

LED-Beleuchtung in der Pferdehaltung. Horse Centric Lighting

Thomas Jost*, Serge Stephan*, Martin C. Stäcker*

*NORKA Automation GmbH, Lange Str. 1, DE-27313 Dörverden/Hülsen, Germany

Abstract/Zusammenfassung

Wie in allen Lebensbereichen werden auch in der Pferdehaltung künstliche Lichtquellen eingesetzt. Die in der Allgemeinbeleuchtung verwendeten weißen Leuchtdioden (LEDs) sind aus Effizienzgründen an die Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ des Menschen bei Tag angepasst. Das abgestrahlte Spektrum dieser Lichtquellen stimmt mit dem Sehempfinden der Pferde nicht überein. Im Vergleich zu den Menschaugen sind Pferdeaugen anatomisch anders aufgebaut [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Zudem sind Pferde dämmerungs- und nachtaktive Beutetiere, deren Sehvermögen an schlechte Lichtverhältnisse, Dunkelheit und die Wahrnehmung kleinster Unstimmigkeiten sehr gut angepasst ist [7, 8, 9]. Im Rahmen einer Literaturrecherche wurde der Frage nachgegangen: In wie weit sind die weißen LEDs und die übliche Art der Allgemeinbeleuchtung für den Einsatz in der Pferdehaltung geeignet? Die gesammelten Informationen wurden bewertet und daraus ein Vorschlag zu einer theoretisch möglichen artgerechten Beleuchtung in der Pferdehaltung unter Beachtung der geltenden Normen erstellt.

Schlagwörter: EquiLumen, Beleuchtung, Pferd, artgerecht, Reitanlage, Stall, LED

Like in all areas of life, artificial lighting is also used in horse husbandry. The white light-emitting diodes (LEDs) used in general lighting are adjusted to the photopic luminosity function $V(\lambda)$ of the human. The radiated spectrum of thus light sources does not conform with the visual perception of horses. Compared to the human eyes, horse eyes are differently anatomically designed [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Moreover horses are crepuscular and nocturnal prey animals, whose vision is very well adapted to the dim light, darkness and the perception of the smallest discrepancies [7, 8, 9]. As part of a literature review, the question was asked: To what extent are the white LEDs and the usual type of lighting suitable for use in horse husbandry? A proposal for a theoretically possible species-appropriate illumination in horse keeping in compliance with the applicable standards was created.

Index Terms: EquiLumen, Lighting, Horse, species-appropriate, Horse husbandry, Stable, LED

1 Einleitung

In der modernen Pferdehaltung werden LED-Leuchten der Allgemeinbeleuchtung eingesetzt. Diese sind auf die Hellempfindlichkeit $V(\lambda)$ des Menschen bei Tag abgestimmt. Es werden überwiegend LED-Lichtquellen mit einer Farbtemperatur CCT = 4000 K und einem Farbwiedergabewert CRI > 80 (im Weiteren LED₈₄₀) verwendet. Pferdeaugen sind im Vergleich zu Menschaugen anatomisch anders aufgebaut [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Zu dem nimmt ein Pferd seine Umwelt anders als ein Mensch wahr [10], so dass die marktüblichen LED-Lichtlösungen für eine tierartgerechte Pferdehaltung nicht optimal sind. Das Ziel dieser Arbeit ist eine Formulierung der Anforderungen an eine pferdegerechte Beleuchtung sowie die Evaluation einer theoretischen pferdegerechten Lichtquelle, die dem Stand der Technik entspricht, die gesetzlichen und normativen Vorgaben erfüllt sowie den Sehkomfort der Pferde verbessern soll.



2 Visuelle Wahrnehmung der Pferde

Pferde sind von Natur aus scheue, vorwiegend dämmerungs- und nachtaktive Beutetiere [7, 8, 9], die in größeren Herden zusammenleben [11, 12, 13]. Vor der Domestizierung war ihre Überlebensstrategie das ständige Beobachten ihres Umfeldes, das Erfassen von minimalen Unstimmigkeiten in der Umgebung, die auf ein Raubtier hindeuten können, und die sofortige Flucht von der mutmaßlichen Gefahrenquelle [9]. Diese Überlebenstaktik der Pferde setzt ein exzellentes weitwinkliges Sehvermögen voraus.

2.1 Sichtfeld eines Pferdes

Im Vergleich zu einem Menschen, der ein horizontales Sichtfeld von ca. 200° hat [9, 14, 15, 16], besitzt ein Pferd ein horizontales Sehfeld von ca. 340° [8, 9, 17, 18]. Ein Pferd hat somit nur eine kleine Blindzone von ca. 20°, die direkt hinter ihm ist. Wobei es nur in einem vorwärts gerichteten Bereich von ca. 60° dreidimensional sehen kann [8, 9, 17]. Im weiten Seitenbereich sieht es zweidimensional. Ein Mensch hat im Vergleich dazu ein binokulares Sichtfeld von ca. 110° [9, 14, 15, 16]. Abb. 1 zeigt schematisch die Sichtfelder eines Pferdes und eines Menschen. Sprunghafte visuelle Änderungen im einseitigen Peripheriebereich werden vom Pferd mit einem Raubtierangriff assoziiert und führen zum Scheuen des Tieres [9, 17].

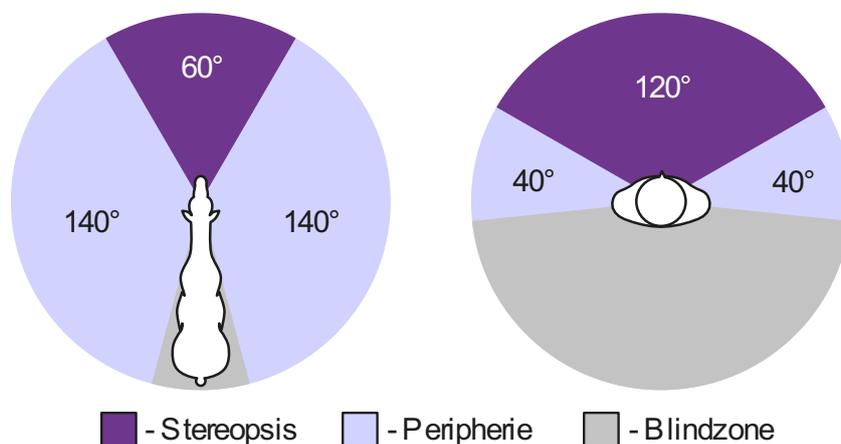


Abb. 1: Horizontales Sichtfeld eines Pferdes (links) und eines Menschen (rechts) [9].

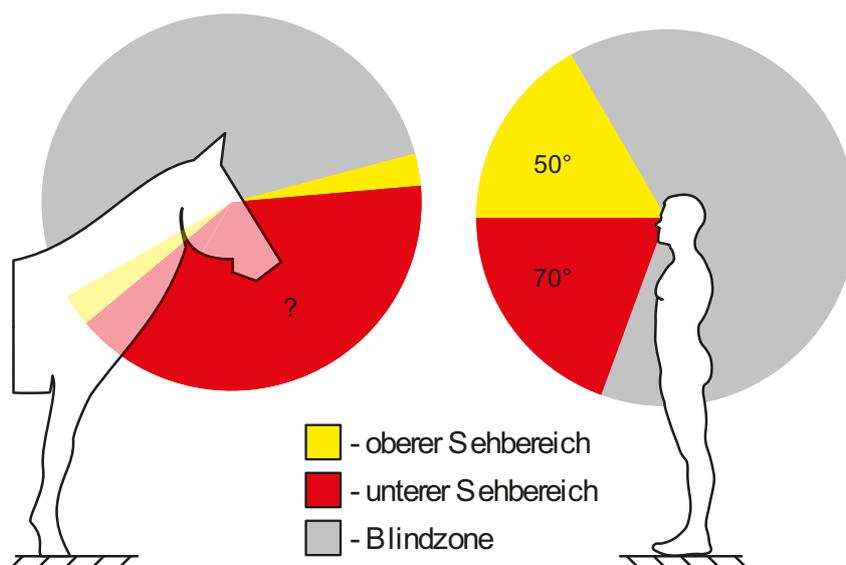


Abb. 2: Vertikales Sichtfeld eines Pferdes (links) und eines Menschen (rechts).

Lange Zeit wurde davon ausgegangen, dass Pferde Objekte, die sie mit nur einem Auge wahrgenommen haben, mit dem anderen Auge nicht wiedererkennen können. Diskriminationstests und anatomische Untersuchungen des Gehirnbalkens (Corpus callosum) bei Pferden zeigten, dass ein Austausch visueller Information zwischen den beiden Gehirnhälften stattfindet [1, 19, 20]. Allerdings ist der Gehirnbalken wesentlich kleiner als bei Menschen [1], so dass der Informationsaustausch klein sein muss.

Ein Mensch hat einen vertikalen Sehwinkel nach oben von ca. 50° und ein Sehwinkel nach unten von ca. 70° [21]. Bei Pferden ist der genaue Winkel des vertikalen Sichtfeldes unbekannt. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass der Sehwinkel nach oben wesentlich kleiner als der Winkel nach unten ist [9, 17], da die natürlichen Feinde der Pferde vom Boden kommen. In Abb. 2 ist ein Vergleich vertikaler Sichtfelder eines Pferdes und eines Menschen schematisch gezeigt.

2.2 Hell-Dunkel-Adaption

Die Pferdeaugen sind durch die Dämmerungs- und Nachtaktivität der Pferde an die Dunkelheit sehr gut angepasst [7, 8, 9]. Wobei die Dunkel-Hell-Adaption - ähnlich wie beim Menschen - schneller als die Hell-Dunkel-Adaption ist [22, 23]. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei Pferden die Adaption an neue Lichtverhältnisse wesentlich länger als bei Menschen ist, da sich die Pferde in der Natur überwiegend im freien Feld aufhalten und an sprunghafte Helligkeitsverhältnisse nicht gewohnt sind. In Abb. 3 ist die Adaption eines Pferdeauges an neue Lichtverhältnisse schematisch skizziert.

Plötzliches Einschalten des Lichts hat eine starke Blendung eines Pferdes zur Folge und kann zum Scheuen des Tieres führen. Im Gegenzug sieht das Pferd beim plötzlichen Ausschalten des Lichtes für längere Zeit nichts, bis sich seine Augen an die neuen Lichtverhältnisse angepasst haben.

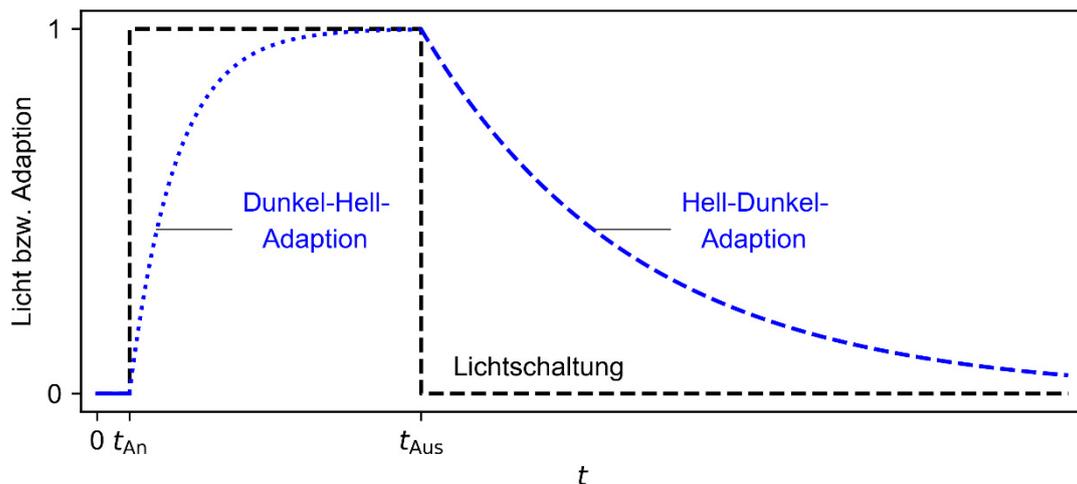


Abb. 3: Schematische Darstellung einer Lichtschaltung (schwarz, gestrichelt) sowie der Dunkel-Hell-Adaption (blau, gepunktet) und der Hell-Dunkel-Adaption (blau, gestrichelt) des Pferdeauges.

2.3 Farbsehen

Pferde sind Dichromaten [2, 4, 24, 25, 26]. Ihre Augen haben nur zwei Typen von Fotorezeptoren zur Farbwahrnehmung: M/L-Zapfen für grünes Licht und S-Zapfen für blaues Licht [2, 9, 17]. Dieses bedeutet, dass Pferde das Licht mit einer Wellenlänge $\lambda > 600$ nm (Farben Orange, Rot, Tiefrot) nicht wahrnehmen können [2, 4, 9]. Eine solche Farbwahrnehmung kann mit der Rot-Grün-Schwäche der Menschen verglichen werden [2, 9]. Sieht ein Mensch alle Regenbogenfarben, so werden die gleichen Lichtfarben von einem Pferd als Blau-Grün-Gelb-Grau wahrgenommen. Der Unterschied in dem Lichtfarbempfinden eines Menschen und eines Pferdes ist in Abb. 4 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei der Farbwahrnehmung des Pferdes die Farben Orange, Rot, Magenta und Violett fehlen.

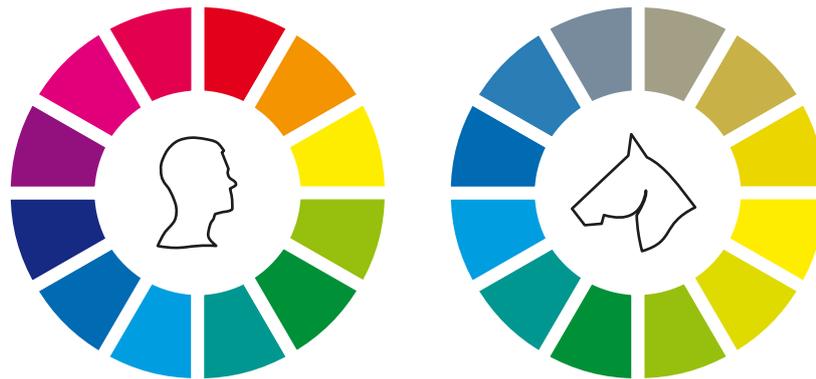


Abb. 4: Farbwahrnehmung eines Menschen (links) und eines Pferdes (rechts) [2].

2.4 Hellempfindlichkeit

Die Hellempfindlichkeitskurve des Pferdes $V_H(\lambda)$ ist nicht definiert [27]. Ausgehend vom anatomischen Augenaufbau [1, 17], Nacht- und Dämmerungsaktivität [7], dem visuellen Neutralpunkt bei 480 nm [3] sowie der mittleren spektralen Empfindlichkeitsfunktion der M/L- und S-Zapfen [2] bei Pferden wird angenommen, dass die Hellempfindlichkeitskurve der Pferde $V_H(\lambda)$ der Hellempfindlichkeitskurve des Menschen bei Nacht $V'(\lambda)$ ähnelt und ihr Maximum bei $\lambda = 480$ nm hat. Die angenommene $V_H(\lambda)$ -Kurve ist in Abb. 5 (schwarz, gestrichelt) im Vergleich zu der $V'(\lambda)$ -Kurve (blau, gepunktet) und der $V(\lambda)$ -Kurve (orange, durchgezogen) dargestellt.

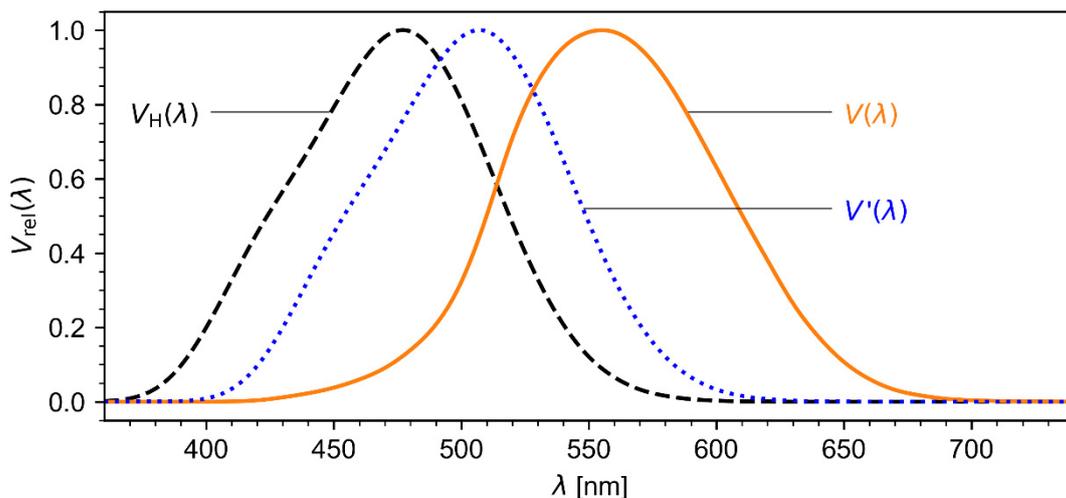


Abb. 5: Hellempfindlichkeitskurven des Menschen bei Tag $V(\lambda)$ und bei Nacht $V'(\lambda)$ sowie die angenommene Hellempfindlichkeitskurve des Pferdes $V_H(\lambda)$.

Für einen Vergleich unterschiedlicher Lichtquellen - in Bezug auf das Licht- und Hellempfinden der Pferde - wurde eine neue Einheit – EquiLumen (elm) – eingeführt. Die Einheit EquiLumen ist vergleichbar mit der Einheit Lumen. Mit EquiLumen wird der Lichtstrom Φ_{Hv} für Pferde mit der Formel

$$\Phi_{Hv} = K_{Hm} \int_0^{\infty} V_H(\lambda) \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} d\lambda$$

berechnet. Der Lichtstrom in EquiLumen gibt die mit der spektralen Hellempfindlichkeit des Pferdes gewichtete Strahlungsleistung einer Lichtquelle in einem Raumwinkel an. Zur Kennzeichnung wird der untere Index "Hv" für "Horse vision" verwendet. Der Zahlenwert K_{Hm} des Maximalwertes des photometrischen Strahlungsäquivalents wurde auf 1000 EquiLumen/Watt (elm/W) festgesetzt.

3 Pferdegerechte Lichtquelle

Eine pferdegerechte Lichtquelle muss nicht nur das Sehempfinden der Pferde verbessern, sondern auch dem Stand der Technik aus der Sicht des Menschen entsprechen. In naher Zukunft und auf lange Sicht wird nicht nur die Effizienz, sondern auch die Lichtqualität eine wesentliche Rolle in der Allgemeinbeleuchtung einnehmen. Gemäß der „Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten im kommunalen Umfeld“ des BMU werden Lichtquellen mit einem Farbwiedergabewert von mindestens 90 in Verbindung mit einer nutzungsgerechter Lichtsteuerung gefördert [28]. Das zeigt deutlich die angestrebte Richtung der Beleuchtungsentwicklung. Deswegen soll eine pferdegerechte Lichtquelle auch einen Farbwiedergabewert $CRI > 90$ besitzen.

Bereits heute wird in vielen Bereichen ein hoher CRI-R9-Wert (gesättigter Rotlichtanteil) verlangt. Zum Beispiel fordert die Deutsche Bahn Netz AG für ihre Werkshallenbeleuchtung ein CRI-R9-Wert > 40 [29]. Ein Pferd sieht zwar das gesättigte Rotlicht nicht, dieser Rotlichtanteil ist aber für das menschliche Sehempfinden im roten Spektralbereich von hoher Bedeutung. Daher wurde bei der Evaluierung einer pferdegerechten Lichtquelle ein besonderer Wert auf den CRI-R9 gelegt.

Damit die pferdegerechte Beleuchtung bei den üblichen Beleuchtungsstärken von 80 bis 500 lx für den Menschen angenehm ist, wurde anhand der Behaglichkeitskurve [30] eine Farbtemperatur von maximal 5700 K angestrebt.

Wie bereits im Abs. 1 erläutert, wird sich der Vergleich einer pferdegerechten Lichtquelle in erster Linie auf die LED_{840} beziehen. In Abs. 2.4 wurde gezeigt, dass die angenommene Hellempfindlichkeitskurve der Pferde $V_H(\lambda)$ im blau-grünen Spektralbereich liegt. Bei den üblichen LED_{840} -Leuchten weist genau dieser Bereich eine spektrale Lücke auf. Basierend auf der Erkenntnis der Farbwahrnehmung der Pferde aus dem Abs. 2.3 lässt sich folgern, dass mit dieser Art der Beleuchtung die Pferde kontrastarm sehen. Es fehlen spektrale Lichtanteile zwischen Blau und Grün. Für das kontrastreiche Sehen bei Pferden muss also bei einer pferdegerechten Lichtquelle genau diese spektrale Lücke geschlossen sein. Damit ergeben sich nachstehende technische Anforderungen an eine pferdegerechte Lichtquelle (LS_H = Light Source for Horses):

1. CCT < 5700 K
2. CRI ≥ 90
3. CRI-R9 ≥ 40
4. Effektivität > 130 lm/W
5. Geschlossene spektrale Lücke zwischen $\lambda = 450$ nm und $\lambda = 550$ nm

3.1 Mögliche Realisierung einer pferdegerechten Lichtquelle

Eine pferdegerechte Lichtquelle kann aus den LEDs mit den Farben Weiß, Blau, Cyan und Rot realisiert werden. Die weißen LEDs liefern das Grundspektrum, die Blau- und Cyan-LEDs schließen die spektrale Lücke zwischen $\lambda = 450$ nm und $\lambda = 550$ nm und die roten LEDs werden zum Anpassen der CRI- und CRI-R9-Werte verwendet. Das zahlenmäßige Verhältnis bei gleicher Bestromung mit I_{ref} und die Eigenschaften der LEDs sind in Tab. 1 aufgelistet.

LED	Eigenschaften	akt. typ. Effektivität	Verhältnis @ I_{ref}
Weiß	CCT = 4000 K, CRI > 70	210 lm/W	5/9
Blau	$\lambda_{Peak} = 475$ nm	44 lm/W	1/9
Cyan	$\lambda_{Peak} = 500$ nm	73 lm/W	2/9
Rot	$\lambda_{Peak} = 625$ nm	68 lm/W	1/9

Tab. 1: Übersicht der LEDs und ihrer Eigenschaften in der konzeptuellen pferdegerechten Lichtquelle.

Abb. 6 zeigt das Spektrum des Vorschlages einer pferdegerechten Lichtquelle und die $V_H(\lambda)$ -Kurve. Zum Vergleich ist ein Spektrum einer LED₈₄₀ dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die LS_H die spektrale Lücke wie gefordert schließt. Die LS_H hat im Detail nachstehende theoretische Eigenschaften:

- CCT = 5150 K ($x = 0,3417$; $y = 0,3670$; $u' = 0,2034$; $v' = 0,4915$; $duv = 0,0089$)
- CRI = 90,5
- CRI-R9 = 78,3
- Effektivität 135 lm/W

Die LS_H hat CCT = 5150 K mit CRI = 90,5. Das ist mit einer weißen LED mit 5000 K, CRI > 90 (im Weiteren LED₉₅₀) vergleichbar. Ein entsprechendes LED-Spektrum ist Abb. 6 dargestellt.

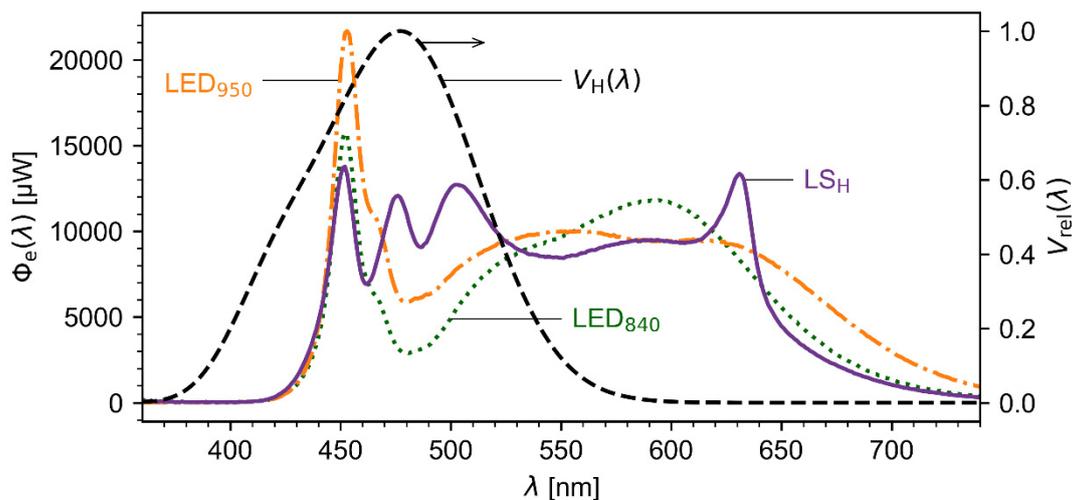


Abb. 6: Auf 683 lm normierte Spektren: LS_H (pferdegerechte Lichtquelle; violett, durchgezogen), LED₈₄₀ (CCT = 4000 K, CRI ≥ 80; grün, gepunktet), LED₉₅₀ (CCT = 5000 K, CRI ≥ 90; orange, strichgepunktet) sowie die $V_H(\lambda)$ -Kurve (schwarz, gestrichelt).

3.2 Lichtquellenvergleich

Für einen Vergleich der Spektren (LED₈₄₀, LED₉₅₀, LS_H) wurden diese mit $V(\lambda)$ -gewichtet und auf $\Phi_V = 683$ lm normiert. Das entspricht einer gewichteten Strahlungsleistung von 1 Watt. Die auf 683 lm normierten Spektren sind in Abb. 6 zu sehen. Die auf 683 lm normierten Spektren aus Abb. 6 wurden mit $V(\lambda)$ gewichtet und in Abb. 7 dargestellt. Alle Spektren zeigen eine ähnliche spektrale Leistungsverteilung, die die Form von $V(\lambda)$ -Kurve (siehe Abb. 5) widerspiegeln.

Abb. 8 zeigt CRI-R-Werte der Lichtquellen (LED₈₄₀, LED₉₅₀, LS_H). Ein Vergleich zu einer LED₈₄₀ zeigt, dass bei der LS_H die Lichtqualität in fast allen spektralen Bereichen deutlich besser geworden ist. Dieses spiegelt sich in dem CRI-Wert wider. Im Vergleich zu einer LED₉₅₀ sind die CRI-R-Werte ähnlich oder ungefähr gleich. Anhand des CRI-R5-Wertes (Türkisblau) und des CRI-R12-Wertes (Blau gesättigt) lässt sich aber ein deutlicher Unterschied im Bereich $\lambda = 450$ nm und $\lambda = 550$ nm erkennen. Bei der LS_H sind der CRI-R5-Wert bei 95,8 (93,2 bei LED₉₅₀) und der CRI-R12-Wert bei 85,2 (67,5 bei LED₉₅₀). Die Lücke im blau-grünen Spektralbereich ist geschlossen. Die auf 683 lm normierten Spektren aus Abb. 6 werden für den Vergleich im Hinblick auf visuelle Wahrnehmung der Pferde mit $V_H(\lambda)$ gewichtet. Die entsprechend gewichteten Spektren sind in Abb. 9 zu sehen. Wie es zu erwarten war, haben LED₈₄₀- und LED₉₅₀-Lichtquellen eine blau lastige spektrale Leistungsverteilung. Die LS_H zeigt dagegen eine gleichmäßigere spektrale Leistungsverteilung, höhere Intensität im blau-grünen Bereich und spiegelt die $V_H(\lambda)$ -Form (siehe Abb. 5) am besten wider. Einem Pferd sollte somit ein volleres Spektrum in seinem Sehbereich zur Verfügung stehen, so dass ein kontrastreicheres Sehen ermöglicht werden kann.

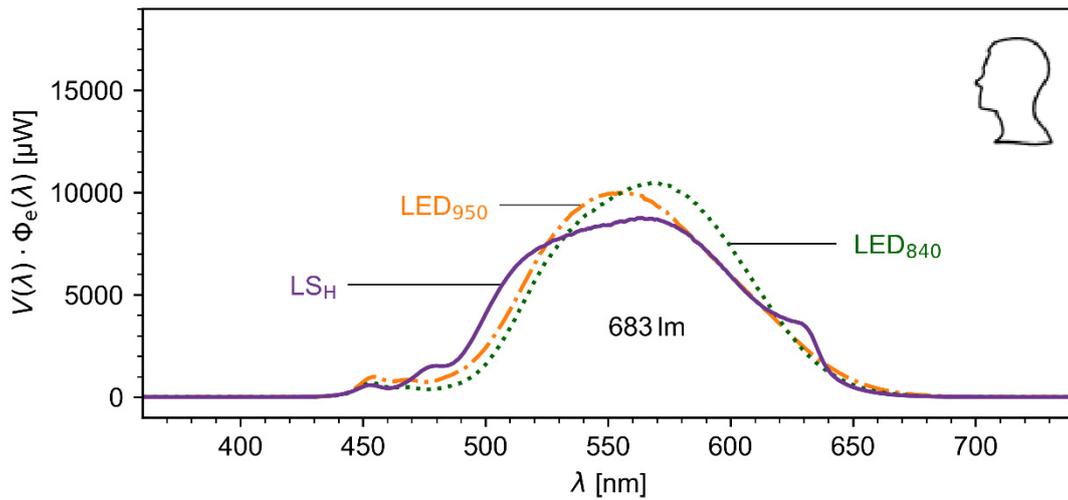


Abb. 7: $V(\lambda)$ -gewichtete Spektren (normiert auf 683 lm) aus Abb. 6: LS_H (violett, durchgezogen), LED_{840} (grün, gepunktet), LED_{950} (orange, strichgepunktet orange, punktgestrichelt).

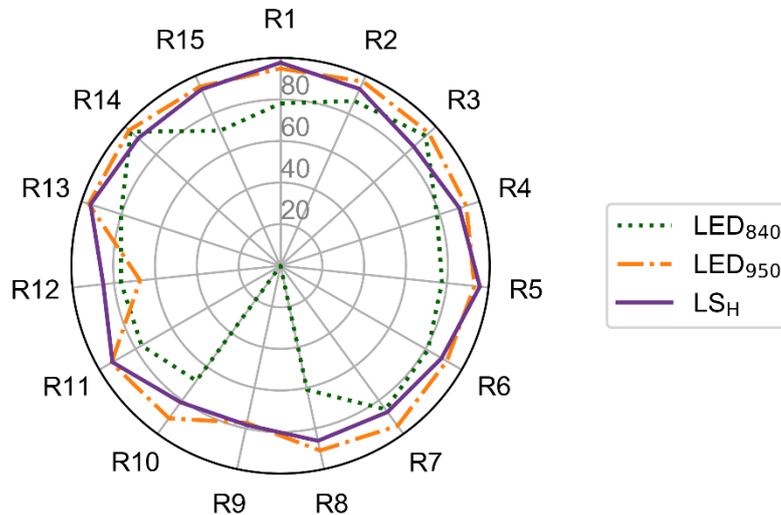


Abb. 8: CRI-R-Werte (R1 bis R15) einer LS_H (violett, durchgezogen) sowie der LED_{840} (grün, gepunktet) und LED_{950} (orange, punktgestrichelt).

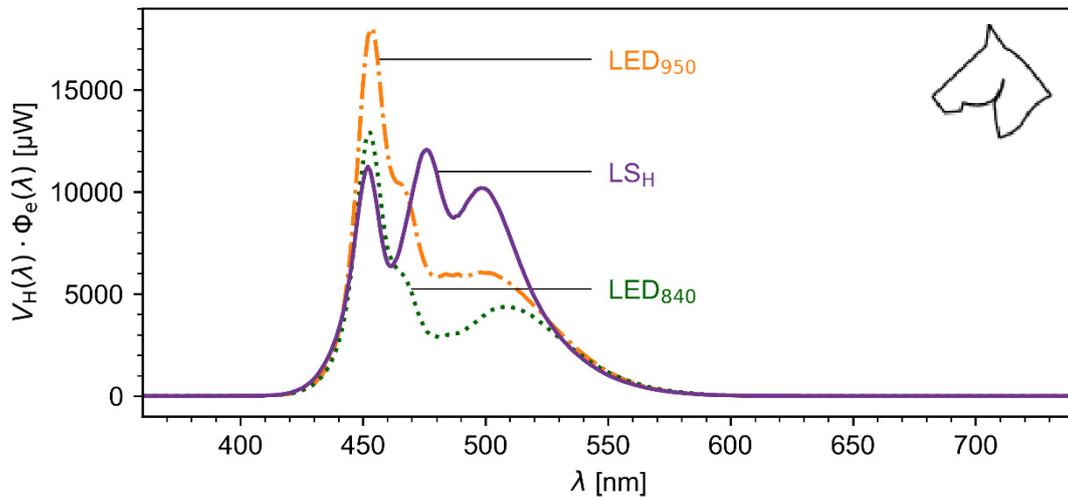


Abb. 9: $V_H(\lambda)$ -gewichtete Spektren (normiert auf 683 lm) aus Abb. 6: LS_H (violett, durchgezogen), LED_{840} (grün, gepunktet), LED_{950} (orange, punktgestrichelt).

Mit der LS_H steht dem Pferd auch mehr Licht in seinem Sehbereich zu Verfügung. Das kann anhand der Berechnung von Φ_{HV} bestimmt werden. Die LED_{840} hat 528 elm, die LED_{950} hat 756 elm und die LS_H hat 808 elm. Das ergibt eine Steigerung um 53 % im Vergleich zur LED_{840} bzw. 7 % im Vergleich zur LED_{950} bei dem gleichen Lichtstrom Φ_v von 683 lm.

4 Beleuchtungssteuerung

Im Abs. 2.2 wurde detailliert die Adaption der Pferdeaugen an neue Helligkeitsverhältnisse erläutert. Sprunghafte Helligkeitsänderungen können zum Scheuen des Tieres führen und vergrößern das Unfallrisiko in der Pferdehaltung. Ein langsames Auf- oder Abdimmen der Beleuchtung gibt den Pferdeaugen die für die notwendige Adaption an die neuen Lichtverhältnisse benötigte Zeit. Dabei soll diese Zeit wesentlich länger als für humane Anwendungen eingestellt werden. Bei der Standardlichtschaltung wird die Beleuchtungshelligkeit innerhalb einer Sekunde von 0 auf die Sollbeleuchtungsstärke E_v^{soll} geschaltet. Bei einer pferdegerechten Schaltung wird eine zweistufige Lichtschaltung vorgeschlagen. Nach Aktivierung wird im ersten Schritt sanft innerhalb einer Sekunde auf die für die Sicherheit notwendige und geforderte Beleuchtungsstärke E_v^{min} geschaltet. Anschließend soll die Beleuchtungsstärke je nach Maximalwert von E_v^{soll} mit 5 bis 20 lx/s auf E_v^{soll} hochgedimmt werden. Abb. 10 zeigt schematisch die zeitlichen Verläufe unterschiedlicher Lichtschaltungen. Auch beim Ausschalten der Beleuchtung soll die Beleuchtungsstärke von E_v^{soll} auf 0 mit 5 bis 20 lx/s sanft abgedimmt werden.

Die träge Helligkeitsadaption der Pferdeaugen hat auch zur Folge, dass bei Bewegungen der Pferde durch ungleichmäßig ausgeleuchtete Bereiche die visuelle Wahrnehmung – besonders im peripheren Sehbereich – stark eingeschränkt ist. Hindernisse und Unebenheiten werden schlecht erkannt und das Verletzungsrisiko steigt enorm. Die Pferde müssen sich wesentlich stärker konzentrieren. Daher soll auf die gleichmäßige Ausleuchtung der Böden in Reithallen und Stallungen besonders geachtet werden. Über die Forderung der Normen [31, 32] wird daher für alle Beleuchtungsklassen ein Gleichmäßigkeitsfaktor von über 0,7 empfohlen. Mithilfe einer Lichtsteuerung kann die Gleichmäßigkeit angepasst werden. Weitere Optimierungsschritte der Beleuchtung in einer Reitanlage mit einer Lichtsteuerung sind:

- Geringer Beleuchtungsstärkegradient zw. zwei unterschiedlich ausgeleuchteten Bereichen
- Separat schaltbare Beleuchtung einzelner Stallboxen

Mit diesen Maßnahmen wird der Lichtkomfort für Pferde weiter verbessert.

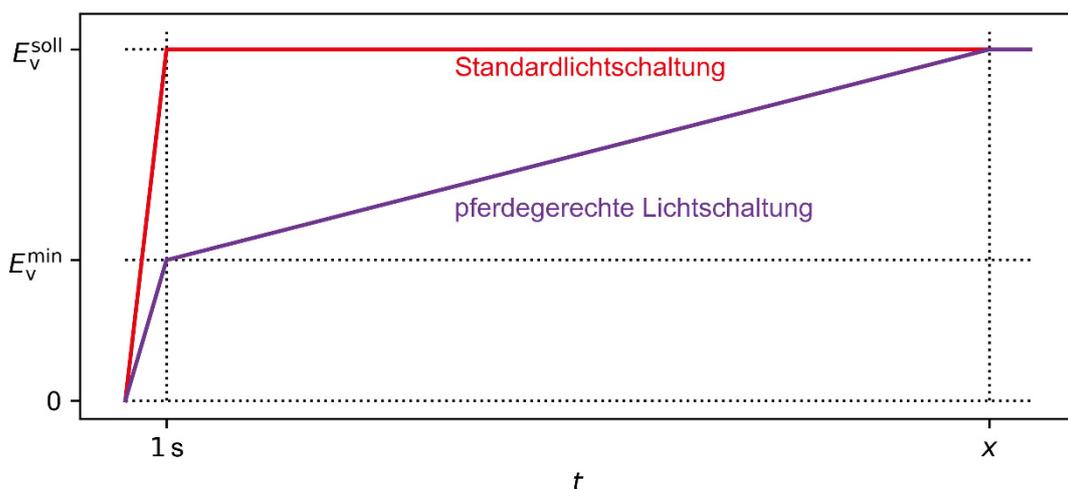


Abb. 10: Schematische Darstellung einer Standardlichteinschaltung und einer pferdegerechten Lichteinschaltung mit der sicherheitsrelevanten Mindestbeleuchtungsstärke E_v^{min} und der Sollbeleuchtungsstärke E_v^{soll} .

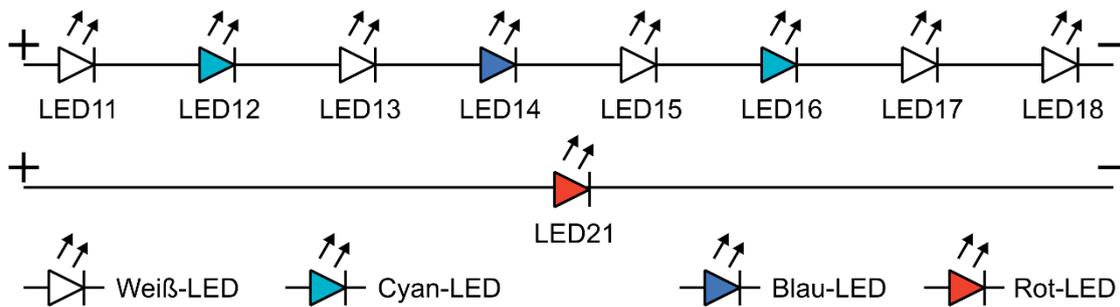


Abb. 11: Konzept der Verschaltungstopologie einer pferdegerechten Lichtquelle

Die konzeptuelle LS_H kann eine zusätzliche Funktion – den Nachtmodus - anbieten. Werden die roten LEDs durch einen separaten Kanal (siehe Abb. 11) betrieben, so emittieren sie das Rotlicht um $\lambda = 625 \text{ nm}$. Dieses Licht liegt außerhalb der angenommenen $V_H(\lambda)$ -Kurve und kann von einem Pferd nicht wahrgenommen werden. Menschen können aber sehr wohl dieses rote Licht sehen, so dass beim Betreiben von nur dem Rotlicht-Kanal die Beleuchtung für die Orientierung bei Nacht verwendet werden kann. Die Abb. 12 zeigt das Spektrum des Rotlicht-Kanals und die $V_H(\lambda)$ -Kurve.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die visuelle Wahrnehmung der Pferde wurde im Rahmen einer Literaturrecherche studiert. Anhand der gesammelten Daten wurde die Hellempfindlichkeitskurve der Pferde $V_H(\lambda)$ abgeleitet und die photometrische Messgröße für Pferde – EquiLumen – eingeführt. Unter der Berücksichtigung der Entwicklung der Allgemeinbeleuchtung und der Seheigenschaften der Pferde konnten die Anforderungen an eine Lichtquelle für pferdegerechte Beleuchtung erstellt werden. Anhand der theoretischen Berechnungen wurde eine mögliche pferdegerechte LED-Lichtquelle vorgeschlagen. Anhand der Bestimmung von Φ_{Hv} konnte festgestellt werden, dass diese pferdegerechte Lichtquelle 53 % mehr Licht als eine weiße LED mit 4000 K ($CRI > 80$) und 7 % mehr Licht als eine LED mit 5000 K ($CRI > 90$) im Sehbereich der Pferde zur Verfügung stellen kann. Durch die Schließung der spektralen Blau-Grün-Lücke können die CRI-R5- und CRI-R12-Werte im Vergleich zu den marktüblichen LEDs deutlich angehoben werden, so dass den Pferden ein kontrastreicheres Sehen ermöglicht werden könnte. Die Lichtqualität einer pferdegerechten Lichtquelle sollte sowohl für den Mensch als auch für das Pferd gesteigert werden können. Darüber hi-

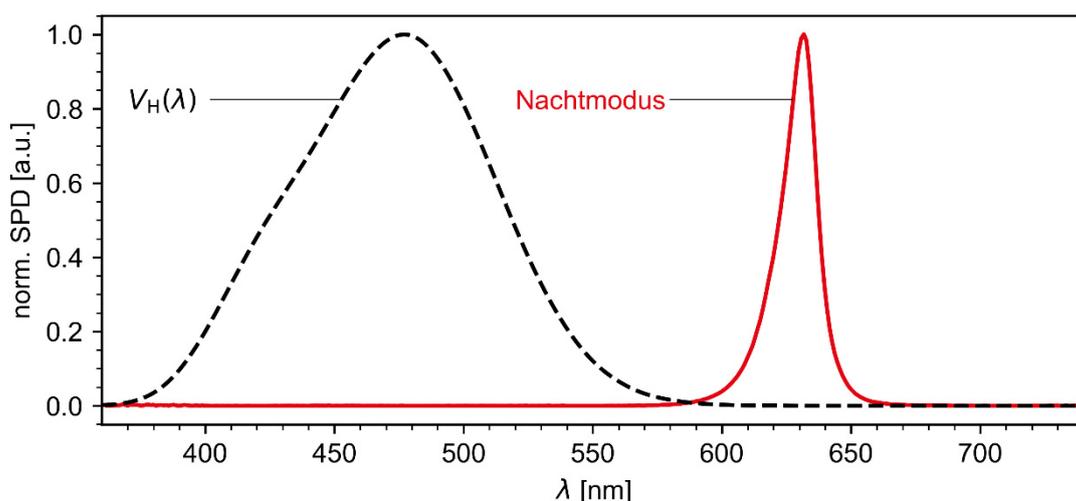


Abb. 12: Abgestrahlte Spektrum der konzeptuellen pferdegerechten Lichtquelle im Nachtmodus (rot, durchgezogen) und die $V_H(\lambda)$ -Kurve (schwarz, gestrichelt). Das rote Licht im Nachtmodus wird von Pferden nicht wahrgenommen.

naus wurden Vorgaben für die Gestaltung, Ausleuchtung und der Steuerung in der Pferdehaltung formuliert. Die wirtschaftliche Betrachtung wurde dabei aber explizit nicht bewertet.

Für die Überprüfung der vorgeschlagenen LS_H -Lichtquelle soll von der Theorie in die Praxis umgestiegen werden. Dabei sollen folgende Fragestellungen beantwortet werden:

1. Erfüllt ein realer Aufbau einer pferdegerechten Lichtquelle die ausgearbeiteten Vorgaben und sind diese mit den Anforderungen für den Menschen vereinbar?
2. Es sollen die Fragen der Wirtschaftlichkeit einer pferdegerechten Lichtquelle im Vergleich zu marktüblichen LEDs beantwortet werden.
3. Sind die entwickelten Gestaltungsvorgaben für Ausleuchtung und Steuerung machbar und welche tatsächliche Mehrnutzen, Sicherheit und Wohl bringen diese für die Tiere? Dies kann in Form einer Pilot-Anlage überprüft und studiert werden.
4. Kann die LS_H soweit angepasst werden, dass die LS_H -Farbtemperatur bei $CCT \approx 4000$ K liegt und die anderen technischen Vorgaben weiterhin erfüllt werden? Anhand der Behaglichkeitskurve kann dann die Beleuchtungsstärke von mind. 350 lx für eine 5000 K Lichtquelle auf 200 lx für eine 4000 K Lichtquelle reduziert werden [30].

6 Literaturverzeichnis

- [1] K.-D. Budras und S. Röck, Atlas der Anatomie des Pferdes – Lehrbuch für Tierärzte und Studierende. 5., vollständig überarbeitete Auflage, Hannover: Schlütersche Verlagsgesellschaft mbH, 2008, p. 52.
- [2] J. Carroll, C. J. Murphy, M. Neitz, J. N. V. Hoeve und J. Neitz, „Photopigment basis for dichromatic color vision in the horse,“ *Journal of Vision* 1, pp. 80-87, 2001.
- [3] G. Geisbauer, U. Griebel, A. Schmid und B. Timney, „Brightness discrimination and neutral point testing in the horse,“ *Canadian Journal of Zoology* 82, pp. 660-670, 2004.
- [4] E. B. Hanggi und J. F. Ingersoll, „Color vision in horses (*Equus caballus*): Deficiencies identified using a pseudoisochromatic plate test,“ *Journal of Comparative Psychology*, Vol. 121, No. 1, pp. 65-72, 2007.
- [5] H. Ninomiya und T. Inomata, „Functional Microvascular Anatomy of the Horse Eye: A Scanning Electron Microscopic Study of Corrosion Casts,“ *Open Journal of Veterinary Medicine* 4, pp. 91-101, 2014.
- [6] A. Kelber und O. Lind, „Limits of colour vision in dim light,“ *Ophthalmic and Physiological Optics* 30, p. 454–459, 2010.
- [7] C. A. Saslow, „Understanding the perceptual world of horses,“ *Applied Animal Behaviour Science* 78, pp. 209-224, 2002.
- [8] L. Sellnow, „Happy trails – Your complete guide to fun and safe trail riding,“ *Blood-Horse Publications*, pp. 46-47, 2004.
- [9] S. Ullmann, „Focus Pferd - Pferdegerechtes Umdenken Nr. 5. Wie Pferde sehen. Erstaunliche Einblicke,“ *Barefoot-Saddle*, 2016.
- [10] J. Murphy, C. Hall und S. Arkins, „What Horses and Humans See: A Comparative Review,“ *International Journal of Zoology*, pp. 1-14, 2009.
- [11] M. A. Pacheco und E. A. Herrera, „Social structure of feral horses in the Llanos of Venezuela,“ *Journal of Mammalogy* 78(1), pp. 15-22, 1997.
- [12] K. Krueger, B. Flauger, K. Farmer und C. Hemelrijck, „Movement initiation in groups of feral horses,“ *Behavioural Processes* 103, pp. 91-101, 2014.

- [13] L. Brubaker und M. A. R. Udell, „Cognition and learning in horses (Equus caballus): What we know and why we should ask more,“ *Behavioural Processes Vol. 126*, p. 121–131, 2016.
- [14] A. Mathur, J. Gehrmann und D. A. Atchison, „Pupil shape as viewed along the horizontal visual field,“ *Journal of Vision 13(6):3*, pp. 1-8, 2013.
- [15] H. Rönne, „Zur Theorie und Technik der Bjerrumschen Gesichtsfelduntersuchung,“ *Archiv für Augenheilkunde, Bd. 78, Heft 4*, 1915.
- [16] H. M. Traquair, *An introduction to clinical perimetry*, London: Henry Kimpton, 1938.
- [17] P. McGreevy, *Equine Behavior: A Guide for Veterinarians and Equine Scientists*, London: Saunders, An Imprint of Elsevier Limited, 2004, pp. 37-53.
- [18] S. Duke-Elder, *System of Ophthalmology - The Eye in Evolution Vol. 1*, London: Henry Kimpton Publishers, 1976, p. 689.
- [19] E. B. Hanggi, „Interocular transfer of learning in horses (Equus caballus),“ *Journal of Equine Veterinary Science Vol. 19 No. 8*, pp. 518-524, 1999.
- [20] E. B. Hanggi, „The thinking horse: cognition and perception. Reviewed,“ *Proceedings of the 51th American Association of Equine Practitioners Annual Convention 51*, pp. 246-255, 2005.
- [21] P. Pretto, M. Ogier, H. H. Bülthoff und J.-P. Bresciani, „Influence of the size of the field of view on motion perception,“ *Computer & Graphics 33*, pp. 139-146, 2009.
- [22] A. M. Komáromy, S. E. Andrew, H. L. Sapp Jr., D. E. Brooks und W. W. Dawson, „Flash electroretinography in standing horses using the DTL™ microfiber electrode,“ *American College of Veterinary Ophthalmologists 6-1*, pp. 27-33, 2003.
- [23] S. Zulauf, V. Gerber und W. Brehm, „Die Elektroretinographie mit dem RETIport®-System beim Pferd: Normalbefunde bei Hell- und Dunkeladaptation,“ *Pferdeheilkunde 24-3*, pp. 367-380, 2008.
- [24] L. S. V. Roth, A. Balkenius und A. Kelber, „Colour perception in a dichromat,“ *The Journal of Experimental Biology 210*, pp. 2795-2800, 2007.
- [25] J. Spaas, W. F. Helsen, M. Adriaenssens, S. Broeckx, L. Duchateau und J. H. Spaas, „Correlation between dichromatic colour vision and jumping performance in horses,“ *The Veterinary Journal 202*, pp. 166-171, 2014.
- [26] G. H. Jacobs, „Evolution of colour vision in mammals,“ *Philosophical Transactions of the Royal Society B Vol. 364*, p. 2957–2967, 2009.
- [27] M.-A. Leblanc, *The Mind of the Horse: An Introduction to Equine Cognition*, London: Harvard University Press, 2013, p. 231.
- [28] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, *Kommunalrichtlinie - Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten im kommunalen Umfeld*, Berlin, 2018, p. 8.
- [29] DB Netz AG, DB Station&Service AG, AK Beleuchtung, *Zusammenstellung der Anforderungen an Leuchten mit LED-Leuchtmitteln*, Berlin, 2016.
- [30] A. A. Kruithof, „Tubular Luminescence Lamps for General Illumination,“ *Philips Technical Review Vol. 6, No. 3*, pp. 65-73, 1941.
- [31] *DIN EN 12464-1:2011, Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen; Deutsche Fassung.*
- [32] G. Hoffmann, „Orientierungshilfen - Reitanlagen und Stallbau,“ Warendorf, FNverlag der Deutschen Reiterlichen Vereinigung GmbH, 2009, p. 119.