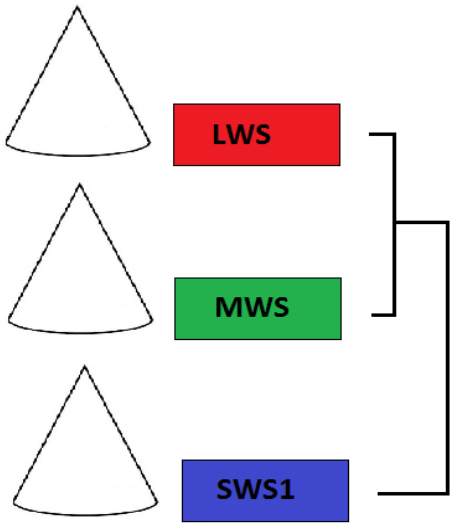

Abbildung 3: Diagramm der Gegenfarbenmechanismen, welche durch die Opponenten-Theorie von Hering (1878; 1905; 1964) beschrieben wurden.

Weil die Gegenfarbenmechanismen beim Menschen einen klareren und effizienteren Weg zur Unterscheidung zwischen Wellenlängen als das einfache Verhältnis der Reaktionen durch einzelne Zapfen ermöglicht (Goldstein, 2010), wird erwartet, dass Vögel den gleichen Mechanismus haben (Canton, 2010). Osorio et al. (1999b) schlugen vor, dass bei Hühnern mindestens drei Gegenfarbenmechanismen existieren: SWS1-SWS2, MWS-LWS und SWS2-(MWS-LWS) (Abbildung 4). Sie sind durch die folgenden Formeln definiert:

1) MWS-LWS =(ql - qm)/(ql + qm)
2) SWS1-SWS2 =(qs - qu)/(qs + qu)
3) SWS2 (MWS-LWS) =[0,5(ql + qm) - qs]/[0,5(ql + qm)+ qs]

Hierbei stellt qx die Antwort der UV-, S-, M- und L-Rezeptoren dar (Osorio et al., 1999b).

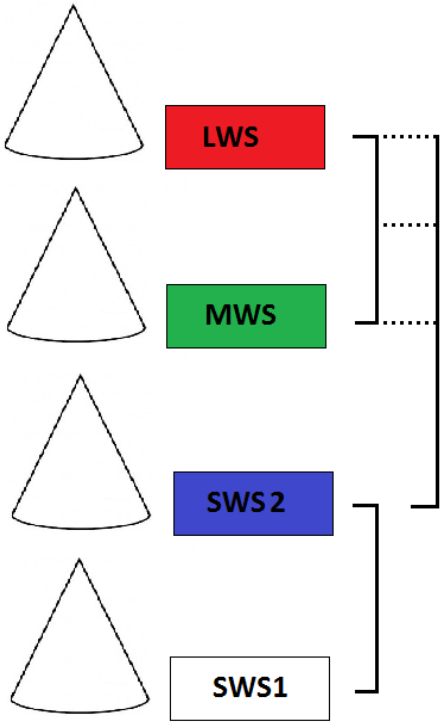

Abbildung 4: Diagramm der Gegenfarbenmechanismen für das Farbsehen des Huhnes nach Osorio et al. (1999b).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die spektrale Empfindlichkeit der Vögel gegenüber der des Menschen unterschiedlich ist, wegen des Vorkommens eines vierten Farbrezeptors in der aviären Retina (Bowmaker & Knowles, 1977; Chen et al., 1984; Govardovskiĭ & Zueva, 1977; Korbel, 2008; Nuboer et al., 1992; Osorio et al., 1999a; 1999b; Prescott & Wathes, 1999b). Ein zusätzlicher Farbrezeptor kann das wahrgenommene Farbspektrum vergrößern oder die Differenzierung innerhalb des Lichtspektrums verbessern, sofern diese visuellen Reize vom Gehirn verarbeitet werden (Jameson, 2005; Nuboer, 1986; Okano et al., 1995). In diesem Zusammenhang zeigen wissenschaftliche Untersuchungen, dass Hühner ein funktionelles tetrachromatisches Farbensehen mit Perzeption im Ultraviolettbereich besitzen (Canton, 2010; Korbel & Szölgyenyi, 2001; Nuboer et al., 1992; Prescott & Wathes, 1999b), dem Funktionen bei Orientierung, Nahrungssuche, Sozialverhalten sowie Synchronisation der inneren Uhr zugeschrieben wurden (Apeldoorn et al, 1999; Bennett & Cuthill, 1994; Cassone, 1990; Cuthill et al., 2000; Honkavaara et al., 2002; Lewis & Morris, 2000; Rajchard, 2009).

2.3.2 Helligkeitswahrnehmung und Lichtintensität

Wie in Kapitel 2.1.1 ("Sichtbares Licht") erwähnt, nimmt das visuelle System der meisten Lebewesen die elektromagnetischen Wellenlängen im Bereich von 400 - 700 nm auf (Dartnall et al., 1983; Gibson, 1940; Goldstein, 2010; Jainski, 1938; Jacobs, 1992; Lewis & Morris, 2000; Nuboer et al., 1992; Prescott & Wathes, 1999b). Der subjektive Helleindruck, der durch eine elektromagnetische Strahlung im Bereich des sichtbaren Lichts auf das visuelle System erzeugt wird, wird als Helligkeitswahrnehmung bezeichnet. Das visuelle System bewertet jedoch nicht alle Bereiche des Lichtspektrums gleich hell, sondern es zeigt Empfindlichkeitsspitzen in verschiedenen Bereichen des sichtbaren Lichts. Der Empfindlichkeitsgrad des Auges gegenüber verschiedenen monochromatischen Lichtreizen wird durch die "relative spektrale Empfindlichkeit" beschrieben. Diese stellt den relativen Beitrag der verschiedenen Wellenlängen zum subjektiven Helleindruck eines Lichts dar (Goldstein, 2010; Honigmann, 1921; Jainski, 1938; Nuboer et al., 1992; Prescott & Wathes, 1999b; Wortel et al., 1987). Um die relative spektrale Empfindlichkeit festzustellen, werden die Schwellenwerte des Sehens von monochromatischen Leuchten für Wellenlängen im sichtbaren Spektrum bestimmt. Der Wert gibt an, wie groß die Anzahl der eingestrahlten Lichtquanten (pro cm^2 und Sekunde) bei jeder Wellenlänge sein muss, damit das Licht gerade noch erkannt wird (Goldstein, 2010; Honigmann, 1921; Prescott & Wathes, 1999b). Dennoch wird die Fähigkeit, bestimmte Wellenlängen zu sehen, oft nicht in Bezug auf die Wellenlänge gegenüber dem Schwellenwert, sondern auf die Wellenlänge gegenüber der Empfindlichkeit dargestellt (Goldstein, 2010; Prescott & Wathes, 1999b). Die Schwellenwerte lassen sich in Empfindlichkeit durch die folgende Gleichung umwandeln:

Empfindlichkeit = 1/Schwellenwerte

Auf diese Weise wird die relative spektrale Empfindlichkeitskurve erhalten. Die relative spektrale Empfindlichkeitskurve des Menschen bei photopischem Sehen wird durch die V-Lambda-Kurve V(λ) beschrieben (Abbildung 5). Diese ist eine Standardfunktion, die von der Internationalen Beleuchtungskommission (Commission Internationale de l´Eclairage - CIE) entwickelt wurde. Die V-Lambda-Kurve zeigt, dass das menschliche visuelle System die Wellenlängen in einem Bereich zwischen ca. 400 nm und 700 nm aufnimmt und dessen spektrale Empfindlichkeit erweist sich in der Mitte (ca. 555 nm) als deutlich höher als am Rand des Lichtspektrums. Dies bedeutet, dass bei Wellenlängen in der Mitte des sichtbaren Bereiches eine geringere Strahlungsdichte als im Randbereich nötig ist, um dieselbe Helligkeitswahrnehmung zu bewirken. Auf diese Weise kann die V-Lambda-Kurve verwendet werden, um Strahlungsenergie in leuchtende (d.h. sichtbare) Energie umzurechnen.

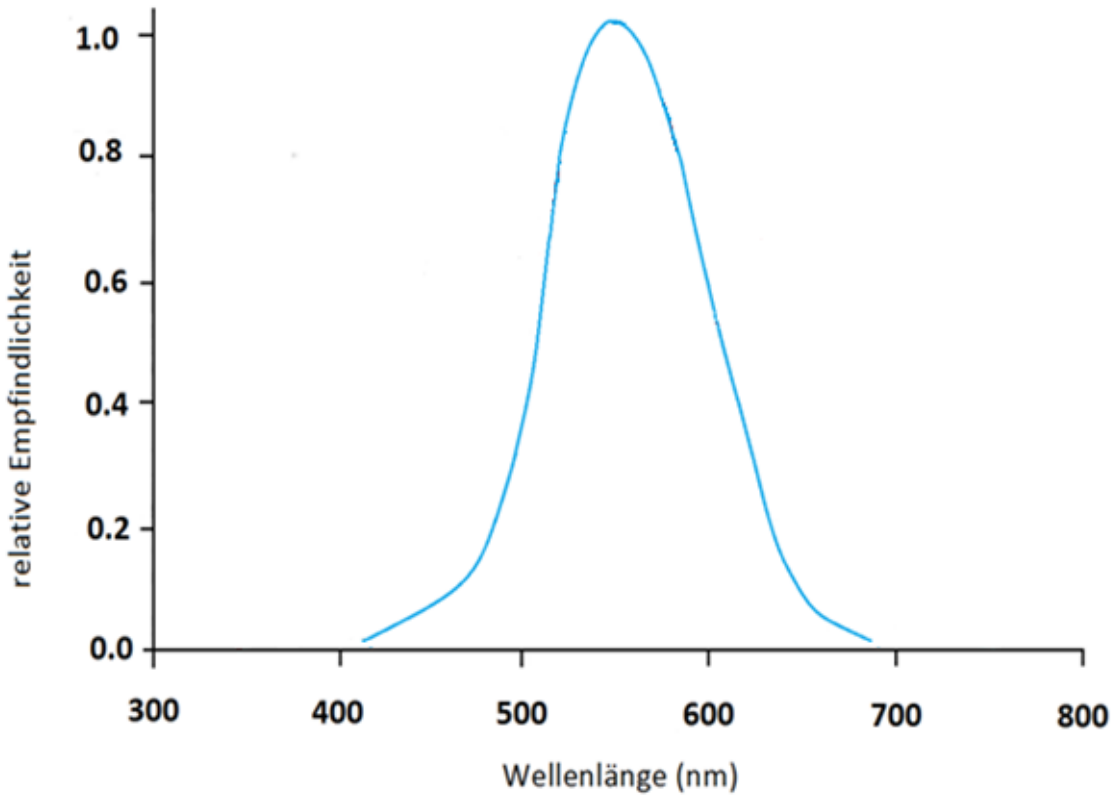

Abbildung 5: Relative spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges. Relative spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges normalisiert auf eine Empfindlichkeit von 1,0 bei 555 nm bei Tageslicht (CIE, 1983).

Um Strahlungsenergie in leuchtende Energie umzuwandeln, sollen die Produkte der eingestrahlten Lichtquanten und die in diskreten Wellenlängen tabellierten Werte der relativen spektralen Empfindlichkeit des Menschen addiert werden (Jainski, 1938). Das internationale Einheitensystem (SI) erkennt drei verschiedene Einheiten, mit denen die Helligkeit eines Lichts dargestellt werden kann. Diese sind die photometrischen abgeleiteten Einheiten Lux, Lumen und Candela. Das Lux (lx) leitet sich aus dem Lumen (lm) ab, welches sich wiederum aus der Candela (cd) ableitet. Die Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung 1/683 W/Steradiant beträgt. Die Lichtstärke gewichtet mit der relativen spektralen Empfindlichkeit des menschlichen visuellen Systems wird als Lichtstrom bezeichnet (McKinley, 1947; Packer & Williams, 2003). Wenn eine punktförmige Lichtquelle mit der Lichtstärke 1 cd gleichmäßig innerhalb eines Raumwinkels (1 Steradiant) ausgesendet wird, beträgt der Lichtstrom 1 Lumen (1lm = 1cd.sr). Ein Lichtstrom von 1 lm, der eine Oberfläche von $1m^2$ beleuchtet, erzeugt die Lichtintensität von 1 Lux ($1 lx = 1 lm/m^2$) (McKinley, 1947). Daher stellen die photometrischen Einheiten Lumen und Lux nur den Eindruck von

Helligkeit des Menschen dar, da sie eine Funktion der relativen Empfindlichkeit des menschlichen Auges sind (Korbel, 2008; 2010; Lewis & Morris, 2000; Nuboer et al., 1992; Prescott & Wathes, 1999b).

Die relative spektrale Hellempfindlichkeitskurve des Huhnes bei photopischem Sehen wurde von Prescott und Wathes (1999b) beschrieben. Sie zeigt die höchste Empfindlichkeit in der Mitte des von Hühnern sichtbaren Bereiches bei 565 nm (Grün-Licht) sowie zwei weitere hoch-empfindliche Bereiche, welche zwischen 380 und 486 nm (UV-V Licht) und 630 und 650 nm (rotes Licht) liegen (Abbildung 6). Die Ergebnisse dieser Studie beweisen, dass sich die relative spektrale Empfindlichkeit des Huhnes von der des Mensche erheblich unterscheidet. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Helligkeitswahrnehmung des Huhnes deutlich größer als angenommen ist (Korbel et al., 1998; Korbel, 2008; Kristensen et al., 2007; Lewis & Morris, 2000; Nuboer et al., 1992; Prescott & Wathes, 1999b).

Die größte Auswirkung der Abweichung zwischen den spektralen Empfindlichkeitskurven der Vögel und jener des Menschen scheint an dem subjektiven Eindruck von Helligkeit und an den jeweiligen Lichtstärkeeinheiten zu liegen (Lewis & Morris, 2000; Nuboer et al., 1992; Prescott et al., 2004; Prescott & Wathes, 1999b). Aus diesem Grund stellt sich die Frage, ob die üblichen photometrischen Größen geeignet sind, um die Helligkeitswahrnehmung von Geflügel zu beschreiben (Korbel et al., 1998; Nuboer et al., 1992; Prescott & Wathes, 1999b). Normalerweise wird die Lichtintensität durch die SI-Maßeinheit „Lux“ gemessen, welche sich nach der relativen spektralen Empfindlichkeit des Menschen richtet. Daher kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass ihre Verwendung bei Vögeln ungeeignet ist, da sie zu einer Unterschätzung der wahrgenommenen Lichtintensität im blauen (ca. 380 bis 486 nm) und roten (ca. 630 bis 650 nm) Teil des Lichtspektrums führt (Korbel et al., 1998; Lewis & Morris, 2000; Nuboer et al., 1992; Prescott & Wathes, 1999b). Um diese Abweichung zu beheben, schlugen Nuboer et al. (1992) und Prescott und Wathes (1999b) eine neue Maßeinheit, die sogenannte „Galluminance” oder „C-Lux“ vor, welche die relative spektrale Empfindlichkeit des Huhnes in Betracht zieht.

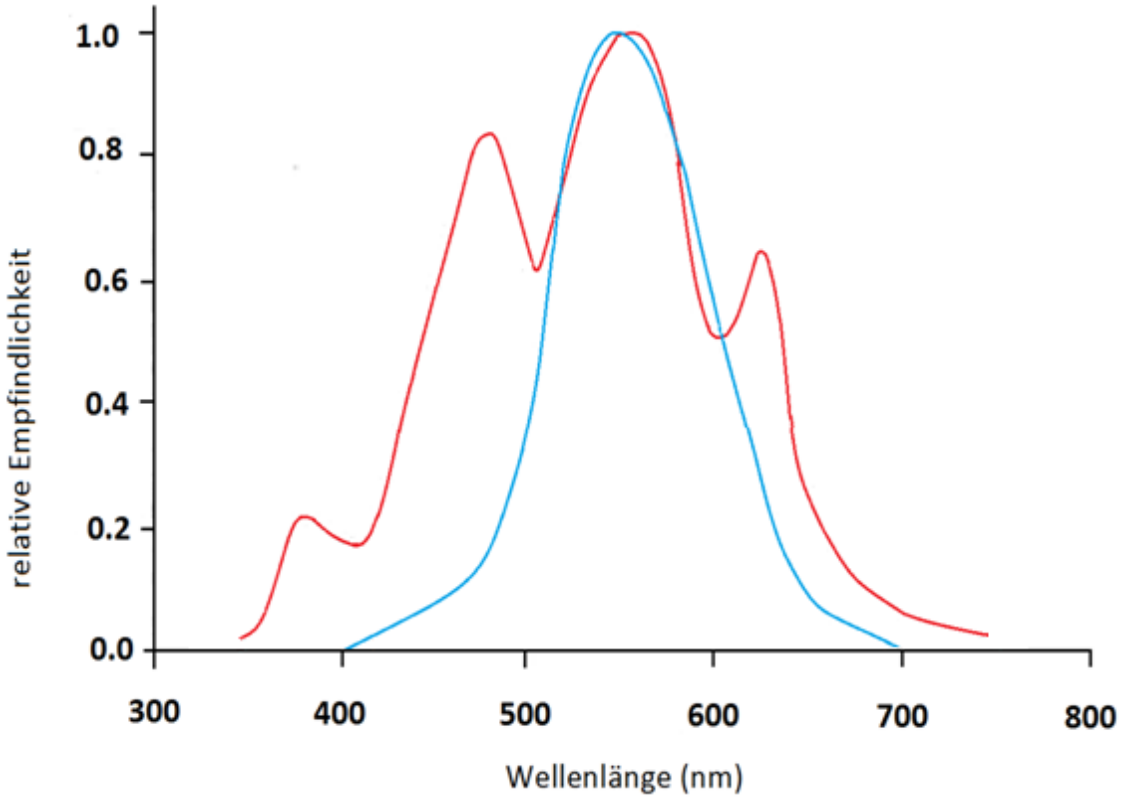

Abbildung 6: Relative spektrale Empfindlichkeit des Huhnes normalisiert auf eine Empfindlichkeit von 1,0 bei 565 nm (rote Linie; Prescott und Wathes, 1999b) und die des Menschen normalisiert auf eine Empfindlichkeit von 1,0 bei 555 nm (blaue Linie; CIE 1983).

Um eine Messung der Helligkeitswahrnehmung des Huhnes durch die C-Lux Einheit ermitteln zu können, ist es wichtig zu bemerken, dass die Absorption des Lichts durch die Photorezeptoren von diskreten Ereignissen dargestellt wird, bei denen ein einzelnes Photon ein einzelnes Pigmentmolekül zu einem bestimmten Zeitpunkt isomerisiert (Hecht, 1942; Goldstein, 2010). Daher soll die spektrale Verteilung des Lichts, welche durch die Strahlungsdichte (Watt) beschrieben wird, zum eingestrahlten Lichtquanten (Photonenfluss pro Sekunde) bei allen 5 nm des Lichtsprektrums umgerechnet werden (Prescott & Wathes, 1999b). Dies wird durch die folgende Funktion dargestellt:

$N = P\lambda/hc$

N = Photonenfluss pro Sekunde
P = Strahlungsleistung (Watt)
λ = Wellenlänge (m)
h = Planck-Konstante ($6{,}62517 \cdot 10^{-34}$ J s)
c = Lichtgeschwindigkeit ($2{,}99792 \cdot 10^{8}$ m/s)

Mittels dieser Verfahren kann man die Anzahl der Photonen, die innerhalb einer Sekunde eine Einheitsfläche durchqueren, jede 5 nm abschätzen. Diese Werte erlauben die Energieverteilung der Lampe zu beschreiben, die mit der relativen spektralen Empfindlichkeit des Huhnes nach Prescott und Wathes (1999b) multipliziert werden soll. Schließlich wird durch Addieren dieser Produkte der Eindruck von Helligkeit des Huhnes in C-Lux ermittelt (Prescott & Wathes, 1999b).

Daraus folgt, dass es nicht allein ausreichend ist anzugeben, wie viel Watt/m^2 (Globalstrahlung) eine Lampe aussendet, um die von dieser Strahlung erzeugte Helligkeitswahrnehmung zu beschreiben, da sie die spektrale Energieverteilung der Lampe nicht ermittelt. Zudem gibt es keinen direkten Weg, um die Lux oder C-Lux-Einheit unmittelbar aus der Strahlung zu berechnen, ohne die relative spektrale Empfindlichkeit des Beobachters zu kennen (Lewis & Morris, 2000).

Analog zur V-Lambda-Kurve ermöglicht die relative spektrale Empfindlichkeitskurve des Huhnes bei photopischem Sehen, Strahlungsenergie in leuchtende Energie umzuwandeln. So kann beim Vergleich einer Standardglühlampe mit einer Leuchtstofflampe festgestellt werden, dass beide zwar mit der gleichen Lichtintensität strahlen (und infolgedessen isoluminant für Menschen sind), jedoch eine unterschiedliche spektrale Verteilung aufweisen, sodass die Beleuchtung der Glühlampe von Hühnern etwa 20 % heller wahrgenommen wird als die der Leuchtstofflampen (Prescott et al., 2004; Prescott & Wathes, 1999b). Dies führt zu Schwierigkeiten bei der Bewertung von früheren Untersuchungen zu den Auswirkungen der Wellenlänge und Lichtintensität, weil bei diesen diese beiden Aspekte nicht getrennt werden konnten (Lewis & Morris, 2000). Dieser Umstand kann zu einer signifikanten Fehleinschätzung führen, insbesondere bei Lichtmessungen in Vogelställen, in denen die spektrale Verteilung der Lampen und reflektive Eigenschaften des Gebäudes unterschiedlich sind (Prescott & Wathes, 1999a).

Lewis und Morris (2000) erstellten eine Vergleichstabelle (Tabelle 2), welche die relative spektrale Empfindlichkeit des Huhnes und des Menschen in jedem Bereich des Spektrums zeigt. Aus dieser Tabelle geht hervor, dass die Abweichung zwischen beiden Helligkeitswahrnehmungen besonders deutlich ist, wenn die emittierte Strahlungsleistung am Rand des sichtbaren Spektrums (UV- V- und Rotbereich) 0,1 W/m^2 beträgt. Im UV- und violetten Bereich (340 - 440 nm) liegt die Helligkeitswahrnehmung des Huhnes bei bis zu 23,6 C-Lux, bei Menschen beträgt sie nur ein Lux (1 Lux). Analog hierzu kann im Bereich des roten Lichtes eine höhere Wahrnehmung des Huhnes bis zu 20,7 C-Lux bei 0,1 W/m^2 beobachtet werden, während Menschen nur maximal 6,6 Lux wahrnehmen können.

Tabelle 2: Wahrgenommene Lichtintensitäten von verschiedenen Wellenlängen des Lichtspektrums beim Menschen und Haushuhn. Die Werte wurden unter Verwendung von spektralen Empfindlichkeitsdaten des Menschen (CIE, 1983) und des Haushuhnes (Prescott & Wathes, 1999b) bei einer Bestrahlungsstärke von 0,1 W/m², einer Lichtintensität von 1 Lux und einer maximalen spektralen Lichtausbeute der Strahlung bei photopischem Sehen von 683 Lumen/W berechnet (CIE, 1983) (aus Lewis & Morris, 2000).

Wellenlänge (nm)	Menschliche Farbperzeption	Lichtintensität nach der menschlichen Wahrnehmung bei 0,1 W/m² (Lux)	Lichtintensität nach der Wahrnehmung des Haushuhnes bei 0,1 W/m² (Gallilux)	Wahrnehmung des Haushuhnes wenn die menschliche Wahrnehmung 1 Lux beträgt (Gallilux)
340 – 360	UV – A	0	1,2	*
360 – 380	UV – A	0	10,7	*
380 – 400	Violett	0	12,40	*
400 – 420	Violett	0,10	11,70	85,80
420 – 440	Violett	1,00	23,60	23,60
440 – 460	Blau	3,00	39,80	13,30
460 – 480	Blau	7,10	52,40	7,34
480 – 500	Blau	16,40	53,10	3,24
500 – 520	Grün	38,10	45,60	1,20
520 – 540	Grün	60,20	59,00	0,98
540 – 560	Grün	67,80	66,90	0,99
560 – 580	Gelb	63,50	66,00	1,04
580 – 600	Gelb	49,50	44,10	0,89
600 – 620	Orange	32,30	37,90	1,17
620 – 640	Orange	16,70	42,70	2,56
640 – 660	Rot	6,60	20,70	3,12
660 – 680	Rot	2,00	10,90	5,47
680 – 700	Rot	0,50	5,80	11,30
700 – 730	Rot	0,10	2,30	22,8

*Nicht für Menschen wahrnehmbar

2.4 Extra-retinale Bestrahlungsdetektion und zirkadiane Rhythmik

Bei Säugetieren hängt das Sehen sowie die Bestrahlungsdetektion ausschließlich von der visuellen Informationsaufnahme der Augen ab (Bertolucci & Foa, 2004; Doyle & Menaker, 2007). Demgegenüber können andere Tierklassen, wie Vögel, die Bestrahlungsdetektion durch extraokuläre Lichtrezeptoren aufnehmen (Baxter et al., 2014; Bertolucci & Foa, 2004; Binkley, 1975; Cassone, 1990; Foster et al., 1994). Extraokuläre Lichtrezeptoren lassen sich als Pineal-Komplex und Tiefenhirn-Photorezeptoren (deep brain photoreceptors) einordnen (Bertolucci & Foa, 2004). Bei Vögeln besteht der Pineal-Komplex aus dem intrakraniellen Pinealorgan (*Epiphysis cerebri*), welches mit wenigen Ausnahmen bei Wirbeltieren ubiquitär vorkommt (Binkley, 1975). Die Tiefenhirn-Photorezeptoren hingegen befinden sich an verschiedenen Stellen des Gehirns (Foster et al., 1994). Auf diese Weise sind Vögel in der Lage, Lichtreize mittels durch den Schädel transmittierte Strahlung direkt im Gehirn zu detektieren, ohne das visuelle System zu verwenden.

Es besteht ein Unterschied in der Effizienz, mit der verschiedene Wellenlängen durch die Sehbahn oder direkt durch die Schädeldecke den Hypothalamus reizen. Mittels der unmittelbaren Anwendung von Licht am Hypothalamus wurde herausgefunden, dass die extraokulären Lichtrezeptoren auf kurze Wellenlängen empfindlicher reagieren als auf lange (Baxter et al., 2014). Darüber hinaus bestehen auch Schwankungen in der Effizienz, mit der verschiedene Wellenlängen den Schädel durchdringen. Es wurde beschrieben, dass die Transmission von längeren Wellenlängen (> 650 nm) durch den Schädelknochen bei verschiedenen Vogelarten um das 36 bis 1000-fache größer ist als bei kürzeren Wellenlängen (400-450 nm) (Lewis & Morris, 2000). Die Kurve der Strahlungstransmission zeigt jedoch zwischen 410 und 700 nm keinen ständigen Anstieg, sondern ein Absinken bei 450 nm und eine Abflachung zwischen 500 und 530 nm (Hartwig & van Veen, 1979). Für diese Unterbrechungen in der Transmissionskurve wird Hämoglobin, welches bei 430 nm und 550 nm stark absorbiert, verantwortlich gemacht (Lewis & Morris, 2000). Zudem werden Melaninpigmente in den Federn (Maximunabsorption bei 420-430 nm) als verantwortliches Agens diskutiert, diese sind jedoch weniger wichtig bei der Veränderung der spektralen Zusammensetzung des übertragenen Lichts als Hämoglobin (Foster & Follett, 1985).

Obwohl die extraokulären Lichtrezeptoren empfindlicher für kurze Wellenlängen sind, ist die einfache Transmission der langen Wellenlängen durch die Schädeldecke verantwortlich dafür, dass das Licht im roten Bereich des Spektrums größere Effekte zeigt (Baxter et al., 2014; Lewis & Morris, 2000). Diese zweite Art der Lichtdetektion spielt eine wichtige Rolle in der Steuerung verschiedener physiologischer Prozesse mittels der Etablierung eines

zirkadianen Melatoninrhythmus (Cassone, 1990; Cassone et al., 1990). In diesem Kontext wurde vermutet, dass die extra-retinale Bestrahlungsdetektion der Synchronisation der inneren Uhr, der Thermoregulation, der motorischen Aktivität, dem Wachstum sowie der Steuerung der Sekretion des Gonadotropin-Rezeptor-Hormons (GnRH), welches die Hypophyse reizt, um luteinisierendes Hormon (LH) und follikelstimulierendes Hormon (FSH) freizusetzen, dient (Apeldoorn et al., 1999; Baxter et al., 2014; Lewis & Morris, 2000). All diese Aspekte der okulären und extraokulären Lichtempfindung sind von großer Bedeutung für die Haltung von Geflügel unter Kunstlichtbedingungen.

2.4.1 Endogene Rhythmen und deren Beeinflussung durch Licht

Mehrere Untersuchungen bei unter Kunstlicht gehaltenem Geflügel weisen darauf hin, dass das Licht einen zentralen Managementfaktor darstellt, welcher das Verhalten und Wachstum der Tiere durch die Steuerung von verschiedenen physiologischen Prozessen beeinflussen kann (Adam & Dimond, 1971; Apeldoorn et al., 1999; Bernard et al., 1999; Cassone, 1990; Deep et al., 2013; John et al., 1990; Korbel, 2007; Kristensen et al., 2006a; Osei et al., 1989; Siegel & Isakson, 1969).

Das Licht erlaubt den Tieren einen Rhythmus und eine Synchronisation von vielen wesentlichen Funktionen zu etablieren, welche auf die Futteraufnahme und Verdauung einwirken (wie beispielsweise Körpertemperatur und verschiedene andere zentrale Stoffwechselvorgänge) (Apeldoorn et al., 1999; Cassone, 1990). Darüber hinaus stimuliert Licht die Sekretionsmuster mehrerer Hormone, die an wichtigen Prozessen des Wachstums, der sexuellen Reifung sowie der Reproduktion beteiligt sind (Apeldoorn et al., 1999; Baxter et al., 2014). Diese endogenen Rhythmen, die in einem temporären Programm von biochemischen, physiologischen und Verhaltensereignissen koordiniert sind, sind das Produkt des so genannten "zirkadianen Systems" (Cassone, 1990). Ein wichtiger regulatorischer Bestandteil dieses Systems ist das Hormon Melatonin, dessen Ausschüttung einen Tag-Nacht-Rhythmus aufweist und dessen Peak bei Dunkelheit erreicht wird. Die Regulation der zirkadianen Sekretion von Melatonin wird jedoch nicht nur vom Tag-Nacht-Zyklus gesteuert, sondern auch von endogenen Mechanismen. Diese sind hochkomplex und bestehen aus interagierenden spezialisierten Photorezeptoren und Oszillatoren. Von zentraler Bedeutung sind in diesem Zusammenhang der *Nucleus suprachiasmaticus* des Hypothalamus, das Pinealorgan sowie die Retina, die zusammen die zentrale innere Uhr des Vogels bilden (Bernard et al., 1999; Binkley, 1978; Cassone, 1990; Zatz, 2000; Zawilska & Iuvone, 1992).

2.4.2 Melatoninproduktion bei Vögeln

Bei Vögeln wurden verschiedene Steuerungsmechanismen der Melatoninproduktion identifiziert. Hierzu zählt ein Organ, welches analog zum *Nucleus suprachiasmaticus* (SCN) der Säugetiere ist und durch sympathische Innervation die Melatoninproduktion reguliert, der sogenannte visuelle Nucleus suprachiasmaticus (vSCN) (Cassone, 1990). Ein zweiter Bestandteil befindet sich am Pinealorgan selbst. Hierbei handelt es sich um autonome Photorezeptoren und zirkadiane Oszillatoren, welche die Melatoninproduktion sogar ohne Tag-Nacht-Zyklus und bei *in vitro* Bedingungen stimulieren können. Ein dritter zirkadianer Oszillator liegt an der Netzhaut, er steuert die lokale Melatoninproduktion (Bernard et al., 1999; Zawilska & Iuvone, 1992).

Die Ausschüttung von Melatonin erfolgt hauptsächlich aus der *Glandula pinealis*, in der das Hormon durch Acetylierung mittels Serotonin-N-Acetyltransferase (NAT) und O-Methylierung mittels O-Methyltransferase (HIOMT) aus Serotonin synthetisiert wird (Binkley et al., 1973; Zatz et al., 2000). In der Netzhaut erfüllt Melatonin vermutlich die Funktion eines Neuromodulators (Binkley et al., 1973). Auch in diesem Gewebe wird es aus Serotonin durch die aufeinanderfolgenden Aktionen von NAT und HIOMT, ähnlich wie im Pinealorgan, synthetisiert (Binkley et al., 1973; Zatz et al., 2000). Um seine physiologische Funktion auszuüben, wirkt Melatonin über spezifische Membranrezeptoren. Dabei gibt es prinzipiell mehrere Klassen von Melatoninrezeptoren. Klonierungsuntersuchungen zeigen, dass aviäre Melatoninrezeptoren zum Subtyp ML-2 gehören (Reppert et al., 1995; Zeman et al., 1999). Im Vergleich zu Säugetieren sind die Melatoninbindungsstellen der Vögel nicht nur in zentralen Nervenstrukturen vorhanden, wie in der *Pars tuberalis* der Hypophyse oder dem *Nucleus suprachiasmaticus* des Hypothalamus, sondern auch in verschiedenen peripheren Organen wie Lunge (Pang et al, 1993), Milz (Yu et al, 1991) und Gastrointestinaltrakt (Lee & Pang, 1992). Diese extensive Verteilung der Rezeptoren kann eine breitere Empfindlichkeit hinsichtlich verschiedener physiologischer Prozesse auf zirkadiane Variationen des Melatoninspiegels bei Vögeln im Vergleich zu Säugetieren widerspiegeln (Zeman et al., 1999).

2.4.3 Melatonin und Wachstumsregulation

Eine mögliche Beteiligung von Melatonin an der Wachstumsregulation durch Interaktion mit Transkriptionsfaktoren, Wachstumshormonen und Modulation des Energiestoffwechsels sowie an der Verringerung körperlicher Aktivität wird diskutiert (Apeldoorn et al., 1999; Osei et al., 1989).

Die Forschung ergab Hinweise darauf, dass Melatonin die Steuerung der Zentralnervenbahnen, die an der Somatotropin-Hormonsynthese (Wachstumshormon, GH) im Hypothalamus beteiligt sind, modulieren kann (John et al., 1990; Osei et al., 1989). So konnte bei adulten Tauben mittels einer intravenösen Gabe von Melatonin eine Stimulation der GH-Freisetzung erzielt werden (John et al., 1990), während eine Pinektomie den gegenteiligen Effekt hatte (Rintamaki et al., 1984). Zudem konnte festgestellt werden, dass Melatonin selektiv durch den Hypothalamus des Huhnes aufgenommen wird, was eine Erhöhung der Konzentration an Serotonin zur Folge hat (Cassone et al., 1986). Da ein Zusammenhang zwischen der Konzentration von Melatonin und dem Hirnstoffwechsel besteht, wird diskutiert, dass das Hormon einige seiner physiologischen Effekte durch die Modulation der zentralen serotonergen Transmission bewirkt (Zeman et al., 1999). Auf diese Weise wird sowohl das Wachstum (Osei et al., 1989) als auch der Gesundheitszustand (Clark & Classen, 2018) bei Vögeln durch diesen Botenstoff beeinflusst. Hierbei sind jedoch artspezifische Unterschiede bei der Steuerung der GH-Sekretion zu beachten. So erhöht Serotonin bei Puten den zirkulierenden GH-Spiegel, während es bei Hühnern die zentrale serotonerge Bahn, welche für die GH-Freisetzung zuständig ist, hemmt (Zeman et al., 1999).

2.4.4 Muskelwachstum bei Vögeln

Bei Vögeln ist die Gesamtzahl der Muskelfasern bereits zum Zeitpunkt des Schlupfes vorhanden (Halevy et al., 1998; 2006). Allerdings stellt bei schnellwachsenden Mastküken die erste Lebenswoche die wichtigste Phase für die Entwicklung der Muskulatur dar (Moss et al., 1964). Das Skelettmuskelwachstum nach dem Schlupf ist durch eine zelluläre Hypertrophie ohne Erhöhung der Anzahl der Muskelfasern gekennzeichnet. Jedoch wird bei Vögeln und auch bei Säugern eine starke Zunahme des Muskel-DNA-Gehaltes während des postnatalen Wachstums beobachtet. Dies ist auf die Vermehrung myogener Vorläuferzellen im Skelettmuskel zurückzuführen, die sogenannten Satellitenzellen (Mauro, 1961). Bei diesen handelt es sich um eine spezialisierte Art von myogenen Stammzellen, die über das gesamte Leben persistieren und eng mit Muskelfasern assoziiert sind (Mauro, 1961; Moss & Leblond, 1971). Es

wird angenommen, dass dieser Zelltyp die einzige Quelle sowol von myogenen Zellen während des frühen postnatalen Skelettmuskelwachstums als auch von myogenen Vorläuferzellen für neue Myoblasten während des Wachstums und während der Regeneration des ausgewachsenen Skelettmuskels ist (Moss & Leblond, 1971).

Mehrere Wachstumsfaktoren und Hormone sind bei der Stimulierung oder Hemmung der Proliferation und Differenzierung von Satellitenzellen diskutiert worden. Es wurde herausgefunden, dass die Proliferation und Differenzierung von Hühner-Satellitenzellkulturen durch GH beeinflusst werden (Halevy et al., 1996; Hodik et al., 1997). Darüber hinaus wird das Wachstumshormonrezeptor-Gen (GH-R) während der Differenzierung der Satellitenzellen *in vitro* sowie im Skelettmuskel während des Hühnerwachstums *in vivo* exprimiert (Halevy et al., 1996). Bei der Untersuchung aviärer Satellitenzellkulturen konnte festgestellt werden, dass GH mittels eigener Rezeptoren die Proliferation von mehr Satellitenzellen durch die Hemmung ihrer Differenzierung induziert und damit mehr Zellkerne zum wachsenden Muskel hinzugefügt werden (Halevy et al., 1996).

Wegen seiner Wirkung auf verschiedene physiologische Prozesse stellt das Licht daher einen wichtigen Faktor für das Muskelwachstum bei Masthühnern dar. Untersuchungen zum Lichtspektrum und deren Auswirkung auf Muskelwachstum bei Mastküken belegen, dass die Exposition gegenüber grünem und blauem Licht die Proliferation von Muskel-Satellitenzellen während des ersten Tages nach dem Schlupf stimuliert (Halevy et al., 1998). Darüber hinaus konnten Cao et al. (2008) zeigen, dass das Wachstum von Broilern gesteigert werden kann, wenn die Tiere während der ersten 26 Tage unter monochromatischem Hellgrünlicht und während der späteren Phase bis zum Tag 49 der Aufzucht bei Hellblaulicht und einer Intensität von 15 Lux gezüchtet werden. Die Verwendung von grünem Licht während der Embryogenese (also der Brut) könnte zudem durch vermehrte Proliferation von Skelettmuskelzellen und gesteigertes Wachstum von Muskel-Myofasern einen signifikanten Effekt auf die Körpermasse männlicher Masthühner nach dem Schlupf haben (Halevy et al., 2006; Rozenboim et al., 2004; Zhang et al., 2012).

2.5 Lichtmanagement in der Broilermast

Die intensive Wirtschaftsgeflügelhaltung wird heute fast ausschließlich unter Kunstlichtbedingungen durchgeführt, welche sich von natürlichem Licht durch seines Photoperiode, spektrale Zusammensetzung und Intensität unterscheidet (Akyüz & Onbaşilar, 2018; Korbel & Sturm, 2005; Korbel, 2008). Das Lichtmanagement in der Geflügelhaltung muss verschiedene wichtige Aspekte des visuellen Systems, der hormonellen Steuerung und der Verhaltensweise der Vögel in Betracht ziehen. Von zentraler Bedeutung ist hierbei, dass sich das visuelle System des Huhnes deutlich von jenem des Menschen unterscheidet. Außerdem weisen Vögel eine extraokuläre Strahlungsrezeption mittels direkter Erregung des Pinealorgans und der Tiefenhirn-Photorezeptoren auf. So können die Lichtbedingungen die Physiologie, das Verhalten, Produktion und das Tierwohl auf verschiedene Weise beeinflussen (Rogers et al., 2015).

2.5.1 Parameter der Masthühnerproduktion und Tierschutz

Das Kunstlicht in der Geflügelhaltung kann durch die Photoperiode (Dauer der Licht- und Dunkelphase), die Wellenlänge (Farbe) und die Intensität (Helligkeit) charakterisiert werden (Olanrewaju et al., 2006). Diese drei Kriterien der künstlichen Beleuchtung werden von mehreren Faktoren beeinflusst, insbesondere von den eingesetzten Leuchtmitteln (Lewis & Morris, 2000; Prescott & Wathes, 1999b), dem Aufbau und den reflektierenden Eigenschaften des Stalles (Prescott & Wathes, 1999a) und von der Art der Vogelhaltung (Bodenhaltung, Freilandhaltung, etc.)

Um die Produktionseffizienz in der Geflügelindustrie zu bewerten, werden die Körpermasse (KM), die Futteraufnahme (FA), die Futterverwertung (FV) und die Mortalität als gängige Parameter der Masthühneraufzucht beurteilt (Deaton at al., 1976; Deep et al., 2010; Lien et al., 2008; Lien et al., 2007; Newberry et al., 1988; Prayitno et al., 1997a). Die tägliche Kontrolle dieser Größen erfolgt in der Regel durch im Stallvorraum installierte elektronische Systeme. Zudem ist der Landwirt nach Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (§ 4, Abs. 3) dazu verpflichtet, die Masthühnerherde täglich zu kontrollieren und zu diesem Zwecke Parameter wie tägliche Mortaliät und Tiere mit Erkrankungsanzeichen absolut und als prozentualen Anteil zu erfassen. Der Tierschutz stellt einen unabdingbaren Aspekt in der Tierproduktion dar. In diesem Zusammenhang dienen u.a. die Inzidenz von Hautläsionen aufgrund von Verkratzungen und Kontaktdermatitis als Tierschutzindikatoren (Deep et al., 2013, 2010; Ekstrand et al., 1998; Gouveia et al., 2009; Haslam et al., 2007; Kristensen et al., 2006b; Louton et al., 2018; 2019;

Shepherd & Fairchild, 2010; Škrbić et al., 2015). Der Heilungsprozess solcher Hautläsionen ist relativ zeitintensiv (Greene et al., 1985). Aufgrund der kurzen Lebensdauer von Masthühnern in den konventionellen Produktionssystemen (Kurzmast: 28 - 30 Tage, Mittellangmast: 32 - 35 Tage und Langmast: 38 - 42 Tage sowie Splittingverfahren: 29 - 33 Tage) (Berk, 2014), kann die Heilung in der Regel nicht fristgerecht bis zum Mastende erfolgen. Aus diesem Grund stellt die Erhebung der Prävalenz von Hautveränderungen am Schlachthof eine repräsentative und geeignete Methode zur Erfassung der Kontaktdermatitis und von Verkratzungen der Herde während eines Aufzuchtdurchgangs dar (Berg, 2004). Darüber hinaus ermöglicht die Messung der lokomotorischen Aktivität und der Bewegungsfähigkeit der Tiere eine Einschätzung der Beingesundheit der Hühner (Deep et al., 2010; Kristensen et al., 2006b; Reiter & Bessei, 1998a; 1998b).

2.5.1.1 Produktionsparameter

Die Körpermasse (KM) gilt als ein wichtiger Parameter in der Masthühnerproduktion. Die Körpermassenentwicklung der Tiere in Gramm pro Tag wird dabei täglich erfasst (Arbor Acres, 2018; Aviagen, 2018; Cobb-Vantress, 2018; Hubbard, 2016). Die Körpermassenentwicklung soll so schnell sein, dass die erwünschte Mastendmasse innerhalb eines festgelegten Zeitraums erreicht wird. In diesem Zusammenhang hat die intensive züchterische Bearbeitung des Erbgutes von Masthybriden dazu geführt, dass sich seit 1957 die Wachstumsgeschwindigkeit der Masthühner vervierfacht hat, sodass die Vögel heutzutage ihre Mastendmasse von ca. 2 kg in etwa 35 bis 42 Tagen erreichen. Allerdings zeigten sich in den frühen Stadien des Wachstums häufig Probleme in der Geflügelproduktion in Verbindung mit einer langsamen Skelettentwicklung, Herzversagen und einer schwache Immunreaktivität (Apeldoorn et al., 1999; Classen & Riddell, 1989; Classen et al., 1991; Deep et al., 2013; Lien et al., 2007). Sie stellen Herausforderungen für die Aufzucht von Masthühnern dar, die von der Industrie durch entsprechende Ernährungsmethoden und Lichtmanagement kontrolliert werden. Insbesondere die Beeinflussung dieser beiden Faktoren hat sich bei der Kontrolle des schnellen Wachstums als wichtig erwiesen.

Die Futteraufnahme (FA) bezieht sich auf das Futter, das während der Aufzucht von den Tieren verzehrt wird. Die FA wird in Gramm pro Tag berechnet. Aufgrund des lichtbedingten Ernährungsverhaltens der Masthühner wirkt sich das verwendete Lichtprogramm auf die Futteraufnahme der Tiere aus. Auf diese Weise wird die FA durch Photoperiode, Wellenlänge und Lichtintensität beeinflusst (Deep et al., 2010; Newberry et al., 1985; Prayitno et al., 1997a; Prescott & Wathes, 1999a; 2002; Savory, 1976a; 1976b).

Die Futterverwertung (FV), bei welcher es sich um den Quotienten zwischen der Futteraufnahme und der Körpermassenentwicklung handelt, ist bei Masthühnern ein wichtiger Parameter, um die Produktionseffizienz in Beziehung zu den Futterkosten zu bewerten. Auf diese Weise lässt sich durch die FV die Umwandlung von Futter in Körpermasse abschätzen. Hierbei ist die Futterverwertung umso besser, je kleiner das Verhältnis zwischen Futteraufnahme und Körpermasse ist (Arbor Acres, 2018; Aviagen, 2018; Cobb-Vantress, 2018; Hubbard, 2016). Dieser Faktor lässt sich auf unterschiedliche Weise auch von den Komponenten des Lichtprogramms beeinflussen (Buyse & Decuypere, 2003; Deaton et al., 1976; Deep et al., 2010; Lewis & Morris, 1998; 2000; Newberry et al., 1988; Rahimi et al., 2005; Schwean-Lardner et al., 2012).

Die Mortalität beschreibt die Verluste, die aufgrund verschiedener Ursachen während der Aufzucht auftreten. Diese täglichen Verluste ergeben sich aus verendeten und selektierten Tieren. Selektierte Tiere stellen in diesem Zusammenhang Indikatortiere dar, also Hähnchen, die mit ihren Erkrankungsanzeichen den Gesundheitszustand des Bestandes reflektieren. Die tägliche Mortalitätsrate wird als absoluter und prozentualer Anteil angegeben, wobei dann die absolute Anzahl der getöteten und verendeten Tieren im Verhältnis zu der Zahl der eingestallten Tiere angegeben wird (Arbor Acres, 2018; Aviagen, 2018; Cobb-Vantress, 2018; Hubbard, 2016). Somit ist die Mortalität ein wichtiger Parameter, um die Wirtschaftlichkeit eines Aufzuchtdurchgangs nachvollziehen zu können. Er ist ebenso ein tierschutzrelevanter Parameter.

2.5.1.2 Tierschutzparameter

Die lokomotorische Aktivität und die Beingesundheit stellen wichtige Tierschutzparameter in der Geflügelhaltung dar. Der Gesundheitszustand der Beine steht dabei in engem Zusammenhang mit der motorischen Aktivität. Ein hohes Aktivitätsniveau kann nur mit einer guten Beingesundheit erreicht werden und es ist ein wichtiger Tierschutzindikator für die Entwicklung gesunder Ständer (Prescott et al., 2004). Durch die hohe Wachstumsrate der Masthühner kann es jedoch zu pathologischen Veränderungen in der Entwicklung der Beine kommen, die die Bewegungsfähigkeit der Tiere einschränken (Deep et al., 2010; Prescott et al., 2004). Klinisch sichtbare Bewegungsstörungen werden allgemein als Beinschäden oder Beinschwächen bezeichnet (Reiter & Bessei, 1998a; 1998b). Ausgelöst werden können sie durch Erkrankungen der Muskulatur, des Skelett- oder des Nervensystems. Häufig auftretende Erkrankungsbilder sind die Dyschondroplasie und Lahmheiten (Deep et al., 2010; Kristensen et al., 2006b). Eine hohe Inzidenz von Beinschwächen ist zudem signifikant korreliert mit einer

erhöhten Rate an Folgeerkrankungen, wie Fersenbeinhöckerveränderungen („hock burn“) und Pododermatitis (Sørensen et al., 1999; Su et al., 1999). Außerdem rufen diese Erkrankungen durch Schmerzen und/oder biomechanische Dysfunktionen Lahmheiten hervor. Ein schlechtes Wachstum, eine erhöhte Rate an selektierten Tieren, eine erhöhte Mortalität durch Auszehrung und Dehydratation sowie Schlachtkörperschäden können die Auswirkungen sein. Aus diesen Gründen stellen Erkrankungen des Bewegungsapparates einen bedeutenden Faktor für Ökonomie und Tierschutz dar (Ekstrand et al., 1998; Gouveia et al., 2009; Kristensen et al., 2006b; Škrbić et al., 2015).

Die Kontaktdermatitis ist eine ulzerative Verletzung der Haut, die die plantare Oberfläche der Füße (Pododermatitis), die Fersen („hock burn“) und der Brust (Brustblasen) betreffen kann. Diese Formen können entweder einzeln oder in verschiedenen Kombinationen auftreten (Ekstrand et al., 1998; Haslam et al., 2007; Shepherd & Fairchild, 2010; Škrbić et al., 2015). Die Dermatitis ist ein multifaktorielles Geschehen verursacht durch verschiedene endogene und exogene Faktoren (z.B. Einstreumaterial, Einstreufeuchtigkeit, Einstreutiefe, Tränkevorrichtung, Besatzdichte, Ernährungsfaktoren, Geschlecht, Körpergröße und genetische Linie) (Ekstrand et al., 1998; Haslam et al., 2007; Shepherd & Fairchild, 2010; Škrbić et al., 2009; 2015). Die Inzidenz von ulzerativen Verletzungen ist in der modernen Masthühnerindustrie von großer Bedeutung, weil diese Läsionen zweifellos schmerzhaft sind und zu einem verminderten Tierwohl führen (Deep et al., 2010; Škrbić et al., 2015).

Pododermatitis und „hock burn“ werden primär durch eine Kombination von Feuchtigkeit und chemischen Reizstoffen in der Einstreu (insbesondere freigesetztes Ammoniak) verursacht (Ekstrand et al., 1998; Haslam et al., 2007; Shepherd & Fairchild, 2010). Die Inzidenz dieser Erkrankungen variiert, da das Auftreten mit dem Verhalten der Tiere zusammenhängt, was zu unterschiedlichen Kontaktstellen mit den Reizstoffen führen kann (Kristensen et al., 2006b). Einige Geflügelschlachthöfe exportieren Broilerfüße für den menschlichen Verzehr. In diesem Fall ist es wichtig, dass die Füße keine pathologischen Veränderungen zeigen (Ekstrand et al., 1998). Außerdem gibt es Hinweise, dass Vögel, die von diesen Läsionen betroffen sind, eine reduzierte Körpermassenentwicklung zeigen (Shepherd & Fairchild, 2010). Aus diesem Grund können Pododermatitis und „hock burn“ beträchtliche finanzielle Einbußen für die Industrie nach sich ziehen (Ekstrand et al., 1998; Shepherd & Fairchild, 2010). Zudem ergibt sich hieraus auch ein wichtiger Tierschutzaspekt, da die Erkrankungen für die betroffenen Vögel äußerst schmerzhaft sein können (Deep et al., 2010; Ekstrand et al., 1998; Shepherd & Fairchild, 2010; Škrbić et al., 2015).

Der Begriff Brustblase, auch als "sternal bursitis" bezeichnet, beschreibt eine Vergrößerung der sternalen Bursa, die durch wiederholte Verletzungen (Druck oder Reibung) des Kielknochens und daraus resultierender Entzündung der *Bursa sternalis* ensteht (Miner & Smart, 1974). Das Auftreten der Brustblasen hängt mit der Prävalenz der Pododermatitis und „hock burn" zusammen, da diese Läsionen in ihrer schwerwiegenderen Erscheinungsform das Stehen der Vögel verhindern und sie daher länger in sternaler Lage verbleiben (Greene et al., 1985; Haslam et al., 2007; Shepherd & Fairchild, 2010). Brustblasen sind aufgrund des Gewebetraumas schmerzhaft. Darüber hinaus führt ein vermehrtes Auftreten von Brustblasen am Schlachthof zu einer erhöhten Verwurfsrate. Aus diesen Gründen handelt es sich bei Bursitiden um einen Tierschutzindikator, welcher unmittelbar Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit eines Betriebes hat (Škrbić et al., 2015).

Verkratzungen bei Masthühnern können in schweren Fällen zu einer Dermatitis mit gegebenenfalls Schorfbildung und Unterhautvereiterungen führen. Schlachtkörper werden hierdurch je nach Schweregrad verworfen oder abgewertet (Frankenhuis et al., 1991; Proudfoot & Hulan, 1985). Verkratzungen stellen auch ein wichtiges Tierschutzproblem dar, weil sie häufig mit hohen Mortalitätsraten korrelieren (Louton et al., 2018). Daher wirken sich Verkratzungen sowohl auf den Tierschutz als auch auf die Wirtschaftlichkeit negativ aus.

Inzidenz und Schwere von Verkratzungen werden durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Zu diesen zählen die Besatzdichte, die lokomotorische Aktivität, Fütterungs- und Tränkeeinrichtungen, Mangel- oder Fehlernährung, die Gestaltung der Haltungseinrichtung und die genetische Veranlagung der Tiere. (Allain et al., 2009; Elfadil et al., 1996; Frankenhuis et al., 1991; Gouveia et al., 2009). Aus diesen Gründen können Verkratzungen Haltungs- und Managementfehler widerspiegeln, welche im Rahmen einer art- und tierschutzgerechten Haltung vermieden werden sollten. Das Alter der Vögel wurde auch als ein Faktor im Zusammenhang mit der Prävalenz von Verkratzungen genannt. Hierbei wird das Kratzverhalten eher jungen Vögeln, welche ein hohes Aktivitätsniveau zeigen, zugeordnet (Fraser, 1985). Im Gegensatz hierzu fanden Gouveia et al. (2009) heraus, dass bei Hühnern, die in extensiven Indoor- und in üblichen Freilandhaltungssytemen, in einem Alter von bis zu 56 – 81 Tagen und 91 – 100 Tagen geschlachtet wurden, Kratzer am häufigsten unter den ältesten Vögeln beobachtet wurden. Dieser Befund deutet darauf hin, dass es ein erneutes Auftreten eines hohen Aktivitätsniveaus gibt, wenn die Hühner die sexuelle Reife erreichen. Dennoch kann diese Erkenntnis nicht auf die konventionelle Masthühnerproduktion übertragen werden, da Masthühner vor Eintritt der Geschlechtsreife geschlachtet werden. Es wurde beobachtet, dass die höchste Prävalenz von Verkratzungen gegen Ender der Aufzucht entsteht und mit der schrittweisen Zunahme der Besatzdichte, die

durch die Erhöhung der Körpermasse der Hühner zustande kommt, positiv korreliert war (Dozier et al., 2005; Elfadil et al., 1996). Dies könnte mit der Zunahme der motorischen Aktivität der Vögel am Ende der Skotophase zusammenhängen (Kristensen et al., 2004; 2006a). Wenn die Lichtintensität bei der Photophase hoch wird, kann sich eine große Anzahl von Hühnern zeitgleich zu den Futtertrögen und Tränken bewegen, was aufgrund der begrenzten verfügaren Bodenfläche Reibungen und Verkratzungen zur Folge hat (Kristensen et al., 2008). Laut Aviagen (2018) kann die Häufigkeit von Verkratzungen verringert werden, wenn eine hohe motorische Aktivität vermieden und eine angemessener Futter- und Trinkraum, sowie eine ständige Zugansmöglichkeit zum Futter sichergestellt wird.

2.5.2 Photoperiode in der Wirtschaftsgeflügelhaltung und deren Auswirkungen auf die Masthühnerproduktion und den Tierschutz

Die Photoperiode umfasst die zeitliche Verteilung des Lichts während des Tages und sie besteht aus einer Photophase (Dauer des Lichts) und einer Skotophase (Dauer der Dunkelheit). Die Urform des Haushuhnes, das sogenannte Bankivahuhn (*Gallus gallus)*, entwickelte sich in den äquatorialen Waldgebieten Asiens unter einer natürlichen Beleuchtungsdauer von 12 Stunden Licht (12 L) und 12 Stunden Dunkelheit (12 D) während einer Tagesdauer von 24 Stunden. Das steht in scharfem Kontrast zu den meisten derzeit in der Geflügelindustrie verwendeten Photoperioden, die viel kürzere Skotophasen aufweisen (Prescott et al., 2004). Normalerweise werden Masthühner unter 23L:1D während ihrer ersten Lebenswoche gehalten, gefolgt von unterschiedlichen Licht- und Dunkelphasen für die weitere Wachstumsperiode (Olanrewaju et al., 2006). Photoperioden, die aus einer Photo- und Skotophase bestehen, die jedoch zusammengenommen mehr oder weniger als 24 Stunden umfassen, werden als ahemeral bezeichnet. Ihre Verwendung ist jedoch in der Broilermast unüblich (Lewis & Perry, 1990). Auf der anderen Seite sind Photoperioden, die 24 Stunden umfassen, als hemeral bekannt. Photoperioden, bei denen mehr als eine Photo- und Skotophase auftreten und die von Hühnern als Tag und Nacht interpretiert werden können oder nicht, werden als intermittirende Beleuchtung bezeichnet (Lewis & Perry, 1990; Olanrewaju et al., 2006). Ist bei einer intermittierenden Beleuchtung die Dauer der Skoto- und jene der Photophase identisch, so wird diese als symmetrisch bezeichnet. Ist eine der beiden Phasen innerhalb von 24 Stunden länger als die andere, wird die Photoperiode als asymmetrisch bezeichnet (Lewis & Perry, 1990). In der Broilermast gängige Photoperioden sind z.B. 23L:1D, 16L:8D, 16L:3D:2L:3D, 16L:1D:6L:1D, wobei in aller Regel nach der Einstallung bis zu sieben Tagen Dauerlicht gegeben wird (2018a; Arbor Acres, 2018; Aviagen, 2018; Cobb-Vantress, 2018; Hubbard, 2016). Laut § 19 Tierschutz-

Nutztierhaltungsverordnung ist sicherzustellen, dass „spätestens ab dem siebten Tag nach der Einstallung der Masthühner und bis zu drei Tagen vor dem voraussichtlichen Schlachttermin ein 24-stündiges Lichtprogramm betrieben wird, das sich am natürlichen Tag-Nacht-Rhythmus orientiert und mindestens eine sechsstündige ununterbrochene Dunkelperiode gewährleistet, wobei Dämmerlichtperioden nicht berücksichtigt werden“.

Eine Photoperiode, die für keine oder nur für eine kurze Dunkelphase unterbrochen ist, wird als Dauerbeleuchtung bezeichnet (Olanrewaju et al., 2006). Die Verwendung einer Dauerbeleuchtung während der gesamten Aufzuchtperiode war in der Vergangenheit in der Broilermast im allgemeinen Einsatz. Eine solche Beleuchtung sollte den Vögeln eine kontinuerliche Futteraufnahme während des gesamten Tages erlauben, was theoretisch das Wachstum und die Futterverwertung im Vergleich zu normalen Tag-Nacht-Lichtperioden verbessert. Bisher gibt es jedoch kaum wissenschaftliche Untersuchungsergebnisse, welche diese Behauptung stützen, Untersuchungen zeigen eher eine gegenläufige Tendenz (Buyse & Decuypere, 2003; Downs et al., 2006; Kristensen et al., 2004; Schwean-Lardner et al., 2012). Weiterhin steht die Dauerbeleuchtung in Konflikt zu zirkadianen Rhythmen des Huhnes, was eine Reihe von metabolischen Veränderungen und Schäden hinsichtlich des Wohlbefindens und der Leistung der Tiere verursachen kann (Apeldoorn et al., 1999; Classen et al., 1991; John et al., 1990; Osei et al., 1989; Zeman et al., 1999). Aus diesem Grund wird die Dauerbeleuchtung derzeit als veraltet und ungeeignet betrachtet. Laut Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (TierSchNutztV, 2006 § 19) ist die Dauerbeleuchtung nur an den Tagen 1 – 7 und an den letzten drei Tagen vor dem voraussichtlichen Schlachttermin erlaubt. Allerdings ist die Dauer der Licht- und Dunkelphase auch aktuell noch ein Diskussionspunkt bezüglich der Festsetzung der optimalen Beleuchtungsdauer für die Broilermast (Arowolo et al., 2019; Olanrewaju et al., 2006).

Verschiedene intermittierende Beleuchtungsprogramme wurden im Laufe der Jahre angewendet und getestet. Die meisten von ihnen zeigen im Vergleich zu einer Dauerbeleuchtung eine höhere Futterverwertung, weniger Beinprobleme und eine geringere Mortalität, wenn die Vögel unter einer ununterbrochenen Dunkelphase gehalten werden (Classen et al., 2004; Classen et al., 1991). Diese Forschungsergebnisse ergaben Hinweise dafür, dass Hühnern mindestens 4 ununterbrochene Stunden Dunkelheit gegeben werden sollte, obwohl die Schlafförderung in bestimmten Phasen der Wachstumsperiode noch länger sein könnte (Blokhuis, 1983). Darüber hinaus lässt sich feststellen, dass die Augen der Vögel auf Lichtreize und Photoperiode reagieren. Diese Reaktionen können für die kommerzielle Geflügelproduktion in Bezug auf Eier und Fleisch sowie zur Verbesserung des Wohlbefindens der Vögel genutzt werden (Egbuniwe & Ayo, 2016).

Zusätzlich trägt eine angemessene Morgen- und Abenddämmerung zu einer normalen Entwicklung des natürlichen Verhaltens der Vögel bei (Prescott et al., 2004). Hierbei ermöglicht es die Morgen- und Abenddämmerungsperiode den Vögeln, den Anfang der Dunkel- und Lichtphase zu erahnen, wodurch sie stimuliert werden vor dem Einbruch der Dunkelheit zu fressen (Savory, 1976a, 1976b). Dies führt zu einer deutlichen Reduktion von Stress, welcher auftritt, wenn die Tiere eine plötzliche Änderung der Leuchtstärke nicht vorhersehen können (Kristensen, 2008).

Hühner zeigen unter natürlichen Bedingungen einen zweigipfligen Aktivitätsrhythmus, dessen Spitzen am frühen Morgen und am Abend liegen (Savory, 1976a). Können die Masthühner die kommende Dunkelheit aufgrund der Dämmerungsperiode voraussehen, nehmen sie am Ende der Lichtphase mehr Futter auf. Diese Fütterungsspitze als Antwort auf die Dämmerung gibt den Vögeln die Gelegenheit, ihren Kropf zu füllen und auf diese Weise ein Nahrungsdefizit während der Nacht zu vermeiden (Savory, 1976a, 1976b). Classen und Riddell (1989) fanden eine höhere Futteraufnahme, wenn eine zweistündige Morgen- und Abenddämmerungsperiode umgesetzt wurde.

In Übereinstimmung mit dem obigen Genannten kann behauptet werden, dass Vögel in der Lage sind, eine bevorstehende Dunkelphase antizipieren zu können und ihre Fütterungsaktivität entsprechend der erwarteten Länge dieser Dunkelphase anzupassen (Savory, 1976a, 1976b). Aus diesem Grund ist es wichtiger, die Vögel mit einer schrittweisen Abenddämmerungsperiode anstatt einer Morgendämmerung zu versorgen. Die Länge der Dämmerungsperiode sollte den Vögeln erlauben, ihren Kropf für die Nacht zu füllen und einen geeigneten Schlafplatz zu finden.

2.5.2.1 Photoperiode und Produktionsparameter

Futteraufnahme: Die Photoperiode ist ein wichtiger Faktor für Hühner, um tägliche Fütterungszeiten zu entwickeln (Savory, 1976a). Es wurde dabei lange Zeit angenommen, dass die Verwendung von Dauerlicht zur Zunahme der Körpermasse beiträgt und dass die Tiere nur während des Tages Futter aufnehmen. Deswegen sollten längere Photophasen einen unbeschränkten Zugang zu Futter und Wasser ermöglichen (Savory, 1976a). Es wurde jedoch beobachtet, dass Masthühner auch während der Dunkelheit Nahrung aufnehmen, wenn ausgedehnte Dunkelphasen eingeführt werden (Bessei, 2006), sodass Hühner unter langen Dunkelphasen einen circadianen Rhythmus mit erhöhter Futteraufnahme vor dem Beginn der Dunkelheit aufweisen (Buyse & Decuypere, 2003; Buyse et al., 1996; Savory, 1976a). Dies lässt darauf schließen, dass die Verkürzung der Dunkelphasen nicht zu einer direkten

Erhöhung der Futteraufnahme beiträgt. Jedoch sind junge Masthühner noch nicht in der Lage, verkürzte Lichtphasen vollständig zu tolerieren (Bessei, 2006). Um die Futteraufnahme der Küken zu optimieren, sollte daher eine kurze Dauerlichtperiode nach der Einstallung von bis zu sieben Tagen gegeben werden (Olanrewaju et al., 2006).

Zusammenfassend ist die Verwendung von Dauerlicht nicht die optimale Weise, um die Futteraufnahme zu verbessern. Diese kann eher durch die Stimulation des Futteraufnahmeverhaltens mittels der Verwendung von circadianen Fütterungszeiten erreicht werden. Darüber hinaus ist die Dauerbeleuchtung nach der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (TierSchNutztV, 2006 § 19) verboten, außer an den Tagen 1 – 7 und an den letzten drei Tagen vor dem voraussichtlichen Schlachttermin.

Körpermasse: Forschungen ergaben Hinweise dafür, dass für das Wachstum und die Gesundheit der Vögel die Dunkelheit genauso wichtig ist wie das Licht (Classen et al., 1991). Classen et al. (2004) verglichen Photoperioden mit 12 Stunden Dunkelheit, welche über einen Zeitraum von 1, 6 und 12 Stunden pro 24 Stunden verteilt wurden. Ihre Untersuchung zeigte, dass die Wachstumsrate in frühen Mastphasen signifikant durch lange Dunkelphasen reduziert, die Endmasse aber durch die Photoperiode nicht beeinflusst wurde. Obwohl lange Dunkelphasen am Anfang des Mastdurchgangs die Rate des frühen Wachstums reduzieren können, wurde beobachtet, dass männliche Hühner ein kompensatorisches Wachstum aufweisen (Buyse & Decuypere, 2003; Downs et al., 2006). Diese Wachstumsform ist durch einen hohen Plasmaspiegel des Wachstumshormons (GH) und von Testosteron gekennzeichnet, was vermuten lässt, dass diese Hormone eine positive Rolle während des kompensatorischen Wachstums spielen (Buyse & Decuypere, 2003). Diese Veränderung der Wachstumsgeschwindigkeit erzeugt eine konkave Wachstumskurve (ein langsames anfängliches Wachstum gefolgt von einer schnellen Wachstumsrate), die einen deutlichen Anstieg um die Tage 42 - 56 Tage zeigt (Downs et al., 2006). In diesem Zusammenhang wurde berichtet, dass eine ähnliche Veränderung der Wachstumskurve durch eine vorübergehende Abnahme der Nahrungsenergie während des frühen Wachstums hervorgerufen werden kann (Buyse et al., 1996). Darüber hinaus wurde argumentiert, dass diese Wachstumsform Vorteile für die Gesundheit der Tiere bringt, indem sie Beinprobleme, Mortalität sowie die Inzidenz des plötzlichen Herztodes im Vergleich zu Vögeln unter Dauerbeleuchtung und mit einem schnellen Wachstum reduziert (Apeldoorn et al., 1999; Classen et al., 2004; Riddell & Classen, 1992).

Bislang wurden durch Forschungsergebnisse noch keine eindeutigen Nachweise dafür erbracht, dass ein Dauerbeleuchtungssystem die Endmasse durch einen uneingeschränkten visuellen Zugang zu den Futteranlagen erhöhen kann.

Schwean-Lardner et al. (2012) fanden heraus, dass unter Dauerbeleuchtung (23L:1D) gezüchteten Vögel eine geringere Körpermasse hatten, und dabei unabhängig vom Alter, als jene, die unter intermittierender Beleuchtung gehalten wurden. Ähnliche Ergebnisse erhielten Buyse et al. (1994) bei einem Vergleich von Dauerbeleuchtungsprogrammen mit Step-up- oder Step-down-Beleuchtungsprogrammen. Dabei ergab sich, dass die Körpermassenentwicklung unter Dauerbeleuchtung gleich oder schlechter war als jene, die unter den wechselnden Programmen erreicht wurde. Im Gegensatz hierzu fanden Rahimi et al. (2005) beim Vergleich einer intermittierenden Beleuchtung (1L:3D) mit einem Dauerlichtprogramm keine signifikanten Unterschiede in der Körpermasse. Dennoch sollte nicht übersehen werden, dass es Wechselwirkungen zwischen Lichtverhältnissen und anderen Managementfaktoren, wie z.B. Genetik, Geschlecht, Alter, die Art der Nahrung, Besatzdichte, Temperatur und Feuchtigkeit gibt, die letztlich scheinbare Abweichungen in den veröffentlichten Ergebnissen verursachen können (Buyse et al., 1996).

Futterverwertung: Die Photoperiode kann die Futterverwertung durch die Steuerung der motorischen Aktivität und des Fressverhaltens der Vögel beeinflussen. Es wurde festgestellt, dass Hühner unter einer intermittierenden Beleuchtung eine signifikante Verbesserung der Futterverwertung am Ende der Wachstumsperiode zeigen, was in hohem Maße auf das kompensatorische Wachstum zurückzuführen sein könnte (Buyse et al., 1996). Außerdem können in die Photoperiode eingeschaltete Dunkelphasen das Ausmaß der motorischen Aktivität der Vögel verringern, was eine signifikante Energieeinsparung darstellt (Buyse et al., 1996; Rahimi et al., 2005). Aus diesem Grund kann eine frühe Lichtbeschränkung die Futterverwertungsrate während der frühen Wachstumsphase verbessern, obwohl sie zu einer indirekten Futterrestriktion führt. Classen et al. (2004) stellten durch die Verwendung intermittierender Beleuchtung fest, dass die Futterverwertung bei Tieren, welche unter 12L:12D und 2x 6L:6D gehalten wurden, höher war als bei jenen, welche unter 12x 1L:1D gehalten wurden. Ähnliche Ergebnisse beschreiben auch Schwean-Lardner et al. (2012), welche die maximale Futterverwertung bei 14L: 10D im Vergleich zu 17L:7D, 20L:4D und 23L:1D feststellten.

Die Kohärenz zwischen Photoperiode und Futterverwertung zeigt, dass keine größere Interaktion mit anderen Faktoren besteht, wie dies bei der Körpermassenentwicklung der Fall ist, so dass das Lichtmanagement als eine wirksame Methode verwendet werden kann, um die Effizienz des Futterverbrauches in der Geflügelindustrie zu verbessern (Buyse et al., 1996).

Mortalität: In der Literatur finden sich Hinweise, dass die Mortalität bei Vögeln, die unter intermittierender Beleuchtung gezüchtet werden, niedriger ist im Vergleich zu denen, die unter Dauerbeleuchtung gehalten werden

(Classen, 2004; Classen et al., 1991; Riddell & Classen, 1992). So zeigen Tiere unter Dauerlicht eine sehr hohe Wachstumsrate (Classen et al., 2004), was möglicherweise einer von vielen Faktoren zur Ätiologie von Aszites ist. Aszites aufgrund einer kongestiven Herzinsuffizienz wurde bei etwa 77 % der Todesfälle bei Masthühnern beobachtet, welche einen unbegrenzten Zugang zu Futter unter 24L:0D hatten (Nain et al., 2009). Lewis et al. (2009) verglichen die Reaktion der genetischen Linien Cobb und Ross auf verschiedene Photophasen zwischen 2 und 21 Stunden und einer Dauerbeleuchtung. In diesem Experiment wurde festgestellt, dass die Mortalität proportional mit Photophasen größer als 12 Stunden ansteigt. Darüber hinaus wurde eine erhöhte Mortalität bei Vögeln unter 23L 1D im Vergleich zu jenen erfasst, die unter intermittierenden Photoperioden mit zunehmender Beleuchtungsdauer (Charles et al., 1992) und unter 12L:12D (Brickett et al., 2007) gehalten wurden. Andere Untersuchungen konnten keine Unterschiede in der Mortalität für Masthühner unter 23L:1D zeigen, im Vergleich zu denen, die unter 18L:6D gehaltet wurden (Lien et al., 2007).

2.5.2.2 Photoperiode und Tierschutzparameter

Beingesundheit und Motorische Aktivität: Die Photoperiode beeinflusst das Aktivitätsmuster der Vögel, wobei die Tiere die höchsten Aktivitätsraten während der Lichtphase zeigen (Bessei, 2006; Blatchford et al., 2012). Außerdem besteht zwischen dem Aktivitätsniveau und der Beingesundheit ein enger Zusammenhang, welcher mittels eines Gait-Scoring-Systems gemessen werden kann. Dieses dient als Beingesundheits- und Tierschutzindikator (Garner et al., 2002; Sanotra et al., 2002). Sanotra et al. (2002) fanden heraus, dass Hühner, die unter Dauerbeleuchtung (24L:0D Photoperiode) gehalten wurden, einen höheren Gait score zeigten, welcher sich in einer schlechten Bewegungsfähigkeit niederschlägt. Das Wohlbefinden der Tiere war daher geringer als das von Hühnern, die unter 16L:8D und 2 - 8L:22 - 16D gezüchtet wurden. Darüber hinaus waren die unter Dauerlicht untergebrachteten Vögel ruhiger (etwa 40 % inaktiver) als die unter intermittierender Beleuchtung gehaltenen Tiere (Schwean-Lardner et al., 2012).

Derzeit wird angenommen, dass die Verwendung von intermittierender Beleuchtung signifikant das Auftreten von Beinproblemen bei Masthühnern und Puten reduziert. Weiterhin wurden lange Dunkelphasen mit einem besseren Gait Scoring und einer niedrigen Mortalität in Verbindung gebracht (Olanrewaju et al., 2006). Verschiedene Hypothesen wurden vorgeschlagen, um die zugrundeliegenden kausalen Mechanismen zu identifizieren:

a) Die hohe körperliche Aktivität bei intermittierender Beleuchtung kann die Entwicklung der Knochenstärke fördern und somit wird die Inzidenz von Lahmheiten verringert (Buyse et al., 1996).

b) Die Verlangsamung des frühen Wachstums durch das Lichtmanagement und/oder die Futterbeschränkung induziert eine vorübergehende Verringerung des Muskelwachstums, ohne die Entwicklung der Knochen zu betreffen. In diesem Fall erreicht das Skelett eine höhere Knochenfestigkeit, die besser das Gewicht der Muskelmasse tragen kann (Buyse et al., 1996).

c) Die dritte Hypothese bezieht sich auf die Beteiligung von Androgenen an der Knochenentwicklung (Buyse et al., 1996; Olanrewaju et al., 2006). Es wurde beobachtet, dass die Kastration von Puten mit einem hohen Auftreten von Beinproblemen in Verbindung gebracht werden kann, während eine Supplementierung mit 17α-Methyltestosteron den entgegengesetzten Effekt hat (Buyse et al., 1996; Pierson et al., 1981). Wenn männliche Masthühner unter einer zunehmenden Beleuchtungsdauer aufgezogen wurden, wurden höhere Plasma-Androgen-Konzentrationen erst im Alter von 7 Wochen beobachtet (Charles et al., 1992). In diesem Zusammenhang ist aufgrund der kurzen Lebensdauer von Masthühnern in den konventionellen Produktionssystemen die Beteiligung von Androgenen an der Knochenentwicklung wahrscheinlich irrelevant.

Daraus kann gefolgert werden, dass die hohe körperliche Aktivität bei intermittierender Beleuchtung eine Folge (oder eine Ursache) eines verbesserten Skelett-Gesundheitszustands ist, was sich in niedrigeren Werten des Gait scoring widerspiegelt (Prescott et al., 2004). Dieser Effekt kann ein Ergebnis der Verringerung des frühen Wachstums, der Zunahme der körperlichen Aktivität, der Steigerung des androgenen Hormonspiegels, der Änderungen am Stoffwechsel oder eine Verbindung aller dieser Faktoren sein (Classen & Riddell, 1989).

Kontaktdermatitis: Wissenschaftliche Untersuchungen bewiesen, dass die zunehmende lokomotorische Aktivität von Hühnern durch Verringerung der Besatzdichte und Verwendung einer natürlichen Photoperiode zu einer verminderten Inzidenz von Pododermatitis führte (Ferrante et al., 2006; Škrbić et al., 2015). Eine höhere körperliche Aktivität, die durch ein regelmäßigen Wechsel von Licht und Dunkelheit in einem intermittierenden Beleuchtungsprogramm verursacht wird, wird als wichtig für die Verbesserung der Beinstärke und die Verringerung der Fußprobleme angesehen (Škrbić et al., 2015). Darüber hinaus besteht ein Zusammenhang zwischen der Beinschwäche und der Inzidenz von Pododermatitis und der sogenannten „hock

burn“ (Sørensen et al., 1999; Su et al., 1999). Diesbezüglich stellten Škrbić et al. (2015) fest, dass die Exposition von Broilern gegenüber einem Beleuchtungsprogramm mit allmählicher Verlängerung der Photophase zu einem niedrigeren Durchschnittswert und einer niedrigeren Frequenz der schwersten Formen von Pododermatitis führt. Diese Autoren sahen als Ursache hierfür an, dass die Verlängerung der Photophase nach der anfänglichen Beschränkung des Lichts nicht in einem Block erfolgte, sondern in kurzen intermittierenden Intervallen, so dass dieses Beleuchtungsprogramm neben einer langen Photophase auch eine intermittierende Beleuchtung erzeugte, wodurch die körperliche Aktivität der Vögel gefördert wurde und dies zu einer besseren Fußgesundheit führte (Škrbić et al., 2015). Auch die Qualität der Einstreu ist ein wichtiger Faktor bei der Entwicklung von Pododermatitis und „hock burn“. Lichtinduzierte Veränderungen im Verhalten von Vögeln, wie Nahrungssuche und Scharren, können die Qualität der Einstreu verbessern und die Inzidenz von Pododermatitis verringern (Kristensen et al., 2006b). Dennoch wiesen Buyse et al. (1996) darauf hin, dass sowohl eine mangelhafte Gestaltung als auch eine unzureichende Anzahl von Tränke- und Fütterungsplätzen einen Effekt auf die Fußballengesundheit haben. In diesen Fällen kann die Steigerung des Futter- und Wasseraufnahmeverhaltens durch die Verwendung einer intermittierenden Beleuchtung die Inzidenz von Kontaktdermatitis erhöhen, da solche Verhaltensweisen verursachen, dass mehr Trinkwasser verschüttet und infolgedessen die Einstreu zunächst feuchter und nach dem Trocknen fester wird.

Verkratzungen: Die Inzidenz der Verkratzungen steht unter anderem in Beziehung zu dem motorischen Aktivitätsniveau (Gouveia et al., 2009). Da die körperliche Aktivität der Vögel während der Tageslichtstunden erhöht ist (Kristensen et al., 2004: 2006a), können längere Photophasen das Auftreten von Verkratzungen bei Geflügel erhöhen. Allerdings scheint dieses eher mit der Lichtintensität als mit der Dauer der Photophase zusammenzuhängen (Newberry et al., 1985). Ein wichtiger Aspekt hierbei ist die Art und Weise, wie der Übergang zwischen Photo- und Skotophase erfolgt. Wird das Licht plötzlich eingeschaltet, bewegen sich die Tiere schnell zu den Tränk- und Fütterungsanlagen, was Reibungen und Verletzungen zur Folge hat. Wird das Licht ausgeschaltet, so suchen die Vögel schnell einen Platz zum Schlafen, was zur Agglomeration und Reibungen zwischen den einzelnen Tieren führen kann. Eine erhöhte Inzidenz dieser Hautläsionen könnte durch das Einschalten einer Dämmerungsphase vermieden werden (Kristensen, 2008).

2.5.3 Wellenlänge in der Wirtschaftsgeflügelhaltung und deren Auswirkungen auf die Masthühnerproduktion und den Tierschutz

Das Haushuhn, und dementsprechend auch das Masthuhn, stammt aus dem dichten Dschungel Asiens, dessen Lichtumgebung von einer grünen Vegetationsabdeckung beherrscht wird. Daher hat sich sein visuelles System in anderen Lichtverhältnissen entwickelt als sie in Geflügelställen vorherrschen. Die spektrale Verteilung des Schattenlichtes innerhalb eines Waldes wird durch eine maximale Bestrahlung charakterisiert, die mit einer maximalen Transmission von Chlorophyll bei etwa 550 nm verbunden ist (Bowmaker & Knowles, 1977). Die künstliche Beleuchtung in der Geflügelhaltung ist häufig von anderer Qualität als natürliches Licht, da die spektrale Verteilung der meisten üblichen Lichtquellen Energiespitzen in unterschiedlichen Bereichen zeigen (Korbel, 2010; Prescott et al., 2004; Siehe Abbildung 7). Sie weisen daher einen ungeeigneten spektralen Output oder eine unzureichende Lichtintensität auf (Lewis & Morris, 2000; Nuboer et al., 1992; Prescott et al., 2004; Prescott & Wathes, 1999a; 1999b).

Die spektrale Zusammensetzung und die entsprechende Farbe des künstlichen Lichts hängen von der Herstellung und Funktionsweise der Leuchtmittel ab (Lewis & Morris, 1998). Derzeit stehen fünf Leuchtmitteltypen für die Geflügelindustrie zur Verfügung: Glühlampen, Leuchtstofflampen, Halogen-Metalldampflampen, Natriumdampf-Hochdrucklampen (Korbel & Sturm, 2005; Olanrewaju et al., 2006) und Light Emitting Diodes (LED)-Leuchtmittel (Korbel, 2010; Parvin et al., 2014), deren spektrale Emissionen erheblich unterschiedlich sein können (Lewis & Morris, 1998). Die ausgesendeten Lichtfarben reizen die Netzhaut und den Hypothalamus auf unterschiedliche Weise, so dass bestimmte Verhaltensänderungen beeinflusst werden, welche ihrerseits das Wachstum, Produktionsniveau und Gesundheit der Vögel beeinflussen (Akyüz & Onbaşilar, 2018; Lewis & Morris, 2000). Trotz der weitreichenden Literatur zu diesem Thema ist es aufgrund der mehrdeutigen Beeinflussung der Farbe und der Lichtintensität schwierig, die genaue Wirkung des Lichts zu bestimmen. Zudem wird häufig keine Beschreibung der spektralen Zusammensetzung des verwendeten Lichts gegeben (Lewis & Morris, 1998; 2000).

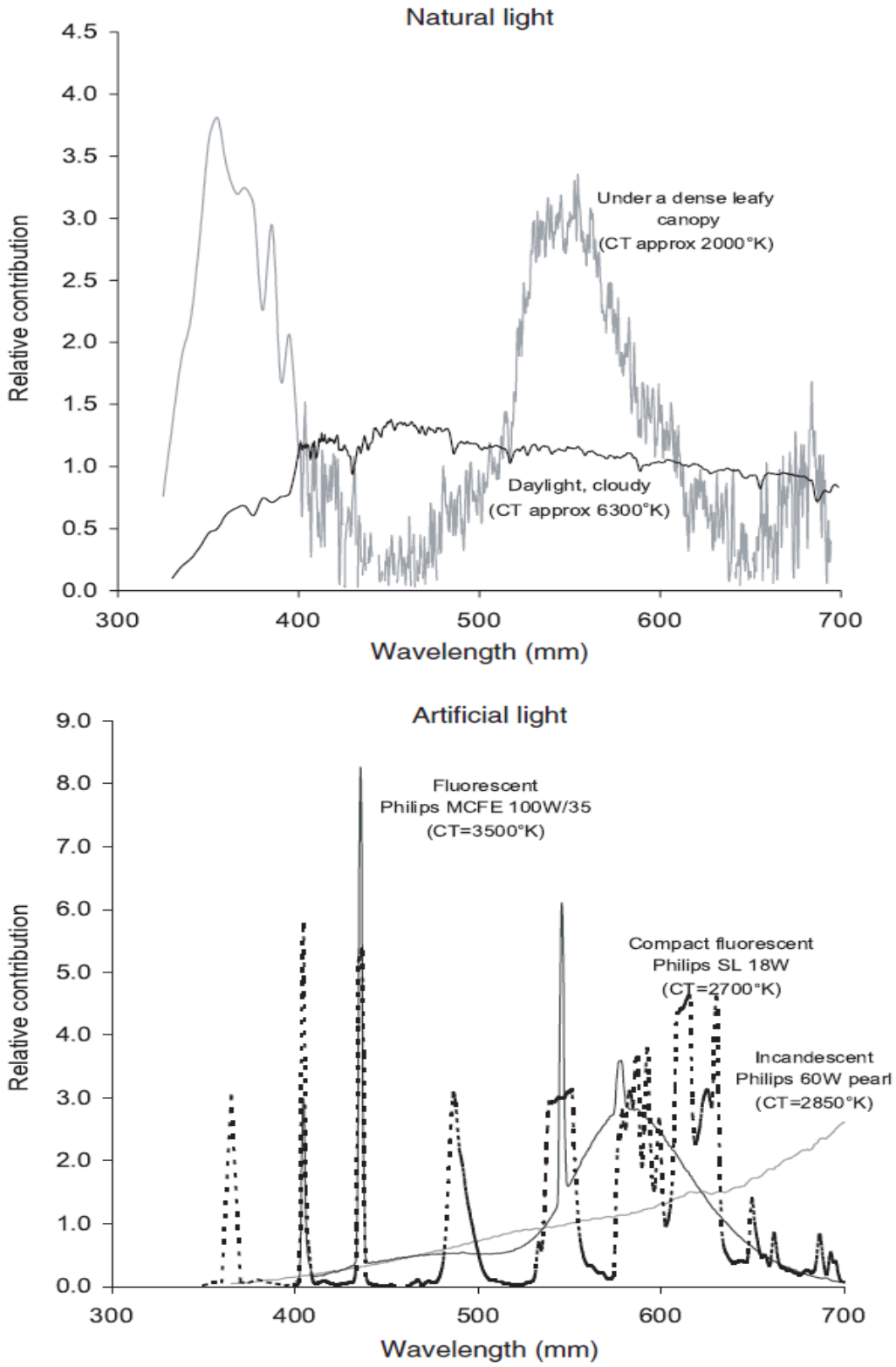

Abbildung 7: Lichtspektrum von natürlichen und künstlichen Lichtquellen (Prescott et al., 2004).

2.5.3.1 Wellenlänge und Produktionsparameter

Futteraufnahme: Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass bestimmte Nahrungsmittel, die von Vögeln unter freien Lebensbedingungen verzehrt werden (wie Insekten, Samen und Früchte), UV-Licht zurückstrahlen. Vögel können diese reflektierenden Eigenschaften von Nahrungsmitteln bei der Futtersuche wahrnehmen (Burkhardt, 1982; Viitala et al., 1995). Allerdings wurden bisher nur wenige Studien hinsichtlich dieser Fähigkeit in Bezug auf die industrielle Geflügelproduktion und Kunstlichtbedingungen durchgeführt. Prescott und Wathes (1999a) fanden heraus, dass ein pelletiertes Mischfuttermitteln für Geflügel und Vollkorn-Gerste ausreichendes UV-A-Licht reflektieren, sodass sie von Vögeln visuell wahrgenommen werden. Wie stark dies die Nahrungssuche beeinflusst, ist unklar, weil die bei künstlicher Beleuchtung verwendete Lichtintensität in Geflügelställen sehr gering ist oder ihre spektralen Eigenschaften ungeeignet sind (Prescott & Wathes, 1999a).

In einer Untersuchung von Wathes et al. (1982) über die Auswirkungen von farbigem Licht und der Lichtintensität auf bestimmte Produktionsindikatoren von Masthühnern wurde geschlossen, dass sich die Wellenlänge nicht auf die Futteraufnahme auswirkt. Prayitno et al. (1997a) zeigten zudem, dass je nach Geschlecht der Masthühner ein Effekt der Wellenlänge auf die Dauer der Futteraufnahme besteht. Die Zeit, die von männlichen Tieren mit Futteraufnahme verbrachtet wurde, stieg unter grünem und blauem Licht im Vergleich zu rotem und weißem Licht an, während bei weiblichen Vögeln die für die Futteraufnahme verwendete Zeit unter weißem und rotem Licht anstieg. Die Autoren vermuteten, dass die hohe Aktivität, die von den männlichen Vögeln unter weißem und rotem Licht festgestellt wurde, eher auf ein erhöhtes interaktives Verhalten mit anderen Vögeln und mit der Umwelt als auf eine längere Futter- und Wasseraufnahme zurückzuführen ist (Prayitno et al., 1997a).

Körpermasse: Die spektrale Zusammensetzung des Lichts beeinflusst die Entwicklung der Vögel bereits während der Embryogenese. Zhang et al. (2012) fanden heraus, dass Hühner aus Eiern, die unter grünem Licht (15 Lux) inkubiert wurden, und die nach Schlupf unter weißem Licht (30 Lux) gezüchtet wurden, eine schwerere Pektoralismuskulatur und eine bessere Futterverwertung erreichten. Diese Lichtbedingungen könnten eine stimulierende Wirkung auf die Proliferation von Myoblasten haben und eine Änderung der Konformation der Myofibrillen erzeugen (Cao et al., 2008, 2012; Halevy et al., 2006). Aber auch nach Abschluss der Embryogenese ist die spektrale Zusammensetzung des Lichts von Relevanz. Cao et al. (2008) fanden heraus, dass Masthühner, die während der Wachstums- und Mastperiode bei einer Kombination aus blauem und grünem Licht (15 Lux) gezüchtet wurden, eine höhere Mastendmasse sowie eine höhere Entwicklung des Brustmuskels erreichten. Diese Ergebnisse ähneln

denen von Rozenboim et al. (1999), die beobachteten, dass unter grünem und blauem Licht gehaltene Küken nach 35 Masttagen schwerer waren als unter weißem Licht gezüchtete. In dieser Untersuchung von Rozenboim et al. (1999) wurde bei den monochromatischen weißen LED-Lampen und Glühlampen die gleiche Bestrahlungsstärke des Lichts (0,1 W/m^2), gemessen auf Kopfhöhe der Vögel, verwendet. Allerdings nahmen die Hühner diese Intensität bei 480 nm, 560 nm, 660 nm und weißem Licht unterschiedlich, und zwar als 56, 68, 15 beziehungsweise 26 C-Lux wahr. Daraus ergab sich, dass die höchsten Körpermassenzunahme bei den Wellenlängen nachgewiesen wurden, welche die Hühner als am hellsten wahrgenommen hatten (480 und 560 nm). In Verbindung mit der Kenntnis, dass bei weißem Licht eine hohe Intensität eine niedrige Körpermasse erzeugt, wurden diese Ergebnisse später so interpretiert, dass die beobachtete Erhöhung der Körpermassen in erster Linie eine Reaktion auf die Wellenlänge und nicht auf die Lichtintensität war (Lewis & Morris, 2000).

Im Allgemeinen wird angenommen, dass grünes Licht das Muskelwachstum in einem frühen Alter aufgrund der in den ersten Lebenstagen stärkeren Vermehrung von Satellitenzellen fördert (Cao et al., 2008; Halevy et al., 1998; 2006), während die Auswirkung der Wellenlängen in späteren Altersgruppen etwas unklar ist. Rozenboim et al. (1999) und Cao et al. (2008) beobachteten, dass das Wachstum durch blaues Licht, jedoch nicht durch weißes und rotes Licht stimuliert wurde. Lewis und Morris (2000) behaupten jedoch, dass die Körpermasse von den längeren Wellenlängen (die in weißem und rotem Licht enthalten sind) unterdrückt wurde, statt von den kürzeren Wellenlängen stimuliert zu werden. Nach diesen Autoren trifft diese Hypothese auch für Fälle zu, bei denen keine signifikanten Unterschiede in der Körpermassenentwicklung der Vögel unter verschiedenen Lichtfarben dokumentiert wurden. In diesen Fällen wurden demnach kommerzielle Lichtquellen verwendet, die nicht vollständig monochromatisch sind, sodass die bei blauem und grünen Licht erwartete höchste Körpermasse durch anwesende lange Wellenlängen annulliert wurde.

Futterverwertung: Im Allgemeinen wird die Futterverwertung nicht signifikant von der Wellenlänge beeinflusst, wenn Masthühner bis zu einem Alter von 42 - 70 Tagen gehalten werden (Lewis & Morris, 1998). Es wurde jedoch bei anderen Geflügelarten eine signifikante Auswirkung auf die FV beobachtet. Bei 16 – 18 Wochen alten Puten wurde eine geringere Futterverwertung unter rotem Licht festgestellt im Vergleich zum blauen Licht, was auf die sexuelle Reife und Steigerung des Plasmaspiegels von Steroidhormonen zurückzuführen sein könnte (Lewis & Morris, 2000). Die Messung dieser Wirkung ist jedoch schwierig, weil das Gonadenwachstum stark von der Lichtinformation von der Netzhaut und dem Hypothalamus sowie von einer unterschiedlichen Empfindlichkeit der retinalen und hypothalamischen Photorezeptoren gegenüber verschiedenen Wellenlängen beeinflusst wird (Lewis & Morris, 2000). Auch wenn

bei Masthühnern ein Effekt der roten Wellenlängen auf die Plasmakonzentration von Steroidhormonen festgestellt wurden, wurde in mehreren Studien kein signifikanter Unterschied in der Futterverwertung bei Verwendung von rotem, grünem und weißem Licht nachgewiesen (Andrews & Zimmermann, 1990; Cherry & Barwick, 1962; Hulan et al., 1987; Lewis & Morris, 1998; Rozenboim et al., 1999; Scheideler, 1990).

Mortalität: Untersuchungen zeigten, dass die Wellenlänge die Mortalitätsraten bei Masthühnern nicht signifikant beeinflusste, wenn die Beleuchtung auf die wahrnehmbare Lichtstärke von Vögeln (C-Lux) eingestellt wurde. Kristensen et al. (2006b) berichteten, dass die Lichtumgebung unter Verwendung von zwei Lichtquellen (Osram biolux und Osram warm-Weißlicht) und zwei Lichtintensitäten (5 und 100 C-Lux) die Mortalität nicht beeinflusste. Darüber hinaus ergaben andere Untersuchungen, dass die Wellenlänge die Mortalitätsrate bei Geflügel nicht wesentlich beeinflusst, wenn die Beleuchtung für die Lichtintensität (Lux) oder die Bestrahlung (W/m^2) gleichgesetzt wurde (Levenick & Leighton, 1988; Webeck & Skoglund, 1974). Ähnliche Ergebnisse wurden von Wathes et al. (1982) dokumentiert, die farbige kommerzielle Lampen, welche in ihrer spektralen Zusammensetzung nicht monochromatisch waren, in ihren Versuchen verwendeten. Daher scheint es keinen spezifischen Effekt der Wellenlänge auf die Mortalität zu geben.

2.5.3.2 Wellenlänge und Tierschutzparameter

Beingesundheit und Motorische Aktivität: Eine der am meisten beachteten Wirkungen von Licht verschiedener Farben auf das Verhalten von Geflügel ist die allgemeine Aktivität und Bewegung (Lewis & Morris, 2000).

Die Verteilung der Emissionswellenlänge variiert zwischen verschiedenen Leuchtmitteln. Keine der derzeit verwendeten Leuchtstofflampen emittiert eine nennenswerte Menge an UV-Licht (320 - 400 nm). Die Strahlung von Glühlampen enthält zwar eine reichliche Menge an roten Wellen, jedoch ebenfalls fast kein UV- und Blaulicht (Prescott et al., 2004). Beim Vergleich dieser beiden Leuchtmittel stellten (Boshouwers & Nicaise, 1993) fest, dass Legehennen bei niedrigen Lichtintensitäten eine ähnliche körperliche Aktivität aufwiesen. Bei hohen Lichtintensitäten war die Aktivität jedoch unter Verwendung von Leuchtstofflampen deutlich höher als bei Glühlampen, so dass anzunehmen ist, dass Hühner qualitative Lichtunterschiede wahrnehmen können. Es wurde vorgeschlagen, dass die Stimulation der Aktivität unter Fluoreszenzlicht durch den Unterschied in der spektralen Zusammensetzung des Lichts an sich hervorgerufen sein könnte oder dass sie durch eine scheinbar höhere Lichtintensität, die durch die spektrale Empfindlichkeit des Huhnes

bedingt wird, beeinflusst wird (Lewis & Morris, 2000). Weiterhin wurde festgestellt, dass die UV-Lichtexposition in frühen Lebensphasen der Mastküken die Inzidenz von Lahmheiten während der Wachstumsperiode verringert (Prayitno et al., 1997b). Dies könnte mit der Wirkung von UV-Licht auf die Knochenentwicklung durch Umwandlung von Vitamin D in der Haut zusammenhängen. Jedoch sind weitere Untersuchungen nötig, um die Beziehung zwischen UV-Licht und Synthese von Vitamin D in Broilern besser charakterisieren zu können (Kristensen et al., 2006b).

Kontaktdermatitis: Die Wellenlängen des Lichts beeinflusst wahrscheinlich die Inzidenz von Kontaktdermatitis bei Masthühnern über Verhaltensänderungen, die zu einem erhöhten Kontakt der Haut mit der Einstreu führen. Kristensen et al. (2006b) vermuteten, dass die Dauer bestimmter Aktivitäten mit Einfluss auf die Einstreuqualität (wie Ruhen, Futtersuche und Scharren) durch die Wellenlänge beeinflusst werden können. Als wichtigste Einflussfaktoren auf die Inzidenz der Pododermatitis und „hock burn“ beim Geflügel wurden der Verdichtungsgrad, die Feuchtigkeit und die Ammonium-Konzentration in der Luft genannt (Haslam et al., 2007).

Kristensen et al. (2006b) berichten, dass die Lichtquelle die Inzidenz von Pododermatitis je nach Körpermasse unterschiedlich beeinflusste. Die leichten Vögel (mit einer Körpermasse von unter 2400 g) wiesen unter Biolux-Lampen eine niedrigere Pododermatitis-Punktzahl auf als unter warmweißem Licht. Im Gegensatz hierzu schien Biolux-Licht das Risiko für eine geringgradige Pododermatitis bei Individuen mit einer Körpermasse von mehr als 2400 g zu erhöhen. In derselben Studie kommen Kristensen et al. (2006b) zu dem Schluss, dass eine höhere Körpermasse das Risiko für eine größere Hock-Burn-Punktzahl erhöht, während eine geringere Körpermasse das Risiko für eine niedrige Hock-Burn-Punktzahl erhöhte.

Verkratzungen: Eine spezifische Beziehung zwischen der spektralen Zusammensetzung des Lichts und dem Auftreten von Verkratzungen wurde bislang nicht festgestellt. Es wurde jedoch beobachtet, dass rote Wellenlängen die motorische Aktivität der Vögel eher stimulieren (Lewis & Morris, 2000), was sich zusammen mit anderen Umwelt-, Genetik- und Managementvariablen auf die Entstehung von Verkratzungen in der Vogelgruppen auswirken könnte (Gouveia et al., 2009). Jedoch sind weitere Untersuchungen notwendig, um die Wirkung der Wellenlänge auf die Inzidenz von Verkratzungen ermitteln.

2.5.4 Lichtintensität in der Wirtschaftsgeflügelhaltung und deren Auswirkungen auf die Masthühnerproduktion und den Tierschutz

Die Lichtintensität weist bei natürlichen Lichtverhältnissen eine zyklische Variation zwischen Tag und Nacht auf. Die Lichtintensität ist tagsüber hoch und während der Nacht normalerweise niedrig. In künstlich beleuchteten Geflügelställen kann die Dauer der relativ hohen Lichtintensität (Tag) sehr lang sein. Der Kontrast zwischen Tag und Nacht ist aufgrund der niedrigen verwendeten Lichtintensität in der Geflügelindustrie im Allgemeinen jedoch gering. Dieser geringe Kontrast zwischen Photo- und Skotophase kann den normalen zirkadianen Rhythmus beeinflussen und eine Reihe physiologischer Veränderungen verursachen (Blatchford et al., 2012). Außerdem sind in der Natur - im Gegensatz zu der gleichmäßigen Beleuchtung in Geflügelställen - räumliche Schwankungen der Lichtintensität vorhanden, sodass eine abwechslungsreiche photopische Umgebung vorherrscht (Kristensen et al., 2006a). Im Geflügelstall kann jedoch eine räumlich heterogene Beleuchtung an bestimmten Stellen eine hohe Besatzdichte verursachen (Newberry et al., 1985), die für die Einstreuqualität schädlich ist oder zu Verkratzungen führen kann (Dozier et al., 2005; Haslam et al., 2007; Kristensen et al., 2006a; Shepherd & Fairchild, 2010). Aus diesem Grund sind Variationen in der Lichtintensität als tierschutzrelevant zu bezeichnen.

In der Regel werden Mastküken während ihrer ersten Lebenswoche unter hoher Lichtintensität gehalten, gefolgt von unterschiedlichen Lichtintensitätsniveaus, die in der intensiven Geflügelindustrie normalerweise ca. 20 Lux betragen (Olanrewaju et al., 2006). Wenn die Lichtintensität nach der ersten Lebenswoche der Aufzucht Variationen aufweist, wird diese Regime als diskontinuierliches Lichtintensitätsprogramm bezeichnet. Demgegenüber bleibt die Lichtintensität bei einem konstanten Lichtintensitätsprogramm nach der ersten Mastwoche unverändert auf einem gleichen Wert (Schneeganß, 2018).

Die Lichtintensität ist ein wichtiger Managementfaktor für die Geflügelindustrie, welcher das Wachstum und das Verhalten der Masthühner durch die Modulation verschiedener physiologischer Prozesse regulieren kann (Korbel, 2007; Apeldoorn et al., 1999; Kristensen et al., 2004; Lewis & Morris, 1998; Olanrewaju et al., 2006). Trotz der umfangreichen Forschung zu diesem Thema steht die optimale Beleuchtungsstärke in der intensiven Geflügelhaltung derzeit noch zur Diskussion. Nur wenige Studien zeigten bisher signifikante Auswirkungen auf die Produktion, wobei hier in der Regel die schädlichen Auswirkungen von geringer Lichtintensität auf die Produktion und den Tierschutz dargestellt wurden (Deep et al., 2010; 2013; Lien et al., 2007; Newberry et al., 1988). Es ist möglich, dass der scheinbare Mangel an Interaktion zwischen der Lichtintensität und den Produktionsparametern in

früheren Untersuchungen an der Verwechslung der Wirkung der Lichtintensität und der Wellenlängen liegt (Lewis & Morris, 2000). Wenn keine spektralen Eigenschaften des Lichts oder keine Angaben über die Art der verwendeten Lampen gegeben wurden, ist es eigentlich nicht möglich, die Ergebnisse verschiedener Studien miteinander zu vergleichen, da die wahrnehmbare Lichtintensität mit der spektralen Verteilung des Lichtes zusammenhängt (Nuboer et al., 1992; Prescott & Wathes, 1999b). Trotz dieser Unstimmigkeit wurde die alternative photometrische Einheit, von Nuboer et al. (1992) und Prescott und Wathes (1999b) als "Gallilux" oder "C-Lux" bezeichnet, bisher selten verwendet (Kristensen et al., 2007; Kristensen et al., 2006b; Weise, 2007). Daher wird die Lichtintensität bei der folgenden Literaturübersicht meistens in der Einheit Lux dargestellt, weil bei einigen der zitierten Studien keine genaue Information über die spektrale Zusammensetzung des Lichts zur Verfügung steht.

Lichtprogramme mit sehr niedrigen Lichtintensitäten von 3 - 5 Lux können zur Ausprägung eines sogenannten lichtinduzierten aviären Glaukoms (LIAG) sowie Buphthalmus führen (Lauber et al., 1961; Lauber & Kinnear, 1979; Lauber, 1987). Derartige Programme mit Induktion spezifischer Augenveränderungen bei Hühnern und Wachteln wurden in den 70er und 80er Jahren als Tiermodelle zur Erforschung des Glaukoms des menschlichen Auges verwendet. Die Auswirkungen von derartigen Lichtprogrammen auf verschiedene okulare Strukturen sowie ihre Interpretation im Hinblick auf das Tierwohl und Tierschutzaspekte sind seit einigen Jahren Gegenstand von Untersuchungen an der Klinik für Vögel, Kleinsäuger, Repitlien und Zierfische der LMU München, mittels sog. Optischer Kohärenztomographie (OCT), einem Verfahren, mit dessen Hilfe auf nahezu histologischer Ebene am lebenden Tier Verlaufsuntersuchungen im Hinblick auf lichtbedingte Einflüsse auf verschiedene okuare Strukturen, u. a. der Netzhaut, untersucht werden können (Korbel & Sigg, 2015a; 2015b; Schneeganß, 2018).

2.5.4.1 Lichtintensität und Produktionsparameter

Futteraufnahme: Die Suche, Auswahl und Manipulation von Nahrungsmitteln vor der oralen Aufnahme sind Verhaltensweisen, die bei den meisten Vögeln stark von ihrer visuellen Wahrnehmung abhängen. Aus diesem Grund ist es in der Geflügelindustrie üblich, eine kontinuierliche Beleuchtung und hohe Lichtintensitäten während der ersten Tage nach dem Einstallen der Mastküken zu verwenden (ca. 7 – 10 Tage). Dies soll sicherstellen, dass sich die Küken gut an die neue Umgebung akklimatisieren und optimale Mengen an Futter und Wasser aufnehmen. Anschließend wird eine Beschränkung der Intensität und Dauer des Lichts für die verbleibende Mastperiode implementiert

(Olanrewaju et al., 2006). Verschiedene Studien versuchten die Beleuchtungsstärke zu bewerten, die für das normale Verhalten erforderlich oder bevorzugt ist. Präferenzstudien bei Masthühnern und Puten zeigten, dass diese Vögel die Futteraufnahme unter helleren Beleuchtungen vorziehen (Davis et al. 1999). Die Motivation von Geflügel zur Futteraufnahme und Trinken unter verschiedenen Beleuchtungsstärken wurde auch von Prescott und Wathes (2002) untersucht. Diese Untersuchung zeigte, dass Hühner bei 200 Lux eine höhere Futteraufnahme aufwiesen als Hühner, die bei 5 Lux gefüttert wurden. Newberry et al. (1986) führten zwei Experimente unter Verwendung von 0,5, 10, 20, 30 Lux und 0,1, 10, 100 Lux durch. Dabei war kein Einfluss der Lichtintensität auf die Körpermasse zu erkennen. Jedoch stieg die Futteraufnahme bei 6 und 9 Wochen alten Tieren unter hoher Lichtintensität an. Darüber hinaus dokumentierten Deep et al. (2010) eine Abnahme der Futteraufnahme zwischen dem 7 und 14 Aufzuchttag bei Vögeln, die unter 1 Lux gehalten wurden. Es handelte sich hierbei jedoch um eine vorübergehende Wirkung, die nicht die Futteraufnahme der gesamten Mastperiode (Tag 0 - 35) betraf. Bei einer nachfolgenden Studie berichteten Deep et al. (2013), dass sich die Futteraufnahme zwischen den Tagen 7 - 14 der Aufzucht linear mit der Zunahme der Lichtintensität (von 0,1 bis 10 Lux) erhöhte und am niedrigsten bei 0,5 Lux war.

Abschließend kann gefolgert werden, dass Hühner ihr Futteraufnahmeverhalten je nach der Beleuchtungsstärke ändern, wobei die Bereitschaft hierzu mit steigender Lichtintensität zunimmt. Darüber hinaus wird im Allgemeinen die Menge des Futterverbrauches unter den Lichtintensitäten, wie sie üblicherweise von der Geflügelindustrie verwendet werden, wesentlich beeinflusst.

Körpermasse: Die Lichtintensität ist ein wichtiger Managementfaktor, der die Hähnchenmast und das Wohlbefinden beeinflusst. Trotz der erheblichen Forschung über die Auswirkungen der Lichtintensität ist die optimale Beleuchtungsstärke noch Gegenstand der Diskussion in der Geflügelproduktion.

Im Gegensatz zur üblichen Hypothese, dass helle Beleuchtungen die Mastleistung aufgrund einer erhöhten Aktivität reduzieren, wird berichtet, dass sich die Körpermasse von Masthühnern bei höheren Beleuchtungsstärken nur geringfügig verringerte oder keine Reaktion auf die Beleuchtungsstärke zu erkennen ist (Blatchford et al., 2009; Deep et al., 2010; Lien et al., 2007; Newberry et al., 1988; Olanrewaju et al., 2012). Deep et al. (2010) verglichen die Mastergebnisse bei vier verschiedenen Lichtintensitäten (1, 10, 20 und 40 Lux). Die Ergebnisse zeigten, dass die Körpermasse von der Lichtintensität bei 35 Tagen Mast unbeeinflusst blieb. Trotzdem verringerte sich die Masse der Karkassen linear mit der Zunahme der Lichtintensität. Ahmad et al. (2011) konnten ebenfalls keinen Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Lichtintensitäten und der Körpermasse nachweisen. Wathes et al. (1982)

beobachteten, dass das Wachstum der männlichen Masthähnchen durch die Beleuchtungsstärke unbeeinflusst blieb, während das Wachstum der weiblichen Tiere von Beleuchtungen über 3 Lux schrittweise verringert wurde. Demgegenüber zeigten andere Untersuchungen, dass die Lichtintensität auf die Körpermasse einwirkt. Charles et al. (1992) verglichen die Mastergebnisse bei zwei Lichtintensitäten (5 Lux und 150 Lux). Die Ergebnisse zeigten, dass die Mastendmasse der Vögel bei 56 Tagen Mast unter 5 Lux signifikant höher war. Außerdem hatten die Vögel unter 150 Lux eine abweichende Zusammensetzung der Karkassen. Sie wiesen einen geringeren Anteil an Körperfett und einen höheren Anteil an Protein als die bei 5 Lux gehaltenen Hühner auf. Zudem waren die abdominalen Fettpolster geringer ausgeprägt. Dies deutet darauf hin, dass eine erhöhte Aktivität von Masthühnern bei der hohen Lichtintensität (150 Lux) für den verminderten Karkassenfettgehalt und das verminderte Abdominalfett verantwortlich sein könnte.

Im Allgemeinen bleibt die Körpermasse von Lichtintensitäten zwischen 5 und 200 Lux unbeeinflusst (Blatchford et al., 2009; Deep et al., 2010; Kristensen et al., 2006b; Lien et al., 2007; Newberry et al., 1988; Olanrewaju et al., 2015). Jedoch wurden negative Effekte bei geringen Lichtintensitäten (< 5 Lux) beobachtet. Diese negativen Effekte umfassten eine niedrigere frühe Homogenität der Körpermasse der Herde, eine verringerte Karkassen- und Fleischausbeute, eine hohe Mortalität und eine niedrige Wachstumsrate (Deep et al., 2013; Lien et al., 2007).

Die oben genannten Versuchsergebnisse lassen darauf schließen, dass die Körpermasse von der Lichtintensität nicht signifikant beeinflusst wird, jedoch ändert sich die Zusammensetzung der Karkassen und die Fleischausbeute.

Futterverwertung: Studien über die Wirkung der Lichtintensität auf die Futterverwertung bei Geflügel zeigen widersprüchliche Ergebnisse. Einige Autoren berichteten, dass eine Verringerung der Lichtintensität die Futterverwertung verbesserte. Deaton et al. (1976) kamen zu dem Ergebnis, dass Vögel, die unter 204,5 Lux gehalten wurden, eine signifikant niedrigere Futterverwertung im Vergleich zu jenen aufwiesen, die unter 12,9 Lux gehalten wurden. Andererseits zeigten Siopes et al., (1984), dass eine sehr niedrige Lichtintensität (1,1 Lux) die Futteraufnahme und Futterverwertung negativ beeinflusst, jedoch konnten keine Auswirkungen anderer verwendeter Lichtintensitäten (11, 110 und 220 Lux) auf die Futterverwertung bestätigt werden. In ähnlicher Weise stellten Deep et al. (2013) fest, dass zwischen 0,1 und 10 Lux die Zunahme der Lichtintensität zu einer Verbesserung der Futterverwertung in quadratischer Form führte. Andere Studien zeigten keinen Einfluss der Lichtintensität auf die Futterverwertung bei Masthühnern. Newberry et al. (1988) fanden heraus, dass männliche und weibliche Masthühner ähnlich auf die Lichtintensität reagierten. Bei diesem Versuch zeigten beide

Geschlechter eine höhere Aktivität unter hellem (180 Lux) gegenüber dunklerem (6 Lux) Licht. Es ergab sich jedoch kein Unterschied bei der Futterverwertung oder anderen Leistungsmerkmalen zwischen 6 und 180 Lux, was darauf hindeutet, dass die erhöhte Aktivität in den helleren Umgebungen nicht den Energiebedarf der Vögel signifikant erhöht (Newberry et al., 1988). Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen Deep et al. (2010), die die Mastergebnisse bei vier verschiedenen Lichtintensitäten (1, 10, 20 und 40 Lux) verglichen. Bei diesem Versuch wurde berichtet, dass die Futterverwertung bei einer Aufzucht von 35 Tagen von der Lichtintensität unbeeinflusst blieb. In ähnlicher Weise konnten Olanrewaju et al. (2012) keinen Unterschied bei der Futterverwertung von Vögeln unter 10, 5, und 0,5 Lux feststellen.

Im Allgemeinen ist aus den Ergebnissen zu erkennen, dass die Lichtintensität keinen konstanten Effekt auf die Futterverwertung aufweist. Es ist möglich, dass diesbezüglich andere Faktoren des Lichtsprogramms, wie die Photoperiode und Ernährungsfaktoren, eine größere Wirkung besitzen.

Mortalität: Daten über die Mortalitätsrate von Geflügel unter verschiedenen Lichtintensitäten sind nicht eindeutig. Mehrere Studien belegten, dass die Lichtintensität keine signifikanten Auswirkungen auf die Mortalität von Masthühnern hatte (Charles et al., 1992; Deep et al., 2013; 2010; Lien et al., 2008; Newberry et al., 1988). Newberry et al. (1988) kamen zu dem Schluss, dass die Lebensfähigkeit der Vögel bei Lichtintensitäten zwischen 6 und 180 Lux bis zu einem Alter von 9 Wochen nicht beeinträchtigt wurde. In einem zweiten Versuch unter Verwendung der gleichen Lichtintensitäten, jedoch einem Alter von bis zu 6 Wochen, war die Mortalität bei 6 Lux höher. Newberry et al. (1988) fanden keine offensichtlichen Gründe dafür, jedoch wurde eine Abnahme der Futter- und Wasseraufnahme in Betracht gezogen. Siopes et al. (1984) beobachteten ebenfalls eine höhere Mortalität bei einer geringeren Beleuchtungsstärke (1,1 Lux) im Vergleich zu 11 Lux. Jedoch konnten sie dies auf die Tatsache zurückführen, dass die Vögel nicht in der Lage waren, Futter und Wasser zu finden. Deep et al. (2010) verglichen die Mastergebnisse bei vier verschiedenen Lichtintensitäten (1, 10, 20 und 40 Lux) und fanden heraus, dass die Mortalität bei einer Aufzucht von 35 Tagen unbeeinflusst blieb. In einer zweiten Studie beobachteten Deep et al. (2013), dass die Mortalität und ihre spezifischen Ursachen bei Vögeln, die unter 0,5, 1 und 10 Lux gehalten wurden, nicht von der Lichtintensität beeinflusst wurden. Allerdings brachen Deep et al. (2013) in der gleichen Untersuchung den ursprünglichen experimentellen Versuchsaufbau (0,1, 1, 5, 10 Lux) wegen der hohen Mortalität und der geringen Körpermassenentwiklung während der ersten Woche nach der Anwendung von 0,1 Lux ab.

Nach der Schlussfolgerung von Deep et al. (2013) wirkt sich 0,1 Lux negativ auf das Wachstum und die Lebensfähigkeit der Vögel aus. Darüber hinaus hat die

niedrige Lichtintensität (0,5 – 1 Lux) einen negativen Effekt auf die Produktion, jedoch ist hierbei die Mortalitätsrate nicht betroffen. Daher sollte eine Lichtintensität von mindestens 5 Lux nach der ersten Woche aufrechterhalten werden (Deep et al., 2013).

2.5.4.2 Lichtintensität und Tierschutzparameter

Beingesundheit und motorische Aktivität: Die Lichtintensität wirkt sich auf das Verhalten der Masthühner aus, in dem sie ihre Sehschärfe verändert (Kristensen et al 2002). Verschiedene Versuchsergebnisse ergaben Hinweise darauf, dass eine hohe Lichtintensität in der Regel die motorische Aktivität erhöht, während eine niedrige Lichtstärke diese reduziert (Boshouwers & Nicaise, 1987; Kristensen et al., 2004; 2006a; Newberry et al., 1985).

Newberry et al. (1985) führten einen freien Auswahlversuch durch, in dem verschiedene Zonen mit diskontinuierlicher Lichtintensität angeboten wurden. Die Tiere zeigten daraufhin eine höhere Aktivität in einem Bereich von 6 - 12 Lux als bei 0,5 Lux. Es wurde auch beobachtet, dass sowohl die körperliche Aktivität als auch der Energieaufwand der Vögel progressiv als Reaktion auf eine Beleuchtungsstärke zwischen 1 und 120 Lux zunahm (Boshouwers & Nicaise, 1987). In einer Untersuchung von Newberry et al. (1988) zeigte sich bei Vergleich von zwei Stufen der Lichtintensität (6 und 180 Lux), dass Masthühner bei 180 Lux aktiver waren und weniger Beinprobleme aufwiesen. Kristensen et al. (2006b) berichteten unter Verwendung der Lichtintensität nach der Helligkeitswahrnehmug des Huhnes, dass Hühner bei einer Lichtintensität von 100 C-Lux im Vergleich zu 5 C-Lux länger stehen blieben. Außerdem konnten Deep et al. (2010) zeigen, dass eine Lichtintensität von 1, 10, 20 und 40 Lux keinen Effekt auf die Skelettentwicklung aufwiesen, jedoch verringerten sich die Läsionen am Fußballen linear mit der Zunahme der Lichtintensität, was in Beziehung zu einer höheren körperlichen Aktivität stehen kann (Prescott et al., 2004).

Auch das Komfortverhalten, also Verhaltensweisen, die von den Tieren gezeigt werden, wenn alle Grundbedürfnisse des Huhns ausreichend befriedigt sind (wie Putzverhalten, Flattern, Scharren und Staubbaden), scheinen durch die Lichtintensität beeinflusst zu werden. Masthühner, die unter 5 Lux gehalten wurden, zeigten ein vermindertes Putz- und Fressverhalten (Alvino et al., 2009).

Kontaktdermatitis: Kontaktdermatitis steht in direkter Beziehung mit der Einstreuqualität und dem Verhalten der Hühner. In diesem Zusammenhang wurde beobachtet, dass die Lichtintensität Verhaltensänderungen verursacht, wodurch sich die Kontaktzeit zwischen der Haut der Vögel und der Einstreu

ändert (Kristensen et al., 2004; 2006b). Jedoch kann die Korrelation dieser Hautveränderungen mit der Einstreuqualität variieren (Greene et al., 1985), da es möglich ist, dass Pododermatitis und „hock burn“ durch unterschiedliche Verhaltensweisen der Vögel verursacht werden, was zu verschiedenen Kontaktstellen mit der Einstreu führt (Kristensen et al., 2006b).

Blatchford et al.(2009) fanden eine erhöhte Prävalenz von „hock burn“ und Pododermatitis bei niedriger Lichtintensität. Diese erhöhte Häufigkeit wurde, wie vermutet wurde, durch eine längere Zeit im Liegen verursacht, was zu einer erhöhten Kontaktzeit zwischen dem Fuß und der Einstreu führt. Deep et al. (2010) registrierten ebenfalls eine erhöhte Ruhezeitdauer bei geringer Lichtintensität, was diese Vermutung unterstützt. Auf der anderen Aktivitäten, die durch eine hohe Lichtintensität angeregt werden, wie z. B. die Futtersuche und Scharren, können die Einstreuqualität verbessern, indem sie die Verdichtung der Einstreu verringern und infolgedessen die Inzidenz von Pododermatitis und „hock burn“ reduzieren (Kristensen et al., 2006b). Andererseits konnten Olanrewaju et al. (2015) keinen Einfluss der Lichtintensität (10, 5,0 und 0,5 Lux) auf die Beingesundheit von Broilern bestätigen.

Verkratzungen: Eine hohe motorische Aktivität in der Vogelgruppe ist eine von vielen Ursachen zur Ätiologie von Verkratzungen (Gouveia et al., 2009). Kristensen et al. (2004; 2006a) beobachteten, dass Vögel, die höheren Lichtintensitäten ausgesetzt sind, eine höhere motorische Aktivität zeigten, was unter bestimmten Bedingungen, wie einer hohen Besatzdichte und einer geringen Befiederung zu Verkratzungen und anderen Hautläsionen führen kann (Elfadil et al., 1996). In diesem Zusammenhang merkten Kristensen et al. (2004) an, dass das Lichtmanagement während des Herausfangens zur Beruhigung der Vögel beitragen und infolgedessen die Inzidenz von Hautläsionen abnehmen kann. Jedoch ist die Besatzdichte als Hauptrisikofaktor für die Entstehung von Verkratzungen zu nennen (Elfadil et al., 1996; Frankenhuis et al., 1991; Proudfoot & Hulan, 1985). In dieser Hinsicht können räumliche Schwankungen der Lichtintensität dazu führen, dass Vögel in bestimmten Bereichen des Stalles (wie an den Tränke- und Fütterungsanlagen) zusammenlaufen (Newberry et al., 1985), was die Dichte erhöht und Verkratzungen und andere Verletzungen verursachen kann (Dozier et al., 2005). Proudfoot und Hulan (1985) beobachteten, dass die Tiere bei höheren Besatzdichten dazu tendierten, über den Rücken anderer ruhender Vögel zu gehen. Hierbei werden durch die Krallen der Tiere Läsionen gesetzt. In diesem Zusammenhang berichteten Frankenhuis et al. (1991) über eine erhöhte Agglomeration um die Fütterungsanlagen im Vergleich zu den anderen Teilen des Stalles, was zu einer erhöhten Inzidenz von Verkratzungen führte.

Abschließend kann behauptet werden, dass sich die Lichtintensität auf die Inzidenz von Verkratzungen durch die Erhöhung der motorischen Aktivität und Veränderungen der räumlichen Verteilung der Vögel im Stall auswirkt.

2.6 Gesetzliche Grundlagen

Im Allgemeinen zeigt sich im globalen Vergleich eine positive Korrelation zwischen dem Tierwohl und dem Wohlstandsniveau eines Landes (Lichter & Kleibrink, 2015). Der Tierschutz hat in Europa mehr legislative Aufmerksamkeit erhalten als in jeder anderen Region der Welt (Van Horne & Achterbosch, 2008). Im Mai 2007 verabschiedete der Rat der Europäischen Union die Richtlinie 2007/43/EG (Richtlinie, 2007/43/EG zuletzt geändert durch Artikel 3 Absatz 2 des Gesetzes vom 30. Juni 2017) mit Mindestvorschriften zum Schutz von Masthühnern. Diese Richtlinie basiert auf dem Europäischen Übereinkommen zum Schutz von Tieren in landwirtschaftlicher Tierhaltung und musste von den EU-Ländern bis zum 30. Juni 2010 in nationales Recht umgesetzt werden.

Das Staatsziel Tierschutz wurde in § 20a Grundgesetz verankert. Grundlage des Tierschutzes in Deutschland, obgleich gewerblich oder privat, ist das Tierschutzgesetz (TSchG, 2006 zuletzt geändert am 20.11.2019). Die Bundesrepublik Deutschland verabschiedete dieses Gesetz, um „aus der Verantwortung des Menschen für das Tier als Mitgeschöpf dessen Leben und Wohlbefinden zu schützen. Niemand darf einem Tier ohne vernünftigen Grund Schmerzen, Leiden oder Schäden zufügen“ (§ 1 TierSchG). Den spezifischen nationalen rechtlichen Rahmen an das Halten von Nutztieren zu Erwerbszwecken in Deutschland stellt die Tierschutznutztierhaltungsverordnung (TierSchNutztV, 2006 zuletzt geändert am 30.06.2017) dar. Die Umsetzung erfolgte durch die Veröffentlichung des Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I Nr. 66 vom 1. Oktober 2009. Zuvor wurden die Anforderungen an das Halten von Masthühnern durch „Bundeseinheitliche Eckwerte für eine freiwillige Vereinbarung zur Haltung von Jungmasthühnern (Broiler, Masthähnchen) und Mastputen“ (1999) geregelt (Berk & Bartels, 2017). Der Abschnitt 4 der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung in Kombination mit den “Bundeseinhetlichen Leitlinien für die gute betriebliche Praxis zur Haltung von Masthühnern”(BMELV, 2012), entstanden in Kooperation des Instituts für Tierschutz und Tierhaltung des Friedrich-Loeffler Instituts mit Vertreterinnen und Vertretern der Veterinärbehörden der Länder, der Wissenschaft und der Verbände der Geflügelwirtschaft, ersetzen somit die “Bundeseinheitlichen Eckwerte für eine freiwillige Vereinbarung zur Haltung von Jungmasthühnern (Broiler, Masthähnchen) und Mastputen”.

2.6.1 Nationales Recht

Die TierSchNutztV (TierSchNutzV, 2006 zuletzt geändert am 30.06.2017) legt im Abschnitt 4 (§§ 16 - 20) die Anforderungen an das konventionelle Halten von Masthühnern in Betrieben mit 500 oder mehr Tieren fest. Die Verordnung findet keine Anwendung in Brütereien, in ökologischen Haltungsformen nach Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates und in extensiven Boden- oder Auslaufhaltungen nach Anhang V der Verordnung (EG) Nr. 543/2008 der Kommission.

Hinsichtlich der Beleuchtung in Ställen für Masthühner wird in § 18 „Anforderungen an Haltungseinrichtungen für Masthühner“ im Absatz 5 Sätze 1 und 2 Folgendes festgesetzt:

- „Masthühnerställe müssen mit Lichtöffnungen für den Einfall von natürlichem Licht versehen sein, deren Gesamtfläche mindestens 3 Prozent der Stallgrundfläche entspricht und die so angeordnet sind, dass eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Lichts über die gesamte Stallgrundfläche gewährleistet ist. Satz 1 gilt nicht für bestehende Gebäude, die vor dem 9. Oktober 2009 genehmigt oder in Benutzung genommen worden sind und über keine oder keine ausreichenden Lichtöffnungen verfügen und bei denen auf Grund fehlender technischer oder sonstiger Möglichkeiten nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand der Einfall von natürlichem Tageslicht erreicht werden kann, soweit eine Ausleuchtung des Einstreu- und Versorgungsbereiches in der Haltungseinrichtung durch eine dem natürlichen Licht so weit wie möglich entsprechende künstliche Beleuchtung sichergestellt ist“.

Bezüglich der künstlichen Beleuchtung wird in § 19 „Anforderungen an das Halten von Masthühnern“ im Absatz 1 Statz 1 Nummer 4 und 5 Folgendes geregelt:

- „In allen Masthühnerställen muss während der Lichtstunden die Lichtintensität mindestens 20 Lux, in Kopfhöhe der Tiere gemessen, betragen, wobei mindestens 80 vom Hundert der Masthühnernutzfläche ausgeleuchtet sein müssen, und, mit Ausnahme von Masthühnerställen nach § 18 Absatz 5 Satz 2, natürliches Tageslicht einfällt“.

- „Spätestens ab dem siebten Tag nach der Einstallung der Masthühner und bis zu drei Tage vor dem voraussichtlichen Schlachttermin muss ein 24-stündiges Lichtprogramm betrieben werden, das sich am natürlichen Tag-Nacht-Rhythmus orientiert und mindestens eine sechsstündige

ununterbrochene Dunkelperiode gewährleistet, wobei Dämmerlichtperioden nicht berücksichtigt werden“.

Entsprechend § 19 Absatz 1 Satz 2 werden die Voraussetzungen für eine zeitlich begrenzte Ausnahmeregelung charakterisiert:

- „Eine zeitweise Einschränkung der Lichtintensität oder die vorübergehende wesentliche Einschränkung des Einfalles des natürlichen Lichtes ist nur nach tierärztlicher Indikation zulässig“.

2.6.2 Bundeseinheitliche Leitlinien für die gute betriebliche Praxis zur Haltung von Masthühnern. Stand 1. Juni 2012

Die Bundeseinheitlichen Leitlinien (BMELV, 2012) sollen Tierhaltern eine Hilfestellung bei einer tierschutzkonformen Haltung von Masthühnern geben. Diese Leitlinien stimmen mit der TierSchNutztV hinsichtlich der Lichtintensität überein und enthalten darüber hinaus weiterführende Empfehlungen für die Lichtquantität und -qualität in Geflügelställen (vgl. Abschnitt 5):

- „Während der Dunkelphase kann eine künstliche Lichtquelle zur Orientierung mit einer Lichtstärke von maximal 0,5 Lux toleriert werden.

- „Beim Einsatz von Vollspektrumröhren ist darauf zu achten, dass eine Leuchte ohne Abdeckung verwendet wird oder die Abdeckung UV-durchlässig ist. Zu beachten ist weiterhin, dass Vollspektrumröhren nach einer gewissen Zeit ihr Lichtspektrum verändern und daher regelmäßig ausgewechselt werden sollten“.

3 Material und Methoden

Diese Untersuchung wurde im Rahmen des Projekts „Licht" der Klinik für Vögel, Kleinsäuger, Reptilien und Zierfische der LMU München in Zusammenarbeit mit einer Brüterei und einem Masthühner-Aufzuchtsbetrieb in Süddeutschland, durchgeführt. In diesem Projekt wurden drei Aspekte mit Bezug zur Lichtintensität in der Masthühnerproduktion bearbeitet: Tierverhalten (in Vorbereitung), Tieraugengesundheit (Schneeganß, 2018) sowie Tierproduktion und Tierschutz. Die Versuche wurden von der Regierung von Oberbayern unter dem Aktenzeichen 55.2-1-54-2532-63-2015 genehmigt. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit stellte die Untersuchung und Auswertung der Parameter Tierproduktion und Tierschutz dar. Die Versuchsgruppe wurde unter einem eigens erstellten diskontinuierlichen Lichtregime aufgezogen.

3.1 Gesamtziel

Ziel der vorliegenden Studie war es, die Auswirkungen zweier unterschiedlicher Lichtintensitätsprogramme auf die Produktions- und Tierschutzparameter kommerziell aufgezogener Masthühner zu bewerten.

3.2 Spezifische Ziele

1. Bestimmung der Lichtintensität in Lux sowie nach der tierartspezifischen Lichtperzeption des Haushuhnes (C-Lux).

2. Bewertung der Produktionsparameter (Körpermasse, Futteraufnahme, Futterverwertung und Mortalität) von Masthühnern unter konstanter und diskontinuierlicher Lichtintensität während der Aufzucht sowie die Beurteilung der Masse des Schalchtkörpers am Schlachthof.

3. Bewertung der Tierschutzparameter (Pododermatitis, „hock burn", Kontaktdermatitis an der Brust und Verkratzungen) von Masthühnern unter konstanter und diskontinuierlicher Lichtintensität am Ende der Aufzucht durch die erhobenen Daten am Schlachthof.

3.3 Tiere, Material und Methoden

3.3.1 Tiere und Aufzuchtverfahren

Die vorliegende Felduntersuchung wurde im Zeitraum von Juni bis September 2016 in einem Masthühner-Aufzuchtsbetrieb in Süddeutschland durchgeführt.
Im Rahmen des Projektes wurden insgesamt 69.400 Tiere der Linie Ross 308 in zwei gemischtgeschlechtlichen Aufzuchtdurchgängen untersucht. Auf diese Weise diente ein Aufzuchtdurchgang als Kontroll- und der andere als Versuchsgruppe. Beide Gruppen umfassten 34.700 Vögel. Die Kontroll- und die Versuchsgruppe wurden nacheinander im selben Stall unter standardisierten Bedingungen, jedoch mit zwei verschiedenen Lichtprogrammen aufgezogen. Hierbei handelte es sich bei der Kontrollgruppe um ein konstantes, bei der Versuchsgruppe um ein diskontinuierliches Lichtintensitätsprogramm.

Die Küken wurden von einer Brüterei in Süddeutschland geliefert. In der Brüterei wurden die Küken nach dem Schlupf in Impfsprühkammern gegen Infektiöse Bronchitis (IB) geimpft. Anschließend wurden beide Gruppen mit dem gleichen Impfregime im Betrieb aufgezogen (Tabelle 3). Des Weiteren können Tabelle 3 die während der Aufzucht verwendeten Arzneimittel entnommen werden. Die verwendeten Kokzidiostatika der Futtermittelhersteller sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Tiere wurden insgesamt 42 Tage aufgezogen. An Tag 35 wurden von der Kontroll- und Versuchsgruppe ungefähr 7.000 Tiere vorgegriffen, damit die Besatzdichte am Ende jedes Aufzuchtdurchganges maximal 39 kg/m² nicht überschreitet. Auf diese Weise betrug die Besatzdichte der Kontrollgruppe 38,29 kg/m² und die der Versuchsgruppe 38,01 kg/m². Die Zielkörpermasse der Tiere sollte bei der Schlachtung beim Vorgriff an Tag 35 ungefähr 2,00 kg betragen. Die Endmastschlachtung sollte an Tag 42 mit einer Zielkörpermasse der Tiere von ca. 2,5 kg. stattfinden.

Tabelle 3: Impfungen und Einsatz von Arzneimitteln in der Kontroll- und Versuchsgruppe, inklusive der Aufzuchttage, an denen die Medikamente eingesetzt wurden.

	Behandlungen (oral über das Tränkewasser)	
Aufzuchttage	Kontrollgruppe	Versuchsgruppe
12	Impfung ND, Gumboro	Impfung ND, Gumboro
13 – 17	Belacol®	-
18	Impfung IB	Impfung IB
20 – 23	Octacillin®	-

ND= Newcastle Disease; Gumboro= Infektiöse Bursitis; IB= Infektiöse Bronchitis; Belacol®= Wirkstoff Colistinsulfat 100 %. Dosierung: 6 g Colistinsulfat pro 1000 kg Körpermasse der zu behandelnden Tiere/Tag; Octacillin®= Wirkstoff Amoxicillin. Dosierung: 20 g pro 1000 kg Körpermasse der zu behandelnden Tiere/Tag.

Tabelle 4: Kokzidiostatika in Futtermitteln in der Kontroll- und Versuchsgruppe, inklusive der Aufzuchttage, an denen die Medikamente eingesetzt wurden.

	Behandlungen (oral über die Futtermittel)	
Phasenfutter und Aufzuchttage	Kontrollgruppe	Versuchsgruppe
Starter ohne Kokzidiostatika mehlförmig (Tag 1 - 4)	---	---
Starter pelletiert (Tag 5 - 8)	Robenidin-Hydrochlorid	Lasalocid-Natrium
Aufzucht I pelletiert (Tag 9 – 16)	Robenidin-Hydrochlorid	Lasalocid-Natrium
Aufzucht II pelletiert (Tag 17 – 27)	Monensin-Natrium	Salinomycin-Natrium
Endmast pelletiert (Tag 28- 42)	---	---

3.3.2 Stallbau, Lüftung- und Heizungssystem

Die Tiere wurden in einem 1.738 m^2 großen (Länge x Breite: 85,2 x 20,4 m) konventionellen, geschlossenen Geflügelstall in Bodenhaltung aufgezogen. Der Stall verfügte über 85 Fenster (Länge x Breite: 0,82 x 0,78 m), deren Fläche insgesamt 3,08 % der Stallgrundfläche betrug. Der Stall war mit einem Unterdrucklüftungssystem mit einer Luftaustauschrate von 4,85 m^3 pro kg Lebendmasse und Stunde ausgestattet. Die Heizungsanlage bestand aus 4 Wärmekanonen, die den Stall mit einer Lufttemperatur von 34 °C zu Beginn der Aufzucht versorgten. Weiterhin erfolgte eine allmähliche Absenkung der Stalltemperatur bis auf 20 °C an Tag 35, die bis zum Ende der Aufzucht konstant gehalten wurde. Durch die automatische Steuerung des Lüftungs- und Heizungssystems stieg schrittweise die relative Luftfeuchtigkeit im Stall während des Aufzuchtdurchgangs an. Der Zielwert der relativen Luftfeuchtigkeit zu Beginn der Aufzucht betrug ca. 60 % und stieg allmählich bis 70 % am Ende des Durchgangs an. Die Stallbetreiber konnten per Stallcomputer die Stalltemperatur und die relative Stallluftfeuchtigkeit steuern.

3.3.3 Einstreu

In beiden Durchgängen wurden Dinkelspelzen als Einstreumaterial eingesetzt, deren Menge ca. 0,8 - 1 kg/m^2 Stallfläche betrug. Die Einstreu wurde vor Einstallung der Küken ausgebracht und verblieb während des gesamten Aufzuchtdurchgangs im Stall. Während der Aufzucht wurde der Stall weder ausgemistet noch nachgestreut.

3.3.4 Futter, Wasser und Versorgungseinrichtungen

Wasser und Futter standen *ad libitum* zur Verfügung, es erfolgte eine Mehrphasenfütterung auf Basis eines Standard-Mais-Weizen-Masthühnerfutters. Die Zusammensetzung der verschiedenen Futtermittel ist in Tabelle 5 dargestellt. Zur Fütterung der Tiere wurde eine Spiralförderanlage mit 452 Rundtrögen in vier Reihen verwendet (0,69 cm Trog/Kilogramm Gesamtlebendmasse). Die Futtertröge wurden mittels flexibler Höhenverstellung im Verlauf des Aufzuchtdurchgangs an das Wachstum und die Körpergröße der Tiere angepasst. Hierdurch wurde eine optimale Futteraufnahme der Tiere sichergestellt. Bei der Kükeneinstallung hatte das Personal Papierbahnen mit Kükenstarterfutter über die gesamte Stalllänge ausgelegt. Es wurden ungefähr 30 g Futter pro Küken ausgestreut. Dies dient der erleichterten Futteraufnahme

in den ersten Lebenstagen der Tiere. Die Wasserversorgung erfolgte über 2.688 Nippeltränken, das heißt 12,56 Tiere können pro Tränke versorgt werden. Die Höhe der Tränkelinien wurde ebenfalls an das Wachstum und die Körpergröße der Tiere angepasst, um eine optimale Wasserversorgung sicherzustellen. Die Lage der Futter- und Tränkelinien ist in Abbildung 9 zu sehen.

Tabelle 5: Nährstoffe der Mehrphasenfütterung.

Nährstoff (%)	Hähnchenstarterfutter		Aufzuchtfutter		Finisherfutter
	Starter ohne Kozidiostatika mehlförmig (Tag 1 - 4)	Starter pelletiert (Tag 5 - 8)	Aufzucht I pelletiert (Tag 9 - 16)	Aufzucht II pelletiert (Tag 17 - 27)	Endmast pelletiert (Tag 28- 42)
Rohprotein	20,5	20,5	20,0	19,0	19,0
MJ ME/kg	12,5	12,4	12,4	12,6	13,0
Methionin	0,60	0,57	0,52	0,52	0,52
Lysin	1,31	1,25	1,16	1,12	1,13
Calcium	0,95	0,85	0,85	0,85	0,75
Phosphor	0,65	0,65	0,55	0,55	0,50
Natrium	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14

3.3.5 Lichtverhältnisse

Nach der Einstallung und den sich anschließenden 24 Stunden wurde eine Lichtintensität von 60 Lux eingestellt. Der Einstallungstag wurde als Masttag 0 bezeichnet. Die Kontrollgruppe wurde mit einer konstanten Lichtintensität (20 Lux) entsprechend §19 der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung aufgezogen. Die Versuchsgruppe wurde nach der Versuchsanordnung mit einem diskontinuierlichen Lichtintensitätsprogramm aufgezogen, welches aus den folgenden Phasen zusammengesetzt war: 20 Lux von Tag 1 bis 10, 15 Lux von Tag 11 bis 13, 10 Lux von Tag 14 bis 18 und 5 Lux von Tag 19 bis 42 (Tabelle 6). In beiden Lichtprogrammen wurde die gleiche Photoperiode (Tabelle 6) sowie Morgen- und Abenddämmerungsperioden von 30 Minuten während der ganzen Aufzucht eingehalten. Die Dämmerungsperioden wurden bei der Photophase berücksichtigt. Die Lichtintensität in der Skotophase betrug < 0,5 Lux. Das Licht wurde von 28 dimmbaren warm-weißen (3.000 K) T8-Leuchtstoffröhren 58 W/50 Hz erzeugt, die sich in zwei Reihen in einer Höhe von 4,5 Metern an der Decke befanden. Die gesamte Oberfläche der Stallwände sowie das Dach waren hellgrau und matt (Abbildung 8). Der Tageslichteinfall

wurde durch Jalousien verhindert, damit die Lichtquantität und -qualität vollumfänglich regulierbar blieb.

Tabelle 6: Lichtprogramm der Versuchsanordnung der Kontroll- und Versuchsgruppe. Morgen- und Abenddämmerungsperiode jeweils 30 Minuten. Lichtintensität in der Skotophase < 0,5 Lux.

Aufzuchttage	Lichtintensität (Lux)		Photoperiode (L= Licht, D= Dunkel)
	Kontrollgruppe	Versuchsgruppe	
1 – 2	20	20	23L:1D
3 – 4	20	20	22L:2D
5 – 6	20	20	20L:4D
7 – 10	20	20	18L:6D
11 – 13	20	15	18L:6D
14 – 18	20	10	18L:6D
19 – 32	20	5	18L:6D
33 – 35	20	5	23L:1D
36 – 38	20	5	18L:6D
39 – 42	20	5	23L:1D

3.4 Datenerfassung

An Tag 41 begann die Vorbereitung auf die Endmastschlachtung. Dafür wurde das Wiegesystem abgebaut und die Futteraufnahme wurde nicht mehr erfasst. An Tag 42 wurden die Sensoren für die Messung der Lufttemperatur und -feuchtigkeit demontiert. Ab dem Tag 41 und nach Anforderungen des Betriebs war es nicht möglich, den Stall zu betreten, um Messungen der Eintreuqualität durchzuführen. Aus diesen Gründen wurden in der vorliegenden Untersuchung die Daten der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit, der Einstreuqualität, der Produktionsparameter und der Mortalität nur bis zum Tag 40 betrachtet.

In der vorliegenden Untersuchung galten die Stalltemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, die Einstreuqualität und das Lichtspektrum als Stallumweltfaktoren. Diese Faktoren wurden in der Kontroll- und Versuchsgruppe kontrolliert, damit sie nicht als Störvariablen wirken. Die Lichtintensität fungierte als die unabhängige Variable, die in Kontroll- und Versuchsgruppe modifiziert wurde. Die abhängigen Variablen Produktions- und Tierschutzparameter wurden unter Berücksichtigung von Körpermasse, Futteraufnahme, Futterverwertung und Mortalität sowie den Kriterien für den Tierschutz einschließlich Kontaktdermatitis

an Fußballen (Pododermatitis), Intertarsalgelenken („hock burn“) und an der Brust und Verkratzungen erfasst.

Die Daten der Produktionsparameter und Mortalität wurden für die Tage 1 - 10, 11 – 18, 19 - 40 und 1 – 40 erhoben, um ihre Beziehung zu der Beleuchtungsstärke bewerten zu können. Die Tierschutzparameter wurden beim Schlachthoftermin an Tag 42 und getrennt nach Gruppen erfasst.

3.4.1 Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit

Die Stall- und Außenlufttemperatur in °C sowie die relative Stall- und Außenluftfeuchtigkeit in Prozent wurden kontinuierlich durch fest installierte Sensoren automatisch aufgezeichnet. Im Stall befanden sich drei Thermometer und drei Hygrometer auf Kopfhöhe der Tiere in drei verschiedenen Stallbereichen (Vorne, Mitte und Hinten). Im Stall wurde täglich die minimale und maximale Lufttemperatur auf der Stallkarte erfasst. Der Mittelwert aus der minimalen und maximalen Lufttemperatur stellte die tägliche Temperatur im Stall dar. Die Außenlufttemperatur wurde durch die maximale tägliche Temperatur dargestellt. Ebenso wurden die Mittelwerte aus den kontinuierlichen Messungen der relativen Stall- und Außenluftfeuchtigkeit täglich auf der Stallkarte registriert.

Die Stall- und Außenlufttemperatur sowie die relative Stall- und Außenluftfeuchtigkeit wurden den Landwirten über den Stallcomputer mitgeteilt. Die Mittelwerte der Stall- und Außenlufttemperatur sowie die der relativen Stall- und Außenluftfeuchtigkeit wurden an den Tagen 1 - 10, 11 - 18 und 19 - 40 nach den Lichtintensitätsänderungen des diskontinuierlichen Lichtintensitätsprogramms berechnet, um mögliche Unterschiede zwischen Kontroll- und Versuchsgruppe während der Aufzucht feststellen zu können.

3.4.2 Einstreuqualität

Die Beurteilung der Einstreuqualität nach dem Bewertungssystem des Welfare Quality® Assessment protocol for poultry (Welfare Quality, 2009) durchgeführt (Tabelle 7). Dieses Bewertungssystem ist eine validierte und zuverlässige Methode zur Messung des Feuchtigkeits- und des Verdichtungsgrads des Einstreumaterials in Geflügelställen. Für diesen Zweck wurden fünfzehn Messstellen auf dem gesamten Stallboden (an den Tränk- und Fütterungsanlagen sowie am Mittelgang des Stalles) festgelegt (Siehe Abbildung 9). Die Einstreuqualität wurde von derselben Person an den Tagen 0, 5, 11, 19, 30 und 40 erfasst.

Tabelle 7: Bewertungssystem des Welfare Quality® Assessment protocol for poultry.

Einstufung	Definition
0	Einstreu vollständig trocken und bröckelig.
1	Einstreu trocken, aber nicht einfach mit dem Fuß zu bewegen.
2	Auf der Einstreu verbleibt der Fußabdruck und sie bildet einen Ball, wenn sie zusammengedrückt wird, aber der Ball hält nicht fest zusammen.
3	Die Einstreu klebt am Fuß und bildet einen Ball, der fest zusammenhält.
4	Die Einstreu klebt am Fuß, wenn die bestehende oberflächlich verdichtete Schicht gebrochen ist.

3.4.3 Lichtintensität und Lichtspektrum

Die Lichtintensität wurde entsprechend der horizontalen Beleuchtungsstärkemessung mit einem Luxmeter (MAVOLUX 5032B, GOSSEN GmbH, Nürnberg, Deutschland) mit einer Spitzenempfindlichkeit von 555 nm erfasst (Abbildung 10). Dazu wurde der Photometerkopf des Messgerätes waagerecht zum Stallboden orientiert, sodass der Lichtempfänger senkrecht nach oben ausgerichtet war. Die Messungen wurden 25 cm über dem Stallboden (Augenhöhe eines ausgewachsenen Masthuhnes) an zehn verschiedenen Messstellen durchgeführt. Auf diese Weise wurde die maximal einfallende Lichtmenge erfasst. Die Messstellen befanden sich unter den Leuchtmitteln, an den Tränk- und Fütterungsanlagen sowie am Mittelgang des Stalles (Abbildung 9). Die Lichtintensität wurde dabei als Mittelwert zwischen all diesen Messstellen erfasst. Die Lichtintensität wurde bei jeder Beleuchtungsstärkeänderung kontrolliert (in Lux) und gemäß der Wahrnehmung des Haushuhnes (C-Lux) nach Prescott und Wathes (1999b) zusätzlich berechnet. Entsprechend der Verfahren dieser Autoren wurde die Strahlungsdichte zum relativen Photonenfluss pro Sekunde in Schritten von jeweils 5 nm des Lichtspektrums gemäß folgender Gleichung umgerechnet:

$N = P\lambda/hc$

N = Photonenfluss pro Sekunde
P = Strahlungsleistung (Watt)
λ = Wellenlänge (m)
h = Planck-Konstante ($6{,}62517 \cdot 10^{-34}$ J s)
c = Lichtgeschwindigkeit ($2{,}99792 \cdot 10^{8}$ m/s)

Die Werte des Photonenflusses pro Sekunde wurden mit der bekannten spektralen Perzeption des Huhnes nach Prescott und Wathes (1999b) multipliziert. Schließlich wurden die Produkte dieser Faktoren addiert, um die wahrnehmende Lichtintensität des Huhnes zu erhalten.

Das Lichtspektrum wurde mit einem Spektrometer (USB2000EPP Fa. StellarNet, Tampa, Florida, USA) unter Verwendung einer Glasfaser, welche sich 25 cm über dem Boden befand und senkrecht zum Boden orientiert war, sowie einem vorgeschalteten Cosinusdiffusor aufgezeichnet (Abbildung 11). Die Messungen des Lichtspektrums erfolgten jeweils am Anfang des ersten und des zweiten Mastdurchganges an 10 verschiedenen Stellen, die sich in drei parallelen Linien in Bezug auf die Längsachse des Stalles befanden (Abbildung 9) und die bei jeder Beleuchtungsstärkeänderung kontrolliert wurden. Für jede Messstelle und Lichtintensität (20, 15, 10 und 5 Lux) wurde die spektrale Strahlungsdichte dreimal bei Wellenlängen zwischen 360 und 700 nm (in Schritten von jeweils 5 nm) aufgezeichnet.

Abbildung 8: Innenansicht des Versuchsstalles mit dem künstlichen Beleuchtungssystem im Betrieb.

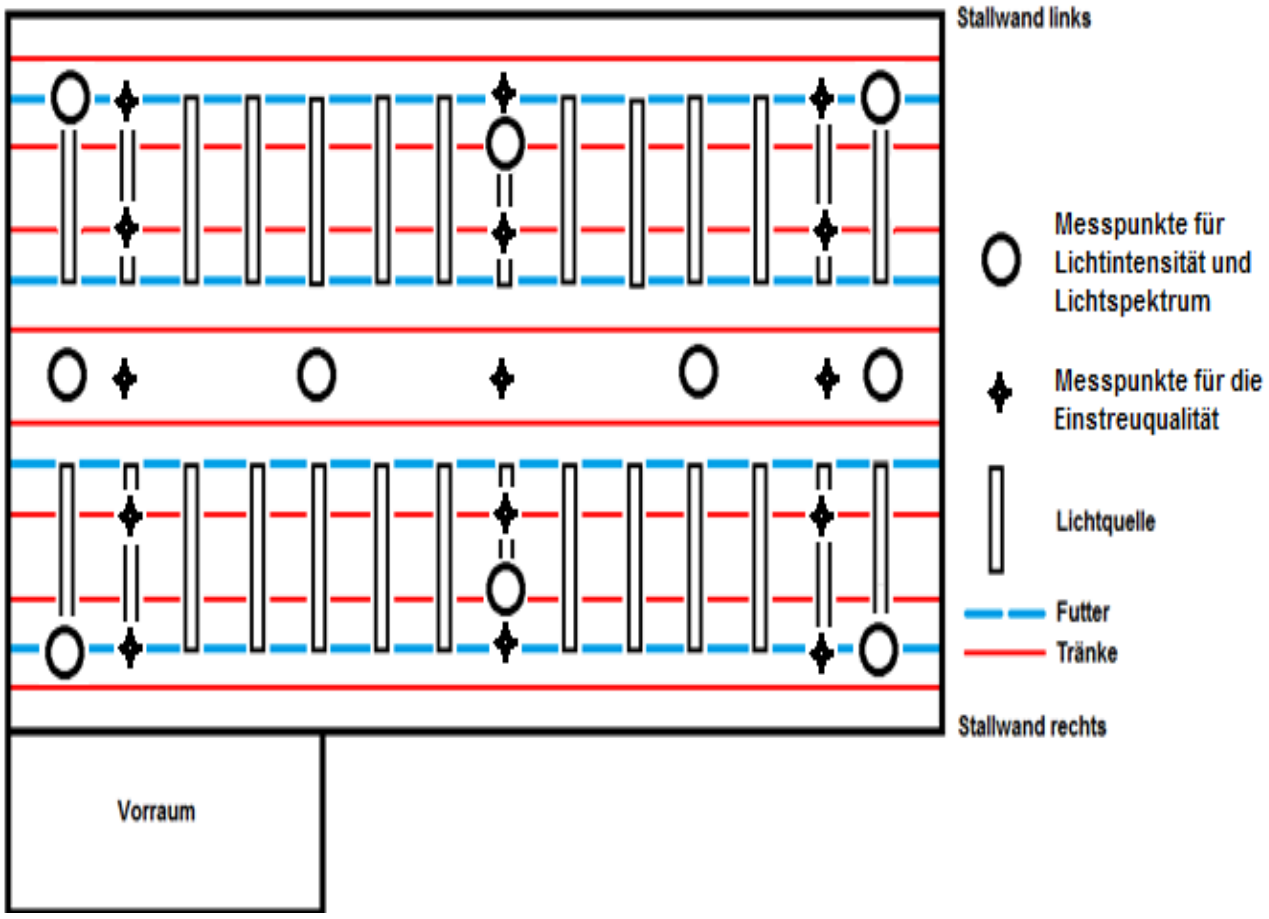

Abbildung 9: Darstellung der Messpunkte für Lichtintensität, Lichtspektrum und Einstreuqualität im Stall. Zusätzlich zeigt die Abbildung die Lage der Futter- und Tränkelinien sowie der Lichtquellen im Stall.

Abbildung 10: Luxmeter MAVOLUX 5032B, GOSSEN GmbH, Nürnberg, Deutschland.

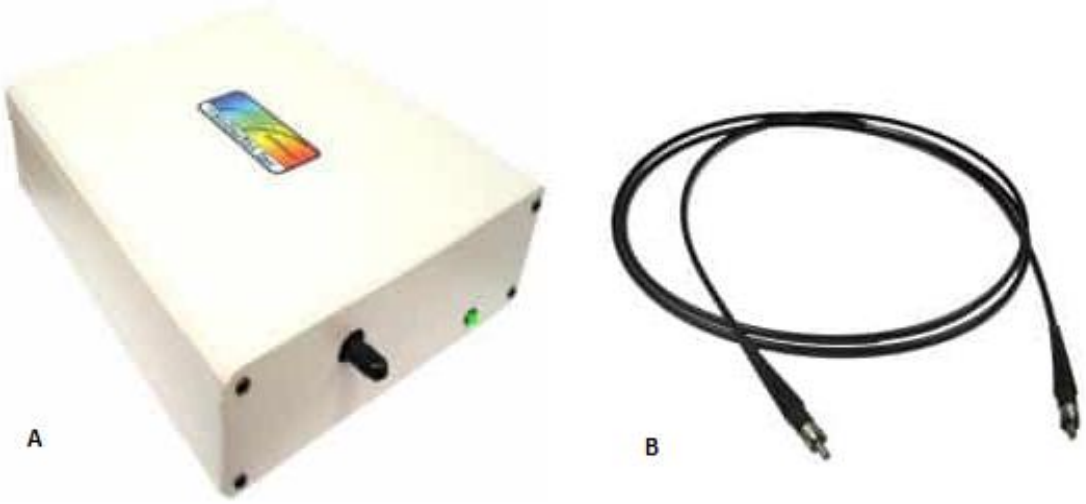

Abbildung 11: A) Spektrometer USB2000EPP Fa. StellarNet, Tampa, Florida, USA. B) Glasfaser und Cosinusdiffusor (Quelle: Stellar Net Inc, 2018).

3.4.4 Produktionsparameter und Mortalität

Während der Aufzucht wurden die Körpermasse (KM), Futteraufnahme (FA) und Futterverwertung (FV) täglich als Durchschnittswerte jeder Gruppe erfasst. Die erhobenen Daten der Produktionsparameter und Mortalität wurden den Versuchsperioden 1 – 10, 11 – 18, 19 – 40 und 1 – 40 zugeordnet, um ihre Beziehung zur Beleuchtungsstärke bewerten zu können.

Körpermasse: Die KM wurde automatisch durch ein fest installiertes Wiegesystem im Stall erfasst. Die Waagen hingen von der Decke, und am unteren Ende des Systems befand sich eine Plattform, die ca. 3 cm über dem Stallboden schwebte, sodass die Tiere auf die Plattform steigen konnten. Der Mittelwert der KM der Herde wurde täglich vom Landwirt in einer Stallkarte erfasst. Außerdem wurde in dieser Studie die KM jeweils am letzten Tag der drei Versuchsperioden (Tag 10, 18 und 40) erfasst. Unter der Bezeichnung KM (01 - 10) ist die aus Versuchsperiode 1 an Tag 10 ermittelte KM zu verstehen. Analog gilt für die Versuchsperiode 2 die Bezeichnung KM (11 - 18) und für die Versuchsperiode 3 die Bezeichnung KM (18 - 40). Die drei Einzelwerte wurden rechnerisch addiert und das Ergebnis ist mit KM (1 - 40) bezeichnet.

Am Ende des Versuches (Tag 42) wurden 25.113 der Hühner der Versuchsgruppe und 26.323 Vögel der Kontrollgruppe durch die Spedition Dirnhofer in Burglengenfeld, Deutschland zur Schlachtung zum Wiesenhof-Schlachthof „Donautal Geflügelspezialitäten“, Straubing-Bogen, Deutschland, transportiert. Im Schlachthof wurden die Schlachtkörper in verschiedene Massenklassen eingestuft. Die erste Massenklasse betraf alle Tiere, die 0 g bis 474 g wogen. Die weiteren Massenklassen staffelten sich in 50 g-Schritten bis zu einer Masse von 2.975 g. Somit wurden die Tiere insgesamt in 52 Massenklassen unterteilt. In jeder Massenklasse wurde die Summe sowie der prozentuale Anteil aller Tiere, die in diese Massenklasse fielen, aufgelistet.

Futteraufnahme: Die FA der Herde wurde automatisch durch Sensoren in der Fütterungsanlage kontrolliert und per Stallcomputer automatisch erfasst. Die FA wurde täglich in kg pro Tag berechnet. Zudem wurde die kumulierte Futteraufnahme berechnet. Hierbei wurde die tägliche Futteraufnahme aufsummiert, sodass sich für jeden Tag die bisherige gesamte Futteraufnahme ergab. Die FA an den Tagen 1 – 10, 11 – 18 und 19 – 40 stellte die kumulierte FA dar, die am Ende jeder Versuchsperiode erreicht wurde. Die FA an der Versuchsperiode 1 – 40 stellt die Summe der FA an den Tagen 1 – 10, 11 – 18 und 19 – 40 dar.

Futterverwertung: Die FV der Herde wurde als Quotient aus der FA und der KM täglich berechnet. Die FV an den Tagen 1 – 10, 11 – 18 und 19 – 40 stellte die

FV dar, die am Ende jeder Versuchsperiode erreicht wurde. Die FV an der Versuchsperiode 1 – 40 stellt den Mittelwert der FV an den Tagen 1 - 10, 11 - 18 und 19 – 40 dar.

Mortalität: Der Stall wurde zweimal pro Tag hinsichtlich toter und erkrankter Vögel kontrolliert. Die täglichen Verluste ergaben sich aus verendeten und selektierten Tieren. Bei den verendeten Tieren wurde zusätzlich zwischen Verstorben aufgrund von Herz-Kreislauf-Versagen (HKV) und „Tote" unterschieden. Selektierte Tiere waren diejenigen, die aufgrund von Beinschäden oder sonstigen Erkrankungen tierschutzgerecht getötet werden mussten. Des Weiteren ergab sich aus den Gesamtverlusten von verendeten und selektierten Tieren in Stück die tägliche Mortalitätsrate in Prozent. Zudem wurde eine tägliche kumulierte Mortalitätsrate in Prozent berechnet. Hierbei wurde die täglichen Verluste aufsummiert, sodass sich für jeden Tag die bisherige Mortalitätsrate in Bezug auf die eingestallte Gesamttierzahl ergab. Die Mortalität und die Rate der Todesursachen wurde in Bezug zu den Gesamtverlusten an den Tagen 1 – 10, 11 – 18, 19 – 40 und 1 - 40 berechnet. Die Gesamtmortalität an der Versuchsperiode 1 - 40 ergab sich aus der kumulierten Mortalitätsrate am Tag 40.

3.4.5 Tierschutzparameter

Im Schlachthof wurde die Prävalenz von Pododermatitis, „hock burn" (Kontaktdermatitis an den Intertarsalgelenken), Verkratzungen und Kontaktdermatitis an der Brust berechnet. Die Tierschutzparameter wurden nach dem integrierten Qualitäts- und Umweltmanagementsystem von Lohmann & CO. AG auf Basis eines Key Welfare Indicators (KWI) bewertet. Die Erfassung wurde von geschultem Personal des Schlachthofes am Schlachtband nach Rupfen und Eviszeration durchgeführt. Die untersuchten Tiere wurden während des Schlachtvorgangs zufällig ausgewählt. Für die Auswertung von Pododermatitis, „hock burn" und Kontaktdermatitis an der Brust wurden bei jedem Schlachtvorgang von der Menge von 10.000 Tieren 100 Tiere nach dem Zufallsprinzip ausgewählt. Für die Auswertung von Verkratzungen wurden bei jedem Schlachtvorgang von der Menge von 10.000 Tieren 50 Tiere ebenfalls nach dem Zufallsprinzip betrachtet. Aus der dabei festgestellten Anzahl der Tiere mit Veränderungen ergab sich die Prävalenz. Wenn der dabei festgelegte Grenzwert überschritten wurde, erfolgte eine Kontrollzählung, damit eine zufällige Abweichung ausgeschlossen werden konnte. Wenn diese Kontrollzählung nicht mit der ersten Zählung übereinstimmte, musste eine zweite Kontrollzählung durchgeführt werden. Die Grenzwerte betrugen: für Pododermatitis 20 %, „hock burn" 10 %, Kontaktdermatitis an der Brust 1 % und für Verkratzungen 2 %.

Pododermatitis: Bei der Erfassung der Pododermatitis wurden 100 Tiere pro 10.000 geschlachtete Tiere betrachtet. Hautläsionen an den Fußballen wurden gezählt, wenn dunkle Verfärbungen das akzeptable Maß von 7,5 mm Durchmesser überschritten (Abbildung 12).

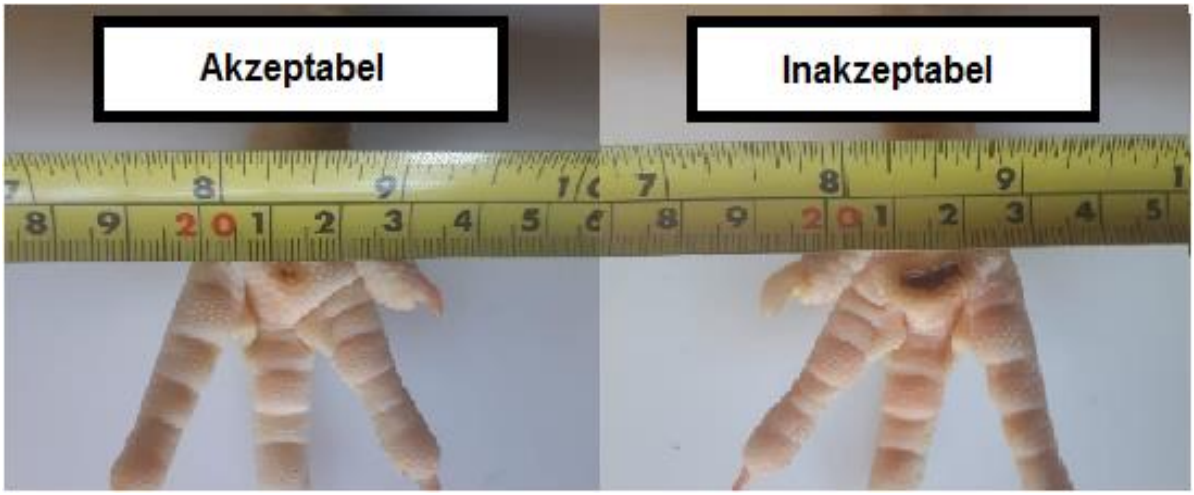

Abbildung 12: Berwertungskriterium der Fußballenläsionen im Schlachthof. Links: Pododermatitis < 7,5 mm; rechts: Pododermatitis > 7,5 mm

„Hock burn“: Bei der Ermittlung des „hock burn“ wurden von 10.000 Tieren 100 Tiere betrachtet. Hautläsionen an den Intertarsalgelenken wurden gezählt, wenn dunkle Verfärbungen das akzeptable Maß von 7,5 mm Durchmesser überschritten (Abbildung 13).

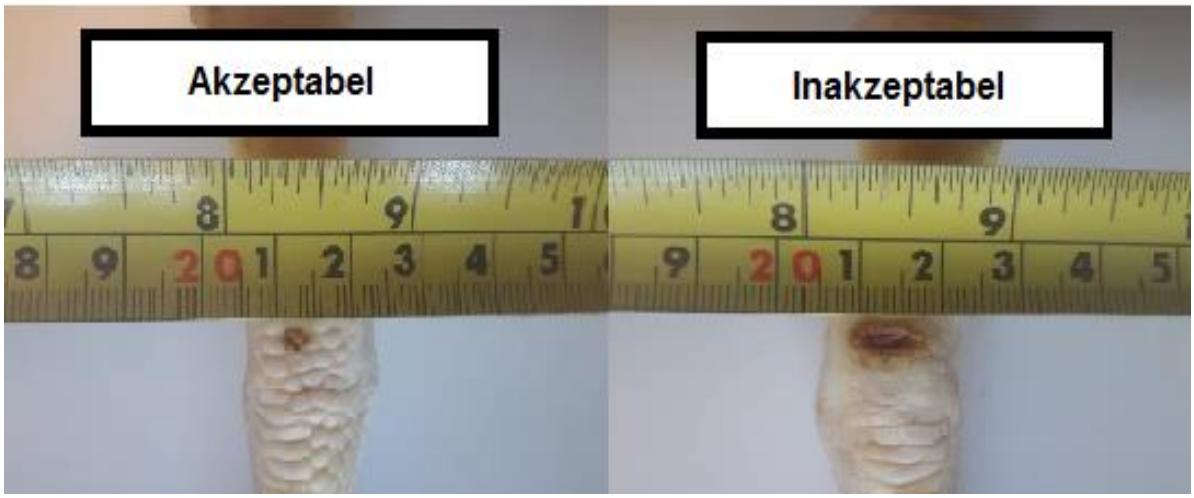

Abbildung 13: Bewertungskriterium der Hautläsionen an den Intertarsalgelenken im Schlachthof. Links: Kontaktdermatitis < 7,5 mm; rechts: Kontaktdermatitis > 7,5 mm.

Kontaktdermatitis an der Brust: Bei der Erfassung der Häufigkeit von Kontaktdermatitis an der Brust wurden von 10.000 Tieren 100 Tiere betrachtet. Kontakdermatitis an der Brust wurde gezählt, wenn Brustblasen oder dunkle Verbrennungen am Brustansatz vorhanden waren (Abbildung 14).

Abbildung 14: Bewertungskriterium der Hautläsionen an der Brust im Schlachthof. Mehrere Schlachtkörper mit inakzeptabler Ausdehnung von Kontaktdermatitis am Brustansatz.

Verkratzungen: Nach dem Rupfen wurden von 10.000 Tieren 50 Tiere betrachtet und das Vorhandensein von Verkratzungen in drei unterschiedliche Kategorien von 1 bis 3 eingeteilt (Abbildung 15).

- Kategorie 1: keine oder nur leichte Verkratzungen im Rückenbereich;
- Kategorie 2: mehrere Kratzer am Rückenbereich oder Tiere, die zusätzlich zum Rücken Verkratzungen an Flügeln oder Keulen aufweisen;
- Kategorie 3: zahlreiche, tiefe Kratzer, die sich über einen Großteil des Rückens und andere Körperteile erstrecken, besonders tiefe Kratzer oder Kratzer mit Schorfbildung.

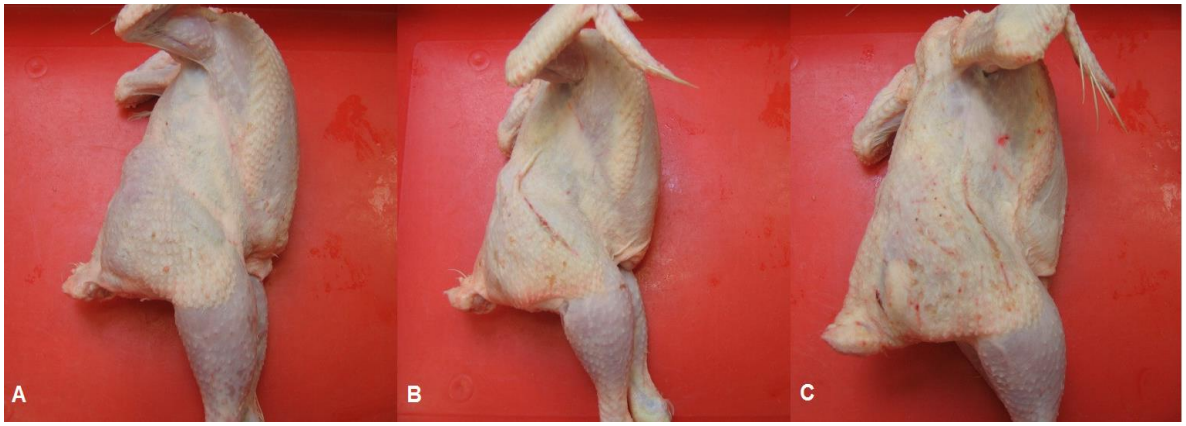

Abbildung 15: Verkratzungen in drei unterschiedliche Kategorien: A) Kategorie 1, B) Kategorie 2, C) Kategorie 3 (Quelle: Schlachthof Donautal Geflügelspezialitäten).

3.5 Statistische Auswertung

Die Rohdaten wurden in Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation, Redmond, USA) erfasst. Die Auswertung der Produktions- und Tierschutzparameter wurde vom statistischen Beratungslabor (StaBLab) des Instituts für Statistik der Ludwig-Maximilians-Universität München durch den Einsatz der statistischen Software R (R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria) durchgeführt. Zur Kontrolle der Luftemperatur und Luftfeuchtigkeit wurde ein t-Test verwendet, um die Mittelwerte der Stall- und Außenlufttemperatur und die der relativen Stall- und Außenluftfeuchtigkeit an den Tagen 1 – 10, 11 – 18 und 19 – 40 zwischen beiden Gruppen zu vergleichen. Die Einstreuqualität wurde mittels eines linearen Modells getrennt nach Gruppen an den Tagen 0, 5, 11, 14, 19, 30 und 40 bewertet. Die Modellierung der Körpermasse, der Futteraufnahme sowie der Futterverwertung in Abhängigkeit von Masttag (1 – 40) und Gruppe wurde mittels generalisierter additiver gemischter Modelle (GAMMs) durchgeführt. Die Mittelwerte der KM, FA und FV an den Tagen 1 - 10, 11 – 18, 19 - 40 und 1 – 40 wurden in einer Tabelle zusammengefasst und die Unterschiede zwischen beiden Gruppen durch Substraktion ermittelt. Anschließend wurde der Unterschied in KM, FA und FV in prozentuale Anteile umgewandelt. Zusätzlich wurde die Masse des Schlachtkörpers am Tag 42 mittels eines t-Tests zwischen beiden Gruppen verglichen. Ein Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests wurde für die Pododermatitis, „hock burn“ und Verkratzungen durchgeführt. Analog dazu wurde ein Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests für die Mortalität und Todesursachen an den Tagen 1 – 10, 11 – 18, 19 – 40 sowie für ihre gesamten Werte während der Mast (1 – 40) verwendet. Für die Kontakdermatitis an der Brust wurde kein Test

durchgeführt, da keine Fälle vorlagen. Das Signifikanzniveau wurde auf $P \leq 0,01$ festgelegt, sofern nicht anders angegeben.

4 Ergebnisse

4.1 Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit

Die Stalllufttemperatur, die durch fest installierte Sensoren auf Kopfhöhe der Tiere in drei verschiedenen Stallbereichen (Vorne, Mitte und Hinten) im Stall als Mittelwert aus der minimalen und maximalen Lufttemperatur erfasst wurde, zeigte wie geplant während der gesamten Aufzuchtperiode tendenziell einen abnehmenden Verlauf (Abbildung 16). Dennoch wurden die täglichen Richtwerte der Stalllufttemperatur während der Aufzucht in der Kontroll- und Versuchsgruppe überschritten. An den Tagen 1 - 10, 11 - 18 und 19 - 40 waren die Mittelwerte der Stalllufttemperatur bei der Kontrollgruppe 1,47 °C, 1,54 °C und 3,63 °C und bei der Versuchsgruppe 1,36 °C, 1,20 °C und 3,35 °C höher als nach Betriebsplan vorgesehen. Es wurden keine signifikanten Unterschiede bei den Mittelwerten der Stalllufttemperatur zwischen der Kontroll- und der Versuchsgruppe an den Aufzuchttagen 1 - 10, 11 - 18 und 19 - 40 beobachtet ($P > 0,05$; Tabelle 8). Die Außenlufttemperatur, die als maximale tägliche Außentemperatur gemessen wurde, variierte in der Kontroll- und Versuchsgruppe während der gesamten Aufzuchtperiode (Abbildung 16). Die Außenlufttemperaturen der Kontroll- und Versuchsgruppe zeigten einen statistisch signifikanten Unterschied an den Aufzuchttagen 1 - 10 und 11 – 18 ($P < 0,05$; Tabelle 8).

Die relative Stallluftfeuchtigkeit, als Mittelwert der Minima und Maxima täglich dokumentiert, zeigte bei der Kontroll- und Versuchsgruppe einen tendenziellen Anstieg während der gesamten Aufzuchtperiode (Abbildung 17). Die Richtwerte der relativen Stallluftfeuchtigkeit wurden während der gesamten Aufzuchtperiode in der Kontroll- und Versuchsgruppe überschritten. An den Tagen 1 - 10, 11 - 18 und 19 – 40 war die durchschnittliche Stallluftfeuchtigkeit der Kontrollgruppe 4,64, 14,88 und 14,27 % und die der Versuchsgruppe 6,91, 11,88 und 14,82 % höher als die Richtwerte des Betriebsplans. Dennoch wurden keine signifikanten Unterschiede bei den Mittelwerten der Stallluftfeuchtigkeit zwischen der Kontroll- und der Versuchsgruppe an den Aufzuchtagen 1 - 10, 11 – 18 und 19 – 40 beobachtet ($P > 0,05$; Tabelle 9). Die Außenluftfeuchtigkeit, die als Mittelwert der Minima und Maxima täglich aufgezeichnet wurde, wies während der gesamten Aufzuchtperiode Schwankungen auf (Abbildung 17). Die erfasste Außenluftfeuchtigkeit der Kontroll- und Versuchsgruppe zeigte dabei einen statistisch signifikanten Unterschied an den Aufzuchttagen 11 – 18 und 19 – 40 ($P < 0,05$; Tabelle 9).

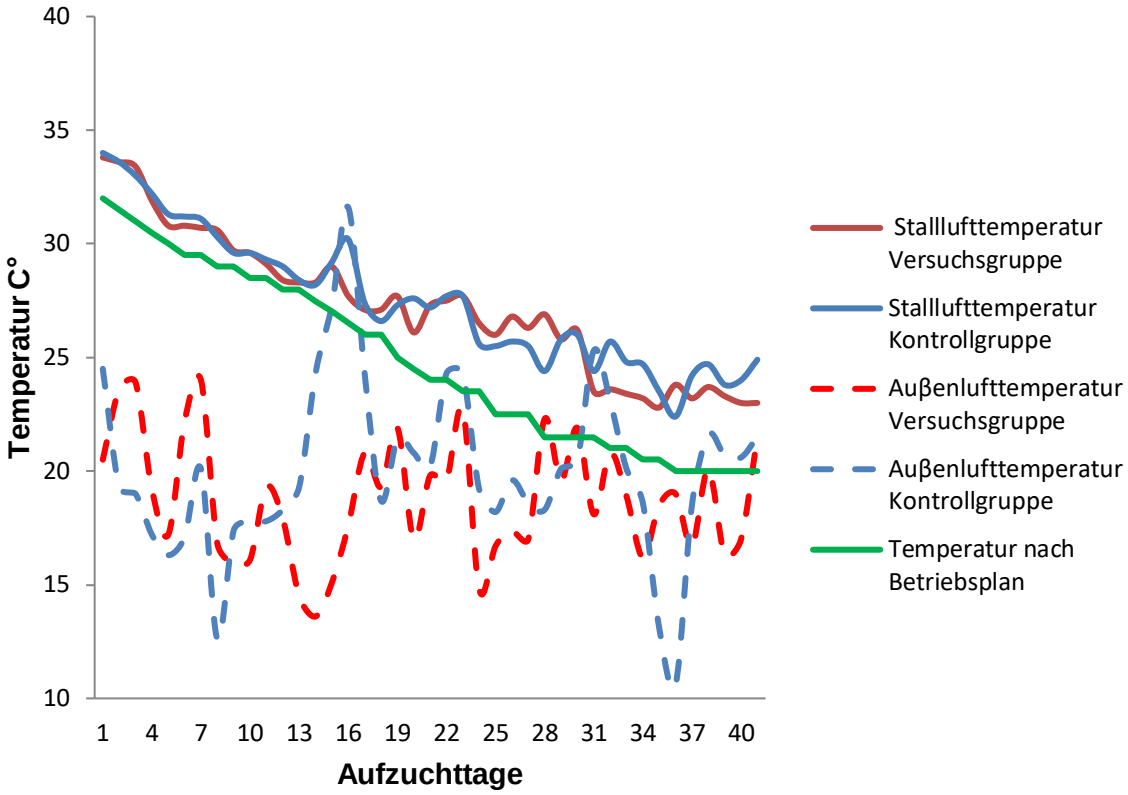

Abbildung 16: Stall- und Außenlufttemperatur der Kontroll- und Versuchsgruppe während der gesamten Aufzuchtperiode.

Tabelle 8: Mittelwerte und Standardabweichung der Stall- und Außenlufttemperatur der Kontroll- und Versuchsgruppe.

Aufzuchttage	Stalltemperatur °C		Außentemperatur °C	
	Kontroll-gruppe	Versuchs-gruppe	Kontroll-gruppe	Versuchs-gruppe
1 – 10	31,38 ± 1,64	31,27 ± 1,67	18,10^{a} ± 2,88	19,88^{b} ± 3,17
11 – 18	28,29 ± 1,17	27,95 ± 0,67	23^{a},15 ± 4,67	17,59^{b} ± 2,88
19 – 40	25,26 ± 1,48	24,98 ± 1,77	19,90 ± 3,31	18,72 ± 2,21

Werte innerhalb einer Zeile mit unterschiedlichen hochgestellten Buchstaben unterscheiden sich signifikant (P ≤ 0,05).

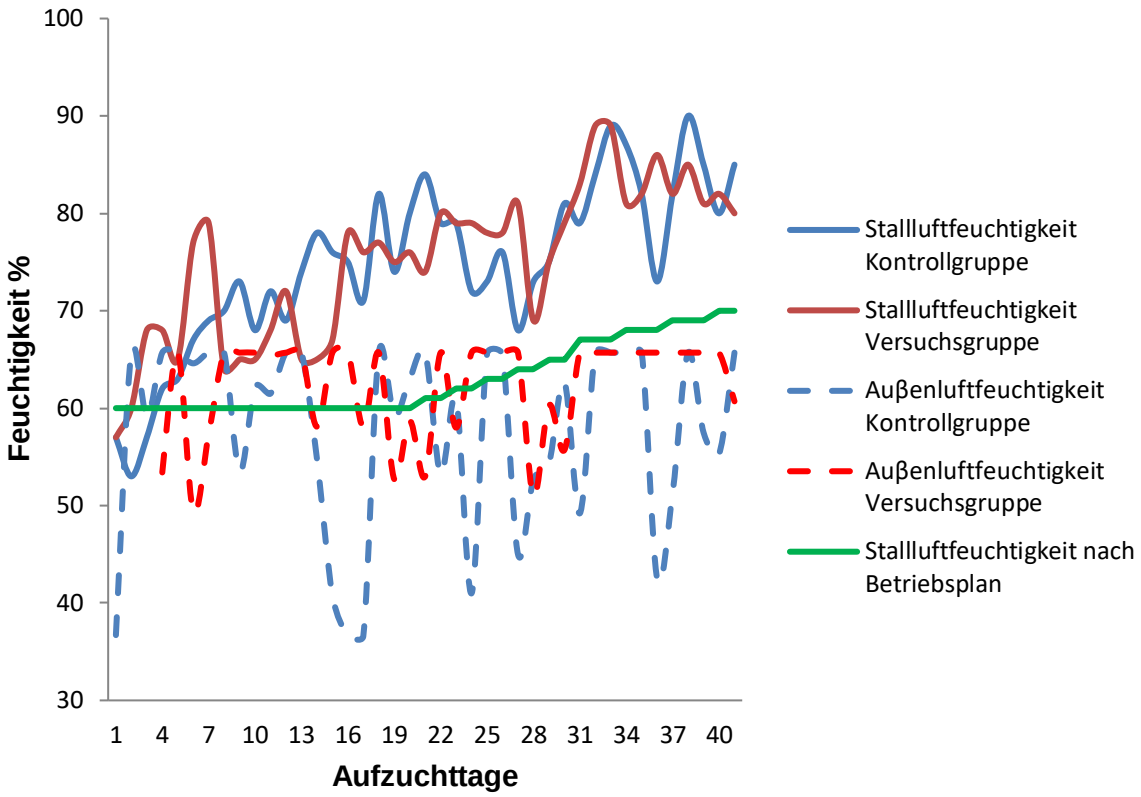

Abbildung 17: Relative Stall- und Außenluftfeuchtigkeit der Kontroll- und Versuchsgruppe während der gesamten Aufzuchtperiode.

Tabelle 9: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Stall- und Außenluftfeuchtigkeit der Kontroll- und Versuchsgruppe.

Aufzuchttage	Stallluftfeuchtigkeit %		Außenluftfeuchtigkeit %	
	Kontroll-gruppe	Versuchs-gruppe	Kontroll-gruppe	Versuchs-gruppe
1 – 10	64,64 ± 6,55	66,91 ± 8,86	62,94 ± 4,50	61,04 ± 6,69*
11 – 18	74,88 ± 4,02	71,88 ± 5,46	53,14 ± 13,16[a]	62,18 ± 5,14[b]
19 – 40	79,32 ± 5,85	80,36 ± 4,64	58,16 ± 8,38[a]	62,86 ± 4,69[b]

* Aufgrund technischer Fehler konnte die relative Außenluftfeuchtigkeit bei der Versuchsgruppe nur an den Tagen 03 – 10 erfasst werden.
Werte innerhalb einer Zeile mit unterschiedlichen hochgestellten Buchstaben unterscheiden sich signifikant (P ≤ 0,05).

4.2 Einstreuqualität

Das Einstreumaterial zeigte signifikante Änderungen hinsichtlich des Feuchtigkeits- und Verdichtungsgrades im Verlauf der Aufzucht in der Kontroll- und der Versuchsgruppe ($P < 0,01$; Abbildung 18). Jedoch wurden keine signifikanten Unterschiede der Einstreuqualität zwischen beiden Gruppen beobachtet ($P > 0,01$; Tabelle 10). Die Tabelle 11 zeigt die Messwerte der Einstreuqualität nach dem Welfare Quality® Assessment protocol for poultry getrennt nach Gruppen an den Tagen 0, 5, 11, 19, 30 und 40. In der Kontroll- sowie in der Versuchsgruppe war an allen Messstellen während der Aufzucht eine ständige Verschlechterung der Einstreuqualität zu beobachten. Dabei wurden Bewertungsstufen-Mittelwerte über 3 gegen Ende der Aufzucht erreicht.

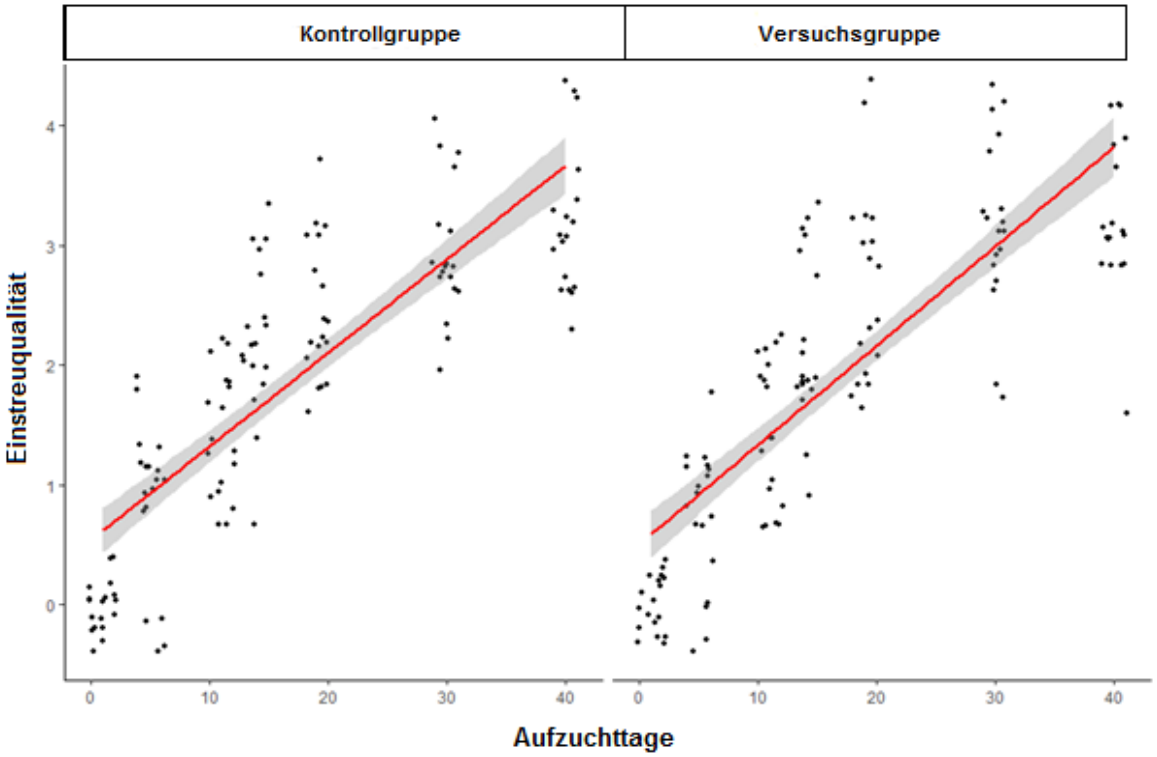

Abbildung 18: Messwerte der Einstreuqualität in der Kontroll- und Versuchsgruppe an den Tagen 0, 5, 11, 19, 30 und 40.

Tabelle 10: Modell der Einstreuqualität getrennt nach Gruppe und Tage

	Estimate	Stadardfehler	Z Werte	Pr(>|z|)
Intercept	-0,15	0,13	-1,18	0,24
Versuchsgruppe	-0,01	0,19	-0,03	0,24
Tag	0,04	0,01	7,96	0,00
Versuchsgruppe: Tag	0,00	0,00	0,19	0,85

Tabelle 11: Mittelwerte der Einstreuqualität an den einzelnen Messpunkten der Kontroll- und der Versuchsgruppe während der Aufzucht. Die Einstufung erfolgte nach der dem Welfare Quality® Assessment protocol for poultry.

Aufzuchttag	Kontrollgruppe		Versuchsgruppe	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
1	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,89	0,38	0,78	0,19
11	1,39	0,78	1,44	0,25
14	2,17	0,50	2,22	0,59
19	2,44	0,35	2,61	0,51
30	2,94	0,51	3,17	0,29
40	3,17	0,50	3,28	0,42

Tabelle 12: Mittelwerte der Einstreuqualität an den einzelnen Messpunkten der Kontroll- und der Versuchsgruppe in verschiedenen Stallbereichen während der Aufzucht. Die Einstufung erfolgte nach dem Welfare Quality® Assessment protocol for poultry.

Aufzucht-tage	Kontrollgruppe			Versuchsgruppe		
	Tränke-anlage	Futterungs-anlage	Mittelgang	Tränke-Anlage	Futterungs-anlage	Mittelgang
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,33	0,67	0,67	1,00	0,67	0,67
11	1,83	1,33	1,00	1,67	1,50	1,17
14	2,67	2,17	1,67	2,83	2,17	1,67
19	2,83	2,17	2,33	3,17	2,17	2,50
30	3,50	2,50	2,83	3,50	3,00	3,00
40	3,67	3,17	2,67	3,67	3,33	3,33

In beiden Gruppen wurde der höchste und damit schlechteste Durchschnittswert der Einstreuqualität am Ende der Aufzucht an den Tränkeanlagen gefolgt von den Fütterungsanlagen und dem Mittelgang erfasst (Tabelle 12). Am Tag 40 wurden die höchsten Werte, Einstufung 4, an der Tränkeanlage registriert, während die niedrigsten, Einstufung 2, im Mittelgang erfasst wurden. Die

schlechteste Einstreuqualität (Einstufung 4) wurde bereits ab Tag 19 in beiden Gruppen an den Tränkeanlagen festgestellt.

4.3 Lichtintensität und Lichtspektrum

Die Tabelle 13 zeigt die Lichtintensität der Kontroll- und Versuchsgruppe während der Aufzuchtperiode. Die tatsächlichen Lichtintensitäten der Versuchs- und Kontrollgruppe lagen lediglich geringfügig über dem Sollwert des geplanten Lichtprogramms. Die Abweichung der veranschlagten Lichtintensität betrug bei der Versuchsgruppe maximal 10 % und bei der Kontrollgruppe maximal 12 %. Die Tabelle 14 zeigt die Lichtintensität der Kontroll- und der Versuchsgruppe gemäß der Lichtperzeption des Haushuhnes (C-Lux) nach Prescott und Wathes (1999b). Bei der Versuchs- und Kontrollgruppe war die Lichtintensität in C-Lux ca. 16,90 % höher als die Lichtintensität in Lux.

Das Lichtspektrum der Kontroll- und Versuchsgruppe bei verschiedenen Lichtintensitäten ist in Abbildung 19 angegeben. Das Lichtspektrum in der Kontroll- und der Versuchsgruppe deckte einen Bereich zwischen 435 und 700 nm ab und wies keine signifikante Bestrahlung im Bereich des UV- und V-Lichts (320 - 450 nm) auf. Die Strahlungsdichte zwischen 435 und 450 nm betrug weniger als 0,001 W/m^2. Die Strahlungsdichte des Lichts zeigte zwei Spitzen bei 545 und 610 nm. Zwei weitere Spitzen in der Strahlungsdichte waren unter 20 und 15 Lux bei 580 und 630 nm zu sehen. Das Lichtspektrum bei 20 Lux wies die gleiche Strahlungsdichte in der Kontroll- und der Versuchsgruppe auf.

Tabelle 13: Tatsächliche Lichtintensität der Kontroll- und Versuchsgruppe in Lux. Morgen- und Abenddämmerungsperiode jeweils 30 Minuten. Lichtintensität in der Skotophase < 0,5 Lux.

Aufzuchttage	Lichtintensität (Lux)		Photoperiode (L= Licht, D= Dunkel)
	Kontrollgruppe	Versuchsgruppe	
1 – 2	20,05 ± 0,07	20,14 ± 0,40	23L:1D
3 – 4	20,13 ± 0,02	21,04 ± 0,20	22L:2D
5 – 6	20,09 ± 0,02	20,14 ± 0,31	20L:4D
7 – 10	20,12 ± 0,11	19,67 ± 0,40	18L:6D
11 – 13	21,41 ± 0,23	14,18 ± 0,20	18L:6D
14 – 18	20,10 ± 0,14	10,14 ± 0,22	18L:6D
19 – 32	20,14 ± 0,12	5,23 ± 0,10	18L:6D
33 – 35	21,94 ± 0,61	5,41 ± 0,32	23L:1D
36 – 38	19,45 ± 0,32	5,30 ± 0,13	18L:6D
39 – 41	19,31 ± 0,17	4,92 ± 0,21	23L:1D

Tabelle 14: Lichtintensität der Kontroll- und Versuchsgruppe gemäß der Lichtperzeption des Haushuhnes (C-Lux) nach Prescott und Wathes (1999b). Morgen- und Abenddämmerungsperiode jeweils 30 Minuten. Lichtintensität in der Skotophase < 0,5 Lux.

Aufzuchttage	Lichtintensität (C-Lux)		Photoperiode (L= Licht, D= Dunkel)
	Kontrollgruppe	Versuchsgruppe	
1 – 2	23,61 ± 0,08	23,71 ± 0,47	23L:1D
3 – 4	23,70 ± 0,02	24,77 ± 0,24	22L:2D
5 – 6	23,65 ± 0,02	23,71 ± 0,36	20L:4D
7 – 10	23,69 ± 0,13	23,16 ± 0,47	18L:6D
11 – 13	25,21 ± 0,27	16,70 ± 0,24	18L:6D
14 – 18	23,67 ± 0,16	11,94 ± 0,26	18L:6D
19 – 32	23,71 ± 0,14	6,16 ± 0,12	18L:6D
33 – 35	25,83 ± 0,72	6,37 ± 0,38	23L:1D
36 – 38	22,90 ± 0,38	6,24 ± 0,15	18L:6D
39 – 41	22,74 ± 0,20	5,79 ± 0,25	23L:1D

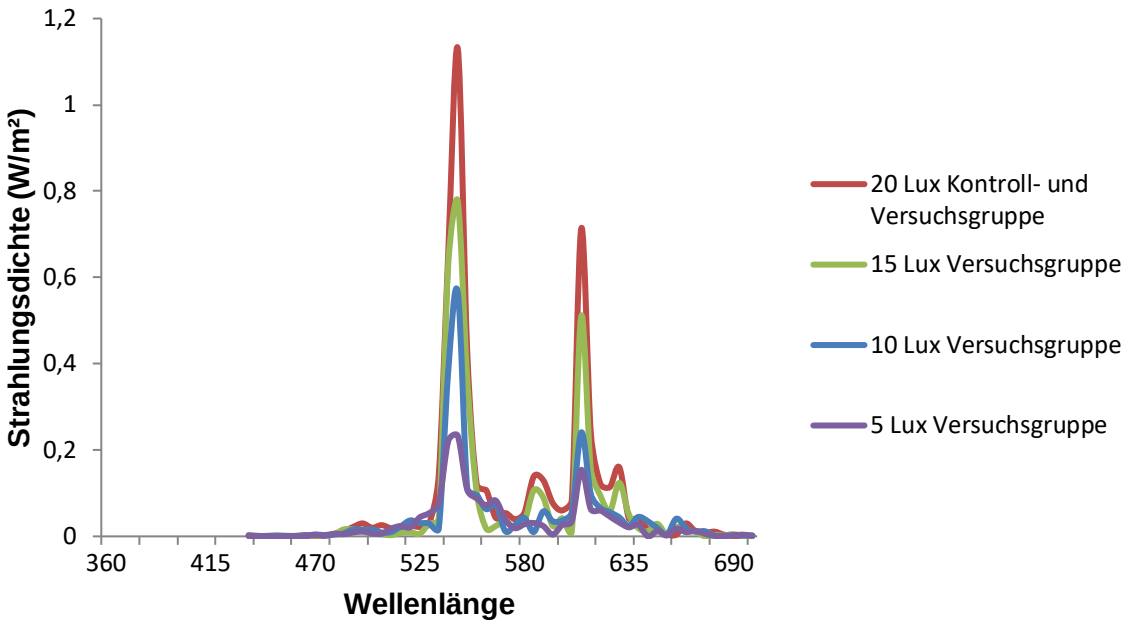

Abbildung 19: Lichtspektrum der Kontroll- und Versuchsgruppe bei verschiedenen Lichtintensitäten. Jeder erfasste Punkt stellt den Mittelwert von drei Messungen bei Wellenlängen zwischen 360 und 700 nm an 10 verschiedenen Messstellen im Stall dar.

4.4 Produktionsparameter und Mortalität

Bei der KM, FA und FV wurden zwischen Kontroll- und Versuchsgruppe prozentuale Abweichungen beobachtet (Tabelle 15). Die Tabelle 15 zeigt die erreichten Werte der KM, FA und FV am Ende jeder Versuchsperiode und die entsprechenden prozentualen Unterschiede bei jeder Versuchsperiode. Bei Auswertung der Daten mittels generalisiertem additiven gemischten Modell (GAMM) zeigten die Produktionsparameter, wie zu erwarten war, in beiden Gruppen je nach Alter einen Anstieg. Die Überlagerung der Kurven der Produktionsparameter der Kontroll- und Versuchsgruppe (Abbildungen 20, 21 und 22) verdeutlicht, in Abhängigkeit vom Aufzuchttag, die Unterschiede der Effekte auf die KM, FA und FV zwischen beiden Gruppen während der gesamten Aufzuchtperiode. Die größten Unterschiede zwischen beiden Gruppen wurden ab dem Tag 19 beobachtet.

Tabelle 15: Produktionsparameter der Kontroll- und Versuchsgruppe an den verschiedenen Versuchsperioden.

	Lichtintensitätsprogramm (Lux)		
Parameter[1]	Kontrollgruppe	Versuchsgruppe	Differenz (%)
KM (01-10)	0,24	0,25	4,00
KM (11-18)	0,41	0,43	4,56
KM (19-40)	1,76	1,94	9,28
KM (01 40)	2,42	2,62	8,01
Schlachtkörper	1,58	1,86	15,05
FA (01-10)	0,25	0,26	3,85
FA (11-18)	0,58	0,59	1,69
FA (19-40)	3,09	3,41	9,38
FA (01 40)	3,92	4,27	8,10
FV (01-10)	1,04	1,05	0,95
FV (11-18)	1,27	1,25	1,57
FV (19-40)	1,62	1,62	0,00
FV (01-40)	1,33	1,32	1,08

[1]KM = Körpermasse (kg); FA= Futteraufnahme (kg); FV= Futterverwertung (kg); Schlachtkörper (kg).

4.4.1 Körpermasse

Die GAM-Modellierung der Körpermasse zeigte, dass eine signifikante Beziehung zwischen den Aufzuchttagen und der Körpermasse besteht ($P < 0,01$; Tabelle 16). In Abbildung 20 ist zu sehen, dass der Effekt des Aufzuchttages auf die KM eine leicht konkave Kurve erzeugte. Darüber hinaus war der Effekt des Aufzuchttages auf die KM zwischen beiden Gruppen unterschiedlich. Hierbei zeigte die KM an den Tagen 1 - 10, 11 - 18 und 19 - 40 jeweils eine Erhöhung von 4,00, 4,56 und 9,28 % bei den Vögeln der Versuchsgruppe im Vergleich zu denen in der Kontrollgruppe, die unter einem konstanten Lichtintensitätsprogramm aufgezogen wurden (Tabelle 15). Die KM der Vögel der Versuchsgruppe war am Ende der Aufzucht (1 – 40) 8,01 % höher als die der Kontrollgruppe. In Bezug auf die im Schlachthof erhobenen Daten wurde festgestellt, dass die Versuchsgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe eine 15,05 % höhere Masse des Schlachtkörpers erreichte ($P < 0,01$; Tabelle 17).

Tabelle 16: Modell Körpermasse. Glatte Effekte (statistische Werte geglättet) des Tages getrennt nach Gruppen.

	Edf	Ref.df	F	p-Wert
Versuchsgruppe	8,31	8,31	26222,10	0,00
Kontrollgruppe	8,19	8,19	24061,63	0,00

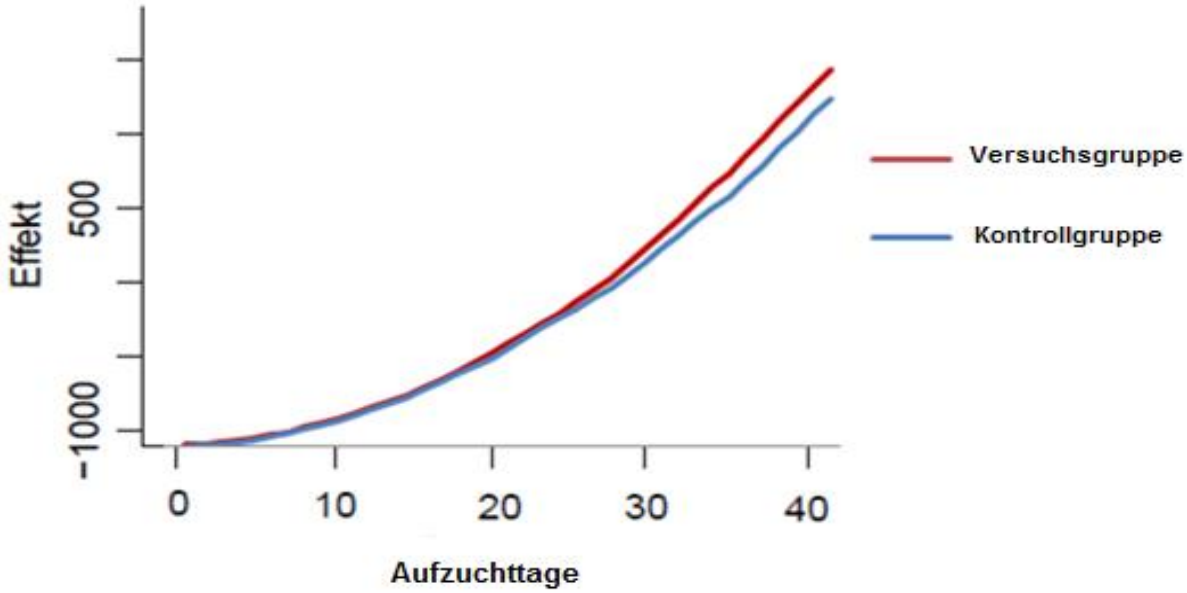

Abbildung 20: Modell der Körpermasse. Das GAM-Modell der Körpermasse zeigt einen signifikanten Effekt des Aufzuchttages auf die Körpermasse in beiden Gruppen. Dieser Effekt stellt sich bei den Tieren der Versuchsgruppe höher dar (blaue Linie: Kontrollgruppe mit konstanter Lichtintensität; rote Linie: Versuchsgruppe mit diskontinuierlicher Lichtintensität).

Tabelle 17: T-Test für die Masse des Schlachtkörpers.

	Masse (kg)			
Test	Kontrollgruppe	Versuchsgruppe	T	P- Wert
Normale Analyse	1,58	1,86	130.74	0,00

4.4.2 Futteraufnahme

Die GAM-Modellierung der Futteraufnahme ergab, dass eine signifikante Beziehung zwischen den Aufzuchttagen und der Futteraufnahme besteht ($P < 0,01$; Tabelle 18). Die Abbildung 21 veranschaulicht, dass der Effekt des Aufzuchttages eine lineare Beziehung mit der Futteraufnahme in beiden Gruppen aufwies. Dabei wurden prozentuale Unterschiede zwischen Kontroll- und

Versuchsgruppe während der Aufzucht beobachtet. Wie aus der Tabelle 15 hervorgeht, war die FA in der Versuchsgruppe an den Tagen 1 - 10 ca. 3,85 % höher als in der Kontrollgruppe. Bei den nachfolgenden Versuchsperioden zeigte die FA der Versuchsgruppe an den Tagen 11 - 18 eine Erhöhung von 1,69 %, und an den Tagen 19 - 40 war sie bei ca. 9,38 % höher als vergleichsweise bei der Kontrollgruppe. Die kumulative FA am Ende des Versuches (1 – 40) war 8,10 % höher in der Versuchs- als in der Kontrollgruppe.

Tabelle 18: Modell Futteraufnahme. Glatte Effekte (statistische Werte geglättet) des Tages getrennt nach Gruppen.

	Edf	Ref.df	F	p-Wert
Versuchsgruppe	1,00	1,00	1780,55	0,00
Kontrollgruppe	1,00	1,00	1839,65	0,00

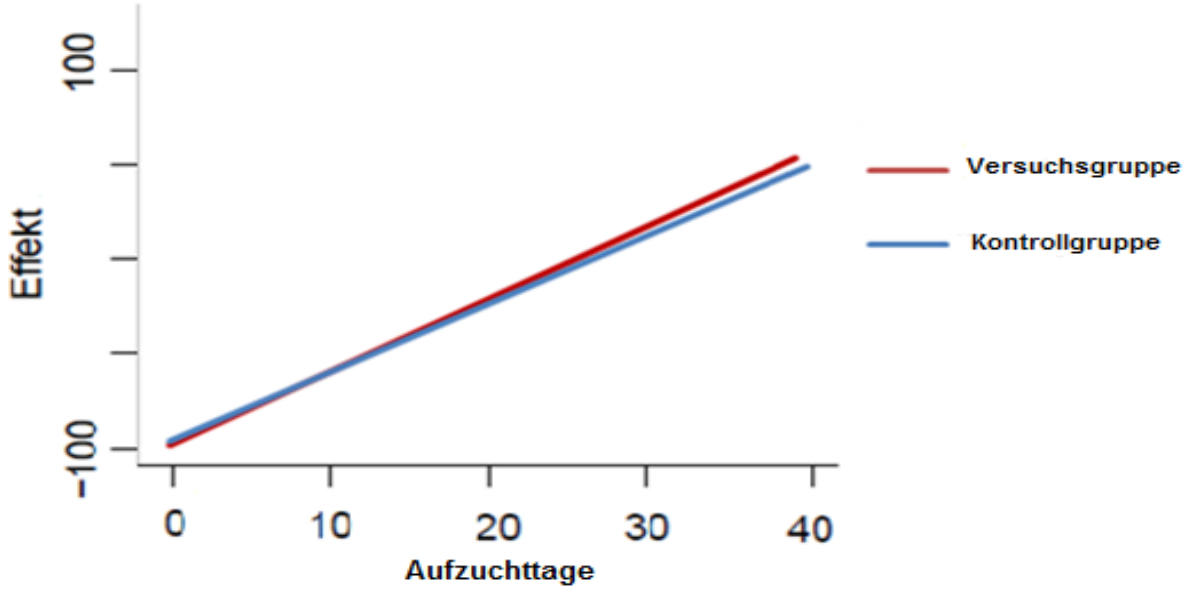

Abbildung 21: Modell der Futteraufnahme. Das GAM-Modell der Futteraufnahme zeigt einen signifikanten Effekt des Aufzuchttages auf die Futteraufnahme in beiden Gruppen. Dieser Effekt stellt sich bei den Tieren der Versuchsgruppe höher dar an den Tagen 1 – 10, 11 – 18 und 19 – 40 (blaue Linie: Kontrollgruppe mit konstanter Lichtintensität; rote Linie: Versuchsgruppe mit diskontinuierlicher Lichtintensität).

4.4.3 Futterverwertung

Die GAM-Modellierung der Futterverwertung zeigte, dass eine signifikante Beziehung zwischen den Aufzuchttagen und der FV besteht ($P < 0,01$;Tabelle 19). Der Effekt der Aufzuchttage auf die Futterverwertung wies eine tendenzielle Steigerung des Quotienten aus Futteraufnahme und Körpermasse über die Zeit in beiden Gruppen auf (Abbildung 22). Die FV war in beiden Gruppen an den Tagen 1 - 10 geringer im Vergleich zu den nachfolgenden Versuchsperioden (Tabelle 15). Ab dem Tag 1 stieg die FV-Wert bis ca. 1 am Tag 10 in der Kontroll- und Versuchsgruppe. An den Tagen 11 – 18 und 19 – 40 war die Steigerung der FV-Werte langsamer in beiden Gruppen im Vergleich zu den Tagen 1 – 10. Prozentuale Unterschiede der FV zwischen Kontroll- und Versuchsgruppe wurden beobachtet, jedoch waren diese an den Tagen 1 - 10, 11 - 18 und 19 - 40 nicht einheitlich. Aus der Tabelle 15 geht hervor, dass die FV an den Tagen 1 - 10 einen leichten Unterschied von ca. 0,95 % zwischen beiden Gruppen zeigte, dabei war die FV in der Versuchsgruppe höher als in der Kontrollgruppe. An den Tagen 11 - 18 war die FV um 1,57 % geringer in der Versuchs- als in der Kontrollgruppe, während an den Tagen 19 - 40 keine prozentuale Abweichung zwischen beiden Gruppen erfasst wurde. Bei Betrachtung der Gesamtzeit des Versuches (1 – 40) war die durchschnittliche FV der Versuchsgruppe 1,08 % niedriger als die der Kontrollgruppe.

Tabelle 19: Modell Futterverwertung. Glatte Effekte (statistische Werte geglättet) des Tages getrennt nach Gruppen.

	Edf	Ref.df	F	p-Wert
Versuchsgruppe	7,90	790	766,28	0,00
Kontrollgruppe	7,98	7,89	845,28	0,00

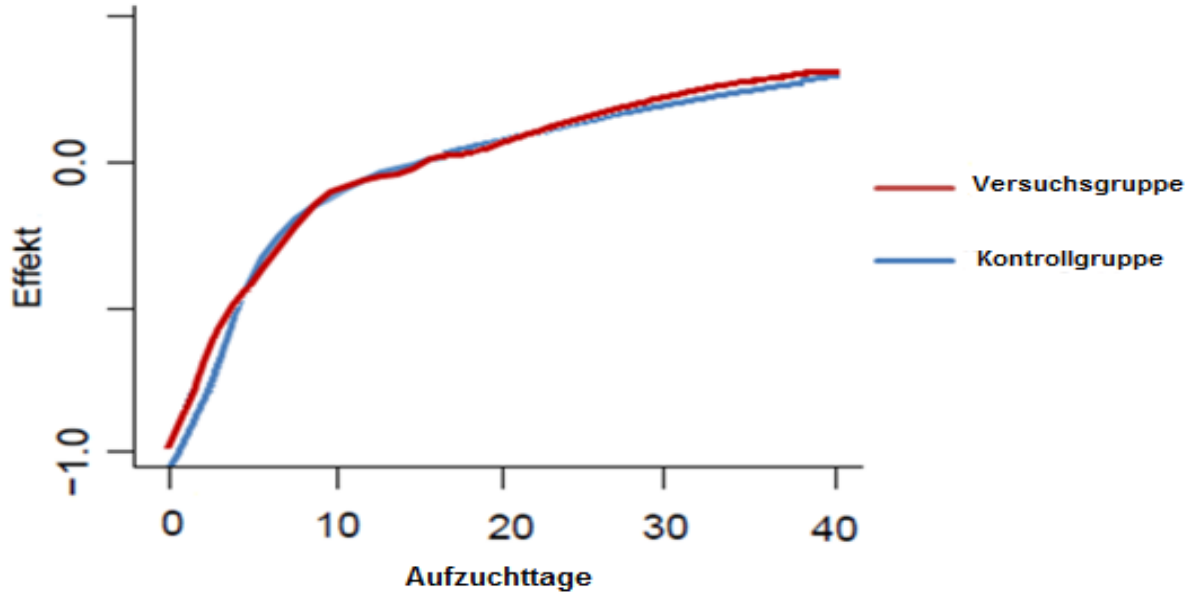

Abbildung 22: Modell der Futterverwertung. Das GAM-Modell der Futterverwertung zeigt einen signifikanten Effekt des Aufzuchttages auf die Futterverwertung in beiden Gruppen (blaue Linie: Kontrollgruppe mit konstanter Lichtintensität, rote Linie: Versuchsgruppe mit diskontinuierlicher Lichtintensität). Der Effekt bezeichnet hier das Ausmaß der Änderung der FV.

4.4.4 Mortalität

Die Mortalität, die in dieser Studie die verendeten und die selektierten Hühner umfasst, zeigte signifikante Unterschiede zwischen der Kontroll- und der Versuchsgruppe. Die verendeten Tiere umfassten die tot aufgefundenen Hühner, die in HKV und sonstige Todesursachen unterteilt wurden. Die selektierten Tiere waren diejenigen, die aufgrund von Beinschäden oder sonstigen Todesursachen, wie z.B Verletzungen oder schwaches Wachstum, getötet werden mussten. Die Selektion der Tiere gilt als eine Tierschutzmaßnahme in der Masthühnerproduktion, und sie gibt zusammen mit den verendeten Tieren relevante Informationen hinsichtlich des Gesundheitszustandes der Herde. Am Ende des Versuches wies die Kontrollgruppe eine höhere Gesamtmortalität (Tage 1 – 40) im Vergleich zur Kontrollgruppe auf ($P < 0,01$; Tabelle 20). Die Mortalität in den verschiedenen Versuchsperioden zeigte einen statistisch signifikanten Unterschied ausschließlich an den Aufzuchttagen 19 - 40 ($P < 0,01$; Tabelle 20) zwischen beiden Gruppen. Bei den Ursachen für die Mortalität wurde beobachtet, dass die Anzahl von verendeten Tieren (also „Tote“ und Tiere mit HKV) keinen signifikanten Unterschied an den Tagen 1 – 10 zeigte ($P > 0,01$). Später war die Prävalenz von HKV höher in der Versuchs- als in der Kontrollgruppe. Dieser Unterschied erwies sich an den Tagen 11 - 18 und 19 - 40 als statistisch signifikant ($P < 0,01$; Tabelle 20). Die Häufigkeit der

„Toten“ zeigte einen signifikanten Unterschied nur an den Tagen 19 - 40 ($P < 0,01$; Tabelle 20), und sie war höher in der Kontroll- als in der Versuchsgruppe. Bezüglich der selektierten Tiere (Tiere mit Beinschäden und sonstigen Erkrankungen) war eine vorübergehende Erhöhung der Prävalenz von Beinschäden in der Versuchsgruppe an den Tagen 1 - 10 im Vergleich zur Kontrollgruppe erkennbar (Tabelle 20). Jedoch wurden an den Tagen 11 - 18 und 19 - 40 bei diesem Parameter keine signifikanten Unterschiede zwischen Kontroll- und Versuchsgruppe beobachtet ($P > 0,01$; Tabelle 20). Bei Betrachtung der Prävalenz der sonstigen Todesursachen ergab sich, dass sie an den Tagen 1 - 10 in der Versuchsgruppe signifikant höher war als die der Kontrollgruppe. Jedoch war die Prävalenz der sonstigen Todesursachen an den darauffolgenden Tagen 11 - 18 und 19 - 40 höher in der Kontroll- als in der Versuchsgruppe ($P > 0,01$; Tabelle 20). Am Ende der Aufzucht wies die Prävalenz der Todesursachen an den Tagen 1 - 40 nur bei den „Toten“ und den sonstigen Todesursachen signifikante Unterschiede auf ($P < 0,01$; Tabelle 18), indem sie höher in der Kontroll- als in der Versuchsgruppe war. In Abbildung 23 ist die Prävalenz der Todesursachen in den verschiedenen Versuchsperioden graphisch dargestellt.

Tabelle 20: Mortalität und Todesursachen der Kontroll- und Versuchsgruppe an den verschiedenen Versuchsperioden. Die Mortaliltät ist als Prozentwert der Verluste in Bezug auf die Gesamtzahl der eingestallten Tiere angegeben. Bei den restlichen Werten stellt die Gesamtzahl der Tierverluste in dem entsprechenden Zeitraum die Bezugsgröße dar.

	Lichtintensitätsprogramm (Lux)	
Parameter (%)	Kontrollgruppe (Konstante Lichtintensität)	Versuchsgrupe (Diskontinuierliche Lichtintensität)
Mortalität (01-10)	0,54	0,62
Mortalität (11-18)	0,54	0,42
Mortalität (19-40)	1,25[a]	0,58[b]
Gesamtmortalität (01-40)	2,34[a]	1,69[b]
Tote (01-10)	67,50	56,48
Tote (11-18)	34,27	35,17
Tote (19-40)	50,23[a]	45,05[b]
Tote (01-40)	50,13[a]	46,89[b]
HKV (01-10)	21,88	20,37
HKV (11-18)	17,98[a]	42,76[b]
HKV (19-40)	34,10[a]	44,06[b]
HKV (01-40)	27,85	34,64
Beinschäden (01-10)	0,00[a]	3,24[b]
Beinschäden (11-18)	16,85	13,10
Beinschäden (19-40)	2,53	4,95
Beinschäden (01-40)	5,31	6,39
Sonstige (01-10)	10,63[a]	19,91[b]
Sonstige (11-18)	30,90[a]	8,97[b]
Sonstige (19-40)	13,13[a]	5,94[b]
Sonstige (01 40)	16,71[a]	12,08[b]

[a,b]Werte innerhalb einer Zeile mit unterschiedlichen hochgestellten Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($P \leq 0,01$).
HKV: Herz-Kreislauf-Versagen.

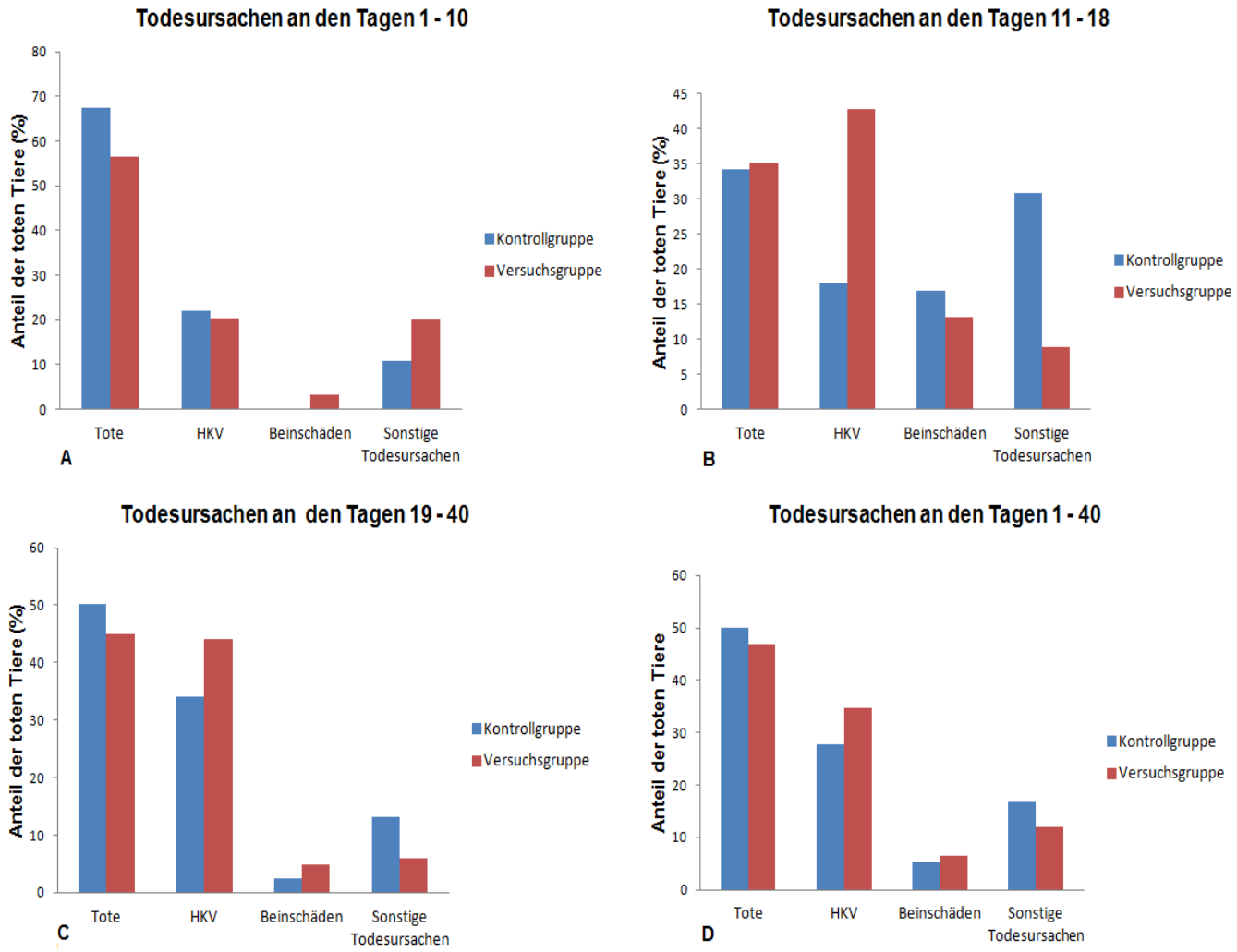

Abbildung 23: Prozentuale Anteile der Todesursachen in Bezug auf die Mortalität jeder Versuchsperiode.

4.5 Tierschutzparameter

4.5.1 Pododermatitis

Bei der Auswertung dieses Parameters wurden im Schlachthof 200 Tiere pro Durchgang betrachtet. Gemäß den erhobenen Daten zeigte die Prävalenz von Pododermatitis einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen Kontroll- und Versuchsgruppe (Tabelle 21). Vögel der Versuchsgruppe, die einem diskontinuierlichen Lichtintensitätsprogramm ausgesetzt waren, wiesen eine höhere Prävalenz an Pododermatitis auf ($P < 0,01$). Diese Hautveränderung war ca. zweifach höher in der Versuchsgruppe im Verglelich zur Kontrollgruppe. Außerdem ist zu bemerken, dass Pododermatits in beiden Gruppen die häufigste Hautveränderung darstellte (Abbildung 24).

4.5.2 „Hock burn“

Bei der Auswertung dieser Parameter wurden im Schlachthof 200 Tiere pro Durchgang betrachtet. Die Prävalenz von „hock burn“ (Dermatitis an den Fersenbeinhöckern) zeigte einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen Kontroll- und Versuchsgruppe ($P < 0,01$; Tabelle 21). In ähnlicher Weise wie Pododermatitis, war die Prävalenz von „hock burn“ höher in der Versuchsgruppe, die einem diskontinuierlichen Lichtintensitätsprogramm ausgesetzt war ($P < 0,01$). Die Häufigkeit von „hock burn“ war ca. vierfach höher in der Versuchsgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe. „Hock burn“ stellte die zweit-häufigste Hautveränderung in der Kontroll- und Versuchsgruppe dar (Abbildung 24).

4.5.3 Kontaktdermatitis an der Brust

Hinsichtlich der Kontaktdermatitis an der Brust wurden bei Betrachtung von 200 Tieren pro Durchgang keine Fälle während des Schlachtvorgangs in der Kontroll- und Versuchsgruppe erfasst (Tabelle 21).

4.5.4 Verkratzungen

Für die Auswertung dieser Parameter wurden im Schlachthof 100 Tiere pro Durchgang betrachtet. Dabei wurde festgestellt, dass die Prävalenz der Verkratzungen der Kategorien 1 und 2 keinen signifikanten Unterschied zwischen Kontroll- und Versuchsgruppe zeigte (P > 0,01; Tabelle 21). Andererseits war der Anteil an Verkratzungen der Kategorie 3 signifikant höher in der Kontrollgruppe, die unter einer konstanten Lichtintensität gehalten wurde, im Vergleich zur Versuchsgruppe (P < 0,01; Tabelle 21).

Tabelle 21: Tierschutzparameter der Kontroll- und Versuchsgruppe im Schlachthof.

	Lichtintensitätsprogramm (Lux)	
Tierschutzparameter (%)	Kontrollgruppe	Versuchsgruppe
Pododermatitis[1] (n = 200)	8,04[a]	17,90[b]
„Hock burns“[1] (n = 200)	2,68[a]	10,44[b]
Verkratzungen Kategorie 1 und 2[1] (n = 100)	0,06	0,09
Verkratzungen Kategorie 3[1] (n = 100)	1,40[a]	0,26[b]
Kontaktdermatitis an der Brust (n = 200)	0	0

[1]Korrigierter Chi-Quadrat-Test nach Yates (Kontinuitätskorrektur).
[a,b]Werte innerhalb einer Zeile mit unterschiedlichen hochgestellten Zeichen unterscheiden sich signifikant (P ≤ 0,01).
n = Tierzahl pro Gruppe.

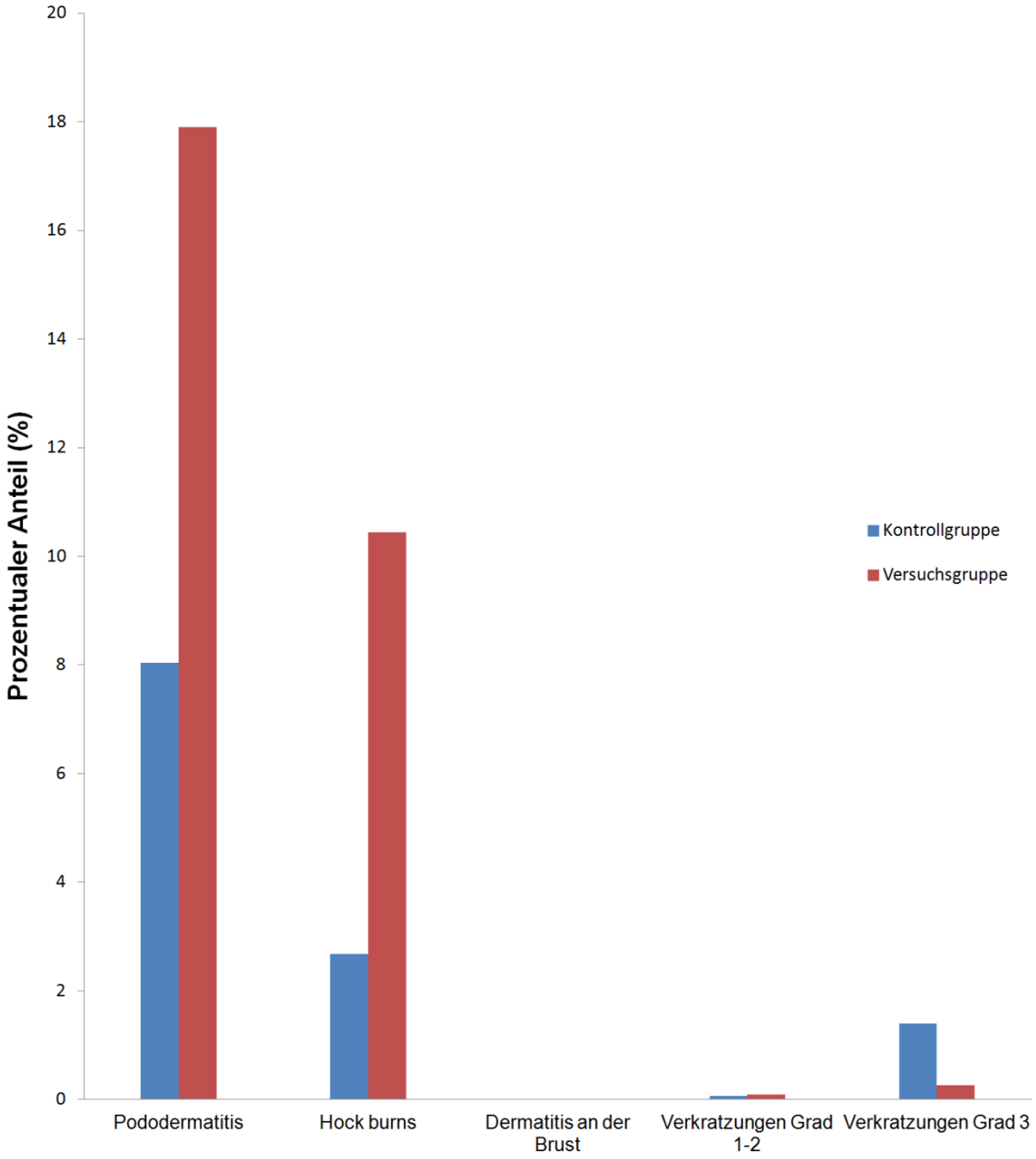

Abbildung 24: Prozentualer Anteil der im Schlachthhof erfassten Verletzungen in der Kontroll- und Versuchsgruppe.

5 Diskussion

Masthühner, welche unter kommerziellen Intensivbedingungen aufgezogen werden, leben in einer Umwelt, in welcher nahezu alle Umweltparameter standardisiert und künstlich beeinflusst werden. Sie stellen in ihrer Gesamtheit ein System dar, in welchem die Einzelparameter sich in großem Umfang wechselweise beeinflussen und entsprechende Auswirkungen auf das Tier haben. Die im Folgenden diskutierten Umweltparameter müssen daher in ihrer Gesamtheit und nicht solitär gesehen werden.

5.1 Kontrolle der Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Einstreuqualität

5.1.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit im Stall stellen wichtige Umweltfaktoren dar, die die Produktionsparameter, den Tierschutz und die Mortalität von Masthühnern beeinflussen (Dozier et al., 2006; Estrada-Pareja et al., 2007; Hulzebosch, 2004; Olanrewaju et al., 2010; Purswell et al., 2012; Reece & Lott, 1982; Tolentino et al., 2008). In der vorliegenden Untersuchung wurden Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit vom Landwirt gezielt an die Bedürfnisse der Tiere angepasst, um diese Parameter entsprechend der von der Brüterei empfohlenen Richtwerte einzuhalten und dadurch die klimatischen Unterschiede zwischen der Kontroll- und der Versuchsgruppe zu minimieren.

Es wurde beobachtet, dass, obwohl die Lufttemperatur im Stall die festgelegten Richtwerte überschritt, sich an den Tagen 1 - 10, 11 - 18 und 19 - 40 keine statistisch signifikanten Unterschiede in der durchschnittlichen Lufttemperatur im Stall zwischen der Kontroll- und der Versuchsgruppe zeigten. Aus diesem Grund konnten mögliche Einflüsse der Stalllufttemperatur auf die untersuchten Produktions- und Tierschutzparameter ausgeschlossen werden. Die Lufttemperatur im Stall wurde nicht in hohem Maße durch Schwankungen der Außenlufttemperatur beeinflusst. Dies ist auf die Konstruktionseigenschaften des Stalls (Wärmeisolationsbedingungen), auf das betriebseigene Stallmanagement sowie auf das Belüftungs- und Heizungssystem im Stall zurückzuführen. Die Differenz der Stalllufttemperatur gegenüber den Richtwerten des Betriebs erhöhte sich gegen Ende der Aufzucht. Die Stalllufttemperatur erreichte im Durchschnitt an den Tagen 19 - 40 in der Kontroll- und der Versuchsgruppe ca. 25,12 °C (21,64 °C Richtwert). Dieser Temperaturanstieg im Stall könnte mit dem Anstieg der Eigenwärmeproduktion der Masthühner zusammenhängen

(Dozier et al., 2006; Purswell et al., 2012; Reece & Lott, 1982). Diesbezüglich erwähnten Reece und Lott (1982), dass die Masthühner ca. 3,2 W/kg an fühlbarer Wärme erzeugen. Wenn die Vögel sich der Mastendmasse nähern, kann die Eigenwärmeproduktion etwa 80 % der gesamten Wärmebelastung im Stall ausmachen. Dozier et al. (2006) und Purswell et al. (2012) zeigten, dass eine hohe Lufttemperatur in Zusammenhang mit einer hohen relativen Luftfeuchte das Wachstum der Vögel negativ beeinflusst, wobei dieser Effekt umso höher war, je höher die Körpermasse der Vögel ist. Aus diesem Grund sieht der Klimamanagementplan gegen Ende der Aufzucht eine Erhöhung der Lüftungsrate vor, um heiße und feuchte Luft aus dem Stall abzuführen. Dieses Management wurde sowohl in der Kontroll- als auch in der Versuchsgruppe angewendet, jedoch konnte die vom Lüftungssystem erzeugte Lüftungsrate die Temperatur insbesondere an den Tagen 19 – 40 nicht auf die gewünschten Werte (ca. 20 - 24 °C) absenken. Dies könnte auf eine zu niedrige Einstellung der Lüftungsrate zurückzuführen sein. Die hohe Lufttemperatur könnte ein wichtiger Stressfaktor sowohl in der Kontroll- als auch in der Versuchsgruppe sein, da sie Dehydratation, hämodynamische Veränderungen (Arad et al., 1985), erhöhte Atemfrequenz und respiratorische Alkalose verursachen kann (Marder & Arad, 1989; Olanrewaju et al., 2010).

5.1.2 Luftfeuchtigkeit

Die relative Stallluftfeuchtigkeit zeigte tägliche Schwankungen mit einer Tendenz zur Zunahme während des Aufzuchtverlaufs sowohl in der Kontroll- als auch in der Versuchsgruppe. Die relative Stallluftfeuchtigkeit lag während der gesamten Aufzuchtperiode über den vom Betrieb festgelegten Richtwerten. Es wurden jedoch keine statistisch signifikanten Unterschiede bei den Mittelwerten der Stallluftfeuchtigkeit zwischen der Kontroll- und der Versuchsgruppe an den Tagen 1 - 10, 11 - 18 und 19 - 40 beobachtet. Aus diesem Grund konnte ein möglicher Einfluss der relativen Stallluftfeuchtigkeit auf die untersuchten Produktions- und Tierschutzparameter nicht nachgewiesen werden. Die relative Stall- und Außenluftfeuchtigkeit zeigte tägliche Schwankungen während der gesamten Aufzuchtperiode. In diesem Zusammenhang beschrieben Hermans et al. (2006) und Dunlop et al. (2016a), dass die Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit im Stall zum Teil aus den Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit der zugeführten Frischluft resultieren. Ist die Frischluft relativ trocken, kann sie im Stall relativ viel Feuchtigkeit aufnehmen, die dann durch das Lüftungssystem nach außen transportiert wird. Des Weiteren wurde im Verlauf der Aufzucht eine ständig steigende relative Luftfeuchtigkeit im Stall beobachtet. Dies erklärt sich aus mehreren Faktoren, die miteinander wechselwirken. In diesem Sinn ist die niedrige relative Stallluftfeuchtigkeit, die zu Beginn der Aufzucht erfasst wurde, auf die erhöhte Einstalltemperatur und

trockene Einstreu zurückzuführen (Berk, 2014; Corkery et al., 2013). Darüber hinaus wurde in der vorliegenden Studie beobachtet, dass die Zunahme der Stallluftfeuchtigkeit in Zusammenhang mit einer Abnahme der Stalllufttemperatur auftrat. Der Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit bei sinkender Stalllufttemperatur im Verlauf der Aufzuchtperiode kann zum Teil auf die in der Ausatemluft der Tiere enthaltene Feuchtigkeit zurückgeführt werden (Olanrewaju et al., 2010; Yahav et al., 2004). Das Hecheln bei Vögeln ist als wirkungsvolle Maßnahme bekannt, um die Körpertemperatur abzusenken (Robertshaw, 2006), da im Gegensatz zu Säugetieren Schweißdrüsen bei Vertretern der Klasse Aves fehlen. Masthühner können als homöotherme Tiere die Körpertemperatur weitgehend konstant halten, indem sie einem Anstieg der Körpertemperatur mittels Erhöhung der Wärmeverluste durch Verdunstung entgegenwirken (Robertshaw, 2006; Yahav et al., 2004). Dies Fähigkeit hängt direkt mit dem Alter und der Körpermasse der Vögel zusammen (Olanrewaju et al., 2010). Dieser Zusammenhang kann auf altersabhängige Unterschiede in der Beatmungsrate zurückzuführen sein oder die Folge eines erhöhten Stoffwechselbedarfs bei den größeren Vögeln widerspiegeln (Korte et al., 1999). Andererseits erhöht die Akkumulation der Ausscheidungen der Vögel während der Aufzucht den Feuchtigkeitsgehalt der Einstreu, was durch Verdunstung zur Erhöhung der relativen Stallluftfeuchtigkeit beiträgt (Huff et al., 1984). In diesem Zusammenhang beobachteten Weaver und Meijerhof (1991) und Hermans et al. (2006) eine positive Korrelation zwischen der Luftfeuchtigkeit und dem Feuchtigkeitsgehalt der Einstreu. Da die Verdunstung ein Prozess ist, der einem Feuchtigkeitsgradienten folgt, ist es bei niedriger relativer Luftfeuchtigkeit möglich, dass mehr Feuchtigkeit aus der Einstreu verdunsten kann (Hermans et al. 2006). Mit der allmählichen Zunahme der Luftfeuchtigkeit nimmt jedoch die Verdunstungsrate aus der Einstreu ab (Dunlop et al., 2016a). Außerdem wurde beobachtet, dass der Anstieg der Lüftungsrate gegen Ende der Aufzuchtperiode nicht ausreichte, um die relative Stallluftfeuchtigkeit innerhalb der Richtwerte von 60 – 70 % zu halten. Die Zunahme der Luftfeuchtigkeit über 70 % kann bei Masthühnern Stress erzeugen, da dies den Wärmeverlust der Vögel durch Verdunstung erschwert (Olanrewaju et al., 2010; Marder & Arad, 1989; Webster & King, 1987) und trägt zu einer erheblichen Verschlechterung der Einstreu bei (Dunlop et al., 2016a).

5.1.3 Einstreuqualität

Die Einstreuqualität ist ein wichtiger Faktor, der die Gesundheit, den Tierschutz und die Produktionsparameter von Masthühnern erheblich beeinflusst (Deep et al., 2010; Ekstrand et al., 1998; Haslam et al., 2007; Shepherd & Fairchild, 2010; Škrbić et al., 2015). In der vorliegenden Untersuchung wurde darauf geachtet, in beiden Gruppen eine vergleichbare

Einstreuqualität beizubehalten, indem das gleiche Einstreumaterial, Futtermittel, Wasser- und Futteranlagen sowie die gleiche relative Stallluftfeuchtigkeit verwendet wurden, damit sich diese nicht als Störfaktoren auswirken.

Die Einstreuqualität zeigte im Verlauf der Aufzucht in der Kontroll- und in der Versuchsgruppe eine erhebliche Verschlechterung. Es waren jedoch wie erwartet keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Gruppen zu erkennen. Sowohl in der Kontroll- als auch in der Versuchsgruppe wurden Dinkelspelzen als Einstreumaterial eingesetzt. Daher waren ihre Eigenschaften, wie Wasserspeicherkapazität, Trocknungsraten, Krümeligkeit und Wasseraktivität in beiden Gruppen ähnlich (Dunlop et al., 2016a). Darüber hinaus wurden die Kontroll- und die Versuchsgruppe mit dem gleichen Futter versorgt, da es den Feuchtigkeitsgehalt der Einstreu durch Veränderung des Wassergehalts im Kot beeinflussen kann (Hermans et al., 2006). Außerdem bestand kein statistisch signifikanter Unterschied bei der Stalllufttemperatur und der relativen Stallluftfeuchtigkeit zwischen der Kontroll- und der Versuchsgruppe. Laut Angabe verschiedener Autoren steht die Einstreuqualität in engem Zusammenhang mit dem Einstreumaterial, der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit (Dunlop et al., 2016a; Hermans et al., 2006; Lolli et al. 2010). Aus diesen Gründen kann ein möglicher Einfluss dieser Faktoren auf die Einstreuqualität der Kontroll- und der Versuchsgruppe ausgeschlossen werden, da bei den genannten Parametern zwischen beiden Gruppen keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten. Dies scheint darauf hinzudeuten, dass die Einstreuqualität nicht mit den beobachteten Unterschieden in den Produktions- und Tierschutzparametern zwischen der Kontroll- und der Versuchsgruppe in Zusammenhang steht.

Die in der vorliegenden Studie beschriebene allmähliche Verschlechterung der Einstreuqualität in der Kontroll- und der Versuchsgruppe steht im Einklang mit den Befunden verschiedener Autoren, die allerdings unter Verwendung unterschiedlicher Einstreumaterialien ebenfalls einen signifikanten Anstieg des Feuchtigkeitsgehalts der Einstreu während der Aufzuchtperiode erfassten und infolgedessen eine Verschlechterung der Einstreuqualität gegen Ende der Untersuchungen beobachteten (Bilgili et al., 1999; Dunlop et al., 2016b; Hermans et al., 2006; Kaukonen et al,. 2016; Loch et al., 2011; Weaver & Meijerhof, 1991). Die allmähliche Erhöhung des Feuchtigkeitsgehalts der Einstreu im Verlauf der Aufzucht in beiden Gruppen könnte auf die Ansammlung von Ausscheidungen der Vögel und auf die Kondenswasserbildung aufgrund der Zunahme der relativen Stallluftfeuchtigkeit zurückzuführen sein (Dunlop et al., 2016a; 2016b; Hermans et al., 2006; Weaver & Meijerhof, 1991). Darüber hinaus ist auch anzumerken, dass mit zunhemender Körpermasse der größer werdenden Tiere auch die Ausscheidungen steigen, was zu einer vermehrten Ansammlung von Exkrementen und einem höherem Feuchtigkeitgehalt der Einstreu führt. Des Weiteren kann der Feuchtigkeitsgehalt

der Einstreu mit der Besatzdichte und der Belüftung auf Bodenebene in Verbindung stehen (Lolli et al. 2010). Aufgrund der schrittweisen Zunahme der Besatzdichte durch die Erhöhung der Körpermasse der Hühner während der Aufzucht wird die gesamte Bodenfläche des Stalles mit Vögeln bedeckt, weswegen eine effektive Belüftung in Bodennähe nicht mehr sichergestellt werden kann (Lolli et al., 2010). Laut Lolli et al. (2010) können diese Umstände eine Erhöhung des Feuchtigkeitsgehalts der Einstreu verursachen. Diesbezüglich wurde die Kontroll- und die Versuchsgruppe während der Aufzuchtperiode mit ähnlicher Besatzdichte gehalten, sodass eine mögliche Auswirkung dieser Variablen auf die Einstreuqualität in beiden Gruppen ausgeschlossen werden kann.

Die Einstreuqualität wurde an den Tränke- und Fütterungsanlagen sowie am Mittelgang des Stalles erfasst, da beobachtet wurde, dass der Vernässungs- und Verdichtungsgrad des Einstreumaterials in verschiedenen Bereichen des Stalles unterschiedlich sein kann (Bessei, 1993; Boďo & Gálik, 2018; Kaukonen et al., 2016). Auf diese Weise konnte die Einstreuqualität im Stall während der Aufzucht repräsentativ ermittelt werden. Der höchste Feuchtigkeitsgehalt der Einstreu konnte in beiden Gruppen neben den Tränke- und Fütterungsanlagen erfasst werden, wohingegen die niedrigsten Werte am Mittelgang registriert werden konnten. Dies könnte durch Wasser- und Futterverluste an den Tränke- und Fütterungsanlagen verursacht werden, was zu einem erhöhten Feuchtigkeitsgehalt und Verklebung des Einstreumaterials beiträgt (Dunlop et al., 2016a; Hermans et al., 2006; Kaukonen et al., 2016). Außerdem erwähnten Kaukonen et al. (2016) sowie Boďo und Gálik (2018), dass, im Vergleich zu anderen Stallbereichen, an den Tränke- und Fütterungsanlagen eine größere Menge an Ausscheidungen der Vögel vorhanden ist, was die Feuchtigkeit des Einstreumaterials in diesen Bereichen zusätzlich erhöht.

5.2 Lichtverhältnisse

5.2.1 Lichtintensität

In der Geflügelhaltung stellt die Lichtintensität einen der wichtigsten Managementfaktoren dar, welche die Produktionsparameter und Aspekte des Tierwohles von Masthühnern durch die Modulation verschiedener physiologischer Prozesse maßgeblich beeinflusst (Apeldoorn et al., 1999; Korbel, 2007; Kristensen et al., 2004; Lewis & Morris, 1998; Olanrewaju et al., 2006). In der Literaturübersicht der vorliegenden Untersuchung wurden die Mechanismen der subjektiven Wahrnehmung der Lichtintensität bei Hühnern ausführlich beschrieben. Darüber hinaus wurden

relevante Forschungsergebnisse zusammengefasst, die unter Verwendung unterschiedlicher Lichtintensitäten, Lichtspektren und Photoperioden auf die Produktions- und Tierschutzparameter von konventionell gehaltenen Masthühnern festgestellt wurden.

In der vorliegenden Untersuchung erfüllte die Lichtintensität die Funktion der unabhängigen Variable, gemäß der die Reaktionen der abhängigen Variablen (Produktions- und Tierschutzparameter), erfasst wurden. Hierzu lag die Lichtintensität der Kontrollgruppe bei den in der TierSchNutztV §19 Absatz 1 Statz 1 Nummer 4 vorgeschriebenen 20 Lux. Die Versuchsgruppe wurde unter einem diskontinuierlichem Beleuchtungsprogramm mit stufenweiser Reduktion der Lichtintensität (20 bis 5 Lux) aufgezogen.

Es wurde beobachtet, dass die tatsächliche Lichtintensität eine Abweichung im Vergleich zur geplanten Lichtintensität während der gesamten Aufzuchtperiode aufwies. Die Abweichungen in Bezug auf die Mittelwerte der Lichtintensität waren bei der Versuchsgruppe maximal +/- 10 % und bei der Kontrollgruppe maximal +/- 12 %. Die Unterschiede zwischen der tatsächlichen und der geplanten Lichtintensität waren durch die Schwierigkeit bedingt, die Helligkeit aller Lichtquellen im Stall gleich einzustellen. Dies könnte auf die unterschiedliche Nutzungsdauer und den dadurch bedingten unterschiedlichen photochemischen Abbaugrad der Leuchtstoffbeschichtung der verwendeten Leuchtmittels zurückzuführen sein (Lehmann, 1983). Die Abnahme der Lichtintensität infolge der Nutzungsdauer einer Lichtquelle wird als "Lichtstromrückgang" bezeichnet. (Aman et al., 2013; Royer, 2014). Aman et al. (2013) erwähnten, dass Leuchtstofflampen mit einer zu erwartenden Lebensdauer von 10.000 Betriebsstunden im Allgemeinen bis zu 20 % ihres ursprünglichen Lumen-Outputs verlieren, während sich bei hochqualitativen Leuchtstofflampen (wie T8 und T5) in 20.000 Betriebsstunden ihr Lumen-Output nur um 5 % verringert. Nach Angaben des Herstellers der Lichtanlage (LAE-Anlagenbau GmbH, Cuxhaven, Deutschland) beträgt die durchschnittliche Lebensdauer der verwendeten T8-Leuchtstoffröhren ca. 10.000 – 18.000 Betriebsstunden (bis zu ca. 2,74 Jahre bei 18 Betriebsstunden pro Tag) (LAE, 2017). Aufgrund dieser Angaben waren die Leuchtmittel zum Zeitpunkt der der Untersuchung im Durchschnitt mehr als 15.000 Stunden in Betrieb und einige von ihnen wurden aufgrund von Betriebsstörungen vor Untersuchungsbeginn ausgetauscht. Der Lichtstromrückgang könnte zu Abweichungen im Lumen-Output der verschiedenen Leuchtmittel im Stall geführt haben, was sich in Abweichungen von bis zu 0,60 Lux vom Durchschnittswert der Lichtintensität widerspiegelte. Wünschenswert wäre für eine Untersuchung unter exakt standardisierten Bedingungen der Betrieb von Leuchtmitteln gleichen Alters (Nutzungsdauer). Die vorliegenden Untersuchungen wurden jedoch unter Feldbedingungen durchgeführt, in welcher diese Bedingungen nicht geschaffen werden können.

Die Beobachtungen von Aman et al. (2013), Lehmann (1983) und Royer, (2014) bezüglich des Verhältnisses zwischen der Nutzungsdauer der Lichtquellen und ihrem Lumen-Output deuten darauf hin, dass dieser Faktor sowohl unter Betriebs- als auch unter Versuchsbedingungen berücksichtigt werden sollte, um eine homogene Beleuchtung im Stall und eine angemessene Einstellung der Lichtintensität in Bezug auf das geplante Helligkeitsniveau zu erreichen.

Hinsichtlich der gängigen Lichtmessverfahren in Geflügelställen sei darauf hingewiesen, dass diese Messmethoden ursprünglich für die Lichtmessung in Gebäuden wie Büros, Krankenhäusern und Sporthallen, in denen die Tätigkeiten und Sehaufgaben von Menschen genau festgelegt sind, konzipiert wurden (Prescott et al., 2004). In diesem Zusammenhang erwähnten Prescott et al. (2004), dass es schwierig ist, die Anforderungen an die visuelle Perzeption eines Huhnes in einem Geflügelstall festzulegen. Daher ist die Umsetzbarkeit dieser Messmethoden in der Geflügelindustrie beschränkt. Trotzdem gibt es einige Richtlinien, die, wie in der vorliegenden Untersuchung, allgemein angewendet werden können. Die erste von ihnen betrifft die Höhe, in der die Lichtmessung durchgeführt werden soll. Die empfohlene Höhe beträgt 25 cm über dem Boden (ungefähre Augenhöhe eines ausgewachsenen Masthuhnes). Bezüglich der Orientierung des Sensors beschrieben Prescott et al. (2004) drei Methoden:

1) der Sensor kann horizontal in Bezug zum Boden gehalten werden.
2) der Sensor kann in Richtung der maximalen Beleuchtungsstärke geneigt sein, die üblicherweise in der Richtung der nächsten Lichtquelle liegt.
3) sechs Messungen werden von jedem Messpunkt parallel zu den Flächen eines virtuellen Würfels durchgeführt. Der Mittelwert aus den sechs Messungen stellt die Lichtintensität an einem Messpunkt dar.

Jedes dieser Verfahren kann erhebliche unterschiedliche Lichtintensitätswerte erbringen, sodass es in seiner Anwendung einheitlich erfolgen muss. In diesem Zusammenhang wurde in der vorliegenden Untersuchung die Lichtintensität durch eine horizontale Beleuchtungsstärkemessung 25 cm über dem Boden direkt unter den Lichtquellen, an den Stellen der Tränk- und Fütterungsanlagen sowie am Mittelgang des Stalles gemessen. Zu diesem Zweck wurde der Lichtmesser senkrecht zum Boden orientiert. Auf diese Weise lässt sich die Lichtintensität von einem repräsentativen Bereich der Bodenoberfläche des Stalles erfassen. Durch die einheitliche Anwendung dieses Messverfahrens wurde eine hohe Reproduzierbarkeit der Lichtintensitätswerte erzielt.

Es ist jedoch erforderlich, die Sehaufgaben der Hühner in Verhaltensstudien genau zu identifizieren, damit die Lichtmessverfahren in Geflügelställen verbessert werden können. Außerdem dürfen hierbei die Beschränkungen der

Helligkeitsmessung in der Einheit Lux nicht übersehen werden, da diese photometrische Einheit auf die Helligkeitswahrnehmung des menschlichen Auges, nicht jedoch auf die des Auges von Hühnern ausgerichtet ist. In diesem Zusammenhang ist die Verwendung einer an die spezifische spektrale Perzeption der Vögel angepassten Einheit von größerer Bedeutung, wie verschiedene Autoren gefordert haben (Korbel, 2008; Korbel et al., 2015; 2016 Lewis & Morris, 2000; Nuboer et al., 1992; Prescott & Wathes, 1999b). Aus technischer Sicht wäre in der Praxis die Verwendung der Einheit C-Lux (corrected Lux) möglich, da es inzwischen auf dem Markt Messgeräte in Vorbereitung sind, die die Lichtintensität entsprechend der Helligkeitswahrnehmung des Huhnes erfassen (z.B. HATO gallilux meter von HATO Lighting Solutions BV, Sittard, Niederlande). Die Verwendung Einheit C-Lux würde es ermöglichen, vergleichbare Messungen zwischen verschiedenen Masthühnerställen mit unterschiedlichen Lichtquellen und Lichtspektren durchzuführen, um somit die Wirkungen der Lichtintensität und des Lichtspektrums auf die Produktions- und Tierschutzparameter bei Masthühnern separat identifizieren zu können (Prescott & Wathes, 1999a). In der vorliegenden Untersuchung wurden die Kontroll- und die Versuchsgruppe nacheinander im selben Stall und unter denselben Leuchtmitteln in direkter zeitlicher Folge aufgezogen, und es wurde kein erheblicher Unterschied im Lichtspektrum zwischen beiden Gruppen erfasst. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass die Lichtintensität als Hauptfaktor wirkte und die Reaktion der abhängigen Variablen in dieser Untersuchung erklären kann.

5.2.2 Lichtspektrum

In Bezug auf das Lichtspektrum und auf die Messungen der Lichtintensität in Lux und C-Lux wurde beobachtet, dass die von den Leuchtstoffröhren emittierte Strahlung Spitzen in ihrer spektralen Zusammensetzung bei 545, 585 und 610 nm aufwies und keine Strahlungsemission im UV- und V-Bereich (320-450 nm) zeigte. In Anbetracht der spektralen Zusammensetzung des verwendeten Lichts wurden bei den Messungen von Lux und C-Lux Unterschiede aufgezeichnet, die die größere Empfindlichkeit des Auges des Huhnes gegenüber den langen Wellenlängen des Lichtspektrums im Vergleich zu der des Menschenwiederspiegeln (Lewis & Morris, 2000). Daraus ist zu folgern, dass dieses Licht von den Vögeln in beiden Gruppen als etwa 18 % heller wahrgenommen wurde als von einem menschlichen Beobachter. In Tabelle 2 in Kapitel 2.3.2 sind die unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeitsdaten aufgelistet. Während beispielsweise ein menschlicher Beobachter eine monochromatische Lichtstrahlung mit einer Wellenlänge zwischen 600 und 730 nm als Lichtintensität 1 Lux wahrnimmt, können Hühner dieselbe Lichtstrahlung je nach Wellenlänge anders, und zwar 1,17 bis zu 22,80-fach

heller wahrnehmen als Menschen. Daher hat die Spitze bei 610 nm im Lichtspektrum des verwendeten Lichts wahrscheinlich zu der Differenz beigetragen, die durch die Messungen in Lux und C-Lux aufgezeichnet wurde (Lewis & Morris, 2000). Dagegen liegen die Spitzen bei 545 und 585 nm in einem Bereich des Lichtspektrums, in dem die Empfindlichkeit von Menschen und Vögeln ähnlich ist, weshalb diese zwei letztgenannte Spitzen keine wesentlichen Unterschiede zu den Messungen in Lux und C-Lux erzeugten (Lewis & Morris, 2000).

Das in der vorliegenden Untersuchung erfasste Lichtspektrum der verwendeten Leuchtstoffröhren weicht von dem veröffentlichten Standardspektrum für diesen Leuchtmitteltyp ab. Der Leuchtmittelhersteller, OSRAM GmbH, München, Deutschland, schreibt in seinem Datenblatt der warm-weißen (3.000 K) T8-Leuchtstoffröhren 58 W, dass diese Strahlung zwischen 300 und 450 nm emittieren. Ähnlich wie von Weise (2007) in Bezug auf die Abnahme der UV-Strahlung von hochqualitativen Leuchtstofflampen erwähnt, könnte das Defizit der Strahlung zwischen 360 und 450 nm des in dieser Untersuchung erfassten Lichtspektrums auf den photochemischen Abbau der Leuchtstoffbeschichtung der verwendeten Lichtquellen infolge einer Nutzungsdauer nahe der vom Hersteller angegebenen maximalen Lebensdauer der Lampen (10.000 - 18.000 Betriebsstunden) zurückzuführen sein. Das Lichtspektrum von Leuchtstoffröhren und anderen Lichtmitteln, insbesondere solchen, die auch im UV-Spektrum emittieren, kann jedoch auch durch andere Faktoren verändert werden, wie eine altersbedingte Reduktion des spektralen Transmissionsgrads von Polymethylmethacrylat-Schutzwannen (Raouf et al., 2016; Zidan & Abu-Elnader, 2005) oder durch die Ansammlung von Staub auf den Lichtquellen (Moreno, 2010).

Das Vorhandensein von Fenstern sowie das Glas, aus dem sie bestehen, kann das Lichtspektrum und die Lichtgestaltung im Stall erheblich beeinflussen (Weise, 2007). Aus diesem Grund waren die Fenster des verwendeten Stalles in dieser Studie während der gesamten Untersuchung verdunkelt. Dadurch konnten Veränderungen des Lichtspektrums aufgrund des Einfalls von natürlichem Licht vermieden und die Reproduzierbarkeit der Lichtbedingungen aufrechterhalten werden. Tatsächlich stellen durch einen unkontrollierten Lichteinfall hervorgerufende „Lichtspots“ einen auch tierschutzrechtlich sehr kritischen Parameter dar, da es zu einer Massierung von Tieren in diesen Bereichen mit Todesfällen durch Crowdingeffekte kommen kann. Hinsichtich der notwendigen Uniformität des Lichtes fand Weise (2007) heraus, dass in Naturställen, in die Sonnenstrahlen direkt einfallen (ohne Filterung durch Fenster o. ä. optische Medien, die UV-Strahlung absorbieren), ultraviolette Strahlung vorkommt. Dies steht im Gegensatz zu anderen Stallformen mit Fensterband, in denen der gemessene Wert der UV-Strahlung gegen Null ging. Das zeigt, dass die UV-Durchlässigkeit der üblichen Fenstermaterialien (Quarz-Glas, verschiedene

Kunststoffe) den UV-Anteil der Beleuchtung direkt beeinflussen (Weise, 2007). Das Defizit der UV- und V-Strahlung kann durch Verwendung von sogenannten Vollspektrum-Leuchtmitteln kompensiert werden. Diese Lichtquellen, die auch im UV-Bereich emittieren, sind kommerziell von verschiedenen Firmen verfügbar (Korbel & Sturm, 2005), beispielsweise Osram® Biolux, Philips® Tageslicht 965, General Electric® Biax Tageslicht. Nach Korbel (2010) könnte durch die Verwendung sogenannter „Tageslicht- oder Vollspektrum"- Leuchtmittel bei der Kunstlichtbeleuchtung von Ställen künftig aviären Sehgewohnheiten unter Erfüllung tierschutzrechtlicher Vorgaben in Bezug auf das Lichtspektrum entsprochen werden. In diesem Zusammenhang wird auch der Verwendung von LED-Leuchten (Light Emitting Diodes) große Bedeutung zukommen, die über die Aspekte der Energieeffizienz und Umweltschonung hinaus die Erfordernisse hinsichtlich des Lichtspektrums erfüllen können (Korbel, 2010). Daher wäre die Verwendung von LED-Licht in Geflügelställen aufgrund seiner Energieeffizienz und der langen Lebensdauer der Leuchten im Vergleich zu üblichen Glühlampen und Leuchtstoffröhren vorteilhaft (Korbel, 2010; Parvin et al., 2014). In Bezug auf die Entscheidung, ein bestimmtes Leuchtmittel zu verwenden, behaupteten Purswell et al. (2018) jedoch, dass von LED-Lichtquellen nicht erwartet werden sollte, dass sie die Produktionsparameter verbessern. Aktuell ist die Gestaltung von Beleuchtungssystemen und -programmen in erster Linie eine wirtschaftliche Entscheidung, die von Kapital- und Betriebskosten angetrieben wird. Die für den wirtschaftlich sinnvollen Einsatz und die Erfüllung aller notwendigen technischen Spezifikationen erforderlichen Produkten werden nach Recherchen und Aussagen der Leuchtmittelindustrie erst in einem Zeitraum von 5 – 7 Jahren in größerem Umfang vollumfänglich verfügbar sein (Korbel, 2019, persönliche Mitteilung).

5.3 Lichtintensität und deren Auswirkung auf Produktionsparameter und Mortalität

5.3.1 Körpermasse

In der vorliegenden Untersuchung wurden prozentuale Unterschiede zwischen der Kontroll- und der Versuchsgruppe hinsichtlich der Körpermasse (KM) während der gesamten Aufzuchtperiode beobachtet. Darüber hinaus war bei der Endmastschlachtung an Tag 42 ein statistisch signifikanter Unterschied der Schlachtkörpermasse zu erkennen ($P < 0,01$). Die Körpermasse war bei den Hühnern der Versuchsgruppe höher als bei den Hühnern der Kontrollgruppe. Dies könnte darauf hindeuten, dass die schrittweise Verringerung der Lichtintensität von 20 bis auf 5 Lux an den Tagen 11 - 18 und das Beibehalten dieser Intensität bis zum Ende der Aufzucht an Tag 42 eine signifikante

Auswirkung auf die KM von Masthühnern bei der intensiven Haltung hat. Der beobachtete Unterschied der Körpermassenentwicklung zwischen der Kontroll- und der Versuchsgruppe an den Tagen 1 – 10 betrug 4,00 %, was in absoluten Zahlen eine durchschnittliche Erhöhung von ca. 10 g bei den Tieren der Versuchsgruppe darstellte. Dieser Unterschied könnte hauptsächlich auf die höhere Futteraufnahme (FA) zurückzuführen sein, die bei der Versuchsgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe festgestellt wurde. Bei Masthühnern der Genetik Ross 308 besteht eine hohe Korrelation zwischen der täglichen FA und den täglichen Änderungen der KM (Mohammadrezaei et al., 2011). Allerdings ging diese Zunahme der KM auch mit einer höheren Futterverwertung (FV) einher, was auch auf Unterschiede im Energiebedarf zwischen der Versuchs- und Kontrollgruppe hinweist. Jedoch steht diese Abweichung mit keinem der kontrollierten Faktoren, wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Einstreuqualität und Lichtintensität im Zusammenhang, da sie sich während der Versuchsperiode nicht statistisch signifikant zwischen beiden Gruppen unterschieden. Dies könnte darauf hindeuten, dass, um die komplexe Wechselwirkung zwischen verschiedenen Umweltbedingungen, physiologischen Faktoren und die KM während der ersten Lebenswochen der Hühner besser zu verstehen, weitere Untersuchungen erforderlich sind. In diesem Zusammenhang könnten Untersuchungen hinsichtlich des Verhaltens und der freiwilligen Futteraufnahme von Masthühnern eine wichtige Rolle spielen (Neves et al., 2014; Richards et al., 2010; Rodriguez & Chocht 2018).

Ab dem Tag 11 kam bei der Versuchsgruppe die Lichtintensitätsreduktion zur Anwendung. An den Tagen 11 - 18 war die KM der Vögel der Versuchsgruppe 4,56 % höher als die der Kontrollgruppe. Das entspricht einer Erhöhung der KM bei der Versuchsgruppe um 20 g. Dies scheint darauf hinzudeuten, dass die allmähliche Verringerung der Lichtintensität die KM der Vögel nicht nachteilig beeinflusste. In diesem Zusammenhang weisen verschiedene Managementguides der einzelnen Zuchtunternehmen darauf hin, dass Hühner bei einer schrittweisen Verringerung der Lichtintensität ihre motorische Aktivität und den Energieverbrauch vermindern. Dadurch sinkt die FV und es wird mehr KM aufgebaut (Arbor Acres, 2018; Aviagen, 2018; Cobb-Vantress, 2018; Hubbard, 2016). Obwohl in der vorliegenden Untersuchung die motorische Aktivität nicht gemessen wurde, wies die Versuchsgruppe eine bessere FV im Vergleich zur Kontrollgruppe auf, was zur Steigerung der KM der Tiere beitragen konnte. Dennoch ist die Auswirkung der allmählichen Verringerung der Lichtintensität während der Aufzuchtperiode auf die KM und motorische Aktivität der Masthühner heutzutage noch nicht hinreichend untersucht (Kristensen et al., 2004; 2006a Schneeganß, 2018; Weise, 2007). Darüber hinaus stammen die meisten verfügbaren Daten zur Auswirkung der Lichtintensität auf die KM aus Untersuchungen, bei denen während der gesamten Aufzucht eine konstante Lichtintensität verwendet wurde (Arowolo et al., 2019; Blatchford et al., 2009; 2012; Charles et al., 1992;

Deep et al., 2010; 2013; Downs et al., 2006; Kristensen et al., 2006b; Lien et al., 2008; Rault et al., 2017).

In der Kontroll- und Versuchsgruppe wurde eine konkave Entwickung der Kurve des Modells der KM beobachtet. Dies deutet auf eine Verringerung der Wachstumsgeschwindigkeit in beiden Gruppen an den Tagen 11 – 18 hin. Eine nichtlineare Wachstumskurve ist ein genetisches Merkmal der Linie Ross 308 (Al-Samarai, 2015; Mendeş, 2009; Tompic et al., 2011). Das in dieser Studie festgestellte Wachstumsprofil könnte mit der Verringerung der Prävalenz von Krankheiten zusammenhängen, die mit dem schnellen Wachstum bei Masthühnern verbundenen sind. Hierzu zählen unter anderem Beinprobleme und plötzlicher Herztod (Apeldoorn et al., 1999; Classen et al., 2004; Riddell & Classen, 1992). Diesbezüglich erwähnten verschiedene Autoren, dass bei Masthühnern nach einem langsamen anfänglichen Wachstum ein kompensatorisches Wachstum folgen kann (Buyse et al., 1996; Buyse & Decuypere, 2003; Downs et al., 2006). Durch das kompensatorische Wachstum ist es möglich, am Ende der Mast eine ähnliche KM wie bei Vögeln mit linearem Wachstum zu erreichen (Buyse et al., 1996; Buyse & Decuypere, 2003; Downs et al., 2006).

An den Tagen 19 – 40 wurde beobachtet, dass die Hühner der Versuchsgruppe eine ca. 9,28 % höhere KM als die Tiere der Kontrollgruppe aufwiesen. Diese Erhöhung der KM könnte zu dem statistisch signifikanten Unterschied in der Schlachtkörpermasse zwischen beiden Gruppen beitragen. Diese Ergebnisse stimmen mit früheren Untersuchungen überein, in denen bei Masthühnern, die bei geringerer Lichtintensität aufgezogen wurden, eine höhere KM beobachtet wurde (Charles et al., 1992; Deep et al., 2013; Lien et al., 2008; Rault et al., 2017). Diesbezüglich berichteten Charles et al. (1992) und Lien et al. (2008), dass Vögel, die mit Lichtintensitäten zwischen 1 und 5 Lux aufgezogen wurden, die höchste Körpermasse erzielten im Vergleich zu Vögeln, die unter zwei Lichtintensitätsprogrammen, deren höchste Lichtintensität ca. 150 - 160 Lux betrug, aufgezogen wurden. Da die dort verwendeten hohen Lichtintensitäten von 150 – 160 Lux deutlich höher waren als die 20 Lux in der vorliegenden Untersuchung, ist ein Vergleich der Ergebnisse nur eingeschränkt möglich. In einer weiteren Studie verglichen Deep et al. (2013) die Aufzuchtergebnisse bei vier verschiedenen Lichtintensitäten (0,5, 1, 5 und 10 Lux). Die Ergebnisse zeigten, dass die höchste Körpermassenzunahme bei 5 Lux beobachtet werden konnte. Sie lag etwa 2,22 % höher als die der Individuen, welche bei 10 Lux aufgezogen wurden. Dieser Unterschied wurde jedoch von den Autoren als „gering“ bewert. Am ehesten vergleichbar mit der vorliegenden Studie ist die Untersuchung von Rault et al. (2017), bei der festgestellt wurde, dass Masthühner, die unter 5 Lux aufgezogen wurden, eine höhere KM aufwiesen als diejenigen, die unter 20 Lux gehalten wurden. Diese Autoren verwendeten jedoch LED-Lichtquellen mit zwei Strahlungsspitzen in

ihrer spektralen Zusammensetzung bei 455 nm und 585 nm. Dies stellt jedoch ein anderes Lichtspektrum als das in der vorliegenden Untersuchung dar und erzeugte möglicherweise in der Wahrnehmung der Masthühner eine andere Lichtintensität.

Die höhere KM der Tiere in der Versuchsgruppe während der gesamten Aufzuchtperiode (1 – 40) spiegelte möglicherweise ihre höhere Futteraufnahme an den Tagen 1 – 10, 11 – 18 und 19 – 40 im Vergleich zur Kontrollgruppe wider. Dieses Versuchsergebnis entspricht den Berichten von Deep et al. (2013) und Lien et al. (2008). Sie beobachteten eine höhere KM und Futteraufnahme von Masthühnern bei einer Beleuchtung mit ca. 5 Lux im Vergleich zu denen, die bei 10 bis ca. 160 Lux aufgezogen wurden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie stehen in Kontrast zu verschiedenen früheren Untersuchungen, die zeigten, dass die KM der Hühner bei Lichtintensitäten zwischen 5 und 150 Lux nicht signifikant beeinflusst wird (Arowolo et al., 2019; Blatchford et al., 2009; 2012; Deep et al., 2010; Kristensen et al., 2006b). Als mögliche Gründe für diese widersprüchlichen Ergebnisse kommen unter anderem die verwendeten Leuchtmittel, das Lichtspektrum, unterschiedliche Photoperioden und die Art der Abnahme der Lichtintensität (schrittweise oder abrupt) in Betracht, die einen direkten Vergleich des Einflusses der Beleuchtungsstärke zwischen verschiedenen Untersuchungen schwierig machen. Darüber hinaus wäre es in der vorliegenden Untersuchung zweckmäßig gewesen, eine größere Anzahl von Replikationen pro Lichtintensitätsprogramm durchzuführen, um die Reproduzierbarkeit dieses Ergebnisses verifizieren zu können.

Die Masse der Schlachtkörper der Vögel der Versuchsgruppe war um 15,05 % höher als die der Vögel der Kontrollgruppe, was einen statistisch signifikanten Unterschied darstellte ($P < 0,01$). Dieses Ergebnis stimmt mit dem Bericht von Lien et al. (2008) überein, die feststellten, dass die Schlachtkörpermasse von Masthühnern höher war, wenn die Tiere bei einer niedrigen Lichtintensität (ca. 1 gegenüber 160 Lux) aufgezogen wurden. In der Untersuchung von Lien et al. (2008) ist die Differenz der Lichtintensität jedoch höher als in der vorliegenden Studie (5 - 20 Lux) und entspricht nicht der üblichen Lichtintensität von 20 Lux der intensiven Masthühnerhaltung. Andererseits widerspricht dieses Ergebnis Deep et al. (2013) und Downs et al. (2006), nach denen die Masse des Schlachtkörpers mit der Steigerung der Lichtintensität zunahm. Ob Genotyp-, Geschlecht-, Lichtintensität-, Photoperiode- und anderen Umweltfaktoren einzeln oder in Kombination miteinander für die Unterschiede bei den Schlachtkörpereigenschaften der einzelnen Studien verantwortlich sein könnten (Fidan et al., 2017), ist aktuell noch unklar.

Es sollte auch berücksichtigt werden, dass die in der Kontrollgruppe beobachtete niedrige KM mit der Gesundheitszustand zusammenhängen könnte. Tabelle 3 zeigt, dass diese Gruppe an den Tagen 13 – 17 und 20 - 23 Antibiotika-Behandlungen erhielt. Die Leitlinien für den sorgfältigen Umgang mit antibakteriell wirksamen Tierarzneimitteln der Bundestierärztekammer (BTK, 2015) besagen, dass der Beginn und die Durchführung einer antibiotischen Behandlung immer eine Diagnose basierend auf einer klinischen, ggf. labordiagnostischen Untersuchungen erfordern. Krankheiten können bei der Herde klinische Anzeichen wie Anorexie, Wachstumsstörungen und eine geringere KM als erwartet verursachen (Koutsos & Klasing, 2001; Klasing et al., 1987; Klasing, 2007). Aus diesem Grund könnten sich das Vorhandensein von Krankheiten und der Einsatz von Antibiotika in der Kontrollgruppe als Störfaktor ausgewirkt haben.

5.3.2 Futteraufnahme

In der vorliegenden Untersuchung wurden prozentuale Unterschiede zwischen Kontroll- und Versuchsgruppe hinsichtlich der Futteraufnahme (FA) während der gesamten Aufzuchtperiode beobachtet. Dies könnte darauf hindeuten, dass die schrittweise Verringerung der Lichtintensität von 20 bis auf 5 Lux an den Tagen 11 - 18 und das Beibehalten dieser Intensität bis Ende der Aufzucht an Tag 42 eine Erhöhung der FA von Masthühnern bei der intensiven Haltung verursachen könnte. Der beobachtete Unterschied in der FA zwischen der Kontroll- und der Versuchsgruppe an den Tagen 1 – 10 betrug 3,85 %, was in absoluten Zahlen eine durchschnittliche Erhöhung von ca. 10 g bei den Tieren der Versuchsgruppe darstellte. Dieser Unterschied kann eigentlich nicht mit der Lichtintensität in Zusammenhang stehen, da beide Gruppen während dieser Untersuchungsperiode 20 Lux ausgesetzt waren. Andererseits wiesen auch andere Umweltfaktoren, wie die durchschnittliche Stalltemperatur, -luftfeuchtigkeit und Einstreuqualität, keine signifikanten Unterschiede auf. In dieser Hinsicht erwähnten Mohammadrezaei et al. (2011), dass es neben den Umweltbedingungen, der genetischen Veranlagung, den Wachstumsraten und auch den physiologischen Veränderungen im Allgemeinen andere Faktoren gibt, die den Energiebedarf und damit die FA von Masthühnern beeinflussen können. Diesbezüglich wiesen Rodriguez und Choct (2019), Neves et al. (2014) und Richards et al. (2010) darauf hin, dass das Verhalten und die molekularen Mechanismen zur Regulierung der freiwilligen Futteraufnahme von Masthuhnern während der frühen Wachstumsphase weiterer Untersuchungen bedürfen.

Hinsichtlich der Wirkung der schrittweisen Abnahme der Lichtintensität auf die FA der Versuchsgruppe konnte nachgewiesen werden, dass die FA der Versuchsgruppe an den Tagen 11 - 18 ca. 1,69 % höher als die der

Kontrollgruppe war. Dies lässt darauf schließen, dass sich die Vögel an die schrittweise Abnahme der Lichtintensität anpassen können und dieses Lichtintensitätmanagement die FA nicht negativ beeinflusst. In diesem Zusammenhang haben Deep et al. (2013) herausgefunden, dass eine abrupte Abnahme der Lichtintensität (von 40 auf 0,1 Lux) dazu führte, dass die Vögel eine Woche lang kein Futter mehr fanden. Im Gegensatz dazu zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Studie, dass eine allmähliche Abnahme der Lichtintensität bis zu 5 Lux als eine ausreichende Lichtintensität zu bewerten ist, die es den Vögeln erlaubt, das Futter im Stall zu finden.

In der vorliegenden Studie war die FA der Versuchsgruppe an den Tagen 19 - 40 9,38 % höher als die der Kontrollgruppe. Dieses Ergebnis steht im Kontrast zu verschiedenen vorherigen Untersuchungen, die zeigten, dass eine Verringerung der Lichtintensität mit einer Abnahme der FA einhergeht (Davis et al., 1999; Deep et al., 2013; Newberry et al., 1985; Prescott & Wathes, 2002). Die in dieser Studie nachgewiesene höhere FA der Vögel der Versuchsgruppe bei 5 Lux könnte durch einen niedrigen Kontrast zwischen Photo- und Skotophase hervorgerufen worden sein (Alvino et al., 2009; Blatchford et al., 2012). Diesbezüglich erwähnten Apeldoorn et al. (1999), Cassone (1990) und Gwinner et al. (1997), dass eine niedrige Lichtintensität eine Störung des Tag-Nacht-Rhythmusses verursachen kann. Obwohl keine Messungen des Futteraufnahmeverhaltens durchgeführt wurden, kann aufgrund anderer wissenschaftlicher Studien geschlussfolgert werden, dass eine kontrastarme Lichtintensität zwischen Photo- und Skotophase den Verhaltensrhythmus bei Broilern stört und sie dann kein ausgeprägtes Futteraufnahmeverhalten zu bestimmten Tageszeiten aufweisen (Alvino et al., 2009; Blatchford et al., 2009; 2012). Diesbezüglich wiesen einige Autoren darauf hin, dass Vögel, die unter niedriger Lichtintensität aufgezogen werden, auch während der Skotophase Futter verzehren (Bessei, 2006; Buyse & Decuypere, 2003; Cherry & Barwick, 1962; Rodriguez & Choct, 2019). Daher könnte dieser Anstieg der FA an den Tagen 19 – 40 in der Versuchsgruppe für ihre höhere kumulative FA am Ende des Versuchs (1 - 40) verantwortlich sein.

Die FA der Kontrollgruppe könnte auch durch den Gesundheitszustand dieser Tiere beeinflusst worden sein, da diese Gruppe an den Tagen 13 – 17 mit Belacol® und an den Tagen 20 – 23 mit Octacillin® behandelt wurde (Tabelle 3). Diese Antibiotika werden bei Hühnern zur Behandlung von Infektionen eingesetz, welche durch Colistinsulfat- und Amoxicillin-empfindliche Bakterien hervorgerufen werden. In diesem Zusammenhang kann der durch eine Krankheit verursachte immunologische Stress den Appetit der Tiere senken und dadurch einen signifikanten Einfluss auf die FA haben. Die mit der angeborenen Immunantwort verbundene proinflammatorische Zytokinkaskade moduliert direkt das Verhalten des Vogels. Lethargie verringert die sozialen Interaktionen und Anorexie resultiert aus der Wirkung von IL-1 und TNF-α auf das Gehirn sowie

auf die Stoffwechselrate und Fieber. Diese Verhaltensänderungen führen zu einer Verringerung der FA und der KM (Koutsos & Klasing, 2001; Klasing et al., 1987; Klasing, 2007). Aus diesem Grund konnte mögicherweise auch der Gesundheitszustand Einfluss auf die beobachtete Unterschiede der FA zwischen der Kontroll- und Versuchsgruppe haben.

5.3.3 Futterverwertung

Die Futterverwertung (FV) zeigte während der Mastperiode keinen einheitlichen Unterschied zwischen der Kontroll- und der Versuchsgruppe. An den Tagen 1 - 10 wurde in der Versuchsgruppe eine 0,95 % höhere FV beobachtet im Vergleich zur Kontrollgruppe. Dieser Unterschied lässt sich teilweise durch die höhere FA der Versuchsgruppe an den Tagen 1 - 10 erklären. Aus diesem Befund ergibt sich, dass die höhere KM der Versuchsgruppe in dieser Periode aus einem weniger effizienten Umwandlung von Futter in Lebendmasse im Vergleich zur Kontrollgruppe resultierte. Dies könnte auf den signifikanten Unterschied in der Mortalität zwischen beiden Gruppen zurückzuführen sein. Die höhere Mortalität der Versuchsgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe an den Tagen 1 – 10 könnte auf einen schlechteren Gesundheitszustand hindeuten, der sich negativ auf die Nährstoffaufnahme der Tiere auswirkte und infolgedessen die FV erhöht wurde. Andererseits war eine um 1,57 % niedrigere FV der Versuchsgruppe an den Tagen 11 - 18 das Ergebnis einer zahlenmäßigen Zunahme der KM und der FA während dieser Versuchsperiode. Dies scheint darauf hinzudeuten, dass die Umwandlung von Futter in Lebendmasse der Hühner der Versuchsgruppe während der allmählichen Verringerung der Lichtintensität im Vergleich zu den Tagen 1 – 10 verbessert wurde. Eine allmähliche Abnahme der Lichtintensität wird von verschiedenen Managementguides der einzelnen Zuchtunternehmen empfohlen, um die FV der Masthühner durch die Verringerung der motorischen Aktivität und damit des Energieaufwands zu verbessern (Arbor Acres, 2018; Aviagen, 2018; Cobb-Vantress, 2018; Hubbard, 2016). Diesbezüglich wurde von Ahmad et. al. (2011) festgestellt, dass Masthühner, die ab der ersten Woche unter 20 Lux und ab der zweiten bis sechsten Woche mit 5 Lux aufgezogen wurden, eine bessere FV aufwiesen als Tiere, die unter einer konstanten Lichtintensität (20 Lux) gehalten wurden. Allerdings wurde in der vorliegenden Untersuchung an den Tagen 19 - 40 kein Unterschied in der FV festgestellt. Insgesamt war die durchschnittliche FV am Ende des Versuchs (1 – 40) bei der Versuchsgruppe um 1,08 % niedriger als bei der Kontrollgruppe. Diese Ergebnisse könnten auf eine geringe oder fehlende Wechselwirkung zwischen der Lichtintensität und der FV hindeuten. Gestützt werden diese Beobachtungen durch frühere Studien in denen bei Lichtintensitäten zwischen 5 und 150 Lux keine erheblichen Unterschiede in der FV festgestellt wurden

(Arowolo et al., 2019; Deep et al., 2010; Lien et al., 2007; Mendes et al., 2013; Newberry et al., 1988; Olanrewaju et al., 2016; Racoursier-Frost, 2016).

Es sei darauf hingewiesen, dass Masthühner der Kontrollgruppe an den Tagen 13 – 17 und 20 – 23 Antibiotika-Behandlungen erhielten (Tabelle 3), was möglicherweise einen Einfluss auf die KM, FA und FV haben kann. Kranke Masthühner können eine Verringerung der Futteraufnahme sowie der Nährstoffaufnahme im Darm aufweisen, was eine Verschlechterung der FV und der KM mit sich bringen kann (Klasing et al., 1987; Klasing, 2007). Aufgrund der kommerziellen Bedingungen der Aufzuchtdurchgänge wurden die Krankheiten in der Kontrollgruppe durch den Einsatz von Colistinsulfat und Amoxicillin behandelt. Daher könnte sich diese Maßnahme als Störfaktor ausgewirkt haben.

5.3.4 Mortalität

Die Mortalität in den Perioden 1 - 10 und 11 - 18 wies keine signifikanten Unterschiede zwischen der Kontroll- und der Versuchsgruppe auf, was darauf hindeuten könnte, dass kein Zusammenhang zwischen den in diesen Versuchsperioden angewendeten Lichtintensitäten und der Mortalität bestand. Andererseits widerspricht die höhere Mortalität in der Kontroll- gegenüber der Versuchsgruppe an den Tagen 19 – 40 und während der gesamten Aufzuchtdauer (1 – 40) verschiedenen früheren Untersuchungen, die keinen Einfluss der Lichtintensität auf die Mortalität feststellen konnten (Charles et al., 1992; Cherry & Barwick, 1962; Deaton et al., 1988; Deep et al., 2010; Downs et al., 2006; Lien et al., 2007; Newberry et al., 1985, 1986; Wathes et al., 1982). In einigen Studien, in denen ein solcher Unterschied nachgewiesen wurde, war jedoch die Mortalität bei den Vögeln unter niedriger Lichtintensität höher (Deep et al., 2013; Newberry et al., 1988; Siopes et al., 1984). Deep et al. (2013) und Siopes et al. (1984) schrieben dies dem Hungertod zu, da die Hühner unter Lichtintensitäten von weniger als 1 Lux das Futter und das Wasser nicht finden konnten. In der vorliegenden Untersuchung wurde jedoch die Futteraufnahme durch die allmähliche Abnahme der Lichtintensität bis zu 5 Lux an den Tagen 11 - 18 nur vorübergehend verringert, was möglicherweise die Überlebensfähigkeit der Vögel während der verbleibenden Dauer des Versuchs sogar verbesserte. Deep et al. (2013) erwähnen diesbezüglich, dass 5 Lux die Mindestbeleuchtungsstärke sein sollte, um negativen Auswirkungen einer niedrigen Lichtintensität auf die Leistung von Masthühnern zu vermeiden.

In Bezug auf die Mortalitätsursachen wurde bei Herz-Kreislauf-Versagen (HKV) an den Tagen 1 – 10 kein signifikanter Unterschied festgestellt, aber eine erheblich höhere Prävalenz von HKV an den Tagen 11 - 18 und 19 - 40 in der

Versuchs- im Vergleich zur Kontrollgruppe beobachtet (P < 0,01). Bei Bezug auf die gesamte Mastdauer (Tage 1 - 40) gab es jedoch keinen signifikanten Unterschied zwischen beiden Gruppen auf. Mehrere Studien wiesen darauf hin, dass diese Krankheit mit schnellem Wachstum und stressigen Bedingungen zusammenhängt (Currie, 1999; Decuypere et al., 2000; Nain et al., 2009). Während der Perioden 11 - 18 und 19 - 40 wurde bei der Versuchsgruppe eine höhere KM beobachtet als bei der Kontrollgruppe. Verschiedene Autoren beschrieben, dass eine Wechselwirkung zwischen der KM und der Prävalenz von HKV besteht, da die hohe KM und das schnelle Wachstum einen bedeutenden Stressfaktor darstellen, der das Vorkommen von Stoffwechselerkrankungen und hämodynamischen Veränderungen fördert (Dozier et al., 2005; Gonzales et al., 1998; Grashorn, 1998; Newberry et al., 1985; Proudfoot & Hulan, 1985). Eine schnelle Wachstumsrate führt zu einem erhöhten Bedarf an Sauerstoff auf Gewebeebene. Die resultierende physiologische Hypoxie löst eine erhöhte Herzleistung und eine daraus folgende Erhöhung des pulmonalen arteriellen Blutdrucks aus, was Aszites und Herzveränderungen verursacht (Currie, 1999). Diese metabolischen Veränderungen könnten als eine mögiche Ursache für die höhere Prävalenz von HKV in der Versuchsgruppe gegenüber der Kontrollgruppe an den Tagen 11 – 18 und 19 - 40 genannt werden.

Andererseits waren Beinschäden an den Tagen 1 – 10 in der Versuchsgruppe signifikant höher als in der Kontrollgruppe (P < 0,01). In dieser Periode erreichte die Versuchsgruppe eine höhere KM als die Kontrollgruppe. Ein Zusammenhang zwischen KM, Wachstumsrate und Beinschäden bei Masthühnern wurde von Kristensen et al. (2006b) und Reiter et al. (2006) am Mastende beschrieben. Ob eine ähnliche Wechselwirkung am Anfang der Mast besteht, ist unklar, da bei den meisten früheren Studien die Daten von Beinschäden und KM für die ersten 10 Tagen nicht getrennt erfasst wurden. In der vorliegenden Studie ist jedoch die Wechselwirkung zwischen KM und Prävalenz von Beinschäden nicht einheitlich. Trotz der prozentualen Unterschiede an KM zwischen Kontroll- und Versuchsgruppe an den Tagen 11 - 18, 19 - 40 wurden während dieser Versuchsperioden keine signifikanten Unterschiede bei Beinschäden festgestellt. Es ist zu beachten, dass die höchste Prävalenz von Beinschäden im Zeitraum 11 - 18 in beiden Gruppen zu verzeichnen war. In diesem Zeitraum erreichte die Prävalenz von Beinschäden 16,85 % in der Kontroll- und 13,10 % in der Versuchsgruppe in Bezug auf die Mortalität, die Unterschiede waren aber nicht signifikant (P > 0,01). In dieser Hinsicht wiesen Williams et al. (2000) darauf hin, dass schnell wachsende Masthühner zwischen den Tagen 4 - 18 eine schnelle Knochenbildung zeigen, was ein Risikofaktor für das Auftreten von Beinschäden sein kann. Später lag die Prävalenz an den Tagen 19 – 40 in beiden Gruppen unten 5 % und zeigte keinen signifikanten Unterschied (P > 0,01). Diesbezüglich beobachteten Kristensen et al. (2006b) und Blatchford et al. (2009) keinen Zusammenhang zwischen Lichtintensität und Beinschäden. Darüber hinaus

erwähnen Reiter und Bessei (1998b), dass Angaben über die Beziehung zwischen KM und Beinschäden bei Masthühnern nicht einheitlich sind. Es ist möglich, dass in der vorliegenden Untersuchung aufgrund genetischer Faktoren, die die Knochenbildung der Vögel beeinflussen, der Unterschied in KM zwischen beiden Gruppen an den Tagen 11 – 18 und 19 – 40 nicht im Zusammenhang mit Beinschäden stand (Kestin et al., 1992; Sørensen, 1992; Reiter & Bessei, 1995; 1998b; Williams et al., 2000).

In Bezug auf „Tote" wurde ein signifikanter Unterschied während der Versuchsperioden 19 - 40 und 1 - 40 beobachtet. Hierbei war die Prävalenz von „Tote“ höher in der Kontroll- als in der Versuchsgruppe ($P < 0,01$). Andererseits war die Prävalenz von sonstigen Todesursachen bei den Tieren in der Kontrollgruppe an den Tagen 1 – 10, 11 – 18 und 19 - 40 signifikant höher ($P < 0,01$) als in der Versuchsgruppe. Über den gesamten Versuch betrachtet (Tage 1 - 40) zeigten „Tote“ und sonstige Todesursachen einen statistisch signifikanten Anstieg in der Kontrollgruppe ($P < 0,01$). Ob hier die Auswirkungen der Lichtintensität an dieser Mortalitätsursache beteiligt sind, ist jedoch unklar, und komplex, da diese verstorbenen Tiere keiner bestimmten Ursache zugeordnet werden konnten. Es ist anzumerken, dass die Vögel der Kontrollgruppe aufgrund der kommerziellen Bedingungen der Aufzuchtdurchgänge Antibiotika-Behandlungen erhielten, die eine Interaktion mit der Verlustrate und ihren spezifischen Ursachen haben könnten. Zusätzlich sollten diese Ergebnisse mit Vorsicht behandelt werden, da in der aktuellen Studie sowie in mehreren früheren Untersuchungen Daten der verendeten und selektierten Tiere zusammengefügt wurden. Eine Rolle spielen könnten auch die Auswirkungen der Lichtintensität auf die Fähigkeit des Personals zur Kontrolle der Vögel. Eine niedrige Lichtintensität macht es schwierig, tote Vögel und solche mit Krankheitsanzeichen zu erkennen (Appleby et al., 1992). Aus diesem Grund muss unter anderem die Qualifikation und Erfahrung des Personals in Betracht gezogen werden, wenn Felduntersuchungen unter Bedingungen der intensiven Wirtschaftsgeflügelhaltung durchgeführt werden. Die gesetzlich vorgeschriebenen Mindestbeleuchtungstärken im Stall sind neben den Tierwohlparametern auch auf die Gewährleistung einer Erkennbarkeit der Tiere für die Durchführung einwandfreier Kontrollen ausgerichtet.

5.4 Lichtintensität und deren Auswirkung auf Tierschutzparameter

5.4.1 Pododermatitis

Die Prävalenz von Pododermatitis war in der Versuchsgruppe mit 17,90 % signifikant höher als in der Kontrollgruppe (8,04 %). Die Prävalenz von Pododermatitis in der Versuchsgruppe lag aber geringfügig unten dem Grenzwert von 20 % (Tabelle 21) des integrierten Qualitäts- und Umweltmanagementsystems von Lohmann & CO. AG. Diese Ergebnisse bestätigen frühere Untersuchungen bei denen eine höhere Prävalenz von Pododermatitis bei Masthühnern festgestellt wurde, wenn die Tiere bei geringer Lichtintensität aufgezogen wurden (Deep et al., 2010; Blatchford et al., 2009; Rault et al., 2017). Diverse Autoren beschrieben, dass die Gehfähigkeit bei geringer Lichtintensität abnimmt (Boshouwers & Nicaise, 1987; Kristensen et al., 2004; Kristensen et al., 2006a; Newberry et al., 1988; Rault et al., 2017) und eine längere Kontaktzeit mit der Einstreu wahrscheinlich zur Entwicklung der Pododermatitis führt (Blatchford et al., 2009; Kristensen et al., 2006b). Verschiedene frühere Versuche belegten einen Zusammenhang zwischen der Lichtintensität, dem motorischen Aktivitätsniveau und der Prävalenz von Pododermatitis bei Masthühnern (Deep et al., 2010; 2013; Newberry et al., 1988; Rault et al., 2017; Sørensen et al., 1999; Su et al., 1999). Die motorische Aktivität in Bezug auf die Verringerung der Lichtintensität wurde jedoch in der vorliegenden Teilstudie nicht untersucht, dies ist Gegenstand eines weiteren Dissertationsprojektes (in Vorbereitung). Der Unterschied in der Prävalenz von Pododermatitis in der Kontroll- und Versuchsgruppe könnte durch die unterschiedliche KM der beiden Gruppen erklärt werden. So wurde eine höhere Prävalenz von Pododermatitis bei unter 5 Lux aufgezogenen Vögeln festgestellt, die gleichzeitig eine höhere KM erreichten als diejenigen, die unter 20 Lux gehalten wurden (Rault et al., 2017). Deep et al. (2010) stellen fest, dass die Prävalenz von Pododermatitis linear mit der Zunahme der Lichtintensität (1, 10, 20 und 40 Lux) abnahm, fanden jedoch keine signifikanten Unterschiede der KM bei verschiedenen Lichtintensitäten. Kristensen et al. (2006b) ermittelten keinen Zusammenhang zwischen der Lichtintensität und der Prävalenz von Pododermatitis. Es existierte jedoch ein Zusammenhang mit der Körpermasse der Vögel, da schwerere Tiere eine höhere Prävalenz von Hautläsionen aufwiesen. Die Beziehung zwischen KM und Pododermatitis scheint unter anderem dadurch bedingt zu sein, dass schwerere Vögel mehr Zeit auf der Einstreu liegen, was das Risiko für diese Hautläsionen erhöht (Bizeray et al., 2000; Kristensen et al., 2006b; Prayitno et al., 1997a; Reiter & Bessei, 1998a; Vestergaard & Sanotra, 1999). Aufgrund der widersprüchlichen Ergebnisse in der Literatur in Bezug auf das Verhältnis von Lichtintensität, KM und Prävalenz von Pododermatitis ist zu vermuten, dass

andere Umweltfaktoren bei dem Auftreten von Pododermatitis bei Masthühnern eine Rolle spielen. In der Literatur wird oftmals die Einstreuqualität als der Hauptfaktor in Bezug zur Pododermatitis bei Masthühnern benannt (Ekstrand et al., 1998; Haslam et al., 2007; Shepherd & Fairchild, 2010). Die Einstreuqualität wird durch die relative Luftfeuchtigkeit stark beeinflusst (Dunlop et al., 2016a; Ekstrand et al., 1998; Haslam et al., 2007; Hermans et al., 2006; Shepherd & Fairchild, 2010). Da während des Winters die Temperatur normalerweise niedrig und die relative Luftfeuchtigkeit hoch ist, ist zu erwarten, dass Pododermatitis am häufigsten im Winter auftritt (Dunlop et al., 2016a; Hermans et al., 2006; Mayne, 2005). Der vorliegende Versuch wurde zwischen Juni und September durchgeführt. Dabei wurden keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Eintreuqualität und die Luftfeuchtigkeit im Stall zwischen beiden Gruppen ermittelt. Diese Ergebnisse weisen somit auf eine komplexe Wechselwirkung zwischen der Prävalenz von Pododermatitis und der Lichtintensität hin, wobei mehrere Umweltfaktoren sowie Verhaltensweisen der Hühner eingreifen können.

5.4.2 „Hock burn“

Ähnlich wie bei der Pododermatitis war die Prävalenz von „hock burn“ höher in der Versuchs- als in der Kontrollgruppe. Sie überschritt in der Versuchsgruppe mit 10,44 % (Tabelle 21) den Grenzwert von 10 % des integrierten Qualitäts- und Umweltmanagementsystems von Lohmann & CO. AG. Auch in anderen Studien wurden parallele Veränderungen der Prävalenz von Pododermatitis und „hock burn“ festgestellt und vermutet, dass die damit zusammenhängenden Faktoren ähnlich sind (Haslam et al., 2007; Shepherd & Fairchild, 2010). Diese Ergebnisse könnten auf einen möglichen Zusammenhang zwischen der Lichtintensität und der im Schlachthof festgestellten Prävalenz von „hock burn“ hinweisen. Andere Studien erzielten diesbezüglich jedoch widersprüchliche Ergebnisse. Rault et al. (2017) konnten keine konsistente Beziehung der Lichtintensität zu „hock burn“ bei Masthühnern feststellen, die bei 5 und 20 Lux aufgezogen wurden. Wenn die Ergebnisse der Studie von Raoult et al. (2017) für einzelne Replikationen getrennt betrachtet werden, zeigten die Masthühner, die bei 20 Lux gehalten wurden, in Replikat 1 eine geringere Prävalenz von „hock burn“ im Vergleich zu Vögeln, die bei 5 Lux in gehalten wurden, jedoch eine höhere Häufigkeit in Replikat 2, während Masthühner, die bei 5 Lux gehalten wurden, eine stabile Prävalenz in beiden Wiederholungen aufwiesen. In der Studie von Raoult et al. (2017) fiel zudem auf, dass die höchste in Replikat 2 beobachtete Prävalenz von „hock burn“ in der Gruppe mit der besten Einstreuqualität auftrat. Die „hock burns“ wurden daher als Folge einer höheren Prävalenz von Beinschäden erklärt. In zwei anderen Untersuchungen war eine hohe Inzidenz von Beinschwäche, schwach, aber statistisch signifikant korreliert

mit einer erhöhten Prävalenz von „hock burn“ (Sorensen & Kestin 1999; Su et al., 1999). Diesbezüglich war in der Versuchsgruppe der vorliegenden Untersuchung die Prävalenz von Beinschäden gering höher als in der Kontrollgruppe in den Versuchsperioden 19 - 40 und 1 - 40, was jedoch keinen statistisch signifikanten Unterschied darstellte. Andererseits erwähnten Kjaer et al. (2006), dass ein Zusammenhang zwischen der KM, dem Alter der Vögel und der Prävalenz von „hock burn“ besteht. In ähnlicher Weise beobachteten Kristensen et al. (2006b), dass das Risiko mittelschwerer bis schwerer Fälle von „hock burn“ mit zunehmender KM anstieg. Louton et al. (2019) berichteten, dass unter Verwendung von 4 langsam wachsenden Masthuhn-Genotypen an 44 Aufzuchttag die Prävalenz von „hock burn“ mit einer hoheren KM einherging. Auch in der vorliegenden Studie zeigten die Vögel der Versuchsgruppe bei einer höheren KM eine statistisch signifikant höhere Prävalenz von „hock burn“ als die Vögel der Kontrollgruppe. Einige Autoren erklären diese Beziehung durch eine aufgrund einer höheren KM reduzierten Fähigkeit, auf den Beinen stehen zu bleiben, was dazu führt, dass die Vögel länger in einer sternalen Position liegen. Daraus folgt ein engerer Kontakt der Fersen mit der Einstreu (Blatchford et al., 2009; Kjaer et al., 2006; Kristensen et al., 2006b). In der vorliegenden Studie wurden Verhaltensänderungen jedoch nicht in die Auswertung einbezogen.

5.4.3 Kontaktdermatitis an der Brust

In dieser Studie lagen weder bei der Kontroll- noch bei der Versuchsgruppe Fälle von Kontaktdermatitis an der Brust vor. Frühere Untersuchungen zeigten, dass die Kontaktdermatitis an der Brust, Pododermatitis und „hock burn“ die gleichen ätiologischen Faktoren aufweisen (Ekstrand et al., 1998; Haslam et al., 2007; Shepherd & Fairchild, 2010). Im vorliegenden Versuch bestand zwar eine höhere Prävalenz von Pododermatitis und „hock burn“, diese Läsionen standen jedoch nicht in Bezug zur Kontaktdermatitis an der Brust. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit einer Studie von Allein et al. (2009), in der die Kontakdermatitis an der Brust negativ mit Pododermatitis und „hock burn“ assoziiert war. Als Hauptfaktoren im Zusammenhang mit dem Auftreten von Kontaktdermatitis an der Brust und an anderen Körperteilen gelten der Feuchtigkeitsgehalt und der Verdichtungsgrad des Einstreumaterials (Dunlop et al., 2016a; Ekstrand et al., 1998; Haslam et al., 2007; Hermans et al., 2006; Shepherd & Fairchild, 2010). In der vorliegenden Studie wurden keine signifikanten Unterschiede in der Einstreuqualität zwischen der Kontroll- und Versuchsgruppe beobachtet, was die ähnliche Prävalenz von Kontaktdermatitis an der Brust in beiden Gruppen erklären könnte. Der in der Kontroll- und Versuchsgruppe beobachtete Unterschied in der Prävalenz anderer Arten von Dermatitis, wie Pododermatitis und „hock burn“, bleibt bei dieser

Argumentationsweise aber unklar. Dies weist darauf hin, dass die Pathogenese dieser Arten von Dermatitis unterschiedlich ist. Hierzu ist zu bemerken, dass die Mechanismen, die der Pathogenese der Kontaktdermatitis an Fußballen, Intertarsalgelenken und Brust zugrundeliegen, noch weiterer wissenschaftlicher Studien bedürfen.

5.4.4 Verkratzungen

Im vorliegenden Versuch wurde beobachtet, dass die Lichtintensität mit der Prävalenz von Verkratzungen der Kategorien 1 und 2 nicht zusammenhing. Jedoch war die Prävalenz von Hautläsionen der Kategorie 3 in der Kontrollgruppe signifikant höher. Die Prävalenz von Verkratzungen in beiden Gruppen (Tabelle 21) lag aber unten dem Grenzwert von 2 % des integrierten Qualitäts- und Umweltmanagementsystems von Lohmann & CO. AG. Frühere Studien ergaben, dass die Prävalenz und der Schweregrad der Verkratzungen mit einer hoher Besatzdichte anstiegen (Elfadil et al., 1996; Frankenhuis et al., 1991; Proudfoot & Hulan, 1985). In der vorliegenden Untersuchung wurde eine ähnliche Besatzdichte in beiden Gruppen gemäß den gesetzlichen Vorgaben der TierSchNutztV § 19 Absatz 3 Satz 1 verwendet. In der Vergangenheit wurde die Lichtintensität als ein wichtiger Einflussfaktor für die motorische Aktivität bei Masthühnern beschrieben (Boshouwers & Nicaise, 1987; Kristensen et al., 2004; 2006a; Newberry et al., 1985). In diesen Untersuchungen hing eine niedrige Lichtintensität signifikant mit einer Verringerung der motorischen Aktivität zusammen und eine hohe motorische Aktivität in der Vogelgruppe wurde als eine von vielen Ursachen für Verkratzungen genannt (Gouveia et al., 2009). In der vorliegenden Studie könnte die geringere Prävalenz von Verkratzungen Kategorie 3 in der Versuchsgruppe in Vergleich zur Kontrollgruppe durch eine geringe Bewegungsfähigkeit aufgrund der hohen Prävalenz von Kontaktdermatitis an Fußballen und Intertarsalgelenken in der dieser Gruppe verursacht worden sein. Diese Läsionen wurden als schmerzhaft beschrieben und wirken sich somit negativ auf die Bewegungsfähigkeit von Masthühnern aus (Deep et al., 2010; Ekstrand et al., 1998; Shepherd & Fairchild, 2010; Škrbić et al., 2015). Daher scheint die alleinige Verwendung von niedrigen Lichtstärken in der intensiven Geflügelhaltung kein ausreichendes Verfahren zu sein, um im Rahmen der Verbesserung der allgemeinen Tiergesundheit und des Wohlbefindens von Masthühnern Hautverletzungen aufgrund von Verkratzungen Kategorie 3 zu vermeiden. Jedoch berichteten Kristensen et al. (2004), dass die Kontrolle der motorischen Aktivität über eine Steuerung der Lichtintensität bei bestimmten Maßnahmen, wie z.B. bei der Herausnahme und dem Transport von lebenden Vögeln, nützlich sein kann, um das Auftreten von Verkratzungen und Blutergüssen zu vermindern. Hier sind auch die Fähigkeiten des Personals beim

Einfangen, die Transportbedingungen und die Wartezeit vor der Schlachtung zu berücksichtigen (Gouveia et al., 2009). Da im vorliegenden Versuch die Daten von Verkratzungen erst nach der Schlachtung erhoben wurden, ist es schwierig, den Anteil der Verkratzungen zu ermitteln, die jeweils während der Mast, der Herausnahme und des Transports zum Schlachthof auftraten.

5.5 Schlussfolgerungen aus den vergleichenden Untersuchungen über Produktions- und Tierschutzparameter bei Masthühnern bei Haltung unter einem konstanten und einem diskontinuierlichen Lichtintensitätsprogramm

Vergleichende Untersuchungen über Produktions- und Tierschutzparameter bei Haltung von Masthühnern der Linie Ross 308 unter einem konstanten und einem diskontinuierlichen Lichtintensitätsprogramm ergaben Hinweise darauf, dass sich die Lichtintensität durch Beeinflussung der Wachstumsrate indirekt auf Produktions- und Tierschutzparameter von Masthühnern auswirken könnte. Dies entspricht auch Ergebnissen anderer Studien (Olanrewaju et al., 2006). Aufgrund der in der vorliegenden Untersuchung nur geringen Anzahl von Replikationen pro Lichtintensitätsprogramm konnte die Reproduzierbarkeit dieser Ergebnisse jedoch nicht ausreichend überprüft werden.

Die Beobachtungen in dieser Untersuchung zeigen, dass Vögel unter einem diskontinuierlichen Lichtintensitätsprogramm eine günstigere Körpermasse, Futteraufnahme und Schlachtkörpermasse bei einer niedrigeren Gesamtmortalität aufwiesen und damit bessere Produktionsparameter erreichten als Hühner, die unter einem konstanten Lichtintensitätsprogramm gehalten wurden. Jedoch stand die Verwendung einer diskontinuierlichen Lichtintensität im Zusammenhang mit einer Verschlechterung von Tierwohlparametern. Dies zeigte sich im vorliegenden Versuch in der erhöhten Prävalenz von Pododermatitis und „hock burn“. Dies könnte z. B. in Fällen, in welchen die Füße zum Konsum verwendet werden, auch einen erheblichen wirtschaftlichen Verlust darstellen, wie von Ekstrand et al. (1998) beschrieben. Außerdem wurde beobachtet, dass der Einsatz diskontinuierlicher Lichtintensität in Verbindung mit einer Erhöhung der Prävalenz von Herz-Kreislauf-Versagen (HKV) an den Tagen 11 - 18 und 18 - 40 stand. In einem Teilbereich ergab sich jedoch bei diskontinuierlicher Lichtintensität eine Verbesserung für den Parameter Verkratzungsstufe 3, also eine Verringerung des Auftretens von schweren Verkratzungen. Dennoch könnte dieses Ergebnis nur eine scheinbare Verbesserung anzeigen, die möglicherweise durch die Verminderung der motorischen Aktivität aufgrund der höheren Prävalenz von Pododermatitis und „hock burn“ bedingt wurde. Die Erhöhung der Häufigkeit von Pododermatitis und „hock burn“ in der Versuchsgrupe im Vergleich zur Kontrollgruppe ist

möglicherweise ein Resultat der Unterschiede in der Körpermasse zwischen beiden Gruppen, was auf die Bedeutung der Wachstumsrate für das Tierwohl von Masthühnern hindeuten könnte.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung stimmen mit mehreren frühere Studien überein, die hauptsächlich auf die negativen Auswirkungen geringer Lichtintensität auf den Tierschutz von Masthühnern hinweisen (Blatchford et al., 2009; Buyse et al., 1996; Deep et al., 2010; 2013; Kjaer & Vestergaard, 1999; Olanrewaju et al., 2006; Rault et al., 2017). Es muss erwähnt werden, dass diese Auswirkungen auch in Zusammenhang mit Veränderungen der okulären Strukturen stehen können, die sich auf das Wohlbefinden und die Orientierung der Masthühner im Stall auswirken (Schneeganß, 2018). Darüber hinaus gibt es komplexe Wechselwirkungen zwischen der Lichtintensität und dem Verhalten von Vögeln, die möglicherweise die Produktions- und Tierschutzparameter bei Masthühnern beeinflussen. In dieser Hinsicht soll erwähnet werden, dass bei niedigeren Lichtintensitäten die Möglichkeit zur Ausübung des spezies-spezifischen Verhaltens des Huhnes, die einen wichtigen Teil zum Wohlbefinden und Tierwohl bei den Tieren beiträgt, eingeschränkt ist. Aus diesen Gründen sind weitere Untersuchungen zur Verwendung von diskontinuierlichen Lichtintensitätsprogrammen notwendig, damit die ursächlichen Beziehungen zwischen Lichtintensität, Produktions- und Tierschutzparameter in der intensiven Masthühnerhaltung detaillierter verifiziert werden können.

6 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Studie war es, die Auswirkungen zweier Lichtintensitätsprogramme auf die Produktions- und Tierschutzparameter kommerziell genutzter Masthühner zu bewerten. Hierzu wurden im Zeitraum von Juni bis September 2016 zwei gemischtgeschlechtliche Herden (jeweils eine Versuchs- und eine Kontrollgruppe) mit insgesamt 69.400 Individuen der Linie Ross 308 untersucht, die nacheinander in baugleichen Ställen 42 Tage lang gemästet wurden. Die Lichtintensität der Kontrollgruppe lag bei den gesetzlich vorgeschriebenen 20 Lux. Bei der Versuchsgruppe wurde ein diskontinuierliches Lichtintensitätsprogramm mit stufenweise reduzierter Lichtintensität eingesetzt (Tag 1 - 10 = 20 Lux, Tag 11 - 13 = 15 Lux, Tag 14 - 18 = 10 Lux und Tag 19 - 40 = 5 Lux). Die Photo- und Skotophase der Kontroll- und Versuchsgruppe war während der Aufzucht identisch. Körpermasse (KM), Futteraufnahme (FA), Futterverwertung (FV) sowie Mortalität und ihre Ursachen wurden an den Tagen 1 - 10, 11 - 18, 19 - 40 und 1 – 40 erfasst. Am Ende jedes Versuchs wurden 25.113 und 26.323 Tiere in einer kommerziellen Verarbeitungsanlage geschlachtet und die Masse des Schlachtkörpers, sowie die Prävalenz von Pododermatitis, „hock burn“, Kontaktdermatitis an der Brust und Verkratzungen berechnet. Die Daten wurden vom statistischen Beratungslabor (StaBLab) des Instituts für Statistik der Ludwig-Maximilians-Universität München ausgewertet.

Individuen, die unter 20 Lux gehalten wurden, wiesen an den Tagen 1 - 10, 11 - 18, 19 - 40 und 1 – 40 eine geringere KM und Masse des Schlachtkörpers auf im Vergleich zu jenen, die unter einem diskontinuierlichen Lichtintensitätsprogramm gehalten wurden. Die FA war während der gesamten Aufzuchtperiode höher bei der Versuchsgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe. Bei der FV wurde kein einheitlicher Unterschied festgestellt. In der Gruppe mit 20 Lux war eine Zunahme der Gesamtmortalität über die Versuchsperiode 1 - 40 zu erkennen, während die Tiere, die unter diskontinuierlicher Lichtintensität gehalten wurden, eine tendenzielle Verringerung der Gesamtmortalität zeigten ($P < 0,01$). Bezüglich der Todesursachen war HKV signifikant höher in der Versuchsgruppe an den Tagen 11 - 18 und 19 - 40 ($P < 0,01$) im Vergleich zu den Vögeln der Kontrollgruppe. Andererseits zeigt die Prävalenz von Beinschäden als Selektionsgrund eine vorübergehende Erhöhung in der Versuchsgruppe nur an den Tagen 1 - 10 ($P < 0,01$). „Tote“ und sonstige Todesursachen waren die einzigen Ursachen, die sich als signifikant höher ($P < 0,01$) während der gesamten Versuchsperiode (1 - 40) erwiesen.

Die Prävalenz von Pododermatitis, „hock burn“ (Kontaktdermatitis an den Intertarsalgelenken) und Verkratzungen der Kategorie 3 zeigte signifikante Unterschiede zwischen beiden Gruppen. Masthühner, die einem diskontinuierlichen Lichtintensitätsprogramm ausgesetzt waren, wiesen eine

höhere Prävalenz an Pododermatitis und „hock burn“ auf ($P < 0,01$). Die Prävalenz der Verkratzungen der Kategorien 1 und 2 zeigte keinen signifikanten Unterschied ($P > 0,05$), jedoch war der Anteil an Verkratzungen der Kategorie 3 bei Vögeln, welche unter einer konstanten Lichtintensität gehalten wurden, signifikant höher ($P < 0,01$). Bei Kontaktdermatitis an der Brust lagen keine Fälle in der Kontroll- und Versuchsgruppe am Ende der Aufzuchtperiode vor.

Durch Vergleich der Auswirkungen der beiden verwendeten Lichtintensitätsprogramme konnte herausgefunden werden, dass die Individuen unter diskontinuierlicher Lichtintensität höhere KM, FA, Masse des Schlachtkörpers und niedrigere Gesamtmortalität aufwiesen im Vergleich zu jenen, die unter einem konstanten Lichtintensitätsprogramm gehalten wurden. Jedoch resultierte aus der Verwendung einer diskontinuierlichen Lichtintensität eine Erhöhung der Prävalenz von „hock burn“ und Pododermatitis, was eine Verschlechterung des Tierwohles mit sich brachte. Eine Verbesserung hingegen ergab sich für den Parameter der Verkratzungsstufe 3. Weiterhin wurde beobachtet, dass der Einsatz diskontinuierlicher Lichtintensität in Verbindung mit einer Erhöhung der Prävalenz von HKV an den Tagen 11 - 18 und 18 - 40 stand. Diese Befunde deuten darauf hin, dass die spezifische Ausgestaltung Lichtintensität auch über den Zeitverlauf der Mastphase hinweg eine wesentliche Rolle als Umweltfaktor in der intensiven Masthühnerhaltung spielt, welche sich signifikant auf die Produktions- und Tierschutzparameter auswirkt. Einschränkend ist hinzuzufügen, dass die Aussage der Untersuchungsergebnisse vorsichtig zu bewerten ist, da lediglich eine Versuchs- und Kontrollgruppe zur Verfügung stand und daher weiterführende (wiederholende) Untersuchungen notwendig sind.

7 Summary

The aim of the present study was to examine the effects of a constant and decreasing light intensity program on production and welfare of broiler chickens. Thus, in the period from June to September 2016, a total of 69.400 Ross x Ross 308 individuals were placed successively in an environmentally controlled room in two fattening runs (control and test group) and reared under two different light intensity programs for 42 days. The light intensity for the control group was set at 20 Lux as required by law. For the test group a step-down light program was applied (day 1 - 10 = 20 Lux, day 11 - 13 = 15 Lux, day 14 - 18 = 10 Lux and day 19 - 40 = 5 Lux). The duration of light and dark periods for the control and test groups was identical during fattening. Body mass (BM), feed intake (FI) and feed conversion ratio (FCR) and mortality and its causes were recorded on days 1 - 10, 11 - 18, 19 - 40 and 1 - 40. At the end of treatment, 25.113 and 26.323 birds, respectively, were processed in a commercial processing plant and the mass of carcass, prevalence of footpad dermatitis, hock burn, dermatitis on breast and scratches (scored from 1 to 3) was calculated. Data were analyzed by the statistical consulting unit STABLAB of the Institute of Statistics of the Ludwig-Maximilians-Universität München.

Individuals under constant light intensity had a lower BM on days 1 - 10, 11 - 18, 19 - 40 and 1 - 40 and mass of carcass compared to those kept under step-down light intensity program. FI was higher in the test group during the entire fattening period compared to the control group. There was no consistent difference in the FCR. In the control group, an increase in total mortality over the experimental period 1 - 40 was observed, while the animals kept under a step-down light program showed a tendency to decrease in total mortality ($P < 0.01$). In terms of causes of mortality, death due to cardiovascular disease was significantly higher in the test group on days 11 - 18 and 19 - 40 ($P < 0.01$) compared to birds in the control group. On the other hand, the prevalence of leg problems shows a transient increase in the test group only on days 1 to 10 ($P < 0.01$). "Dead" and other causes of death were the only causes of mortality, which were significantly higher ($P < 0.01$) at the end of the experimental period (1 - 40). Prevalence of footpad dermatitis, hock burn and scratches level 3 show significant differences between the groups. Broilers exposed to a step-down light intensity program had higher prevalence of footpad dermatitis and hock burns. The prevalence of scratches level 1 and 2 showed no differences between groups but scratches level 3 was higher on birds under a constant light intensity. In this study the presence of skin lesions on breast was not observed in any of the groups.

These results indicate that birds under a step-down light intensity program have higher BM, FI, mass of carcass and lower total mortality. However, the use of step-down light intensity was associated with an increase in the prevalence of

hock burn and pododermatitis, resulting in a reduction in animal welfare. An improvement on the other hand was found for the parameters scratch level 3. In addition, it was observed that the use of step down light intensity was related to an increase in the prevalence of death due to cardiovascular disease during days 11 - 18 and 19 - 40. These findings indicate that the specific design of the light intensity program also plays an essential role as an environmental factor in intensive broiler farming over the course of the fattening phase, which has a significant impact on the production and animal welfare parameters. However, due to the low number of replications per light intensity program, the results of the present study should be treated with caution.

8 Resumen

El objetivo del presente estudio fue examinar el efecto de dos programas de iluminación artificial, con intensidad de luz constante y decreciente, sobre parámetros de producción y bienestar animal en pollos broilers. Para esto, durante el periodo de junio a septiembre 2016, se utilizaron un total de 69.400 individuos de la línea Ross 308, los que fueron divididos en dos grupos y mantenidos sucesivamente bajo condiciones ambientales controladas. Ambos grupos (grupo control y grupo experimental) fueron sometidos a dos programas de intensidad de luz diferentes durante 42 días. La intensidad de luz del grupo control fue fijada en 20 Lux, como es requerido por ley europea. El grupo experimental fue sometido a un programa de intensidad de luz decreciente (días 1 – 10 = 20 Lux, días 11 – 13 = 15 Lux, días 14 - 18 = 10 Lux y días 19 – 40 = 5 Lux). La duración de los periodos de luz y oscuridad fue idéntica en ambos grupos. La masa corporal (MC), consumo de alimento (CA), la tasa de conversión alimentaria (TCA) y la mortalidad, así como también sus causas específicas, fueron registradas en los días 1 – 10, 11 – 18, 19 – 40 y 1 – 40. A término del experimento, 25.113 y 26.323 aves del grupo experimental y grupo control, respectivamente, fueron procesadas en una planta procesadora comercial y se calculó la masa de las carcasas, prevalencia de pododermatitis, dermatitis en tarsos, dermatitis en la pechuga y rasguños (categorizados de 1 a 3). Los datos fueron procesados por el departamento de consultorías estadísticas (STABLAB) del Instituto de Estadística de la Universidad Ludwig Maximilians de Munich (LMU).

Los individuos mantenidos bajo intensidad de luz constante mostraron una menor MC en los días 1 – 10, 11 – 18, 19 – 40, 1 – 40 y una menor masa de las carcasas, comparados con los individuos mantenidos bajo intensidad de luz decreciente. El CA fue mayor en el grupo experimental (intensidad de luz decreciente) durante todo el período de engorde en comparación con el grupo de control. No se observaron diferencias consistentes en el FCR entre ambos grupos. En el grupo control (Intensidad de luz constate) se observó un incremento en la mortalidad durante el periodo de estudio (días 1 – 40), mientras que los animales mantenidos bajo intensidad de luz decreciente mostraron una disminución de la mortalidad ($P < 0,01$). La mortalidad atribuida a enfermedad cardiovascular fue significativamente mayor en el grupo experimental en los días 11 – 18 y 19 – 40 ($P < 0,01$). En cuanto a las causas de muerte al final del periodo de estudio (1 – 40), los animales hallados muertos y otras cusas especificas de muerte fueron los únicos ítems significativamente diferentes entre ambos grupos ($P < 0,01$), siendo mayor en el grupo control. La prevalencia de pododermatitis y dermatitis en los tarsos fue significativamente mayor en el grupo experimental. La prevalencia de rasguños de categoría 1 y 2 no mostraron diferencias entre ambos grupos,

mientras que los rasguños de categoría 3 fueron mayores en el grupo control. En el presente estudio no se observó la presencia de dermatitis en la pechuga en ningún grupo.

Estos resultados indican que las aves mantenidas bajo un programa de intensidad de luz decreciente tienen mayor MC, CA, una mayor masa de las carcasas y menor mortalidad total. Sin embargo, el uso de la intensidad de luz decreciente se asoció con un aumento en la prevalencia de dermatitis en los tarsos y pododermatitis, lo que resultó en una reducción del bienestar animal. Por otro lado, se obsevó una disminución de los rasguños de categoría 3. Además, el uso de la intensidad de la luz decreciente estuvo relacionado con un aumento en la prevalencia de muerte por enfermedad cardiovascular durante los días 11 - 18 y 19 – 40. Estos resultados indican que el diseño específico del programa de intensidad de luz también juega un papel esencial como factor ambiental durante el transcurso del periodo de producción en pollos de engorde, lo que tiene un impacto significativo en los parámetros de producción y bienestar animal. Sin embargo, debido al bajo número de repeticiones por programa de intensidad de luz en el presente estudio, los resultados aquí mostrados deben tratarse con precaución.

9 Literaturverzeichnis

Adam, J. H., & Dimond, S. J. (1971). Influence of light on the time of hatching in the domestic chick. *Anim Behav*, 19 (2), 226 - 229.

Ahmad, F., Haq, A. U., Ashraf, M., Abbas, G., & Siddiqui, M. Z. (2011). Effect of different light intensities on the production performance of broiler chickens. *Pak Vet J*, 31 (3), 203 - 206.

Akyüz, H. Ç., & Onbaşilar, E. E. (2018). Light wavelength on different poultry species. *Poult Sci,* 1 (74), 79 - 88.

Allain, V., Mirabito, L., Arnould, C., Colas, M., Le Bouquin, S., Lupo, C., & Michel, V. (2009). Skin lesions in broiler chickens measured at the slaughterhouse: relationships between lesions and between their prevalence and rearing factors. *Br Poult Sci*, 50 (4), 407 – 417

Al-Samarai, F. R. (2015). Growth curve of commercial broiler as predicted by different nonlinear functions. *AJASR*, 1 (2), 6 - 9.

Alvino, G. M., Archer, G. S., & Mench, J. A. (2009). Behavioural time budgets of broiler chickens reared in varying light intensities. *Appl Anim Behav Sci*, 118 (1 - 2), 54 – 61.

Aman, M. M., Jasmon, G. B., Mokhlis, H., & Bakar, A. H. A. (2013). Analysis of the performance of domestic lighting lamps. *Energy Policy*, 52 (1), 482 - 500.

Andrews, D. K., & Zimmermann, N. G. (1990). A comparison of energy efficient broiler house lighting sources and photoperiods. *Poult Sci*, 69 (9), 1471 - 1479.

Apeldoorn, E. J., Schrama, J. W., Mashaly, M. M., & Parmentier, H. K. (1999). Effect of melatonin and lighting schedule on energy metabolism in broiler chickens. *Poult Sci*, 78 (2), 223 – 229.

Appleby, M. C., Hughes, B. O., & Elson, H. A. (1992). *Poultry production systems: Behaviour, management and welfare*. Oxfordshire, U.K: CAB International.

Arad, Z., Sighvatur, S., Arnason, S., Chadwick, A., & Skadhauge, E. (1985) Osmotic and hormonal responses to heat and dehydration in the fowl. *J Comp Physiol B*, 155 (2), 227 – 234.

Arowolo, M. A., He, J. H., He, S. P., & Adebowale, T. O. (2019). The implication of lighting programmes in intensive broiler production system. *World Poult Sci J*, 75 (1), 17 - 28.

Arteni, A. A., La Fountain, A. M., Alexandre, M. T. A., Fradot, M., Mendes - Pinto, M. M., Sahel, J. A., Picaud, S., Frank, H. A., Robert, B., & Pascal, A. A. (2019) Carotenoid composition and conformation in retinal oil droplets of the domestic chicken. *PLOS ONE*, 14 (5), 1 – 14.

Balazs, A., Laurent, T. C., Laurent, U. B. G., Deroche, M. H., & Burmey, D. M. (1959). Studies on the structure of the vitreous body. *Arch Biochem Biophys*, 81 (2), 464 – 479.

Balazs, A., Toth, L. Z., Eckl, E. A., & Mitchell, A. P. (1964). Studies on the structure of the vitreous body. Cytological and histochemical studies on the cortical tissue layer. *Exp Eye Res*, 3 (1), 57 – 71.

Baxter, M., Joseph, N., Osborne, V. R., & Bédécarrats, G. Y. (2014). Red light is necessary to activate the reproductive axis in chickens independently of the retina of the eye. *Poult Sci*, 5 (93), 289 – 1297.

Baylor, D. A., & Hodgkin, A. L. (1973). Detection and resolution of visual stimuli by turtle photoreceptors. *J Physiol*, 234 (1), 163 – 198.

Bennett, A. T. D., & Cuthill, I. C. (1994). Ultraviolet vision in birds: What is its function? *Vision Res*, 34 (11), 1471 – 1478.

Bennett, A. T. D., Cuthill, I. C., Partridge, J. C., & Lunau, K. (1997). Ultraviolet plumage colors predict male preferences in starlings. *Proc Natl Acad Sci*, 94 (16), 8618 – 8621.

Berg, C. (2004). Pododermatitis and hock burn in broiler chickens. In C. Weeks and A. Butterworth (Eds.), *Measuring and auditing broiler welfare* (pp. 37 - 49). Oxfordshire, UK: CAB International.

Berk, J. (2014). Haltung von Masthühnern: Haltungsansprüche – Fütterung – Tiergesundheit. DLG-Merkblatt 406. DLG-Ausschuss für Geflügelproduktion und Institut für Tierschutz und Tierhaltung Celle, Friedrich-Loeffler-Institut, Bundesforschungsinstitut für Tiergesundheit.

Berk, J., & Bartels, T. (2017). Technik in der Geflügelhaltung. In: F. Ludger (Hrsg.), *Jahrbuch Agrartechnik*. (S. 1 – 8). Braunschweig, Deutschland: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge.

Bernard, M., Guerlotté, J., Pierre, G., Gréchez-Cassiau, A., Iuvone, M. P., Zatz, M., & Voisin, P. (1999). Melatonin synthesis pathway : Circadian regulation of the genes encoding the key enzymes in the chicken pineal gland and retina. *Reprod Nutr Dev*, 39 (3), 325 – 334.

Bertolucci, C., & Foa, A. (2004). Extraocular photoreception and circadian entrainment in nonmammalian vertebrates. *Chronobiol Int*, 21 (4 – 5), 501 - 519.

Bessei, W. (1993). Der Einfluß der Besatzdichte auf Leistung, Verhalten und Gesundheit von Broilern – Literaturübersicht. *Arch Geflügelk,* 57 (3), 97 - 102.

Bessei, W. (2006). Welfare of broilers : A review. *World Poult Sci J,* 62 (3), 455 - 466.

Bilgili, S. F., Montenegro, G. I., Hess, J. B., & Eckman, M. K. (1999). Live performance, carcass quality, and deboning yields of broilers reared on sand as a litter source. *J Appl Poult Res*, 8 (3), 352 – 361.

Binkley, S. A., Macbride, S. E., Klein, D. C., Ralph, C. L., & Charles, L. R. (1973). Regulation of avian melatonin synthesis. *Science*, 181 (4096), 273 - 275.

Binkley, S. A. (1975). Pineal enzymes in chickens : Development of daily rhythmicity. *Gen Comp Endocrinol*, *27*, 424 – 429.

Binkley, S. A., Riebman, J. B., & Reilly, K. B. (1978). The pineal gland: A biological clock in vitro. *Science*, 202 (4373), 1198 – 1201.

Bizeray, D., Leterrier, C., Constantin, P., Picard, M., & Faure, J. M. (2000). Early locomotor behaviour in genetic stocks of chickens with different growth rates. *Appl Anim Behav Sci*, 68 (3), 231 – 242.

Blatchford, R. A., Klasing, K. C., Shivaprasad, H. L., Wakenell, P. S., Archer, G. S., & Mench, J. A. (2009). The effect of light intensity on the behavior, eye and leg health, and immune function of broiler chickens. *Poult Sci*, 88 (1), 20 – 28.

Blatchford, R. A., Archer, G. S., & Mench, J. A. (2012). Contrast in light intensity, rather than day length, influences the behavior and health of broiler chickens. *Poult Sci*, 91 (8), 1768 – 1774.

Blokhuis, H. J. (1983). The relevance of sleep in poultry. *World Poult Sci J*, 39 (1), 32 – 37.

Boďo, Š., & Gálik, G. (2018). Monitoring of litter quality and temperature in breeding of fattening chickens. *Acta Technologica Agriculturae*, 21 (1), 33 - 37.

Boshouwers, F. M. G., & Nicaise, E. (1987). Physical activity and energy expenditure of laying hens as affected by light intensity. *Br Poult Sci*, 28 (1), 155 – 163.

Boshouwers, F. M. G., & Nicaise, E. (1993). Artificial light sources and their influence on physical activity and energy expenditure of laying hens. *Br Poult Sci*, 34 (1), 11 – 19.

Bowmaker, J. K., & Knowles, A. (1977). The visual pigments and oil droplets of the chicken retina. *Vision Res*, 17 (7), 755 – 764.

Bowmaker, J. K., Heath, L. A., Wilkie, S. E., & Hunt, D. M. (1997). Visual pigments and oil droplets from six classes of photoreceptor in the retinas of birds. *Vision Res*, 37 (16), 2183 – 2194.

Bowmaker, J. K. (2008). Evolution of vertebrate visual pigments. *Vision Res*, 48 (20), 2022 – 2041.

Boyton, R. M. (1960). Theory of color vision. *J Opt Soc Am A,* 50 (10), 929 - 944.

Brickett, K. E., Dahiya, J. P., Classen, H. L., & Gomis, S. (2007). Influence of dietary nutrient density, feed form, and lighting on growth and meat yield of broiler chickens. *Poult Sci*, 86 (10), 2172 – 2181.

Brown, P. K., Wald, G. (1964) Visual pigments in single rods and cones of the human retina. Direct measurements reveal mechanisms of human night and color vision. *Science*, 144 (3614), 45-52.

Burkhardt, D. (1982). A note on some consequences of UV vision in birds. *Naturwissenschaften*, 69 (4), 153 – 157.

Burkhardt, D. (1989). UV vision : A bird´s eye view of feathers. *J Comp Physiol A*, 164 (6), 787 – 796.

Burton, R. F. (2008). The scaling of eye size in adult birds: Relationship to brain, head and body sizes. *Vision Res*, 48 (22), 2345 – 2351.

Buyse, J., Decuypere, E., & Michels, H. (1994). Intermittent lighting and broiler production. Effect on female broiler performance. *Arch Geflügelk*, 58 (2), 69 - 74.

Buyse, J., Simons, P., Boshouwers, F., & Decuypere, E. (1996). Effect of intermittent lighting, light intensity and source on the performance and welfare of broilers. *World Poultry Sci J*, 52 (5), 111 – 130.

Buyse, J., & Decuypere, B. (2003). Feeding patterns in chickens: Effects on endocrine and metabolic status. *Proceedings Australian Poultry Science Symposium*. University of Sydney, Suydney, Australia.

Canton, C. (2010). *Domestic chickens (Gallus gallus domesticus) classify spectral colors into four categories: UV, blue, green and red* (Degree project in biology, Master of Science). Biology Education Centre and Department of Animal Ecology. Uppsala University, Uppsala, Sweden.

Cao, J., Liu, W., Wang, Z., Xie, D., Jia, L., & Chen, Y. (2008). Green and blue monochromatic lights promote growth and development of broilers via stimulating testosterone secretion and myofiber growth. *Appl Anim Behav Sci*, 17 (2), 211 – 218.

Cao, J., Wang, Z., Dong, Y., Zhang, Z., Li, J., Li, F., & Chen, Y. (2012). Effect of combinations of monochromatic lights on growth and productive performance of broilers. *Poult Sci*, 91 (12), 3013 – 3018.

Cassone, V. M., Lane, R. F., & Menaker, M. (1986). Melatonin-Induced increases in serotonin concentrations in specific regions of the chicken brain. *Neuroendocrinology*, 42 (1), 38 – 43.

Cassone, V. M. (1990). Effects of melatonin on vertebrate circadian systems. *TINS*, 13 (11), 457 – 464.

Cassone, V. M., Forsyth, A. M., & Woodlee, L. (1990). Hypothalamic regulation of circadian noradrenergic input to the chick pineal gland. *J Comp Physiol A*, 167 (2), 187 – 192.

Charles, R. G., Robinson, F. E., Hardin, R. T., Yu, M. W., Feddes, J., & Classen, H. L. (1992). Growth, body-composition, and plasma androgen concentration of male broiler-chickens subjected to different regimens of photoperiod and light-intensity. *Poult Sci*, 71 (10), 1595 – 1605.

Chen, D. M., Collins, J. S., & Goldsmith, T. H. (1984). The ultraviolet receptor of bird retinas. *Science*, 225 (4659), 337 – 340.

Cherry, P., & Barwick, M. W. (1962). The effect of light on broiler growth. The effect of light on broiler growth. *Br Poult Sci*, 3 (1), 41 – 50.

CIE (1983). *The Basis of Physical Photometry.* Technical report 18.2. Commission Internationale de L'Eclairage, Vienna, 1 – 37.

Clark, W. D., & Classen, H. L. (2018). The effects of continuously or diurnally fed melatonin on broiler performance and health. *Poult Sci*, 74 (11), 1900 - 1904.

Classen, H. L., & Riddell, C. (1989). Photoperiodic effects on performance and leg abnormalities in broiler chickens. *Poultry Sci*, 68 (7), 873 – 879.

Classen, H. L., Riddell, C., & Robinson, F. E. (1991). Effects of increasing photoperiod length on performance and health of broiler chickens. *Br Poult Sci*, 32 (1), 21 – 29.

Classen, H. L. (2004). Day length affects performance, health and condemnations in broiler chickens. *Proceedings of the 16th Australian Poultry Science Symposium.* Poultry Research Foundation. Sydney, New South Wales, Australia.

Classen, H. L., Annett, C. B., Schwean-Lardner, K. V., Gonda, R., & Derow, D. (2004). The effects of lighting programmes with twelve hours of darkness per day provided in one, six or twelve hour intervals on the productivity and health of broiler chickens. *Br Poul Sci*, 45 (Suppl. 1), 7 – 9.

Corkery, G., Ward, S., Kenny, C., & Hemmingway, P. (2013). Monitoring environmental parameters in poultry production facilities. *Computer Aided Process Engineering (CAPE) Forum 2013*. Graz University of Technology (TU Graz). Graz, Austria.

Cornwall, M. C., Jones, G. J., Kefalov, V. J., Fain, G. L., & Matthews, H. R. (2000). Electrophysiological methods for measurement of activation of phototransduction by bleached visual pigment in salamander photoreceptors. *Methods Enzymol*, 316, 224 – 252.

Currie, R. J. W. (1999). Ascites in poultry : Recent investigations. *Avian Pathol*, 28 (4), 313 – 326.

Cuthbertson, R. A, Tomarev, S. I., & Piatigorsky, J. (1992). Taxon-specific recruitment of enzymes as major soluble proteins in the corneal epithelium of three mammals, chicken, and squid. *Proc Natl Acad Sci USA*, 89 (9), 4004 – 4008.

Cuthill, I. C., Partridge, J. C., Bennett, A. T. D., Church, S. C., Hart, N. S., & Hunt, S. (2000). Ultraviolet Vision in Birds. *Adv Study Behav*, 29 (C), 159 - 214.

Dartnall, H. J. A., Bowmaker, J. K, & Mollon, J. D. (1983). Human visual pigments: Microspectrophotometric results from the eyes of seven persons. *Proc R Soc Lond B,* 220, (1218), 115 – 130.

Davis, N. J., Prescott, N. B., Savory, C. J., & Wathes, C. M. (1999). Preferences of growing fowls for different light intensities in relation to age, strain, and behaviour. *Anim Welf*, 8 (3), 193 – 203.

Deaton, J. W., Reece, F. N., Kubena, L. F., & May, J. D. (1976). Effect of varying light-intensity on broiler performance. *Poult Sci*, 55 (2), 515 – 519.

Deaton, J. W., Lott, B. D., Branton, S. L., & Simmons, J. D (1988). Effect of differing light intensities on abdominal fat deposition in broilers. *Poult Sci*, 67 (9), 1239 – 1242.

Decuypere, E., Buyse, J., & Buys, N. (2000). Ascites in broiler chickens: Exogenous and endogenous structural and functional causal factors. *World Poult Sci J*, 56 (4), 367 – 377.

Deep, A., Schwean-Lardner, K., Crowe, T. G., Fancher, B. I., & Classen, H. L. (2010). Effect of light intensity on broiler production, processing characteristics, and welfare. *Poult Sci*, 89 (11), 2326 – 2333.

Deep, A., Raginski, C., Schwean-Lardner, K., Fancher, B. I., & Classen, H. L. (2013). Minimum light intensity threshold to prevent negative effects on broiler production and welfare. *Br Poult Sci*, 54 (6), 686 – 694.

Douglas, R.H., Marshall, N.J. (1999). A review of vertebrate and invertebrate ocular filters. In S. N. Archer, M. B. A. Djamgoz, E. R. Loew, J. C. Partridge, S. Vallerga (Eds.), *Adaptive mechanisms in the ecology of vision* (pp. 95–162). Dordrecht, The Netherlands: Springer.

Downs, K. M., Lien, R. J., Hess, J. B., & Bilgili, S. F., (2006). The effects of photoperiod length, light intensity, and feed energy on growth responses and meat yield of broilers. *J Appl Poult Res,* 15 (3), 406 – 416.

Doyle, S., & Menaker, M. (2007). Circadian photoreception in vertebrates circadian clock. *Controlling, Cold Spring Harb Symp Quant Biol*. 72, 499 - 508.

Dozier, W. A., Thaxton, J. P., Branton, S. L., Morgan, G. W., Miles, D. M., Roush, W. B., & Vizzier-Thaxton, Y. (2005). Stocking density effects on growth performance and processing yields of heavy broilers. *Poult Sci*, 84 (8), 1332 – 1338.

Dozier, W. A., Purswell, J. L., & Branton, S. L. (2006). Growth responses of male broilers subjected to high air velocity for either twelve or twenty-four hours from thirty-seven to fifty-one days of age. *J Appl Poult Res,* 15 (3), 362 - 366.

Dunlop, M. W., Moss, A. F., Groves, P. J., Wilkinson, S. J., Stuetz, R. M., & Selle, P. H. (2016a). The multidimensional causal factors of 'wet litter' in chicken-meat production. *Sci Total Environ*, 562, 766 – 776.

Dunlop, M. W., McAuley, J., Blackall, P. J., & Stuetz, R. M. (2016b). Water activity of poultry litter: Relationship to moisture content during a grow-out. *J Environ Manage*, 172, 201 – 206.

Egbuniwe, I. C., & Ayo, J. O. (2016). Physiological roles of avian eyes in light perception and their responses to photoperiodicity. *Poult Sci*, 3 (72), 605 - 614.

Ekstrand, C., Carpenter, T. E., Andersson, I., & Algers, B. (1998). Prevalence and control of foot-pad dermatitis in broilers in Sweden. *Br Poult Sci*, 39 (3), 318 – 324.

Elfadil, A. A., Vaillancourt, J., & Meek, A. H. (1996). Impact of stocking density, breed, and feathering on the prevalence of abdominal skin scratches in broiler chickens. *Avian Dis*, 40 (3), 546 – 552.

Estrada-Pareja, M. M., Márquez-Girón, S. M., & Restrepo-Betancur, L. F. (2007). Effect of temperature and relative humidity on the productive behaviour and the transfer of heat in broilers. *Rev Col Cienc Pec*, 20, 288 - 303.

Ferrante, V., Lolli, S., Marelli, S., Vezzoli, G., & Sirri, F. (2006). Effect of light programmes, bird densities and litter types on broilers welfare. *Proceedings. XII European Poultry Conference*, Verona, Italy.

Fidan, E. D., Nazligül, A., Türkyilmaz, M. K., Karaarslan, S., & Kaya, M. (2017). Effects of photoperiod length and light intensity on performance, carcass characteristics and heterophil to lymphocyte ratio in broilers. *Kafkas Univ Vet Fak Derg*, 23 (1), 39 – 45.

Foster, R. G., & Follett, B. K. (1985). The involvement of a rhodopsin-like photopigment in the photoperiodic response of the Japanese quail. *J Comp Physiol A*, 157 (4), 519 – 528.

Foster, R. G., Grace, M. S., Provencio, I., Degrip, J. W., & Garcia-Fernandez, J. M. (1994). Identification of vertebrate deep brain photoreceptors. *Neurosci Biobehav Rev*, *18* (4), 541 – 546.

Frankenhuis, M. T., Vertommen, M., & Hemminga, H. (1991). Influence of claw clipping, stocking density and feeding space on the incidence of scabby hips in broilers. *Br Poult Sci*, 32 (1), 227 – 230.

Fraser, A. F. (1985). Deprivation of maintenance behaviour in modern farm animal husbandry. In: A. F. Fraser (Eds), *Ethology of Farm Animals: A Comprehensive Study of the Behavioural Features of the Common Farm Animals* (pp 377-389). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.

Frewein, J., & Sinowatz, F. (1992). Sinnesorgane. In: R. Nickel, A. Schummer, E. Seiferle (Hrsg.), *Lehrbuch der Anatomie der Haustiere* (S. 365 - 384). Berlin, Hamburg: Paul Parey Verlag.

Garamszegi, L. Z., Moller, A. P., & Erritzoe, J. (2002). Coevolving avian eye size and brain size in relation to prey capture and nocturnality. *Proc Biol Sci*, 269 (1494), 961 – 967.

Garner, J. P., Falcone, C., Wakenell, P., Martin, M., & Mench, J. A. (2002). Reliability and validity of a modified gait scoring system and its use in assessing tibial dyschondroplasia in broilers. *Br Poult Sci*, 43 (3), 355 - 363.

Gerl, E. J., & Morris, M. R. (2008). The causes and consequences of color vision. *Evo Edu Outreach*, *1* (4), 476 – 486.

Gibson, K. S., (1940). Spectral luminosity factors. *J Opt Soc Am,* 30, (2), 51 - 61.

Goldsmith, T. H. (1980). Hummingbirds see near ultraviolet light. *Science*, 207 (4432), 786 – 788.

Goldsmith, T. H. (1991). Optimization, constraint and history in the evolution of eyes. *Q Rev Biol*, 65 (3), 281 – 322.

Goldsmith, T. H. (1994). Ultraviolet Receptors and Color Vision : Evolutionary implications and a dissonance of paradigms. *Vision Res*, 34 (11), 1479 - 1487.

Goldsmith, T. H., & Butler, B. K. (2005). Color vision of the budgerigar (Melopsittacus undulatus): Hue matches, tetrachromacy and intensity discrimination. *J Comp Physiol A*, 191 (10), 933 – 951.

Goldstein, E. B. (2010). Sensation and Perception. Belmont, USA: Wadsworth, Cengage Learning.

Gonzales, E., Junqueira, O. M., Macari, M., Andreatti-Filho, R. L., & García, E. A. (1998). Uso da restrição alimentar quantitativa para diminuir a mortalidade de frangos de corte machos. *R Bras Zootec*, 27 (1), 129 - 136.

Gouveia, K. G., Vaz-Pires, P., & Martins da Costa, P. (2009). Welfare assessment of broilers through examination of haematomas, foot-pad dermatitis, scratches and breast blisters at processing. *Anim Welfare*, 18 (1), 43 – 48.

Govardovskiĭ, V. I., & Zueva, L. V. (1977). Visual pigments of chicken and pigeon. *Vision Res*, 17 (4), 537 – 543.

Grashorn, M. (1998). Ursachen des plotzlichen Herztodes beim Broiler. [Probable causes of sudden death syndrome]. *Arch. Geflgelk*, 53 (1), 26 - 28.

Greene, J. A., Mccracken, R. M., & Evans, R. T. (1985). A contact dermatitis of broilers - clinical and pathological findings. *Avian Pathol*, 14 (1), 23 – 38.

Gwinner, E., Hau, M., & Heigl, S. (1997). Melatonin : Generation and modulation of avian circadian rhythms. *Brain Research Bulletin*, 44 (4), 439 – 444.

Halevy, O., Hodik, V., & Mett, A. (1996). The effects of growth hormone on avian skeletal muscle satellite cell proliferation and differentiation. *Gen Comp Endocrinol*, 101 (1), 43 – 52.

Halevy, O., Biran, I., & Rozenboim, I. (1998). Various light source treatments affect body and skeletal muscle growth by affecting skeletal muscle satellite cell proliferation in broilers. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol*, 120 (2), 317 – 323.

Halevy, O., Piestun, Y., Rozenboim, I., & Yablonka-Reuveni, Z. (2006). In ovo exposure to monochromatic green light promotes skeletal muscle cell proliferation and affects myofiber growth in posthatch chicks. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 290 (4), 1062 – 1070.

Hart, N. S., Partridge, J., & Cuthill, I. (1998). Visual pigments, oil droplets and cone photoreceptor distribution in the european starling (*Sturnus vulgaris*). *J Exp Biol*, 201 (9), 1433 – 1446.

Hart, N. S. (2001a). The visual ecology of avian photoreceptors. *Prog Retin Eye Res*, 20 (5), 675 – 703.

Hart, N. S. (2001b). Variations in cone photoreceptor abundance and the visual ecology of birds. *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol*, 187 (9), 685 – 697.

Hart, N. S. (2002). Vision in the peafowl (Aves: *Pavo cristatus*). *J Exp Biol*, 205 (24), 3925 – 3935.

Hart, N. S., & Hunt, M. D. (2007). Avian visual pigments: Characteristics, spectral tuning, and evolution. *Am Nat*, 169, (Supplement 1), 7 – 26.

Hartwig, H. G., & van Veen, T. (1979). Spectral characteristics of visible radiation penetrating into the brain and stimulating extraretinal photoreceptors - Transmission recordings in vertebrates. *J Comp Physio*, 130 (3), 277 – 282.

Haslam, S. M., Knowles, T. G., Brown, S. N., Wilkins, L. J., Kestin, S. C., Warriss, P. D., & Nicol, C. J. (2007). Factors affecting the prevalence of foot pad dermatitis, hock burn and breast burn in broiler chicken. *Br Poult Sci*, 48 (3), 264 – 275.

Håstad, O., Partridge, J. C., & Ödeen, A. (2009). Ultraviolet photopigment sensitivity and ocular media transmittance in gulls, with an evolutionary perspective. *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol*, 195 (6), 585 – 590.

Hecht, S. (1930). The development of Thomas Young's theory of color vision. *J Opt Soc Am A*, 20 (5), 231 – 270.

Hecht, S., Shlaer. S., Pirenne, M. H. (1942). Energy, quanta, and vision. *J Gen Physiol,* 25 (6), 819 – 840.

Helmholtz, H. von. (1852). On the theory of compound colors. *Philosophical Magazine, 4*, 519 – 534.

Hering, E. (1878). *Zur Lehre vom Lichtsinn*. Wien: Gerold.

Hering, E. (1905). Grundzuge der Lehre vom Lichtsinn. In A. Graefe-Seamisch (Hrsg.), *Handbuch der gesamter Augenheilkunde* (S 1 – 294*)*. Vol. 3, Kap. 13, *2te Ausg*. Berlin, Deutschland: J Springer.

Hering, E. (1964). *Outlines of a theory of the light sense* (L. M. Hurvich & D. Jameson, Trans.). Cambridge, Mass. USA: Harvard University Press.

Hermans, P. G., Fradkin, D., Muchnik, I. B., & Morgan, K. L. (2006). Prevalence of wet litter and the associated risk factors in broiler flocks in the United Kingdom. *Vet Rec*, 158 (18), 615 - 622.

Hodik, V., Mett, A., & Halevy, O. (1997). Mutual effects of growth hormone and growth factors on avian skeletal muscle satellite cells. *Gen Comp Endocrinol*, 170 (1), 161 – 170.

Honigmann, H. (1921) Untersuchungen uber Lichtempfindlichkeit und Adaptierung des Vogelauges. *Pflüger's Archiv ges. Physiologie*, 189 (1), 1 – 72.

Honkavaara, J., Koivula, M., Korpima, E., Siitari, H., & Viitala, J. (2002). Ultraviolet vision and foraging in terrestrial vertebrates. *OIKOS,* 98 (3), 505 - 511.

Huff, W. E., Malone, G. W., & Chaloupka, G. W. (1984). Effect of litter treatment on broiler performance and certain litter quality parameters. *Poult Sci*, 63 (11), 2167 – 2171.

Hulan, H. W., Proudfoot, F. G., Canada, A., & Scotia, N. (1987). Effects of light source, ambient temperature, and dietary energy source on the general performance and incidence of leg abnormalities of roaster chickens. *Poult Sci*, 66 (4), 645 – 651.

Hulzebosch, J. (2004). What affects the climate in poultry houses? *World Poultry*, 20, 36 – 38.

Jacobs, G. H. (1992). Ultraviolet vision in vertebrates. *Amer Zool*, 32 (4), 544 - 554.

Jainski, P. (1938). *Die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges und ihre Bedeutung für die Lichtmesstechnik*. Dissertation, Technische Hochschule Berlin, Berlin, Deutschland.

Jameson, K. A. (2005). Culture and cognition: What is universal about the representation of color experience? *Jocc*, 5 (3 – 4), 293 – 347.

Jester, J. V., Budge, A., Fisher, S., & Huang, J. (2005). Corneal keratocytes: Phenotypic and species differences in abundant protein expression and in vitro light-scattering. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 46 (7), 2369 – 2378.

John, T. M., Viswanathan, M., George, J. C., & Scanes, C. G. (1990). Influence of chronic melatonin implantation on circulating levels of growth hormone, thyroid hormones, glucose, and free fatty acids in the pigeon. *Gen Comp Endocrinol*, 79 (2), 226 – 232.

Jones, M. P., Pierce, K. E., & Ward, D. (2007). Avian vision: A review of form and function with special consideration to birds of prey. *J Exot Pet Med*, 16 (2), 69 – 87.

Kaukonen, E., Norring, M., & Valros, A. (2016). Effect of litter quality on foot pad dermatitis, hock burns and breast blisters in broiler breeders during the production period, *Avian Pathol.* 45 (6), 667 – 673.

Kestin, S. C., Knowles, T. G., Tinch, A. E., & Gregory, N. G. (1992). Prevalence of leg weakness in broiler chickens and its relationship with genotype. *Vet Rec,* 131 (9), 190 – 194.

Kiltie, R. A. (2000). Scaling of visual acuity with body size in mammals and birds. *Funct Ecol*, 14 (2), 226 – 234.

Kjaer, J. B., & Vestergaard, K. S. (1999). Development of feather pecking in relation to light intensity. *Appl Anim Behav Sci*, 62 (2 - 3), 243 - 254.

Kjaer, J. B., Su, G., Nielsen, B. L., & Sørensen, P. (2006). Foot pad dermatitis and hock burn in broiler chickens and degree of inheritance. *Poult Sci*, 85 (8), 1342 - 1348.

Klasing, K. C., Laurin, D. E., Peng, R. K., & Fry, D. M. (1987). Immunologically mediated growth depression in chicks: influence of feed intake, corticosterone and interleukin-1. *J Nutr*, 117 (9), 1629 – 1637.

Klasing, K. C. (2007). Nutrition and the immune system. *Br Poult Sci*, 48 (5), 525 – 537.

Kliger, D. S., Milder, S. J., & Dratz, E. A. (1977). Solvent effects on the spectra of retinal schiff bases—I. Models for the bathochromic shift of the chromophore spectrum in visual pigments. *Photochem Photobiol*, 25 (3), 277 – 287.

Korbel, R. T. (1994). Augenheilkunde bei Vögeln: Ätiologie und Klinik von Augenkrankheiten, Luftsack-Perfusionsanästhesie, ophthalmologische Photographie und Bildatlas der Augenerkrankungen bei Vögeln (Vet.Habil.). Zentrum für klinische Tiermedizin. Ludwig-Maximilians-Universität München. München, Deutschland.

Korbel, R. T., Jakoby, J., R., & Kösters, J. (1998). Light perception in turkeys – hypothesis on influences of the behaviour. *1st Int. Congr. Turkey Diseases*. Berlin, Deutschland.

Korbel R. T, Reese S., Nell, B., Walde, I., & Redig P. T. (2001). The vascular pattern of the avian eye – anatomical structures and correspondent findings in the healthy and diseased eye using fluorescein angiography. *Proceedings 6th Conf Europ Assoc Avian Vet* (AAV). European Association of Avian Veterinarians. Munich, Germany.

Korbel, R. T., Szölgyenyi, W. (2001). Vision-related aspects of animal welfare in aviculture. *Abs. 4th Scientific ECAMS* Meeting (*9 – 10).* European College of Avian Medicine and Surgery (ECAMS). Munich, Germany.

Korbel, R. T., & Sturm, K. (2005). Review on lightsources under artificial light circumstances. *Proceedings 6th Scientific ECAMS Meeting (7 – 8)*. European College of Avian Medicine and Surgery (ECAMS). Arles, France.

Korbel, R. T. (2007). Lichtbedingte Einflüsse auf Aktivität und Leistung in der Hähnchenmast unter Aspekten des Tierschutzes und der Wirtschaftlichkeit. *Tagungsband Geflügelfachgespräch*. Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft (DVG). Hannover, Deutschland.

Korbel, R. T. (2008). Bedeutung des Lichtes in der kommerziellen Geflügelproduktion. *Geflügelforum des Geflügelwirtschaftsverbandes*. Leitfaden der Zentralverband der Deutschen Geflügelwirtschaft e. V (ZDG). Baden-Württemberg, Weilheim/Teck, Deutschland.

Korbel, R. T. (2010). Beleuchtungsqualität und –quantität im Geflügelstall: Ein (technischer) Überblick zur Tierschutzgerechtigkeit und Messbarkeit kommerziell verfügbarer Kunstlichtquellen. *Tagung über Vogelkrankheiten.* 16 Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft *(DVG).* München, Deutschland.

Korbel, R., Helmer, M., Knoll-Sauer, M. (2015). Praktischer Leitfaden zur Lichtmessung in Geflügelställen. 88. Fachgespräch über Geflügelkrankheiten. Tagung der DVG- Fachgruppe „Geflügelkrankheiten“ und der Deutschen Gruppe der WVPA. Hannover, 23 - 24.

Korbel, R., Sigg, R. (2015a). Central and peripheral avian corneal thickness measured with Optical Coherence Tomography (OCT) in the normal eye. *Proc 2nd International Conference on Avian Herpetological and Exotic Mammal Medicine* (397) (ICARE). Paris.

Korbel, R. Sigg, R. (2015b). Investigations in central and peripheral cornal thickness using optical coherence tomography (OCT). *Proc 8th “Hafez”* (62-66). International Symposium, Berlin.

Korbel, R. T., Reese, S., & König, H. E. (2016). Clinical Examination. In: H. E König, R. T. Korbel and H-G. Liebich (Eds), *Avian Anatomy: Textbook and Colour Atlas 2nd Edition* (pp 263 – 270). London, UK: 5m Publishing Ltd

Korbel, R. (2019). Persönliche Mitteilung.

Korte, S. M., Sgoifo, A., Ruesink, W., Kwakernaak, C., van Voorst, S., Scheele, C. W., & Blokhuis, H. J. (1999). High carbon dioxide tension (pCO2) and the incidence of cardiac arrhythmias in rapidly growing broiler chickens. *Vet Rec*, 145 (2) 40 - 43.

Koutsos, E. A. & Klasing, K. C. (2001). Modulation of nutritional status by the immune response. *Prodceedings 28th Annual Carolina Poultry Nutrition Conference* (1 – 6). Sheraton Imperial Hotel, Raleigh, North Carolina. USA.

Kristensen, H. H., Prescott, N. B., Ladewig, J., Perry, G. C., & Wathes, C. M. (2002). Light quality and the visual acuity in broiler chickens. *Proceedings of the 36th International Congress of the ISAE*. International Society for Applied Ethology (ISAE). Egmond aan Zee, The Netherlands.

Kristensen, H. H., Aerts, J. M., Leroy, T., Berckmans, D., & Wathes, C. M. (2004). Using light to control activity in broiler chickens. *Br Poult Sci*, 45 (Suppl 1), 30 – 31.

Kristensen, H. H., Aerts, J. M., Leroy, T., Wathes, C. M., & Berckmans, D. (2006a). Modelling the dynamic activity of broiler chickens in response to step-wise changes in light intensity. *Appl Anim Behav Sci*, 101 (1-2), 125 - 143.

Kristensen, H. H., Perry, G., Prescott, N. B., Ladewig, J., Ersbøll, A. K., & Wathes, C. M. (2006b). Leg health and performance of broiler chickens reared in different light environments. *Br Poul Sci*, 47 (3), 257 – 263.

Kristensen, H. H., Prescott, N. B., Perry, G. C., Ladewig, J., Ersbøll, A. K., Overvad, K. C., & Wathes, C. M. (2007). The behaviour of broiler chickens in different light sources and illuminances. *Appl Anim Behav Sci*, 103 (1-2), 75 – 89.

Kristensen, H. H. (2008). The effects of light intensity, gradual changes between light and dark and definition of darkness for the behaviour and welfare of broiler chickens, laying hens, pullets and turkeys. Norwegian Scientific Committee for Food Safety.

Kuhn, A. (1924). Versuche über das Unterscheidungsvermögen der Bienen und Fische für Spektrallichter. *Nachr D Ges Wiss*, 1, 66 – 71.

Lee, P., & Pang, S. (1992). Identification and characterization of melatonin binding sites in the gastrointestinal tract of ducks. *Life Sci*, 50 (2), 117 - 125.

Lauber, J. K., Shutze, J. V., & McGinnis, J. (1961). Effects of exposure to continuous light on the eye of the growing chick. Experimental Biology and Medicine 1961;106: 871-2.

Lauber, J., Kinnear, A. (1979). Eye enlargement in birds induced by dim light. Can JOphthalmol 1979;14: 265-9.

Lauber, J. K. (1987). Light-induced avain glaucoma as an animal model for human primary glaucoma. Journal of Ocular Pharmacology and Therapeutics 1987;3: 77-100.

Lehmann, W. (1983). Phosphor deterioration in fluorescent lamps. *Electrochem Soc*, 130 (2), 426 – 431.

Levenick, C. K., & Leighton, A. T. (1988). Effects of photoperiod and filtered light on growth, reproduction, and mating behavior of turkeys. Growth performance of two lines of males and females. *Poult Sci*, 67 (11), 1505 - 1513.

Lewis, P. D., & Perry, G. C. (1990). Glossary of avian photoperiodic terminology and methods of expressing lighting regimens. 31: 677-684*Br Poult Sci*, 31 (3), 677 - 684.

Lewis, P. D., & Morris, T. R. (1998). Responses of domestic poultry to various light sources. *Worlds Poult Sci J*, 54 (1), 7 – 25.

Lewis, P. D., & Morris, T. R. (2000). Poultry and coloured light. *World Poult Sci J*, 56 (3), 189 – 207.

Lewis, P. D., Danisman, R., & Gous, R. M. (2009). Photoperiodic responses of broilers. I. Growth, feeding behaviour, breast meat yield, and testicular growth. *Br Poult Sci*, 50 (6), 657 – 666.

Lichter, J., & Kleibrink, J. (2015). Geflügelwirtschaft weltweit - Deutschland im internationalen Vergleich. Eine Analyse der Erzeugungsstandards Handelsblatt Research Institute, Düsseldorf, Deutschland.

Lien, R. J., Hess, J. B, McKee, S. R., Bilgili, S. F. & Townsed, J. C. (2007). Effect of light intensity and photoperiod on live performance, heterophil-to-lymphocyte ratio, and processing yields of broilers. *Polt Sci*, 86 (7), 1287 – 1293.

Lien, R. J., Hess, J. B., McKee, S. R., & Bilgili, S. F. (2008). Effect of light intensity on live performance and processing characteristics of broilers. *Poult Sci*, 87 (5), 853 – 857.

Lind, O., Mitkus, M., Olsson, P., & Kelber, A. (2013). Ultraviolet vision in birds: The importance of transparent eye media. *Proc R Soc Lond B Biol Sci*, 281 (1774), 20132209 – 20132209.

Lipetz, L. E. (1984). A new method for determining peak absorbance of dense pigment samples and its application to the cone oil droplets of Emydoidea blandingii. *Vision Res*, 24 (6), 597 – 604.

Loch, F. C., de Oliveira, M. C., da Silva, D., Gonçalves, B. N., de Faria, B. F., & Menezes, J. F. S. (2011). Quality of poultry litter submitted to different treatments in five consecutive flocks. *R Bras Zootec*, 40 (5), 1025 – 1030.

Lolli, S., Bessei, W., Cahaner, A., Yadgari, L., & Ferrante, F. (2010). Der Einfluss der Besatzdichte auf das Verhalten von genetisch federlosen und normal befiederten Masthühnern unter hohen Temperaturen. *Arch Geflügelk*, 74 (2), 73 – 80.

Louton, H., Bergmann, S., Reese, S., Erhard, M., Bachmeier, J., R¨osler, B., & Rauch, E. (2018). Animal- and management-based welfare indicators for a conventional broiler strain in 2 barn types (Louisiana barn and closed barn). *Poult Sci*, 97 (8), 2754 – 2767.

Louton, H., Keppler, C., Erhard, M., Tuijl, O., Bachmeier, J., Damme, K., Reese, S., & Rauch, E. (2019). Animal-based welfare indicators of 4 slow-growing broiler genotypes for the approval in an animal welfare label program. *Poult Sci,* 98 (6), 2326 – 2337.

Marder, J., & Arad, Z. (1989). Panting and acid-base regulation in heat stressed birds. *Comp Biochem Physiol A Comp Physiol*, 94 (3), 395 - 400.

Mauro, A. (1961). Satellite cell of skeletal muscle fibers. *J Biophys Biochem Cytol*, 9 (2), 493 – 495.

Maxwell, J. C. (1865). A dynamical theory of the electromagnetic field. *Phil Trans R Soc Lond*, 155, 459 – 512.

Mayne, R. K. (2005). A review of the aetiology and possible causative factors of foot pad dermatitis in growing turkeys and broilers. *World Poult Sci J*, 61(2), 256 – 267.

McKinley R. W. (1947). *IES lighting handbook. The Standard Lighting Guide*. Baltimore, Maryland, USA: The Waverly Press.

Mendes, A. S., Paixao, S. J., Restelatto, R., Morello, G. M., De Moura, D. J., & Possenti, J. C. (2013). Performance and preference of broiler chickens exposed to different lightig sources. *J Appl Poult Res*, 22 (1), 62 – 70.

Mendeş, M. (2009). Growth Curves for Body Weight and Some Body Measurement of Ross 308 Broiler Chickens. *J Appl Anim Res,* 36 (1), 85 – 88.

Miner, M. L., & Smart, R. A. (1974). Causes of enlarged sternal bursas (Breast Blisters). *Avian Dis*, 19 (2), 246 – 256.

Mohammadrezaei, M., Toghyani, M., Gheisari, A., & Toghyani, M. (2011). Modeling daily feed intake of four strains of broiler chicks. *J Anim Vet Adv,* 10(9), 1137 – 1140.

Moreno, I. (2010). Dirty LED: Effect of dust, fat, fingerprints, water, oil and coal on light output. *Proceedings Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)* 7617. *Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XIV, 7617 1S*. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. San Francisco, California, USA.

Moss, F.P., Simmonds, R. A., & McNary, H. W. (1964). The growth and composition of skeletal muscle in the chicken: 2. The relationship between muscle weight and the number of nuclei. *Poult Sci*, 43 (5), 1086 - 1091.

Moss, F. P., & Leblond, C. P. (1971). Satellite cells as the source of nuclei in muscles of growing rats. *Anat Rec*, 170 (4), 421 – 435.

Nain, S., Wojnarowicz, C., Laarveld, B., & Olkowski, A. A. (2009). Vascular remodeling and its role in the pathogenesis of ascites in fast growing commercial broilers. *Res Vet Sci*, 86 (3), 479 – 484.

Nakatani, K., & Yau, K - W. (1989). Sodium-dependent calcium extrusion and sensitivity regulation in retinal cones of the salamander. *J Physiol*, 409 (1), 525 – 548.

Neves, D. P., Banhazi, T. M., & Nääs, I. A. (2014). Feeding behaviour of broiler chickens: a review on the biomechanical characteristics. *Braz J Poultry Sci*, 16 (2), 1 – 16.

Newberry, R. C., Hunt, J. R., & Gardiner, E. E. (1985). Effect of alternating lights and strain on roaster chicken performance and mortality due to sudden death syndrome. *Can J Anim Sci*, 65 (4), 993 – 996.

Newberry, R. C., Hunt, J. R., & Gardiner, E. E. (1986). Environment and health light intensity effects on performance, activity, leg disorders, and sudden death syndrome of roaster chickens. *Poult Sci*, 65 (12), 2232 – 2238.

Newberry, R. C., Hunt, J. R., & Gardiner, E. E. (1988). Influence of light intensity on behavior and performance of broiler chickens. *Poult Sci*, 67 (7), 1020 - 1025.

Norren, D. V., & Vos, J. J (1974) Spectral transmission of the human ocular media. *Vision Res*, 14 (11), 1237 – 1244.

Nuboer, J. F. W. (1986). A comparative view on colour vision. *Neth J Zool*, 36 (3), 344 – 380.

Nuboer, J. F. W., Coemans, M. A. J. M., & Vos, J. J. (1992). Artificial lighting in poultry houses: Are photometric units appropriate for describing illumination intensities? *Br Poult Sci*, 33 (1), 135 – 140.

Okano, T., Fukada, Y., Artamonov, I. D., & Yoshizawa, T. (1989). Purification of cone visual pigments from chicken retina. *Biochemistry,* 28 (22), 8848 - 8856.

Okano, T., Kojima, D., Fukada, Y., Shichida, Y., & Yoshizawa, T. (1992). Primary structures of chicken cone visual pigments: Vertebrate rhodopsins have evolved out of cone visual pigments. *Proc Nati Acad Sci USA*, 89 (13), 5932 - 5936.

Okano, T., Fukada, Y., & Yoshizawa, T. (1995). Molecular basis for tetrachromatic color vision. *Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol*, 112 (3), 405 – 414.

Olanrewaju, H. A., Thaxton, J. P., Iii, W. A. D., Purswell, J., Roush, W. B., & Branton, S. L. (2006). A review of lighting programs for broiler production. *Int J Poult Sci*, 5 (4), 301 - 308.

Olanrewaju, H. A., Purswell, J., Collier, S., & Branton, S. (2010). Effect of ambient temperature and light intensity on growth performance and carcass characteristics of heavy broiler chickens at 56 days of age. *Int J Poult Sci*, 9 (8), 720 – 725.

Olanrewaju, H. A., Purswell, J., Collier, S., & Branton, S. (2012). Influence of photoperiod, light intensity and their interaction on growth performance and carcass characteristics of broilers grown to heavy weights. *Int J Poult Sci*, 11 (12), 739 – 746.

Olanrewaju, H., A., Miller, W., Maslin, W., Collier, S., Purswell, J., & Branton, S. (2015). Influence of photoperiod, light intensity and their interaction on health indices of modern broilers grown to heavy weights. *Int J Poult Sci*, 4 (14), 183 – 190.

Olanrewaju, H. A., Miller, W., Maslin, W., Collier, S., Purswell, J., & Branton, S. (2016). Effects of light sources and intensity on broilers grown to heavy weights. Part 1: Growth performance, carcass characteristics, and welfare indices. *Poult Sci*, 95 (4), 727 – 735.

Osei, P., Robbins, K., & Shirley, H. V. (1989). Effects of exogenous melatonin on growth and energy metabolism of chickens. *Nutr Res*, 9 (c), 69 - 81.

Osorio, D., Miklósi, A., & Gonda, Z. (1999a). Visual ecology and perception of coloration patterns by domestic chicks. *Evol Ecol*, 13 (7 – 8), 673 – 689.

Osorio, D., Vorobyev, M., & Jones, C. D. (1999b). Colour vision of domestic chicks. *J Exp Biol*, 202 (21), 2951 – 2959.

Osorio, D., & Vorobyev, M. (2008). A review of the evolution of animal colour vision and visual communication signals. *Vision Res*, 48 (20), 2042 – 2051.

Packer, O., & Williams, D. R. (2003). Light, the retinal image, and photoreceptors. In S. K. Shevell (Eds), *The Science of Color* (pp 42 - 79). Oxford, UK: Elsevier.

Pang, C. S., Brown, G. M., Tang, P. L., Cheng, K. M., & Pang, S. F. (1993). 2-[125|] Iodomelatonin binding sites in the lung and heart: A link between the photoperioddic signal, melatonin, and the cardiopulmonary system. *Biol Signals*, 2 (4), 228 – 236.

Partridge, J. C. (1989). The visual ecology of avian cone oil droplets. *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol*, 165 (3), 415 - 426.

Parvin, R., Mushtaq, M. M. H., Kim, M. J., & Choi, H. C. (2014) Light emitting diode (LED) as a source of monochromatic light: a novel lighting approach for behaviour, physiology and welfare of poultry. *World Poult Sci J*, 3 (70), 557 – 562.

Philips Lighting (1988). *Correspondence Course Lighting Application, No 3, Light and Radiation*. Philips Lighting B.V, The Netherlands, 3 - 34.

Piatigorsky, J. (2001). Enigma of the abundant water-soluble cytoplasmic proteins of the cornea: The “refracton” hypothesis. *Cornea*, 20 (8), 853. - 858.

Pierson, F. W., Hester, P. Y., & Wilson, E. K. (1981). The effect of caponization and dietary 17 a-methyltestosterone on the incidence of leg abnormalities in turkeys 1. *Poult Sci*, 60 (9), 2144 – 2149.

Prayitno, D. S., Phillips, C. J. C., & Omed, H. (1997a). The effects of color of lighting on the behavior and production of meat chickens. *Poult Sci*, 76 (3), 452 – 457.

Prayitno, D. S., Phillips, C. J. D., & Stokes, D. K. (1997b). The effects of color and intensity of light on behaviour and leg problems in broiler chickens. *Poult Sci*, 76 (12), 1674 – 1681.

Prescott, N. B., & Wathes, C. M. (1999a). Reflective properties of domestic fowl (Gallus g. domesticus), the fabric of their housing and the characteristics of the light environment in environmentally controlled poultry houses. *Br Poult Sci*, 40 (2), 185 – 193.

Prescott, N. B., & Wathes, C. M. (1999b). Spectral sensitivity of the domestic fowl (Gallus g. domesticus). *Br Poult Sci*, 40 (3), 332 – 339.

Prescott, N. B., & Wathes, C. M. (2002). Preference and motivation of laying hens to eat under different illuminances and the effect of illuminance on eating behaviour. *Br Poult Sci*, 43 (2), 190 – 195.

Prescott, N.B., Kristensen, H.H., & Wathes, C.M. (2004). Light. In C. Weeks and A. Butterworth (Eds.), *Measuring and auditing broiler welfare* (pp. 101 - 106). Oxfordshire, UK: CAB International.

Proudfoot, F. G., & Hulan, H. W. (1985). Effects of stocking density on the incidence of scabby hip syndrome among broiler chickens. *Poult Sci*, 64 (10), 2001 – 2003.

Purswell, J. L., Dozier, W. A., Olanrewaju, H. A., Davis, J. D., Xin, H., & Gates, R. S. (2012). Effect of temperature-humidity index on live performance in broiler chickens grown from 49 To 63 days of age. *9th International Livestock Environment Symposium (1 – 9).* American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). Valencia, Spain.

Purswell, J. L., Olanrewaju, H. A, & Linhoss, J. E. (2018). Effect of Light Intensity Adjusted for Species-Specific Spectral Sensitivity on Live Performance and Processing Yield of Male Broiler Chickens. *J Appl Poult Res*, pfy034.1 – 7.

Raccoursier–Frost, M. (2016). *Effect of light intensity on production parameters and feeding behavior of broilers* (Thesis and Dissertations. Master of Science in Poultry Science). Department of Poultry Science. University of Arkansas. Arkansas, USA.

Rahimi, G., Rezaei, M., Hafezian, H., & Saiyahzadeh, H. (2005). The effect of intermittent lighting schedule on broiler performance. *Int J Poult Sci*, 4 (6), 396 – 398.

Rajchard, J. (2009). Ultraviolet (UV) light perception by birds: A review. *Vet Med*, 54 (8), 351 – 359.

Raouf, M. R., Zaidan, A. W., Nor, A. I., Zainal, A. T., & Buong, W. C. (2016). Transparent Blend of Poly (Methylmethacrylate)/ Cellulose Acetate Butyrate for the Protection from Ultraviolet. *Polymers*, 8 (128), 1 – 10.

Rault, J. L, Clark, K., Groves, P. J., & Cronin, G. M. (2017). Light intensity of 5 or 20 lux on broiler behavior, welfare and productivity. *Poult Sci*, 96 (4), 779 - 787.

Reece, F. N., & Lott, B. D. (1982). The effect of environmental temperature on sensible and latent heat production of broiler chickens. *Poult Sci*, (8),1590-1953.

Reese, S, Korbel, R., Liebich, H-G. (2016). Eye.In: H. E. König, R. T. Korbel, H-G. Liebich (Eds), *Colour atlas of avian anatomy* (pp 216 – 242). Sheffield, UK: 5 m Publishing.

Reiter, K., & Bessei, W. (1995). Einfluss eines Lauftrainings auf die Lauffähigkeit von schnell und langsam wachsenden Broilern. *Aktuelle Arbeiten zur artgemäßen Tierhaltung 1994.* KTBL-Schrift 370 (S. 206 – 217). Darmstadt, Deutschland.

Reiter, K., & Bessei, W. (1998a). Einfluss der Laufaktivität auf die Knochenentwicklung und Beinschäden bei Broilern. *Arch Geflügelk*, 62 (6), 247 – 253.

Reiter, K., & Bessei, W. (1998b).Möglichkeiten zur Verringerung von Beinschäden bei Broilern und Puten (Übersicht). *Arch Geflügelk*, 62 (4), 145 – 149.

Reiter, K. (2006). Verhalten und Wohlbefinden bei Masthühnern. *Arch Geflügelk*, 70 (5), 208 – 215.

Reppert, S. M., Weaver, D. R., Cassone, V. M., Godson, C., & Kolakowski, L. F. (1995). Melatonin receptors are for the birds : Molecular analysis of two receptor subtypes differentially expressed in chick brain. *Neuron*, 15 (5), 1003 – 1015.

Richards, M. P., Rosebrough, R. W., Coon, C. N., & McMurtry, J. P. (2010). Feed intake regulation for the female broiler breeder: In theory and in practice. *J Appl Poult Res*, 19 (2), 182 – 193.

Riddell, A. C., & Classen, H. L. (1992). Effects of increasing photoperiod length and anticoccidials on performance and health of roaster chickens. *Avian Dis*, 36 (3), 491 – 498.

Rintamaki, H., Hissa, R., Balthazart, J., & Scanes, C. G. (1984). The effect of pinealectomy on plasma levels of gonadotrophins and growth hormone in the pigeon (Columba liuia). *J Pineal Res*, 1 (4), 381 – 389.

Robertshaw, D. (2006). Mechanisms for the control of respiratory evaporative heat loss in panting animals. *J Appl Physiol*, 101 (2), 664 – 668.

Rodriguez, I., & Choct, M. (2019). Feed intake pattern of broiler chickens under intermittent lighting: Do birds eat in the dark? *Animal Nutrition,* 5 (3), 174 - 178.

Rogers, A. G., Pritchett, E. M., Alphin, R. L., Brannick, E. M., & Benson, E. R. (2015). II. Evaluation of the impact of alternative light technology on male broiler chicken growth, feed conversion, and allometric characteristics. *Poult Sci*, 3 (94), 408 – 414.

Royer, M. (2014). Lumen maintenance and light loss factors: Consequences of current design practices for LEDs. *LEUKOS*, 10 (2), 77 – 86.

Rozenboim, I., Biran, I., Uni, Z., Robinzon, B., & Halevy, O. (1999). The effect of monochromatic light on broiler growth and development. *Poult Sci*, 78 (1), 135 – 138.

Rozenboim, I., Piestun, Y., Mobarkey, N., Barak, M., Hoyzman, A., & Halevy, O. (2004). Monochromatic light stimuli during embryogenesis enhance embryo development and posthatch growth. *Poult Sci*, 83 (8), 1413 – 1419.

Rubene, D., Håstad, O., Tauson, R., Wall, H., & Ödeen, A. (2010). The presence of UV wavelengths improves the temporal resolution of the avian visual system. *J Exp Biol*, 213 (19), 3357 – 3363.

Sanotra, G. S., Lund, J. D., & Vestergaard, K. S. (2002). Influence of light-dark schedules and stocking density on behaviour, risk of leg problems and occurrence of chronic fear in broilers. *Br Poult Sci*, 43(3), 344 – 354.

Savory, C. J. (1976a). Broiler growth and feeding behaviour in three different lighting regimes. *Br Poult Csi,* 17 (5), 557 – 560.

Savory, C. J. (1976b). Effects of different lighting regimes on diurnal feeding patterns of the domestic fowl. *Br Poult Csi*, 17 (3), 341 – 350.

Scheideler, S. E. (1990). Research Note: Effect of various light sources on broiler performance and efficiency of production under commercial conditions. *Poult Sci*, 69 (6), 1030 – 1033.

Schneeganß, A. (2018). *Dreidimensionale Sonographie am Masthähnchenauge unter diskontinuierlichen Beleuchtungsbedingungen* (Inaugural-Dissertation zur Erlangung der tiermedizinischen Doktorwürde). Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München. München, Deutschland.

Schwean-Lardner, K., Fancher, B. I., & Classen, H. L. (2012). Impact of daylength on the productivity of two commercial broiler strains. *Br Poult Sci*, 53 (1), 7 – 18.

Shapley, R., & Enroth-Cugell, C. (1984) Visual adaptation and retinal gain controls. *Prog Retinal Res*, 3 (c), 263 – 346.

Shepherd, E. M., & Fairchild, B. D. (2010). Footpad dermatitis in poultry. *Poult Sci*, 89 (10), 2043 – 2051.

Siegel, P. B., & Isakson, S. T. (1969). Photoacceleration of development in chick embryos. *Comp Biochem Physiol*, 28 (2), 753 – 758.

Siopes, T. D., Timmons, M. B., Baughman, G. R., & Parkhurst, C. R. (1984). The effects of light intensity on turkey poult performance, eye morphology and adrenal weight. *Poult Sci*, 63 (5), 904 – 909.

Škrbić, Z., Pavlovski, Z., Lukić, M., Perić, L., & Milošević, N. (2009). The effect of stocking density on certain broiler welfare parameters. *Biotechnol Anim Husb*, 25 (1 - 2), 11 – 21.

Škrbić, Z., Pavlovski, Z., Lukić, M., & Petričević, V. (2015). Incidence of footpad dermatitis and hock burns in broilers as affected by genotype, lighting program and litter type. *Ann Anim Sci*, 15 (2), 433 – 445.

Sørensen, P. (1992). The genetic of leg disorders. In C. C. Whithead (Eds), *Bone biology and skeletal disorders in poultry.* Poultry Science Symposium 23. (pp. 213 – 229). Abingdon, UK: Carfax Publisching Co.

Sørensen, P., Su, G., & Kestin, S. C. (1999). The effect of photoperiod : Scotoperiod on leg weakness in Broiler chickens. *Poult Sci*, 78 (3), 336 - 342.

Su, G., Sørensen, P., & Kestin, S. C. (1999). Meal feeding is more effective than early feed restriction at reducing the prevalence of leg weakness in broiler chickens. *Poult Sci*, 78 (7), 949 – 955.

Tolentino, C. M., Icochea, E. D., Reyna, P. S., & Valdivia, R. R. (2008). Effect of summer and winter air temperature and humidity on productive parameters of broiler chickens raised in the city of Lima. *Rev Inv Vet Perú*, 19 (1), 9 - 14.

Tompic, T., Dobsa, J., Legen, S., Tompic, N., & Medic H. (2011). Modeling the growth pattern of in-season and off-season Ross 308 broiler breeder flocks. *Poult Sci*, 90 (12), 2879 – 2887.

Tsukahara, N., Tani, Y., Kikuchi, H., & Sugita, S. (2014). Light transmission of the ocular media in birds and mammals. *J Vet Med Sci*, 76 (1), 93 – 95.

Van Horne, P. L. M., & Achterbosch, T. J. (2008). Animal welfare in poultry production systems : impact of EU standards on world trade. *World Poult Sci J*, 64 (1), 40 – 52.

Vestergaard, S. K., & Sanotra, S. G. (1999). Relationships between leg disorders and changes in the behaviour of broiler chickens. *Vet Rec*, 144 (8), 205 - 209.

Viitala, J., Korplmäki, E., Palokangas, P., & Koivula, M. (1995). Attraction of kestrels to vole scent marks visible in ultraviolet light. *Nature*, 373, 425 - 427.

Vorobyev, M., Osorio, D., Bennett, A. T. D., Marshall, N. J., & Cuthill, I. C. (1998). Tetrachromacy, oil droplets and bird plumage colours. *J Comp Physiol A*, 183 (5), 621 – 633.

Wald, G., Durell, J., & St George, C.C. (1950). The light reaction in the bleaching of rhodopsin. *Science*, 111 (2877), 179 - 181.

Wald, G. (1951). The chemistry of rod vision. *Science,* 113 (2933), 287 - 291.

Waldvogel, J. A. (1990). The bird's eye view. *Am Scientist*, 78 (4), 342 - 353.

Walls, G. L. (1942). *Bulletin 19: The vertebrate eye and its adaptive radiation*. Michigan, USA: Cranbrook Institute of Science, Bloomfield Hills.

Wathes, C. M., Spechter, H. H., & Bray, T. S. (1982). The effects of light illuminance and wavelength on the growth of broiler chickens. *J Agric Sci*, 98 (4), 195 – 201.

Weaver, W. D. Jr, & Meijerhof, R. (1991). The effect of different levels of relative humidity and air movement on litter conditions, ammonia levels, growth, and carcass quality for broiler chickens. *Poult Sci*, 70 (4), 746 - 755.

Webeck, C. J., & Skoglund, W. C. (1974). Influence of radiant energy from fluorescent light sources on growth, mortality, and feed conversion of broilers. *Poult Sci*, 53 (6), 2055 – 2059.

Webster, M. D., & King, J. R. (1987). Temperature and humidity dynamics of cutaneous and respiratory evaporation in pigeons, *Columba livia*. *J Comp Physiol B*, 157 (2), 253 - 260.

Weise, H (2007). *Lichtbedingte Einflüsse auf Verhalten und Leistung in der Hähnchenmast*. *Eine Feldstudie unter Berücksichtigung tierschutzrechtlicher und wirtschaftlicher Aspekte* (Inaugural-Dissertation zur Erlangung der tiermedizinischen Doktorwürde). Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München. München, Deutschland.

Welfare Quality (2009). Welfare Quality® assessment protocol for poultry (broilers, layings hens). Welfare Quality® Consortium, Lelystad, Netherlands.

Williams, B., Solomon, S., Waddington, D., Thorp, B., & Farquharson, C. (2000) Skeletal development in the meat-type chicken. *Br Poult Sci,* 41 (2), 141 - 149.

Wistow, G. J., & Piatigorsky, J. (1988). Lens crystallins : The evolution and expression of proteins for a highly specialized tissue. *Ann Rev Biochem*, 57, 479 – 504.

Wortel, J.F., Rugenbrink, H. &, Nuboer, J.F.W. (1987). The photopic spectral sensitivity of the dorsal and ventral retinae of the chicken. *J Comp Physiol*, 160 (2), 151 – 154.

Yahav, S., Straschnow, A., Luger, D., Shinder, D., Tanny, J., & Cohen, S. (2004). Ventilation, sensible heat loss, broiler energy, and water balance under harsh environmental conditions. *Poult Sci,* 83 (2), 253 – 258.

Yau, K-W. (1994). Phototransduction mechanism in retinal rods and cones. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 35 (1), 9–32.

Yokoyama, S. (2000). Molecular evolution of vertebrate visual pigments. *Prog Retin Eye Res*, 19 (4), 385 – 419.

Yoshizawa, T. (1994). Molecular basis for color vision. *Biophys Chem*, 50 (1 - 2), 17 – 24.

Young, T. (1802). On the theory of light and colours. *Transactions of the Royal Society of London, 92*, 12 – 48.

Yu, Z., Yuan, H., Lu, Y., & Pang, S. F. (1991). [125I] Iodomelatonin binding sites in spleens of birds and mammals. *Neurosci Lett*, 125 (2), 175 – 178.

Zatz, M., Gastel, J. A., Iii, J. R. H., & Klein, D. C. (2000). Chick pineal melatonin synthesis : Light and cyclic AMP control abundance of serotonin N-Acetyltransferase Protein. *J Neurochem*, 74 (6), 2315 – 2321.

Zawilska, J., & Iuvone, P. (1992). Melatonin synthesis in chicken retina: Effect of kainic acid-induced lesions on the diurnal rhythm and D2-dopamine receptor-mediated regulation of serotonin N-Acetyltransferase activity. *Neurosci Lett*, 135 (1), 71 – 74.

Zeman, M., Buyse, J., & Lamos, D. (1999). Role of melatonin in the control of growth and growth hormone secretion in poultry. *Domest Anim Endocrinol*, 17 (2 – 3), 199 – 207.

Zhang, L., Zhang, H. J., Qiao, X., Yue, H. Y., Wu, S. G., Yao, J. H., & Qi, G. H. (2012). Effect of monochromatic light stimuli during embryogenesis on muscular growth, chemical composition, and meat quality of breast muscle in male broilers. *Poult Sci*, 91 (4), 1026 – 1031.

Zidan, H. M., & Abu-Elnader, M. (2005). Structural and optical properties of pure PMMA and metal chloride-doped PMMA films. *Physica B,* 355 (1 - 4), 308 - 317.

Internetzugriffe:

Arbor Acres (2018). *Broiler Management Handbook*. http://la.aviagen.com/assets/Tech_Center/AA_Broiler/AA-BroilerHandbook2018-EN.pdf (Datum des Zugriffs: 23.09.2019).

Aviagen (2018). *Ross broiler management manual.* http://la.aviagen.com/assets/Tech_Center/Ross_Broiler/Ross-BroilerHandbook2018-EN.pdf (Datum des Zugriffs: 23.09.2019).

Bioland (2019). Bioland e. V. *Bioland Richtlinien*. https://www.bioland.de/fileadmin/dateien/HP_Dokumente/Richtlinien/Bioland_Richtlinien_18_Maerz_2019.pdf (Datum des Zugriffs: 23.09.2019).

BTK (2015). Bundestierärztekammer e.V. *Leitlinien für den sorgfältigen Umgang mit antibakteriell wirksamen Tierarzneimitteln- mit Erläuterungen*.https://www.bundestieraerztekammer.de/tieraerzte/leitlinien/ (Datum des Zugriffs: 28.03.2020).

Cobb-Vantress (2018). *Broiler Management Guide*. https://cobbstorage.blob.core.windows.net/guides/5fc96620-0aba-11e9-9c88-c51e407c53ab (Datum des Zugriffs: 23.09.2019).

Demeter (2018). Demeter e. V. *Richtlinien Erzeugung und Verarbeitung Richtlinien fürdie Zertifizierung "Demeter" und "Biodynamisch"*. https://www.demeter.de/sites/default/files/richtlinien/richtlinien_gesamt.pdf (Datum des Zugriffs: 23.09.2019).

Hubbard (2016). *Broiler Management*. https://www.hubbardbreeders.com/media/manual_broiler_management_en___013796700_1441_27062016.pdf (Datum des Zugriffs: 23.09.2019).

LAE (2017). LAE Anlagenbau. *LAE Beleuchtung. Feuchtraum Wannenleuchte. Technische Information.* https://lae-cuxhaven.de/wp-content/uploads/2017/07/D-Technische-Information-HF-Flourescent-lamp.pdf (Datum des Zugriffs: 20.09.2019).

Naturland (2019b). Naturland - Verband für ökologischen Landbau e. V. Gräfelfing. *Richtlinien Erzeugung.* https://www.naturland.de/images/Naturland/Richtlinien/Naturland-Richtlinien_Erzeugung.pdf (Datum des Zugriffs: 23.09.2019).

Richtlinien, Leitlinien, Verordnungen und Europaratsempfehlungen:

BMELV (2012). Bundeseinheitliche Leitlinien für die gute betriebliche Praxis zur Haltung von Masthühnern. Stand 1. Juni 2012. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbrauchersschutz.

Richtlinie 2007/43/EG des Rates (2007). EG des Rates vom 28. Juni 2007 mit Mindestvorschriften zum Schutz von Masthühnern.

TSchG (2006). Tierschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. Mai 2006 (BGBl. I S. 1206, 1313), das zuletzt durch Artikel 101 des Gesetzes vom 20. November 2019 (BGBl. I S. 1626) geändert worden ist.

TierSchNutztV (2006). Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 22. August 2006 (BGBl. I S. 2043), die zuletzt durch Artikel 3 Absatz 2 des Gesetzes vom 30. Juni 2017 (BGBl. I S. 2147) geändert worden ist.

Verordnung (EG) Nr. 543/2008 der Kommission vom 16. Juni 2008 mit Durchführungsvorschriften zur Verordnung (EG) Nr. 1234/2007 des Rates hinsichtlich der Vermarktungsnormen für Geflügelfleisch.

Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates vom 28. Juni 2007 über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 2092/91.

Verordnung (EG) Nr. 889/2008 der Kommission vom 5. September 2008 mit Durchführungsvorschriften zur Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen hinsichtlich der ökologischen/biologischen Produktion, Kennzeichnung und Kontrolle.

10 Anhang

10.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bulbusformen der Vögel; a) flach b) konisch c) tubulär 5

Abbildung 2: Chromatizitätsdiagramme für menschliche Trichromasie und Tetrachromasie des Huhnes..... 19

Abbildung 3: Diagramm der Gegenfarbenmechanismen. 20

Abbildung 4: Diagramm der Gegenfarbenmechanismen für das Farbsehen des Huhnes. 21

Abbildung 5: Relative spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges.. 23

Abbildung 6: Relative spektrale Empfindlichkeit des Huhnes und die des Menschen. 25

Abbildung 7: Spektrale Leistungsemission von natürlichen und künstlichen Lichtquellen..... 47

Abbildung 8: Innenansicht des Versuchsstalles mit dem künstlichen Beleuchtungssystem im Betrieb..... 70

Abbildung 9: Darstellung der Messpunkte für Lichtintensität, Lichtspektrum und Einstreuqualität im Stall.....71

Abbildung 10: Luxmeter MAVOLUX 5032B, GOSSEN GmbH, Nürnberg, Deutschland. 72

Abbildung 11: A) Spektrometer USB2000EPP Fa. StellarNet, Tampa, Florida, USA. B) Glasfaser und Cosinusdiffusor. 72

Abbildung 12: Berwertungskriterium der Fußballenläsionen im Schlachthof..... 75

Abbildung 13: Bewertungskriterium der Hautläsionen an den Intertarsalgelenken im Schlachthof..... 75

Abbildung 14: Bewertungskriterium der Hautläsionen an der Brust im Schlachthof. 76

Abbildung 15: Verkratzungen in drei unterschiedliche Kategorien: A) Kategorie 1, B) Kategorie 2, C) Kategorie 3. 77

Abbildung 16: Stall- und Außenlufttemperatur der Kontroll- und Versuchsgruppe während der gesamten Aufzuchtperiode. 80

Abbildung 17: Relative Stall- und Außenluftfeuchtigkeit der Kontroll- und Versuchsgruppe während der gesamten Aufzuchtperiode. 81

Abbildung 18: Messwerte der Einstreuqualität in der Kontroll- und Versuchsgruppe an den Tagen 0, 5, 11, 19, 30 und 40. 82

Abbildung 19: Lichtspektrum der Kontroll- und Versuchsgruppe bei verschiedenen Lichtintensitäten. 86

Abbildung 20: Modell der Körpermasse.. 88

Abbildung 21: Modell der Futteraufnahme. 89

Abbildung 22: Modell der Futterverwertung. 91

Abbildung 23: Prozentuale Anteile der Todesursachen in Bezug auf die Mortalität jeder Versuchsperiode. 94

Abbildung 24: Prozentualer Anteil der im Schlachthhof erfassten Verletzungen in der Kontroll- und Versuchsgruppe. 97

10.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zapfen auf der Netzhaut des Haushuhnes (*Gallus gallus domesticus*).....17

Tabelle 2: Wahrgenommene Lichtintensitäten von verschiedenen Wellenlängen des Lichtspektrums beim Menschen und Haushuhn.. 27

Tabelle 3: Impfungen und Einsatz von Arzneimitteln in der Kontroll- und Versuchsgruppe, inklusive der Aufzuchttage, an denen die Medikamente eingesetzt wurden. 64

Tabelle 4: Kokzidiostatika in Futtermitteln in der Kontroll- und Versuchsgruppe, inklusive der Aufzuchttage, an denen die Medikamente eingesetzt wurde 64

Tabelle 5: Nährstoffe der Mehrphasenfütterung. 66

Tabelle 6: Lichtprogramm der Versuchsanordnung der Kontroll- und Versuchsgruppe. Morgen- und Abenddämmerungsperiode jeweils 30 minuten. Lichtintensität in der Skotophase < 0,5 Lux.....67

Tabelle 7: Bewertungssystem des Welfare Quality® Assessment protocol for poultry.....69

Tabelle 8: Mittelwerte und Standardabweichung der Stall- und Außenlufttemperatur der Kontroll- und Versuchsgruppe.....80

Tabelle 9: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Stall- und Außenluftfeuchtigkeit der Kontroll- und Versuchsgruppe.....81

Tabelle 10: Modell der Einstreuqualität getrennt nach Gruppe und Tage 83

Tabelle 11: Mittelwerte der Einstreuqualität an den einzelnen Messpunkten der Kontroll- und der Versuchsgruppe während der Aufzucht. Nach der dem Welfare Quality® Assessment protocol for poultry.....83

Tabelle 12: Mittelwerte der Einstreuqualität an den einzelnen Messpunkten der Kontroll- und der Versuchsgruppe in verschiedenen Stallbereichen während der Aufzucht. Nach dem Welfare Quality® Assessment protocol for poultry 83

Tabelle 13: Tatsächliche Lichtintensität der Kontroll- und Versuchsgruppe in Lux. Dämmerungsperiode 30 Minuten. Morgen- und Abenddämmerungsperiode jeweils 30 minuten. Lichtintensität in der Skotophase < 0,5 Lux 85

Tabelle 14: Lichtintensität der Kontroll- und Versuchsgruppe gemäß der Lichtperzeption des Haushuhnes (C-Lux) nach Prescott und Wathes (1999b). Morgen- und Abenddämmerungsperiode jeweils 30 minuten. Lichtintensität in der Skotophase < 0,5 Lux. 85

Tabelle 15: Produktionsparameter der Kontroll- und Versuchsgruppe getrennt nach Tagen.. 87

Tabelle 16: Modell Körpermasse. Glatte Effekte des Tages getrennt nach Gruppen. 88

Tabelle 17: T-Test für die Masse des Schlachtkörpers. 88

Tabelle 18: Modell Futteraufnahme. Glatte Effekte des Tages getrennt nach Gruppen. 89

Tabelle 19: Modell Futterverwertung. Glatte Effekte des Tages getrennt nach Gruppen. 90

Tabelle 20: Mortalität und Todesursachen der Kontroll- und Versuchsgruppe getrennt nach Tagen 93

Tabelle 21: Tierschutzparameter der Kontroll- und Versuchsgruppe im Schlachthof. 96

10.3 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich an alle, die zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben, meinen herzlichen Dank aussprechen.

Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Prof. Dr. Dr. habil R. T. Korbel für die Überlassung dieses interessanten Themas, die Einführung in die Thematik „Licht und Sehen“.

Frau Dr. Noreen Baas und Priv. Doz. Dr Monika Rinder möchte ich herzlich für die große fachliche Unterstützung danken.

Ganz herzlich möchte ich mich auch bei der Familie Brunsbach bedanken, die mich während meines Aufenthaltes in Deutschland und der Korrekturlesung dieser Arbeit unterstützt hat.

Besonders danken möchte ich Herrn Daniel Schwarz und Frau Dr. Nadia Vazquez-Novoa für ihre Freundschaft und Unterstützung während dieser Zeit in Deutschland.

Mein größter Dank gilt meinem Vater und meiner Mutter für Ihr Verständnis und ihr großes Vertrauen in mich.

Ich möchte mich auch bei „CONICYT PFCHA/Becas Chile del Ministerio de Educación/2013 – 72140444“ für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit bedanken.