

**Bedarfsorientierte Beleuchtung für Mensch und Rind
in der landwirtschaftlichen Milchviehhaltung**

**Dissertation
zur Erlangung des
Doktorgrades der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)**

der

Naturwissenschaftlichen Fakultät III -
Agrar- und Ernährungswissenschaften,
Geowissenschaften und Informatik

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg,

vorgelegt von

Herrn Daniel Werner
Geb. am 17.07.1984 in Paderborn

1. Gutachter: Prof. Dr. Eberhard von Borell
2. Gutachter: Prof. Dr. Klaus Reiter
3. Gutachterin: Prof. Dr. Eva Schwenzfeier-Hellkamp

Tag der Verteidigung: 04. November 2019

„Den Rest meines Lebens möchte ich damit zubringen, darüber nachzudenken, was Licht ist“

Albert Einstein

Abstract

Ziel dieser Untersuchung war die Entwicklung, Umsetzung und Validierung einer bedarfsorientierten Beleuchtung für Mensch und Rind in der landwirtschaftlichen Milchviehhaltung. Da Licht zum Sehen benötigt wird, physiologische Vorgänge steuert und maßgeblich Gesundheit und Wohlbefinden beeinflusst, wurde im ersten Schritt eine bedarfsorientierte LED-Leuchte entwickelt und in der lichttechnischen Laborumgebung verifiziert. Basierend auf der entwickelten Demonstrationsleuchte wurde ein Beleuchtungskonzept für einen Liegeboxenlaufstall konzipiert und im Anschluss praktisch umgesetzt und validiert. Die Validierung erfolgte mittels einer neuen Mess- und Bewertungsstrategie, einer Mitarbeiterbefragung sowie einer Verhaltensbeobachtung bei ausgewählten Fokustieren. Die messtechnischen Ergebnisse zeigen, dass die Beleuchtungssituation in der Stallumgebung deutlich verbessert wurde. Dies wurde durch die Ergebnisse der Mitarbeiterbefragung in Bezug auf das Wohlbefinden sowie den Arbeitskomfort und die -sicherheit des Menschen bestätigt. Die Verhaltensbeobachtungen zeigen, dass die Häufigkeit des Komfort- und Sozialverhalten mit dem neuen Beleuchtungskonzept gesteigert wurde.

Abstract

The aim of this study was the development, realization and validation of a demand-oriented lighting concept for humans and cattle in agricultural dairy cattle farming. Light is not only a main requirement for seeing, it also controls physiological processes and significantly influences health and well-being. That is why in a first step, a demand-oriented LED light was developed and verified in the lighting laboratory environment. Based on this developed demonstration light, a lighting concept for a cubicle stall was developed and subsequently implemented and validated. The validation was carried out by means of a new measurement and evaluation strategy, an employee survey and a behavioral observation of selected focus animals. The metrological results show that the lighting situation in the stable was significantly improved. This was also confirmed by the results of an employee survey on well-being, working comfort and safety. The behavioral observations show that the frequency of comfort and social behavior has been increased with the new lighting concept.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Eberhard von Borell für die Übernahme dieses spannenden Themas sowie seinem Verständnis für meine Arbeit, die ohne seine Unterstützung in dieser Form nicht hätte realisiert werden können.

Meinen Mentoren Herrn Prof. Dr. Klaus Reiter und Frau Prof. Dr. Eva Schwenzfeier-Hellkamp, die mich immer unterstützen, möchte ich ganz besonders danken. Sie haben mir das notwendige Vertrauen zur Umsetzung dieser Arbeit entgegengebracht. Vielen Dank für die Freiheiten zum Einbringen eigener Ideen, die offenen Ohren sowie die konstruktiven und wertvollen Anregungen.

Weiterhin bedanke ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen Michael, Kristin, Maïke, Kristin, Anna-Lena, Christian, Fabian und Matthias sowie den studentischen und wissenschaftlichen Hilfskräften für das wunderbar freundschaftliche Arbeitsklima. Mit umfassender und engagierter Hilfe standet Ihr mir bei den praktischen Versuchsaufbauten und -durchführungen immer zur Seite.

Den Mitarbeitern des Versuchs- und Bildungszentrums Landwirtschaft Haus Düsse, insbesondere Andreas, Alfons, Rolf, Frank und Sebastian, möchte ich ganz herzlich danken. Besonders die Zeit in der Stallumgebung und die fachliche Unterstützung bei den Versuchsdurchführungen war sehr lehrreich und haben mir immer viel Freude bereitet.

Ferner möchte ich mich bei dem Unternehmen DeLaval bedanken, dass bereits in einem sehr frühen Stadium an die Idee einer bedarfsorientierten Beleuchtung glaubte. Erst durch die finanzielle Unterstützung, die Bereitstellung von Ressourcen und dem Bau der notwendigen Demonstratoren konnten die Untersuchungen dieser Arbeit erfolgreich durchgeführt werden. Danke Alfred Kröger, Boris Perović und Jörg Brink.

Ebenso möchte ich mich für die Förderung des Forschungsvorhabens I_LED_Milchvieh durch die Landwirtschaftliche Rentenbank sowie die positive Begutachtung und Projektbegleitung durch die Bundesanstalt für Landwirtschaft bedanken.

Ein ganz herzlicher Dank auch an Kristin, Daniela und Lea-Elisa, die meine Arbeit als Lektoren auf die sprachliche Richtigkeit prüften.

Von ganzem Herzen möchte ich abschließend meiner Frau Johanna sowie meinen Eltern und Geschwistern danken, die mir in allen Situationen zur Seite standen und durch die Anfertigung meiner Arbeit oft auf mich verzichten mussten.

Inhaltsverzeichnis

1. Problemstellung und Ziele der Arbeit	1
2. Stand von Wissenschaft und Technik	3
2.1 Lichtwahrnehmung von Mensch und Rind.....	3
2.1.1 Sehvermögen des Menschen	4
2.1.2 Sehvermögen des Rindes	6
2.2 Bewertungsgrundlagen des Sehvermögens	7
2.2.1 Farbmeterik.....	8
2.2.2 Photometrie	9
2.2.3 Photopisches Sehen	10
2.2.4 Skotopisches Sehen.....	11
2.2.5 Photometrische Kontrastbestimmung	12
2.3 Lichtwirkung auf physiologische Prozesse von Mensch und Rind	14
2.3.1 Biologische Rhythmen	14
2.3.2 Fertilität.....	15
2.3.3 Melatonin	16
2.3.4 Bedeutung und Bildung von Vitamin A, Beta-Carotin, Vitamin D	17
2.3.5 Lichtprogramme in der landwirtschaftlichen Milchviehhaltung	18
2.4 Anwendungsbereich landwirtschaftliche Milchviehhaltung.....	19
2.4.1 Haltung und Haltungssysteme	19
2.4.2 Schadgasbelastung und Schutzart.....	20
2.5 Gesetzliche Anforderungen und normative Empfehlungen	23
3. Material und Methoden zur Konzeptionierung einer bedarfsorientierten Leuchte	25
3.1 Ermittlung der Kundenbedürfnisse	25
3.2 Anforderungen an eine bedarfsorientierte Leuchte	31
4. Entwicklung und Verifizierung der bedarfsorientierten Leuchte	36
4.1 Vorstellung der Demonstrationsleuchte	36
4.2 Lichttechnische Vermessung und Prüfung der Demonstrationsleuchte im Laborbereich ...	39
4.2.1 Vermessung mit der Integrationskugel	39
4.2.2 Vermessung mit dem Nahfeldgoniometer.....	42
4.2.3 Prüfung der Demonstrationsleuchte in der Laborumgebung	43
5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts	47
5.1 Anforderungen an ein bedarfsorientiertes Beleuchtungskonzept	47

5.2	Mitarbeiterbefragung.....	50
5.3	Beschreibung der ausgewählten Versuchsumgebung	51
5.3.1	Gebäudestruktur sowie Be- und Entlüftung.....	52
5.3.2	Melksystem, Fütterung und Entmistung	53
5.3.3	Beschreibung und Funktionsweise der Bestandsbeleuchtung.....	54
5.4	Erstellung einer Beleuchtungssimulation.....	56
5.4.1	Wartungsfaktor und Wartungsplanmethode.....	56
5.4.2	Raumflächen	58
5.4.3	Leuchtenanordnung.....	59
5.4.4	Steuerungsgruppen und Lichtszenen	60
5.5	Erstellung eines neuen Mess- und Bewertungskonzepts.....	61
5.5.1	Messgenauigkeit und verwendete Messausrüstung.....	61
5.5.2	Normative Anforderungen an ein Messraster und deren Übertragbarkeit auf den Anwendungsfall der Milchviehhaltung	64
5.5.3	Definition der Bewertungsflächen, Berechnungsraster und Messfelder	67
5.5.4	Definition prägnanter Stellen zur Erfassung und Bewertung der Leuchtdichte, der Leuchtdichteverteilung sowie der daraus zu berechnenden Kontraste.....	69
5.6	Tierbeobachtung	73
5.6.1	Ausgewählte Fokustiere	74
5.6.2	Ausgewählter Beobachtungsbereich.....	75
5.6.3	Verhaltensparameter und deren Erfassung	78
5.6.4	Statistische Auswertung.....	79
6.	Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind	81
6.1	Vorstellung des neuen Beleuchtungskonzepts	81
6.2	Verifizierung und messtechnische Validierung	84
6.2.1	Verifizierung des neuen Beleuchtungskonzepts	84
6.2.2	Validierung des neuen Beleuchtungskonzepts	87
6.3	Ergebnisse der Mitarbeiterbefragung	93
6.4	Ergebnisse der Verhaltensbeobachtungen	95
6.4.1	Häufigkeit aller erfassten Verhaltensweisen.....	95
6.4.2	Häufigkeit des Verhaltens Stehen	98
6.4.1	Häufigkeit des Verhaltens Komfortverhalten.....	99
6.4.1	Häufigkeit des Verhaltens Sozialverhalten.....	101
7.	Diskussion.....	103
8.	Zusammenfassung und Ausblick	115

Anhang	I
Literaturverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis	XVII
Tabellenverzeichnis	XX
I. Fragebogen „Zukunftsorientierter Landwirt - Optimierung der Beleuchtung in der Milchviehhaltung“	XXIII
II. Ergebnisse der Beleuchtungssimulation	XXVI
III. Ergebnisse der lichttechnischen Vermessungen	XXXIII
IV. Ergebnisse der Befragungsaktion LED- / NAV-Beleuchtung	XXXVI
Eidesstattliche Erklärung / Declaration under Oath	XXXVIII
Lebenslauf	XXXIX

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

Alle nachfolgenden Erläuterungen und Definitionen sind, sofern nicht im Verlauf der Arbeit oder im vorliegenden Verzeichnis anderweitig gekennzeichnet, der Online-Version des Duden [Dud19] entnommen.

°	Grad, messbare Stufe, Abstufung des mehr oder weniger starken Vorhandenseins einer Eigenschaft, eines Zustandes
α	Alpha, Signifikanzniveau als festgesetzter Wert der Irrtumswahrscheinlichkeit, statistische Kenngröße
A	Ampere, SI-Einheit der elektrischen Stromstärke
ALT	Aktivität, Lage und Temperatur, Kenngrößen die mittels der verwendeten Pedometer erfasst wurden
AMS	Automatisches Melksystem, Einrichtung, in der die Rinder eigenständig und frei nach Bedarf zum Melken gehen und nicht an feste Melkzeiten gebunden sind
BDM	Bundesverband Deutscher Milchviehhalter e. V.
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
C	Celsius, Gradeinheit auf der Celsiusskala
C_M	Michelson-Kontrast, photometrische Kontrastdefinition
C_R	einfaches Leuchtdichteverhältnis, photometrische Kontrastdefinition, engl.: <i>ratio</i>
C_W	Weber-Kontrast, photometrische Kontrastdefinition
cd	Candela, SI-Einheit der Lichtstärke, lichttechnische Grundgröße
CH ₄	Methan, farb- und geruchloses Gas (Kohlenwasserstoff aus der Gruppe der Paraffine), das technisch besonders aus Erdgas gewonnen und als Heizgas verwendet wird
CIE	Internationale Beleuchtungskommission, frz.: <i>Commission Internationale de l'Éclairage</i>
Clux	Lichttechnische Kenngröße der Beleuchtungsstärke, die das Sehvermögen des Geflügels berücksichtigen soll

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

CO ₂	Kohlendioxid, farb-, geruch- und geschmackloses Gas, das zum Beispiel bei der vollständigen Verbrennung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe entsteht
cos φ	Wirkleistungsfaktor, Verhältnis vom Betrag der Wirkleistung zur Scheinleistung
Δ	Delta, eine Abweichung vom Ursprung, Unterschied und Differenz
dA ₁ ·cosγ ₁	Geneigte, leuchtende Fläche [cd/m ²]
dΦ	Lichtstromanteil [lm]
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Spitzenverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften und der Unfallkassen
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DUT	Prüfling bei Messvorgang, engl.: <i>Device Under Test</i>
dΩ ₁	Raumwinkelement
ε	Stichprobenfehler, Variable, die den gewählten und tolerierten Fehler beziffert, statistische Kenngröße
E	Beleuchtungsstärke [lx], Stärke der Beleuchtung, die sich berechnet aus dem Verhältnis des auf eine Ebene auftreffenden Lichtstroms zu einer bestimmten Fläche, lichttechnische Grundgröße
E _M	Mittlere Beleuchtungsstärke [lx]
E _{Min}	Minimale Beleuchtungsstärke [lx]
E _{Max}	Maximale Beleuchtungsstärke [lx]
EG-ökokonform	Übereinstimmung mit der Verordnung (Europäischen Gemeinschaft) Nr. 834/2007 des Rates vom 28. Juni 2007 über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen
ΔE _i	Farbunterschied zur Berechnung des Farbwiedergabeindex
Φ	Lichtstrom [lm], Strahlungsfluss einer Lichtquelle, lichttechnische Grundgröße
φ	relative Luftfeuchtigkeit, in Form von Wasserdampf, in der Luft vorhandene Feuchtigkeit, Angabe in Prozent
F	Frequenz [Hz], physikalische Schwingungszahl von Wellen (pro Sekunde)
f _{ges}	Gesamtkenngröße des Messfehlers für lichttechnische Messungen mit physikalischen Photometern [DIN5032-7]

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

Fa.	Firma, ins Handelsregister eingetragener Name eines Unternehmens, Geschäftes
FB	Funktionsbereich, eine bestimmte Funktion betreffender Bereich
FSP	Forschungsschwerpunkt
F&E	Forschung und Entwicklung
η	Effizienz [lm/W], Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit, lichttechnische Kenngröße
g	Gramm, tausendster Teil eines Kilogramms
g_1	Gleichmäßigkeit, die als Verhältnis der minimalen Beleuchtungsstärke zur mittleren Beleuchtungsstärke definiert ist
g_2	Gleichmäßigkeit, die als Verhältnis der minimalen Beleuchtungsstärke zur maximalen Beleuchtungsstärke definiert ist
Gallilux	Lichttechnische Kenngröße der Beleuchtungsstärke, die das Sehvermögen des Geflügels berücksichtigt
GVE	Großvieheinheit, Wertzahl zur Erfassung des Viehbestandes eines landwirtschaftlichen Betriebes
H ₂ S	Schwefelwasserstoff, farbloses, brennbares, nach faulen Eiern riechendes, stark giftiges Gas, das u. a. in vulkanischen Gasen und Schwefelquellen vorkommt und durch Zersetzung von Eiweiß entsteht
Hz	Hertz, Maßeinheit der Frequenz
I	Lichtstärke [cd], SI-Einheit messbare Stärke des von einer Lichtquelle ausgestrahlten Lichts, lichttechnische Grundgröße
I	Elektrische Stromstärke [A], SI-Einheit, Menge des in einer bestimmten Zeit durch einen Leiter fließenden Stromes
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
IGF-1	Insulinähnlicher Wachstumsfaktor, engl.: <i>Insulin-like-growth-factor-I</i>
IP	Schutz gegen Eindringen, engl.: <i>Ingress Protection</i>
ipRGC	Photosensitive Ganglienzelle engl.: <i>intrinsically photosensitive retinal ganglion cells</i>
ITES	Intelligente Technische Energiesysteme, Forschungsschwerpunkt an der Fachhochschule Bielefeld
k. a.	Keine Angabe, keine Aussage, keine Auskunft oder Information

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

K	Kelvin, Maßeinheit der absoluten Temperaturskala
K	Photometrischer Leuchtdichtekontrast
K_m	Photometrisches Strahlungsäquivalent für Tagessehen [lm/W]
K_{MNa}	Berechneter Michelson-Kontrast unter Natriumdampfbeleuchtung
K_{MLED}	Berechneter Michelson-Kontrast unter LED-Beleuchtung
K'_m	Photometrisches Strahlungsäquivalent für Nachtsehen [lm/W]
K-Zapfen	Photorezeptor mit einer maximalen Intensität im kurzwellenlängen-sensitiven Spektralbereich (Mensch und Rind); siehe S-Zapfen
kg	Kilogramm, SI-Einheit der Masse
k Ω	Kiloohm, Tausendfaches der Einheit Ohm
l	Länge [m], bestimmte räumliche Ausdehnung in einer Richtung (in Verbindung mit Maßangaben)
λ	Wellenlänge [nm], räumlicher Abstand zweier aufeinanderfolgender Orte gleicher Phase, wie er bei einer Welle gemessen werden kann
λ_{peak}	Peak-Wellenlänge [nm], lichttechnische Messgröße
λ_{dom}	dominante Wellenlänge [nm], lichttechnische Messgröße
λ_{zen}	zentrale Wellenlänge [nm], lichttechnische Messgröße
L	photopische Leuchtdichte [cd/m^2], gemessener Helligkeitsgrad, den eine leuchtende Fläche hervorruft, lichttechnische Grundgröße
L_{LED}	Lebensdauerangabe der LED [Betriebsstunden]
L_{LED}	Messtechnisch erfasste Leuchtdichte unter LED-Beleuchtung [cd/m^2]
$L_{Leuchte}$	Lebensdauerangabe der Beleuchtungsanlage [Betriebsstunden]
L_{Na}	Messtechnisch erfasste Leuchtdichte unter Natriumdampfbeleuchtung [cd/m^2]
L_o	Leuchtdichte des Sehobjekts [cd/m^2]
L_u	Leuchtdichte des Umfeldes [cd/m^2]
L_x	Angabe des Lichtstromrückgangs der LEDs [Std.], [DIN62717]
L_xB_y	Angabe des Lichtstromrückgangs der LEDs mit der Erweiterung um den allmählich schrittweisen [Std.], engl.: <i>Gradual failure fraction</i> , [DIN62717]

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

L _x C _y	Angabe des Lichtstromrückgangs der LEDs mit der Erweiterung um den abrupten und totalen Ausfall [Std.], engl.: <i>Abrupt failure fraction</i> , [DIN62717]
L _x F _y	Angabe des Lichtstromrückgangs der LEDs mit der Erweiterung um allgemeine Fehler bzw. Ausfall [Std.], engl.: <i>Failure fraction</i> , [DIN62717]
L-Zapfen	Photorezeptor mit einer maximalen Intensität im langwellenlängen-sensitiven Spektralbereich (Mensch)
LED	Lichtemittierende Diode, engl.: <i>light-emitting diode</i>
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
LVK	Lichtstärkeverteilungskurve
lx	Lux, Einheit der lichttechnischen Grundeinheit des Lichtstroms
m	Meter, SI-Einheit der Länge
m ²	Fläche eines Quadrats mit der Seitenlänge 1 m entsprechende Maßeinheit der Fläche
M-Zapfen	Photorezeptor mit einer maximalen Intensität im mittelwellenlängen-sensitiven Spektralbereich (Mensch)
M-/L-Zapfen	Photorezeptor mit einer maximalen Intensität im mittel- und langwellenlängen-sensitiven Spektralbereich (Rind)
mA	Milliampere, tausendstel der SI-Einheit Ampere
MicroSD	Speicherkarte, kleine einsteckbare Karte für einen PC, eine Digitalkamera oder Ähnliches, auf der Daten gespeichert werden können
mm	Millimeter, tausendstel der SI-Einheit Meter
ms	Millisekunde, 1/3.600 Teil der SI-Einheit Minute
mW	Milliwatt, tausendstel der Einheit Watt
Min.	Minimalwert, kleinst(möglich)er Wert, statistische Kenngröße
Milchvieh	Vieh, das wegen der Produktion von Milch (aus dem Euter von Kühen (auch Schafen, Ziegen u. a. säugenden Haustieren) stammende, durch Melken gewonnene weiße, leicht süße und fetthaltige Flüssigkeit, die als wichtiges Nahrungsmittel, besonders als Getränk, verwendet wird) gehalten wird
Max.	Maximalwert, höchst(möglich)er Wert, statistische Kenngröße
MF	Wartungsfaktor, engl.: <i>maintenance factor</i> , Angabe für die Durchführung von Arbeiten an einer technischen Anlage oder Ähnliches, die der Erhaltung ihrer Funktionsfähigkeit dienen

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

N	Grundgesamtheit, statistische Kenngröße
N	Anzahl der Nennungen, bezogen auf zurückgemeldete Fragebögen, statistische Kenngröße
N	Anzahl der Elemente in statistischer Auswertung (erfasste Verhaltensbeobachtungen)
N _{abs}	Anzahl der Nennungen in absoluter Darstellung, statistische Kenngröße
N _{rel}	Anzahl der Nennungen in relativer Darstellung, statistische Kenngröße
NAV	Natriumdampf Lampe, Gasentladungslampe, die durch die Gasentladung von Dampf des Elementes Natrium monochromatisches Licht emittiert
NH ₃	Ammoniak, stechend riechende, gasförmige Verbindung von Stickstoff und Wasserstoff
nm	Nanometer, ein milliardstel Meter, Maßeinheit der Länge
Nr.	Nummer, Zahl, die etwas kennzeichnet, eine Reihenfolge oder Ähnliches angibt
OKFF	Oberkante fertiger Fußboden, Bemaßungs-Angabe aus dem Bauwesen
π	Kreiszahl
Pos.	Position, bestimmte (räumliche) Stellung oder Lage
ppm	Millionster Teil, engl.: <i>Parts per million</i> , Hinweis bei Zahlenangaben, die sich auf die Vergleichszahl 1.000.000 beziehen
R	Elektrischer Widerstand [Ω], Eigenschaft von bestimmten Stoffen, das Fließen von elektrischem Strom zu hemmen
R _a	Farbwiedergabeindex, Kennzahl einer photometrischen Größe, mit der die Qualität der Farbwiedergabe von Lichtquellen gleicher korrelierter Farbtemperatur beschrieben wird
R _i	Testfarbe bezogen auf die Farbwiedergabe
R ₉	Testfarbe bezogen auf die Farbwiedergabe Rot gesättigt
R ₁₃	Testfarbe bezogen auf die Farbwiedergabe Rosa (Hautfarbe)
Rind	Vertreter einer in mehreren Arten vorkommenden, zur Familie der Horntiere gehörenden Unterfamilie von Paarhufern
ρ	Reflektionsgrad

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

P	Elektrische Wirkleistung [W], Verhältnis aus der (bei einem physikalischen Vorgang) verrichteten Arbeit zu der benötigten Zeitspanne; Fähigkeit, in der Zeiteinheit eine bestimmte Arbeit zu verrichten
p	p-Wert, zweiseitig asymptotische Signifikanz, engl.: <i>p-value, probability</i> , statistische Kenngröße
P	Tatsächlicher Mittelwert der Grundgesamtheit, statistische Kenngröße
PVC	Polyvinylchlorid, thermoplastisches Polymer
Q	Blindleistung [Var], Anteil der elektrischen Leistung in einem Stromkreis (besonders in einem Stromversorgungssystem), der zum Aufbau elektrischer und magnetischer Felder verbraucht wird und daher nicht zur tatsächlichen Leistung beiträgt
Q	Variable, berechnet durch die Subtraktion aus dem Minuenden 1 und dem Subtrahenden P, statistische Kenngröße
σ	Standardabweichung, mittlere Abweichung der Streuung, statistische Kenngröße
s	Sekunde, sechzigster Teil einer Minute als Grundeinheit der Zeit
S	Scheinleistung [VA], Rechengröße, die im Blick auf die Verluste und die Beanspruchung der Bauelemente eines Energieversorgungssystems zu beachten ist, wenn einem elektrischen Verbraucher elektrische Leistung zugeführt wird
SCN	Kerngebiet im Hirn (ventraler griech.: <i>Hypothalamus</i>), engl.: <i>Nucleus suprachiasmaticus</i>
SI	Internationales Einheitensystem, frz.: <i>Système International d' Unités</i>
SON-T	Leuchtmittelbezeichnung einer Natriumdampfleuchte
S-Zapfen	Photorezeptor mit einer maximalen Intensität im kurzwellenlängen-sensitiven Spektralbereich (Mensch); siehe K-Zapfen
T	Temperatur [°C], Wärmegrad eines Stoffes, gemessene Wärme von etwas, besonders der Luft
T_{\min}	Minimale Temperatur, untere Grenze eines Temperaturbereichs
T_{\max}	Maximale Temperatur, obere Grenze eines Temperaturbereichs
T4C	Managementsystem der Firma Lely, das in Verbindung mit dem automatischen Melksystem Astronaut der Firma Lely verwendet wurde, engl. <i>Time for cows</i>
T_{CP}	Korrelierte Farbtemperatur [K]
T_N	Ähnlichste Farbtemperatur [K]

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

tan	Tangens, im rechtwinkligen Dreieck das Verhältnis von Gegenkathete zu Ankathete
TierSchNutztV	Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung, Verordnung zum Schutz landwirtschaftlicher Nutztiere und anderer zur Erzeugung tierischer Produkte gehaltener Tiere bei ihrer Haltung
THI	Temperatur-Luftfeuchtigkeitsindex, engl.: <i>temperature-humidity index</i>
T_j	Sperrschichttemperatur [°C], engl.: <i>junction temperature</i>
U	Elektrische Spannung [V], Differenz der elektrischen Potentiale zweier Punkte, aufgrund derer zwischen diesen beiden Punkten ein elektrischer Strom fließen kann
u	Farbmaßzahl im CIE-Normvalenzsystem
U_0	Gleichmäßigkeit, die als Verhältnis der minimalen Beleuchtungsstärke zur mittleren Beleuchtungsstärke definiert ist
USB	Leitung zur Datenübertragung, die es ermöglicht, dass alle peripheren Komponenten eines Computers über einen Anschluss mit dem Computer verbunden werden und kommunizieren, engl.: <i>Universal Serial Bus</i>
UV	Ultraviolettstrahlung; für Mensch und Rind unsichtbare elektromagnetische Strahlung nach [DIN5031-10] im Wellenlängenbereich von 10 nm - 380 nm
UV-B	Mittlere Ultraviolettstrahlung; für Mensch und Rind unsichtbare elektromagnetische Strahlung nach [DIN5031-10] im Wellenlängenbereich von 280 nm - 315 nm
v	Farbmaßzahl im CIE-Normvalenzsystem
v	Schiefe, schiefe Lage oder Richtung, statistische Kenngröße
V	Volt, Einheit der elektrischen Spannung
VA	Voltampere, Einheit der elektrischen Scheinleistung
Var	Einheit der elektrischen Blindleistung, franz.: <i>Volt-Ampère-réactif</i>
VBZL	Versuchs- und Bildungszentrum Landwirtschaft der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen
Vp 1	Versuchsphase 1 (Natriumdampfbeleuchtung)
Vp 2	Versuchsphase 2 (LED-Beleuchtung)
Vp 3	Versuchsphase 3 (Kontrollphase, Natriumdampfbeleuchtung)
$V(\lambda)$	Spektrale Hellempfindlichkeit des Menschen für Tagessehen

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

$V'(\lambda)$	Spektrale Hellempfindlichkeit des Menschen für Nachtsehen
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
VOC	Flüchtige organische Verbindungen, engl.: <i>volatile organic compounds</i>
w	Kurtosis, die Wölbung als eine Maßzahl für die Steilheit bzw. „Spitzigkeit“ einer Wahrscheinlichkeitsfunktion, statistische Kenngröße
W	Watt, Einheit der elektrischen Leistung
WF	Wartungsfaktor, Angabe für die Durchführung von Arbeiten an einer technischen Anlage oder Ähnliches, die der Erhaltung ihrer Funktionsfähigkeit dienen
\bar{x}	Arithmetischer Mittelwert, aus mehreren vergleichbaren Größen errechneter Durchschnitt in Bezug auf Quantität oder Qualität, statistische Kenngröße
x	Farbmaßzahl im CIE-Normvalenzsystem
x	Koordinate, zur Angabe der Lage eines Punktes in der Ebene oder im Raum (anhand eines Koordinatensystems) dienende Zahl
x_{Med}	Median, Zentralwert, statistische Kenngröße
x_{Mod}	Modus, in einer Reihe am häufigsten vorkommender Wert, statistische Kenngröße
y	Farbmaßzahl im CIE-Normvalenzsystem
y	Koordinate, zur Angabe der Lage eines Punktes in der Ebene oder im Raum (anhand eines Koordinatensystems) dienende Zahl
z	Koordinate, zur Angabe der Lage eines Punktes in der Ebene oder im Raum (anhand eines Koordinatensystems) dienende Zahl
z	Wert der gewählten Sicherheitswahrscheinlichkeit, berechnet aus der zentralen Wahrscheinlichkeit der Standardnormalverteilung, statistische Kenngröße
Ω	Ohm, Einheit des elektrischen Widerstandes

1. Problemstellung und Ziele der Arbeit

Licht wird zum Sehen benötigt, steuert physiologische Vorgänge und beeinflusst die biologischen Rhythmen. Die Gesundheit, das Wohlbefinden sowie die Leistungsfähigkeit werden maßgeblich durch Licht beeinflusst. Weiterhin fördert Licht die Aktivität, ermöglicht eine bessere Tierbeobachtung und -kontrolle und steigert die Tiergesundheit [Arb16] [Jan00] [Oek13] [Pli16]. In der Milchviehhaltung werden Lichtprogramme eingesetzt, die den biologischen Effekt der unterschiedlichen Lichtwirkung eines Sommer- oder Wintertages nutzen. Der Einsatz erfolgt zur Steigerung der Milchproduktion [Mor08] [Rek99] [Wri13]. Temple Grandin wies im Rahmen ihrer 1997 für das United States Department of Agriculture erstellten Richtlinien auf die Wichtigkeit einer guten Beleuchtung hin. In einer für Nutztierbetriebe erstellten Checkliste entfallen vierzehn der achtzehn Checkpunkte auf den rein visuellen Bereich. Zehn Checkpunkte sind dem Kontrast- und Farbsehen zuzuordnen [Gra15].

Durch Gespräche mit Landwirten sowie Mitarbeitern der landwirtschaftlichen Versuchs- und Bildungsanstalten der nationalen Landwirtschaftskammern und durch zahlreiche Begehungen auf landwirtschaftlichen Milchviehbetrieben ist aufgefallen, dass eine gute Stallbeleuchtung auch im Bereich der Milchviehhaltung nur in den seltensten Fällen vorzufinden ist. Aktuell ist jedoch ein Effekt des positiven Umdenkens zu Tierkomfort, -gerechtigkeit und -gesundheit zu erkennen. Mit der LED-Technologie ist die Möglichkeit für eine energieeffiziente, nachhaltige und tiergerechte Beleuchtung gegeben [Cla06]. Allerdings zeigen Ergebnisse aus den durchgeführten Forschungsprojekten an der Fachhochschule Bielefeld sowie die Erfahrungen aus der industriellen Beleuchtungsplanung, dass viele vorhandene Beleuchtungsplanungen unvollständig oder auch fehlerhaft sind. Bedarfsorientierte Konzepte, die die Bedürfnisse und die Anforderungen von Mensch und Rind in der landwirtschaftlichen Milchviehhaltung berücksichtigen, sind nicht bekannt.

Auf Basis dieser Erkenntnisse ergeben sich für die vorliegende Arbeit die grundlegenden Fragestellungen:

- **Welche Anforderungen werden an eine bedarfsorientierte Leuchte in der landwirtschaftlichen Milchviehhaltung gestellt?**
- **Wie muss ein Beleuchtungskonzept für Mensch und Rind konzipiert und umgesetzt werden, dass es die Sehaufgaben unterstützt und gleichzeitig das Verhalten positiv beeinflusst?**

Die Besonderheit dieser Arbeit besteht vor allem in der Interdisziplinarität. Ansätze und Methoden werden primär aus den verschiedenen Fachrichtungen der Ingenieur- und der Biowissenschaften sowie der Ethologie verwendet. Besonders die Einbeziehung der Ansprüche der Rinder, deren Akzeptanz anhand ethologischer Studien erfasst werden muss, sowie die Zielgruppe Landwirt, bei der Kenntnis in

1. Problemstellung und Ziele der Arbeit

der Licht- und Beleuchtungstechnik aufgrund der Komplexität des Alltags nur untergeordnet bzw. rudimentär betrachtet werden können, stellen große Herausforderungen dar. Da es keinen einheitlichen Beleuchtungsstandard oder eine adäquate normative Empfehlung zum Vorgehen in Milchviehställen gibt, ist für die Evaluierung eines Beleuchtungskonzepts zudem die Definition neuer Mess- und Bewertungskriterien notwendig. Zur systematischen Untersuchung der grundlegenden Fragestellungen wird der Verlauf dieser Arbeit wie folgt gegliedert:



2. Stand von Wissenschaft und Technik

Licht wird als sichtbarer Bereich des elektromagnetischen Spektrums im Bereich von 380 nm bis 780 nm definiert [DIN5031-100] [Voe16]. Es wird nicht nur für das Sehen, sondern auch für lebensnotwendige physiologische Vorgänge und biologische Rhythmen benötigt [Oek13] [Arb16]. Tageslicht hemmt in der Stallumgebung das Bakterien- und Parasitenwachstum [Arb16] [Ofn16]. Der Unterschied zwischen einer künstlichen und einer natürlichen Beleuchtung liegt in der Variabilität des Tageslichts. Neben einem kontinuierlichen Farbspektrum weist Tageslicht kein gleichbleibendes Lichtspektrum auf. Wetterbedingt sowie durch die unterschiedlich langen Wege, die Sonnenstrahlen durch die Erdatmosphäre zurücklegen (unterschiedliche Sonnenstände je nach Tages- und Jahreszeit), verändert sich das Tageslicht bezüglich Helligkeit sowie spektraler Zusammensetzung und steuert durch die unterschiedlichen biologischen Wirkungen den gesamten Organismus [Oek13] [Rea02a] [Rea02b].

2.1 Lichtwahrnehmung von Mensch und Rind

Wahrnehmung wird auch als Perzeption bezeichnet und ist als eine Fähigkeit definiert, die die Veränderungen der physikalischen oder chemischen Bedingungen in der Umgebung oder im Körperinneren bewusst registriert. Die sensorische Perzeption (Sinneswahrnehmung) erfolgt durch die Sinnesorgane und umfasst den Geruchs-, Gleichgewichts-, Hör-, Seh- und Tastsinn [Bur05].

Aus physiologischer Sicht umfasst die visuelle Wahrnehmung die Fähigkeiten, dass optische Reize aufgenommen, unterschieden, verarbeitet, eingeordnet und interpretiert werden, sodass auf die optischen Reize entsprechend reagiert werden kann [Zim15]. Der Sehsinn wird als bedeutendster Sinn des Menschen beschrieben [Mue09] [Weh13]. Dieser Sinn liefert die detailreichsten Informationen in Bezug auf unsere Umwelt und besitzt die höchste räumliche Auflösung, indem unendlich viele Formen und Farben in einer Vielfalt von Bildern erschaffen werden [Mue09]. Die Lichtwahrnehmung basiert neben den erfassten Reizen vor allem auf Erfahrungen und Lerneffekten [Gre08]. Die physiologischen Grundfunktionen werden im Wesentlichen mit der Unterscheidung von Leuchtdichte- und Farbdifferenzen, das Wahrnehmen von Formen sowie die Geschwindigkeit der Wahrnehmung dieser drei Größen beschrieben [Hen02].

Die wichtigsten Sinne des Rindes sind der Gesichts- (Seh-) sowie der Geruchssinn. Objekte im direkten Nahbereich und besonders weit entfernte, sowie vor allem sich seitlich bewegende Objekte können sehr gut wahrgenommen werden. Zur Nahkommunikation im Hinblick auf die individuelle Erkennung und dem Sexualverhalten dient der Geruchssinn [Hel13] [Win09]. Bartussek [Bar94] benennt zur Orientierung bei der Futteraufnahme den Geruchssinn als bedeutendsten Sinn des Rindes [Bar94]. Ob der

2. Stand von Wissenschaft und Technik

Geruchssinn, wie vergleichbar zum Schwein, oder der Sehsinn, vergleichbar zum Mensch, maßgeblich für die Orientierung im allgemeinen Lebensraum ist, wird in der Literatur nicht eindeutig beschrieben. Phillips [Phi02] führt auf, dass für die meisten Situationen der Sehsinn als dominantester Sinn des Rindes gilt [Phi02].

2.1.1 Sehvermögen des Menschen

Im menschlichen Auge sind für das grundlegende Sehen zwei Arten von Photorezeptoren, die Stäbchen und die Zapfen, vorhanden. Die Stäbchen, in der Literatur mit einer Anzahl von durchschnittlich 92 Millionen bis 125 Millionen pro Auge [Bar09] [Cur90] [Fri14] [Lan98] benannt, benötigen nur sehr wenig Licht und können bereits einzelne Lichtquanten wahrnehmen. Die minimal wahrnehmbare Helligkeit des Nachtsehens (skotopisches Sehen) wird mit $1 / 1.000.000 \text{ cd/m}^2$ angegeben. Im Übergangsbereich des Dämmerungssehens (mesopisches Sehen), welcher in etwa mit der Helligkeit bei Mondlicht und der Dämmerung umschrieben wird, sind neben den Stäbchen auch die Zapfen aktiv. Im Bereich des Tagessehens (photopisches Sehen) sind die Zapfen, die in Summe mit durchschnittlich 4,6 Millionen bis etwa 7 Millionen angegeben werden [Cur90] [Fri14] [Lan98], allein aktiv. Die Stäbchen sind vollständig gesättigt und liefern keine verwertbaren Informationen. Das Farbsehen erfolgt nur und ausschließlich durch die Zapfen. Die maximal wahrnehmbare Helligkeit beträgt etwa $100.000.000 \text{ cd/m}^2$ [Fri14].

Als Trichromat besitzt der Mensch drei unterschiedliche Gene für Zapfenopsine, die eine unterschiedliche Abfolge von Aminosäuren im Protein verursachen und drei unterschiedliche Sehfärbstoffe produzieren. Jedes Gen codiert einen dieser Zapfen, sodass eine Unterscheidung in drei Zapfenarten erfolgt. Nach der höchsten Empfindlichkeit im Spektralbereich werden diese als lang-, mittel-, und kurzwellenlängen-sensitiv und umgangssprachlich als Rot-, Grün- und Blauzapfen bezeichnet. Abgekürzt werden diese als L-, M- und K-Zapfen, wobei der kurzwellenlängen-sensitive Zapfen alternativ als S-Zapfen (engl.: *short*) betitelt wird [Bow80] [Bur05] [Geg12] [Scz11] [Weh13].

In der Literatur benennt Frings [Fri14] die maximalen Sensitivitäten der Zapfen mit 565 nm für den langwellenlängen-sensitiven Zapfen, 535 nm für den mittelwellenlängen-sensitiven Zapfen sowie 430 nm für den kurzwellenlängen-sensitiven Zapfen. Bowmaker und Dartnall [Bow80] konnten messtechnisch die maximalen Sensitivitäten bei 562,8 nm, 533,8 nm und 420,3 nm nachweisen [Bow80]. Der minimale Unterschied von circa 30 nm (M- zu L-Zapfen) ist darauf zurückzuführen, dass sich das zweite Zapfenopsin vor circa 55 Mio. Jahren auf dem X-Chromosom durch Mutation verdoppelt hat. Durch eine unterschiedliche Entwicklung der Tochtergene wurden diese unabhängig und es entstanden zwei Opsine, die sich im Absorptionsspektrum unterscheiden. Der genetische Evolutionsvorteil,

2. Stand von Wissenschaft und Technik

welcher die Unterscheidung von Rot- und Grüntönen darstellt, war so groß, dass sich dieser sehr schnell in der Population ausbreitete [Geg12] [Fri14].

Angeordnet sind die Photorezeptoren in Form eines „Gebirges“ über die Retina [Fri14]. Im Bereich des schärfsten Sehens (lat.: *fovea centralis*) beträgt das Verhältnis zwischen Stäbchen und Zapfen zwei zu eins. Im Peripheriebereich steigt das Verhältnis auf dreißig zu eins an [vdZ05]. Diese Verteilung beruht evolutionsbedingt darauf, dass die Augen spezialisiert sind, besonders kleine Objekte scharf abzubilden. Die Sehschärfe des Menschen wird mit einer Winkelminute bzw. $1/60$ Grad Sehwinkel angegeben. Die Bestimmung der Sehschärfe erfolgt mittels standardisierter Figuren, wie zum Beispiel mit dem Landolt-Ring, der eine Öffnung bzw. Lücke von $1/60$ Grad (eine Winkelminute) aufweist [Bar09] [Fri14].

Die Reaktion der Photorezeptoren wird als relativ träge beschrieben. Da die Stäbchen nur wenig Licht benötigen, verschmelzen Lichtreize bereits bei 20 bis 30 Reizen pro Sekunde. Bei den Zapfen geschieht dies erst bei 50 bis 60 Reizen pro Sekunde. Bewegungen mit etwa 50 Bildern pro Sekunde werden als fließende Bewegung ohne Flimmern wahrgenommen [Fri14].

Die Anpassung des Lichtsinnes der Augen an verschiedene Helligkeitsstufen wird als Adaption bezeichnet. Die schnellste Anpassung erfolgt durch den Pupillenreflex, der eine Verengung der Pupille bei Erhöhung der Netzhautbeleuchtungsstärke verursacht [Roe95]. In einem weiteren Schritt sind die chemische Adaption und die neuronale Adaption zu unterscheiden. Bei der chemischen Adaption wird das Rhodopsin als Sehpigment der Stäbchen durch das einfallende Licht chemisch verändert [Bri72] [Mor72] [Neu03]. Bleicht es aus, fällt das Stäbchensehen zugunsten des Zapfensehens aus. Dieser Prozess wird als Helladaption bezeichnet und umfasst einen Zeitraum von ungefähr fünf bis sieben Minuten. Die Dunkeladaption benötigt für die vollständige Regeneration des Rhodopsins in der Retina einen Zeitraum von etwa 30 bis 45 Minuten. Die Prozesse der neuronalen Adaption, in denen durch Querverbindungen in der Retina und in den visuellen Zentren mehrere rezeptive Felder zusammengeschaltet werden, verlaufen schneller als die Prozesse der chemischen Adaption und nehmen in der Gesamtbetrachtung eine untergeordnete Rolle ein [Gre08] [Lan98] [Rei96].

Neben der Sehschärfe ist vor allem das Gesichtsfeld für die Wahrnehmung der Umwelt entscheidend. Als Gesichtsfeld wird derjenige Teil des auf eine Fläche projizierten Raumes definiert, der bei ruhig gehaltenem Blick gleichzeitig überschaut wird [Lau44]. Der monokulare Bereich der überlagernden Gesichtsfelder der einzelnen Augen umfasst in der Horizontalen eine 180 bis 200 Grad messende Halbkugel. Der binokulare Bereich wird mit 120 Grad, selten bis 140 Grad, angegeben. Das Blickfeld, definiert als Bereich, der ohne Kopf- und Augenbewegung gerade noch fixiert werden kann, beträgt etwa 50 Grad. Die Gegend des schärfsten Sehens wird als foveales Zentrum bezeichnet. Dieser Bereich wird mit etwa drei Grad angegeben [Koe88] [Lau44].

2. Stand von Wissenschaft und Technik

2.1.2 Sehvermögen des Rindes

Vergleichend zum Sehvermögen des Menschen erfolgt die Photoperzeption der Rinder mittels Stäbchen und Zapfen, die ein skotopisches und photopisches Sehen ermöglichen [Bur05] [Mou14]. Da Rinder als tages- bzw. dämmerungsaktiv gelten, ist das skotopische Sehen gut ausgebildet und deutlich besser als das des Menschen [Win09]. Zurückzuführen ist dies auf eine erhöhte Anzahl der Stäbchen sowie auf eine reflektierende Schicht im Auge (lat.: *tapetum lucidum*), die bei Rindern reflektierend blaugrün bis azurblau erscheint und das Rest- bzw. Nachtlicht verstärkt [Nic04] [Rod98]. Land et al. beschreiben das *tapetum lucidum* als „silbriger Teppich“ mit der Funktion eines Spiegels. Einzelne Lichtquanten, die nicht direkt auf die Retina treffen, werden durch den Spiegeleffekt gezielt auf die Retina gelenkt [Lan12a].

Im Bereich des Farbsehens werden Rinder, wie auch andere Tiere der Kategorie Artiodactyl (Paarhufer), den Dichromaten zugeordnet [Ama14] [Car01] [Phi01] [Rio89]. In der frühen Vergangenheit wurde den Wiederkäuern, insbesondere dem Rind und dem Schaf, jede Art der Farbunterscheidung abgesprochen [Gor70]. Durch Wahlversuche [Gil86] sowie immunzytochemische Untersuchungen konnten jedoch auch bei Rindern zwei Zapfenarten (S- sowie M/L-Zapfen) nachgewiesen werden [Jac09] [Sze88]. Mittels der Methode ERG- (Elektroretinogramm-) Messung (Flicker-Photometrie) wurden 1993 für die Familie der Bovidae (Hornträger, zum Beispiel Hausrind, Schaf und Ziege) zwei Photopigmente mit Maxima im Bereich von 440 bis 455 nm sowie im Bereich von 536 bis 555 nm gefunden. Maxima im Bereich von 455 nm (kurzwellenlängen-sensitiver Bereich) und 554 nm (mittel- und langwellenlängen-sensitiver Bereich) (n = 5) wurden durch Jacobs et al. ermittelt [Jac98]. Untersuchungen von Douglas et al. [Dou14] zeigten, dass bei Rinderaugen eine UVA-Durchlässigkeit der Linse von rund 22 % vorliegt [Dou14]. Die maximal wahrnehmbare Wellenlänge von Rindern wird mit 620 nm angegeben [Phi01].

Die Anordnung der Photorezeptoren ist im Auge der Rinder relativ flach. Durch die Verteilung der Zapfen über die Retina ist das Auge evolutionsbedingt optimiert, um weit entfernte Objekte möglichst früh zu erkennen. Ein großer Anteil des Horizonts, von dem sich Gefahren in der freien und weiten Umgebung nähern, kann unter Berücksichtigung der Bewegungen scharf gesehen werden [Fri14]. Beschrieben wird die Anordnung der Zapfen in einer dorsal-temporal verlaufenden L-Form [Nic04] [Sch08]. Das Verhältnis der Stäbchen zu den Zapfen wird im zentralen Bereich der Retina mit zwei bis drei zu eins angegeben. Im Peripheriebereich steigt dieses Verhältnis auf Werte von fünf bis sechs zu eins an [Phi01]. Laut Kolb [Kol90] können Kälber die Mutterkuh bereits nach einigen Tagen auf eine Entfernung von 50 m relativ sicher und Kühe den Bullen auf 100 bis 150 m genau erkennen. Im Gegensatz zum Menschen, der eine zentrale Stelle höchster Rezeptorendichte besitzt, verfügen Haustiere allgemein über eine runde Zone (lat.: *area centralis rotunda*). Wiederkäuer besitzen darüber hinaus einen von

2. Stand von Wissenschaft und Technik

temporal nach nasal verlaufenden Horizontalstreifen höchster Rezeptorendichte (lat.: *area centralis striaeformis*) [Reh00]. Dynamische Bewegungen sind wesentlich detaillierter und besser ausgeprägt wahrnehmbar [Mou14]. Sehr gut werden auch kleinste horizontale Bewegungen erkannt. Die guten Eigenschaften des Bewegungssehens sind vermutlich auf die *area centralis striaeformis*, die oberhalb der Eintrittsstelle des Sehnervs liegt, zurückzuführen. Unterscheiden können Rinder etwa 40 bis 60 Reize pro Sekunde [Mes14]. Zusätzlich liegt bei Weidetieren allgemein eine Schrägstellung der Netzhaut vor. Durch diese Eigenschaft wird dem Rind ermöglicht, mit dem oberen Teil der Retina permanent die Ferne und mit dem unteren Teil die Nähe eingeschränkt zu fokussieren [Hel13]. Laut Winckler [Win09] sind Rinder vermutlich kurzsichtig und ihre Sehschärfe ist deutlich geringer als die des Menschen. In der weiteren Literatur werden Angaben zur Sehschärfe des Rindes im Bereich von sieben [Lie13] sowie zwölf bis vierundzwanzig Winkelminuten [Phi02] genannt. Frings et al. [Fri14] beschreiben die Gesamtschärfe des Sehstreifens als deutlich geringer als die des Menschen. Da die Sehschärfe besonders im Nahbereich gering ist, muss das Rind seinen Kopf zu Boden senken, um die eingeschränkte Tiefenwahrnehmung auszugleichen. Dies erklärt auch, warum Rinder vor Schatten oder flachen Gegenständen anhalten oder zurückscheuen [Gra15].

Im Bereich der visuellen Wahrnehmung können Rinder verschiedenste geometrische Formen und Ausrichtungen unterscheiden [Bal81] [Reh97] [Reh98]. Ohne Kopfbewegung können Rinder weit hinter sich schauen [Gra97] [McF99]. Das monokulare Gesichtsfeld beträgt circa 330 Grad [Phi02] [Win09]. Anschleichende Raubtiere können so aus dem Rückraum kommend wahrgenommen werden [Sja10]. Der Bereich des binokularen Sehens beträgt etwa 50 Grad [Win09]. Für das Gesichtsfeld in der Vertikalen wird ein Bereich von circa 60 Grad angegeben [Mes14].

Die Reaktionsgeschwindigkeiten der Augen unterscheiden sich ebenfalls stark von denen des Menschen. Für die Helladaption wurden mittels ERG-Messungen eine Zeit von 30 Minuten ermittelt [Ryb89].

2.2 Bewertungsgrundlagen des Sehvermögens

Zur Bewertung des Lichts werden die lichttechnischen Betrachtungen in die Bereiche Farbmeterik und Photometrie aufgeteilt [Lan04]. Die Farbmeterik wird zur Farbmessung verwendet und beschreibt die Kenngrößen, die durch die visuelle Empfindung des Farbreizes definiert werden. Zu nennen sind beispielsweise die ähnlichste Farbtemperatur T_N sowie der Farbwiedergabeindex R_a [Bod16] [Hei14]

2. Stand von Wissenschaft und Technik

[DIN5033-1] [DIN5033-5]. Die Photometrie wird für Lichtmessung verwendet und umfasst vier lichttechnische Grundeinheiten, die sich auf die Lichtstärke als eine der sieben Basiseinheiten im SI-Einheitssystem (frz.: *ystème international d'unités*) zurückführen lassen. Im Einzelnen sind dies der Lichtstrom Φ , die Lichtstärke I , die Beleuchtungsstärke E sowie die Leuchtdichte L [Lan04] [Hei14]. Zur Bewertung des Sehvermögens werden darüber hinaus das photopische und skotopische Sehen sowie die photometrische Kontrastbestimmung herangezogen.

2.2.1 Farbmatrik

Die Bewertung der Farbmatrik erfolgt als eine Farbempfindung aus der Erregungssumme mehrerer Empfängertypen, welche auf die spektrale Energieverteilung des Lichtes reagieren. Die Kennzeichnung der Farben kann über die Farbvalenzen oder die spektrale Energieverteilung erfolgen. Bei der Bewertung der Farbvalenzen wird jede Farbempfindung in Farbton, Helligkeit und Sättigung angegeben. Um die räumlichen Farbvalenzen als ebene Farbarten in einer Farbtabelle darzustellen, wird auf die Helligkeitsinformation verzichtet. Die mit x und y bezeichneten und aufgetragenen Farbwerte können der CIE-Farbtabelle von 1931 entnommen werden [Bod16] [DIN5033-1] [Hei14].

Mit dem Farbwiedergabeindex R_a ist eine Maßzahl zur Beschreibung der allgemeinen Farbwiedergabe gegeben [DIN6169-1]. Berechnet wird der Farbwiedergabeindex R_a aus der Durchschnittssumme der ersten acht Testfarben in Bezug auf die einzelnen Farbunterschiede ΔE_i [Bod16] [Hei14] (Formel 2.1 und Formel 2.2):

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i \quad (2.1)$$

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (2.2)$$

Der Vorteil des Farbwiedergabeindex R_a ist die standardisierte und einfache Definition, die bei Leuchten bzw. Leuchtmitteln angegeben wird. Bei Betrachtung der einzelnen Testfarben ist zu beachten, dass Äquivalente zu Blut und Haut mit den Testfarben R_9 (Rot gesättigt) und R_{13} (Rosa (Hautfarbe)) vorliegen und nicht in den Farbwiedergabeindex R_a einbezogen werden (Abbildung 2.1).

2. Stand von Wissenschaft und Technik



Abbildung 2.1: Testfarben zur Bestimmung des Farbwiedergabeindex nach DIN 6169-2 [Kha19]

2.2.2 Photometrie

Der Bereich der Photometrie umfasst die Transformation der strahlungsphysikalischen Grundgrößen in die lichttechnischen Grundgrößen. Jede strahlungsphysikalische Grundgröße lässt sich mit der spektralen Hellempfindlichkeit des Menschen für Tagessehen ($V(\lambda)$) oder für Nachtsehen ($V'(\lambda)$) bewerten und als lichttechnische Grundgröße darstellen. Als Grenzen des skotopischen und photopischen Sehens sind laut DIN-Norm die Leuchtdichten $L' = 10^{-5} \text{ cd/m}^2$ und $L = 10^2 \text{ cd/m}^2$ angegeben [DIN5031-3].

Die Leuchtdichte L , angegeben in der Einheit cd/m^2 , ist die Grundgröße, die den Helligkeitseindruck beschreibt [Voe16]. Diese einzig für den Menschen und das Rind sichtbare lichttechnische Grundgröße ist laut Völker [Voe16] als „[...] der Lichtstromanteil $d\Phi$ definiert, der in eine vorgegebene Richtung, in ein Raumwinkelelement $d\Omega_1$ eingestrahlt wird, bezogen auf die scheinbar leuchtende Fläche ($dA_1 \cdot \cos\gamma_1$)“ (Formel 2.3).

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA_1 \cdot \cos\gamma_1 \cdot d\Omega_1} \quad (2.3)$$

Der Dynamikbereich der visuellen Wahrnehmung umfasst $12 \log_{10}$ Einheiten. Bei einem sternlosen Nachthimmel können in etwa $4 \times 10^{-6} \text{ cd/m}^2$ und bei der im Zenit stehenden Sonne etwa $3,2 \times 10^6 \text{ cd/m}^2$ wahrgenommen werden [Scz11]. Bei einer vollkommen diffus reflektierten Fläche, Reflexionsgrad ρ ist bekannt, lässt sich die Leuchtdichte L über die Beleuchtungsstärke E , wie nachfolgend in der Formel 2.4 dargestellt, berechnen [Bel09].

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi} \quad (2.4)$$

2. Stand von Wissenschaft und Technik

Die Beleuchtungsstärke E wird zur Überprüfung einer definierten Bezugsfläche genutzt. Diese Bezugsfläche orientiert sich in den meisten Fällen horizontal oder vertikal und dient als Indikator, wie schnell und fehlerfrei eine definierte Sehaufgabe erfüllt werden kann [Bel09] [Ros16].

Im Rahmen einer Studie zur Verringerung von Lichtemissionen bei Milchviehställen erfasste Swinkels [Swi10] unterschiedliche Leuchtdichten im Umfeld von Milchviehställen. Die aufgenommenen Messergebnisse lagen zwischen $0,8 \text{ cd/m}^2$ und $33,4 \text{ cd/m}^2$ und umfassen in Bezug auf das Sehvermögen des Menschen den oberen Bereich des mesopischen Sehens [Swi10].

Laut Schierz [Sch16] ist bei der Sehleistung zu beachten, dass diese in einem starken Maße von den Beleuchtungsbedingungen abhängig ist und sich im Allgemeinen aus einer Vielzahl elementarer Sehfunktionen, die Funktionen der Beleuchtung sind, zusammensetzt. Für die dominierende Rolle werden die Parameter Leuchtdichte des Sehobjekts, Leuchtdichte und Struktur des unmittelbaren Sehobjekt-Umfeldes, Adaptionsleuchtdichte (großes, fernes Umfeld), Sehgröße und -form, Darbietungsdauer, spektrale Zusammensetzung des Lichtes und der Körperfarben, Ort der Darbietung im Gesichtsfeld sowie der Bewegungsablauf benannt [Sch16].

2.2.3 Photopisches Sehen

Die $V(\lambda)$ -Kurve gilt für Gesichtsfelder, die kleiner gleich vier Grad sind [DIN5031-2], und stellt die Grundlage für die lichttechnische Messtechnik dar. Neben der spektralen Hellempfindlichkeit wird das photometrische Strahlungsäquivalent K_m eingeführt, um die Intensität, bezogen auf das menschliche Sehvermögen, zu beschreiben. Die Lichtstärkeinheit Candela, ist in der DIN-Norm [DIN5031-3] als „[...] Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ aussendet und deren Strahlungsstärke in dieser Richtung $1/683 \text{ Watt}$ durch Steradian beträgt [...]“, definiert und dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ für Tagessehen bei der Wellenlänge 555 nm zugeordnet. Die Werte für das photometrische Strahlungsäquivalent des Menschen werden für Tagessehen mit $K_m = 683 \text{ lm/W}$ angegeben [DIN5031-3].

Eine Hellempfindlichkeitskurve für Rinder oder ein zum Menschen vergleichbares photometrisches Strahlungsäquivalent sind nicht bekannt. Laut Schiller [Sch15] reichen die bekannten Sensitivitäten der einzelnen Zapfenpigmente allein nicht aus, um aus diesen auf die Empfindlichkeit des gesamten visuellen Systems zu schließen. Effekte wie die Vorverarbeitung der Zapfensignale durch die komplexe Verschaltung der Rezeptorschicht nachgelagerten Zellschichten werden nicht berücksichtigt [Sch15]. Die Bewertung des photopischen Sehens kann nur annähernd auf Basis der Sensitivitäten, Anzahl und Lage der unterschiedlichen Zapfentypen erfolgen. Untersuchungen durch Schiviz et al. [Sch08] zeigen, dass

2. Stand von Wissenschaft und Technik

der Anteil der S-Zapfen im Vergleich zu den M/L-Zapfen des Rindes bei circa 17 % liegt (Abbildung 2.2 und Abbildung 2.3). Die Ausrichtung unterscheidet sich deutlich von der des Menschen [Nic04]. In Abbildung 2.3 ist zu erkennen, dass eine hohe Dichte der Zapfen in einer temporal-dorsal bzw. temporal-superior L-Form vorzufinden ist. Zu begründen ist dies u. a. mit der langgezogenen Schädelform des Rindes sowie dem Effekt, dass Gefahren in der Peripherie, wie beispielsweise Fressfeinde auf horizontaler Ebene, schnell und eindeutig erkannt werden müssen [Hil15] [Gol15] [Sch08].

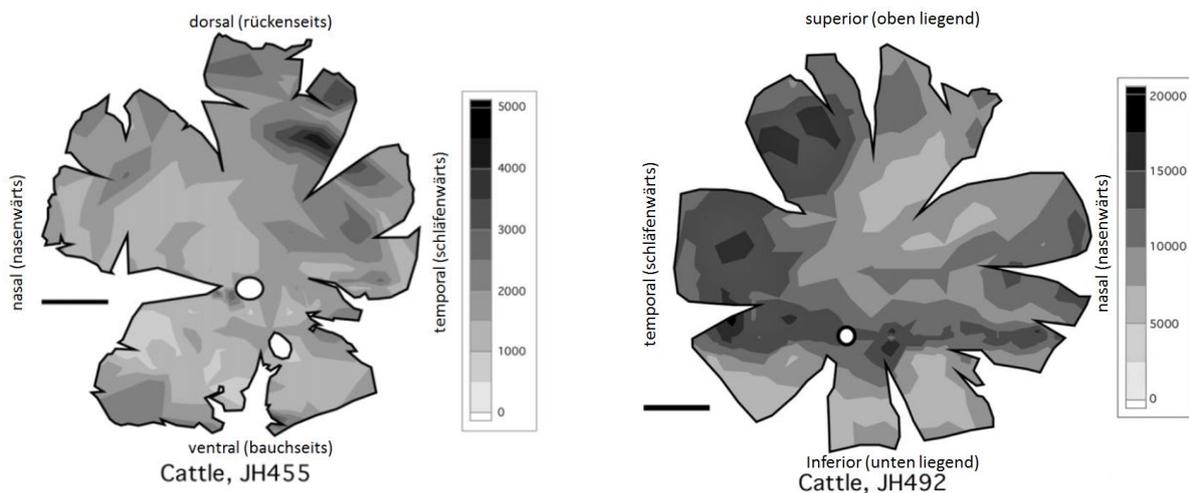


Abbildung 2.2 (links): Repräsentative Dichteverteilung des S-Zapfens Rind mit eingefügter Lage- und Richtungsbezeichnung [Bearbeitete Grafik auf Datengrundlage [Sch08]]

Abbildung 2.3 (rechts): Repräsentative Dichteverteilung des M/L-Zapfens Rind mit eingefügter Lage- und Richtungsbezeichnung [Bearbeitete Grafik auf Datengrundlage [Sch08]]

2.2.4 Skotopisches Sehen

Im Bereich des skotopischen Sehens gelten für den Menschen die Werte der $V'(\lambda)$ -Kurve [DIN5031-2] sowie das photometrische Strahlungsäquivalent für Nachtsehen, das für den Menschen mit $K'_m = 1.699 \text{ lm/W}$ angegeben wird [DIN5031-3]. In Bezug auf das Rind ist das skotopische Sehen zum größten Teil unerforscht. Besonders die Effekte des *tapetum lucidum*, mit dessen Hilfe sich Rinder bei geringer bzw. nächtlicher Beleuchtung deutlich besser als der Mensch orientieren können, sind weitgehend unbekannt [Erk14].

Eriksson [Erk14] untersuchte den Effekt von niedrigen Beleuchtungsstärken auf das Verhalten von zwölf laktierenden Versuchstieren. Hintergrund dieser Studie war, dass in Schweden eine reduzierte bzw. gedimmte Beleuchtung als Nachtbeleuchtung vorgeschrieben ist. Die Intensität der Nachtbeleuchtung wird aber nicht weiter beschrieben. Eriksson untersuchte hierzu in einem Parcours das Verhalten bei den Beleuchtungsstärken von 0 lx, 5 lx, 20 lx sowie 50 lx. 0 lx entsprach einem Wert von circa 0,2 lx und ist daher nicht mit völliger Dunkelheit gleichzusetzen. Neben dem Einfluss von „weißem

2. Stand von Wissenschaft und Technik

Licht“ wurde zusätzlich „rotes Licht“ in die Versuchsdurchführung einbezogen. Aufgenommen wurden unter anderem die Schrittfrequenzen der Rinder mittels Pedometer sowie die Zeit zum Zurücklegen der vorgegebenen Strecke. Die Ergebnisse zeigten, dass Objekte in einem nahen Abstand bei einer Beleuchtungsstärke von 0,2 lx unterschieden wurden. Weiterhin gibt es keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Beleuchtungsintensitäten von 5 lx, 20 lx sowie 50 lx. Vermutet wird, dass Effekte mit „weißer Beleuchtung“ erst bei unter 0,2 lx auftreten. Die Ergebnisse mit „roter Beleuchtung“ zeigten bei den Intensitäten von 5 lx, 20 lx sowie 50 lx nur eine leichte Verschlechterung in Form einer erhöhten Schrittfrequenz sowie erhöhten Zeiten zum Absolvieren des Parcours. Bei der minimalen „roten Beleuchtung“ von 0,2 lx zeigten sich im Vergleich zur „weißen Beleuchtung“ signifikante Unterschiede. Besonders die Zeit zum Erreichen des ersten Hindernisses verdoppelte sich unter roter Beleuchtung [Erk14].

In einer weiteren Studie untersuchten Muthuramalingam et al. [Mut06] die Werte des nächtlichen Melatoningehalts sowie des IGF-1-Wertes (engl.: *Insulin-like-growth-factor-I*), der eine hohe Ähnlichkeit zu Insulin aufweist. In der Untersuchung (n = 12 Versuchstiere) wurden der Einfluss der Beleuchtungsstärken 5 lx, 10 lx sowie 50 lx getestet. Die Ergebnisse zeigten, dass sich bei Werten von 5 lx und 10 lx die zuvor genannten Parameter nicht verändern. Bei 50 lx konnte ein deutlicher Anstieg des IGF-1-Wertes, der negativ mit dem Melatoningehalt korreliert, festgestellt werden. Als Empfehlung benennen Muthuramalingam et al. eine nächtliche Beleuchtungsintensität von unter 10 lx [Mut06].

2.2.5 Photometrische Kontrastbestimmung

Die Kontrastwahrnehmung gilt innerhalb der Beleuchtungstechnik als eine der wesentlichen Beurteilungsgrundlagen der visuellen Umwelt [Sch16]. Die visuelle Wahrnehmung kann nur durch die Registrierung der Objektgrenzen entstehen [Scz11]. Als photometrischer Kontrast wird der relative Leuchtdichteunterschied verstanden [Roe95]. Laut der DIN-Norm „Barrierefreies Bauen - Planungsgrundlagen - Teil 2: Wohnungen“ kann ein Leuchtdichtekontrast nicht durch einen Farbkontrast ersetzt werden [DIN18040-2].

Als photometrische Kontrastdefinitionen werden in der Literatur das Leuchtdichtekontrastverhältnis C_R , der Weber-Kontrast C_W sowie der Michelson-Kontrast C_M benannt [Sch16].

Das einfache Leuchtdichteverhältnis C_R (engl.: *ratio*; Formel 2.5) ist als Verhältnis der Leuchtdichte des Sehobjekts L_O zur Leuchtdichte des Umfeldes L_U angegeben [Sch16]:

$$C_R = \frac{L_O}{L_U} \quad (2.5)$$

2. Stand von Wissenschaft und Technik

Der Weber-Kontrast C_W (Formel 2.6) ist als ein Grundgesetz der klassischen Psychophysik zuzuordnen und im photopischen Bereich bei einer hohen Umfeldleuchtdichte gültig [Sch16]. In der Wahrnehmungsphysiologie gilt dieser als „gut angemessen“, da berücksichtigt wird, dass die Unterschiedswahrnehmungsschwellen mit der Reizstärke skalieren [Sch16]. Beschrieben wird diese Form der Kontrastbestimmung als „zweckmäßig“ für kleine Sehobjekte in einem großen Umfeld [Sch16]:

$$C_W = \frac{L_O - L_U}{L_U} \quad (2.6)$$

Der Michelson-Kontrast C_M (Formel 2.7) wird verwendet, wenn keine eindeutige Unterscheidung zwischen dem Sehobjekt und dem Umfeld möglich ist [Sch16]. In der Größenordnung variiert dieser zwischen -1 und 1. Durch das Vorzeichen wird beschrieben, ob es sich um einen Positivkontrast oder einen Negativkontrast handelt. Bei einem Positivkontrast wird ein helles Sehobjekt vor einem dunklen Umfeld detektiert. Ist die Leuchtdichte des Sehobjekts geringer als die des Umfelds, handelt es sich um einen Negativkontrast [DIN32975]. Da die hellen und dunklen Anteile des Sehreizes gleichberechtigt bewertet werden, eignet sich diese Form der Kontrastberechnung besonders für Gitterreize oder realistische Bilder [Bac16], [Sch16], [Kuk93]:

$$C_M = \frac{L_O - L_U}{L_O + L_U} \quad (2.7)$$

Die Umrechnung der drei zuvor genannten Kontrastmaße wird wie folgt beschrieben (Formel 2.8) [Sch16]:

$$C_W = C_R - 1 = 2 \cdot C_M / (1 - C_M) \quad (2.8)$$

Für die nachfolgenden Betrachtungen ist zu beachten, dass eine Vielzahl von Einflussparametern die Kontrastschwellen erhöhen kann und die Kontrastempfindlichkeit reduziert. Als wesentliche Einflussparameter beschreibt Schierz [Sch16] die Adaptionsleuchtdichte, die Objektgröße, die Darbietungsdauer und das Alter der Person [Sch16].

In der DIN-Norm „Barrierefreies Bauen - Planungsgrundlagen - Teil 2: Wohnungen“ [DIN18040-2] werden „[...] Leuchtdichtekontraste $K \geq 0,4$ zum Orientieren und Leiten und für Bodenmarkierungen sowie Leuchtdichtekontraste $K \geq 0,7$ für Warnungen und schriftliche Informationen [...]“ empfohlen. Die DIN-Norm „Gestaltung visueller Informationen im öffentlichen Raum zur barrierefreien Nutzung“ [DIN32975] empfiehlt weiterhin: „[...] Für die Kennzeichnung von Bedienelementen an Hilfs- und Notruffeinrichtungen, die Markierung von Hindernissen und Absperrungen sowie für die Darstellung von Informationen bestehend aus Schrift- und Bildzeichen, wie zum Beispiel Fahrpläne, Schilder oder Informationstafeln, ist ein Kontrast von mindestens 0,7 einzuhalten. Für Schwarz-Weiß-Darstellungen

2. Stand von Wissenschaft und Technik

sind Kontraste von mindestens 0,8 anzustreben. Zur Kennzeichnung von Bedienelementen, für Orientierungs- und Leitsysteme ohne Schrift- und Bildzeichen wie zum Beispiel Bodenmarkierungen sowie für Kennzeichnungen im Bodenbereich ist ein Kontrast von mindestens 0,4 einzuhalten. Die hellere der kontrastgebenden Flächen muss einen Reflexionsgrad von mindestens 0,5 aufweisen [...]“ [DIN32975].

2.3 Lichtwirkung auf physiologische Prozesse von Mensch und Rind

Die Lichtaufnahme von Mensch und Rind zur Steuerung physiologischer Prozesse erfolgt im wesentlichen Teil mittels der intrinsisch photosensitiven Ganglienzellen (engl.: *intrinsically photosensitive retinal ganglion cells* (ipRGC)) sowie über die Körperoberfläche [Pau11]. Licht, das von retinalen Ganglienzellen wahrgenommen wird, steuert die biologischen Rhythmen der Säugetiere. Der Schrittmacher bzw. die „innere Uhr“, die sich im Kerngebiet des Hirns (ventraler griech.: *Hypothalamus*, engl.: *Nucleus suprachiasmaticus* [SCN]) befindet, benutzt neuroendokrine sowie neuronale Mechanismen, um Zeitinformationen an Gewebe und Organe zu übertragen [Ber02] [Hat02] [Kal02]. Die Phasenlage wird bevorzugt durch das Hormon Melatonin gesteuert [Fau17] [Hat02]. Der Melatoninhaushalt wird in der Zirbeldrüse (Epiphyse, gr.: *he epíphysis*) bzw. im Pinealorgan (*Corpus pineale*, lat.: *pineae*) geregelt [Loe15] [Pau11]. Beeinflussend wirkt Melatonin verstärkt auf den Tag-Nacht-Rhythmus, die Fruchtbarkeit, das Wachstum, das Immunsystem sowie auf die Milchbildung [Arb16] [Loc12] [Kas08]. Schon geringe Lichtintensitäten beeinflussen die Melatoninausschüttung und wirken somit auf die biologischen Rhythmen [Fau17] [Lin85] [Wal13]. Im Jahr 2017 wurden die US-Forscher Jeffrey C. Hall, Michael Rosbash und Michael W. Young für ihre Forschungen zur Funktionsweise der biologischen Rhythmen als Fundament des Forschungsfeldes Chronobiologie mit dem Medizin-Nobelpreis ausgezeichnet [Ost17].

2.3.1 Biologische Rhythmen

Biologische Rhythmen werden als regelmäßig wiederkehrende Ereignisse, die endogene oder exogen bedingte Schwankungen physiologischer Parameter beinhalten, definiert. Die Periodendauer umfasst den Bereich von Millisekunden bei Nervenimpulsen bis hin zu mehreren Jahren bei Populationszyklen [Nel11] [Pal76]. Als Mikrorhythmen werden Periodendauern mit einer Länge von bis zu einer Stunde bezeichnet [Dri72]. Insgesamt werden in der Literatur vier Frequenzen besonders benannt. Diese korrelieren mit den geophysikalischen Zyklen des Tag-Nacht-Rhythmus (circadian), den der Jahreszeiten

2. Stand von Wissenschaft und Technik

(circannual), den der Gezeiten (circatidal) und den der Mondphasen (circalunar). Beeinflusst bzw. gesteuert werden diese durch endogene und exogene Faktoren [Hel04] [Hel13] [Moo85] [Nel11] [Pal76].

Bereits 1963 untersuchte Quay [Qua63] den circadianen Rhythmus bei Ratten. Im Fokus stand die Beeinflussung des circadianen Rhythmus durch Serotonin und der Photoperiode [Qua63]. Für den Bereich der Nutztierhaltung im Bereich Schwein können stellvertretend die Untersuchungen von Griffith et al. [Gri92] benannt werden, die den Effekt der Lichtintensität auf die Hormone Melatonin, Prolaktin, Adrenocorticotropin und Cortisol untersucht haben [Gri92].

Beim Einsatz von Lichtprogrammen in der Milchviehhaltung wird vor allem der circadiane Rhythmus beeinflusst [Pla12]. Dynamische Lichtprogramme, die eine ultradiane Rhythmik (Periodendauer kleiner 24 Stunden) oder eine infradiane Rhythmik (Periodendauer größer 24 Stunden) unterstützen, sind nicht bekannt. Als Beispiel eines circannualen Rhythmus ist zu benennen, dass Kälber, die von Frühjahr bis Herbst – im Intervall eines natürlichen Langtages – geboren werden, schneller die Fruchtbarkeit erreichen als Artgenossen, die in den Wintermonaten mit wenig natürlichem Tageslicht geboren werden [Rek99]. Eine weitere Studie zeigt, dass Rinder, die in den Wintermonaten kalben, eine längere Zeit zur Erlangung der Reproduktionsfähigkeit benötigen als Rinder, die in den Sommermonaten kalben. Von besonderer Bedeutung ist dies bei erstkalbenden Tieren sowie bei Rindern mit genetischer Veranlagung zu hohen Milchleistungen [Han83].

Umweltsignale wie zum Beispiel Umgebungstemperatur, Lärm, soziale Faktoren und restriktive Fütterung besitzen deutlich geringere Eigenschaften zur Synchronisation [Hel04] [Hel13]. Nach van Oosterhout et al. [vOo12] wirkt besonders kurzwelliges (blaues) Licht beeinflussend auf die Melatonin- und Blutwerte der Rinder. Langwelliges (rotes) Licht hingegen zeigte in Versuchen kaum eine Veränderung der Melatonin- und Blutwerte, sodass vermutet wird, dass langwelliges Licht nur äußerst gering auf die biologischen Rhythmen wirkt [vOo12].

2.3.2 Fertilität

Die Bezeichnung Fertilität umfasst die Thematik der Fruchtbarkeit des Rindes und ist in der landwirtschaftlichen Milchviehhaltung von größter Bedeutung [Mue58] [Eis09]. Unfruchtbarkeit zählt zu den häufigsten Abgangsursachen bei Milchkühen [Lan08] [Lan12b] [Mue11]. Liegt der Schnitt der Geburtenrate unter drei Kälbern pro Kuhleben, decken sich die entstehenden Vollkosten der Jungviehaufzucht nicht und es gibt Probleme mit einer qualitativ hochwertigen Nachzucht aus eigenem Bestand. Funktionsstörungen im Zusammenhang mit Unfruchtbarkeit sind meist auf multifaktorielle Erkrankungen zurückzuführen [Sal15]. Lotthammer [Lot99] benennt, dass die Fruchtbarkeit zu 20 % durch die

2. Stand von Wissenschaft und Technik

genetische Veranlagung und durch 80 % durch die Umweltfaktoren in der Haltung beeinflusst wird [Lot99].

Eise [Eis09] beschreibt, dass Lichtverhältnisse eine „übergeordnete Bedeutung für das Fruchtbarkeitsgeschehen“ besitzen. Schreiber [Sch53] konnte einen Zusammenhang zwischen einem Fenster/Boden-Quotienten und Fertilitätsstörungen nachweisen. Der Quotient, der das Verhältnis zwischen der Fenster- zur Bodenfläche beschreibt, sollte Aufschluss über den Tageslichtanteil in der Stallumgebung geben. Bei einem Quotienten von eins zu zwanzig wurde ein Anteil der nachgewiesenen Fertilitätsstörungen bei 11,2 % der Rinder nachgewiesen. Dieser stieg bei einem Quotienten von eins zu größer sechzig auf einen Anteil von 18,7 % an [Sch53]. Untersuchungen von Kordts et al. [Kor72] zeigen, dass die Konzeptionsrate der Kühe nach der ersten Besamung unter schlechten Lichtverhältnissen von etwa 2,5 W/m² und einer Beleuchtungsdauer von 18 Stunden bei einem Wert von 30 % lag. Unter „normalen“ Lichtbedingungen („normal“ in der Quelle nicht weiter spezifiziert) erreichte die Kontrollgruppe einen Wert von 65 Prozent. Bei einer Gruppe mit einem täglichen Auslauf von drei Stunden pro Tag stieg der Wert auf 69 % an [Kor72]. Zehle [Zeh82] beobachtete Tiergruppen bei unterschiedlichen Lichtprogrammen (120 lx und 60 lx sowie 14 Stunden und 12 Stunden Beleuchtungsdauer). Bei 120 lx und 14 Stunden Beleuchtungsdauer konnte eine verbesserte Fruchtbarkeit nachgewiesen werden. Im Weiteren führt er aus, dass der Lichttaglänge eine größere Bedeutung als der Lichtintensität zuzusprechen ist [Zeh82]. Steiger et al. [Ste76] empfehlen für die Milchviehhaltung eine Lichtintensität von 100 lx und eine zusammenhängende Beleuchtungsdauer von 14 bis 16 Stunden. Eine Dauerbeleuchtung wirkte in den durchgeführten Untersuchungen negativ auf den Besamungserfolg, die Dauer der Serviceperiode sowie die Länge der postpartalen Rastzeit [Ste76].

2.3.3 Melatonin

Melatonin wird als Hormon der Dunkelheit bezeichnet, da es zum Zeitpunkt der subjektiven Nacht in Maximalwerten vorliegt [Fau17] [Lin85]. Nach aktuellem Stand der Literatur wird Melatonin nicht für den Schlaferhalt benötigt, sondern ist nur an der Schlafinitiierung beteiligt. Es besitzt Eigenschaften, die das Immunsystem positiv beeinflussen und das Wachstum von Tumorzellen hemmen. Gemeinsam mit dem Hormon Serotonin (Wachhormon) regelt das Serotonin-Melatonin-System viele Funktionen wie zum Beispiel Stimmung, Angst, Schlaf-Wach-Rhythmus, Körpertemperatur und die Immunantwort. Bei Ratten konnte zudem der Bezug zu den milchsynthese- und milchejektionsabhängigen Hormonen Prolaktin und Oxytocin hergestellt werden [Fau17] [Kol07].

2. Stand von Wissenschaft und Technik

Die Produktion des Melatonins erfolgt in der Zirbeldrüse sowie in der Netzhaut. In der Netzhaut wird es für wichtige Funktionen wie beispielsweise die Kontrolle der Augenpigmentierung und die damit verbundene Regulierung der Lichtmenge, die die Photorezeptoren erreicht, benötigt. Im Weiteren wird das äußere Blatt der Netzhaut, das als retinale Pigmentepithel bezeichnet wird, durch das produzierte Melatonin vor oxidativen Schäden geschützt [Fau17].

Beim Menschen wurde 2001 durch Brainard et al. [Bra01] der Beweis für einen neuen und bis dahin unbekanntem „circadianen Photorezeptor“, der maßgeblich für die Regulierung des Melatonins verantwortlich ist, erbracht. Dieser Rezeptor enthält das Photopigment Melanopsin, welches in den Ganglienzellen, in der inneren Retina, vorhanden ist. In der Netzhaut sind etwa ein bis drei Prozent Ganglienzellen mit dieser Funktion zur Wahrnehmung nicht-visueller Informationen des Lichts zugewiesen. Das Absorptionsmaximum wurde im Bereich von 446 nm bis 477 nm ermittelt [Bra01] [Wes11]. Berson et al. [Ber02] beschreiben, dass die maximale Unterdrückung der Melatoninsynthese bei circa 480 nm liegt und von dem photopischen Bereich der Zapfen (550 nm) sowie von dem skotopischen Bereich der Stäbchen (505 nm) abweicht [Ber02]. Zusätzlich zeigen Studien, dass für die Unterdrückung der Melatoninsynthese neben dem Spektrum auch die Richtung, aus der die Strahlung auf die Retina fällt, entscheidend ist [Las99] [Vis99].

Durch die reflektierende Membran im Rinderauge (*tapetum lucidum*) wird das Nachtlicht derart verstärkt, dass bereits eine Beleuchtungsstärke von mehr als 5 lx ausreicht, um die Produktion des Melatonins zu hemmen [Mes14].

2.3.4 Bedeutung und Bildung von Vitamin A, Beta-Carotin, Vitamin D

Vitamin A wird oft mit Retinol gleichgesetzt. Es handelt sich aber nicht um ein einzelnes Vitamin, sondern um eine Stoffgruppe, zu der neben Retinol (Vitamin A1) auch beispielsweise Retinal, Retinsäure und Retinylpalmitat zählen. Es kann direkt durch den Verzehr von tierischen Lebensmitteln aufgenommen oder vom Körper aus Provitamin A (Beta-Carotin), welches in pflanzlichen Lebensmitteln enthalten ist, hergestellt werden, und ist von wesentlicher Bedeutung für den Sehvorgang. Zurückzuführen ist dies auf die Darstellung verschiedener Sehfärbstoffe, deren Vorstufe Vitamin A ist und daher für die Farbunterscheidung sowie die Hell- und Dunkelunterscheidung mitverantwortlich ist [Meh15] [Loc11] [Red08]. Liegt ein Mangel dieser Stoffgruppe vor, führt dies beim Menschen zu einem stark herabgesetzten Sehvermögen im Dämmerungsbereich (Nachtblindheit) [Roe95].

2. Stand von Wissenschaft und Technik

Laut Reichrath [Rei12] ist Vitamin D von erhöhter Bedeutung für den Knochen- und Kalziumstoffwechsel und sorgt für positive Effekte auf unter anderem Muskulatur, Herzkreislaufsystem und Infektionskrankheiten und zeigt projektive Wirkung gegen Autoimmunerkrankungen. Circa 90 bis 95 % des vom Organismus benötigten Vitamin D, welches Schutz vor Krebs und anderen Krankheiten bietet sowie wichtig für den Knochen- und Kalziumstoffwechsel ist, wird unter UV-B-Einwirkung gebildet [Rei12] [Kra14]. Özcelik et al. untersuchten die Auswirkungen von Tageslicht auf den Kalzium- und den Vitamin D-Status im Blut von Milchkühen im frühen Laktationsstadium. Die Versuchsgruppe, die täglich für neun Stunden Zugang zum Tageslicht erhielt, zeigte gegenüber der Kontrollgruppe, die in einem geschlossenen Stall ohne Tageslichteintrag gehalten wurde, einen erhöhte Kalzium- und Vitamin D-Status im Blut [Oez17].

2.3.5 Lichtprogramme in der landwirtschaftlichen Milchviehhaltung

Lichtprogramme nutzen die biologischen Effekte der unterschiedlichen Lichtwirkung eines Lang- oder Kurztages bzw. eines Sommer- oder Wintertages und werden in der Milchviehhaltung zur Steigerung der Milchproduktion eingesetzt [Mor08] [Rek99] [Wri13]. Vermehrt werden Beleuchtungsintervalle mit 16 Stunden Licht und 8 Stunden Dunkelheit (16:8, Langtag) bzw. 8 Stunden Licht und 16 Stunden Dunkelheit (8:16, Kurztag) und einer Beleuchtungsstärke von 150 lx umgesetzt. Ein 16:8 Rhythmus wird für die laktierenden Rinder, Färsen und Jungtiere sowie ein 8:16 Rhythmus bei den trockengestellten Rindern eingesetzt. Um einen Effekt zu erzielen, ist die Umsetzung beider Rhythmen notwendig [Auc05], wobei die erforderlichen bzw. natürlichen Rahmenbedingungen nur in den Wintermonaten gegeben sind [Voe14]. Bei der strikten Durchführung müssen laktierende und trockengestellte Rinder in unterschiedlichen Ställen gehalten werden. In den Sommermonaten wird zudem eine Verdunkelung der trockengestellten Rinder notwendig [ASAEEP344.3].

Die Vorteile des Einsatzes eines Lichtprogramms in der Milchviehhaltung werden in der Steigerung der Milchproduktion, bei der verbesserten Fruchtbarkeit der Herde, im schnelleren Wachstum der Färsen, in der Zunahme von magerem bzw. fettfreiem Gewebe sowie in der Steigerung der Gesundheit und Vitalität gesehen [Dah00] [Dah03b] [Wal05] [Zeh82]. Dahl et al. [Dah03a] beschreiben weiterhin, dass bei einem Lichtprogramm immer Lang- und Kurztage umzusetzen sind. Positive Effekte entfallen bei einem dauerhaft vorliegenden Langtag. Bei einer Ausdehnung der Langtage von 16:8 auf 18:6 beschreiben Dahl et al. [Dah12] eine weitere Steigerung der Milchleistung von 2 bis 3 kg pro Tag. Eine weitere Steigerung der Milchleistung konnte bei mehr als 18 Stunden Beleuchtung nicht nachgewiesen werden [Dah03a].

2.4 Anwendungsbereich landwirtschaftliche Milchviehhaltung

Der Anwendungsbereich der landwirtschaftlichen Milchviehhaltung stellt besondere Anforderungen an eine bedarfsorientierte Beleuchtung. Zum einen ist es der Arbeitsbereich des Landwirts, zum anderen der Lebensraum der Rinder. Die unterschiedlichen Bedürfnisse von Mensch und Rind sollten in einem bestmöglichen Kompromiss erfüllt werden. Durch die Besonderheiten der Stallumgebung, wie beispielsweise klimatische Bedingungen und eine erhöhte Schadgasbelastung, entstehen weitere Anforderungen, die eine bedarfsorientierte Beleuchtung stark beeinflussen.

2.4.1 Haltung und Haltungssysteme

Bei der Haltungsform erfolgt eine Unterteilung in Warmställe und Außenklimaställe. Durch das ursprüngliche Komforterleben des Menschen wurden Ställe traditionell in einer wärmeisolierten Variante gebaut [Ric06]. Arave und Albright beschreiben, dass Rinder in Wahlsituationen Außenklimaställe bevorzugen [Ara81]. Da in Warmställen der Keimdruck stark erhöht ist und Stoffwechselprozesse wie zum Beispiel die Produktion von Ammoniak schneller ablaufen, ist aus Sicht des Tierwohls ein Außenklimastall zu bevorzugen [Ric06]. Zudem ist bei Rindern, die als homöothermale Tiere gelten, eine gute Fähigkeit zur klimatischen Anpassung an niedrige Temperaturen gegeben [Sch09]. Yousef et al. [You68] untersuchten die Grenzen der thermoneutralen Zone, die in dem Bereich definiert wird, in dem die Körpertemperatur der Rinder ohne Anpassungsreaktion konstant bleibt, bei laktierenden und ad libitum gefütterten Rindern. Als Ergebnisse führt er die obere kritische Grenze für die Rassen Holstein mit $T_{\max} = 27 \text{ °C}$, Jersey mit $T_{\max} = 30 \text{ °C}$, Brown-Swiss mit $T_{\max} = 28 \text{ °C}$ und Brahman mit $T_{\max} = 35 \text{ °C}$ an [You68]. Aktuell wird für die obere Grenze der thermoneutralen Zone ein Temperatur-Luftfeuchtigkeitsindex THI (engl.: *temperature-humidity index*) von 72 angegeben [Arm94] [Gan11]. Der Wert 72 entspricht in etwa einer Lufttemperatur von $T = 24 \text{ °C}$ bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von $\phi = 60 \%$ [Arm94] [Sch09].

Die Haltungssysteme der Milchviehhaltung werden laut Auernhammer [Aue89] in drei verschiedene Systeme aufgeteilt, die sich stark in der Beziehung von Mensch zu Rind unterscheiden. Als erstes System ist der Anbindestall aufgeführt. In diesem ordnet sich das Rind ganz dem Menschen unter. Als Unterteilung werden Lang-, Mittellang- und Kurzstand benannt. In allen drei Varianten des Anbindestalls befindet sich das Rind fixiert an einer Stelle im Stall und kann hier stehen, liegen, fressen und trinken, allerdings nicht laufen. Kontakt zu Artgenossen ist nur seitlich zum jeweils nächsten Rind möglich. Im zweiten Haltungssystem, dem Laufstall, erhält das Rind individuelle Freiheiten. Der Liegebe-

2. Stand von Wissenschaft und Technik

reich des Laufstalls kann mit Fressliegeboxen, Liegeboxen oder Liegeflächen gestaltet sein. Die Liegefläche kann zusätzlich als Tiefstreu oder Tretmist ausgeführt werden. Im dritten System ist der Transportstall zu nennen, in dem das Rind isoliert und ausschließlich in fahrbaren Paletten bewegt wird [Aue89]. Da diese Haltungsform nicht tiergerecht und in Deutschland nicht mehr vorzufinden ist, entfallen weitere Betrachtungen.

Laut Batz [Bat90] etablierte sich in den letzten Jahren als Standardverfahren das System des Liegeboxenlaufstalls. Ein großer Vorteil dieses Stallsystems ist, dass die Rinder die meisten Freiheiten erhalten und entscheiden können, auf welchem Liegeplatz sie ruhen sowie wann und wo sie fressen möchten. In Bezug auf das Komfortverhalten der Rinder werden die haltungstechnischen Details, besonders im Bereich der Liegeflächengestaltung, ständig weiterentwickelt, um die Stallumgebung so bestmöglich an das typische Verhalten über den Tagesverlauf hin anzupassen [Bat90].

Im Tiefstreulaufstall sind die Funktionsbereiche „Laufen“ (FB „Laufen“) und „Liegen“ (FB „Liegen“) kombiniert. Die Basis besteht aus einer Mistmatratze, die mit frischem Einstreumaterial aufgefüllt wird. Ein Vorteil dieser Haltungsvariante ist, dass durch die Ausführungen in Tretmist oder Tiefstreu im Vergleich zu konventionellen Boxenlaufställen Integumentschäden oder Lahmheiten, je nach Ausführung der Liegeboxengestaltung, reduziert werden. Als Nachteile sind der hohe Platzbedarf, der Einstreubedarf, der hohe Arbeitsaufwand, ein erhöhtes Klauenwachstum, hygienische Probleme am Euter, erhöhte Temperaturen im Sommer sowie der fehlende Schutz vor Auseinandersetzungen zu nennen. Bei Tiefstreuställen kommt der Vorteil einer komfortableren Liegefläche und das unbehinderte Aufstehen und Abliegen sowie die Vielfalt der Liegepositionen hinzu. Im Tretmiststall überwiegen ein im Vergleich zum Tiefstreustall reduzierter Einstreu- und Platzbedarf sowie das Wegfallen des Ausmistens. Durch die hohen Managementanforderungen und die zuvor genannten Vor- und Nachteile ist diese Haltungsform gängig, aber nicht als Standardverfahren verbreitet [Nie07].

Rinder sind sozial lebende Tiere, die ständigen Kontakt zu Artgenossen suchen. Für die tiergerechte Haltung ist eine Gruppenhaltung notwendig, sodass der Kontakt zu Artgenossen geschaffen und die Möglichkeit zum Ausleben des Spiel- und Sozialverhaltens gegeben ist. Weitere Vorteile einer Gruppenhaltung sind mehr Bewegungsfreiheit, eine mögliche automatische Fütterung, die Arbeitszeiterparnis sowie saubere Rinder im Vergleich zur Einzeltierhaltung [Ges03].

2.4.2 Schadgasbelastung und Schutzart

Je nach Art und Gegebenheit des Stalls können unterschiedlich hohe Schadgas- und Staubbelastungen in der Stallumgebung vorliegen. Als Quellen des Stallstaubs sind die Rinder selbst, Futter, Fäkalien und

2. Stand von Wissenschaft und Technik

im Stall vorhandenes oder einzubringendes Einstreumaterial zu nennen. Als maßgebliche Einflussfaktoren auf die Staubkonzentration gelten Lüftung, Fütterung, Management in Form von Tätigkeiten der Mitarbeiter im Stall und die Tieraktivitäten [Bue12] [Cam10] [Pea95] [See02].

Der IP-Code (engl.: *Ingress Protection*) beschreibt den Schutz gegen Eindringen von Fremdkörpern in ein Gehäuse. Die Angaben zur Schutzart werden durch die DIN EN Norm bzw. die gleichlautende VDE-Vorschrift „Schutzart durch Gehäuse (IP-Code)“ geregelt [DIN60529]. Beschrieben werden der Schutzgrad gegen Eindringen von festen Fremdkörpern (Tabelle 2.1) sowie der Schutzgrad gegen Eindringen von Wasser als „flüssiger“ Fremdkörper (Tabelle 2.2). Eine Beschreibung gegen Eindringen von Schadgasen bzw. „gasförmigen Fremdkörpern“ findet in der DIN-Norm bzw. VDE-Vorschrift nicht statt [DIN60529].

Tabelle 2.1: Schutzart durch ein Gehäuse – IP-Code erste Kennziffer [DIN60529]

Erste Ziffer	Bedeutung für den Schutz des Betriebsmittels	Bedeutung für den Schutz von Personen
	Gegen Eindringen von festen Fremdkörpern	Gegen Zugang zu gefährlichen Teilen
0	(nicht geschützt)	(nicht geschützt)
1	≥ 50 mm Durchmesser	Handrücken
2	≥ 12,5 mm Durchmesser	Finger
3	≥ 2,5 mm Durchmesser	Werkzeug
4	≥ 1,0 mm Durchmesser	Draht
5	Staubgeschützt	Draht
6	Staubdicht	Draht

Tabelle 2.2: Schutzart durch ein Gehäuse – IP-Code zweite Kennziffer [DIN60529]

Erste Ziffer	Bedeutung für den Schutz des Betriebsmittels - Gegen Eindringen von Wasser mit schädlichen Wirkungen	Erste Ziffer	Bedeutung für den Schutz des Betriebsmittels - Gegen Eindringen von Wasser mit schädlichen Wirkungen
0	(nicht geschützt)	5	Strahlwasser
1	senkrecht Tropfen	6	Starkes Strahlwasser
2	Tropfen (15° Neigung)	7	Zeitweiliges Untertauchen
3	Sprühwasser	8	Dauerndes Untertauchen
4	Spritzwasser	9	Hochdruck und hohe Strahlwassertemperatur

2. Stand von Wissenschaft und Technik

Die Thematik Schadgasbelastung gilt in der Stallumgebung einer landwirtschaftlichen Nutztierhaltung als besondere Herausforderung. Gesundheitsgefährdungen für Mensch und Rind, sinkende Milchleistungen und dauerhafte Schädigungen an der Bausubstanz, der Stalleinrichtung sowie den Installationskomponenten, wie beispielsweise den Leuchten, lassen sich auf Schadgasbelastungen zurückführen [Zen12]. Laut Zenter [Zen12] zählen zu den wichtigsten Schad-Fremdgasen in der Stallluft Ammoniak (NH_3), Kohlendioxid (CO_2) und Schwefelwasserstoff (H_2S). Maximale Konzentrationen werden in der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung mit 20 ppm NH_3 , 2.000 ppm CO_2 und 5 ppm H_2S für die Haltung von Kälbern angegeben. Erhöhte Konzentrationen können tödliche Auswirkungen für Mensch und Rind hervorrufen. Beeinflusst werden die Konzentrationen durch die Haltungsform sowie durch das Aufrühren und Ablassen, die Lagerung bzw. Abfuhr und Ablauf des Flüssig- oder Festdunges. Zusätzlich gilt, dass mit sinkender Luftrate, steigender Lufttemperatur und erhöhter Luftfeuchte die Konzentration der Schadgase ansteigt [TierSchNutzV] [Zen12].

Ergebnisse einer Studie, die eine einjährige Messreihe in einem freibelüfteten und zweigeteilten Milchviehstall mit den vergleichenden Haltungsformen „Spaltenboden“ und „planbefestigte Laufflächen“ umfasst, zeigen, dass unter Einbeziehung der Emissionen aus dem Flüssigmistlager und bei geringer Intensität des Flüssigmist-Homogenisierens im Jahresmittel die geringsten Methan (CH_4)- und Ammoniak (NH_3)-Emissionen mit $324,9 \text{ g} \pm 123,6 \text{ g CH}_4$ und $29,8 \text{ g} \pm 13,1 \text{ g NH}_3$ pro Großvieheinheit (GVE) und Tag vorlagen. Bei intensivem Homogenisieren erhöhten sich die Emissionsraten um 17 % CH_4 und um 29 % NH_3 [Sch13].

Können Schadgase dauerhaft in eine LED-Leuchte eindringen, sind chemische Unverträglichkeiten zu erwarten, die im direkten Einfluss zur Lebensdauererwartung des Leuchtmittels stehen. Die Ursache ist, dass die Vielzahl der LEDs über Silikonbeschichtungen oder Silikonlinsen verfügen. Die ausgehärteten Silikone werden durch Porosität in Form von schwachen Bindungen sowie Hohlräumen geprägt und sind sehr anfällig für die Diffusion von Gasmolekülen. Diffundieren Sauerstoff, Halogene, Schwefelverbindungen und flüchtige organische Verbindungen (VOCs, engl.: *volatile organic compounds*) durch das Silikon und lagern sich in diesem ab, kommt es zur Verfärbung oder Trübung, was von einer Degradation, bis hin zum Ausfall und einem irreparablen Ausfall des gesamten LED-Chips führen kann (Abbildung 2.4 und Abbildung 2.5) [Cre18] [Vos15].

2. Stand von Wissenschaft und Technik

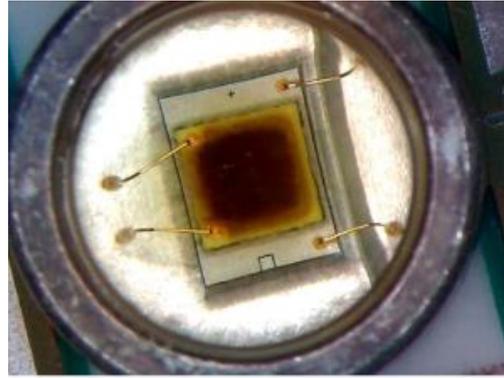
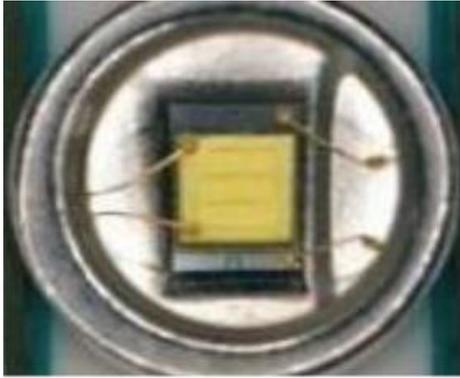


Abbildung 2.4 (links): Beispiel einer normalen (nicht VOC degradierten) LED [Cre18]

Abbildung 2.5 (rechts): Beispiel einer VOC degradierten LED [Cre18]

Neben dem Einfluss der Schadgase aus der Stallluft sollte bei einer Stallleuchte weiterführend auf die Verwendung von kompatiblen Chemikalien und Materialien geachtet werden. Bei der Verwendung von inkompatiblen Stoffen wie beispielsweise falschen Klebstoffen, Flussmitteln, Dichtungen, Schutzlacken oder Vergussmaterialien können die zuvor genannten Probleme mit Verfärbung, Trübung und Zerstörung des LED-Chips durch unumkehrbare Erosion, Risse oder sonstige Oberflächenschäden auftreten. Erkennbar sind diese durch eine Reduzierung des emittierten Lichtstroms sowie einer Veränderung der Chromatizität, die die Farbtiefe bzw. Brillanz beschreibt [Sch14] [Vos15]. Um Effekten einer chemischen Inkompatibilität vorzubeugen, sind die von den LED-Herstellern veröffentlichten Tabellen und Listen mit auf chemische Kompatibilität getesteten Stoffen und Materialien zu berücksichtigen und zusätzlich durch Langzeitversuche sowie Extremtests zu validieren. Exemplarisch sind für die zu berücksichtigten Dokumente der „*Application Brief 32*“ von LUMILEDS oder das „*Support Document Cree XLamp LEDs Chemical Compatibility*“ zu nennen [Cre18] [Lum16].

2.5 Gesetzliche Anforderungen und normative Empfehlungen

Rechtlich nach § 3 (3) der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung [TierSchNutzV] müssen Ställe „[...] mit Vorrichtungen ausgestattet sein, die jederzeit eine zur Inaugenscheinnahme der Tiere ausreichende Beleuchtung und einen Zugriff auf alle Nutztiere durch die mit der Fütterung und Pflege betrauten Personen ermöglichen [...]“. Für Kälber, definiert als Hausrind im Alter von bis zu sechs Monaten, wird im weiteren Verlauf unter § 6 (3) beschrieben: Ställe müssen „[...] mit Lichtöffnungen und mit einer Kunstlichtanlage ausgestattet sein, die sicherstellen, dass bei einer möglichst gleichmäßigen Verteilung im Aufenthaltsbereich der Kälber eine Lichtstärke von mindestens 80 lx erreicht wird [...]“.

2. Stand von Wissenschaft und Technik

Normativ werden in der DIN-Norm „Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen“ [DIN12464-1] für die Bereiche der Sehaufgabe bzw. Bereiche der Tätigkeiten (Bedürfnisse des Menschen) 200 lx für das Beschicken und Bedienen von Fördereinrichtungen und Maschinen, für Ställe für kranke Tiere, Abkalbeställe, die Futteraufbereitung, Milchräume und der Gerätereinigung empfohlen. Für Viehställe allgemein werden 50 lx empfohlen. Die empfohlene Gleichmäßigkeit U_0 , die als Verhältnis der minimalen Beleuchtungsstärke zur mittleren Beleuchtungsstärke definiert und im Verlauf der Arbeit mit der Gleichmäßigkeit g_1 gleichzusetzen ist, liegt in den Bereichen zwischen $U_0 = 0,40$ und $U_0 = 0,60$. Für die Farbwiedergabe werden Werte zwischen $R_a = 40$ (Viehställe allgemein) und $R_a = 80$ (Ställe für kranke Tiere, Abkalbeställe) empfohlen [DIN12464-1].

In den Technischen Regeln der Arbeitsstätten [ASRA3.4] werden unter den Punkten 5.1 bis 5.3 für Beschicken und Bedienen von Fördereinrichtungen und Maschinen, Behandlungsstände für Tiere und Melkstände jeweils 200 lx als Mindestwert an mittlerer Beleuchtungsstärke und $R_a = 80$ als Mindestwert des Farbwiedergabeindex gefordert.

3. Material und Methoden zur Konzeptionierung einer bedarfsorientierten Leuchte

Der Stand von Wissenschaft und Technik stellt die Grundlagen zur Beantwortung der ersten Fragestellung „Welche Anforderungen werden an eine bedarfsorientierte Leuchte in der landwirtschaftlichen Milchviehhaltung gestellt?“ dar. Dieser Stand soll nun um die Bedürfnisse des Landwirts, die per Befragungsaktion ermittelt wurden, erweitert werden. Für die Konzeptionierung der Leuchte bedeutet dies, dass neben den bereits aufgeführten Anforderungen und Qualitätsmerkmalen aus dem Stand der Wissenschaft und Technik zusätzliche Kundenbedürfnisse in definierte und messbare Größen umzusetzen sind.

3.1 Ermittlung der Kundenbedürfnisse

Zur Ermittlung der Kundenbedürfnisse wurde eine quantitative und bundesweite Erhebung unter dem Titel „Zukunftsorientierter Landwirt - Optimierung der Beleuchtung in der Milchviehhaltung“ durchgeführt. Die Erhebung erfolgte mittels Fragebögen (Anhang I). Die Verteilung wurde in digitaler Form als ausfüllbares pdf-Dokument über die Landwirtschaftskammern (bundesweit), den Bundesverband Deutscher Milchviehhalter e.V. (BDM), Kontakte der FH Bielefeld und der LfL Tier und Technik sowie über private Kontakte vorgenommen. Die Umfrage wurde am 27.11.2014 gestartet und endete mit 155 ausgefüllten Fragebögen am 28.02.2015. Eine kurze Erprobungs- und Pilotierungsphase, die Rückschlüsse auf die Verständlichkeit der Fragen sowie auf den Sprachgebrauch der Zielgruppe Landwirte abzielte, wurde vorab durchgeführt und fließt nicht in die nachfolgende Bewertung ein.

Als Qualitätsmerkmal und zur Überprüfung der Aussagekraft einer empirischen Studie wird der Stichprobenfehler (Formel 3.1) herangezogen [Mos12]:

$$n \geq \frac{N}{1 + \frac{(N-1) \cdot \varepsilon^2}{z^2 \cdot P \cdot Q}} \quad (3.1)$$

Als Grundgesamtheit N wird der Wert 76.469 angenommen. Dieser Wert entspricht laut dem statistischen Bundesamt [Sta15] der Anzahl an Haltungen für Rinder in der Bundesrepublik Deutschland zum Zeitpunkt der Befragungsaktion (Stand November 2014; Bestände werden halbjährlich im November und Mai erfasst). Bei der Annahme, dass es sich um eine Befragung handelt, dessen Ergebnisse einer Normalverteilung unterliegen, beschreibt z den aus der zentralen Wahrscheinlichkeit der Standardnor-

3. Material und Methoden zur Konzeptionierung einer bedarfsorientierten Leuchte

malverteilung berechneten Wert der gewählten Sicherheitswahrscheinlichkeit. Dieser ist bei einer Sicherheit von 90 % mit 1,6449 und bei 95 % mit 1,96 in Statistiktabelle angegeben [Lip11]. Die Variable P entspricht dem tatsächlichen Mittelwert der Grundgesamtheit und liegt im Wertebereich von 0 bis 1. Die Variable Q berechnet sich durch die Subtraktion aus dem Minuenden 1 und dem Subtrahenden P. Da Q direkt von P abhängig ist und der maximale Wert des Produkts für den ungünstigsten Fall 0,25 ergibt, sind jeweils die Werte 0,5 für P und Q zu wählen. Die Variable ϵ beziffert den gewählten und tolerierten Fehler, der beispielweise mit 5 % ($\rightarrow \epsilon = 0,05$) angenommen werden kann [Mos12] [Lip11].

Um den Stichprobenfehler der Befragung zu berechnen, wurde die Berechnungsformel zur Bestimmung des minimalen Stichprobenumfangs nach dem Stichprobenfehler ϵ umgestellt. Für die Unterscheidung des Stichprobenfehlers bei den verschiedenen Sicherheiten von 90 % sowie 95 % wurden der Index 90 (Formel 3.2) sowie der Index 95 (Formel 3.3) eingeführt:

$$\epsilon_{90} = \sqrt{\frac{N \cdot z^2 \cdot P \cdot Q}{n \cdot (N - 1)}} = \sqrt{\frac{76.469 \cdot 1,6449^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{155 \cdot (76.469 - 1)}} \approx 6,6\% \quad (3.2)$$

$$\epsilon_{95} = \sqrt{\frac{N \cdot z^2 \cdot P \cdot Q}{n \cdot (N - 1)}} = \sqrt{\frac{76.469 \cdot 1,96^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{155 \cdot (76.469 - 1)}} \approx 7,9\% \quad (3.3)$$

Da diese Arbeit sich schwerpunktmäßig auf die Optimierung der Stallbeleuchtung zur Verbesserung der Tiergesundheit und hin zu einer positiven Verhaltensänderung bezieht, werden im weiteren Verlauf nur rückgemeldete Fragebögen bewertet, die folgende Kriterien erfüllen:

- Tierhalter sind an der Optimierung ihrer Stallbeleuchtung zur Verbesserung des Tierwohls interessiert (89,7 % aller Befragten),
- bewirtschaften die Stallsysteme Liegeboxenlaufstall, Fressliegeboxenstall sowie Tiefstreulaufstall (91,6 % aller Befragten) und
- halten mindestens 50 Rinder (78,1 % aller Befragten).

Die Grenze mit einer minimalen Betriebsgröße von 50 Rindern wird gewählt, da erfahrungsgemäß bei kleineren Haltungen die Thematik der Beleuchtung kaum auf Interesse stößt und keine Beachtung findet. Oftmals werden nur maximal ein bis zwei konventionelle Leuchten in den betreffenden Betrieben zur Illumination eingesetzt.

Durch die eingefügten Auswahlkriterien reduziert sich die Anzahl des Stichprobenumfangs auf 98 Fragebögen. Für die Berechnung der Stichprobenfehler wird eine Grundgesamtheit von 28.364 angenommen. Diese Zahl entspricht den milchviehhaltenden Betrieben mit mindestens 50 Rindern. Da der Anteil dieser Betriebe mit einer Anbindehaltung nicht bekannt ist und nicht sicher geschätzt werden kann,

3. Material und Methoden zur Konzeptionierung einer bedarfsorientierten Leuchte

wird der Wert von 28.364 als Grundgesamtheit angenommen, um den größtmöglichen Fehler zu erhalten (Formel 3.4 und Formel 3.5).

$$\varepsilon_{90} = \sqrt{\frac{N \cdot z^2 \cdot P \cdot Q}{n \cdot (N - 1)}} = \sqrt{\frac{28.364 \cdot 1,6449^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{98 \cdot (28.364 - 1)}} \approx 8,3 \% \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_{95} = \sqrt{\frac{N \cdot z^2 \cdot P \cdot Q}{n \cdot (N - 1)}} = \sqrt{\frac{28.364 \cdot 1,96^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{98 \cdot (28.364 - 1)}} \approx 9,9\% \quad (3.5)$$

Neben dem Stichprobenfehler soll als zweites Qualitätsmerkmal die Verteilung bzw. die Herkunft der Fragebögen betrachtet werden. Insgesamt wurden im Rahmen der gesamten Befragungsaktion aus elf der sechzehn deutschen Bundesländern Fragebögen zurückgesandt. In den übrigen fünf Bundesländern (Berlin, Hamburg, Saarland, Sachsen und Thüringen) befanden sich zum Zeitpunkt der Erhebung 2.288 milchviehhaltende Betriebe, die mit einem Anteil von knapp drei Prozent zum Gesamtbestand beitragen [Sta15]. Zur vereinfachten Darstellung erfolgt eine Einteilung in die Region Süd (Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz und Saarland), die Region Nordwest (Bremen, Hamburg, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Schleswig-Holstein) sowie die Region Nordost (Berlin, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen) (Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Regionale Zuordnung aller zurückgemeldeten Fragebögen

Region	Anteil der zurückgemeldeten Fragebögen	Anteil der Haltungen am Gesamtbestand der Haltung
Süd	73,4 %	64,8 %
Nordwest	23,4 %	29,6 %
Nordost	3,2 %	5,6 %

Durch die zuvor eingefügten Auswahlkriterien verändert sich die Verteilung nicht wesentlich. Die Verhältnisse der Fragebögen zu Haltungen am Gesamtbestand mit den eingefügten Auswahlkriterien kann der nachfolgenden Tabelle 3.2 entnommen werden.

Tabelle 3.2: Regionale Zuordnung der rückgemeldeten Fragebögen nach eingefügten Auswahlkriterien

Region	Anteil der zurückgemeldeten Fragebögen	Anteil der Haltungen am Gesamtbestand der Haltung
Süd	63,3 %	64,8 %
Nordwest	32,6 %	29,6 %
Nordost	4,1 %	5,6 %

3. Material und Methoden zur Konzeptionierung einer bedarfsorientierten Leuchte

Angepasst an die Zielgruppe des Landwirts wurden vermehrt geschlossene Fragen mit vorgegebenen Einschätzungen bzw. Bewertungsmöglichkeiten gestellt. Als Beispiel ist die Beleuchtung im eigenen Milchviehstall von sehr gut bis ungenügend einzuschätzen. Da es sich bei der Einteilung der Antwortmöglichkeiten um eine nicht metrische Skaleneinteilung in Form einer Ordinalskala handelt, können zur statistischen Auswertung nur die Bildung der Häufigkeiten, Quantile sowie die Größen Median (x_{Med}) und Modus (x_{Mod}) verwendet werden [Aue15]. Zur weiteren Auswertung wird im Folgenden unterstellt, dass die Abstände zwischen den einzelnen Zuordnungen gleichartig sind. Mit dieser Annahme und der Zuordnung von sehr gut = 1 bis ungenügend = 6 kann die zusätzliche Angabe des arithmetischen Mittelwertes (\bar{x}) erfolgen. Zur Beurteilung der Streubreite werden zudem die Minimal- sowie Maximalwerte (Min. und Max.) angegeben.

Aus den 98 zurückgesandten Fragebögen konnten auf die Frage „Sind Sie an der Optimierung Ihrer Stallbeleuchtung zur Verbesserung des Tierwohls interessiert? Falls ja, warum?“ folgende Nennungen (N_{abs} entspricht Anzahl der Nennungen absolut und N_{rel} entspricht Anzahl der Nennungen relativ) entnommen werden (Mehrfachnennungen waren zulässig; Tabelle 3.3)

Tabelle 3.3: Statistische Auswertung (Häufigkeit) der Frage bezüglich der Motivation zur Optimierung der Stallbeleuchtung

	Steigerung der Energieeffizienz	Optimierung des Tierwohls	Steigerung der Milchleistung	Verbesserung der Arbeitsbedingungen
N_{abs}	80	78	64	51
N_{rel}	81,6 %	79,6 %	65,3 %	52,0 %

Auf die Fragen „Wie beurteilen Sie die Beleuchtung in Ihrem Milchviehstall?“ und „Wie beurteilen Sie die Beleuchtung in Ihrem Melkstand?“ gaben die Befragten folgende Rückmeldungen (sehr gut = 1 bis ungenügend = 6; Tabelle 3.4).

Tabelle 3.4: Statistische Auswertung (Häufigkeit und Verteilung) der Frage zur Einschätzung der eigenen Beleuchtung

	N	\bar{x}	x_{Med}	x_{Mod}	Min.	Max.
Milchviehstall	97	3,0	3	(2 & 3)*	1	5
Melkstand	94	2,5	2	2	1	5

* Die Werte „2“ und „3“ treten in der gleichen maximalen Häufigkeit auf (kein Modus vorhanden)

Um die Wichtigkeit der einzelnen Parameter zu erfassen, wurde die Frage „Wie wichtig ist Ihnen in der Beleuchtung Helligkeit, Lichtfarbe, Energieeffizienz, Wartungsfreundlichkeit, lange Lebensdauer sowie schnelle Einschaltzeit?“ gestellt? Die Bewertung wurde wie folgt vorgenommen (Tabelle 3.5).

3. Material und Methoden zur Konzeptionierung einer bedarfsorientierten Leuchte

Tabelle 3.5: Statistische Auswertung (Häufigkeit und Verteilung) der Frage zur Bedeutung der Helligkeit, Lichtfarbe, Energieeffizienz, Wartungsfreundlichkeit, langen Lebensdauer sowie einer schnellen Einschaltzeit

	N	\bar{x}	X_{Med}	X_{Mod}	Min.	Max.
Helligkeit	98	1,4	1	1	1	3
Lichtfarbe	98	2,4	2	2	1	5
Energieeffizienz	98	1,4	1	1	1	4
Wartungsfreundlichkeit	98	1,6	1	1	1	3
Lange Lebensdauer	98	1,3	1	1	1	3
Schnelle Einschaltzeit	98	2,3	2	2	1	5

In der Übersicht ist gut zu erkennen, dass sich zwei Gruppen bilden. Helligkeit, Energieeffizienz sowie eine lange Lebensdauer werden wichtiger als die Wartungsfreundlichkeit, Lichtfarbe und eine schnelle Einschaltzeit gesehen. Um die Erwartungen in Bezug auf eine lange Lebensdauer, die als wichtigster Parameter bewertet wurde, quantifizieren zu können, wurden die Erwartungen an die Lebensdauer der Leuchtmittel, der Leuchte/Armaturn sowie die erwartete Mindestgarantiedauer abgefragt. Alle Angaben beziehen sich auf das Zeitintervall Jahr (Tabelle 3.6).

Tabelle 3.6: Statistische Auswertung (Häufigkeit und Verteilung) der Frage zur Erwartung an Lebens- und Mindestgarantiedauer

	N	\bar{x}	X_{Med}	X_{Mod}	Min.	Max.
Lebensdauer Leuchtmittel [Jahre]	92	9,6	10	10	2	50
Lebensdauer Leuchte [Jahre]	93	19,3	20	20	3	50
Mindestgarantiedauer Leuchte [Jahre]	91	5,5	5	5	1	15

Da die Lebensdauer einer Leuchte maßgeblich von den Betriebs- bzw. Einsatzstunden beeinflusst wird, wurde die Frage „Wie viele Stunden am Tag sollten die jeweiligen Arbeitsbereiche beleuchtet werden?“ mit folgenden Ergebnissen eingefügt (Tabelle 3.7).

3. Material und Methoden zur Konzeptionierung einer bedarfsorientierten Leuchte

Tabelle 3.7: Statistische Auswertung (Häufigkeit und Verteilung) der Frage zu den durchschnittlichen Beleuchtungsstunden

	Durchschnittliche Beleuchtungsstunden pro Tag im Monat Juni [Stunden]				Durchschnittliche Beleuchtungsstunden pro Tag im Monat Dezember [Stunden]			
	N	\bar{x}	x_{Med}	x_{Mod}	N	\bar{x}	x_{Med}	x_{Mod}
Laufbereich	69	3,3	2	0	73	9,2	2	6
Liegebereich	65	3,7	3	0	71	9,5	8	6
Jungviehbereich	66	3,4	2,5	0	72	8,8	8	8
Melkstand	61	1,7	1	0	66	5,7	5,5	6
Büroräume	72	4,0	4	4	73	5,0	5	4
Futtertisch	55	1,4	1	2	57	2,8	1	2

Am zweitwichtigsten ist den Landwirten nach der langen Lebensdauer die Energieeffizienz. Da für eine energieeffiziente Beleuchtung, die zum Beispiel Tageslichtanteile erkennt und entsprechend nutzt, eine dimmbare Leuchte wesentliche Vorteile bringt, wurde der Wunsch nach einer dimmbaren Leuchte mit „Wünschen Sie sich eine dimmbare Leuchte?“ erfragt (Tabelle 3.8).

Tabelle 3.8: Statistische Auswertung (Häufigkeit) der Frage zum Wunsch einer dimmbaren Leuchte

	ja	nein	k. A.
N_{abs}	17	79	2
N_{rel}	17,4 %	80,6 %	2,0 %

Zu erkennen ist, dass sich zwar viele Landwirte eine energieeffiziente Beleuchtung wünschen, aber nur 17 % der Befragten den Wunsch nach einer dimmbaren Leuchte äußern. Auf die Frage „Wünschen Sie sich eine Nachtbeleuchtung für a) Ihr Milchvieh und b) die Tier- und Stallkontrolle?“ antworteten die Befragten wie folgt (Tabelle 3.9).

Tabelle 3.9: Statistische Auswertung (Häufigkeit) der Frage zum Wunsch der Nachtbeleuchtung

	Nachtbeleuchtung für Milchvieh			Nachtbeleuchtung zur Tier- und Stallkontrolle		
	ja	nein	k. A.	ja	nein	k. A.
N_{abs}	88	7	3	71	16	11
N_{rel}	89,8 %	7,1 %	3,1 %	72,5 %	16,3 %	11,2 %

Da im landwirtschaftlichen Bereich derzeit erste Systeme zur Lichtsteuerung eingesetzt werden, wurde die Akzeptanz der Technik für die einzelnen Bereiche mit der Frage „Wie sollte das Licht in den jeweiligen Arbeitsbereichen geschaltet werden?“ erfasst. Die Antworten fielen wie folgt aus (Tabelle 3.10):

Tabelle 3.10: Statistische Auswertung (Häufigkeit und Verteilung) der Frage zum Wunsch der Lichtsteuerung

	Lichtschalter		Zeitschaltuhr / Dämmerungs- schalter		Integrierte Steuerung		keine Angabe	
	N _{abs}	N _{rel}	N _{abs}	N _{rel}	N _{abs}	N _{rel}	N _{abs}	N _{rel}
Futtertisch	31	31,6 %	56	57,1 %	8	8,2 %	3	3,0 %
Laufbereich	18	18,4 %	61	62,2 %	13	13,3 %	6	6,1 %
Liegebereich	20	20,4 %	59	60,2 %	15	15,3 %	4	4,1 %
Jungviehbereich	57	58,2 %	29	29,6 %	3	3,1 %	12	12,3 %
Melkstand	93	94,9 %	3	3,1 %	0	0,0 %	2	2,0 %
Büroräume	92	93,9 %	2	2,0 %	0	0,0 %	4	4,1 %

3.2 Anforderungen an eine bedarfsorientierte Leuchte

Aus dem Stand von Wissenschaft und Technik sowie aus den ermittelten Kundenbedürfnissen kann eine Vielzahl an Anforderungen abgeleitet werden. Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage „Welche Anforderungen werden an eine bedarfsorientierte Leuchte in der landwirtschaftlichen Milchviehhaltung gestellt?“ werden im Verlauf die wichtigsten Anforderungen nochmals kurz zusammengefasst und in zwei Prioritätsstufen eingeteilt.

Priorität 1:

Als erste und wichtigste Anforderung an eine bedarfsorientierte Leuchte ist das passende Lichtspektrum zu definieren. Dieses sollte sich am Sehvermögen des Menschen und an dem Sehvermögen des Rindes orientieren. Als relevante Bereiche des Lichtspektrums sind die beschriebenen maximalen Sensitivitäten des Menschen (565 nm, 535 nm und 430 nm), der Rinder (554 nm und 445 nm) sowie die maximale Unterdrückung der Melatoninsynthese (480 nm) zu berücksichtigen (siehe Kapitel 2.3.3 Melatonin). Die Maxima im spektralen Verlauf sollten in den Bereichen von 565 nm bis 535 nm sowie von 430 nm bis 480 nm liegen. Zur Erzeugung dieses Lichtspektrums sollten blaue *Mid-* oder *High-Power-LEDs*, die mit einem Lumineszenzfarbstoff überzogen sind, verwendet werden. Durch die Verwendung des Leuchtstoffs wird ein Teil der kurzwelligeren Strahlung in langwellige Strahlung umgewandelt und wirkt je nach Art und Anteil des Leuchtstoffs als blau-weißes bis rötlich-weißes Licht [Spe16]. Die Verwendung einer RGB-Mischung, die auf roten, grünen und blauen LEDs basiert, kann nicht empfohlen werden, da diese Spektren im Vergleich zu LEDs mit Lumineszenzfarbstoffen schmalbandiger sind und nur geringe Teile des Spektrums abdecken, was eine verschlechterte Farbwiedergabe bedeuten würde.

3. Material und Methoden zur Konzeptionierung einer bedarfsorientierten Leuchte

Als erste Näherung zur Auswahl geeigneter LEDs kann auf die Herstellerangabe der „Peak-Wellenlänge“ verwiesen werden. Diese Angabe beschreibt, an welcher Stelle die maximale Intensität des Spektrums vorliegt (energetische Betrachtung). Eine detailliertere Beschreibung zum gesamten Farbeindruck des Spektrums ($V(\lambda)$ bewertet), liefert die Angabe der dominanten Wellenlänge.

Für die Farbwahrnehmung (Farbart) sollte ein emittierendes Licht in der Lichtfarbengruppe tageslichtweiß (über 5.300 K [Ros16]) gewählt werden. Zu beachten ist, dass die Auswahl als Kompromiss zwischen Mensch und Rind erfolgen muss. Höhere Farbtemperaturen können wie beschrieben besser durch das Rind wahrgenommen werden (siehe Kapitel 2.1.2. Sehvermögen des Rindes). Auf den Menschen, dessen Arbeitsstätte der Stall ist, bei dem die Aspekte der Arbeitssicherheit und des Arbeitskomforts einen wichtigen Stellenwert einnehmen, können zu hohe Farbtemperaturen ein Gefühl des Unwohlseins auslösen. Bei den Rindern ist zu beachten, dass, wie beschrieben, besonders die kurzwellige Strahlung des sichtbaren Lichtspektrums auf die physiologischen Prozesse wirkt (siehe Kapitel 2.3 Lichtwirkung auf physiologische Prozesse von Mensch und Rind).

Energieeffizienz, Helligkeit und eine lange Lebensdauer sind wie zuvor in 3.1. Ermittlung der Kundenbedürfnisse beschrieben die wichtigsten Qualitätsmerkmale für den Landwirt (Tabelle 3.5). Die Ergebnisse eines durchgeführten Wettbewerbsvergleichs für Stalleuchten im Rahmen des Forschungsvorhabens I_LED_Milchvieh zeigen, dass die meisten Produkte mit einer Effizienz von $\eta > 75 \text{ lm/W}$, einem Lichtstrom $\phi > 10.000 \text{ lm}$ und einer Lebensdauer von 50.000 Stunden angeboten werden. Eine genaue Angabe zur Lebensdauerdefinition mit Nennung der zugehörigen L- und B-Werte (zur Erläuterung der L- und B-Werte siehe Kapitel 5.4.1 Wartungsfaktor und Wartungsplanmethode) erfolgt oftmals [Mar18]. Eine Empfehlung zum emittierenden Gesamtlichtstrom sowie zur Effizienz der Leuchte kann nur annäherungsweise abgegeben werden. Je nach Installationsumgebung, vorgegebener Lichtpunkthöhe und verwendeter Optik werden unterschiedliche Intensitäten benötigt. Als Anforderung wird definiert, dass die zu entwickelnde Leuchte über eine Effizienz von $\eta > 75 \text{ lm/W}$, eine Lebensdauer von $L_{80} B_{10} = 50.000$ Stunden und einem Lichtstrom $\Phi > 10.000 \text{ lm}$ verfügt.

Sollte es zu einem Teil- oder Totalausfall der Leuchte kommen, nimmt der Aspekt der Wartungsfreundlichkeiten einen hohen Stellenwert ein. In Bezug auf die Nachhaltigkeit können beim Bau einer Stalleuchte zwei verschiedene Ansätze verfolgt werden. Der erste Ansatz besteht darin, die Leuchte in einer modularen und nachhaltigen Variante auszuführen. Alle Einzelkomponenten, wie beispielsweise LED, Vorschaltgerät, Optik, Dichtung und Abdeckung, können bei einem Fehlerfall erneuert oder instandgesetzt werden. Vorteil dieses Ansatzes ist, dass nur eine Komponente und nicht die ganze Leuchte bei Ausfall erneuert werden muss. Bauteile mit unterschiedlichen Erwartungen an die Lebensdauer können über den gesamten Lebenszyklus ressourcensparend betrieben werden. Weiterhin kann

3. Material und Methoden zur Konzeptionierung einer bedarfsorientierten Leuchte

die Leuchte im Falle der Entsorgung leicht recycelt werden. Als zweite Variante kann ein Ansatz verfolgt werden, der eine in sich geschlossene und vergossene Leuchte beinhaltet. Der Vorteil ist, dass diese Variante vermutlich kostengünstiger und ohne Rücksicht auf die Wartungsfreundlichkeit, wie beispielsweise der Verzicht auf eine Vorrichtung zur werkzeuglosen Öffnung, hergestellt werden kann. Probleme bei der Ersatzteilverfügbarkeit oder der Kompatibilität alter und neuer Bauteilstandards entstehen nicht. Defekte oder Störungen muss kein externes Fachpersonal beheben. Der Landwirt könnte selbstständig die Leuchte tauschen, wenn diese zusätzlich über einen vorkonfektionierten Anschluss per Schutzkontaktstecker verfügt. Ein weiterer Vorteil ist, dass nur an einer Abzweigdose bzw. am Abgang in der Elektroverteilung oder der Ansteuerung die BGV A3 (Berufsgenossenschaftlichen Vorschriften) bzw. DGUV-Vorschrift 3 (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung) Prüfung durchgeführt und nicht wie bei einer zu öffnenden Leuchte die Prüfung in der Leuchte vollzogen werden muss. Da aber eine zukünftig gesicherte und wettbewerbsfähige Milchproduktion nur unter Berücksichtigung aller relevanten Produktionsfaktoren möglich ist, kann der schonende Umgang mit beschränkten Ressourcen, wie beispielsweise Energie und Material, wettbewerbsentscheidend werden. Vor diesem Hintergrund wird für den Bau einer Stallleuchte das Konzept des modularen und wartungsfreundlichen Aufbaus empfohlen. Da die Lebens- und Nutzungsdauer einer Stallleuchte maßgeblich von Betrieb und der Einsatzumgebung beeinflusst wird, erfolgen die weiteren Betrachtungen im Verlauf der Arbeit im Bereich der Konzeptionierung und Validierung des bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts (Kapitel 5).

Priorität 2:

Eine gute Farbwiedergabe ermöglicht dem Rind die qualitative Bewertung des Futters und das Erkennen der Sozialpartner, dem Menschen, die Gestaltung des Liege- und Fressplatzes sowie die Bewertung der Tiergesundheit (siehe Kapitel 2.1 Lichtwahrnehmung von Mensch und Rind). Um ein gutes Farbsehen von Mensch und Rind zu ermöglichen, müssen zum einen eine ausreichende Helligkeit und zum anderen ein Lichtspektrum mit einem möglichst hohen Farbwiedergabeindex vorhanden sein. Zur Bewertung der Tiergesundheit sind beispielsweise besonders geringe Farbabweichungen zu den Testfarben R_9 (Rot gesättigt) und R_{13} Rosa (Hautfarbe) entscheidend. Für eine gute Beleuchtung und zur Bewertung der Tiergesundheit wird, angelehnt an den Ergebnissen des BMWi geförderten IGF Vorhabens - Grundlagen der Normung für ein Performance Quality Label für LED-Leuchten, eine Farbwiedergabe von mindestens $R_a = 86$ mit dem Zusatz, dass der Farbwiedergabewert R_9 (Rot gesättigt) größer 45 sowie der Farbwiedergabewert R_{13} (Rosa) mindestens 80 beträgt, empfohlen [Sch14].

Rinder können wie zuvor beschrieben etwa 40 bis 60 Reize pro Sekunde unterscheiden (siehe Kapitel 2.1.2 Sehvermögen des Rindes). Zur Vermeidung einer visuellen Beeinträchtigung, die durch Flackern,

3. Material und Methoden zur Konzeptionierung einer bedarfsorientierten Leuchte

blendendes Licht oder einer Überanstrengung der Augen entstehen kann [Pus10], sollte die Frequenz der Vorschalt elektronik bei einem Wert von f viel größer als 60 Hz liegen.

Die Haltungsumgebung stellt weitere Anforderungen an die Entwicklung einer bedarfsorientierten Leuchte. Aus Sicht des Tierwohls sowie als wirtschaftlicher Vorteil sollte ein Außenklimastall bevorzugt werden (siehe Kapitel 2.4.1 Haltung und Haltungssysteme). Die Einsatztemperatur der Leuchte orientiert sich an den im Stallbereich vorherrschenden Temperaturen. Zu beachten ist, dass sich bei einem schlecht gedämmten Stall die Temperatur im Winter unterhalb des Gefrierpunkts und im Sommer auf Werte von bis zu $T_{\max} = 75\text{ °C}$ erhöhen kann [Zen12]. Die Komponenten der Leuchte, wie beispielsweise die Vorschalt elektronik, sollten somit für einen Temperaturbereich von $T_{\min} = 0\text{ °C}$ bis $T_{\max} = 75\text{ °C}$ ausgelegt sein. Um Kondensat in der Leuchte zu vermeiden, sollte eine „atmungsaktive Membran“ eingesetzt werden. Als Herausforderung wird gesehen, dass die Membran zum Ausgleich des Luftdrucks beitragen muss, aber fein genug in der Struktur sein sollte, um keine Schadgase in die Leuchte zu lassen.

3. Material und Methoden zur Konzeptionierung einer bedarfsorientierten Leuchte

Nachfolgend werden die Bedürfnisse und Qualitätsmerkmale in der Tabelle 3.11 kurz dargestellt.

Tabelle 3.11: Gegenüberstellung der Bedürfnisse und Qualitätsmerkmale mit den daraus abgeleiteten Anforderungen einer bedarfsorientierten Leuchte für Mensch und Rind

Bedürfnisse und Qualitätsmerkmale	Abgeleitete Anforderungen
Priorität 1	
<ul style="list-style-type: none"> • Mensch: Maximale Sensitivitäten der Zapfen Mensch (565 nm, 535 nm und 430 nm) • Rind: Maximale Sensitivitäten der Zapfen Rind (554 nm und 445 nm), Maximale Unterdrückung der Melatoninsynthese (480 nm) 	<ul style="list-style-type: none"> • Maximale Intensität im spektralen Verlauf bei 565 nm bis 535 nm sowie bei 430 nm bis 480 nm
<ul style="list-style-type: none"> • Mensch: Arbeitssicherheit und -komfort sowie Wohlbefinden am Arbeitsplatz • Rind: Biologische Wirksamkeit des Lichts und verbessertes Sehvermögen im kurzwelligen Bereich 	<ul style="list-style-type: none"> • Lichtfarbgruppe tageslichtweiß (Farbtemperatur T_{CP} über 5.300 K)
<ul style="list-style-type: none"> • Mensch: 200 lx für u. a. Beschicken und Bedienen von Fördereinrichtungen sowie für Ställe mit kranken Tieren, Wettbewerbsvorteil durch eine wirtschaftliche und nachhaltige Lösung • Rind: Mindestens 100 lx für positive Aspekte in Bezug auf die Fertilität und Tiergesundheit 	<ul style="list-style-type: none"> • Gesamtlichtstrom (Leuchte) $\phi > 10.000 \text{ lm}$ • Effizienz (Leuchte) $\eta > 75 \text{ lm/W}$ • Modularaufgebaute und langlebige Leuchte
Priorität 2	
<ul style="list-style-type: none"> • Mensch: Gutes Farbsehvermögen zur qualitativen Gestaltung des Liege- und Fressplatzes sowie zur Bewertung der Tiergesundheit • Rind: Gutes Farbsehvermögen zur qualitativen Bewertung des Futters und zum Erkennen der Sozialpartner 	<ul style="list-style-type: none"> • Farbwiedergabeindex $R_a = 86$ mit dem Zusatz, dass der Farbwiedergabewert R_9 (Rot gesättigt) größer 45 ist und der R_{13} (Rosa) mindestens 80 beträgt, Farbwiedergabewert
<ul style="list-style-type: none"> • Mensch: 50 Bilder pro Sekunde werden als fließende Bewegung wahrgenommen • Rind: Unterscheidung von 40 Reizen pro Sekunde bis 60 Reizen pro Sekunde 	<ul style="list-style-type: none"> • Frequenz der Vorschaltel Elektronik $f \gg 60 \text{ Hz}$
<ul style="list-style-type: none"> • Mensch: Haltungsumgebung Außenklimastall 	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz der Leuchte im Temperaturbereich von $T_{min} = 0 \text{ °C}$ bis $T_{max} = 75 \text{ °C}$
<ul style="list-style-type: none"> • Mensch: Reinigung der Stallumgebung mit Spitzwasser, Staubemissionen durch Einbringung von Futter und Einstreumaterial • Rind: Staub- und Schadgasemissionen durch Bewegung in der Stallumgebung 	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendung einer atmungsaktiven Membran, chemisch-kompatiblen Stoffen und Materialien • Konstruktion mit einer IP-Schutzart von mindestens IP 64

4. Entwicklung und Verifizierung der bedarfsorientierten Leuchte

Die Entwicklung der bedarfsorientierten Leuchte sowie die Verifizierung konnten im Rahmen des Forschungsvorhabens „Intelligente LED-Leuchte für die Funktionsbereiche „Fressen“, „Liegen“ und „Laufen“ in der Milchviehhaltung (I_LED_Milchvieh)“ durchgeführt werden. Die messtechnische Überprüfung sowie die praktischen Untersuchungen erfolgten im lichttechnischen Laborbereich der Fachhochschule Bielefeld sowie in der Stallumgebung des Versuchs- und Bildungszentrums Landwirtschaft Haus Düsse. Unter der Projektleitung von Prof. Dr.-Ing. Eva Schwenzfeier-Hellkamp und dem Teilprojektleiter Prof. Dr. sc. agr. habil. Klaus Reiter wurde das Forschungsvorhaben I_LED_Milchvieh in der Laufzeit vom 01.08.2014 bis 31.07.2017 aus dem Zweckvermögen des Bundes bei der Landwirtschaftlichen Rentenbank gefördert. Nach erfolgreicher Durchführung und auf Empfehlung der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung konnte das Konsortium bestehend aus der Fachhochschule Bielefeld, Forschungsschwerpunkt Intelligente Technische EnergieSysteme (FSP ITES), der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft - Institut für Landtechnik und Tierhaltung (LfL Tier und Technik), der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Technische Elektronik, dem Versuchs- und Bildungszentrum Landwirtschaft Haus Düsse (VBZL Haus Düsse) sowie dem Projekt- und Industriepartner DeLaval International AB im direkten Anschluss eine zweijährige Anschlussförderung des Vorhabens I_LED_Milchvieh_II erhalten. Das Ziel des Vorhabens ist, die im Vorhaben I_LED_Milchvieh_I entwickelte Demonstrationsleuchte bis zur Erlangung der Marktreife weiterzuentwickeln.

4.1 Vorstellung der Demonstrationsleuchte

Um auf die Bedürfnisse von Mensch und Rind einzugehen, wurden zwei unterschiedliche LED-Typen verwendet. Die Hauptbeleuchtung, primär auf die Bedürfnisse des Menschen abgestimmt und als „*Farmer White*“ bezeichnet, wurde im ersten Schritt mit weißen LEDs des Typs LUXEON R Emitters / LXA7-PW50 realisiert. Laut Datenblatt wird der Wert der ähnlichsten Farbtemperatur T_N bei 700 mA, was der in der Leuchte umgesetzten maximalen Stromstärke entspricht, mit 5.000 K angegeben. Für die Farbwiedergabe werden ein Mindestwert von $R_a = 70$ und ein typischer Wert von $R_a = 75$ benannt. Der Lichtstrom einer Einzel-LED wird laut Datenblatt bei 700 mA mit 220 lm angegeben. Für die Effizienz einer einzelnen LED wird im Datenblatt die Angabe 112 lm/W bei 700 mA aufgeführt. [Lum15].

In der entwickelten Demonstrationsleuchte wurden insgesamt drei Platinen mit jeweils dreizehn weißen LEDs sowie eine vierte LED-Platine mit drei weißen und zehn blauen LEDs installiert (Abbildung 4.1). Die zehn blauen LEDs stellen den zweiten LED-Typ dar und sind in Verwendung mit den drei weißen LEDs auf der vierten LED-Platine als „*Cow White*“ bezeichnet. Die Mischung der weißen und

4. Entwicklung und Verifizierung der bedarfsorientierten Leuchte

blauen LEDs soll zum einen das Sehvermögen der Rinder, gezielt im Bereich der S-Zapfen, unterstützen, und zum anderen die Unterdrückung des Hormons Melatonin positiv beeinflussen. Ausgewählt wurden *Royal Blue* LEDs des Typs LUXEON Rebel ES Colors / LXML-PR02-1100, die laut Datenblatt des Herstellers bei 700 mA eine minimale radiometrische Leistung von 1.100 mW und eine typische radiometrische Leistung von 1.120 mW aufweisen [Lum17].

Angaben zur Lebensdauer der LEDs (zum Beispiel $L_{80 B_{10}}$; siehe Kapitel 5.4.1 Wartungsfaktor und Wartungsplanmethode) werden in den Datenblättern der ausgewählten LUMILEDs nicht aufgeführt [Lum15] [Lum16] [Lum17]. Für die Lichtstromdegradation ist bei einem Betrieb mit einer Stromstärke von $I = 700 \text{ mA}$ und einer Sperrschichttemperatur $T_J = 125 \text{ °C}$ (maximale Angabe) für die weißen LEDs ein relativer Lichtstrom (Bezugsgröße Lichtstrom bei identischer Bestromung und einer Sperrschichttemperatur $T_J = 85 \text{ °C}$) von circa 92 % angegeben [Lum15]. Für die blauen LEDs wird bei einer Bestromung von $I = 350 \text{ mA}$ und bei einer Sperrschichttemperatur $T_J = 125 \text{ °C}$ ein relativer Lichtstrom von knapp 90 % angegeben [Lum17].

Das Vorschaltgerät zur Ansteuerung der „weißen“ LED-Platine („*Farmer White*“) wurde mit dem Produkt HLG-80H-C700B des Herstellers MeanWell realisiert. Dieser spezielle LED-Konstantstromtreiber versorgt die „weiße“ LED-Platine mit einem konstanten Betriebsstrom von 700 mA, verfügt über eine 1-10 V Schnittstelle zur Dimmung und ist für die Schutzart IP 67 / IP 65 ausgelegt. Die typische Lebensdauer des LED-Treibers wird vom Hersteller mit > 62.000 Stunden angegeben. Für den Betrieb ist eine Umgebungstemperatur von $T_{\min} = -40 \text{ °C}$ bis $T_{\max} = 80 \text{ °C}$ benannt [Mea18]. Zur Ansteuerung der „blauen“ LED-Platine wurde ein LED-Treiber des Typs Lumotech L05049 gewählt. Als Vorwiderstand und zur Einstellung der Bestromung wurde ein $1,8 \text{ k}\Omega$ Widerstand verwendet. Bei dieser Auswahl wurden die blauen LEDs mit einem konstanten Strom von maximal 350 mA versorgt. Die Verwendung des Vorwiderstandes wurde notwendig, da schon die Bestromung mit 350 mA ausreichende Anteile des kurzwelligen Spektrums (Blauanteile) emittierte.

4. Entwicklung und Verifizierung der bedarfsorientierten Leuchte

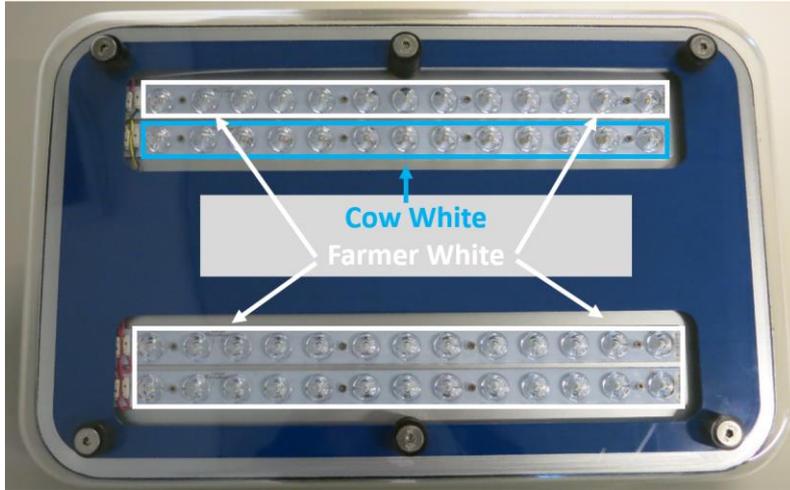


Abbildung 4.1 (links): Frontansicht der Demonstrationsleuchte mit den hervorgehobenen LED-Bereichen „Cow White“ und „Farmer White“ LEDs [eigene Darstellung]

Abbildung 4.2 (rechts): Rückwärtige Ansicht der Demonstrationsleuchte [eigene Darstellung]

In Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 ist der Entwicklungsstand der Demonstrationsleuchte zum Zeitpunkt der Pilotserie zu erkennen. Dieser Entwicklungsstand beinhaltete 15 gefertigte Demonstrationsleuchten. 14 dieser Leuchten wurden in der Versuchsumgebung, dem Liegeboxenlaufstall des VBZL Haus Düsse, installiert (siehe Kapitel 5. Anforderungen eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind). Eine Leuchte verblieb zu Testzwecken in der lichttechnischen Laborumgebung der Fachhochschule Bielefeld.

Gegenüber dem allerersten Labormuster wurden die LED-Treiber aus thermischen Gründen verlagert. Statt wie ursprünglich im Leuchtenkopf platziert, wurde hierfür eigens ein Leuchtensockel zur Unterbringung der LED-Treiber entwickelt. Weiterhin wurde der Kühlkörper aus Aluminiumstrangguss, statt wie ursprünglich aus Aluminiumdruckguss, hergestellt. Ein blaues Hintergrundblech, in den Unternehmensfarben des Industriepartners DeLaval wurde aus designtechnischen Aspekten eingefügt und die Verschraubungen am gesamten Leuchtengehäuse wurden in einem ersten Schritt überarbeitet.

4. Entwicklung und Verifizierung der bedarfsorientierten Leuchte

4.2 Lichttechnische Vermessung und Prüfung der Demonstrationsleuchte im Laborbereich

Zur Überprüfung der photo- und farbmtrischen Eigenschaften wurde die Demonstrationsleuchte mit einem Integrationsmesssystem des Herstellers LabSphere sowie mit einem Nahfeldgoniometer des Herstellers Radiant Zemax in den lichttechnischen Laboren der Fachhochschule Bielefeld vermessen. Alle Messungen wurden nach der thermischen Stabilisation der Demonstrationsleuchte, die nach circa 45 Minuten erreicht wurde, durchgeführt. Die Abweichung des Lichtstroms, als Vergleichsgröße der beiden unterschiedlichen Messmethoden, betrug bei voller Intensität knapp zehn Prozent.

4.2.1 Vermessung mit der Integrationskugel

Das verwendete Lichtmesssystem, welches im weiteren Verlauf vereinfacht als Integrationskugel, Ulbricht-Kugel oder kurz U-Kugel bezeichnet wird, besteht aus der Ulbricht-Kugel, einem Spektrometer, Software, Hilfs- und Kalibrierlampe sowie weitere für die optische Anwendung spezifische Module. Es ermöglicht die normgerechte Bestimmung der photometrischen und radiometrischen Parameter Gesamtlichtstrom (Watt/nm), Photometrischer Lichtstrom (Lumen), Lichtausbeute (Lumen/Watt), Strahlungsfluss (Watt), Farbmaßzahlen (x , y , u , v), T_N , R_a sowie der Zentral- und Hauptwellenlänge [Lab17].

Der Kugeldurchmesser der LMS-760 Integrationskugel beträgt 76 Zoll bzw. 1.930 mm und ist für Leuchten mit einer Leuchtmittellänge von bis zu 1.300 mm ausgelegt. Zur Lichtverteilung wird die Innenbeschichtung *Spectrafect*, eine Beschichtung auf Bariumsulfatbasis, verwendet. Im Weiteren ist das Messsystem für eine maximale Leuchtmittelleistung von 5.000 W und für Messungen mit einem minimalen Leuchtmittellichtstrom von 6 lm ausgelegt. Das CDS-600 Spektrometer misst mit einer einstellbaren Integrationszeit von 8 ms bis 30 s im Wellenlängenbereich von 200 nm bis 850 nm. Der Detektor des Typs Sony ILX511 *linear silicon CCD array* besitzt eine Auslösung von 2.048 Pixel und ist für den Messbereich von 200 nm bis 1.100 nm geeignet. Als Software wird das Programm LightMetrX verwendet. Für die durchgeführten 4π -Messungen wurde zusätzlich ein eigens hergestellter weißer, universell einsetzbarer und hängender Messtisch verwendet [Lab17].

Zur Feinjustierung der adaptiven Farbmischung bzw. der Intensitäten zwischen der weißen Hauptbeleuchtung („*Farmer White*“, nachfolgend vereinfacht als „weiß“ bezeichnet) und der blau/weißen Beleuchtung („*Cow White*“, nachfolgend vereinfacht als „blau“ bezeichnet) wurden beide Vorschaltgeräte separat über eine 1-10 V Schnittstelle angesteuert. Insgesamt wurden 25 Messungen durchgeführt, indem die Ansteuerungen der „weißen“ und der „blauen“ Beleuchtung jeweils kombiniert in Schritten von 2,5 V angesteuert wurden (Tabelle 4.1).

4. Entwicklung und Verifizierung der bedarfsorientierten Leuchte

Tabelle 4.1: Übersicht der durchgeführten Messreihen mit der Demonstrationsleuchte in der Integrationskugel der FH Bielefeld

Messreihe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ansteuerung „weiß“ [V]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Ansteuerung „blau“ [V]	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0

Messreihe	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ansteuerung „weiß“ [V]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Ansteuerung „blau“ [V]	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0

Messreihe	21	22	23	24	25
Ansteuerung „weiß“ [V]	10,0	10,0	10,0	10,0	1
Ansteuerung „blau“ [V]	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0

Bei der Betrachtung der vier „Extremeinstellungen“, in denen „weiß“ und „blau“ jeweils in den Kombinationen mit „0 V“ und „10 V“ angesteuert werden, ist deutlich zu erkennen, dass die maximale spektrale Intensität im Bereich um 450 nm liegt (Abbildung 4.3). Dies lässt vermuten, dass die spektralen Intensitäten der unterschiedlichen LED-Chips, des blauen und des weißen, im ähnlichen Bereich liegen und zu einem *Peak* „verschmelzen“. Eine Differenzierung bzw. Unterscheidung anhand der *Peaks* ist entsprechend nicht möglich.

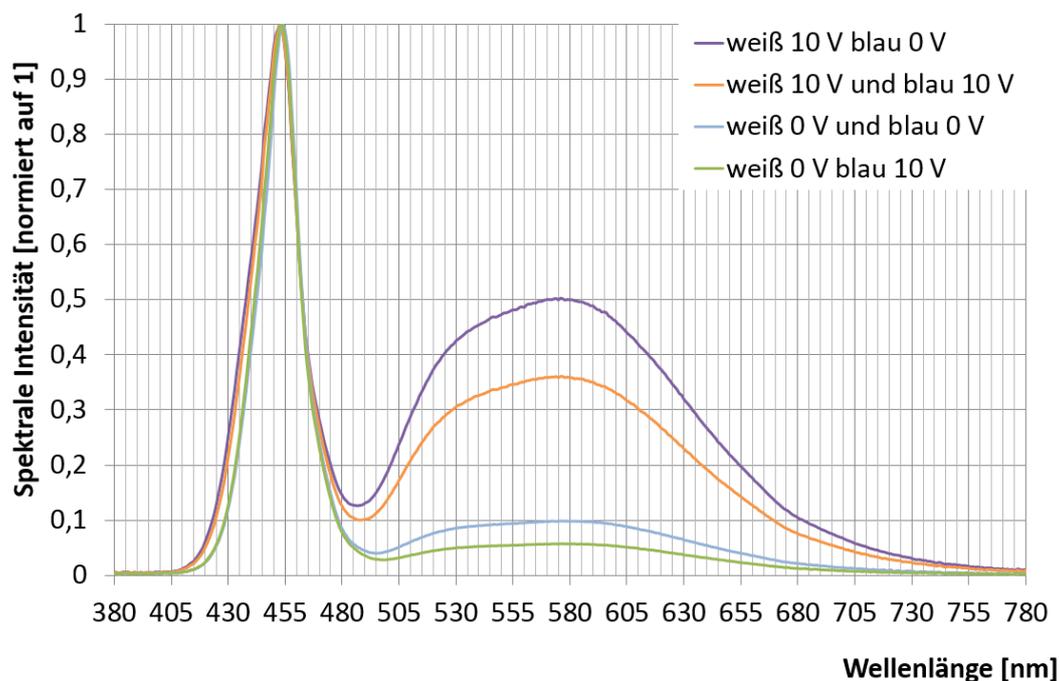


Abbildung 4.3: Spektraler Verlauf ausgewählter Messreihen in den „Extremeinstellungen“ („weiß“ und „blau“ jeweils in Kombinationen mit „0 V“ und „10 V“) [eigene Darstellung]

4. Entwicklung und Verifizierung der bedarfsorientierten Leuchte

Bei einem Vergleich zwischen den gemessenen Intensitäten der Leuchte und der Sensitivität des Rinderauges ist zu erkennen, dass die beiden Verläufe in den Maxima der Wellenlängen gut übereinstimmen (Abbildung 4.4).

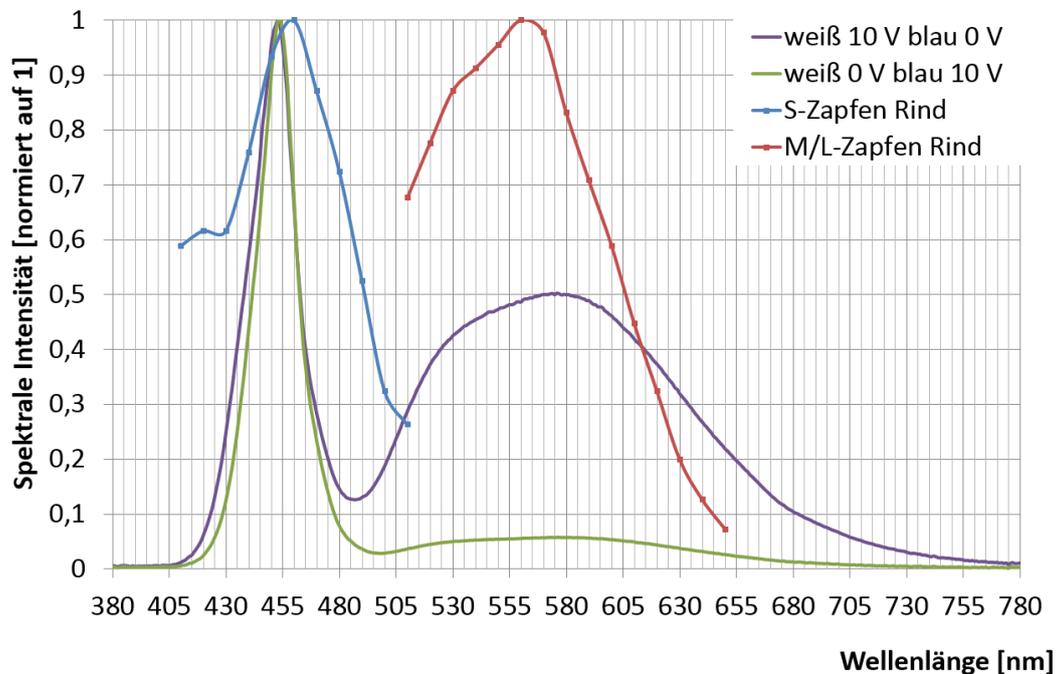


Abbildung 4.4: Vergleich zwischen den gemessenen Intensitäten der Demonstrationsleuchte und der Sensitivität des Rinderauges [eigene Darstellung, nach [Jac98]]

Zur messtechnischen Überprüfung der in Tabelle 3.11 zusammengefassten Anforderungen an die bedarfsorientierte Leuchte werden im folgenden Verlauf die Ergebnisse der Messgrößen des Lichtstroms ϕ [lm], der „Peak-Wellenlänge“ λ_{peak} [nm], der dominanten Wellenlänge λ_{dom} [nm], des Farbwiedergabeindex R_a , des Farbwiedergabewertes R_9 , des Farbwiedergabewertes R_{13} sowie der ähnlichsten Farbtemperatur T_N [K] bei den „Extremeinstellungen“ aufgeführt (Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Messtechnisch erfasste Anforderungen als Auszug ausgewählter Messreihen bei „Extremeinstellungen“ („weiß“ und „blau“ jeweils in Kombinationen mit „0 V“ und „10 V“)

Messreihe	Einstellung „weiß / blau“	ϕ [lm]	λ_{peak} [nm]	λ_{dom} [nm]	R_a	R_9	R_{13}	T_N [K]
1	0 V / 0 V	615,7	454,1	455,4	64,3	86,6	67,9	≥ 22.000
5	0 V / 10 V	978,8	453,5	455,4	33,8	86,2	50,3	≥ 22.000
21	10 V / 0 V	9.856	452,7	566,7	80,4	16,2	81,8	5.668
25	10 V / 10 V	10.250	452,9	445,5	84,2	51,3	86,8	7.442

4. Entwicklung und Verifizierung der bedarfsorientierten Leuchte

4.2.2 Vermessung mit dem Nahfeldgoniometer

Das verwendete Typ B Nahfeldgoniometer des Herstellers Radiant Zemax umfasst einen Goniometertisch des Typs NFMS-0800, eine *ProMetric Imaging IC-PM12-N* Kamera sowie die Software ProMetric in der Version 10.7. Auf die Zusatzkomponenten wie beispielsweise das Spektrometer zur Farbkalibration oder die Stative und zusätzliche Leuchtenhalterungen wird nicht weiter eingegangen.

Als Typ B Ausführung verfügt das Nahfeldgoniometer über eine fixierte vertikale Achse (Abbildung 4.5 und Abbildung 4.6). Die horizontale Achse ist beweglich ausgeführt. Im Messvorgang wird der Prüfling (DUT, engl.: *Device Under Test*) bzw. die Leuchte um die vertikale Achse gedreht, sodass die zweite Achse in fester Position verbleiben kann. Die grafische Visualisierung erfolgt als Lichtstärkeverteilungskurve ((LVK) im C-Ebenensystem) [DIN5032-4].



Abbildung 4.5 (links): Schematische Darstellung eines Goniometertyps B [Ins19]

Abbildung 4.6 (rechts): Nahfeldgoniometer (Typ B) im lichttechnischen Labor der Fachhochschule Bielefeld [eigene Aufnahme]

Der Goniometertisch des Typs NFMS-0800 ist für Prüflinge mit einer maximalen Größe von 865 mm Länge und 535 mm Breite ausgelegt. Das Gewicht sollte 25 kg nicht überschreiten. Die Genauigkeit zur Ansteuerung der anzufahrenden Winkel wird im Datenblatt des Herstellers mit 0,25 Grad angegeben. Der Drehbereich beträgt für den Azimut- und Elevationswinkel jeweils ± 90 Grad [Rad13].

Das Hauptziel der lichttechnischen Vermessung mit dem Nahfeldgoniometer besteht in der Aufnahme einer Lichtstärkeverteilungskurve, die in einem weiteren Schritt in eine EULUM.dat Datei umgewandelt und anschließend zur lichttechnischen Simulation verwendet werden kann. Die Darstellung der Messwerte kann in Polar- oder Linear-Form mit Bezug zum C-Ebenensystem erfolgen [DIN5032-4] [Voe16].

Die Vermessung der Leuchte erfolgte bei Ansteuerung von jeweils 10 V für „weiß“ und „blau“. Laut der gültigen DIN-Norm „Lichtmessung - Teil 4: Messungen an Leuchten“ [DIN5032-4] wird für Innenraumleuchten eine Abtastrate von 5,0 Grad in Elevation und 15 Grad in Azimut empfohlen. Für eine genaue

4. Entwicklung und Verifizierung der bedarfsorientierten Leuchte

und feinstrukturierte Aufnahme der LVK wurde für die lichttechnische Vermessung die Einstellung der anzufahrenden Winkel mit 2,5 Grad für die Elevation und 5,0 Grad für den Azimut gewählt.

Die erfassten Messdaten lassen sich als Lichtstärke-Verteilungskurve wie folgt in Polar-Form (Abbildung 4.7) und in Linear-Form (Abbildung 4.8) darstellen.

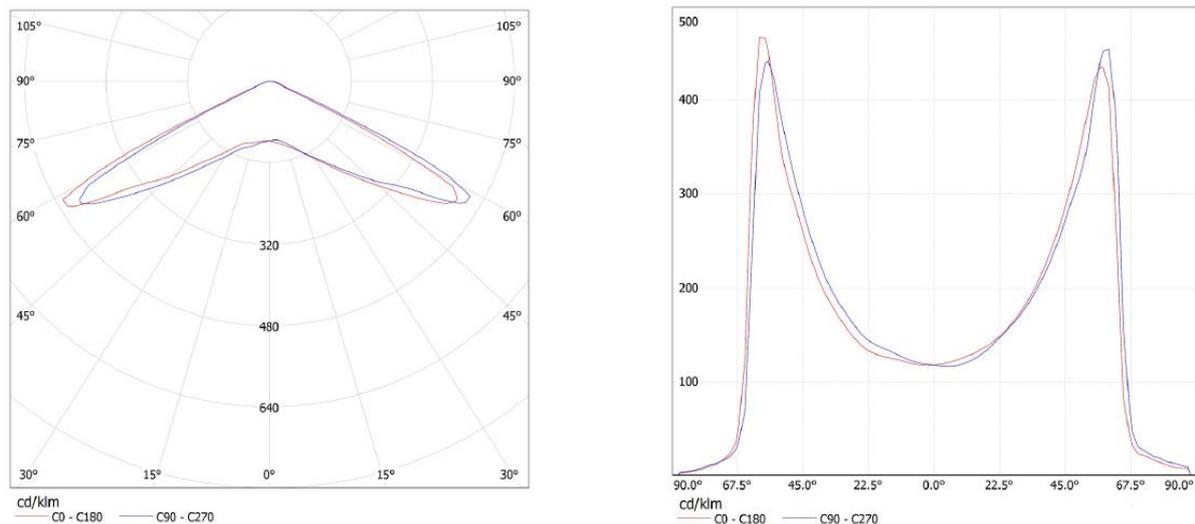


Abbildung 4.7 (links): Lichtstärke-Verteilungskurve der vermessenen Demonstrationsleuchte in Polar-Form Darstellung [eigene Darstellung]

Abbildung 4.8 (rechts): Lichtstärke-Verteilungskurve der vermessenen Demonstrationsleuchte in Linear-Form Darstellung [eigene Darstellung]

4.2.3 Prüfung der Demonstrationsleuchte in der Laborumgebung

Neben den bereits vorgestellten lichttechnischen Vermessungen erfolgte die Aufnahme der elektrischen Leistungsdaten. Zur Erfassung wurde das *TRMS System Multimeter MetraHit Energy* verwendet. Vergleichend zu den durchgeführten lichttechnischen Vermessungen wurden bei 25 Einstellungen die Wirkleistung P [W], die Scheinleistung S [VA], die Blindleistung Q [Var] sowie der Wirkleistungsfaktor $\cos \phi$ bei einer Betriebsspannung von 230 V aufgenommen. In der folgenden Tabelle sind die messtechnisch erfassten Leistungsdaten, als Auszug ausgewählter Messreihen bei „Extremeinstellungen“, dargestellt (Tabelle 4.3). Zusätzlich ist der aus Tabelle 4.3 erfasste Lichtstrom ϕ aufgeführt und zur Berechnung der Effizienz verwendet. Die Effizienz η berechnet sich aus dem Verhältnis des Lichtstroms ϕ zur Wirkleistung P .

4. Entwicklung und Verifizierung der bedarfsorientierten Leuchte

Tabelle 4.3: Messtechnisch erfasste Leistungsdaten der Demonstrationsleuchte und die daraus berechnete Effizienz als Auszug ausgewählter Messreihen bei „Extremstellungen“ („weiß“ und „blau“ jeweils in Kombinationen mit „0 V“ und „10 V“)

Messreihe	Einstellung „weiß / blau“	P [W]	S [VA]	Q [Var]	cos ϕ	ϕ [lm]	η [lm/W]
1	0 V / 0 V	8,46	16,0	13,8	- 0,53	615,7	72,8
5	0 V / 10 V	16,8	22,0	14,3	- 0,76	978,8	58,3
21	10 V / 0 V	92,8	97,2	29,2	- 0,95	9.856	106,2
25	10 V / 10 V	101	105	29,6	- 0,96	10.250	101,5

Bei der weiteren Betrachtung der Leuchte ist festzustellen, dass der Fokus beim Leuchtenbau vor allem auf die Robustheit gelegt wurde. Der Kühlkörper, auf dem die LEDs aufgebracht sind und der gleichzeitig als Gehäuserückwand dient, wurde als gerippter und stranggepresster Aluminiumkörper hergestellt. Die thermische Dimensionierung wurde durch den Forschungspartner DeLaval übernommen. Die Unterbringung der Vorschalt elektronik erfolgte in einem separaten Stahlgehäuse, welches zusätzlich als Befestigungssockel dient. Alle Verbindungsleitungen wurden mit Druckausgleichs-Kabelverschraubungen des Typs Stego DAK 284 ausgeführt. Die Schutzklasse dieser Verschraubung wird durch den Hersteller mit der Zuordnung IP 66 angegeben [Ste17]. Der Schutzarttest der Leuchte wurde durch den Forschungspartner DeLaval übernommen. Eine separate Angabe zur Schutzart der LED-Treiber kann dem Datenblatt nicht entnommen werden. Als Betriebstemperatur wird ein Bereich von $T_{\min} = -25\text{ °C}$ bis $T_{\max} = 60\text{ °C}$ angegeben. Die Gehäusetemperatur sollte $T_{\max} = 80\text{ °C}$ nicht überschreiten [Lum11].

4. Entwicklung und Verifizierung der bedarfsorientierten Leuchte

Zusammenfassend lassen sich die zuvor aufgestellten Anforderungen mit den messtechnisch erfassten Kenngrößen wie folgt in Tabelle 4.4 gegenüberstellen.

Tabelle 4.4: Gegenüberstellung der abgeleiteten Anforderungen mit den messtechnisch erfassten Kenngrößen einer bedarfsorientierten Leuchte für Mensch und Rind

Abgeleitete Anforderungen	Messtechnisch erfasste Kenngrößen (Einstellung „weiß“ 10 V / „blau 10 V“)	
Priorität 1		
<ul style="list-style-type: none"> • Maximale Intensität im spektralen Verlauf bei 565 nm bis 535 nm sowie bei 430 nm bis 480 nm 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Peak</i>-Wellenlänge $\lambda_{\text{peak}} = 452,9 \text{ nm}$ • dominante Wellenlänge $\lambda_{\text{dom}} = 445,5 \text{ nm}$ • Zentralwellenlänge $\lambda_{\text{zen}} = 538,9 \text{ nm}$ 	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> • Lichtfarbgruppe tageslichtweiß (Farbtemperatur T_{CP} über 5.300 K) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ähnlichste Farbtemperatur $T_{\text{N}} = 7.442 \text{ K}$ 	<input checked="" type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> • Gesamtlichtstrom (Leuchte) $\Phi > 10.000 \text{ lm}$ • Effizienz der Leuchte $\eta > 75 \text{ lm/W}$ • Modular aufgebaute und langlebige Leuchte 	<ul style="list-style-type: none"> • Lichtstrom (Leuchte) $\phi = 10.250 \text{ lm}$ und Effizienz (Leuchte) $\eta = 101,5 \text{ lm/W}$ • Lebensdauer $L_{80 \text{ B}10} = 50.000 \text{ Std.}$ • 6 Verschraubungen am Leuchtenkopf (Zugang LED und Linsen) • 6 Verschraubungen am Leuchtensockel (Zugang Vorschalt elektronik) 	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
Priorität 2		
<ul style="list-style-type: none"> • Farbwiedergabeindex $R_{\text{a}} = 86$ mit dem Zusatz, dass der Farbwiedergabewert R_{9} (Rot gesättigt) größer 45 ist und der Farbwiedergabewert R_{13} (Rosa) mindestens 80 beträgt 	<ul style="list-style-type: none"> • Farbwiedergabeindex $R_{\text{a}} = 84,2$ • Farbwiedergabewert $R_{\text{9}} = 51,3$ • Farbwiedergabewert $R_{13} = 86,8$ 	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> • Frequenz der Vorschalt elektronik $f \gg 60 \text{ Hz}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Konstantstromregelung (keine Ansteuerung per Pulsweitenmodulation \rightarrow „flackerfreies“ Licht) 	<input checked="" type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz der Leuchte im Temperaturbereich von $T_{\text{min}} = 0 \text{ °C}$ bis $T_{\text{max}} = 75 \text{ °C}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Zulässiger Temperaturbereich der Vorschalt elektronik laut Datenblatt $T_{\text{min}} = -40 \text{ °C}$ bis $T_{\text{max}} = 80 \text{ °C}$ und $T_{\text{min}} = -25 \text{ °C}$ bis $T_{\text{max}} = 60 \text{ °C}$ • Zulässige Betriebstemperatur der LEDs laut Datenblatt $T_{\text{min}} = -40 \text{ °C}$ bis $T_{\text{max}} = 135 \text{ °C}$ 	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> • Verwendung einer atmungsaktiven Membran, chemisch-kompatiblen Stoffen und Materialien • Konstruktion mit einer IP-Schutzart von mindestens IP 64 	<ul style="list-style-type: none"> • Membran vorhanden, Verwendung chemisch-kompatibler Stoffe und Materialien • Schutzart IP 64 	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>

4. Entwicklung und Verifizierung der bedarfsorientierten Leuchte

Als ein erstes Zwischenfazit ist zu erkennen, dass bis auf die Werte der Lebensdauer, des Farbwiedergabeindex R_a und des maximal zulässigen Temperaturbereichs der Vorschalt elektronik im Bereich des LED-Treibers „Cow White“ alle zuvor definierten Anforderungen erfüllt werden.

Wie bereits beschrieben, können aus den Datenblättern der LUMILEDs keine Angaben hinsichtlich der Lebensdauer entnommen werden. Diese Angaben würden aber auch nur bedingt aussagekräftig sein, da viele weitere Faktoren wie beispielsweise die Kühlung und die Anordnung der LEDs in dem Gehäuse die Lebensdauer stark beeinflussen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass eine Größenordnung von 50.000 Stunden einen Zeitraum von knapp sechs Jahren im Dauerbetrieb beinhaltet.

Die Abweichung des Farbwiedergabeindex lag unterhalb von fünf Prozent und innerhalb einer für die Lichttechnik typischen Messtoleranz. Zur Einordnung werden für physikalische Photometer laut DIN-Norm [DIN5032-7] [DIN5036-6] ein Messfehler von fünf Prozent für Betriebsmessungen im Labor mit Messinstrumenten hoher Güte und zehn Prozent Messfehler für Messungen im Feld mit Messinstrumenten der mittleren Güte benannt.

Die maximal zulässige Temperatur der Vorschalt elektronik wurde nur von einem Bauelement unterschritten. Zu berücksichtigen ist, dass die maximale Anforderung der Temperatur von $T_{max} = 75 \text{ °C}$ als Extremfall angenommen wurde und bauartbedingt in der ausgewählten Versuchsumgebung wahrscheinlich nie erreicht wird. Weiterhin ist zu beachten, dass sich die Temperaturangabe des LED-Treibers auf eine Bestromung von 700 mA bezieht. Für die später beschriebene Versuchsdurchführung war ein Betriebsstrom von 350 mA völlig ausreichend. Eine Angabe zur maximalen Betriebstemperatur bei einem Wert von 350 mA konnte dem Datenblatt nicht entnommen werden. Der betreffende LED-Treiber wurde somit nie mit der vollen Leistung betrieben. Zusätzlich war der LED-Treiber in dem Leuchtensockel aus Metall positioniert (gute Wärmeableitung) und entsprechend räumlich weit von der emittierten Wärmestrahlung entfernt. Der LED-Treiber „Cow White“ wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens I_LED_Milchvieh_II, welches das Ziel der Weiterentwicklung zur Marktfähigkeit verfolgt, ersetzt. Der neu ausgewählte LED-Treiber „Cow White“ erfüllt die gestellten Anforderungen.

Die entwickelte Leuchte wurde zum Zeitpunkt bzw. Beginn der Versuchsdurchführung als „bedarfsorientiert“ eingestuft und konnte für das nun folgende Beleuchtungskonzept für Mensch und Rind verwendet werden.

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

Die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage „Wie muss ein Beleuchtungskonzept für Mensch und Rind konzipiert und umgesetzt werden, dass es die Sehaufgaben unterstützt und gleichzeitig das Verhalten positiv beeinflusst?“ erfolgt nach der Entwicklung und Verifizierung der neu entwickelten Leuchte. Das neue Beleuchtungskonzept wurde mittels der Simulationssoftware DIALux 4.12 erstellt, es basiert ausschließlich auf der neu entwickelten Leuchte und wurde für den Liegeboxenlaufstall des VBZL Haus Düsse konzipiert.

In diesem Kapitel wird nach der Definition der Anforderungen, die an ein bedarfsorientiertes Beleuchtungskonzept gestellt werden, das Material und die Methodik der Mitarbeiterbefragung, die den subjektiven Eindruck des Menschen erfassen sollte, dargestellt. Im Anschluss erfolgen die Beschreibungen der ausgewählten Versuchsumgebung sowie der grundlegenden Elemente für die Erstellung einer lichttechnischen Planung. Weiterhin wird für die Verifizierung und anschließenden Validierung ein neues Mess- und Bewertungskonzept, das das Sehvermögen von Mensch und Rind berücksichtigt, vorgestellt. Abschließend und für den letzten Schritt der Validierung, der das Tierverhalten und somit die Lichtwirkung auf die Rinder beinhaltet, werden in diesem Kapitel die Tiere, das Material und die Methoden zur Beobachtung und Auswertung des Tierverhaltens aufgeführt.

5.1 Anforderungen an ein bedarfsorientiertes Beleuchtungskonzept

Es können drei unterschiedliche Ansätze eines Beleuchtungskonzepts umgesetzt werden. Als erstes kann eine raumbezogene Beleuchtung gewählt werden. Diese beinhaltet, dass der Raum als Ganzes betrachtet wird und alle Tätigkeiten an jeder Stelle des Raumes zu erfüllen sind. Das zweite Konzept, die arbeitsbereichsbezogene Beleuchtung, sowie das dritte Konzept der teilflächenbezogenen Beleuchtung unterteilen den zu betrachtenden Raum in unterschiedliche Bereiche, die verschieden voneinander zu beleuchten sind [Ros16]. Da Rinder wie bereits beschrieben eine möglichst homogene Beleuchtung bevorzugen (siehe Kapitel 2.1.2 Sehvermögen des Rindes), wird im nachfolgenden Teil das Beleuchtungskonzept einer raumbezogenen Beleuchtung umgesetzt.

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

Die Anforderungen an die Beleuchtung werden durch die zu erwartenden Tätigkeiten im Raum vorgegeben. Der Fokus sollte auf den Punkten Sicherheit, Ermöglichung der Sehaufgabe, Sehkomfort und ein angenehmes Raumambiente liegen. Die Wirtschaftlichkeit der Beleuchtungsanlage gilt als zusätzliches Merkmal, das nicht zu den beleuchtungstechnischen Eigenschaften zählt. Viele dieser Anforderungen sind voneinander abhängig und beeinflussen sich je nach Situation gegenseitig [Ros16].

Als erste Anforderungen werden zur Validierung der planungstechnischen Aspekte die Kenngrößen Beleuchtungsstärke und Beleuchtungsstärkeverteilung benannt. Die Beleuchtungsstärke E ist als Quotient des Lichtstroms zu einer beleuchteten Fläche definiert. Diese Kenngröße wird zur Überprüfung einer Beleuchtungsplanung verwendet und beschreibt nicht den wahrnehmbaren Helligkeitseindruck [Voe16]. Die Beleuchtungsstärke gilt als Indikator zur Erfüllung der Sehaufgabe. Bevorzugt gewählt werden horizontal und vertikal orientierte Bezugsflächen, die zur messtechnischen Überprüfung in möglichst gleich große Flächen zu unterteilen sind. Zur Bewertung der Beleuchtungsstärkeverteilung wird die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke als Quotient aus der minimalen Beleuchtungsstärke E_{\min} zur mittleren Beleuchtungsstärke E_m gebildet [Ros16]. Im nachfolgenden Teil dieser Arbeit wird in Anlehnung an die verwendete lichttechnische Simulationssoftware DIALux für die Bezeichnung der Gleichmäßigkeit g_1 verwendet.

Die Kenngrößen Leuchtdichte und die Leuchtdichteverteilung werden im zweiten Block als Anforderungen zur Beurteilung der wahrnehmungstechnischen Aspekte definiert. Wie bereits in Kapitel 2.2.2 Photometrie aufgeführt, beschreibt die Leuchtdichte maßgeblich die Helligkeitsempfindung. Angelehnt an den mesopischen Bereich, der für den Menschen mit den Grenzen $L' = 10^{-5} \text{ cd/m}^2$ und $L = 10^2 \text{ cd/m}^2$ definiert ist und ein Farbsehen ermöglicht (siehe Kapitel 2.1.1 Sehvermögen des Menschen), wird eine Umgebungsleuchtdichte L von viel größer als 10^{-5} cd/m^2 und ungefähr gleich 100 cd/m^2 empfohlen.

Rosemann [Ros16] beschreibt, dass die Leuchtdichteverteilung zur Beurteilung der auftretenden Kontraste im Sichtfeld verwendet werden kann. Im Verlauf beschreibt er, dass der Kontrast zwischen der Sehaufgabe und dem Umfeld nicht zu groß sein sollte, da dies bei Blickwechseln dafür sorgt, dass sich das Auge ununterbrochen auf neue Leuchtdichteverhältnisse einstellen muss und so schneller ermüdet. Ein zu geringer Leuchtdichtekontrast ist ebenfalls nicht wünschenswert, da dieser die Situation als monoton erscheinen lässt [Ros16]. Angelehnt an die DIN-Norm „Gestaltung visueller Informationen im öffentlichen Raum zur barrierefreien Nutzung“ [DIN32975] sollte für die Kontrastbetrachtung an signifikanten Stellen ein Michelson-Kontrast von $K_M \geq 0,7$ vorliegen.

Eine lange Lebensdauer der Beleuchtung ist für den Landwirt, wie bereits in Kapitel 3.1 Ermittlung der Kundenbedürfnisse beschrieben, das wichtigste Kriterium. Eine wirtschaftliche Beleuchtungslösung,

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

die einen Wettbewerbsvorteil schafft, kann nur in der Kombination mit einer energieeffizienten und nachhaltigen Leuchte sowie einem bedarfsorientierten Beleuchtungskonzept geschaffen werden. Entscheidend für die Nutzungsdauer der Beleuchtungsanlage ist der durch den Planer festzulegende Wartungsfaktor sowie die dazugehörige Wartungsplanmethode. Bei der Betrachtung der durchschnittlichen Erwartungshaltung erfolgt die Berechnung der erfassten Kundendaten mit den Werten des Medians (vgl. 3.1 Ermittlung der Kundenbedürfnisse). Der Mittelwert wird nicht benutzt, da der Vergleich von Mittelwert und Median zeigt, dass der Median fast immer deutlich unter den Werten des Mittelwertes liegt. Dies lässt vermuten, dass es viele „hohe Extremantworten“ gibt und entsprechend eine rechtsschiefe Verteilung vorliegt, was auch durch die Betrachtung der Verteilung der Antworten bestätigt wird. Da im Laufbereich die höchsten Angaben an Beleuchtungsstunden getätigt wurden, werden die Medianwerte von 3 Stunden im Sommer und 8 Stunden im Winter zur Betrachtung herangezogen und ergeben einen durchschnittlichen mittleren Jahreswert von 5,5 Stunden. Dieser Wert multipliziert mit 365,25 Tagen pro Jahr, ergibt einen gerundeten Wert von etwa 2.000 Betriebsstunden pro Jahr. Bei der gewünschten Mindestgarantiedauer von 5 Jahren ergeben sich als Anforderung rund 10.000 Betriebsstunden. Bei der Erwartung an die Lebensdauer des Leuchtmittels mit einer Benutzung von 10 Jahren sind es rund 20.000 Betriebsstunden sowie bei der Erwartung an die Lebensdauer der gesamten Leuchte von 20 Jahren rund 40.000 Betriebsstunden.

Eine Zusammenfassung der aufgeführten Bedürfnisse und Qualitätsmerkmale sowie die daraus abgeleiteten Anforderungen kann der Tabelle 5.1 entnommen werden. Weitere Kenngrößen, wie beispielsweise Raumharmonie, Lichtstimmung und Lichtgestaltung werden in der Umsetzung dieses Konzepts nur bei Bedarf, aber nicht fokussiert, betrachtet.

Tabelle 5.1: Gegenüberstellung der Bedürfnisse und Qualitätsmerkmale mit den daraus abgeleiteten Anforderungen einer bedarfsorientierten Leuchte für Mensch und Rind

Bedürfnisse und Qualitätsmerkmale	Abgeleitete Anforderungen
<ul style="list-style-type: none"> • Mensch: Unterstützung der Sehaufgabe für sehrelevante Elemente der auszuführenden Tätigkeiten in der Stallumgebung • Rind: Unterstützung der Sehaufgabe sowie der Einsatz eines Lichtprogramms (biologische Rhythmik) 	<ul style="list-style-type: none"> • Beleuchtungsstärke mindestens $E_m \geq 150 \text{ lx}$ • Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärkeverteilung mindestens $g_1 \geq 0,4$
<ul style="list-style-type: none"> • Mensch und Rind: Sichere und barrierefreie Orientierung in der Stallumgebung 	<ul style="list-style-type: none"> • Umgebungsleuchtdichte $L \gg 10^{-5} \text{ cd/m}^2$ bis $L \approx 10^2 \text{ cd/m}^2$ • Michelson-Kontrast $K_M \geq 0,7$
<ul style="list-style-type: none"> • Mensch: Langlebige und wirtschaftliche Beleuchtungslösung • Rind: Kurze Störzeiten, die durch Wartungsarbeiten oder Leuchtenausfall entstehen 	<ul style="list-style-type: none"> • Lebensdauer der LEDs $L_{LED} = 20.000 \text{ Betriebsstunden}$ • Beleuchtungsanlage von $L_{Leuchte} = 40.000 \text{ Betriebsstunden}$

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

5.2 Mitarbeiterbefragung

Die zuvor für Mensch und Rind aufgeführten Bedürfnisse und Qualitätsmerkmale konnten mit den abgeleiteten Anforderungen in messbare Kenngrößen übertragen werden. Diese Kenngrößen konnten für den Bereich der Lichtwahrnehmung messtechnisch erfasst und im Verlauf dieser Arbeit bewertet werden. In Bezug auf die Lichtwirkung wurde zusätzlich eine Befragungsaktion, die auch den subjektiven Eindruck des Landwirts erfasste, notwendig.

Im Rahmen der Versuchsdurchführungen des Projekts I_LED_Milchvieh wurde hierzu nach der Befragung „Zukunftsorientierter Landwirt - Optimierung der Beleuchtung in der Milchviehhaltung“ eine zweite Befragungsaktion mit zwei Befragungen durchgeführt. Der Leiter des Rinderbereichs wurde in die Vorbesprechungen sowie Planungen einbezogen, sodass die Durchführung mit den verbleibenden sechs Mitarbeitern sowie den sechs Auszubildenden vorgenommen wurde. Für beide Befragungsaktionen standen die gleichen Personen zur Verfügung.

Die Befragungen wurden jeweils zur Mittagszeit am 02. Dezember 2015 unter der Natriumdampfbeleuchtung und am 13. Januar 2016 unter der LED-Beleuchtung durchgeführt. Der Zeitpunkt der Befragung wurde ans Ende einer Versuchsphase gelegt, sodass die Mitarbeiter sowie die Auszubildenden bereits bis zu sechs Wochen unter der eingestellten Beleuchtungssituation arbeiten konnten. Die mittlere Beleuchtungsstärke betrug durchschnittlich 164 lx bei LED-Beleuchtung und 137 lx bei NAV-Beleuchtung. In beiden Versuchsphasen wurde die Beleuchtung tagsüber per Zeitschaltuhr, sofern nicht genug Tageslicht vorhanden war (Bewertung mittels eines Dämmerungsschalters), sechzehn Stunden eingeschaltet und nachts acht Stunden ausgeschaltet. Der Einschaltzeitpunkt der Beleuchtung erfolgte morgens um kurz vor sechs Uhr.

Um den Aufwand für die Befragten so gering wie möglich zu halten und hierdurch die Akzeptanz der Befragungsaktion zu steigern, wurden je Befragung drei Fragen gestellt. Zur Vergleichbarkeit untereinander wurden die gleichen Fragen gestellt. Die Zuordnung Mitarbeiter oder Auszubildender erfolgte durch den Interviewer, dem alle Befragten persönlich bekannt waren. Eine personalisierte und eindeutig zurückführbare Kennzeichnung der Fragebögen erfolgte nicht.

Bei der Einteilung der Antwortmöglichkeiten wurde vergleichbar zu Kapitel 3.1 Ermittlung der Kundenbedürfnisse eine nicht metrische Skaleneinteilung in Form einer Ordinalskala verwendet. Zur statistischen Auswertung können so nur die Bildung der Häufigkeiten, Quantile sowie die Größen Median (x_{Med}) und Modus (x_{Mod}) verwendet werden [Aue15]. Zur Auswertung wird im Verlauf wiederholt unterstellt, dass die Abstände zwischen den einzelnen Zuordnungen gleichartig sind. Mit dieser Annahme

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

und der Zuordnung von sehr gut = 1 bis ungenügend = 6 kann die zusätzliche Angabe des arithmetischen Mittelwertes (\bar{x}) vorgenommen werden. Für die Beurteilung der Streubreite werden zudem die Minimal- sowie Maximalwerte (Min. und Max.) angegeben.

Die Darstellung der zusammengefassten Ergebnisse erfolgt im Kapitel 6.3. Die Primärdaten können dem Anhang IV entnommen werden.

5.3 Beschreibung der ausgewählten Versuchsumgebung

Zur Erstellung des Beleuchtungskonzepts wurde als Anwendungsbeispiel ein Liegeboxenlaufstall des VBZL Haus Düsse gewählt. Mit einer Länge von 32,20 m und einer Breite von 17,75 m umfasst die Gebäudegrundfläche etwa 570 m² (Abbildung 5.1). Die Firsthöhe des Versuchsstalls beträgt 4,90 m (Abbildung 5.2). Ausgestattet mit insgesamt 21 Hochboxen, 18 Tiefboxen sowie 43 Fressplätzen bietet der Stall unter der Voraussetzung, dass jedem Rind immer eine freie Liegebox und ein freier Fressplatz zur Verfügung steht, maximal 39 laktierenden Rindern ausreichend Platz. Die Abkalbe- und Krankenboxen, Kälberaufzucht, Futteraufbereitung sowie der Bereich der Trockensteher befinden sich außerhalb der beschriebenen Fläche bzw. des Gebäudes und werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht betrachtet.

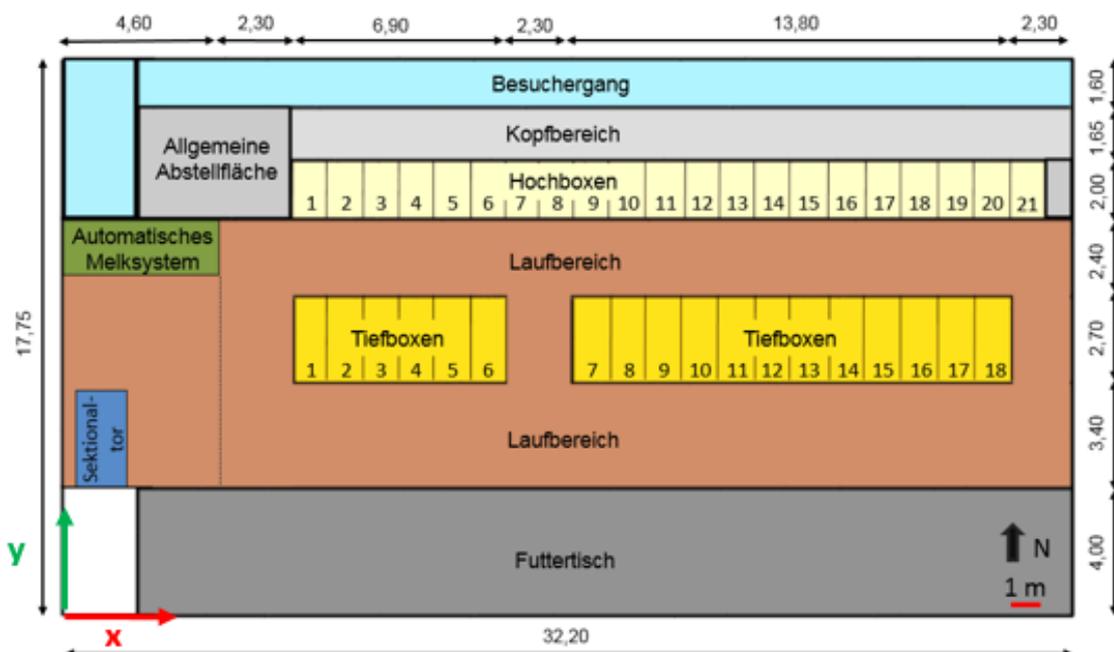


Abbildung 5.1: Schematischer Grundriss des Versuchsstalls VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

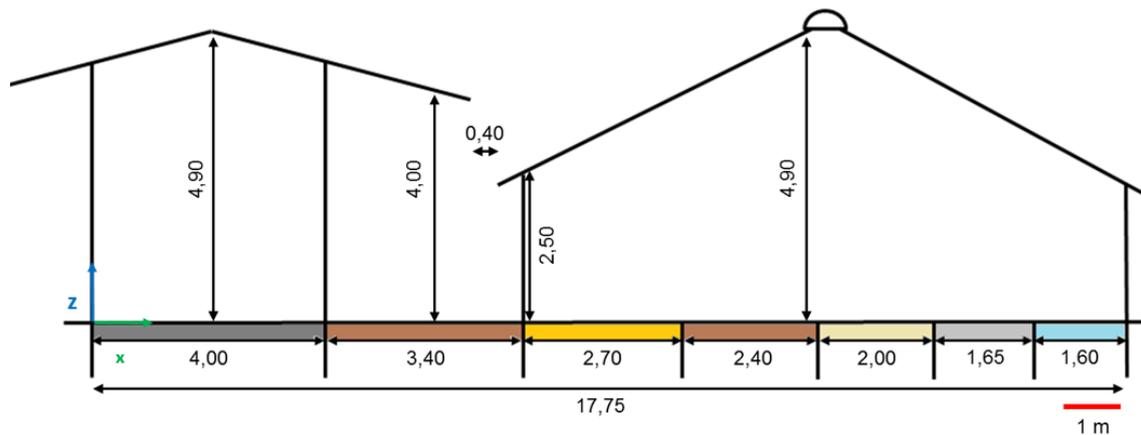


Abbildung 5.2: Schematischer Querschnitt des Versuchsstalls VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

Für die Grundkonstruktion des Gebäudes im Simulationsprogramm DIALux 4.12 wurden insgesamt 18 Eckpunkte benötigt. Zur eindeutigen Lagebeschreibung der definierten Eckpunkte wurde das anzusetzende Koordinatensystem mit dem Nullpunkt an der südwestlichen Gebäudeecke auf dem Nullniveau des Peripheriebereichs, was der architektonischen Bezeichnung OKFF (Oberkante fertiger Fußboden) entspricht, gelegt. Jeder Eckpunkt kann somit in der Lage durch die drei Koordinaten **x**, **y** und **z** eindeutig beschrieben werden (Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Lage der Eckpunkte (x-, y- und z-Werte) des simulierten Versuchsstalls VBZL Haus Düsse

Eckpunkt	x [m]	y [m]	z [m]	Eckpunkt	x [m]	y [m]	z [m]
1	0,00	0,00	0,00	10	32,20	0,00	0,00
2	0,00	0,00	4,20	11	32,20	0,00	4,20
3	0,00	2,00	4,90	12	32,20	2,00	4,90
4	0,00	7,00	4,00	13	32,20	7,00	4,00
5	0,00	7,00	2,50	14	32,20	7,00	2,50
6	0,00	7,40	2,50	15	32,20	7,40	2,50
7	0,00	12,50	4,90	16	32,20	12,50	4,90
8	0,00	17,75	2,50	17	32,20	17,75	2,50
9	0,00	17,75	0,00	18	32,20	17,75	0,00

5.3.1 Gebäudestruktur sowie Be- und Entlüftung

Konstruktiv liegt eine „mehrhäusige Bauweise“ vor. Durch ein automatisches Sektionaltor kann den Rindern von Frühjahr bis Herbst die Möglichkeit zum Weidegang gegeben werden. Als bautechnische Besonderheit ist ein schmaler Besuchergang entlang der nördlichen Längsseite zu nennen. Dieser wird

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

als Verbindungsgang zur gebäudeangrenzenden Krankenbox vom Stallpersonal sowie für Gruppenführungen, die durch die Mitarbeiter des Rinderbereichs erfolgen, genutzt. Die Längsseite des Futtertisches ist, in Richtung Süden, in einer offenen Bauweise ausgeführt. Die Stirnseiten sowie die Begrenzung der Längsseite zum Besuchergang sind in einer Massivbauweise ausgebildet. Teilbereiche der nördlichen Längsseite sind im Winter durch ein Windschutzsystem, bestehend aus einer gewickelten Folienjalousie (engl.: *Curtain*), geschützt und können im Sommer zur Verbesserung der Be- und Entlüftung manuell geöffnet werden. Für ein verbessertes Stallklima können zusätzlich zwei senkrecht hängende Ventilatoren (Fa. Multifan, Durchmesser circa 1,5 m) über dem Laufbereich zwischen den Hoch- und Tiefboxen stufenweise eingeschaltet werden.

5.3.2 Melksystem, Fütterung und Entmistung

Die Milchgewinnung erfolgt durch ein automatisches Melksystem (AMS) der Firma Lely (Lely Astronaut). Dieses System bietet den Vorteil, dass die Rinder eigenständig und frei nach Bedarf zum Melken gehen und nicht an feste Melkzeiten gebunden sind. Eine automatische Sperrung des Zugangs zum AMS erfolgt alle zwei Tage zwischen 18:00 Uhr und 19:00 Uhr, verursacht durch eine Tankspülung, sowie täglich dreimal für jeweils 20 Minuten beginnend um 05:00 Uhr, 13:00 Uhr sowie 22:00 Uhr zu automatischen Reinigungen bzw. Spülungen des AMS. Liegen bei einzelnen Rindern zu lange Zwischenmelkzeiten vor, werden diese durch das Stallpersonal im Rahmen der Fütterungs- und Reinigungsphase am frühen Vormittag (circa 06:00 Uhr bis 08:00 Uhr) sowie am späten Nachmittag (circa 16:00 Uhr bis 18:00 Uhr) zum AMS nachgetrieben. Der Nachtrieb der Rinder erfolgt, wenn diese in den letzten zehn Stunden nicht erfolgreich durch das AMS gemolken wurden. Die Einstellungen zu dem Anrecht eines Melkvorganges erfolgte im Betrachtungszeitraum der Versuchsdurchführung im Winter 2015/16 wie in Tabelle 5.3 dargestellt.

Tabelle 5.3: Einstellungen zum Melkanrecht des automatischen Melksystems im Versuchsstall VBZL Haus Düsse

Laktationsstadium	Maximale Anzahl an Melkungen	Optimaler Milchertag pro Melkung	Minimale Anzahl von Melkungen
Von dem Abkalben bis 30 Tage nach dem Abkalben	5,0	7,0	4,0
30 Tage nach dem Abkalben bis 14 Tage vor dem Trockenstellen	4,5	9,0	2,7
14 Tage vor dem Trockenstellen bis zum Trockenstellen	3,5	10,0	2,0

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

Die Fütterung der Rinder basiert auf einem halbautomatischen System. Zu Beginn der Fütterungs- und Reinigungsphase wird die Grundfuttermischung durch das Stallpersonal mit Hilfe eines selbstfahrenden Futtermischwagens vorgelegt. Ein automatisches Futtermischsystem (Butler, Fa. Wasserbauer) schiebt im Rhythmus von zwei Stunden das von den Rindern weggeschobene und auf dem Futtertisch verteilte Futter in den Fressbereich zurück. Die tierindividuelle Kraftfuttergabe erfolgt während des Melkvorgangs im AMS. Für eine ausreichende Flüssigkeitsaufnahme stehen zwei Tränken zur Verfügung. Eine Tränke befindet sich an der östlichen Wand direkt neben Hochbox 21. Die zweite Tränke befindet sich im westlichen Stallbereich in unmittelbarer Nähe des Warte- und Aufenthaltsbereichs des AMS.

Die Entmistung des Liegeboxenlaufstalls erfolgt halbautomatisch. Der planbefestigte und mit Laufmatten aus elastischem Kautschuk aufgebaute Laufbereich des angrenzenden Futtertisches wird durch einen vollautomatischen Stallungsschieber alle zwei Stunden gereinigt. Der zweite große Laufbereich zwischen den Hoch- und Tiefboxen ist als Betonspaltenboden ausgebildet und wird durch das Stallpersonal am frühen Vormittag sowie am späten Nachmittag mit Hilfe eines mobilen Spaltenschiebers gereinigt. Gleiches gilt für die planbefestigten Bodenbeläge an den Durchgängen. Die Liegeboxen sowie die Fläche des Warte- und Aufenthaltsbereichs des AMS werden durch das Stallpersonal zweimal täglich manuell abgeschoben und anschließend mit Wasser abgespritzt.

5.3.3 Beschreibung und Funktionsweise der Bestandsbeleuchtung

Die Bestandsbeleuchtung wurde mittels Natriumdampf-Hochdruckleuchten (NAV-Leuchten) und Langfeldleuchten realisiert. In der Gesamtsumme sind elf NAV-Leuchten mit jeweils einem 250 W Master SON-T Leuchtmittel, schaltbar in zwei Gruppen als Haupt- bzw. Tagesbeleuchtung, sowie drei freistrahenden Langfeldleuchten mit jeweils einem 58 W Leuchtmittel, vorwiegend für die Nachtbeleuchtung, installiert (Abbildung 4.3). Weitere klassische Langfeldleuchten, Glühlampen, eine LED-Retrofit-Variante sowie eine LED-Leuchte in Ausführung eines Hallentiefstrahlers sind zu Demonstrationszwecken in den verschiedensten Bereichen des Versuchsstalls installiert worden. Eine Skizzierung der Lichtpunkte in der nachfolgenden Abbildung 5.3 entfällt, da diese Leuchten zum Zeitpunkt der Betrachtungen im Winter 2015/16 ausschließlich zu Demonstrationszwecken befestigt und nicht in Betrieb waren.

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

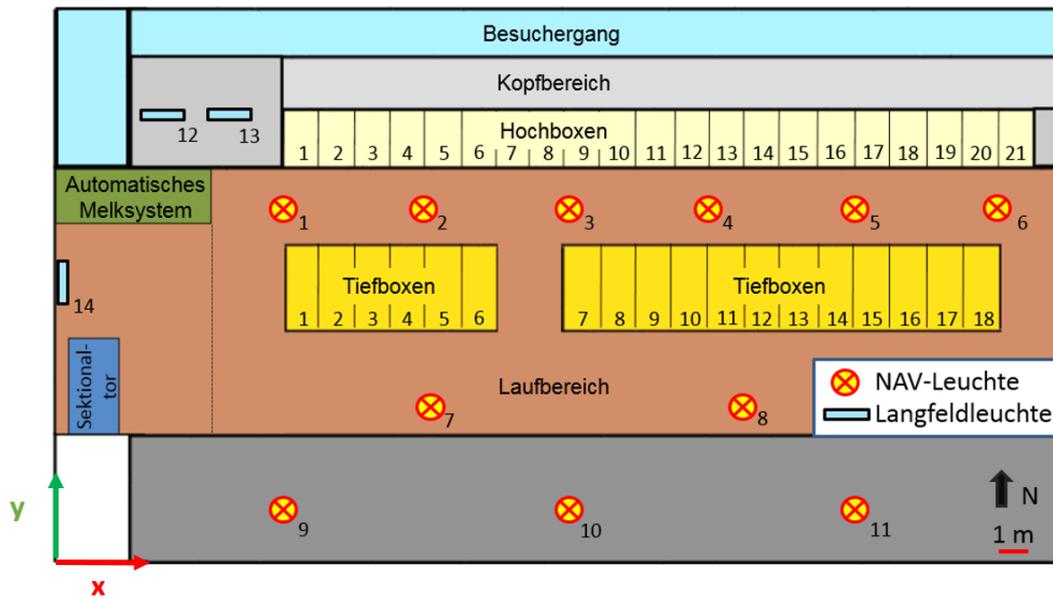


Abbildung 5.3: Skizzierung der Bestandsbeleuchtung im Versuchsstall des VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

Sechs der NAV-Leuchten (Nr. 1 bis Nr. 6) wurden mittig in einer Reihenordnung über dem Laufbereich zwischen den Hoch- und Tiefboxen (Laufbereich H-T) positioniert, zwei NAV-Leuchten (Nr. 7 und Nr. 8) über dem Laufbereich zwischen den Tiefboxen und dem Futtertisch (Laufbereich T-F) sowie drei NAV-Leuchten (Nr. 9 bis Nr. 11) in einer Reihenordnung mittig über dem Futtertisch. Zwei der Langfeldleuchten (Nr. 12 und Nr. 13) wurden im Vorräum des Melkroboters sowie eine Langfeldleuchte (Nr. 14) im Wartebereich des Melkroboters platziert. Für die Beleuchtungssteuerung der NAV-Beleuchtung wurde je Gruppe ein Wahlschalter eingesetzt. Dieser ermöglicht eine manuelle Schaltung bzw. Auswahl der Zustände „Ein“, „Automatik“ sowie „Aus“. Im Modus „Automatik“ gibt eine analoge Zeitschaltuhr in Kombination mit einem Dämmerungsschalter, der an der nördlichen Außenseite des Stalles installiert ist, die Einschaltzeit vor. Messtechnische Untersuchungen ergaben, dass bei einer durchschnittlichen horizontalen Beleuchtungsstärke von circa 200 lx im Bodenbereich des Stalls der Dämmerungsschalter in Kombination mit der Zeitschaltuhr, die auf den Zeitraum von morgens 05:45 Uhr bis abends 21:45 Uhr aktiv eingestellt war, das Licht einschaltet.

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

5.4 Erstellung einer Beleuchtungssimulation

Die lichttechnische Planung dieser Arbeit erfolgte mittels des Simulationsprogramms DIALux 12.4. Die Gestaltung des Simulationsmodells leitet sich aus den zuvor beschriebenen und vorgestellten Grundelementen des ausgewählten Liegeboxenlaufstalls ab. Als Zielgröße der Beleuchtungssimulation wird eine mittlere horizontale Beleuchtungsstärke von $E_M \geq 150 \text{ lx}$ in einer bodennahen Bewertungshöhe von 0,2 m mit einer möglichst hohen Gleichmäßigkeit ($g_1 \geq 0,40$) angestrebt.

5.4.1 Wartungsfaktor und Wartungsplanmethode

Eine langlebige und wirtschaftliche Beleuchtungslösung ist wie zuvor beschrieben eine wesentliche Anforderung, die der Landwirt an ein bedarfsorientiertes Beleuchtungskonzept stellt. Die Stallumgebung beeinflusst dabei vor allem die Thematik der Wartung, die in der landwirtschaftlichen Beleuchtung einen hohen Stellenwert einnimmt. Nicht nur die Wartungsfreundlichkeit der Leuchte muss betrachtet werden, sondern auch die Herausforderung der Stallumgebung. Im Vergleich zu anderen Branchen, wie beispielsweise der klassischen Industriehallen- oder Straßenbeleuchtung, sind die Leuchten oftmals zu Wartungszwecken schwer zugänglich. Als Gründe der schlechten Zugänglichkeit sind unter anderem Stalleinbauten wie beispielsweise Tränken, Fressgitter und Liegeboxen zu nennen, die das Positionieren einer Leiter, eines Gerüsts oder einer Hebebühne stark einschränken. Spaltenböden sind vielfach statisch nicht für die Befahrung mit schweren Maschinen ausgelegt. Weiterhin besteht eine zusätzliche Gefährdung, da Böden durch Rückstände von Flüssig- und Festmist rutschig oder beispielsweise im Tretmiststall weich und uneben sind. Außerdem befinden sich die Rinder im Arbeitsbereich, die in manchen Ställen nur schwer und mit Hilfe von Gittern vom Arbeitsbereich abgeschirmt werden können.

Der Wartungsfaktor WF (MF engl.: *maintenance factor*) muss vom Planer mit allen notwendigen Annahmen, die zur Bestimmung des Wertes führen, angegeben werden und stellt eine Grundlage des Wartungsplanes dar [DIN12464-1]. Laut Rosemann [Ros16] werden für die Festlegung des Wartungsfaktors vor allem der Ausfall oder der Lichtstromrückgang der Leuchtmittel, die Verschmutzung der Leuchten sowie die Verschmutzung der Raumflächen betrachtet [Ros16].

Zur Angabe des Lichtstromrückgangs können verschiedene Angaben genutzt werden. Laut der DIN EN Norm „LED-Module für die Allgemeinbeleuchtung - Anforderungen an die Arbeitsweise“ [DIN62717] erfolgt die Angabe des Lichtstromrückgangs mittels des Buchstabens L und einer dazugehörigen zweistelligen Zahl. Als Beispiel sind die Angaben L_{70} oder L_{80} zu nennen, die das Zeitintervall beziffern, in

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

dem noch 70 % bzw. 80 % des ursprünglichen Lichtstroms in Bezug auf die gesamte Beleuchtungsanlage vorhanden sind. Zusätzlich können weitere Spezifikationen angegeben werden [DIN62717] [Hei14].

Eine dieser Spezifikationen ist die Definition des B-Wertes. Der B-Wert beschreibt den allmählich schrittweisen Ausfall (engl.: *Gradual failure fraction*). Als Beispiel bedeutet die Angabe $L_{70}B_{50}$, dass 50 % der Leuchtmittel bzw. der LEDs noch mehr als 70 % Lichtstrom besitzen. Für die Betrachtung des ungünstigsten Falles bedeutet dies, dass 50 % der LEDs noch über 70 % des Lichtstroms und 50 % der LEDs noch 1 % des Lichtstroms emittieren. Im besten Falle geben 50 % der LEDs noch 100 % und 50 % der LEDs noch 69 % Lichtstrom ab. Diese Spanne zeigt, dass bei dieser Angabe ein möglichst geringer B-Wert für eine aussagekräftige Angabe bzw. ein kleines Intervall wünschenswert ist [DIN62717] [Hei14].

Als Alternative zum B-Wert kann der C-Wert angegeben werden. Dieser beschreibt den abrupten und totalen Ausfall (engl.: *Abrupt failure fraction*) der LEDs. Heinz [Hei14] beschreibt als gebräuchliche Charakterisierungsgröße für den Bereich der Innenbeleuchtung die mittlere Lebensdauer L_0C_{50} . Diese wird als Erwartungswert für das Betriebsintervall, in dessen Zeitintervall 50 % aller Leuchtmittel einer Beleuchtungsanlage ausfallen, definiert [DIN62717] [Hei14].

Die dritte Möglichkeit zur weiteren Spezifikation erfolgt mittels des F-Wertes. Dieser gibt den allgemeinen Fehler bzw. Ausfall (engl.: *Failure fraction*) an. Am Beispiel der Angabe $L_{70}F_{50}$ wäre noch 70 % des Restlichtstroms vorhanden und mindestens 50 % der LEDs wären degradiert oder ausgefallen. Im besten Falle würden 49 % der LEDs noch 100 %, 49 % der LEDs noch 69 % und 2 % der LEDs 0 % des Lichtstroms emittieren. Für den ungünstigen Fall wiesen 42 % der LEDs 70 %, 42 % der LEDs 1 % und 16 % der LEDs 0 % Restlichtstrom auf [DIN62717].

Für die Umsetzung eines energieeffizienten und ressourcenschonenden Beleuchtungskonzepts ist eine detaillierte Betrachtung des Wartungsfaktors und die daraus abgeleitete Wartungsplanmethode unerlässlich. Wird der Wartungsfaktor zu hoch angesetzt, entsteht ein erhöhter Aufwand an Wartungsarbeiten. Reinigungen der Beleuchtungskörper sowie ein früherer Tausch von noch funktionstüchtigen Komponenten (gealterte LEDs) sind mögliche Maßnahmen und stehen im Konflikt mit einem ressourcenschonenden Umgang und der Praxis in der Landwirtschaft. Wird der Wartungsfaktor zu niedrig angesetzt, ist die Beleuchtungsanlage zu Beginn „überdimensioniert“, was in einem Konflikt mit einer energieeffizienten Betrachtung steht. Wartungsfreundlichkeit und Lebensdauerbetrachtung stehen somit in einem unmittelbaren Zusammenhang.

Als Wartungsfaktor für die nachfolgenden Betrachtungen, im Speziellen der nachfolgenden Validierung des Beleuchtungskonzepts, wird ein Wert von $WF = 0,9$ angenommen. Dies ist damit zu begrün-

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

den, dass zum einen die Stallumgebung stark verschmutzt ist und nicht erwartet wird, dass eine wesentlich stärkere Verschmutzung, die eine deutliche Reduzierung der Reflektionseigenschaften hervorruft, kurzfristig auftritt. Weiterhin stand der Versuchszeitpunkt der Validierung im Winter 2015/16 unmittelbar bevor, sodass auch keine wesentlichen Alterungseffekte der LEDs zu erwarten waren. Erschwerend kommt hinzu, dass die Kombination der ausgewählten LEDs nie zuvor in einer Leuchte verbaut und in einer Stallumgebung unter Schadgasbelastung getestet wurde, sodass auf keine verlässlichen Angaben zum Lichtstromrückgang zurückgegriffen werden kann.

5.4.2 Raumflächen

In der nachfolgenden Beleuchtungssimulation wird auf die Integration der Stalleinrichtung verzichtet, da die Erfahrungen aus dem BMBF Forschungsvorhaben „Kommunen in neuem Licht - Lichtkonzept Historischer Stadtkern Rietberg: Akzeptanz-Effizienz-Monitoring“ zeigen, dass auch mit einem reduzierten Detailgrad sehr genaue Simulationen möglich sind. Details wie beispielsweise Stangen von Verkehrsschildern, die vergleichbar zu Liegeboxenbegrenzungen sind, oder kleineres Stadtmobiliar konnten nur schwer in ihren Eigenschaften umgesetzt werden und verursachten Probleme durch punktuellen Schattenwurf oder Spiegelungen in der Gesamtauswertung [Sch12a].

In der Fachliteratur werden von der *American Society of Agricultural and Biological Engineers* [ASAE344.3] Empfehlungen zur Angabe der Reflektionseigenschaften gemacht. In dem Dokument *Lighting Systems for Agricultural Facilities* wird der Anteil der Reflektion für die Wände mit 40 bis 60 %, für die Decke mit 80 bis 90 %, für den Futtertisch mit 25 bis 45 % sowie für den Boden mit mindestens 20 % benannt [ASAE344.3].

Zur Bewertung der Verschmutzung und der damit verbundenen Reduzierung der Reflektion der einzelnen Raumflächen wurde für den Boden ein Anteil der Reflektion von durchschnittlich zehn Prozent angenommen. Eine klare Trennung in unterschiedliche Bereiche konnte nicht vorgenommen werden, da je nach Tageszeit der Bodenbelag unterschiedlich stark verschmutzt und vereinzelt Einstreumaterial der Boxen im Funktionsbereich „Laufen“ vorzufinden ist. Im Bereich des Futtertisches musste für die Simulation davon ausgegangen werden, dass Futter mit einer geringen Reflektion, wie beispielsweise Grassilage, den helleren Betonboden fast flächendeckend überlagert. Für die Decke wurde ein durchschnittlicher Wert der Reflektion von fünfzig Prozent angenommen. Die Wände wurden differenziert betrachtet. Keine Reflektion bzw. null Prozent wurde für die Südseite angenommen, da diese Längsseite des Stalls in einer offenen Bauweise ausgeführt ist und keine Reflektionsoberfläche besitzt. Die

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

Nord-, Ost- und Westseite besitzen eine Holzverkleidung. Die Farbe kann mit einem Farbton Dunkelbraun bis Dunkelgrau beschrieben werden. Zusätzliche Anbauten und Schmutz reduzieren die Reflektionseigenschaften zusätzlich, sodass ein Reflektionswert von fünfzehn Prozent gewählt wurde. Für die Flächen des Bodens, der Wände sowie der Decke wurden die Parameter Transparenz, Rauigkeit und Spiegeleffekt mit dem Wert null Prozent belegt.

5.4.3 Leuchtenanordnung

Um eine leichte Zugänglichkeit der Lichtpunkte für Reinigungs- und Wartungszwecke zu gewährleisten, wurde in Absprache mit dem zuständigen Fachpersonal des VBZL Haus Düsse der Wunsch geäußert, dass die Leuchten möglichst in zwei Reihen anzuordnen sind. Beide Reihen sollten mittig und unterhalb des Firstpunktes verlaufen. Vorteil dieser Positionierung ist neben der einfachen Zugänglichkeit für Reinigungs- und Wartungszwecke, dass die Leuchten am höchsten Punkt des Stalles platziert sind und so die größtmögliche Fläche gleichmäßig illuminieren. Die Zugänglichkeit wird durch ein mobiles Rollgerüst, welches durch den Laufgang und über den Futtertisch geschoben werden kann, erreicht. Nachteil dieser Lichtpunktpositionierung ist, dass die Firste zur natürlichen Belichtung mit lichtdurchlässigen Wellplatten aus Polyvinylchlorid (PVC) ausgeführt wurden. Bei starkem Tageslichteinfall werden durch die Leuchten die lichtdurchlässigen Flächen minimal reduziert. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Firste als kombinierte Licht- und Lüftungfirste ausgeführt sind und feinste Schmutz- und Staubpartikel durch die natürliche Thermik verstärkt an den Leuchten vorbeiziehen oder sich auf den Oberflächen ablagern.

Zur ersten Überprüfung, ob eine Reihenanordnung pro First alle auszuleuchtende Bereiche ausreichend überdeckt, kann überschlagsweise mit Hilfe der trigonometrischen Funktion Tangens die maximale Ausdehnung des Lichtkegels berechnet werden. Der maximale Lichtaustrittswinkel der Leuchte auf Basis der LVK beträgt 120 Grad. Beide Firsthöhen sind mit einer Höhe von 4,90 m vergleichbar groß. Bei der Betrachtung der Lichtpunkthöhe ist mit einzurechnen, dass keine Abpendelung der Leuchten erfolgen soll, die Lichtaustrittsfläche der Leuchte aber bauart- und montagebedingt bei circa 30 cm unterhalb des Firstpunktes liegt. Die maximale Reichweite des Lichtkegels berechnet sich wie folgt:

$$\text{Ausdehnung des Lichtkegels} = \tan 60^\circ \cdot (4,9 \text{ m} - 0,3 \text{ m}) = 7,96 \text{ m} \quad (4.1)$$

Grafisch kann die Ausdehnung des Lichtkegels wie folgt (Abbildung 5.4) vereinfacht dargestellt werden:

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

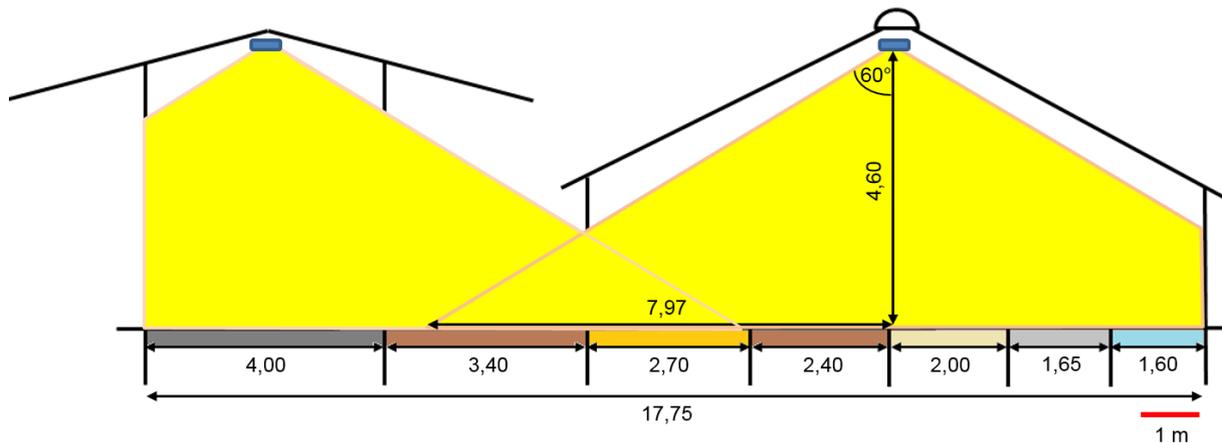


Abbildung 5.4: Skizzierung der maximalen Ausdehnung des Lichtkegels im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

5.4.4 Steuerungsgruppen und Lichtszenen

Durch das Einfügen einzelner Steuerungsgruppen und Lichtszenen können unterschiedliche Ziele verfolgt werden. Als Steuergruppe wird in DIALux 4.12 die Zusammenfassung mehrerer Leuchten verstanden. Die Einstellung der Steuerung gilt für alle Leuchten innerhalb der Steuergruppe. Zu beachten ist, dass eine Leuchte nur einer Steuergruppe zugeordnet werden kann. In der Praxis der landwirtschaftlichen Milchviehhaltung werden Steuergruppen häufig in Form von Halb- oder Drittelschaltungen umgesetzt. Bei Bedarf kann mit einer einfachen Schaltung die Hälfte oder ein Drittel der Beleuchtung hinzu- oder abgeschaltet werden. Wie bereits in Kapitel 4.1.3 Beschreibung und Funktionsweise der Bestandsbeleuchtung erwähnt, wurde eine Halbschaltung der Bestandsbeleuchtung im Versuchsstall umgesetzt. Als Vorteil ist zu nennen, dass ohne großen Aufwand der Energiebedarf gesenkt werden kann. Als Nachteil ist zu nennen, dass durch das Abschalten einer Beleuchtungsgruppe die Gleichmäßigkeit in der gesamten Stallumgebung deutlich sinkt (Tabelle 6.8). Zur Vermeidung dieses Effekts könnte eine nahezu stufenlose Helligkeitsregulierung per Dimmung vorgenommen werden. Steuergruppen können in DIALux 4.12 mit einer Einstellung von 0 bis 100 % simuliert werden. Die im Stall zu installierenden Demonstrationsleuchten verfügen zu diesem Zweck über zwei Vorschaltgeräte, die jeweils über eine separate 1 - 10 V Schnittstelle anzusteuern sind.

Lichtszenen sind in DIALux 4.12 übergreifend angeordnet und dienen zur Einstellung der Beleuchtungsintensität einer Beleuchtungssituation von einzelnen Leuchten in Kombination mit und ohne definierte Steuergruppen. Einzelleuchten und Steuergruppen können mehreren Lichtszenen zugeordnet werden. In der Praxis des landwirtschaftlichen Milchviehstalls können Lichtszenen wie beispielsweise „Tagesbeleuchtung“ und „Nachtbeleuchtung“ umgesetzt werden.

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

5.5 Erstellung eines neuen Mess- und Bewertungskonzepts

Nachdem die aufgeführten Bedürfnisse und Qualitätsmerkmale von Mensch und Rind in messbare Kenngrößen übertragen wurden und die Beschreibung der vorgestellten Versuchsumgebung erfolgte, muss in den nun folgenden Abschnitten ein Messkonzept erarbeitet werden, das speziell die zuvor definierten Anforderungen ermittelt und auf die ausgewählte Versuchsumgebung abgestimmt ist. Die Erstellung eines neuen Messkonzepts wird notwendig, da es weder in den aktuellen Normen noch in der weiteren Fachliteratur Empfehlungen zu einer bedarfsorientierten Bewertung gibt.

Bei der Erstellung dieses neuen Messkonzepts ist im ersten Schritt die Messgenauigkeit zu definieren. Es müssen unter anderem die Annahmen getroffen werden, mit welcher Genauigkeit und mit welcher Messausrüstung die Messgrößen erfasst werden sollen. Im zweiten Schritt sind geeignete Mess- und Bewertungsraster sowie prägnante Stellen in der Stallumgebung zur Beurteilung der wahrnehmungstechnischen Aspekte zu bestimmen.

5.5.1 Messgenauigkeit und verwendete Messausrüstung

Zur Beurteilung der Messgenauigkeit kann die Kenngröße des Messfehlers f_{ges} genutzt werden. Diese Größe gilt als ein statistisches Maß für Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessgeräte und beschreibt die Abweichung zu einem fehlerfreien Messgerät. Zur Bewertung der allgemeinen Messgenauigkeit sind neben der Gesamtkenngröße f_{ges} vor allem auch die Messmethode sowie die -situation entscheidend. Für physikalische Photometer, die als Messgeräte für Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessungen verwendet werden, benennt die DIN-Norm 5032-7 vier verschiedene Klasseneinteilungen. Geräte der Klasse L werden ausschließlich für Messaufgaben im Labor empfohlen. Für Messungen im Feld werden Photometer der Klasse A, der Klasse B und der Klasse C benannt (Tabelle 5.4) [DIN5032-7].

Tabelle 5.4: Normative Klasseneinteilung physikalischer Photometer [DIN5032-7]

Klasse	Beschreibung	f_{ges} für Beleuchtungsstärke-messgeräte	f_{ges} für Leuchtdichtemessgeräte
L	Geräte mit höchster Güte für die Anwendung unter Laborbedingungen	3 %	5 %
A	Geräte mit hoher Güte	5 %	7,5 %
B	Geräte mit mittlerer Güte	10 %	10 %
C	Geräte mit geringer Güte	20 %	20 %

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

Die DIN-Norm 5035-6 ordnet weitergehend der Klasseneinteilung die folgenden Anwendungen zu: „Präzisionsmessungen“ der Klasse A, „Betriebsmessungen“ der Klasse B sowie „Orientierende Messungen“ der Klasse C [DIN5035-6].

Zur Erlangung einer aussagekräftigen Messung in der Stallumgebung wurden für die weiteren Betrachtungen kalibrierte Beleuchtungsstärkemessinstrumente des Typs Gossen Mavolux 5032 B USB sowie ein Leuchtdichtemessgerät des Typs Konica Minolta LS-110 verwendet. Alle Messinstrumente sind der Güteklasse B zugeteilt. Die Auswahl dieser Messinstrumente erfolgte unter anderem auf Grundlage der sehr genauen Anpassung an die Hellempfindlichkeitskurve ($V(\lambda)$ -Anpassung) im kurzwelligen Bereich.

Schon geringe Neigungen des Photometerkopfs bzw. Messkopfs bei Beleuchtungsstärkemessinstrumenten bewirken große Auswirkungen auf die Messgenauigkeit, sodass ein Beleuchtungsstativ für die Messdurchführung zu nutzen ist. Um Fehlansichtungen bei einer Beleuchtungsstärkemessung zu vermeiden, wurde ein neues Messstativ entwickelt (Abbildung 5.5). Der Photometerkopf des Mavolux 5032 B USB sowie die Anzeigeeinheit eines Beleuchtungsstärkemessinstruments können an dem Stativ stabil und parallel fixiert werden. Zusätzlich wurde eine Dosenlibelle neben der Anzeigeeinheit angebracht, sodass eine horizontale Ausrichtung des gesamten Statives permanent kontrolliert und sichergestellt werden kann (Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7).



Abbildung 5.5 (links): Beleuchtungsstärkemessinstrument und Stativ in der Frontansicht [eigene Aufnahme]

Abbildung 5.6 (mittig): Detailaufnahme der Anzeigeeinheit des Beleuchtungsstärkemessinstruments und der angebrachten Dosenlibelle [eigene Aufnahme]

Abbildung 5.7 (rechts): Einsatz des Beleuchtungsstärkemessinstruments und des Statives für Beleuchtungsstärkemessungen (Demonstrationszweck am Tag) [eigene Aufnahme]

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

Mittels einer Gewindestange lässt sich der Photometerkopf sehr genau in der Messpunkthöhe (Z-Achse) einstellen. Für die Stallumgebung wurde eine Messhöhe von 200 mm gewählt, da eine bodennahe Messung unterhalb von 200 mm durch Rückstände von Stalldung auf Spaltenboden oder Planflächen stark beeinflusst wird und der Photometerkopf stark verschmutzen kann. In Bezug auf die Stallhygiene wurde das Stativ aus Edelstahl und in einer modularen Bauweise konstruiert. Das Messinstrument lässt sich in kurzer Zeit vom Stativ demontieren und gesondert vom Stativ reinigen sowie desinfizieren.

Für die messtechnische Erfassung der Leuchtdichte wurde das tragbare Leuchtdichtemessgerät Konica Minolta LS-110 verwendet. Kalibriert nach der Klassifizierung B verfügt es über einen standardisierten Messwinkel von einem Grad. Bei der Durchführung einer Messung ist zu beachten, dass die minimale Entfernungsdistanz, die der Hersteller bei diesem Leuchtdichtemessinstrument ohne Zusatzlinsen mit 1.014 mm angibt [Kon13], nicht unterschritten wird. Bei der Erfassung der Leuchtdichte sollte sich der Messwinkel an der Perspektive und die Messentfernung an dem Standpunkt des Betrachters (Mensch und/oder Rind) orientieren.

Zur Durchführung von reproduzierbaren Messungen wurden speziell für die Vermessung hergestellte Messpunktmarkierungen verwendet. Auf Markierungsstifte oder Sprays, die Rückstände hinterlassen und so die Tiergesundheit durch Ablecken der Markierung negativ beeinflussen können, wurde verzichtet. Die quadratischen Aluminiumplättchen wurden zur besseren Erkennbarkeit in dem Farbton Signalrot pulverbeschichtet. Vorteil dieser Markierungsplättchen ist, dass diese schnell und präzise verlegt werden können. Als ein weiterer Vorteil der Messpunktmarkierungen ist zu nennen, dass die markierten Stellen auf Bildern, die zu Dokumentationszwecken dienen, deutlich zu erkennen sind (Abbildung 5.8 und Abbildung 5.9).

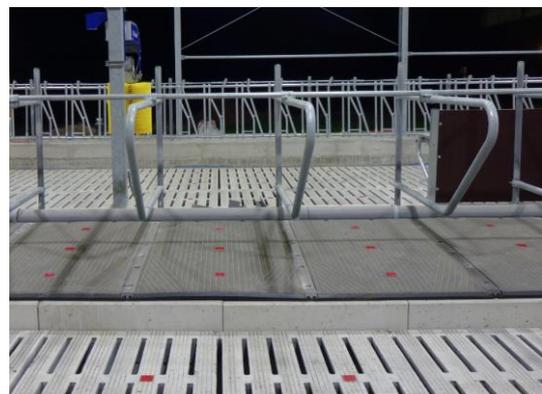


Abbildung 5.8 (links): Ausgelegte Messpunktmarkierungen für Beleuchtungsstärkemessungen im Funktionsbereich „Fressen“ [eigene Aufnahme]

Abbildung 5.9 (rechts): Ausgelegte Messpunktmarkierungen für Beleuchtungsstärkemessungen in den Funktionsbereichen „Liegen“ und „Laufen“ [eigene Aufnahme]

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

Bei der Durchführung der Messung sollte darauf geachtet werden, dass die Ventilatoren ausgeschaltet und die Messungen nicht durch einen rotierenden Schattenwurf beeinflusst werden. Der Einfluss von Fremdlicht aus der Umgebung, stationären Verschattungen, stark reflektierender Flächen oder der Stalleinrichtung sollte berücksichtigt und zusätzlich mit allen erkennbaren Beeinträchtigungen dokumentiert werden.

5.5.2 Normative Anforderungen an ein Messraster und deren Übertragbarkeit auf den Anwendungsfall der Milchviehhaltung

In der Lichtmesstechnik sind zur Definition eines Messrasters verschiedene Anwendungsfälle mit unterschiedlichen Ansätzen zur Berechnung vorgesehen. Exemplarisch sind normative Empfehlungen für die Straßenbeleuchtung (DIN EN 13201), die Beleuchtung von Arbeitsstätten (DIN EN 12464) oder die Sportstättenbeleuchtung (DIN EN 12193) zu nennen. Durch die unterschiedlichen Größenverhältnisse der landwirtschaftlichen Milchviehställe gegenüber der Situationen und Vorgaben aus der Straßen-, Arbeitsstätten- oder Sportstättenbeleuchtung können diese nicht einfach auf den Anwendungsfall der Milchviehhaltung übertragen werden. Zur Bewertung unterschiedlicher Messrastergrößen und der anschließenden Empfehlung eines geeigneten Messrasters werden im Verlauf verschiedene Beleuchtungssimulationen kurz vorgestellt und verglichen.

Zur Beurteilung der Aussagekraft einer geeigneten Messrastergröße wurden verschiedene Beleuchtungssimulationen mit dem Programm DIALux 4.12 durchgeführt. Als erstes Beispiel erfolgt die Betrachtung eines knapp 1.000 m² großen Milchviehstalls. Simuliert wurde eine 52,0 m lange und 18,5 m breite Bewertungsfläche, die den gesamten Lauf-, Fress- und Liegebereich eines Milchviehstalls umfasst.

Im ersten Schritt wurde die Bewertungsfläche mit einer kleiner werdenden Rastergröße in einer Bewertungshöhe von 200 mm eingefügt. Die Rasterform wurde quadratisch und nicht deckungsgleich mit dem Raster der Leuchtenanordnung gewählt. Ab einer Rastergröße kleiner gleich 0,1 m konnten keine Abweichungen bei den Simulationsergebnissen mehr festgestellt werden.

Im zweiten Schritt wurden die Simulationsergebnisse bei der Rastergröße von 0,1 m als Bezugsgröße festgelegt und mit den Seitenlängen des Rasters von 0,25 m, 0,5 m, 1,0 m, 2,5 m, 5,0 m, 7,5 m, 10 m sowie 12,5 m verglichen. Zusätzlich wurden mittig im Stall einmal zwei sowie einmal ein Bewertungspunkt gleichmäßig über die Mittelsenkrechte der kürzeren Seitenlänge verteilt. Im Fokus der anschließenden Betrachtung liegen die mittlere (E_m), die minimale (E_{min}) und die maximale Beleuchtungsstärke (E_{max}) sowie die daraus berechneten Gleichmäßigkeiten g_1 und g_2 . Die mittlere Beleuchtungsstärke ist

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

definiert als arithmetisches Mittel der Punktbeleuchtungsstärken auf dem eingefügten bzw. definierten und ausgewählten Raster. Das Verhältnis der minimalen zur mittleren Beleuchtungsstärke ergibt die Gleichmäßigkeit g_1 . Aus dem Verhältnis der minimalen zur maximalen Beleuchtungsstärke berechnet sich die Gleichmäßigkeit g_2 (Tabelle 5.5).

Vor der Bewertung der Ergebnisse ist zu erwähnen, dass bei der Beleuchtungssimulation, die als Bezug genommen wurde, eine für einen landwirtschaftlichen Milchviehstall sehr hohe Gleichmäßigkeit mit den Werten von $g_1 = 0,49$ und $g_2 = 0,37$ vorlag. Da in vielen Situationen mittig eine Leuchte positioniert wird und unterhalb dieser die höchsten Werte der Beleuchtungsstärke erreicht werden, ist die prozentuale Abweichung bei einem Bewertungspunkt oftmals wesentlich höher. Im ungünstigsten Falle wäre in diesem Beispiel bei einer maximalen Beleuchtungsstärke von 215 lx eine Abweichung von knapp 25 % zu erwarten. Aus diesem Grund ist zu beachten, dass das Messraster wie bereits zuvor erwähnt nicht mit dem Raster der Leuchten korreliert.

Tabelle 5.5: Lichttechnische Auswertung der prozentualen Abweichungen verschiedener Messraster zu einem Referenzmessraster mit der Messrastergröße 0,1 m x 0,1 m am Beispiel eines Musterstalls

Messrastergröße	Anzahl der Bewertungspunkte	E_m	E_{min}	E_{max}	g_1	g_2
0,10 m x 0,10 m	520 x 185	0%	0%	0%	0%	0%
0,25 m x 0,25 m	208 x 74	0%	1%	0%	2%	0%
0,50 m x 0,50 m	104 x 37	0%	4%	0%	4%	3%
1,00 m x 1,00 m	52 x 19	0%	9%	0%	9%	10%
2,50 m x 2,50 m	21 x 7	1%	22%	-2%	21%	23%
5,00 m x 5,00 m	10 x 4	2%	32%	-4%	31%	35%
7,50 m x 7,50 m	7 x 2	5%	44%	-5%	41%	46%
10,0 m x 10,0 m	5 x 2	6%	44%	-5%	41%	47%
12,5 m x 12,5 m	4 x 1	4%	52%	-26%	51%	62%
2 Punkte mittig	2 x 1	4%	53%	-26%	51%	63%
1 Punkt mittig	1 x 1	4%	53%	-27%	51%	63%

Im nächsten Schritt wurden zur Übertragung der Ergebnisse auf weitere Stallformen und Leuchten zusätzliche Beleuchtungssimulationen durchgeführt. Bei den Leuchten kamen neben einer LED-Leuchte mit einem 120 Grad großen Abstrahlwinkel, eine Ausführung mit einem 60 Grad großen Abstrahlwinkel, ein Hallentiefstrahler mit einer runden Abstrahlcharakteristik auf Basis der LED-Technologie, eine konventionelle Langfeldleuchte, die simulationstechnisch mit zwei 58 W Leuchtstofflampen bestückt wurde, sowie zwei konventionelle Hochdruckmetaldampfleuchten, die speziell für den Einsatzbereich Milchviehstall konzipiert wurden und mit 250 W und 400 W Leuchtmittel ausgestattet

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

wurden, zum Einsatz. Als Musterställe dienten die Gebäudemodelle MV 25001, MV 25002 sowie MV 27002, die aus dem Programm Baukost 2.9 des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL, Stand Januar 2014) stammen. Alle Gebäudemodelle sind EG-ökokonform und mit einem Auslauf, der nicht weiter betrachtet wurde, vorgesehen. Der Musterstall MV (Milchvieh) 25001 stellt einen zweireihigen Boxenlaufstall mit 58 Tierplätzen dar. Der Musterstall MV 25002 ist als einreihiger Tretmiststall mit 64 Tierplätzen und der Musterstall MV 27002 als doppel-zweireihiger Boxenlaufstall mit 108 Tierplätzen ausgelegt.

In der nachfolgenden Tabelle 5.6 werden die prozentualen Abweichungen der Mittelwerte aller Versionen dargestellt. Die einzelnen Abweichungen beziehen sich wie beim Beispiel zuvor auf die Messrastergröße 0,1 m x 0,1 m. Insgesamt besteht jeder gemittelte Wert aus den Einzelwerten der zuvor genannten verschiedenen Versionen. Die 19 Versionen entstehen durch das Beispiel des Stalles mit den knapp 1.000 m² Grundfläche plus die Kombinationen aus den sechs Leuchten in drei verschiedenen Stallformen.

Tabelle 5.6: Lichttechnische Auswertung der durchschnittlichen prozentualen Abweichungen der Mittelwerte Beleuchtungsstärke und Gleichmäßigkeiten über ausgewählte Stallversionen

Messrastergröße	E_m	E_{min}	E_{max}	g_1	g_2
0,10 m x 0,10 m	0%	0%	0%	0%	0%
0,25 m x 0,25 m	0%	6%	0%	6%	6%
0,50 m x 0,50 m	0%	15%	-1%	15%	16%
1,00 m x 1,00 m	0%	33%	-3%	33%	35%
2,50 m x 2,50 m	1%	65%	-7%	64%	70%
5,00 m x 5,00 m	7%	95%	-15%	91%	102%
7,50 m x 7,50 m	11%	107%	-21%	101%	114%
10,0 m x 10,0 m	11%	112%	-32%	106%	122%
12,5 m x 12,5 m	6%	117%	-55%	115%	133%
2 Punkte mittig	13%	126%	-58%	122%	141%
1 Punkt mittig	13%	127%	-65%	123%	144%

Vergleichend zur ersten Simulation wurde in den achtzehn folgenden Simulationen eine hohe Gleichmäßigkeit angestrebt. Bei der Bewertung wurde erneut darauf geachtet, dass die Bewertungspunkte bzw. die -raster und die Raster- bzw. die Linienanordnung der Leuchten nicht übereinanderlagen.

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

5.5.3 Definition der Bewertungsflächen, Berechnungsraster und Messfelder

Für die Bewertung der Beleuchtungssituation wurden elf Berechnungsflächen in die Beleuchtungssimulation eingefügt. Die Berechnungsflächen wurden zur Dimensionierung der Beleuchtungssituation benötigt. Bei der Betrachtung dieser Flächen wurden keine Stalleinbauten wie beispielsweise Liegeboxen berücksichtigt. Alle Bewertungspunkte wurden automatisch in den Berechnungsflächen durch das Programm DIALux positioniert. Eine manuelle Anpassung der Berechnungspunkte war nicht möglich (Tabelle 5.7).

Tabelle 5.7: Bezeichnung, Lage und Größe (x-, y- und z-Werte) der elf eingefügten Berechnungsflächen im simulierten Versuchsstall VBZL Haus

Bezeichnung der Berechnungsflächen	Position des Objektsprungs [m]			Größe der Berechnungsfläche [m]	
	x	y	z	x	Y
Besuchergang	18,400	16,950	0,200	26,600	0,600
Kopfbereich	18,400	15,325	0,200	26,600	0,650
Hochboxen	18,400	13,500	0,200	26,600	1,000
Laufbereich H-T	18,400	11,300	0,200	26,600	1,700
Tiefboxen 1-6	10,300	8,750	0,200	5,900	1,700
Tiefboxen 7-18	23,000	8,750	0,200	12,800	1,700
Laufbereich T-F	18,400	5,700	0,200	26,600	2,400
Futtertisch	16,100	2,000	0,200	31,200	3,000
Hauptgebäude	18,400	12,575	0,200	26,600	9,350
Anbau	16,100	3,700	0,200	31,200	6,400
Nutzfläche gesamt	17,150	8,550	0,200	31,200	16,750

Im zweiten Schritt wurden unter Berücksichtigung der Stalleinbauten vier Messfelder definiert (Tabelle 5.8). Die eingefügten Berechnungspunkte wurden manuell in Anzahl und Position so gewählt, dass diese bei allen lichttechnischen Vermessungen der Stallumgebung reproduzierbar und hinreichend genau erfasst werden konnten. Die Definition der Messfelder wurde notwendig, da nur so die messtechnische Überprüfung in einem angemessenen Zeitintervall und unter vergleichbaren Umgebungsbedingungen durchgeführt werden konnte. Angelehnt an die zuvor erläuterten Ausführungen wurde eine Messrastergröße von circa 1,0 m x 1,0 m gewählt. Insgesamt wurden je Messfeld 68 Mess- und Bewertungspunkte definiert.

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

Tabelle 5.8: Bezeichnung, Lage und Größe (x-, y- und z-Werte) der vier eingefügten Messfelder im simulierten Versuchsstall VBZL Haus Düsse

Bezeichnung der Berechnungsflächen	Position des Objektsprungs [m]			Größe der Berechnungsfläche [m]	
	X	y	z	X	Y
Messfeld 1	11,500	9,000	0,200	4,600	14,150
Messfeld 2	16,100	9,000	0,200	4,600	14,150
Messfeld 3	20,700	9,000	0,200	4,600	14,150
Messfeld 4	25,300	9,000	0,200	4,600	14,150

Zur vereinfachten Vergleichbarkeit zwischen den Werten der Berechnungsflächen und den definierten Messfeldern wurde jedes Messfeld mit jeweils sechs weiteren Berechnungsrastern unterteilt (Tabelle 5.9). Die Definition der Berechnungsraster erfolgte vergleichbar zu der Definition der Berechnungsflächen als repräsentativer Querschnitt der gesamten Stallumgebung und in Anlehnung an die unterschiedlichen Funktionsbereiche (FB) des Stalls. Eine Drehung der Flächen in x-, y- oder z-Richtung wurde nicht vorgenommen, sodass im Verlauf auf die Angaben zur Drehung verzichtet werden kann.

Tabelle 5.9: Bezeichnung, Lage, Größe (x-, y- und z-Werte) und Anzahl der Berechnungsraster sowie die Zuordnung der Berechnungspunkte am Beispiel des definierten Messfelds 1 im Versuchsstall VBZL Haus Düsse

Bezeichnung des Berechnungsrasters	Position des Objektsprungs [m]			Größe des Berechnungsraster [m]		Anzahl der Berechnungspunkte	
	x	y	Z	x	y	x	y
Kopfbereich	11,500	15,325	0,200	4,600	0,650	4	1
Hochboxen	11,500	13,500	0,200	4,600	1,000	4	3
Laufbereich H-T	11,500	11,300	0,200	4,600	1,700	4	3
Tiefboxen	11,500	8,750	0,200	4,600	1,700	4	4
Laufbereich T-F	11,500	5,700	0,200	4,600	2,400	4	4
Futtertisch	11,500	3,500	0,200	4,600	1,000	4	2

Exemplarisch ist in Tabelle 5.9 die Position und Größe der Berechnungsraster sowie die Anzahl der Berechnungspunkte, deren Besonderheit die gleichmäßige Aufteilung innerhalb eines Berechnungsrasters ist, für das Messfeld 1 aufgeführt. Für Messfeld 2, Messfeld 3 und Messfeld 4 erfolgte jeweils eine Verschiebung der Lage von $x = 11,500$ m auf $x = 16,100$ m, $x = 20,700$ m sowie auf $x = 25,300$ m. Die Lage in der y- und z-Koordinate sowie die Anzahl und Positionierung der Berechnungspunkte wurde gleichbleibend zu den Werten aus Messfeld 1 definiert.

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

Grafisch lassen sich die Berechnungsflächen und -raster sowie die vier Messfelder wie folgt im Grundriss skizzieren (Abbildung 5.10).

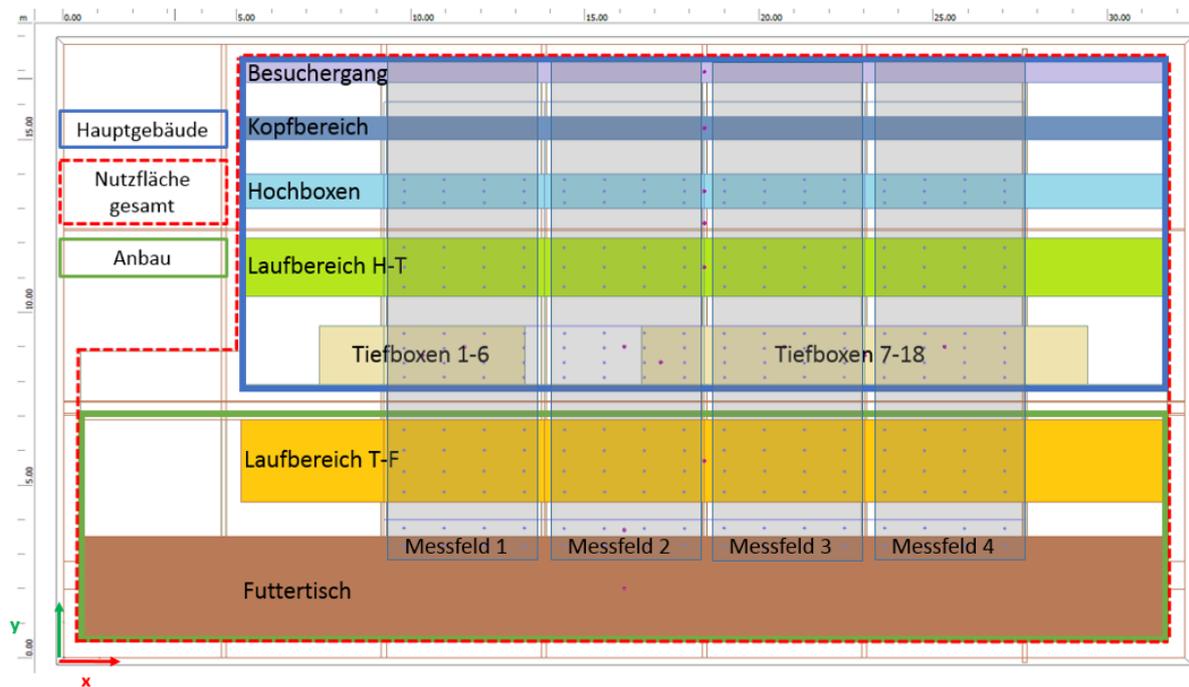


Abbildung 5.10: Skizzierung der eingefügten Berechnungsflächen und -raster sowie der vier Messfelder im simulierten Versuchstall VBZL Haus [eigene Darstellung]

5.5.4 Definition prägnanter Stellen zur Erfassung und Bewertung der Leuchtdichte, der Leuchtdichteverteilung sowie der daraus zu berechnenden Kontraste

Innerhalb der Stallumgebung wird wie bereits in den definierten Anforderungen beschrieben (siehe Kapitel 5.1 Anforderungen an ein bedarfsorientiertes Beleuchtungskonzept) eine möglichst gleichmäßige Beleuchtungssituation gewünscht. Eine Unterscheidung der Beleuchtung in unterschiedliche Funktionsbereiche erfolgt nicht. Zur Beurteilung der Stallsituation werden im Verlauf prägnante Stellen definiert und den unterschiedlichen Funktionsbereichen „Fressen“, „Liegen“ und „Laufen“ zugeordnet (Tabelle 5.10 und Abbildung 5.11). Die Zuordnung dient ausschließlich dem schnellen Auffinden der prägnanten Stelle. Diese Stellen befinden sich am Fressgitter, an der Tränke, in einer Hoch- und in einer Tiefbox sowie im Bereich des Durchgangs zwischen zwei Tiefboxen.

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

Tabelle 5.10: Definition der prägnanten Stellen mit Zuordnung der Funktionsbereiche und den gestellten Anforderungen

Funktionsbereich	Prägnante Stellen	Anforderung
• „Fressen“	• (1) Fressgitter	• Erkennen des Fressgitters
	• (2) Tränke	• Erkennen der Trankewanne
• „Liegen“	• (3) Hochbox	• Erkennen der Stufe • Erkennen der Liegeboxenabgrenzung
	• (4) Tiefbox	• Erkennen der Stufe
• „Laufen“	• (5) Durchgang zwischen den Tiefboxen Nr. 6 und Nr. 7	• Erkennen der Wandbegrenzungen

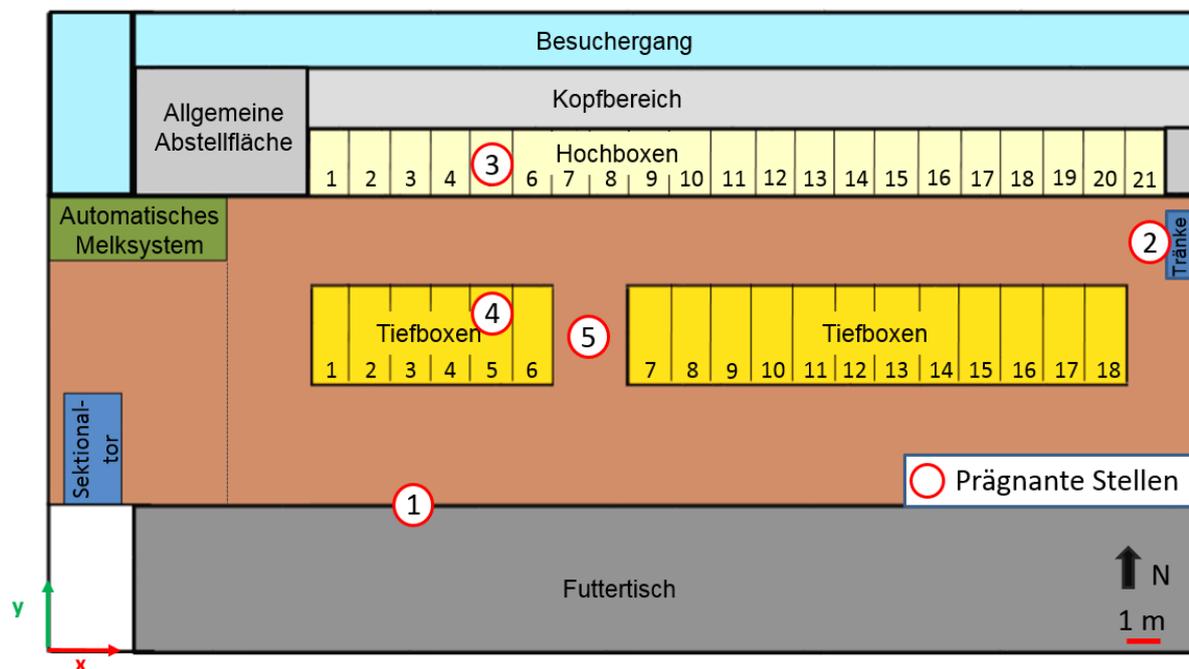


Abbildung 5.11: Skizzierung der prägnanten Stellen im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

Im Funktionsbereich „Fressen“ muss das Rind die Abgrenzung zwischen dem Futtertisch und dem Laufbereich erkennen. In der ausgewählten Versuchsumgebung erfolgt die Abtrennung durch ein Fressgitter (Pos. 1) sowie einer Stufe (Pos. 2 - Pos. 4), sodass der Futtertisch (Pos. 2) gegenüber der Lauffläche (Pos. 4) leicht erhöht ist (Abbildung 5.12).

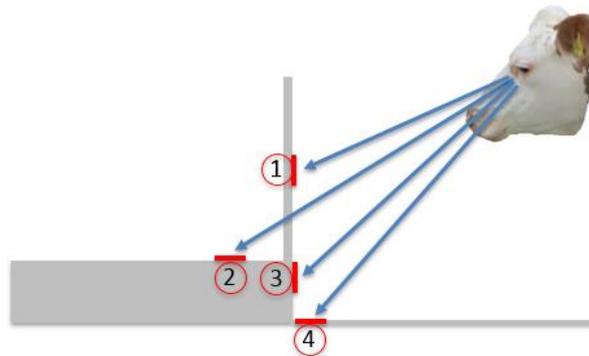


Abbildung 5.12: Skizzierung der prägnanten Stelle „Fressgitter“ Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

Das Rind muss neben dem Fressplatz im FB „Fressen“ auch die Tränke aus weiter Entfernung sicher und schnell erkennen. Hierzu sollte sich die Tränke deutlich vom Hintergrund hervorheben. In der ausgewählten Stallumgebung ist die zu betrachtende Tränke in dem Material Edelstahl und in der Variante Trogtränke mit Wandhalterung ausgeführt. Im Nahbereich sollte das Rind die Unterscheidung zwischen Oberfläche der Tränke (Pos. 2) und der Wand (Pos. 1) gut unterscheiden können (Abbildung 5.13).

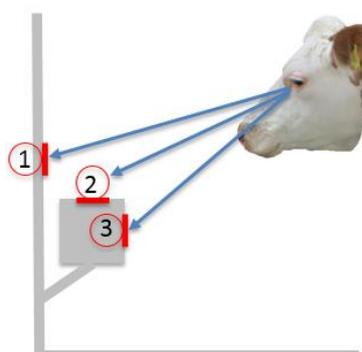


Abbildung 5.13: Skizzierung der prägnanten Stelle „Tränke“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

Durch die Besonderheit der ausgewählten Stallumgebung sind für den FB „Liegen“ prägnante Stellen an und in einer Hochbox sowie in einer Tiefbox zu beurteilen. Zum Betreten der beiden Liegeboxvarianten muss eine Stufe erkannt und überwunden werden. Die obere Trittstufe (Pos.1) und die untere Trittstufe (Pos. 3) sollte sich deutlich gegenüber der Setzstufe (Pos. 2) unterscheiden (Abbildung 5.14).

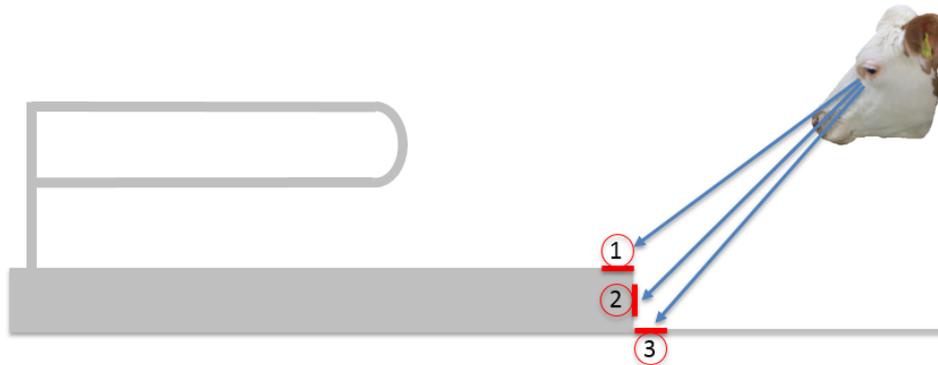


Abbildung 5.14: Skizzierung der prägnanten Stelle „Liegebox“ (Betreten) im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

Liegt oder ruht das Rind in einer der Hochboxen und schaut nach vorne, erblickt es die Außenwand des Stallgebäudes (Pos. 1) sowie eine Abtrennung zwischen dem Kopfbereich und dem Besuchergang (Pos. 2). Die Abtrennung, die mittels drei festmontierter Querrohre erfolgt, kann von den Rindern nicht erreicht werden und dient vor allem der räumlichen Trennung zwischen Besucher und Rind. Schaut das Rind in einer Tiefbox nach vorne, erblickt es das Fressgitter (Pos. 3) (Abbildung 5.15).

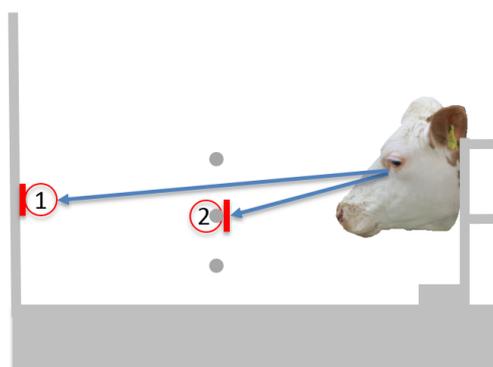


Abbildung 5.15: Skizzierung der prägnanten Stelle „Liegebox“ (Ruhen) im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

Im Funktionsbereich „Laufen“ wird der Durchgang zwischen der Tiefbox Nr. 6 und der Tiefbox Nr. 7 ausgewählt. Diese zentrale Stelle wird sehr häufig von den Rindern passiert und ist eine von drei Möglichkeiten, um von den Liegeboxen zu einem Fressplatz zu gelangen. Zu erkennen ist an dieser Stelle die Wandbegrenzung (Pos. 1), die sich vom Bodenbelag (Pos. 2) optisch hervorheben sollte (Abbildung 5.16).

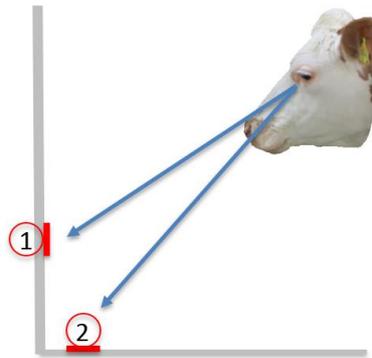


Abbildung 5.16: Skizzierung der prägnanten Stelle „Durchgang“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

5.6 Tierbeobachtung

Um den Einfluss der Beleuchtung auf das Verhalten der Rinder zu beurteilen, wurden im letzten Schritt der Validierung Verhaltensuntersuchungen durchgeführt. Die ausgewählten Fokustiere wurden mit ALT (Aktivität, Lage und Temperatur) - Pedometern des Ingenieurbüros Roland Holz aus Falkenhagen in Deutschland ausgestattet. Die Pedometer verfügten über eine Übertragungreichweite von 25 m, einer Speicherkapazität von 8.192 Datensätzen und betrug in den Abmessungen 60 mm x 50 mm x 2 mm (Länge x Breite x Höhe). Das Gewicht wurde laut Datenblatt mit 150 g (ohne Gurt) angegeben [Ibs19]. Zur Datenübertragung wurde eine Ausleseantenne im Wartebereich des AMS installiert. Während der Versuchsphasen wurde für Fokustierbeobachtungen eine kontinuierliche Aufzeichnung mit insgesamt sechs Überwachungskameras des Typs Mobotix D16A DualDome durchgeführt. Jede der Überwachungskameras verfügte über zwei Objektive, zwei HiRes-Bildsensoren, einen internen MicroSD-Speicher sowie über ein zwölf Megapixel großes Doppelbild [Mob19]. Die Daten zur Milchgewinnung wurden durch das automatische Melksystem Astronaut der Fa. Lely erfasst und in dem Managementsystem *Time for Cows* (T4C) der Fa. Lely dargestellt. Die Tierbeobachtungen dieser Arbeit erfolgten parallel zu den Untersuchungen der LfL Tier und Technik im Forschungsvorhaben

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

I_LED_Milchvieh. Die Untersuchungen der LfL Tier und Technik beinhalteten die Auswertung der Pedometerdaten sowie die Verhaltensbeobachtungen einzelner Fokustiere in der gesamten Stallumgebung. Maßgeblich wurde das Aktivitätsverhalten (Aktivitätseinheiten pro Stunde) sowie das Ruhe- und Liegeverhalten analysiert. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Verhaltensbeobachtung aller 18 Fokustiere in einem zuvor mit der LfL Tier und Technik abgestimmten und definierten Teilbereich der Stallumgebung. Ausgewertet wurden in dem ausgewählten Fokusbereich die Verhaltensweisen Stehen, Komfort- und Sozialverhalten.

5.6.1 Ausgewählte Fokustiere

Für die Versuchsdurchführung wurden in Zusammenarbeit mit der LFL Tier und Technik und dem zuständigen Stallmeister des Versuchsstalls 18 Fokustiere aus der dynamischen Herde, die im Maximum 39 Rinder umfasste, ausgewählt. Bei der Auswahl der Fokustiere wurde auf eine „gute Durchmischung der Rasse Holstein“ geachtet. Ausgewählt wurden sowohl rotbunte Holstein als auch schwarzbunte Holstein. Rinder anderer Rassen wie beispielsweise Braunvieh, Rotvieh, Jersey und Fleckvieh wurden nicht weiter betrachtet. Zu erwähnen ist jedoch, dass Einzeltiere der zuvor genannten Rassen Bestandteil der dynamischen Herde waren. Von der Altersstruktur wurden vermehrt Rinder, die sich in der ersten, zweiten und dritten Laktation befanden, ausgewählt. Von den älteren Tieren konnte jeweils ein Rind, das sich in der vierten, fünften und sechsten Laktation befand, die Auswahl vervollständigen.

Bei der Auswahl der Fokustiere wurde als erstes Kriterium die Anzahl der „Tage in Milch“ beachtet. Bei den Rindern, die sich mehr als 200 „Tage in Milch“ befanden, wären wahrscheinlich in der dritten Versuchsphase trockengestellt worden. Als zweites Auswahlkriterium wurde eine Bewertung der Lahmheit vorgenommen (*Locomotion Score*). Nur Rinder mit der Bewertungsnote 1 (normal) und der Bewertungsnote 2 (leicht lahm) wurden weiter betrachtet. Mittelmäßig lahme Rinder (Bewertungsnote 3), lahme Rinder (Bewertungsnote 4) und schwer lahme Rinder (Bewertungsnote 5) wurden nicht weiter betrachtet. Als letztes Kriterium der Tierausswahl erfolgte eine Bewertung zur eindeutigen Erkennbarkeit auf den Videoaufnahmen. Jedes Rind sollte anhand der unterschiedlichen Fellfärbung eindeutig zu erkennen sein. Auf zusätzliche Tiermarkierungen konnte somit verzichtet werden. Die Bewertung des Rangs wurde in Rücksprache mit den Mitarbeitern des VBZL Haus Düsse vorgenommen. Die Daten der Milchgewinnung sowie die Angaben zur Laktation wurden dem AMS entnommen. Mit dem Stichtag des 04.11.15 setzte sich die Gruppe der Fokustiere wie folgt zusammen (Tabelle 5.11).

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

Tabelle 5.11: Darstellung der ausgewählten Fokustiere im Versuchsstall VBZL Haus Düsse

Nr.	Farbrichtung	Geburtsdatum	Rang	Laktation	Tage in Milch	Milchleistung*
329	Rotbunt	28.04.2008	mittel	6	9	20,2
341	Schwarzbunt	04.07.2008	hoch	5	162	46,5
386	Schwarzbunt	24.04.2009	mittel	4	99	42,2
504	Schwarzbunt	06.02.2011	mittel	3	128	40,0
507	Schwarzbunt	19.02.2011	mittel	3	6	29,7
569	Schwarzbunt	04.08.2011	mittel	3	32	36,3
597	Schwarzbunt	10.02.2012	hoch	2	154	46,7
604	Schwarzbunt	23.02.2012	mittel	3	81	41,4
610	Rotbunt	02.03.2012	mittel	2	13	29,9
616	Schwarzbunt	27.04.2012	mittel	2	149	41,2
621	Schwarzbunt	29.05.2012	mittel	2	109	41,8
631	Rotbunt	14.07.2012	niedrig	2	84	32,8
652	Schwarzbunt	29.09.2012	hoch	2	18	34,4
702	Schwarzbunt	11.05.2013	mittel	1	165	32,7
706	Schwarzbunt	28.05.2013	mittel	1	188	31,4
712	Schwarzbunt	29.06.2013	mittel	1	39	20,3
723	Schwarzbunt	26.09.2013	niedrig	1	57	21,9
725	Schwarzbunt	01.10.2013	hoch	1	59	21,8

* Durchschnittliche Tagesproduktion in der aktuellen Laktation [kg]

5.6.2 Ausgewählter Beobachtungsbereich

Der Aufenthalts- und Wartebereich, in dem die Rinder beobachtet wurden, umfasste eine Fläche von 25,5 m² und wurde durch das AMS, die Wand zum angrenzenden Stallbüro sowie eine um zwei Seiten umlaufende Stufe von knapp 20 cm Höhe begrenzt (Abbildung 5.17). Dieser Bereich wurde ausgewählt, da es sich um einen zentralen Stallbereich handelt. Aus jedem Funktionsbereich konnte der Beobachtungsbereich erreicht werden und mit Verlassen des Beobachtungsbereichs konnten die Rinder jeden Funktionsbereich erreichen. Zusätzlich musste jedes Rind nach Abschluss des Melkvorgangs diesen Bereich durchqueren.

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

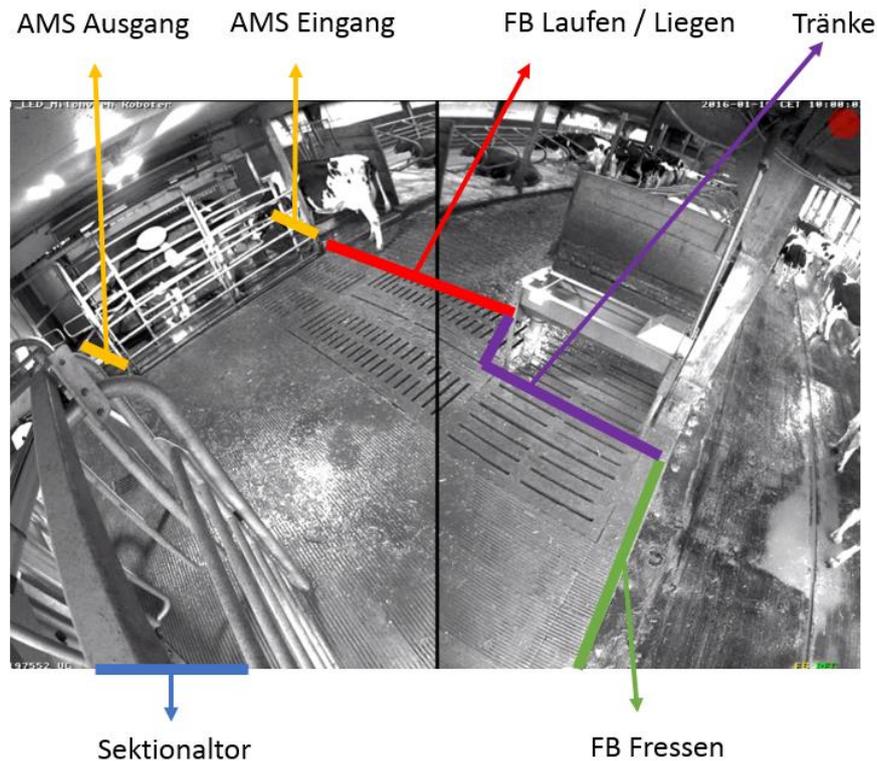


Abbildung 5.17: Skizzierung der Zu- und Abgangsmöglichkeiten der ausgewählten Beobachtungsfläche im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

Der Bodenbelag war zur Hälfte planbefestigt und in einem weiteren Teilbereich mit Spaltenboden ausgestattet. Die Fokustiere konnten, wie auch alle anderen Rinder der dynamischen Herde, den Beobachtungsbereich über verschiedene „Zugänge“ betreten. Die Zugangsmöglichkeit bestand durch das Verlassen des AMS, das Verlassen des Funktionsbereichs Laufen/Liegen (FB Laufen/Liegen), das Verlassen der Tränke sowie das Verlassen des Funktionsbereichs Fressen (FB Fressen). Der Bereich galt als erreicht, sobald der Fuß eines Fokustieres den Bereich betreten hat. Als Alternative galt der Bereich als erreicht, wenn das Fokustier den Tränkevorgang beendet hat und die Tränke nicht mehr berührte. Zum Verlassen des Beobachtungsbereichs konnten die Rinder den FB Laufen/Liegen betreten, zur Tränke gehen, den FB Fressen oder das Sektionaltor betreten. Als Endkriterium der Aktionserfassung galt, dass das Rind mit einem Fuß den definierten Bereich verlassen hat oder alternativ die Tränke berührte. Durch ein schwenkbares Gitter ließ sich der Bereich zu Reinigungszwecken sowie für den Nachtrieb einzelner Rinder absperren und wurde im Zugang beschränkt. In den nachfolgenden Betrachtungen werden nur Aufenthalte innerhalb des definierten Bereiches betrachtet, dessen Intervall zwischen Betreten und Verlassen mindestens 30 s betrug. Kürzere Intervalle wurden nicht berücksichtigt.

Die Versuchsbeobachtungen erfolgten über drei Hauptversuchsphasen. Die erste Phase umfasste die Beleuchtungssituation mit Natriumdampfbeleuchtung. In der zweiten Versuchsphase wurde das neu

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

installierte Beleuchtungskonzept LED und in der dritten Versuchsphase die ursprüngliche Bestandsbeleuchtung als Kontrollphase eingestellt. Für eine gleichmäßige und homogene Beleuchtung des gesamten Beobachtungsbereichs wurde zusätzlich eine LED-Leuchte unterhalb des vorhandenen Deckenvorsprungs bzw. der baulich eingezogenen Zwischendecke installiert. Bei der messtechnischen Erfassung (Gossen, Mavolux 5032 B USB, siehe Kapitel 5.4.1 Messgenauigkeit und verwendete Messausrüstung) des Fokusbereiches wurde eine mittlere Beleuchtungsstärke von $E_M = 1.895 \text{ lx}$ mit einer Gleichmäßigkeit $g_1 = 0,09$ erreicht. Die Erfassung wurde unter Tageslicht bei leicht bewölktem Himmel während der Mittagszeit und ohne künstliche Beleuchtung vorgenommen. Die weiteren messtechnischen Ergebnisse, die in den frühen Nachtstunden des gleichen Tages unter künstlicher Beleuchtung messtechnisch erfasst wurden, zeigen, dass nachts unter der Natriumdampf- ($E_M = 55 \text{ lx}$; $g_1 = 0,51$) und der LED-Beleuchtung ($E_M = 79 \text{ lx}$; $g_1 = 0,75$) ein nach DIN-Norm nicht wahrnehmbarer Unterschied der Beleuchtungsstärke vorhanden war [DIN12464-1] [DIN12665].

Die Beobachtungen sowie die Aufzeichnungen des Tierverhaltens erfolgten jeweils nach einer dreiwöchigen Eingewöhnungszeit und über einen Versuchszeitraum von jeweils drei Wochen. Bei den folgenden Betrachtungen wurden drei Wochenenden im Winter 2015/16 je Versuchsphase ausgewählt, da an den Samstagen und Sonntagen die geringsten Einflüsse durch das Stallpersonal und etwaige Besuchergruppen entstanden sind. Insgesamt umfassen die nachfolgenden Betrachtungen 18 Versuchstage bzw. 432 Versuchsstunden, die sich wie in Tabelle 5.12 folgt verteilen.

Tabelle 5.12: Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Versuchsphasen

Versuchswoche	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Versuchsphase	1 (Bestand)						2 (Neu)						3 (Kontrolle)		
Eingewöhnung				LED						Natriumdampf					

Versuchsphase 1 (Bestand)			Versuchsphase 2 (Neu)			Versuchsphase 3 (Kontrolle)		
Natriumdampfbeleuchtung			LED-Beleuchtung			Natriumdampfbeleuchtung		
07.11.	14.11.	21.11.	26.12.	02.01.	09.01.	06.02.	13.02.	20.02.
08.11.	15.11.	22.11.	27.12.	03.01.	10.01.	07.02.	14.02.	21.02.

Beobachtet und dokumentiert wurden das Datum, die Stunde zum Zeitpunkt des Betretens des Bereichs, der Beleuchtungszustand (Licht ein- oder ausgeschaltet), die Tiernummer des Fokustieres, die Startzeit (Betreten des Bereichs), der Zugangsweg (von wo kommt das Rind), das Verhalten sowie der Zeitpunkt beim Verlassen des Bereichs. Wenn das Rind aus dem AMS kam, wurde zudem dokumentiert, ob es zuvor gemolken wurde.

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

5.6.3 Verhaltensparameter und deren Erfassung

Bei der Verhaltensbeobachtung wurden drei Parameter erfasst. Der Parameter „Stehen“ wurde dokumentiert, wenn bei dem Fokustier weder ein Komfortverhalten noch ein Sozialverhalten beobachtet werden konnten. Wurde ein Komfortverhalten beobachtet, was beispielsweise das Reiben an Gegenständen der Stalleinrichtung, der Körperpflege mit Zunge, Hörner, Klauen oder Schwanz beinhaltete, wurde der Parameter „Komfortverhalten“ zugeordnet. Der dritte Parameter „Sozialverhalten“ wurde dokumentiert, wenn das Fokustier ein anderes Rind aus der dynamischen Herde berührte. Ob der Kontakt von dem Fokustier oder dem anderen Rind aus der dynamischen Herde ausging, wurde nicht unterschieden (Tabelle 5.13).

Tabelle 5.13: Beschreibung der ausgewählten Verhaltensweisen

Verhaltensbeobachtung	Verhaltensparameter
Fokustier zeigte Stehen ohne motorische Aktivität (kein Komfort- oder Sozialverhalten)	Stehen
Fokustier zeigte Komfortverhalten (zum Beispiel Reiben an Gegenständen der Stalleinrichtung, Körperpflege mit Zunge, Hörner, Klauen oder Schwanz)	Komfortverhalten
Fokustier zeigte Sozialverhalten (gegenseitige Körperpflege, Stoß eines anderen Rindes oder von einem anderen Rind)	Sozialverhalten

Die Verhaltensbeobachtung erfolgte nach dem Verfahren der Verhaltensqualifizierung (*Event-Sampling*). In der Vorgehensweise wurde hierzu der Verhaltensstrom in diskrete Einheiten unterteilt [Wie10]. Im Verlauf dieser Arbeit werden in den Ergebnissen als erstes die Anzahl der erfassten Verhaltensweisen aller Fokustiere je Versuchsstunde dargestellt. Eine erfasste Verhaltensweise umfasste das Betreten und Verlassen des Beobachtungsbereichs eines Fokustieres. Durch das spezifische Zeitintervall einer Versuchsstunde kann die Rhythmik als Häufigkeit über den Tagesverlauf hinweg dargestellt werden. Im zweiten Schritt erfolgt die Darstellung der erfassten Verhaltensparameter. Bezogen auf ein vierundzwanzigstündiges Zeitintervall werden die durchschnittlichen Verhaltensparameter pro Fokustier und Versuchstag dargestellt.

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

5.6.4 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Verhaltensbeobachtungen erfolgte mittels des Programms IBM SPSS Statistics 24 und Excel 2016 (Microsoft Office 2016). Zur Beschreibung der Verteilung sowie zur Bestimmung der Lage werden zu jeder Auswertung die Anzahl der Elemente (N), das arithmetische Mittel (\bar{x}), die Standardabweichung (σ), Median (x_{Med}), das Minimum (Min.) und das Maximum (Max.) angegeben. Zusätzlich erfolgt als statistische Kennzahlen zur Art und Stärke der Asymmetrie die Angabe der Schiefe (v) sowie zur Angabe der Steilheit der Wert der Kurtosis (w).

Zur Überprüfung der erfassten Daten auf Normalverteilungsannahme wurde der Shapiro-Wilk-Test verwendet. Dieses Testverfahren gilt als der erste Test auf Normalverteilung, der eine Beurteilung nach der Schiefe sowie der Kurtosis erlaubt und sich durch eine große Teststärke auszeichnet. Anzuwenden ist der Shapiro-Wilk-Test bei einer Stichprobengröße von $3 \leq n \leq 5.000$ [Bor10] [Raz11] [Sha65].

Bei Anwendung des Shapiro-Wilk-Tests auf die Daten der erfassten Verhaltensweisen in Kapitel 6.4 Ergebnisse der Verhaltensbeobachtungen ergeben sich folgende statistische Angaben zur Schiefe, Wölbung und Signifikanz zur Normalverteilung (Tabelle 5.14).

Tabelle 5.14: Statistische Angaben zur Schiefe, Wölbung und Signifikanz zur Normalverteilung der erfassten Verhaltensweisen im stündlichen Intervall der unterschiedlichen Versuchsphasen mit Natriumdampf- und LED-Beleuchtung

	Schiefe v	Kurtosis w	p-Wert
Versuchsphase 1 (Natriumdampfbeleuchtung)	0,628	- 0,402	0,148
Versuchsphase 2 (LED-Beleuchtung)	0,998	0,443	0,043
Versuchsphase 3 (Natriumdampfbeleuchtung)	0,573	- 0,449	0,277

Bei der Betrachtung der Schiefe fällt auf, dass die berechneten Werte der betrachteten Versuchsreihen mit einem Wert von jeweils $v > 0$ getestet wurden und eine rechtsschiefe Verteilung der erfassten Werte vorliegt. Die Wölbung der ersten sowie der dritten Versuchsphase (Natriumdampfbeleuchtung) sind jeweils mit $w < 0$ getestet worden und somit ist die Verteilung gegenüber der Normalverteilung nach unten gestaucht bzw. flachgipflig. Der Wert $w > 0$, der bei den Daten der Versuchsphase 2 (LED-Beleuchtung) vorliegt, weist auf eine spitzgipflige Verteilung gegenüber der Normalverteilung hin.

Die Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests zeigen, dass das Signifikanzniveau zur Normverteilung bei den Versuchsphasen mit Natriumdampfbeleuchtung über dem zuvor festgesetzten Wert der Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ liegt und die Daten mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % normalverteilt

5. Tiere, Material und Methoden zur Konzeptionierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts

sind. Bei den Daten der Versuchsphase mit LED-Beleuchtung ist mit der zuvor festgelegten Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass die Daten nicht normalverteilt sind.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse musste für die Überprüfung der Nullhypothesen der Vorzeichenrangtest nach Wilcoxon (Wilcoxon-Test) verwendet werden. Die Auswahl dieses Testverfahrens erfolgte auf der Grundlage, dass es sich bei den Versuchsphasen um verbundene Stichproben handelte und diese nicht alle normalverteilt waren. Vergleichbar zum Vorzeichentest ist der Wilcoxon-Test als ein Vorzeichenrangtest teststärker und bezieht die vollständigen Ranginformationen in die Analyse mit ein. Als Voraussetzung werden Werte einer abhängigen Zufallsstichprobe einer Variablen, die mindestens ordinalskaliert ist, benötigt [Har09] [Leo17]. Als Signifikanzniveau wurde die standardisierte Grenze $\alpha = 0,05$ festgelegt [Bor10].

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

Das Beleuchtungskonzept konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens I_LED_Milchvieh erfolgreich umgesetzt werden. Die Installation der notwendigen Komponenten begann am 01.12.2015 und endete mit der Inbetriebnahme der Beleuchtungsanlage am 02.12.2015.

6.1 Vorstellung des neuen Beleuchtungskonzepts

Das erstellte Beleuchtungskonzept umfasst eine raumbezogene Beleuchtungssimulation. Durch die getroffene Auswahl und Positionierung der Leuchten wird die Beleuchtungssituation in Form einer Direktbeleuchtung umgesetzt (Anhang II). Zur Erfüllung der Anforderungen, die eine mittlere horizontale Beleuchtungsstärke in 0,20 m Bewertungshöhe mit einem Wert von $E_m \geq 150 \text{ lx}$ und einer möglichst hohen Gleichmäßigkeit g_1 auf der gesamten Nutzfläche umfasst, wurden zwölf Demonstrationsleuchten, aufgeteilt in je sechs Leuchten pro First, benötigt. Die Positionierung der Leuchten kann der Tabelle 6.1 entnommen werden:

Tabelle 6.1: Lage der eingefügten Leuchten in dem simulierten Versuchsstall VBZL Haus Düsse

Eckpunkt	x [m]	y [m]	z [m]	Eckpunkt	x [m]	y [m]	z [m]
1	6,836	12,400	4,700	7	2,667	2,573	4,700
2	11,448	12,400	4,700	8	8,000	2,573	4,700
3	16,059	12,400	4,700	9	13,333	2,573	4,700
4	20,671	12,400	4,700	10	18,667	2,573	4,700
5	25,283	12,400	4,700	11	24,000	2,573	4,700
6	29,894	12,400	4,700	12	29,333	2,573	4,700

Zusammenfassend lassen sich die wesentlichen Ergebnisse wie in Tabelle 6.2 darstellen. Die ausführlichen Ergebnisse können dem Anhang II entnommen werden.

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

Tabelle 6.2: Zusammengefasste Simulationsergebnisse der eingefügten Bewertungsflächen im simulierten Versuchsstall VBZL Haus

Bezeichnung der Berechnungsfläche	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	g_1	g_2
Nutzfläche gesamt	153	73	216	0,48	0,34
Besuchergang	117	74	136	0,64	0,54
Kopfbereich	136	88	163	0,65	0,54
Hochboxen	148	95	175	0,64	0,54
Laufbereich H-T	155	96	187	0,62	0,51
Tiefboxen 1-6	190	157	215	0,83	0,73
Tiefboxen 7-18	196	141	216	0,72	0,65
Laufbereich T-F	185	104	213	0,56	0,49
Futtertisch	129	76	162	0,59	0,47

Als Ergebnis der Beleuchtungssimulation konnte auf der gesamten Nutzfläche eine mittlere Beleuchtungsstärke von 153 lx erzielt werden. Die minimale Beleuchtungsstärke wurde mit einem Wert von 73 lx und die maximale Beleuchtungsstärke mit einem Wert von 216 lx simuliert. Für die Gleichmäßigkeit ergab sich auf der Berechnungsfläche „Nutzfläche gesamt“ ein Wert von $g_1 = 0,48$ und $g_2 = 0,34$. Die minimalen Beleuchtungsstärken sind besonders in den Randbereichen des Futtertisches (außerhalb des Fressbereiches der Rinder) sowie im Bereich des Besuchergangs vorzufinden. Die maximalen Beleuchtungsstärken befinden sich im Bereich des Laufgangs H-T. Zur Verdeutlichung lassen sich die Ergebnisse grafisch wie folgt in einer Falschfarbendarstellung präsentieren (Abbildung 6.1).

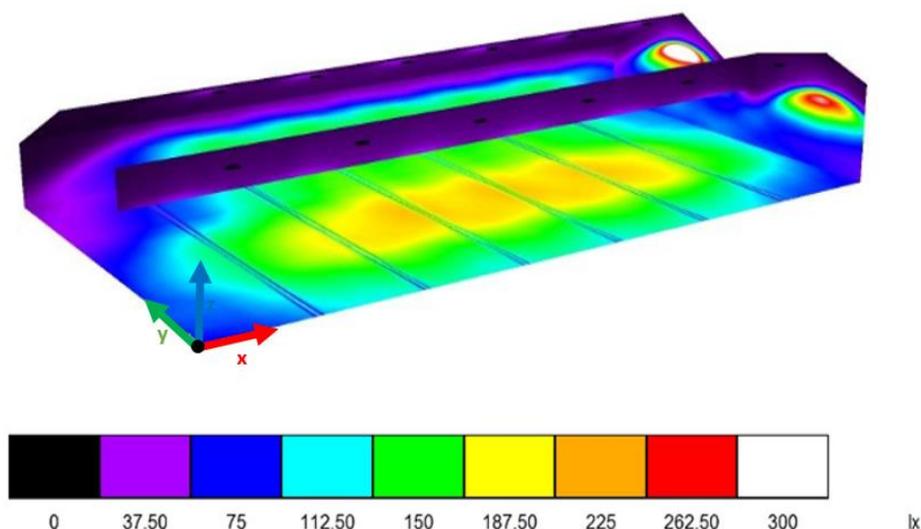


Abbildung 6.1: Falschfarbendarstellung des simulierten Versuchsstalls VBZL Haus [eigene Darstellung, erstellt mit dem Programm DIALux 4.12]

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

In der Falschfarbendarstellung ist zu erkennen, dass die Bereiche der Decke in den Farbtönen schwarz und violett visualisiert wurden. Dies bedeutet, dass dort eine mittlere Beleuchtungsstärke von weniger als 37,5 lx simuliert werden konnte. An den Wänden und in den Ecken des Bodens sind im dunkelblauen Bereich noch mindestens 75 lx vorhanden. Im Bereich der Liegeboxen, des Laufbereichs zwischen den Liegeboxen sowie im Bereich des Futtertisches ist zu erkennen, dass vergleichend zur Tabelle 6.3 eine homogene und mittlere Beleuchtungsstärke von $E_M \geq 150$ lx simuliert wurde.

In den zuvor beschriebenen Bewertungsflächen Messfeld 1 bis Messfeld 4 konnten folgende Werte der Beleuchtungsstärke im Detail simuliert werden (Tabelle 6.3).

Tabelle 6.3: Simulationsergebnisse der Beleuchtungsstärke in den Bewertungsflächen Messfeld 1 bis Messfeld 4 des Versuchstall VBZL Haus

Simulationsergebnisse (LED)	Messfeld 1				Messfeld 2				Messfeld 3				Messfeld 4			
Kopfbereich	137	141	150	159	155	146	151	159	155	147	151	159	155	144	141	138
Hochboxen	144	151	162	171	168	159	164	172	169	159	164	172	168	156	150	146
	145	151	164	172	169	160	165	173	170	160	165	173	169	156	152	147
Laufbereich H-T	146	152	165	174	171	161	167	174	171	161	167	174	171	157	153	148
	146	151	166	174	171	161	168	175	172	161	168	174	171	157	153	147
Tiefboxen	153	157	171	180	177	167	173	180	177	167	173	179	176	163	160	152
	159	163	175	185	182	173	177	185	181	173	177	185	180	168	165	159
Laufbereich T-F	182	187	195	202	199	192	197	204	200	191	197	204	199	187	185	181
	186	193	202	207	203	198	201	210	203	196	202	207	204	194	190	185
Futtertisch	190	197	206	212	206	201	205	214	209	201	205	210	210	200	195	188
	193	198	210	216	208	202	207	215	212	204	204	212	212	204	198	188
Futtertisch	197	201	209	213	209	202	205	210	212	208	203	205	211	209	197	182
	197	200	204	207	203	202	202	205	206	205	201	200	205	204	195	178
Futtertisch	193	195	197	198	197	197	197	198	198	199	196	194	196	197	189	171
	186	185	185	187	188	188	187	186	189	188	187	185	186	186	179	162
Futtertisch	167	164	161	163	166	168	164	161	165	166	165	164	161	161	154	140
	158	158	154	154	158	161	157	153	156	158	160	155	152	154	146	132

\bar{E}	178	\bar{E}	183	\bar{E}	183	\bar{E}	173
E_{\min}	137	E_{\min}	146	E_{\min}	147	E_{\min}	132
E_{\max}	216	E_{\max}	215	E_{\max}	212	E_{\max}	212
g_1	0,77	g_1	0,80	g_1	0,80	g_1	0,76
g_2	0,63	g_2	0,68	g_2	0,69	g_2	0,62

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

6.2 Verifizierung und messtechnische Validierung

Im Verlauf dieses Unterkapitels wird im ersten Schritt die Verifizierung des Beleuchtungskonzepts durchgeführt. Hierzu werden die simulationstechnischen Ergebnisse des neuen Beleuchtungskonzepts und die messtechnisch erfassten Ergebnisse der Beleuchtungsstärke und deren Gleichmäßigkeit gegenübergestellt. Im zweiten Schritt erfolgt die messtechnische Validierung des Beleuchtungskonzepts. Hierzu werden die messtechnisch erfassten Kenngrößen der Beleuchtungsstärke, deren Gleichmäßigkeit, der erfassten Leuchtdichten sowie die daraus berechneten Kontraste des neuen Beleuchtungskonzepts mit den Werten der Bestandsbeleuchtung (Natriumdampfbeleuchtung) verglichen. Alle erfassten Mess- und Simulationswerte orientieren sich in der Lage und der Position an den zuvor beschriebenen Vorgaben des neuen Mess- und Bewertungskonzepts.

6.2.1 Verifizierung des neuen Beleuchtungskonzepts

Die Verifizierung des Beleuchtungskonzepts wurde mittels einer messtechnischen Überprüfung der Beleuchtungsstärke in den Bewertungsflächen Messfeld 1 bis Messfeld 4 vorgenommen. Die Durchführung der messtechnischen Überprüfung erfolgte am 03.12.2015 nach Sonnenuntergang ab 19:15 Uhr. Als Referenzwert wurde im Bereich der Außenanlage an mehreren Messstellen unter freiem Himmel eine Beleuchtungsstärke von unter einem Lux erfasst. Die Leuchten konnten in der Nacht zuvor 16 Stunden einbrennen. Zum Zeitpunkt der Messungen waren die Leuchten zusätzliche zwei Stunden in Betrieb, sodass die Beleuchtungsanlage in einem thermisch stabilen Zustand vermessen wurde. Insgesamt wurden in den bereits beschriebenen vier Messfeldern 272 Messwerte aufgenommen. Die zusammengefassten Messergebnisse können der Tabelle 6.4 entnommen werden.

Tabelle 6.4: Zusammengefasste Messergebnisse des neuen Beleuchtungskonzepts der Bewertungsflächen Messfeld 1 bis Messfeld 4 im Versuchsstall VBZL Haus Düsse

Bezeichnung	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	g_1	g_2
Messfeld 1	164	85	220	0,52	0,39
Messfeld 2	159	105	205	0,66	0,51
Messfeld 3	159	97	220	0,61	0,44
Messfeld 4	152	71	190	0,47	0,37

Zu erkennen ist, dass in allen Messfelder eine mittlere Beleuchtungsstärke von über 150 lx mit einer Gleichmäßigkeit g_1 von mehr als 0,47 vorlag. Vergleichend zu den simulationstechnischen Werten werden in Messfeld 2 und Messfeld 3 die höchsten Werte der mittleren Beleuchtungsstärke erzielt. Die

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

Abweichungen zwischen den simulierten sowie den messtechnisch erfassten Werten der Beleuchtungsstärke werden im Folgenden zur besseren Vergleichbarkeit in absoluter Darstellung (Tabelle 6.5) und in relativer Darstellung (Tabelle 6.6) aufgeführt. Als Bezugsgröße wurden im Verlauf die Werte der Beleuchtungssimulation gewählt.

Tabelle 6.5: Abweichungen (absolute Darstellung) zwischen simulierten und messtechnisch erfassten Werten der Beleuchtungsstärke in den Bewertungsflächen Messfeld 1 bis Messfeld 4 im Versuchsstall VBZL Haus Düsse

Bezeichnung	ΔE_m [lx]	ΔE_{min} [lx]	ΔE_{max} [lx]	Δg_1	Δg_2
<u>Messfeld 1</u>	12	48	-5	0,24	0,23
<u>Messfeld 2</u>	23	39	10	0,13	0,16
<u>Messfeld 3</u>	23	47	-7	0,18	0,24
<u>Messfeld 4</u>	19	62	22	0,31	0,26

Tabelle 6.6: Abweichungen (relative Darstellung) zwischen simulierten und messtechnisch erfassten Werten der Beleuchtungsstärke in Bewertungsflächen Messfeld 1 bis Messfeld 4 im Versuchsstall VBZL Haus Düsse

Bezeichnung	ΔE_m [%]	ΔE_{min} [%]	ΔE_{max} [%]	Δg_1 [%]	Δg_2 [%]
<u>Messfeld 1</u>	6,8	36,1	-2,3	31,6	37,1
<u>Messfeld 2</u>	12,6	27,1	4,7	16,5	23,9
<u>Messfeld 3</u>	12,6	32,6	-3,3	22,8	35,3
<u>Messfeld 4</u>	11,1	46,6	10,4	39,7	41,3

Mittels der messtechnischen Überprüfung konnte die lichttechnische Simulation verifiziert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die messtechnisch erfassten Werte unterhalb der Werte der Beleuchtungssimulation liegen.

Die Vermessung der Messfelder wurde vor diesem Hintergrund in den Wintermonaten der Folgejahre wiederholt. Die jährliche Betriebsdauer der Beleuchtungsanlage umfasst in etwa 5.000 Betriebsstunden. Am 18.06.2016 erfolgte um 19:30 Uhr die erste Kontrollmessung (Messung 2). Die Leuchten waren leicht verschmutzt. Nach einer Reinigung der Leuchten am 03.11.2016 erfolgte ab 18:00 Uhr die nächste Vermessung der Beleuchtungsanlage (Messung 3). Am 07.11.2017 (Messung 4) konnte um 17:40 Uhr mit der Vermessung im verschmutzten Zustand und am 09.11.2017 (Messung 5) um 19:30 Uhr mit der Vermessung im gereinigten Zustand begonnen werden. Die letzte Vermessung (Mes-

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

sung 6) konnte im verschmutzten Zustand am 11.01.2018 erfolgen. Da die Leuchten zwischen der fünften und sechsten Vermessung kaum verschmutzen, wurde auf eine erneute Vermessung verzichtet (Tabelle 6.7).

Tabelle 6.7: Mittlere Beleuchtungsstärke und deren Gleichmäßigkeit im Verlauf der Alterung in Bewertungsflächen Messfeld 1 bis Messfeld 4 im Versuchsstall VBZL Haus Düsse

Bezeichnung	Reinigungsgrad	Messfeld 1		Messfeld 2		Messfeld 3		Messfeld 4	
		E_m [lx]	g_1						
Messung 1	sauber	164	0,52	159	0,66	159	0,61	152	0,47
Messung 2	verschmutzt	183	0,48	177	0,62	175	0,51	151	0,54
Messung 3	gereinigt	184	0,49	174	0,44	180	0,54	163	0,55
Messung 4	verschmutzt	175	0,61	169	0,55	181	0,56	168	0,58
Messung 5	gereinigt	176	0,66	174	0,55	184	0,56	169	0,55
Messung 6	verschmutzt	170	0,43	167	0,45	175	0,41	160	0,47

Bei der Betrachtung der mittleren Beleuchtungsstärke (Abbildung 6.2) und der Gleichmäßigkeit g_1 (Abbildung 6.3) ist zu erkennen, dass die Werte der Beleuchtungsstärke und der Gleichmäßigkeit im Verlauf der Alterung erst leicht ansteigen und anschließend abfallen. Nach einer Betriebsdauer von circa 10.000 Betriebsstunden (Messung 6) werden in jedem Messfeld die Zielgrößen von $E_M \geq 150$ lx und $g_1 \geq 0,4$ erreicht (Anhang III).

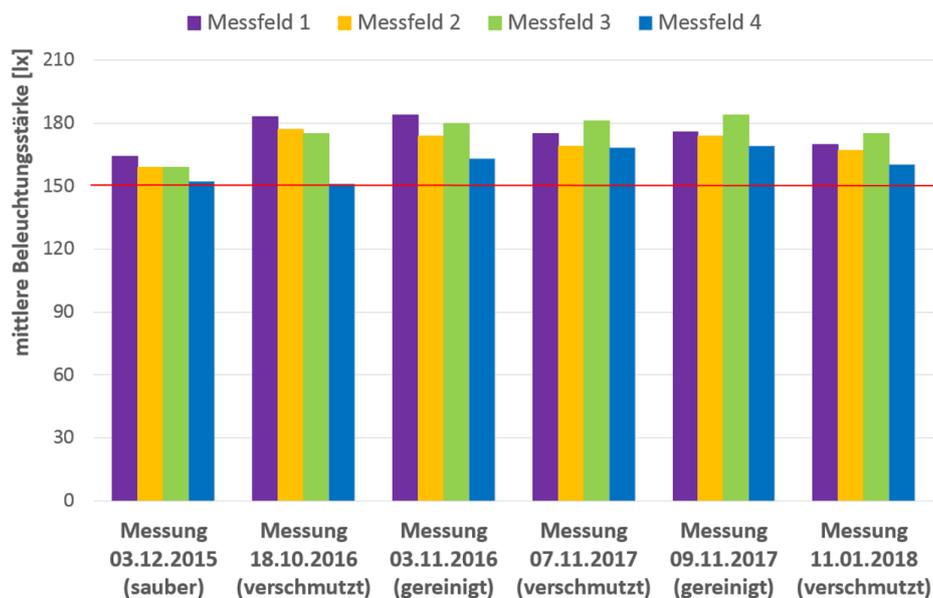


Abbildung 6.2: Mittlere Beleuchtungsstärke im Verlauf der Alterung in den Bewertungsflächen Messfeld 1 bis Messfeld 4 im Versuchsstall VBZL Haus Düsse

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

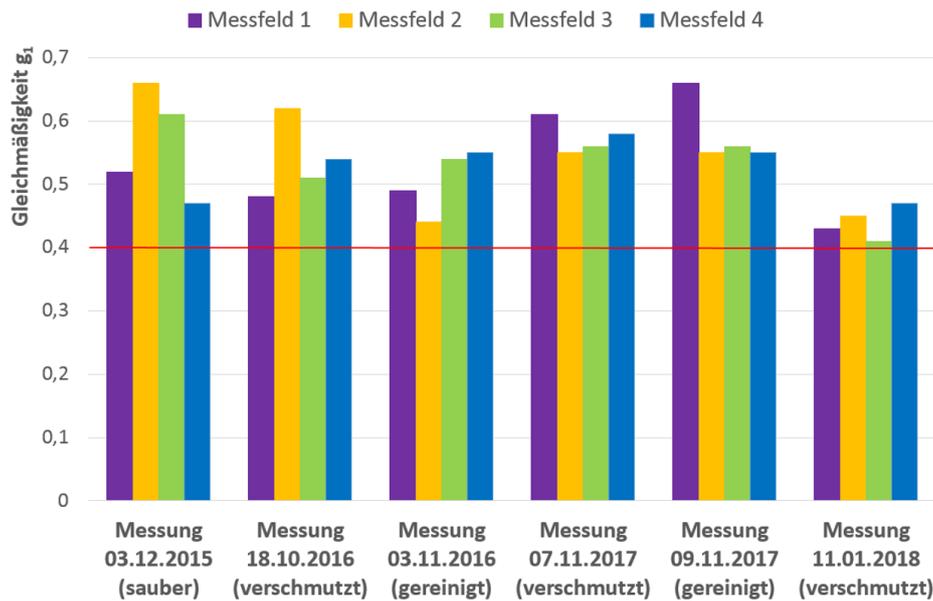


Abbildung 6.3: Grafische Darstellung der Gleichmäßigkeit im Verlauf der Alterung in den Bewertungsflächen Messfeld 1 bis Messfeld 4 im Versuchsstall VBZL Haus Düsse

6.2.2 Validierung des neuen Beleuchtungskonzepts

Zur Validierung des neuen Beleuchtungskonzepts wird das vorhandene Bestandskonzept, welches mittels einer Natriumdampfbeleuchtung realisiert wurde (siehe Kapitel 5.2.3 Beschreibung und Funktionsweise der Bestandsbeleuchtung), mit dem neuen Beleuchtungskonzept auf Basis der LED-Technologie verglichen. Die messtechnische Erfassung der Beleuchtungsstärke unter Einstellung der Natriumdampfbeleuchtung erfolgte am 14.04.2015 mit dem Startzeitpunkt der Messungen um 22:00 Uhr. Die messtechnischen Daten der LED-Beleuchtung wurden am 03.12.2015 ab 19:15 Uhr erfasst (siehe Kapitel 6.2.1 Verifizierung des neuen Beleuchtungskonzepts).

In der folgenden Tabelle 6.8 ist zu erkennen, dass die Werte der Natriumdampfbeleuchtung in Messfeld 1 und Messfeld 3 auf Grund der Anordnung der Leuchten sowie der umgesetzten Halbschaltung unterhalb der Werte des neuen Beleuchtungskonzepts liegen.

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

Tabelle 6.8: Vergleich der mittleren Beleuchtungsstärke E_m und deren Gleichmäßigkeit g_1 bei dem Bestandskonzept (Natriumdampf) und dem neuen Beleuchtungskonzept (LED) im Versuchsstall VBZL Haus Düsse

Bezeichnung	Natriumdampfbeleuchtung (Bestandskonzept)		LED-Beleuchtung (neues Beleuchtungskonzept)	
	E_m [lx]	g_1	E_m [lx]	g_1
<u>Messfeld 1</u>	124	0,18	164	0,52
<u>Messfeld 2</u>	153	0,45	159	0,66
<u>Messfeld 3</u>	111	0,27	159	0,61
<u>Messfeld 4</u>	162	0,27	152	0,47

Bei der detaillierteren Betrachtung fällt auf, dass im Bestandskonzept unter Natriumdampfbeleuchtung im Messfeld 2 und im Messfeld 4 eine vergleichbare Beleuchtungsstärke E_m zu den Werten der LED-Beleuchtung des neuen Beleuchtungskonzepts erreicht wurde (Abbildung 6.4).

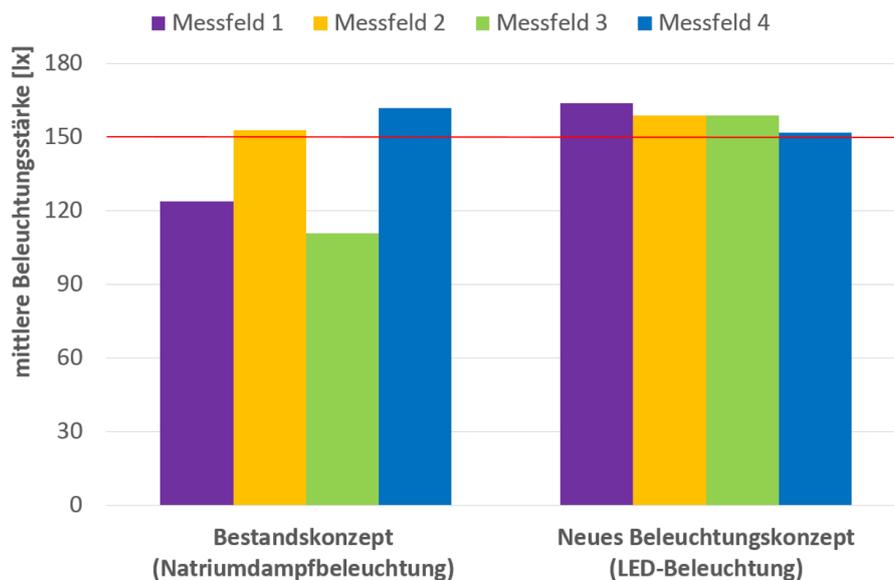


Abbildung 6.4: Mittlerer Beleuchtungsstärke E_m bei dem Bestandskonzept (Natriumdampf) und dem neuen Beleuchtungskonzept (LED) im Versuchsstall VBZL Haus Düsse

Die Gleichmäßigkeit g_1 lag in dem Bestandskonzept unter Natriumdampfbeleuchtung deutlich unter den Werten des neuen Beleuchtungskonzepts bei LED-Beleuchtung (Abbildung 6.5). Besonders die geringe Gleichmäßigkeit in Messfeld 1, Messfeld 3 sowie in Messfeld 4, deren Werte unterhalb der gestellten Anforderung von $g_1 > 0,4$ lagen, ist zu beachten.

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

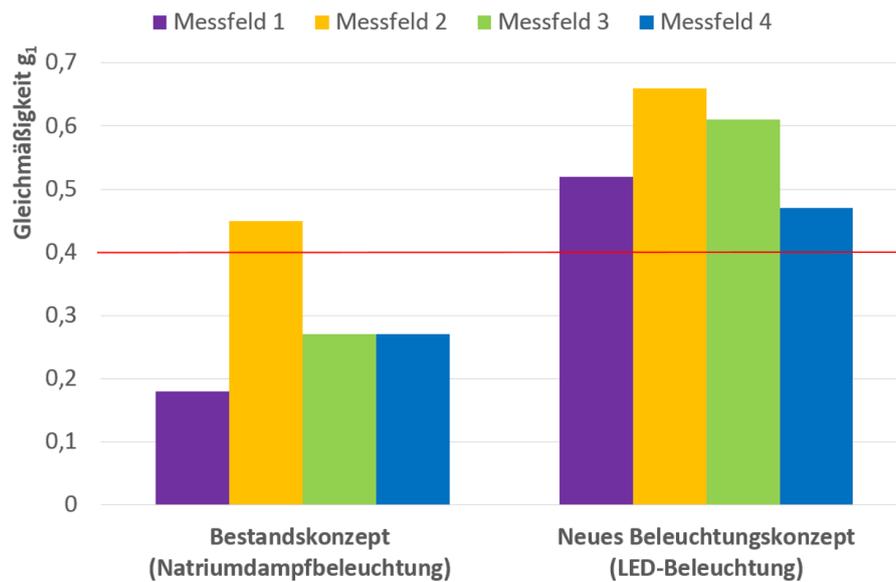


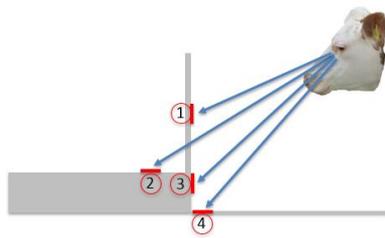
Abbildung 6.5: Gleichmäßigkeit g_1 bei dem Bestandskonzept (Natriumdampf) und dem neuen Beleuchtungskonzept (LED) im Versuchsstall VBZL Haus Düsse

Zur weiteren Validierung werden die erfassten Leuchtdichten sowie die daraus berechneten Kontraste dargestellt. Die messtechnische Erfassung erfolgte am 14.04.2015 ab 20:15 Uhr. Zuerst wurden die Leuchtdichten unter Natriumdampfbeleuchtung (L_{Na}) und anschließend die Leuchtdichten unter LED-Beleuchtung (L_{LED}) erfasst. Aus diesen Größen werden die Kontraste nach Michelson berechnet. Die Michelson-Kontraste, die unter Natriumdampfbeleuchtung vorherrschten, werden mit K_{MNa} und die Michelson-Kontraste, die unter LED-Beleuchtung vorlagen, werden mit K_{MLED} bezeichnet.

An jeder prägnanten Stelle erfolgten parallel die messtechnische Erfassung der Beleuchtungsstärke sowie die Erfassung der Leuchtdichte auf einem Stück optischen PTFE (Polytetrafluorethylen). Optisches PTFE verfügt über eine diffus-reflektierende Beschichtung mit einem Reflexionsgrad $\rho = 0,98$. Mit Hilfe der Formel 2.2 (siehe Kapitel 2.2.2 Photometrie) und den messtechnisch erfassten Größen konnte der Messaufbau an jeder der prägnanten Stellen verifiziert werden.

Nachfolgend werden als erstes die Ergebnisse an der prägnanten Stelle „Fressgitter“ im Funktionsbereich „Fressen“ dargestellt. Zur Kontrastberechnung werden als Bezugspunkte das Fressgitter (Pos. 1), der Futtertisch als obere Trittstufe (Pos. 2), die Setzstufe (Pos. 3) sowie der Boden als untere Trittstufe (Pos. 4) betrachtet (Abbildung 6.6).

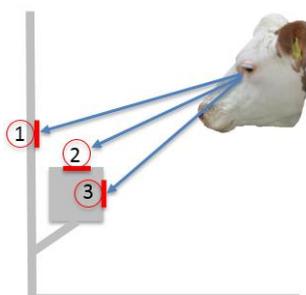
6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind



Pos.	Beschreibung	L_{Na} [cd/m ²]	L_{LED} [cd/m ²]
1	Fressgitter	2,4	2,3
2	Futtertisch (obere Trittstufe)	4,2	4,2
3	Setzstufe	3,2	1,3
4	Boden (untere Trittstufe)	2,4	0,7
Kontrastbeziehung		K_{MNA}	K_{MLEd}
Pos. 1 zu Pos. 2		-0,27	-0,29
Pos. 1 zu Pos. 3		-0,14	0,28
Pos. 1 zu Pos. 4		0,00	0,53
Pos. 2 zu Pos. 3		0,14	0,53
Pos. 2 zu Pos. 4		0,27	0,71
Pos. 3 zu Pos. 4		0,14	0,30

Abbildung 6.6: Darstellung der messtechnisch erfassten Leuchtdichten und der berechneten Michelson-Kontraste an der prägnanten Stelle „Fressgitter“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

Als zweite prägnante Stelle wurde im Funktionsbereich „Fressen“ die Stelle „Tränke“ ausgewählt. Zu betrachten sind die Rückwand (Pos. 1), die Ober- (Pos. 2) sowie die Vorderfläche der Tränke (Pos. 3) (Abbildung 6.7).



Pos.	Beschreibung	L_{Na} [cd/m ²]	L_{LED} [cd/m ²]
1	Rückwand	1,4	4,8
2	Oberfläche der Tränke	1,3	2,4
3	Vorderfläche der Tränke	1,1	1,7
Kontrastbeziehung		K_{MNA}	K_{MLEd}
Pos. 1 zu Pos. 2		0,04	0,33
Pos. 1 zu Pos. 3		0,11	0,48
Pos. 2 zu Pos. 3		0,07	0,17

Abbildung 6.7: Darstellung der messtechnisch erfassten Leuchtdichten und der berechneten Michelson-Kontraste an der prägnanten Stelle „Tränke“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

Im Funktionsbereich „Liegen“ wird als nächstes die prägnante Stelle „Hochbox“ betrachtet. Im ersten Schritt erfolgt die Ergebnisdarstellung zum Erkennen der Stufe. Wie bereits zuvor beschrieben werden die Positionen obere Trittstufe (Pos. 1), Setzstufe (Pos. 2) sowie die untere Trittstufe (Pos. 3) betrachtet (Abbildung 6.8).

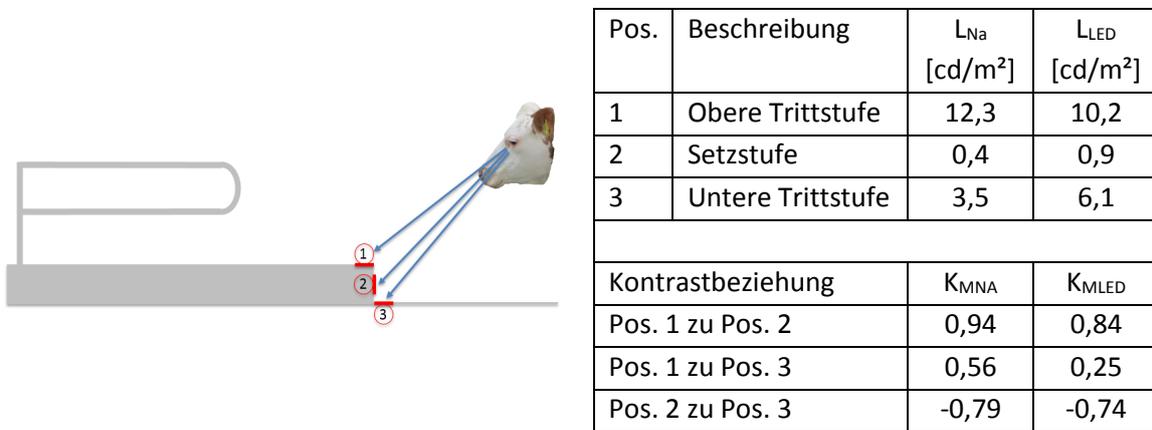


Abbildung 6.8: Darstellung der messtechnisch erfassten Leuchtdichten und der berechneten Michelson-Kontraste an der prägnanten Stelle „Hochbox - Stufe“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

Weiterhin wird an der prägnanten Stelle „Hochbox“ die Situation „Erkennen der Liegeboxenabgrenzung“ / „Ruhen in der Liegebox“ betrachtet. Hier erfolgte eine Unterscheidung zwischen der rückwärtigen Wand (Pos. 1) und dem Gitter der Liegeboxenbegrenzung (Pos. 2) (Abbildung 6.9).

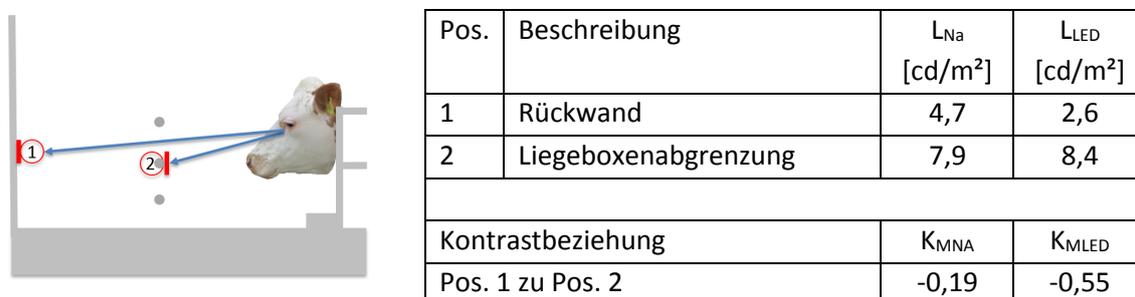


Abbildung 6.9: Darstellung der messtechnisch erfassten Leuchtdichten und der berechneten Michelson-Kontraste an der prägnanten Stelle „Hochbox - Ruhen“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

Als letzte Betrachtung im Funktionsbereich „Liegen“ erfolgt die Darstellung „Tiefbox - Stufe“ (Abbildung 6.10). Die Definition der zu betrachtenden Flächen ist vergleichbar zu der Situation der „Hochbox - Stufe“

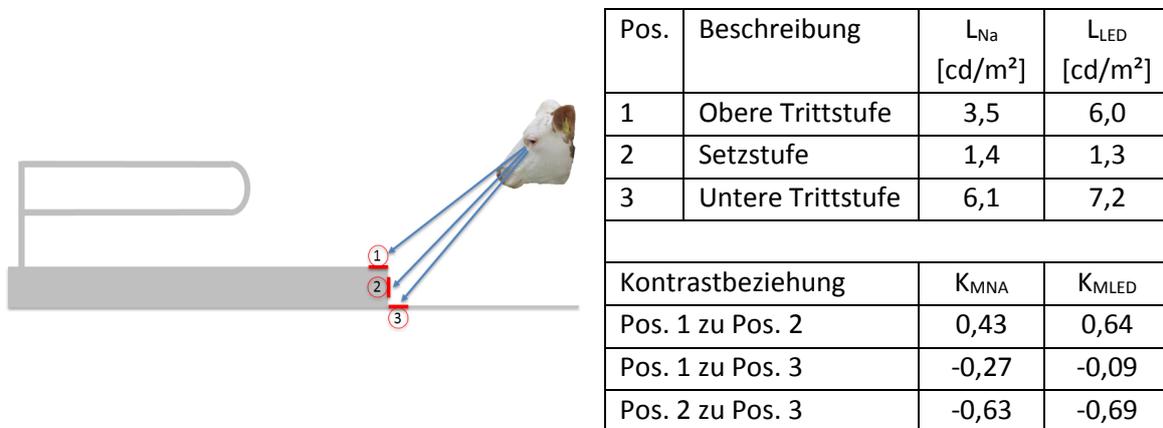


Abbildung 6.10: Darstellung der messtechnisch erfassten Leuchtdichten und der berechneten Michelson-Kontraste an der prägnanten Stelle „Tiefbox - Stufe“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

Abschließend werden die Ergebnisse für den Funktionsbereich „Laufen“ an der prägnanten Stelle eines Durchgangs zwischen der Tiefbox Nr. 6 und der Tiefbox Nr. 7 dargestellt. Eine Unterscheidung muss zwischen der Wandbegrenzung (Pos. 1) und dem Bodenbelag (Pos. 2) erfolgen. Im ersten Fall wird die Situation angrenzend an die Tiefbox Nr. 6 dargestellt (Abbildung 6.11).

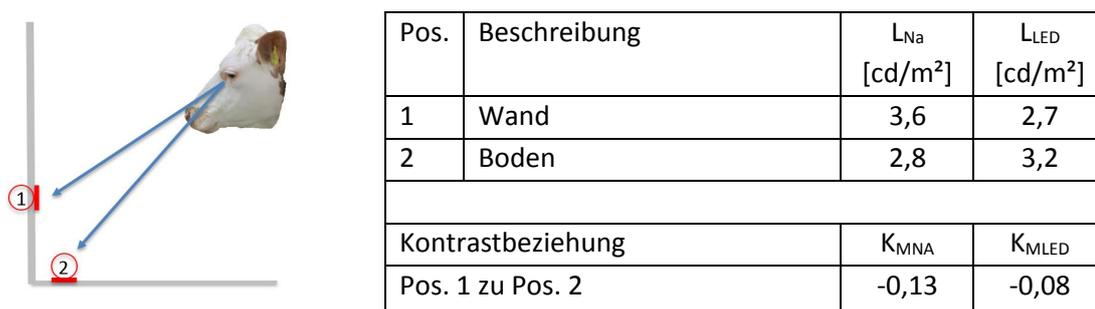
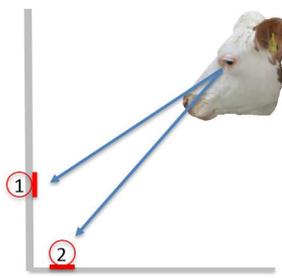


Abbildung 6.11: Darstellung der messtechnisch erfassten Leuchtdichten und der berechneten Michelson-Kontraste an der prägnanten Stelle „Durchgang - angrenzend Tiefbox 6“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

Zum Schluss wird für den Funktionsbereich „Laufen“ an der prägnanten Stelle „Durchgang“ die Situation angrenzend an die Tiefbox Nr. 7 dargestellt (Abbildung 6.12).



Pos.	Beschreibung	L_{Na} [cd/m ²]	L_{LED} [cd/m ²]
1	Wand	3,0	5,3
2	Boden	0,3	3,5
Kontrastbeziehung		K_{MNA}	K_{MLED}
Pos. 1 zu Pos. 2		0,13	0,08

Abbildung 6.12: Darstellung der messtechnisch erfassten Leuchtdichten und der berechneten Michelson-Kontraste an der prägnanten Stelle „Durchgang - angrenzend Tiefbox 6“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]

6.3 Ergebnisse der Mitarbeiterbefragung

Zur Erfassung des subjektiven Eindrucks des Landwirts werden im nun folgenden Verlauf, aufbauend auf der in Kapitel 5.2 vorgestellten Methodik, die zusammengefassten Ergebnisse der Mitarbeiterbefragung vorgestellt. Die Primärdaten können dem Anhang IV. entnommen werden.

Die erste Frage wurde als geschlossene Frage formuliert und lautete: „Wie bewerten Sie die aktuelle Beleuchtungssituation im Stall?“ Als Antwortmöglichkeiten wurde das Schulnotensystem vorgegeben (Tabelle 6.9).

Tabelle 6.9: Statistische Auswertung (Häufigkeit und Verteilung) der Frage 1: „Wie bewerten Sie die aktuelle Beleuchtung im Stall?“

	n	Natriumdampfbeleuchtung					LED-Beleuchtung				
		\bar{x}	x_{Med}	x_{Mod}	Min.	Max.	\bar{x}	x_{Med}	x_{Mod}	Min.	Max.
Mitarbeiter	6	3,2	4	4	2	4	2,1	2	2	1	3
Auszubildende	7	3,9	4	4	2	5	2,0	2	2	1	3
Gesamt	13	3,5	4	4	2	5	2,0	2	2	1	3

Die zweite Frage wurde in einer offenen Form gestellt und lautete: „Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als positiv?“ Bei der Beleuchtungssituation Natriumdampfbeleuchtung (Tabelle 6.10) konnten nur vier der sechs Mitarbeiter und zwei der sieben Auszubildenden einen positiven

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

Aspekt benennen. Bei der Beleuchtungssituation LED-Beleuchtung gaben hierzu alle dreizehn befragten Personen mindestens einen Aspekt als Rückmeldung (Tabelle 6.11). Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die genannten Antworten den Kategorien „Helligkeit“, „Gleichmäßigkeit“, „Farbwahrnehmung“, „Energieeffizienz“ und „Blendung“ zugeordnet (Anhang IV).

Tabelle 6.10: Statistische Auswertung (Häufigkeit) der Frage 2: Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als positiv (Natriumdampfbeleuchtung)?

	Natriumdampfbeleuchtung				
	Helligkeit	Gleichmäßigkeit	Farbwahrnehmung	Energieeffizienz	Blendung
Mitarbeiter	3	2	3	0	1
Auszubildende	0	0	1	0	0
Gesamt	3	2	4	0	1

Tabelle 6.11: Statistische Auswertung (Häufigkeit) der Frage 2: Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als positiv (LED-Beleuchtung)?

	LED-Beleuchtung				
	Helligkeit	Gleichmäßigkeit	Farbwahrnehmung	Energieeffizienz	Blendung
Mitarbeiter	5	1	2	2	0
Auszubildende	6	4	3	0	0
Gesamt	11	5	5	2	0

Die dritte Frage wurde wie Frage 2 zuvor in einer offenen Form gestellt und lautete: „Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als negativ?“ Bei der Befragungsaktion zur Natriumdampfbeleuchtung (Tabelle 6.12) gaben alle befragten Personen einen negativen Aspekt als Antwort an. Bei der Beleuchtungssituation LED-Beleuchtung (Tabelle 6.13) gaben zehn der dreizehn befragten Personen einen negativen Aspekt als Rückmeldung. Detaillierter betrachtet wurden je Gruppe fünf Rückmeldungen. Ein Mitarbeiter sowie zwei Auszubildende nannten keinen negativen Aspekt zur LED-Beleuchtung. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die genannten Antworten den Kategorien „Helligkeit“, „Gleichmäßigkeit“, „Farbwahrnehmung“, „Energieeffizienz“ und „Blendung“ sowie neu hinzukommend „Kosten“, „Optik“ und „Wartung“ zugeordnet.

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

Tabelle 6.12: Statistische Auswertung (Häufigkeit) der Frage 3: Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als negativ (Natriumdampfbeleuchtung)?

	Natriumdampfbeleuchtung							
	Helligkeit	Gleichmäßigkeit	Farbwahrnehmung	Energieeffizienz	Blendung	Kosten	Optik	Wartung
Mitarbeiter	2	0	1	0	0	0	0	1
Auszubildende	6	1	1	0	0	0	0	1
Gesamt	8	1	2	0	0	0	0	2

Tabelle 6.13: Statistische Auswertung (Häufigkeit) der Frage 3: Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als negativ (LED-Beleuchtung)?

	LED-Beleuchtung							
	Helligkeit	Gleichmäßigkeit	Farbwahrnehmung	Energieeffizienz	Blendung	Kosten	Optik	Wartung
Mitarbeiter	0	0	3	0	1	2	1	0
Auszubildende	0	1	1	0	4	0	0	0
Gesamt	0	1	4	0	5	2	1	0

6.4 Ergebnisse der Verhaltensbeobachtungen

Bei den Verhaltensbeobachtungen erfolgt im ersten Schritt die Betrachtung aller Fokustiere als Gruppe. Die Darstellung der erfassten Verhaltensweisen (Aktionen) erfolgt als durchschnittliche Tagesrhythmik bezogen auf ein stündliches Intervall. Im zweiten Schritt werden die durchschnittlichen Häufigkeiten der Verhaltensparameter Stehen, Komfortverhalten und Sozialverhalten bezogen auf ein Intervall von 24 Stunden aufgeführt.

6.4.1 Häufigkeit aller erfassten Verhaltensweisen

Insgesamt wurden in den ausgewählten 432 Versuchsstunden über alle drei Versuchsphasen hinweg 1.502 Aktionen (Verhaltensparameter Stehen, Komfort- und Sozialverhalten) mit einer Gesamtdauer von 119 Stunden, 55 Minuten und 06 Sekunden erfasst. Die Häufigkeit umfasste 436 Aktionen mit ei-

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

ner Dauer von 37 Stunden, 46 Minuten und 36 Sekunden in der ersten Versuchsphase unter Natriumdampfbeleuchtung (Vp 1), 543 Aktionen mit einer Dauer von 42 Stunden, 34 Minuten und 26 Sekunden in der zweiten Versuchsphase unter LED-Beleuchtung (Vp 2) und 523 Aktionen mit einer Dauer von 39 Stunden, 34 Minuten und 41 Sekunden in der dritten Versuchsphase bzw. Kontrollphase mit Natriumdampfbeleuchtung (Vp 3).

Bezogen auf die einzelnen Versuchsphasen und in Form eines Box-Whisker-Plots lassen sich die erfassten Häufigkeiten als durchschnittliche Tagesrhythmik wie folgt im stündlichen Intervall darstellen (Abbildung 6.13).

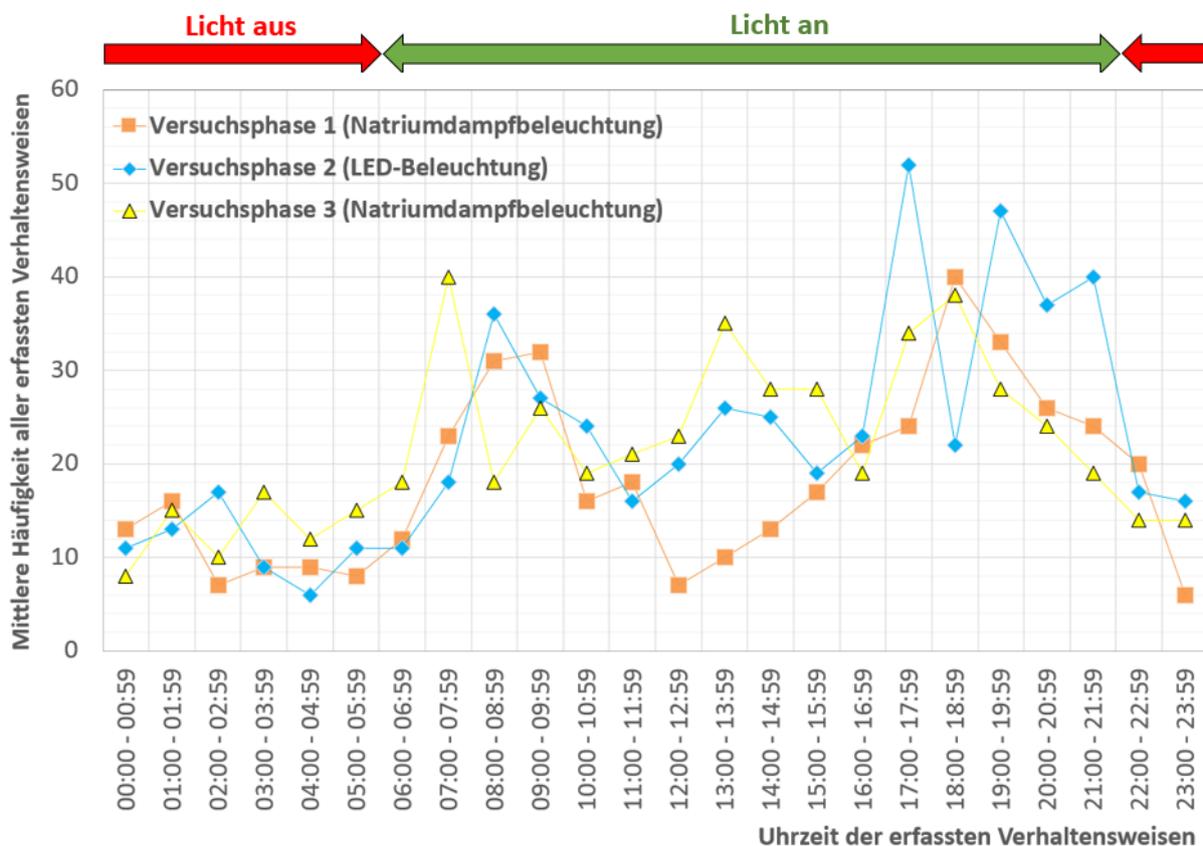


Abbildung 6.13: Mittlere Häufigkeit aller erfasster Verhaltensweisen im stündlichen Intervall bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung

Bei der Betrachtung der Abbildung 6.13 ist zu erkennen, dass im ersten Quartal bei ausgeschalteter Beleuchtung kaum eine Unterscheidung zwischen den beobachteten Verhaltensweisen in den unterschiedlichen Versuchsphasen festzustellen ist. Im Verlauf, bei eingeschalteter Beleuchtung, heben sich zwei Maxima über alle Versuchsphasen hinweg hervor. Das erste Maximum liegt in den frühen Vormittagsstunden und das zweite Maximum ist in den späten Stunden des Nachmittags vorzufinden. Während der Mittagszeit konnte in der Vp 1 unter Natriumdampfbeleuchtung ein starker Rückgang

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

der beobachteten Verhaltensweisen festgestellt werden. In der Versuchsphase 2 (LED-Beleuchtung) und der Versuchsphase 3 (Natriumdampfbeleuchtung) konnte ein leichter Anstieg festgestellt werden. Das Maximum in den abendlichen Stunden über alle Versuchsphasen hinweg ist bei LED-Beleuchtung am größten.

Tabelle 6.14: Statistische Kennzahlen der erfassten Verhaltensweisen im stündlichen Intervall in den unterschiedlichen Versuchsphasen bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung

	N	\bar{x}	σ	x_{Med}	Min.	Max.
Versuchsphase 1 (Natriumdampfbeleuchtung)	24	18,17	9,27	16,5	6	40
Versuchsphase 2 (LED-Beleuchtung)	24	22,63	11,79	19,5	6	52
Versuchsphase 3 (Natriumdampfbeleuchtung)	24	21,79	8,59	19	8	40

In der Tabelle 6.14 ist bei Betrachtung der statistischen Kennzahlen zu erkennen, dass die Werte des Mittelwertes \bar{x} sowie des Medians x_{Med} in der Versuchsphase 2 unter LED-Beleuchtung am höchsten sind.

Zur Überprüfung der Signifikanz, der in Abbildung 6.13 und Tabelle 6.14 dargestellten Ergebnisse, wird in der folgenden Tabelle 6.15 die Signifikanz der Teststatistik z sowie der p-Wert als zweiseitig asymptotische Signifikanz aufgeführt.

Tabelle 6.15: Statistische Angaben zur Signifikanz der Teststatistik und der zweiseitig asymptotischen Signifikanz der erfassten Beobachtungen im stündlichen Intervall

	Signifikanz der Teststatistik z	p-Wert (zweiseitig asymptotische Signifikanz)
Versuchsphase 1 zu Versuchsphase 2 (Natriumdampf- zu LED-Beleuchtung)	-1,888	0,059
Versuchsphase 3 zu Versuchsphase 2 (Natriumdampf- zu LED-Beleuchtung)	-0,029	0,997

Zu erkennen ist, dass die zweiseitige asymptotische Signifikanz größer als der zuvor festgelegte Wert von $p = 0,05$ ist. Ein signifikanter Unterschied in der Häufigkeit der erfassten Verhaltensweisen im stündlichen Intervall der unterschiedlichen Versuchsphasen konnte nicht festgestellt werden.

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

6.4.2 Häufigkeit des Verhaltens Stehen

Die Häufigkeit der Verhaltensbeobachtung Stehen lässt sich wie folgt darstellen (Abbildung 6.14 und Tabelle 6.16).

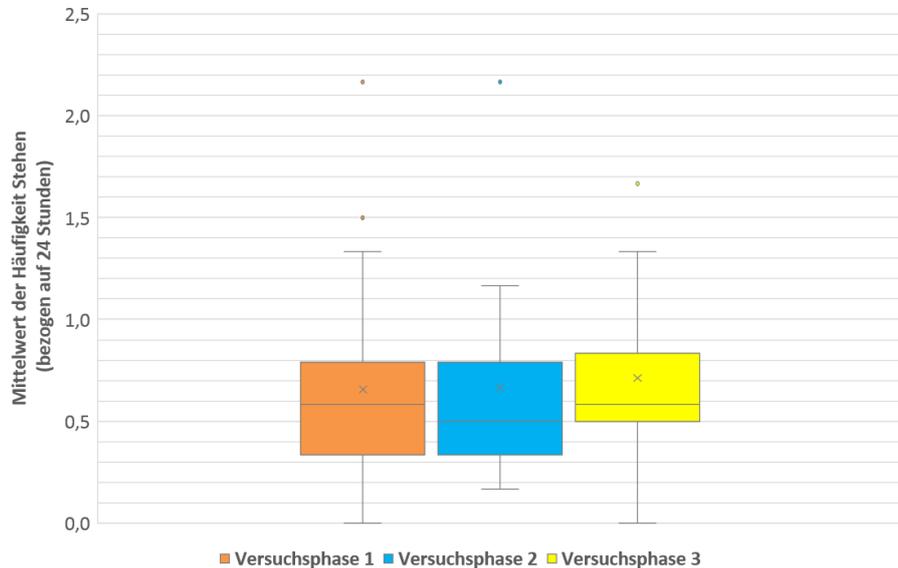


Abbildung 6.14: Mittlere Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Stehen bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung

Tabelle 6.16: Statistische Kennzahlen der Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Stehen bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung

	N	\bar{x}	σ	x_{Med}	Min.	Max.
Versuchsphase 1 (Natriumdampfbeleuchtung)	18	0,66	0,57	0,58	0,00	2,17
Versuchsphase 2 (LED-Beleuchtung)	18	0,67	0,48	0,50	0,17	2,17
Versuchsphase 3 (Natrium- dampfbeleuchtung)	18	0,71	0,46	0,58	0,00	1,67

An den in Abbildung 6.14 und Tabelle 6.16. dargestellten Ergebnissen ist zu erkennen, dass die Mittelwerte und die Mediane der drei Versuchsphasen vergleichbar sind. Bei der Betrachtung der Box-Whisker-Plots fällt auf, dass die Streuung der Daten in der Versuchsphase 2 unter LED-Beleuchtung am geringsten ist. Zwei Außreißer sind in der ersten Versuchsphase und jeweils ein Ausreißer in der zweiten sowie in der dritten Versuchsphase zu erkennen.

Die Ergebnisse des Wilcoxon-Tests in Tabelle 6.17 zeigen, dass die berechneten p-Werte über dem zuvor festgesetzten Wert der Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ liegen und die Unterschiede zwi-

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

schen der Versuchsphase 1 und der Versuchsphase 2 (Natriumdampf- zu LED-Beleuchtung) sowie zwischen der Versuchsphase 3 und der Versuchsphase 2 (Natriumdampf- zu LED-Beleuchtung) mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % nicht signifikant sind.

Tabelle 6.17: Statistische Angaben zur Signifikanz der Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Stehen bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung

	Signifikanz der Teststatistik z	p-Wert (zweiseitig asymptotische Signifikanz)
Versuchsphase 1 zu Versuchsphase 2 (Natriumdampf- zu LED-Beleuchtung)	- 0,507	0,955
Versuchsphase 3 zu Versuchsphase 2 (Natriumdampf- zu LED-Beleuchtung)	- 0,472	0,637

6.4.1 Häufigkeit des Verhaltens Komfortverhalten

Die Verhaltensbeobachtung Komfortverhalten wurde in Tabelle 5.13 so definiert, dass das Fokustier durch beispielsweise Reiben an Gegenständen der Stalleinrichtung, Körperpflege mit Zunge, Hörner, Klauen oder Schwanz ein Komfortverhalten zeigte. Bezogen auf das Grundintervall eines Versuchstages lässt sich die durchschnittliche Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Komfortverhalten wie folgt darstellen.

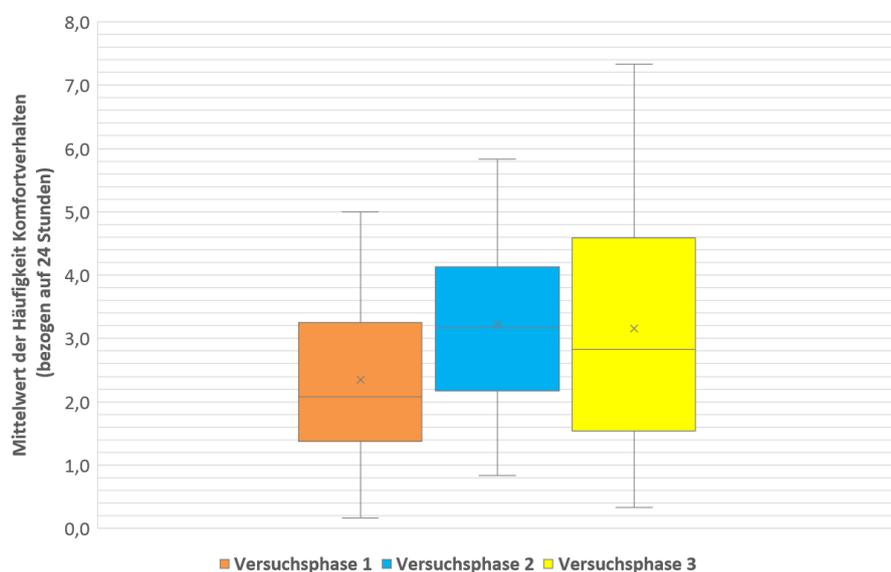


Abbildung 6.15: Mittlere Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Komfortverhalten bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

Tabelle 6.18: Statistische Kennzahlen der Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Komfortverhalten bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung

	N	\bar{x}	σ	x_{Med}	Min.	Max.
Versuchsphase 1 (Natriumdampfbeleuchtung)	18	2,35	1,31	2,08	0,17	5,00
Versuchsphase 2 (LED-Beleuchtung)	18	3,23	1,51	3,17	0,83	5,83
Versuchsphase 3 (Natriumdampfbeleuchtung)	18	3,16	2,09	2,83	0,33	7,33

Die in Abbildung 6.15 und Tabelle 6.18 aufgeführten Daten zeigen zwischen der ersten und der zweiten Versuchsphase einen deutlichen Anstieg in der Häufigkeit der Verhaltensweise Komfortverhalten. Bei der Betrachtung der zweiten und der dritten Versuchsphase ist ein leichter Rückgang im Bereich der Mittelwerte und der Mediane zu erkennen. Die Streuung der Daten ist in der Versuchsphase 3 unter Natriumdampfbeleuchtung am größten. Ausreißer sind nicht vorhanden. Der größte Mittelwert und Median ist bei LED-Beleuchtung in der Versuchsphase 2 zu erkennen.

Tabelle 6.19: Statistische Angaben zur Signifikanz der Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Komfortverhalten bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung

	Signifikanz der Teststatistik z	p-Wert (zweiseitig asymptotische Signifikanz)
Versuchsphase 1 zu Versuchsphase 2 (Natriumdampf- zu LED-Beleuchtung)	- 2,924	0,003
Versuchsphase 3 zu Versuchsphase 2 (Natriumdampf- zu LED-Beleuchtung)	- 0,403	0,687

Bei der Betrachtung der zweiseitig asymptotischen Signifikanz in Tabelle 6.19 ist zu erkennen, dass der p-Wert unterhalb der zuvor festgesetzten Irrtumswahrscheinlichkeit liegt und sich die beobachtete Verhaltensweise Komfortverhalten zwischen der Versuchsphase 1 und der Versuchsphase 2 (Natriumdampf- zu LED-Beleuchtung) signifikant unterscheidet. Zwischen der Versuchsphase 3 und der Versuchsphase 2 (Natriumdampf- zu LED-Beleuchtung) konnte keine statistische Signifikanz nachgewiesen werden.

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

6.4.1 Häufigkeit des Verhaltens Sozialverhalten

Die Verhaltensbeobachtung Sozialverhalten wurde in Tabelle 5.13 so definiert, dass das Fokustier durch beispielsweise gegenseitige Körperpflege, Stoß eines anderen Rindes oder von einem anderen Rind ein Sozialverhalten zeigt. Bezogen auf das Grundintervall eines Versuchstages, lässt sich die durchschnittliche Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Sozialverhalten wie folgt darstellen.

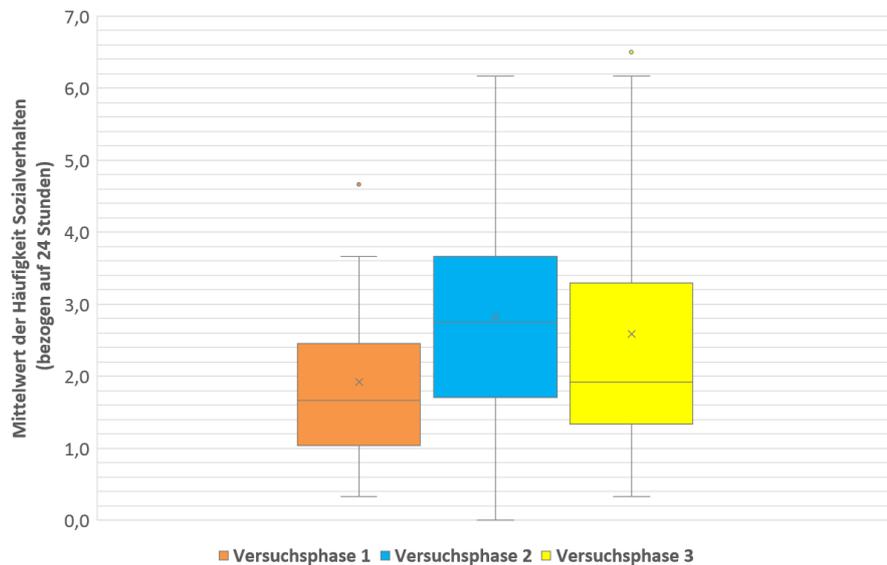


Abbildung 6.16: Mittlere Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Sozialverhalten bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung

Tabelle 6.20: Statistische Kennzahlen der Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Sozialverhalten bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung

	N	\bar{x}	σ	x_{Med}	Min.	Max.
Versuchsphase 1 (Natriumdampfbeleuchtung)	18	1,92	1,18	1,67	0,33	4,67
Versuchsphase 2 (LED-Beleuchtung)	18	2,82	1,56	2,75	0,00	6,17
Versuchsphase 3 (Natriumdampfbeleuchtung)	18	2,58	1,86	1,92	0,33	6,50

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Verhaltensweise Sozialverhalten ist in der Abbildung 6.16 und der Tabelle 6.20 vergleichbar zu den zuvor beschriebenen Ergebnissen der Verhaltensweise Komfortverhalten ein deutlicher Anstieg zwischen der Versuchsphase 1 unter Natriumdampfbeleuchtung und der Versuchsphase 2 mit LED-Beleuchtung erkennbar. Bei der Betrachtung der Mediane ist zwischen der zweiten und der dritten Versuchsphase ein deutlicher Rückgang erkennbar. Die Mittelwerte der

6. Vorstellung, Verifizierung und Validierung eines bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

beiden Versuchsphasen sind jedoch weiterhin vergleichbar. Die Streuung der Daten aus der Versuchsphase 1 unter Natriumdampfbeleuchtung ist am geringsten und in der Versuchsphase 1 und der Versuchsphase 3 ist jeweils ein Außreißer vorhanden. Vergleichbar zur Verhaltensweise Komfortverhalten ist zu erkennen, dass der Mittelwert sowie der Median unter LED-Beleuchtung am größten sind.

Vergleichend zur Verhaltensweise Komfortverhalten kann bei Betrachtung des p-Werts der Verhaltensweise Sozialverhalten in Tabelle 6.21 ein signifikanter Unterschied zwischen der Versuchsphase 1 und der Versuchsphase 2 (Natriumdampf- zu LED-Beleuchtung) nachgewiesen werden. Zwischen der Versuchsphase 3 und der Versuchsphase 2 (Natriumdampf- zu LED-Beleuchtung) konnte erneut und vergleichbar zu den zuvor aufgeführten Ergebnissen keine statistische Signifikanz nachgewiesen werden.

Tabelle 6.21: Statistische Angaben zur Signifikanz der Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Sozialverhalten bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung

	Signifikanz der Teststatistik z	p-Wert (zweiseitig asymptotische Signifikanz)
Versuchsphase 1 zu Versuchsphase 2 (Natriumdampf- zu LED-Beleuchtung)	- 2,419	0,016
Versuchsphase 3 zu Versuchsphase 2 (Natriumdampf- zu LED-Beleuchtung)	- 1,025	0,305

7. Diskussion

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, im ersten Schritt eine bedarfsorientierte LED-Leuchte für die Funktionsbereiche „Fressen“, „Liegen“ und „Laufen“ zu konzipieren und anschließend zu verifizieren. Die Leuchte sollte als Besonderheit die unterschiedlichen Anforderungen der Lichtwahrnehmung und -wirkung von Mensch und Rind berücksichtigen. Im zweiten Schritt sollte ein neues Beleuchtungskonzept für Mensch und Rind konzipiert, mit der zuvor entwickelten Leuchte praktisch umgesetzt und in einem Feldversuch validiert werden. Das neue Beleuchtungskonzept sollte die Sehaufgaben von Mensch und Rind unterstützen und gleichzeitig das Verhalten positiv beeinflussen. Die Unterteilung dieses Vorgehens in zwei Schritte wurde notwendig, da bei einer Lichtplanung zwischen den Eigenschaften der Leuchte und der Umsetzung des Beleuchtungskonzepts unterschieden werden muss. Beispielsweise sind der spektrale Verlauf und der Parameter Farbwiedergabe Eigenschaften der Leuchte und können in der Beleuchtungsplanung nicht durch die Anordnung, die Anzahl oder durch die Einsatzumgebung beeinflusst werden. Das Beleuchtungsniveau, die Homogenität und Lichtverteilung sind Eigenschaften eines Beleuchtungskonzepts.

Vergleichbare Arbeiten oder Studien, die die unterschiedlichen Anforderungen der Lichtwahrnehmung und -wirkung von Mensch und Rind berücksichtigen, sind nicht bekannt. In einer Studie von van Oosterhout et al. [vOo12] wurde erstmals untersucht, ob eine verlängerte Beleuchtung mittels LED-Technologie (vier Stunden farbiges Licht, im direkten Anschluss acht Stunden weißes Licht und abschließend erneut vier Stunden farbiges Licht) einen Einfluss auf die Milchproduktion, das Verhalten und den Hormonstatus von Milchkühen besitzt. Verwendet wurde monochromatisches LED-Licht mit den Wellenlängen 462 nm (blau), 592 nm (gelb), 630 nm (rot). Vorherige Studien untersuchten mittels konventioneller Beleuchtungstechnologien fokussiert den Aspekt einer Ertragssteigerung unter Verwendung eines Lichtprogramms [Auc05] [Dah97] [Dah12] [Pet78] [Phi89] [Rek99] oder das allgemeine Sehvermögen in verschiedenen Wahlversuchen [Bal81] [Gil86] [Phi01] [Reh97] [Sze88].

Bewertung und Diskussion der bedarfsorientierten Leuchte

Bei der Konzeptionierung der zu entwickelnden Leuchte erfolgte eine Unterteilung der abgeleiteten Anforderungen in zwei Prioritätsstufen. Mit der höchsten Priorität wurden die Angaben zur Wellenlänge, Lichtfarbe, Gesamtlichtstrom und Effizienz der Leuchte belegt.

Die Angaben zu den Wellenlängen und der Lichtfarbe wurden als die zentralen Kenngrößen in Bezug auf eine bedarfsorientierte Beleuchtung für Mensch und Rind gesehen. Die Zapfen des Menschen und

7. Diskussion

des Rindes besitzen ihre maximalen Sensitivitäten in den bereits beschriebenen Wellenlängenbereichen und können nur durch eine ausreichende Lichtunterstützung in diesen Bereichen die maximale Funktionalität erbringen. Die im Labor erfassten Wellenlängen des Leuchtenspektrums ($\lambda_{\text{peak}} = 452,9 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{dom}} = 445,5 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{zen}} = 538,9 \text{ nm}$) der Demonstrationsleuchte decken sich sehr gut mit dem Sehvermögen des Rindes, dessen maximale Intensitäten bei 445 nm und 554 nm liegen [Jac98]. Auch das Sehvermögen des Menschen, dessen maximale Intensitäten der Zapfen bei 430 nm, 535 nm und 565 nm liegen [Fri14], wird gut unterstützt. Die Studie von van Oosterhout et al. [vOo12] zeigte, dass besonders kurzwelliges (blaues) Licht beeinflussend auf die Melatonin- und Blutwerte der Rinder wirkt. Langwelliges (rotes) Licht hingegen zeigte in Versuchen kaum einen Einfluss auf die Melatonin- und Blutwerte. Es wird vermutet, dass langwelliges Licht nur äußerst gering auf die biologischen Rhythmen wirkt. Kurzwelliges Licht, das die biologischen Rhythmen unterstützt, ist einer sehr hohen Farbtemperatur zuzuordnen [Ros16]. Die Farbtemperatur der Leuchte sollte daher mindestens in der Lichtfarbgruppe „tageslichtweiß“ mit einer Farbtemperatur von $T_{\text{CP}} > 5.300 \text{ K}$ eingeordnet sein. Mit der messtechnisch erfassten Farbtemperatur von $T_{\text{N}} = 7.442 \text{ K}$ konnte diese Vorgabe sehr gut erreicht werden.

Für die Zielgruppe Landwirt, bei der die Licht- und Beleuchtungstechnik aufgrund der Komplexität des Alltags nur untergeordnet und rudimentär betrachtet wird, sollte auf eine wirtschaftliche und effiziente Beleuchtungslösung geachtet werden. Dies wird durch die in Kapitel 3.1 aufgeführten Kundenergebnisse bestätigt. Helligkeit, Energieeffizienz sowie eine lange Lebensdauer sind die wichtigsten Bedürfnisse des Landwirts. Die Anforderung zum Gesamtlichtstrom der Leuchte wurde somit ebenfalls der Priorität 1 zugeordnet und sollte die Anforderung von $\Phi > 10.000 \text{ lm}$ erfüllen. Die Größenordnung 10.000 lm wurde in Anlehnung an den durchgeführten Wettbewerbsvergleich für Stalleuchten im Rahmen des Forschungsvorhabens I_LED_Milchvieh definiert. In durchgeführten Beleuchtungssimulationen zeigte sich, dass sich theoretisch auch gute Simulationsergebnisse mit Leuchten, die einen geringeren Lichtstrom emittieren, erzielen lassen. In der Umsetzung gelang dies aber nur, wenn eine Vielzahl an Leuchten eingesetzt wurde. Dies bedeutet für den Transfer in die Praxis, dass ein erhöhter Installationsaufwand entstehen würde. Zusätzlich könnten bei einem sehr geringen Lichtpunktabstand, der durch eine hohe Anzahl an Leuchten entstehen würde, bauartbedingt eine zusätzliche Installationsebene bzw. zusätzliche Installationsflächen notwendig werden. Durch den erhöhten Installationsbedarf entstünde weiterhin auch ein erhöhter Wartungs- und Instandsetzungsbedarf. Die messtechnischen Ergebnisse der entwickelten Demonstrationsleuchte zeigen, dass bei voller Beleuchtungsintensität („Farmer White“ und „Cow White“ jeweils mit 10 V angesteuert) ein Lichtstrom von $\Phi = 10.250 \text{ lm}$ messtechnisch erfasst werden konnte. Bei den Betrachtungen der weiteren Messergebnisse fällt auf, dass die drei LED-Platinen „Farmer White“ in etwa neunzig Prozent und die einzelne Platine „Cow White“ in etwa zehn Prozent des Lichtstroms emittieren. Mit einem Lichtstrom

7. Diskussion

$\Phi = 10.250$ lm erreicht die Leuchte nur knapp die definierte Anforderung. Dies ist aber völlig ausreichend, da vermutet wird, dass durch den erhöhten Blauanteil die Unterstützung des Sehvermögens und die biologische Wirksamkeit, besonders auch im Vergleich zu konventionellen Beleuchtungslösungen, bei Beleuchtungsintensitäten von unter 150 lx noch ausreichend gegeben ist. Erste Auswertungen der Untersuchungen des Forschungsvorhabens I_LED_Milchvieh_II bestätigen diese Annahmen und zeigen, dass sich das Verhalten der Rinder bei einer mittleren Beleuchtungsstärke von 80 lx zu einer Beleuchtungsstärke von 150 lx kaum verändert.

Neben der Anforderung des Gesamtlichtstroms der Leuchte muss eine bedarfsorientierte Leuchte, die für eine wirtschaftliche und effiziente Beleuchtungslösung eingesetzt werden soll, dimmbar und wartungs- und instandsetzungsfreundlich aufgebaut sein. Die Dimmbarkeit wird als ein Standard und eine Notwendigkeit für eine energieeffiziente Beleuchtungslösung angesehen; dies auch vor dem Hintergrund, dass wie in Kapitel 3 aufgeführt, 80 % der Befragten Landwirte keine dimmbare Leuchte wünschen. In vielen Gesprächen mit Landwirten wurde hierzu deutlich, dass bei einer dimmbaren Leuchte die Gefahr eines erhöhten Ausfalles gesehen wird. Die Vorteile der Energieeffizienz werden durch die Dimmbarkeit nicht gesehen. Aus den Gesprächen heraus ist somit nochmals deutlich geworden, welchen Stellenwert eine wartungs- und instandsetzungsfreundliche Leuchte einnimmt. Als letzte Anforderung der Prioritätsstufe 1 wurde hierzu eine modular aufgebaute und langlebige Leuchte gefordert. Der Zugang zu der Vorschalt elektronik, den LEDs und den Optiken war über jeweils sechs zu lösende Verschraubungen gegeben. Konstruktionsbedingt wurden bei der Leuchte drei unterschiedliche Schraubkopfantriebe sowie zwei unterschiedliche Arten von Befestigungsmuttern verwendet. Für eine vollständige Demontage oder den Fall einer Instandsetzung wurden insgesamt sechs unterschiedliche Werkzeuge benötigt. Vergleichbar zu anderen Stallleuchten war aufzuführen, dass alle Komponenten austauschbar sind. Im Vergleich zur Straßenbeleuchtung, wo Leuchten und Komponenten werkzeuglos zu öffnen oder zu tauschen sind, besteht noch Optimierungspotenzial. Dieses Optimierungspotenzial wurde auch durch den Projektträger des Forschungsprojekts I_LED_Milchvieh (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung) erkannt, sodass eine Förderempfehlung der Demonstrationsleuchte zum marktfähigen Produkt im Rahmen des Förderprogramms DIP (Deutsche Innovationspartnerschaft Agrar) ausgesprochen wurde. Nach einer erfolgreichen Bewerbung und Antragsstellung konnte das Forschungsvorhaben I_LED_Milchvieh_II mit der Laufzeit vom 01.08. bis 31.07.2019 eingeworben werden. In Bezug auf die Langlebigkeit konnte festgestellt werden, dass es innerhalb der ersten drei Jahre bei den 14 verwendeten Demonstrationsleuchten zu insgesamt zwei Fehlerfällen kam. Als erster Fehlerfall trat bei einer von insgesamt 728 verbauten LEDs ein Defekt nach etwa zwei Jahren Betriebsdauer auf. Da eine einzelne LED nicht getauscht werden konnte, erfolgte der Austausch einer LED-Platine („Farmer White“). Als zweiter Fehlerfall trat auf, dass sich nach knapp drei Jahren Feuch-

7. Diskussion

tigkeit (Niederschlagswasser) in einer der vierzehn verbauten Leuchten ansammelte. Durch eine Undichtigkeit im Bereich des Lüftungsfirstes sammelten sich im Laufe der Zeit kleine Mengen Niederschlagswasser auf dem Kühlkörper der Leuchte an. Durch einen Materialfehler im Bereich der Dichtung am Leuchtenkopf konnten geringste Mengen in die Leuchte eindringen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens I_LED_Milchvieh_II wurde dieser Fehlerfall erfasst und mit dem Einsatz einer neuen und veränderten Dichtung behoben.

Die Werte der Farbwiedergabe und im speziellen die Werte des Farbwiedergabeindex R_a wurden der Prioritätsstufe 2 zugeordnet. Die Zuordnung erfolgte, da der Farbwiedergabeindex R_a nur die ersten acht Testfarben beinhaltet [Bod16] [Hei14] und an verschiedenen Stellen in der Lichttechnik teilweise kritisch diskutiert wird [Kha17]. Im Bereich der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung ist die Anwendung des Farbwiedergabeindex nach CIE als anerkannter Stand der Wissenschaft und Technik (europäischer Standard) hinreichend gut anzuwenden und für die Bewertung unter Einbeziehung der weiteren Testfarben als ausreichend zu bewerten. Die definierte Anforderung beinhaltet, dass mindestens ein Farbwiedergabeindex von $R_a = 86$ erreicht wird, mit dem Zusatz, dass der Farbwiedergabewert R_9 (Rot gesättigt) größer 45 ist und der Farbwiedergabewert R_{13} (Rosa) mindestens 80 beträgt. Die Zusatzangaben zur Farbwiedergabe konnten mit den Werten $R_9 = 51,3$ und $R_{13} = 86,8$ sehr gut erreicht werden. Bei den Ergebnissen des Farbwiedergabeindex R_a ist zu erkennen, dass der gemessene Wert $R_a = 84,2$ nur knapp die Vorgabe verfehlt. Die Vorgabe selbst wurde in Anlehnung an die Ergebnisse des BMWi geförderten IGF Vorhabens - Grundlagen der Normung für ein Performance Quality Label für LED-Leuchten gewählt. Betrachtet wurden in diesem Projekt vor allem Leuchten im Innenbereich sowie Leuchten zur Illumination des öffentlichen und urbanen Raumes [Sch14]. Ein Farbwiedergabeindex von $R_a = 86$ konnte im Vergleich der Produkte untereinander nur durch sehr wenige Produkte erreicht werden. Durch die gültige DIN-Norm wird für die Stallbeleuchtung ein Farbwiedergabeindex von $R_a = 40$ (Viehställe allgemein) und $R_a = 80$ (Ställe für kranke Tiere, Abkalbeställe) empfohlen [DIN12464-1]. Zusätzlich zu berücksichtigen ist, dass dieser Wert, wie auch all die weiteren Messwerte in dieser Arbeit, fehlerbehaftet ist. Trotz größter Sorgfalt bei der Vorbereitung, der Kalibration und Durchführung der Messungen entstehen Messabweichungen. Auch sind die Messungenauigkeiten der verwendeten Messinstrumente zu berücksichtigen. Im vorliegenden Beispiel beträgt die Abweichung zwischen dem Sollwert und dem gemessenen Wert gute zwei Prozent. Unter der Vorgabe, dass im lichttechnischen Laborbereich sowie in der Stallumgebung kalibrierte Messinstrumente mit mittlerer Güte [DIN5032-7] verwendet werden und diese über einen Toleranzbereich von zehn Prozent verfügen, kann der vorliegende Wert der Farbwiedergabe akzeptiert werden. Im Weiteren ist davon auszugehen, dass in der Stallumgebung weder das menschliche Auge noch das Auge des Rindes zwischen einer Farbwiedergabe von $R_a = 86$ und $R_a = 84,2$ einen Unterschied wahrnehmen können. Um dennoch einen höheren Wert der Farbwiedergabe zu erreichen, hätte der LED-Typ gewechselt oder die Leuchte um einen weiteren

7. Diskussion

LED-Typ erweitert werden müssen. Beide Varianten hätten eine leichte Verschiebung des Spektrums bedeutet, und die Werte der spektralen Wellenlänge λ_{peak} , λ_{dom} und λ_{zen} hätten sich ebenfalls verschoben. Weiterhin würden sich mit Blick auf eine spätere Vermarktung des zukünftigen Produkts die Kosten unverhältnismäßig erhöhen.

Als ein weiteres Kriterium der Priorität 2 sollte die Frequenz der Vorschalt elektronik viel größer als die Sehfrequenz von Mensch und Rind sein. Die konzipierte Leuchte verfügt über eine Konstantlichtstromregelung und es entsteht im Gegensatz zu einer Plusweitenmodulation ein „flackerfreies Licht“ [Lum11] [Mea18].

Durch die Stallumgebung werden Anforderungen an den zulässigen Temperaturbereich der Leuchte, den Einsatz einer atmungsaktiven Membran, die Verwendung von chemisch-kompatiblen Stoffen und Materialien sowie Anforderungen an die Schutzart gestellt. Als zulässiger Temperaturbereich der Leuchte wurden die Grenzen $T_{\text{min}} = 0 \text{ °C}$ und $T_{\text{max}} = 75 \text{ °C}$ definiert. Diese Grenzen übersteigen bei weitem die thermoneutrale Zone des Rindes und orientieren sich an messtechnisch erfassten Werten eines schlecht gedämmten Stalls. Wie bereits im Zwischenfazit erwähnt, kann besonders die obere Grenze mit $T_{\text{max}} = 75 \text{ °C}$ als Extremfall betrachtet werden. Bauartbedingt wird die ausgewählte Versuchsumgebung wahrscheinlich nie diese Grenze erreichen. Für die Übertragbarkeit und Anwendbarkeit auf weitere Vorhaben wurde die betreffende Komponente getauscht, und die nun verbaute Vorschalt elektronik ist vergleichbar zur Vorschalt elektronik der weißen LEDs für einen Temperaturbereich von $T_{\text{min}} = -40 \text{ °C}$ bis $T_{\text{max}} = 80 \text{ °C}$ ausgelegt.

Durch Verwendung einer Druckausgleichmembran [Ste17] sowie die Verwendung von ausschließlich chemisch-kompatiblen Stoffen und Materialien [Cre18] [Lum16] können diese Anforderungen als erfüllt angenommen werden. Die Überprüfung der Schutzart IP 64 sowie das notwendige Konformitätsbewertungsverfahren nach Anhang IV der Niederspannungsrichtlinie [EG/2006/95] wurden durch den Industriepartner DeLaval an ein externes Prüflabor vergeben und erfolgreich durchgeführt. Eine visuelle Überprüfung der installierten Demonstrationsleuchten und die Messergebnisse der Langzeitmessungen zeigen, dass es nach einer dreijährigen Betriebsdauer noch keine Anzeichen einer ungewöhnlich hohen Degradation, einer Verfärbung oder Trübung der LEDs und deren Optiken durch diffundierenden Sauerstoff, Halogene, Schwefelverbindungen oder flüchtige organische Verbindungen gab.

Bewertung und Diskussion des bedarfsorientierten Beleuchtungskonzepts für Mensch und Rind

Das bedarfsorientierte Beleuchtungskonzept wurde für den Liegeboxenlaufstall des VBZL Haus Düsse konzipiert. Bei der Wahl der Versuchsumgebung ist vorteilhaft zu nennen, dass es sich um ein Versuchs- und Bildungszentrum der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen handelt. Dies bedingt, dass durch das Ausbildungs- und Fachpersonal eine repräsentative Versuchsumgebung mit einer zu jeder Zeit optimalen Tierbetreuung zur Verfügung stand. Anomalien wurden umgehend, fachgerecht und ausführlich dokumentiert und wenn notwendig in Rücksprache behoben. Durch den Ausbildungsbetrieb bedingt ist die Herde als „sehr ruhig“ zu bezeichnen, sodass die Rinder bei notwendigen Arbeiten in der Stallumgebung kaum Verhaltensänderungen zeigten. Weiterhin verfügte die Stallumgebung über Hoch- und Tiefboxen sowie über eine moderne Ausstattung (automatisches Melksystem, automatische Futtevorlagen und automatische Entmistung im Fressbereich). Als nachteilig ist zu sehen, dass es sich um einen älteren und umgebauten Stall in einer „mehrhäusigen Bauweise“ handelt. Mit einer Grundfläche von etwa 570 m², einer Firsthöhe von 4,90 m und einer Besatzdichte von 39 laktierenden Rindern ist der Liegeboxenstall im Vergleich zu den durchschnittlichen Milchviehställen in Deutschland eher klein. Laut statistischem Bundesamt [Sta18] gab es zwar zum Stichtag 03. Mai 2018 mit 19.239 Haltungen die meisten Haltungen mit Rindern im Bereich einer Herdengröße von 20 bis 49 Rinder, aber die meisten Rinder standen in Betrieben mit einer Herdengröße von 50 bis 99 Rinder. Bei der Beobachtung des Trends ist zudem zu erkennen, dass die Betriebsgrößen über die letzten Jahre hinweg kontinuierlich ansteigen und vermehrt nur größere Ställe gebaut werden [Sta18]. Abschließend ist in Bezug auf die ausgewählte Stallumgebung zu nennen, dass ein größerer Liegeboxenstall mit mehr Rindern aus finanziellen Gründen nicht vollständig hätte ausgestattet werden können. In den bereits benannten Studien wurden vergleichbar zu diesen Untersuchungen oftmals noch wesentlich kleinere Tiergruppen betrachtet. Van Oosterhout et al. [vOo12] führten ihre Untersuchungen in Gruppengrößen von zehn Rindern durch. Peters et al. [Pet 81] bildeten zwei Gruppen mit 24 und 18 Rindern. Philips und Schonfield [Phi89] untersuchten in einem ersten Experiment 12 Rinder und in einem zweiten Experiment 16 Rinder. Bei Wahlversuchen zum Sehvermögen wurden teilweise noch kleinere Gruppengrößen verwendet. Jacobs et al. (Jac98) untersuchten das dichromatische Farbsehen der Rinder mit fünf weiblichen Rindern (Färsen), die jünger als ein Jahr waren. Rehkämper und Görlach [Reh98] führten ihre Untersuchungen zur Sehschärfe mit drei Bullen durch.

Als erste Zielgröße wurde für das neue Beleuchtungskonzept in Anlehnung an den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik eine mittlere Beleuchtungsstärke von $E_M = 150 \text{ lx}$ mit einer Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärkeverteilung von mindestens $g_1 \geq 0,4$ in 0,2 m Bewertungshöhe definiert. Eine Bewertung mittels der Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe des Tieres ist nicht zu empfehlen, da der

7. Diskussion

Boden die Bezugsfläche in der Stallumgebung ist. Als „Sendergröße“ kann die Beleuchtungsstärke nicht wahrgenommen werden. Erst durch die Reflektion an einer Bezugsfläche beispielweise kann die Leuchtdichte als „Empfängergröße“ und einzig sichtbare lichttechnische Grundgröße wahrgenommen werden. Die Größenordnung 0,2 m wurde gewählt, da bei einer Messhöhe von unter 0,2 m Rückstände von Stallung auf Spaltenboden oder Planflächen die Messungen stark beeinflussen und der Photometerkopf stark verschmutzen würde.

Bei der Betrachtung der erfassten Beleuchtungsstärken und deren Gleichmäßigkeit in dieser Arbeit ist zu erkennen, dass bei dem neuen Beleuchtungskonzept eine wesentlich höhere Homogenität vorliegt. In der gesamten Stallumgebung und besonders im Bereich der Laufflächen sind somit weniger Schatten, vor denen die Rinder zurückschrecken und die die Rinder in ihrer Bewegung hemmen.

Die Zielgröße der mittleren Beleuchtungsstärke liegt dabei über der Grenze von 80 lx, die im Aufenthaltsbereich von Kälbern laut der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung gefordert wird [TierSchNutzV]. Auch liegt dieser Wert deutlich über 50 lx, die für den Menschen als Mindestbeleuchtungsstärke in Viehställen empfohlen wird [DIN12464-1]. Bei der Betrachtung der bereits benannten Studien fällt auf, dass in keiner Studie eine Aussage zur Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärkeverteilung getätigt wird. Zudem wird nie angegeben, in welchem Messraster und mit welcher Messgenauigkeit die Messwerte erfasst wurden. Angabe zur Betriebsdauer der Leuchten, dem Wartungsfaktor sowie den Verschmutzungszustand sind ebenfalls nicht zu finden. In den Studien [Auc05] [Dah00] [Dah03a] [Dah12] [Mor08] [Rek99] werden keine Angaben zur Beleuchtungsstärke oder dem Helligkeitsniveau getätigt. Bei der Betrachtung der Studien, die ein Beleuchtungslevel benennen, fällt auf, dass teilweise für die Stallbeleuchtung recht hohe Werte der Beleuchtungsstärke angegeben werden. Peters et al. [Pet81] führten ihre Untersuchungen bei einer mittleren Beleuchtungsstärke von 555 lx und 462 lx, erfasst auf Augenhöhe des Rindes, durch. Dahl et al. [Dah97] untersuchten Kühe in einer Anbindehaltung bei einer Beleuchtungsstärke von 350 lx auf Höhe der Augen [Dah97]. Phillips et al. [Phi89] führten Untersuchungen in einem ersten Experiment bei 481 lx und in einem zweiten Experiment bei 0 lx, 101 lx, 191 lx und 529 lx durch. Marcek et al. [Mar84] verwendeten bei ihren Untersuchungen tagsüber eine auf Augenhöhe des Rindes erfasste Beleuchtungsstärke von 254 ± 26 lx sowie nachts eine Beleuchtungsstärke von 132 ± 9 lx. Evans et al. [Eva89] benennen eine Beleuchtungsstärke von 200 lx auf Höhe des Tierauges. Bilodeau et al. [Bil89] benennen eine mittlere Beleuchtungsstärke von 107 lx auf Augenhöhe. Van Oosterhout et al. [vOo12] beschreiben beispielsweise, dass die Untersuchungen bei einer Beleuchtungsstärke von 50 bis 170 lx durchgeführt wurde. Ob es sich bei den zuvor genannten Angaben um die Werte der minimalen und maximalen Beleuchtungsstärke oder um die Werte mittleren Beleuchtungsstärke handelt, ist nicht bekannt. Weiterhin werden keinerlei Anga-

7. Diskussion

ben getätigt, in welcher Bewertungshöhe und mit welcher Genauigkeit die Messwerte von van Oosterhout et al. [vOo12] erfasst wurden. Bei der Betrachtung des Beleuchtungsniveaus in dieser Arbeit ist zusätzlich zu bedenken, dass ein völlig neues LED-Lichtspektrum verwendet wurde, welches sich deutlich von einem konventionellen Lichtspektrum unterscheidet. Bei der Angabe Lux, die das Sehvermögen des Menschen im helladaptierten Raum berücksichtigt (Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ für Tagessehen), wird beispielsweise der Blauanteil nur sehr gering bewertet. Wünschenswert wäre eine lichttechnische Einheit, die das Sehvermögen des Rindes berücksichtigt. In der Geflügelhaltung wurde beispielsweise versucht, das Sehvermögen des Geflügels mit der Einheit Gallilux bzw. Clux oder dem neueren Ansatz des Lichtindex Geflügel nachzubilden [Arn16]. Bei der Einheit Gallilux erfolgte eine Bewertung nach der Sensitivität aller Farbrezeptoren [Nub92]. Für hühnerartige Vögel wurden somit die Sensitivität der drei Standard-Farbrezeptoren für kurz-, mittel- und langwelliges Licht sowie die Sensitivität eines vierten Farbrezeptors für den Bereich des ultravioletten Lichts verwendet. Bewertungsgrundlage war ein gemischter Kurvenverlauf aller einzelnen Farbrezeptoren und nicht wie beim Menschen der des gesamten Hellempfindlichkeitsgrads $V(\lambda)$. Bei Steigerwald [Ste06] ist bei genauer Betrachtung deutlich zu erkennen, dass die Verläufe der einzelnen Kurven stark voneinander abweichen. Weitere Annahme im Verlauf ist, dass die relative photopische Sensitivität des Menschen unter der des Hausgeflügels liegt. Aus einer vergleichenden Grafik wurde für das photometrische Strahlungsäquivalent ein Wert von 110 %, etwa 700 lm/W, geschätzt [Ste06]. Lewis et al. [Lew06] stellen den Ansatz der Einheit Gallilux in Zusammenhang mit dem Strahlungsäquivalent von 683 lm/W in Frage und argumentieren, dass bei einem vergleichbaren Sehvermögen der Tiere und einer größeren Fläche unterhalb der Kurve das photometrische Strahlungsäquivalent geringer sein muss. Im weiteren Verlauf wird ein Strahlungsäquivalent von 400 lm/W benannt. Da der Verlauf der gesamten Hellempfindlichkeit sich nicht aus dem Verlauf der einzelnen Farbrezeptoren herleiten lässt, muss der gesamte Ansatz der Einheit Gallilux bzw. Clux vollständig verworfen werden. Entscheidend für das Helligkeitsempfinden ist neben der unterschiedlichen Anzahl, Position und Lage der einzelnen Farbrezeptoren vor allem die neuronale Verschaltung und Weiterleitung in den ventralen Hypothalamus. Bei der Einheit Gallilux bzw. Clux wurden diese Parameter nicht berücksichtigt. Weiterhin wäre der Ansatz der Einheit Gallilux bzw. Clux nur unter Voraussetzung der vollständig helladaptierten Wahrnehmung, dem photopischen Sehen, und bei einem ausreichenden UV-Anteil eingeschränkt anwendbar. Da der Hellempfindlichkeitsgrad und das photometrische Strahlungsäquivalent des Rindes ebenfalls nicht bekannt sind und sich nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik nicht hinreichend genau ermitteln lassen, muss weiterhin auf die lichttechnischen Grundgrößen, die auf dem Sehvermögen des Menschen basieren, zurückgegriffen werden. Weiterhin ist zu bedenken, dass das Beleuchtungsniveau in der Stallumgebung mit Leuchtdichtewerten im Bereich um 10 cd/m² dem mesopischen Bereich des menschl-

7. Diskussion

chen Sehens zuzuordnen ist. Durch die Eigenschaften des *tapetum lucidum* des Rindes ist keine Aussage möglich, ob die Grenzen des skotopischen, mesopischen und photopischen Bereichs vergleichbar zu den Grenzen des Menschen sind. Vermutlich ist das Beleuchtungsniveau in der Stallumgebung dem mesopischen Bereich des Rindes zuzuordnen.

Als nächste Anforderung wurde definiert, dass die Umgebungsleuchtdichte $L \gg 10^{-5} \text{ cd/m}^2$ bis $L \approx 10^2 \text{ cd/m}^2$ beträgt und ein Michelson-Kontrast von $K_M \geq 0,7$ angestrebt wird. Ein Vergleich dieser Anforderung mit Kontrasten aus anderen Studien kann nicht erfolgen, da keine Studie bekannt ist, in der eine Erfassung oder die Berechnung von Leuchtdichten und Kontrasten erfolgte. Dies ist sehr erstaunlich, da schon 1997 durch Temple Grandin (US-amerikanische Spezialistin für den Entwurf von Anlagen zur Haltung und Schlachtung kommerzieller Nutztiere) auf die Wichtigkeit hingewiesen wurde und in ihrer für Nutztierbetriebe erstellten Checkliste vierzehn der achtzehn Checkpunkte auf den rein visuellen Bereich entfallen und zehn dieser Checkpunkte dem Kontrast- und Farbsehen zuzuordnen sind [Gra15]. Im Bereich der Lichttechnik wird der Michelson-Kontrast vor allem im Bereich des barrierefreien Bauens verwendet. Die Erfahrungen aus den BMBF Verbundprojekt: Vernetztes Wohnen - Die mitdenkende Wohnung (KogniHome), dem BMBF Forschungsprojekt Lichtkonzept Historischer Stadtkern Rietberg und dem hochschulintern geförderten Vorhaben Intelligentes optisches LED-Leitsystem zeigen, wie wichtig ein ausreichender Kontrast zur Orientierung bei Sehbeeinträchtigungen (beispielsweise bei einer verringerten Sehschärfe) ist. Mit dem neuen Beleuchtungskonzept konnte im Versuchstall im Einzelnen an der prägnanten Stelle „Fressgitter“ im Funktionsbereich „Fressen“ der Kontrast mit dem neuen Beleuchtungskonzept deutlich gesteigert werden. Wird der Kontrast zwischen der Pos. 1 (Fressgitter) und der Pos. 4 (Boden) betrachtet, fällt auf, dass unter Natriumdampfbeleuchtung kein Kontrast vorlag ($K_m = 0,00$). Mit dem neuen Beleuchtungskonzept konnte der Michelson-Kontrast auf einen Wert von $K_m = 0,53$ gesteigert werden. Für das Rind bedeutet dies, dass es vermutlich schon auf einer weiten Entfernung das Gitter und dessen Abgrenzung erkennen kann, was dem Rind eine gewisse Sicherheit vor Gefahren aus der Entfernung gibt (Urinstinkt) [Fri14]. Eine vergleichbare Situation ist an der prägnanten Stelle „Tränke“ zu erkennen. Auch hier konnte der Kontrast zwischen der Tränkenoberfläche und der Rückwand von $K_M = 0,04$ bei Natriumdampfbeleuchtung auf $K_M = 0,33$ bei LED-Beleuchtung gesteigert werden. An der prägnanten Stelle „Hochbox-Stufe“ ist zu erkennen, dass zwischen der oberen Trittstufe und der Setzstufe im Bestandskonzept ein Kontrast von $K_M = 0,94$ berechnet wurde. Dieser Wert des Kontrastes kommt dem Grenzwert $K_M = 1$ sehr nahe und bedeutet, dass die Setzstufe nicht hinreichend erkannt wird. Das Auge fokussiert die hellere Fläche und kann die dunkle Fläche nur sehr schlecht wahrnehmen. Für das Rind bedeutet dies, dass es die Stufe nur schlecht erkennen kann und wahrscheinlich ungern den Schritt über die nur schwer zu erkennende Setzstufe wagt. An der prägnanten Stelle „Hochbox-Ruhen“ konnte der Kontrast von $K_M = -0,19$ bei dem Bestandskonzept auf $K_M = -0,55$ gesteigert werden. Das Rind kann vermutlich bei diesen Werten

7. Diskussion

in seiner Ruhephase sowie beim Aufstehen und Verlassen der Liegebox die Boxenbegrenzung sehr gut erkennen. Vergleichbar zur prägnanten Stelle „Hochbox-Stufe“ konnte auch an der prägnanten Stelle „Tiefbox-Stufe“ der Kontrast unter der LED-Beleuchtung gesteigert werden. Da an unterschiedlichen Liegeboxen vergleichbare Kontraste vorliegen, wird vermutet, dass kein Liegeboxentyp auf Grund einer schlechteren Erkennbarkeit gemieden wird. Abschließend ist an den prägnanten Stellen des Durchgangs zu erkennen, dass die Kontraste bei beiden Beleuchtungskonzepten sehr gering sind und die Rinder wahrscheinlich nur schlecht die Übergänge zwischen der Wand und dem Boden wahrnehmen können. Um dieses Problem zu beseitigen, wären bauliche Maßnahmen oder die Installation einer zusätzlichen Leuchte notwendig. Da es an dieser Stelle bei Beobachtungen zu keinerlei offensichtlichen Problemen kam, es zwei weitere Möglichkeiten zur Querung gibt und die Umbaumaßnahmen nur mit erheblichen Aufwand umgesetzt werden könnten, wurde unter Berücksichtigung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses auf weitere Maßnahmen verzichtet. Zusammenfassend lässt sich bewerten, dass an vielen prägnanten Stellen eine deutliche Verbesserung des Kontrasts zu erkennen ist.

Durch die Befragung der Mitarbeiter und Auszubildenden sollte der subjektive Eindruck erfasst werden. Hierzu wurde die Befragungsaktion bewusst als Vollerhebung zum Ende einer Versuchsphase durchgeführt. Die Mitarbeiter und Auszubildenden konnten zum Zeitpunkt der Befragungsaktion bereits sechs Wochen lang unter und mit der jeweiligen Beleuchtung in der Stallumgebung arbeiten. Auf Grund der geringen Anzahl an Befragten konnte keine umfassende statistische Auswertung erfolgen. Wäre statt der Vollerhebung eine Befragungsaktion mit Dritten und somit einer größeren Stichprobe durchgeführt worden, wäre zwar eine vollständige statistische Auswertung möglich gewesen, die dann aber auf objektiven Aspekten basiert hätte. Die wertvollen Antworten zum subjektiven Empfinden, die über dem Zeitraum der gesamten Versuchsphase hinweg entstanden sind, wären verloren gegangen. Bei der Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass die Mitarbeiter und Auszubildenden die Natriumdampfbeleuchtung deutlich schlechter als die LED-Beleuchtung bewertet haben. Die LED-Beleuchtung wurde durchschnittlich mit der Schulnote „gut“ bewertet. Die Natriumdampfbeleuchtung wurde hingegen durchschnittlich nur mit der Schulnote „befriedigend“ von den Mitarbeitern und mit der Schulnote „ausreichend“ von den Auszubildenden bewertet. Bei der Betrachtung der einzelnen Antworten fällt auf, dass es bei der LED-Beleuchtung auf die Frage 2 „Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als positiv?“ dreizehn Rückmeldungen gab. Jeder, der befragt wurde, konnte einen positiven Aspekt benennen. Zu dem Bestandskonzept konnten nur sieben und somit nur gut die Hälfte der Befragten eine Rückmeldung geben. Besonders bei den Auszubildenden fällt auf, dass nur zwei der sieben Befragten eine positive Rückmeldung geben konnten. Dieser Aspekt unterstreicht den Trend, dass das Bestandskonzept besonders durch die jüngeren Auszubildenden schlechter bewertet wurde. Bei der Betrachtung der Frage 3 „Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als negativ?“ bestätigt sich diese Vermutung erneut. Neun der dreizehn Befragten benannten einen negativen Aspekt, den sie bei

7. Diskussion

der LED-Beleuchtung empfinden. In Bezug auf die Natriumdampfbeleuchtung konnten wieder alle Befragten einen negativen Aspekt benennen. Bei der Betrachtung der einzelnen Nennungen fällt auf, dass die Helligkeit und Gleichmäßigkeit der LED-Beleuchtung besonders positiv benannt wurden. Bei der Helligkeit ist der direkte Bezug zur Leuchtdichte gegeben. Bezüglich der Gleichmäßigkeit wird vermutet, dass der Aspekt des verbesserten Kontrastsehens hier wirkt. Durch die Erhöhung der Kontrastverhältnisse können die Objekte der Stalleinrichtung sowie Kanten und Begrenzungen noch deutlicher erkannt werden. Zusammenfassend lässt sich als Zwischenfazit feststellen, dass das neue Beleuchtungskonzept objektiv bei Betrachtung der messtechnischen Ergebnisse und subjektiv durch die Ergebnisse der Befragung der Auszubildenden und Mitarbeiter von der Zielgruppe Mensch und hier insbesondere vom Landwirt besser angenommen wird.

Zur Bewertung des Beleuchtungskonzepts in Bezug auf die Anforderungen des Rindes wurden Verhaltensbeobachtungen in einem Aufenthaltsbereich durchgeführt. Da die Versuchsumgebung nicht zu unterteilend und symmetrisch aufgebaut war und zudem nicht über zwei identische Ausstattungen verfügte, musste die Versuchsdurchführung in drei Phasen erfolgen. In jeder der drei Versuchsphasen wurde kapazitätsbedingt das Verhalten über jeweils drei Samstage und drei Sonntage beobachtet. Die Wochentage Samstag und Sonntag wurden ausgewählt, da an diesen Tagen nur sehr wenig und selten Besucher vor Ort waren, welche die Rinder im Verhalten hätten beeinflussen können. Weiterhin wurden am Wochenende nur die notwendigsten Arbeiten durch das Stallpersonal erledigt, sodass auch hier die Beeinflussung minimiert werden konnte. Drei Versuchsphasen wurden zudem notwendig, da die erste Versuchsphase im November startete und die natürliche Länge des Tageslichts abnehmend war. Während der zweiten Versuchsphase änderte sich dies und die natürliche Länge des Tageslichts nahm zu. Weiterhin befanden sich die Rinder in der fortschreitenden Laktation, was ebenfalls einen Einfluss besaß. Die Ergebnisse der Verhaltensbeobachtungen zeigen, dass die meisten Aktionen und die längste Aufenthaltsdauer in der zweiten Versuchsphase, die während der LED-Beleuchtung stattfand, erfasst wurden. Ein signifikanter Unterschied konnte nicht festgestellt werden. Gut zu erkennen ist jedoch, dass sich die mittlere Häufigkeit aller erfassten Verhaltensweisen nur bei der eingeschalteten Beleuchtung unterscheidet. Bei ausgeschalteter Beleuchtung in den nächtlichen Stunden wurden kaum Veränderungen festgestellt. Bei der weiteren Verteilung der Aktionen im Tagesverlauf ist festzustellen, dass es keine signifikante Verschiebung des Rhythmus gab. Die Untersuchungen der LfL Tier und Technik [Gre17], die Verhaltensbeobachtungen einzelner Fokustiere in der gesamten Stallumgebung beinhalteten, zeigten, dass die betrachteten Fokustiere während der zweiten Versuchsphase signifikant länger in den Liegeboxen lagen und signifikant häufiger den Melkroboter besuchten. In diesem Zusammenhang wird vermutet, dass durch die erhöhte Anzahl an erfolgreichen Melkbesuchen auch eine erhöhte Anzahl und Aufenthaltszeit im ausgewählten Beobachtungsbereich, der sich in unmittelbarer Nähe zum AMS befindet, stattfand. Eine erhöhte Anzahl an erfolgreichen Melkbesuchen kann

7. Diskussion

als ein positiver Effekt des Beleuchtungskonzepts in Bezug auf die Eutergesundheit gewertet werden. Im weiteren Verlauf konnte die LfL Tier und Technik [Gre17] feststellen, dass mit der zweiten Versuchsphase ein signifikanter Anstieg in der Häufigkeit des Komfortverhaltens vorlag. In der dritten Phase bei Natriumdampfbeleuchtung war die Häufigkeit des Komfortverhaltens im Trend rückläufig. Ein signifikanter Unterschied konnte jedoch nicht festgestellt werden. Mit den Beobachtungen dieser Arbeit können die Ergebnisse der LfL Tier und Technik in Ansätzen bestätigt werden. Bei der Verhaltensbeobachtung Stehen ist zu erkennen, dass der geringste Median in der Versuchsphase 2 unter LED-Beleuchtung vorzufinden war. Dies lässt darauf schließen, dass die Rinder im Vergleich zu den anderen Versuchsphasen mit Natriumdampfbeleuchtung mehr Komfortverhalten und Sozialverhalten bei LED-Beleuchtung zeigten und nur selten eine Verhaltensbeobachtung ohne motorische Aktivität unter LED-Beleuchtung zu beobachten war. Bei den Verhaltensbeobachtungen Komfortverhalten und Sozialverhalten ist der höchste Mittelwert und Median in der zweiten Versuchsphase unter Beleuchtung zu erkennen. Nach der statistischen Auswertung kann der Unterschied zwischen der ersten Versuchsphase unter Natriumdampfbeleuchtung und der zweiten Versuchsphase unter LED-Beleuchtung als signifikant bezeichnet werden. Der Unterschied zwischen der zweiten und der dritten Versuchsphase ist nur im Trend zu erkennen und unter der vorgegebenen Wahrscheinlichkeit nicht signifikant. Dieser Effekt ist vergleichend bei den Ergebnissen der LfL Tier und Technik [Gre17] zu erkennen. Inwiefern die saisonalen Einflüsse des natürlichen Lichttages oder die fortschreitende Laktation der Fokustiere das Verhalten in den Versuchsphasen beeinflussten, kann nicht eindeutig bewertet werden.

Als Schlussfolgerung dieser Arbeit ist festzustellen, dass das Verhalten der Rinder und das Wohlbefinden des Menschen durch den Einsatz einer bedarfsorientierten Leuchte in Verbindung mit einem neuen Beleuchtungskonzept positiv beeinflusst wurden. Trotz der großen lichttechnischen Unterschiede in Bezug auf beispielsweise das Spektrum und die Farbwiedergabe der Leuchte sowie den Eigenschaften des neuen Beleuchtungskonzepts (erhöhte Gleichmäßigkeit in Kombination mit verbesserten Kontrastwerten) konnten im dem definierten Fokusbereich der ausgewählten Versuchsumgebung nur sehr geringe Verhaltensänderungen bei den Tieren festgestellt werden. Der subjektive Eindruck der Mitarbeiter zeigte deutlichere Anzeichen eines positiven Wohlbefindens in Bezug auf den Menschen. Das Vorgehen dieser Arbeit, das eine Unterteilung in den zwei grundlegenden Fragestellungen vorsah, war absolut notwendig. Eine bedarfsorientierte Leuchte allein oder ein Beleuchtungskonzept mit einer herkömmlichen LED-Leuchte hätte vermutlich keine signifikanten Veränderungen erzeugt.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Anforderungen an eine bedarfsorientierte Leuchte für die landwirtschaftliche Milchviehhaltung zu definieren sowie aufbauend ein Beleuchtungskonzept für Mensch und Rind zu konzipieren und praktisch umzusetzen. Basierend auf dem Stand von Wissenschaft und Technik und erweitert um die Kundenbedürfnisse der Landwirte, die in einer bundesweiten Befragungsaktion mit 155 ausgefüllten Fragebögen ermittelt wurden, erfolgte die Zuordnung der Anforderungen in zwei Prioritätsstufen. Der Priorität 1 wurden die Angaben zur maximalen Intensität im spektralen Verlauf, der Lichtfarbgruppe, des Gesamtlichtstroms, der Effizienz sowie des Aufbaus der Leuchte zugeordnet. Die Priorität 2 umfasste die Anforderungen der Farbwiedergabe, der Frequenz der Vorschalt elektronik, der Umgebungstemperatur, der verwendeten Stoffe und Materialien sowie der Schutzart der Leuchte. Nach der Entwicklung einer Demonstrationsleuchte, die im F&E Vorhaben I_LED_Milchvieh erfolgte, konnte abschließend im Rahmen dieser Arbeit die Verifizierung der entwickelten Leuchte in der lichttechnischen Laborumgebung der Fachhochschule Bielefeld durchgeführt werden.

Im zweiten Schritt wurde ein bedarfsorientiertes Beleuchtungskonzept für Mensch und Rind in dem Anwendungsfall eines Liegeboxenlaufstalls des Versuchs- und Bildungszentrums Landwirtschaft Haus Düsse konzipiert und praktisch umgesetzt. Das Konzept sollte dabei die Sehaufgaben unterstützen und gleichzeitig das Verhalten positiv beeinflussen. Die abschließende Validierung erfolgte mittels einer neu entwickelten Mess- und Bewertungsstrategie, einer Mitarbeiterbefragung sowie einer Verhaltensbeobachtung der Rinder. Im Rahmen der neu entwickelten Mess- und Bewertungsstrategie wurde ein von den DIN-Normen abweichendes Messraster, das zuvor in verschiedenen Beleuchtungssimulationen für den Anwendungsfall der landwirtschaftlichen Milchviehhaltung optimiert wurde, verwendet. Zusätzlich zur klassischen Bewertung, die auf Grundlage der Beleuchtungsstärke und dessen Gleichmäßigkeit basiert, wurde an prägnanten Stellen in der ausgewählten Versuchsumgebung die Leuchtdichte erfasst. Unter Berücksichtigung des Michelson-Kontrasts wurden in den Funktionsbereichen „Fressen“, „Laufen“ und „Liegen“ fünf prägnante Stellen betrachtet. Durch das neue Beleuchtungskonzept, welches mit der neu entwickelten LED-Leuchte umgesetzt wurde, konnten bei einem vergleichbaren Beleuchtungsniveau zur Bestandsbeleuchtung mit Natriumdampfbeleuchtung die Gleichmäßigkeit sowie die erfassten Kontraste deutlich verbessert werden. Im Rahmen einer Mitarbeiterbefragung, die als Vollerhebung durchgeführt wurde, konnte der subjektive Eindruck eines jeden Mitarbeiters erfasst und bewertet werden. Bei den Ergebnissen ist deutlich zu erkennen, dass das neue LED-Beleuchtungskonzept bevorzugt wurde. Besonders die Aspekte Helligkeit und Gleichmäßigkeit wurden

8. Zusammenfassung und Ausblick

vermehrt positiv benannt. Abschließend erfolgte in einem Aufenthalts- und Wartebereich die Verhaltensbeobachtung ausgewählter Verhaltensweisen. 18 ausgewählte Fokustiere wurden hierzu in drei Versuchsphasen mit Natriumdampf-, LED- und abschließender Natriumdampfbeleuchtung als Kontrollphase beobachtet. Insgesamt wurden in der 15-wöchigen Versuchsdurchführung 432 Versuchsstunden mit 1.502 Aktionen, die die Verhaltensweisen Stehen, Komfort- und Sozialverhalten beinhalteten, ausgewertet. Signifikante Unterschiede konnten in der Häufigkeit des Verhaltens Stehen nicht nachgewiesen werden. Zwischen der ersten Versuchsphase unter Natriumdampfbeleuchtung und der zweiten Versuchsphase unter LED-Beleuchtung konnte ein signifikanter Anstieg im Komfortverhalten und Sozialverhalten festgestellt werden. Ein signifikanter Rückgang konnte in der Kontrollphase nicht festgestellt werden.

Aktuell wird im Rahmen des Forschungsvorhabens I_LED_Milchvieh_II die vorhandene Demonstrationsleuchte zur Marktreife weiterentwickelt. Inhaltlich wurden für die erfolgreiche Umsetzung im ersten Schritt eine Analyse des Marktumfelds (Schwerpunkte auf Markt-, Kunden-, Konkurrenz- und Umfeldsituation) sowie die daraus folgende Definition der Erfolgsfaktoren für die Marktreife durchgeführt. Weiterhin wurde die Optimierung der Wartungsfreundlichkeit unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten geplant. Neben den Praxis- und Funktionstests in der Labor- und der Stallumgebung soll aktuell im Winter 2018/19 der Bau und anschließende Praxistest einer weiteren Kleinserie erfolgen. Im Fokus der Untersuchungen stehen weiterhin die tierschutzrelevanten Aspekte sowie die biologische Wirksamkeit des Lichts. Durch eine intelligent gesteuerte und an den Bedarf angepasste Beleuchtung soll die Tiergerechtigkeit sowie der Arbeitskomfort und die -sicherheit des Menschen gesteigert werden.

In zukünftigen Forschungsarbeiten könnten die Thematiken Vernetzung und Stallklimaregelung weiter in den Fokus gestellt werden. Derzeit und im Rahmen der Untersuchungen dieser Arbeit, wurde die Beleuchtung statisch ein- und ausgeschaltet. Per Zeitschaltuhr wurde ein Lichtprogramm vorgegeben und mittels eines Dämmerungsschalters wurde bei ausreichendem Tageslichteintrag die vorhandene Beleuchtung ausgeschaltet. In weiterführenden Arbeiten könnten das Spektrum und die Ansteuerung der Leuchte erweitert werden, sodass ein dynamisches und tageslichtähnliches Spektrum eingestellt werden kann. Als ein Ziel wäre ein „gläsernes Dach“ anzustreben. Das natürliche Tageslicht könnte messtechnisch erfasst und bedarfsorientiert innerhalb der Stallumgebung nachgebildet werden. Weiterhin könnten intelligente Curtains neben der Luft- auch die Lichtqualität verbessern. Durch das positive Zusammenwirken von geeigneter Sensorik, einer adaptiven Systemsteuer- und Regeleinheit sowie innovativen Stallausrüstungen könnte eine ganzheitliche Betrachtung der Stallklimaregelung erfolgen.

Anhang

Literaturverzeichnis

- [Ama14] Amann, B. et al.: True blue: S-opsin is widely expressed in different animal species. In Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2014, 98, S. 32-42
- [Ara81] Arave, C. W.; Albright, J. L.: Cattle Behavior. In Journal of dairy science, 1981, 64, S. 1318-1329
- [Arb16] Arbeitsgruppe Selbstevaluierung Tierschutz / Rind: Handbuch Rinder. Selbstevaluierung Tierschutz, Wien, 2016, S. 59
- [Arm94] Armstrong, D. V.: Heat stress interaction with shade and cooling. In Journal of dairy science, 1994, 77, S. 2044-2050
- [Arn16] Arndt, C. et al.: Ausstieg Schnabelkürzung bei Legehennen. Einfluss von Lichtmodifikationen (UV-Licht) auf das Auftreten von Federpicken und Kannibalismus von Jung- und Legehennen in Praxisbetrieben, Abschlussbericht, 2016, S. 64
- [Auc05] Auchtung, T. L. et al.: Effects of photoperiod during the dry period on prolactin, prolactin receptor, and milk production of dairy cows. In Journal Dairy Science, 2005, 88, S. 121-127
- [Aue89] Auernhammer, H.: Stallsysteme für die Milchviehhaltung im Vergleich - Methode und Ergebnisse. Habilitationsschrift, Weihenstephan, 1989, S. 8-12
- [Aue15] Auer, B. R.; Rottmann, H.: Statistik und Ökonometrie für Wirtschaftswissenschaftler. Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, s.l., 2015, S. 32-35
- [Bac16] Bach, M. et al.: Kontrastsehen–Definitionen, Umrechnungen und Äquivalenztabelle. In Der Ophthalmologe, 2017, 114; S. 341-347
- [Bal81] Baldwin, B. A.: Shape discrimination in sheep and calves. In Animal Behaviour, 1981, 29, S. 830-834

Anhang

- [Bar94] Bartussek, H.: Theorie der Freilandhaltung von Nutztieren: Eine unbekannte Wissenschaft. In Die Bodenkultur, 1994, 45; S. 369-387
- [Bar09] Bartenbach, C.; Witting, W.: Handbuch für Lichtgestaltung. Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen. Springer, Wien, 2009, S. 77-105
- [Bat90] Batz, F.-J.: Grundvoraussetzungen für eine tiergerechte Milchviehhaltung. Birkhäuser, Basel, 1990, S. 57
- [Bel09] Beleuchtungspraxis. Außenbeleuchtung. Trilux GmbH, Arnsberg, 2009, S. 19
- [Ber02] Berson, D. M.; Dunn, F. A.; Takao, M.: Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock. In Science, 2002, 295, S. 1070-1073
- [Bil89] Bilodeau, P. P. et al.: Effects of Photoperiod and Pair-Feeding on Lactation of Cows Fed Corn or Barley Grain in Total Mixed Rations. In Journal of dairy science, 1989, 72, S. 2999-3005
- [Bod16] Bodrogi, P. in Baer, R.; Barfuß, M.; Seifert, D. Hrsg.: Beleuchtungstechnik. Huss-Medien GmbH, Berlin, 2016, S. 54-67
- [Bor10] Bortz, J.; Schuster, C.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010, S. 100-133
- [Bow80] Bowmaker, J. K.; Dartnall, H. J.: Visual pigments of rods and cones in a human retina. In The Journal of physiology, 1980, 298, S. 501-511
- [Bra01] Brainard, G. C. et al.: Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. In Journal of Neuroscience, 2001, 21, S. 6405-6412
- [Bri72] Bridges, C. D. B. in Dartnall, H. J. A.: Photochemistry of vision. Springer Berlin Heidelberg, 1972, S. 470
- [Bue12] Büscher, W.; Henseler-Paßmann, J.; Schmidhausen, A.: Feinstaubbelastungen in Tierställen - Situationsbewertung und Minderungsmaßnahmen. Forschungsbericht Nr. 169, Bonn, 2012, S. 17-39
- [Bur05] Burda, H.: Allgemeine Zoologie. 7 Tabellen. Ulmer, Stuttgart, 2005, S. 272-281
- [Cam10] Cambra-López, M. et al.: Airborne particulate matter from livestock production systems: A review of an air pollution problem. In Environmental pollution, 2010, 158, S. 1-17

Anhang

- [Car01] Carroll, J. et al.: Photopigment basis for dichromatic color vision in the horse. In Journal of Vision, 2001, 1, S. 2
- [Cla06] Clarke, S.; House, H.: Energy efficient dairy lighting, 2006
- [Cre18] Cree, I.: Cree XLamp LEDs. Chemical Compatibility, Durham, USA, 2018, S. 1-13
- [Cur90] Curcio C. A.; Sloan K. R.; Kalina R. E.; Hendrickson A. E.: Human Photoreceptor Topography. In Journal of Comparative Neurology, 1990; S. 497-523
- [Dah97] Dahl, G. E. et al.: Effects of a Long Daily Photoperiod on Milk Yield and Circulating Concentrations of Insulin-Like Growth Factor-I. In Journal of dairy science, 1997, 80, S. 2784 -2789
- [Dah00] Dahl G. E.; Buchanan B. A.; Tucker H. A: Photoperiodic Effects on Dairy Cattle: A Review. In Journal Dairy Science, 2000, 83, S. 885-893
- [Dah03a] Dahl, G. E.: Photoperiod management of dairy cattle for performance and health. In Advances in Dairy Technology, 2003, 15, S. 347-353
- [Dah03b] Dahl, G. E.; Petitclerc, D.: Management of photoperiod in the dairy herd for improved production and health. In Journal of animal science, 2003, 81, S. 11-17
- [Dah12] Dahl, G. E.; Tao, S.; Thompson, I. M.: LACTATION BIOLOGY SYMPOSIUM: Effects of photoperiod on mammary gland development and lactation. In Journal of animal science, 2012, 90, S. 755-760
- [Dou14] Douglas, R. H.; Jeffery, G.: The spectral transmission of ocular media suggests ultraviolet sensitivity is widespread among mammals. In Proceedings. Biological sciences, 2014, S. 281
- [Dri72] Drischel, H.: Biologische Rhythmen, Akademie-Verlag, 1972, S. 9
- [Dud19] Duden: Suchen nach einem Wort, Produkt, einer ISBM oder Wendung, <https://www.duden.de/>, letzter Zugriff 19.02.2019
- [Eis09] Eise, M.: Beurteilung von Interaktionen zwischen Kriterien der Haltungstechnik und der Fruchtbarkeit von Milchkühen am Beispiel von Kühen in Anbindehaltung als Grundlage zur Verbesserung der Haltungsumgebung. Inauguraldissertation, 2009

Anhang

- [Erk14] Eriksson, J.: Effect of low light intensities on dairy cows behavior. Master Thesis Animal Science, Uppsala, 2014, S. 20-21
- [Eva89] Evans, N. M.; Hacker, R. R.: Effect of chronobiological manipulation of lactation in the dairy cow. In Journal of dairy science, 1989, 72; S. 2921-2927
- [Fau17] Fauteck, J.-D.; Eder, A.: Melatonin. Das Geheimnis eines wunderbaren Hormons, Brandstätter, 2017, S. 21-143
- [Fri14] Frings, S.; Müller, F.: Biologie der Sinne. Vom Molekül zur Wahrnehmung. Springer Spektrum, Heidelberg, 2014, S. 120-154
- [Gan11] Gantner, V. et al.: Temperature-humidity index values and their significance on the daily production of dairy cattle. In Mljekarstvo: časopis za unaprjeđenje proizvodnje i prerade mlijeka, 2011, S. 56-63
- [Geg12] Gegenfurtner, K. R. in Karnath, H.-O.; Ackermann, H. Hrsg.: Kognitive Neurowissenschaften mit 28 Tabellen. Springer, Berlin, 2012, S. 47-48
- [Ges03] Gesellschaft für Ökologische Tierhaltung e.V.: Verhalten, artgerechte Haltungssysteme und Stalleinrichtungen für Rind, Schwein und Huhn, Witzenhausen, 2003
- [Gil86] Gilbert, B. J.; Arave, C. W.: Ability of Cattle to Distinguish Among Different Wavelengths of Light. In Journal Dairy Science, 1986, 69, S. 825-832
- [Gol15] Goldstein, E.B.; Gegenfurtner, K.; Neuser-von Oettingen, K. Hrsg.: Wahrnehmungspsychologie. Der Grundkurs. Springer, Berlin, 2015, S. 251
- [Gor70] Gordon, J. G.: Food selection by ruminants. In Proceedings of the Nutrition Society, 1970, 29, S. 325-330.
- [Gra15] Grandin, T.; Johnson, C.; Burkhardt, C.: Ich sehe die Welt wie ein frohes Tier. Eine Autistin entdeckt die Sprache der Tiere. Verlag Rad und Soziales, Hannover, 2015, S. 27-46
- [Gra97] Grandin, T.: The design and construction of facilities for handling cattle. In Livestock Production Science, 1997, 49, S. 103-119
- [Gre08] Green, M.; Odom, J. V.: Forensic vision with application to highway safety. Lawyers & Judges, Tucson, op. 2008, S. 68-84

Anhang

- [Gre17] Greif, M. et al.: Einfluss unterschiedlicher Lichtspektren auf das Verhalten von Milchkühen, Posterbeitrag, 49. Internationale Tagung Angewandte Ethologie, 2017
- [Gri92] Griffith, M. K.; Minton, J. E.: Effect of light intensity on circadian profiles of melatonin, prolactin, ACTH, and cortisol in pig. In Journal of animal science, 1992, 70, S. 492-498
- [Han83] Hansen, P. J.; Hauser, E. R.: Genotype Environmental Interactions on Reproductive Traits of Bovine Females. III. Seasonal Variation in Postpartum Reproduction as Influenced by Genotype, Suckling and Dietary Regimen. In Journal of animal science, 1983, 56, S. 1362-1369
- [Har09] Hartung, J.; Elpelt, B.; Klösener, K.-H.: Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. Oldenbourg, München, 2009, S. 243
- [Hat02] Hattar, S. et al.: Melanopsin-Containing Retinal Ganglion Cells: Architecture, Projections, and Intrinsic Photosensitivity. In Science, 2002, 295, S. 1065-1070
- [Hei14] Heinz, R.: Grundlagen der Lichterzeugung. Von der Glühlampe bis zu LED, OLED und Laser; Lampen - Leistungsreduktion - LED - OLED - Laser. Highlight Verl.-Ges, Rüthen, 2014, S. 16-154
- [Hel04] Heldmaier, G.: Vegetative Physiologie. Mit 36 Tabellen. Springer, Berlin, 2004, S. 447-448
- [Hel13] Heldmaier, G.; Neuweiler, G.; Rössler, W.: Vergleichende Tierphysiologie. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2013, S. 425-786
- [Hen02] Hentschel, H.-J.; Bernitz, F. Hrsg.: Licht und Beleuchtung. Grundlagen und Anwendungen der Lichttechnik. Hüthig, Heidelberg, 2002, S. 47
- [Hil15] Hildebrandt, J.-P.; Bleckmann, H.; Homberg, U.: Penzlin - Lehrbuch der Tierphysiologie. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2015, S. 687
- [lbs19] IBS Elektronik: ALT-Pedometer, Datenblatt, https://ibs-elektronik.de/wp-content/uploads/2014/11/flydeu_pedo2G.pdf, letzter Zugriff 19.02.2019
- [Ins19] Instrument Systems Optische Messtechnik GmbH: Die Goniometertypen A / B / C, <http://www.optronik.de/produkte/goniophotometer/goniometertypen-abc/>, letzter Zugriff 19.02.2019

Anhang

- [Jac98] Jacobs, G. H.; Deegan, J. F.; Neitz, J.: Photopigment basis for dichromatic color vision in cows, goats, and sheep. In *Vision Research*, 1998, 15, S. 581-584.
- [Jac09] Jacobs, G. H.: Evolution of colour vision in mammals. In *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 2009, 364, S. 2957–2967.
- [Jan00] Janni, K. A.: *Lighting Dairy Facilities*, St. Paul, Minnesota, 2000, S. 76
- [Kad14] Strasburger, E. et al.: *Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften*. Springer Spektrum, Berlin, 2014, S. 319
- [Kal02] Kalsbeek, A.; Buijs, R. M.: Output pathways of the mammalian suprachiasmatic nucleus: coding circadian time by transmitter selection and specific targeting. In *Cell and tissue research*, 2002, 309, S. 109-118.
- [Kas08] Kasuya, E. et al.: Light exposure during night suppresses nocturnal increase in growth hormone secretion in Holstein steers. In *Journal of animal science*, 2008, 86, S. 1799-1807.
- [Kha17] Khanh, T. Q.; Bodrogi, P.; Vinh, T. Q.: *Farbwiedergabe nach CIE 1995, nach TM30-15 und nach CIE 2016*, TU Ilmenau, 2017
- [Kha19] Khanh T. Q.: *Testfarben nach DIN 6169*, https://www.lichtnet.de/wp-content/uploads/Li1-2_T45_Khanh_B18.jpg, letzter Zugriff 19.02.2019
- [Koh13] Koh S.; van Driel W. D.; Yuan C. A.; Zhang G. Q. in van Driel, W.D.; Fan, X.J. Hrsg.: *Solid State Lighting Reliability. Components to Systems*. Springer, New York, NY, 2013, S. 186
- [Kon13] Konica Minolta: *Luminance Meter LS 100 / LS 110. Instruction Manuel*, Japan, 2013, S. 32
- [Kor72] Kordts, E.; Gravert, H. O.: Untersuchungen über den Einfluss von künstlichem Licht und Bewegung auf die Fruchtbarkeit der Kuh. In *Kieler milchwirtschaftliche Forschungsberichte: Veröffentlichungen der Bundesforschungsanstalt für Ernährung und Lebensmittel*, 1972, S. 15-22
- [Koe88] Kölmel, H. W.: *Die homonymen Hemianopsien. Klinik und Pathophysiologie zentraler Sehstörungen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1988, S. 18

Anhang

- [Kol07] Kollmann, M. T.: Importance of light and of the serotonin-melatonin-system on neurophysiology of milk synthesis and ejection in dairy cows. Dissertation, Weihenstephan, 2007, S. 9-10
- [Kol90] Kolb, E.: Vom Leben und Verhalten unserer Haustiere. Eine populärwissenschaftliche Einführung für Tierfreunde. Hirzel, Leipzig, 1990, S. 232
- [Kra14] Krause, R. et al. in Völker, S.: Vitamin-D-Status in Deutschland - 8. Symposium Licht und Gesundheit. Eine Sondertagung der TU Berlin gemeinsam mit DAfP und LiTG; Univ.-Verl. der TU, Berlin, 2014, S. 37
- [Kuk93] Kukkonen, H. et al.: Michelson contrast, RMS contrast and energy of various spatial stimuli at threshold. In Vision research, 1993, 33, S. 1431-1436.
- [Lab17] Labsphere: illumia Plus. Light Measurement Sphere Systems, 2017
- [Lan04] Lang, H. in Eichler, H.-J.; Niedrig, H.: Lehrbuch der Experimentalphysik. Optik. Wellen- und Teilchenoptik. Walter de Gruyter, Berlin, 2004, S. 690
- [Lan08] Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern: Forschungsbericht. Analyse der Abgangsursachen in ausgewählten Milchviehbetrieben Mecklenburg-Vorpommerns unter Einbeziehung einzeltierbezogener Behandlungen und Leistungen, 2008, S. 4-5
- [Lan12a] Land, M. F.; Nilsson, D.-E.: Animal eyes. Oxford University Press, Oxford, New York, NY, 2012, S. 139-141
- [Lan12b] Landesverband Thüringer Rinderzüchter: Bericht über Arbeit und Ergebnisse 2012, S. 52
- [Lan98] Lang, G. K.; Amann, J.: Augenheilkunde. Verstehen, lernen, anwenden; 42 Tabellen. Thieme, Stuttgart, 1998, S. 309
- [Las99] Lasko, T. A.; Kripke, D. F.; Elliot, J. A.: Melatonin suppression by illumination of upper and lower visual fields. In Journal of biological rhythms, 1999, 14, S. 122-125
- [Lau44] Lauber, H.: Das Gesichtsfeld. Untersuchungsgrundlagen, Physiologie und Pathologie. J.F. Bergmann-Verlag, Munich, s.l., 1944, S. 28
- [Leo17] Leonhart, R.: Lehrbuch Statistik. Einstieg und Vertiefung. Hogrefe Verlag, Bern, 2017, S. 248

Anhang

- [Lew06] Lewis, P.; Morris, T.: Poultry lighting. The theory and practice. Northcot, Andover, 2006
- [Lie13] Lieury, A.; Herbst, G.: Die Geheimnisse unseres Gehirns. Springer, Dordrecht, 2013, S. 175
- [Lin85] in Evered, D.; Clark, S.: Photoperiodism, melatonin and the pineal. Pitman, London, Newark, USA, 1985, S. 129-139
- [Loc11] Lochner, H.; Beckmann, C.: Grundstufe Landwirt. Fachtheorie für Boden, Pflanze, Tier, Technik, Chemie, Physik, Biologie, Züchtung, Ökologie, Landschaftspflege, Artenschutz, Betriebswirtschaft, Buchführung, Datenverarbeitung, Kommunikation, landwirtschaftliches Fachrechnen. BLV-Buchverlag, München, 2011, S. 414
- [Loc12] Lochner, H.; Beckmann, C.: Agrarwirtschaft, Fachstufe Landwirt. Fachtheorie für pflanzliche Produktion: Planen, Führen, Verwerten und Vermarkten von Kulturen; tierische Produktion: Haltung, Fütterung, Zucht und Vermarkten von Nutztieren; Energieproduktion: Erzeugen und Vermarkten regenerativer Energie; Lehr- und Arbeitsbuch für berufsbildende Schulen, 2012, S. 385
- [Loe15] Loeffler, K.; Gäbel, G.: Anatomie und Physiologie der Haustiere. UTB; Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, Stuttgart, 2015, S. 391
- [Lot99] Lotthammer, K. - H. in Grunert, E. et al. Hrsg.: Fertilitätsstörungen beim weiblichen Rind. Parey, Berlin, 1999, S. 307
- [Lum11] Lumotech: Product Specification - LED drivers, Datenblatt, 2011
- [Lum15] Lumileds: DS101 LUXEON R Product Datasheet, 2015
- [Lum16] Lumileds: AB32 LUXEON Rebel Platform Assembly and Handling Information Application Brief, 2016
- [Lum17] Lumileds: DS68 LUXEON Rebel Color Line Product Datasheet, 2017
- [Mar84] Marcek, J. M.; Swanson, L. V.: Effect of Photoperiod on Milk Production and Prolactin of Holstein Dairy Cows. In Journal of dairy science, 1984, 67, S. 2380-2388
- [Mar18] Marzahn, J.: Konkurrenzanalyse für den LED-Stallleuchtenmarkt im Bereich der Milchviehtierhaltung. Bachelorarbeit im Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen, Bielefeld, 2018, Anlage Wettbewerbsvergleich

Anhang

- [McF99] McFarland, D.; Dreßen, W.: Biologie des Verhaltens. Evolution, Physiologie, Psychologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1999, S. 188
- [Mea18] MeanWell: HLG-80H-C series 90 W Constant Current Mode LED Driver. Datenblatt, 2018
- [Meh15] Mehner, K.: Vitamin A: Folgen von Mangel und Überdosierung, Frankfurt am Main, 2015, S. 1-5
- [Mes14] Messner, S.: Blinde Kuh. Master Thesis, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, 2014, S. 10-15
- [Mil99] Miller, S. P.; Wilton, J. W.; Pfeiffer W. C.: Effects of milk yield on biological efficiency and profit of beef production from birth to slaughter. In Journal of animal science, 1999, 77, S. 344-352
- [Mob19] Mobotix, Mobotix D16A DualDome, Datenblatt, https://www.mobotix.com/sites/default/files/2018-05/Mx_TS_D16A_de_20180529.pdf, letzter Zugriff 19.02.2019
- [Moo85] Moore-Ede, M. C.; Moline, M. L.; in Evered, D.; Clark, S.: Photoperiodism, melatonin and the pineal. Pitman, London, Newark, NJ, USA, 1985, S. 23-24
- [Mor08] Morrissy, A. D.; Cameron, A. W. N.; Tilbrook, A. J.: Artificial lighting during winter increases milk yield in dairy ewes. In Journal Dairy Science, 2008, 91, S. 4238-4243
- [Mor72] Morton, R. A. in Dartnall, H. J. A.: Photochemistry of vision. Springer Berlin Heidelberg, 1972, S. 44-45
- [Mos12] Moßig, I.: Stichproben, Stichprobenauswahlverfahren und Berechnung des minimal erforderlichen Stichprobenumfangs, Beiträge zur Wirtschaftsgeographie und Regionalentwicklung, 2012, S. 20-21
- [Mou14] Mounaix, B. et al.: Cattle behaviour and the human-animal relationship. Variation factors and consequences in breeding, Le Rheu, 2014, S. 3-5
- [Mue09] Müller, W.; Frings, S.: Tier- und Humanphysiologie. Eine Einführung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009, S. 505
- [Mue11] Münch, T.: Die wirtschaftliche Milchkuh - Ökonomische Aspekte der Tiergesundheit, Lichtenwalde, 2011, S. 9-19

Anhang

- [Mue58] Müller, R.; Kurtz, L.: Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen Stallklima und Fruchtbarkeit des Rindes. In Zeitschrift für Tierzüchtung und Züchtungsbiologie, 1958, 71, S. 146-154
- [Mut06] Muthuramalingam, P.; Kennedy, A. D.; Berry, R. J.: Plasma melatonin and insulin-like growth factor-1 responses to dim light at night in dairy heifers. In Journal of pineal research, 2006, 40, S. 225-229
- [Nel11] Nelson, R. J.: An introduction to behavioral endocrinology. Sinauer Associates, Sunderland, MA, 2011, S. 517
- [Neu03] Neuweiler, G.: Neuro- und Sinnesphysiologie. Mit 5 Tabellen. Springer, Berlin, 2003, S. 343
- [Nie07] Niedersächsisches Ministerium für den ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft, Ref. 204 Hrsg.: Tierschutzleitlinie für die Milchkuhhaltung, 2007, S. 42-46
- [Nic04] Nickel, R. et al.: Nervensystem, Sinnesorgane, endokrine Drüsen. Parey, Stuttgart, 2004, S. 412- 414
- [Nub92] Nuboer, J. F. W.; Coemans, M. A. J. M.; Vos, J. J.: Artificial lighting in poultry houses: are photometric units appropriate for describing illumination intensities? In British Poultry Science, 1992, 33, S. 135-140
- [Oek13] ÖKL-Arbeitskreis Landwirtschaftsbau: Licht im Rinderstall, 2013, S. 3
- [Oez17] Özçelik, R.; Bruckmaier, R. M.; Hernández-Castellano, L. E.: Prepartum daylight exposure increases serum calcium concentrations in dairy cows at the onset of lactation. In Journal of animal science, 2017, 95, S. 4440-4447
- [Ost17] Osterkamp, J.: Medizin-Nobelpreis für die innere Uhr. In Spektrum - Die Woche, 2017, S. 40-44
- [Pal76] Palmer, J.: An Introduction to Biological Rhythms. Elsevier Science, Oxford, 1976, S. 5-7
- [Pau11] Paululat, A.; Purschke, G.: Wörterbuch der Zoologie. Tiernamen, allgemeinbiologische, anatomische, entwicklungsbiologische, genetische, physiologische und ökologische Termini. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2011, S. 175
- [Pea95] Pearson, C. C.; T. J. Sharples: Airborne dust concentrations in livestock buildings and the effect of feed. In Journal of agricultural engineering research, 1995, 60, S. 145-154

Anhang

- [Pet78] Peters, R. R. et al.: Supplemental lighting stimulates growth and lactation in cattle. In *Science*, 1978, 199, S. 911-912
- [Pet81] Peters, R. R. et al.: Milk Yield, Feed Intake, Prolactin, Growth Hormone, and Glucocorticoid Response of Cows to Supplemented Light. In *Journal of dairy science*, 1981, 64, S. 1671-1678
- [Phi89] Phillips, C. J. C., Schofield, S. A.: The effect of supplementary light on the production and behaviour of dairy cows. In *Animal Science*, 1989, 48, S. 293-303
- [Phi01] Phillips, C. J. C.; Lomas, C. A.: The Perception of Color by Cattle and its Influence on Behavior. In *Journal Dairy Science*, 2001, 84, S. 807-813
- [Phi02] Phillips, C. J. C.: Cattle behaviour and welfare. Blackwell Science, Oxford, 2002, S. 49-52
- [Pla12] Plaut, K.; Casey, T.: Does the circadian system regulate lactation? In *Animal*, 2012, 6, S. 394-402
- [Pli16] Plischke H. in Baer, R.; Barfuß, M.; Seifert, D. Hrsg.: Beleuchtungstechnik. Huss-Medien GmbH, Berlin, 2016, S. 92
- [Pus10] Puschmann, A.-K.: Migräne, Stress und Emotionen - Psychophysiologische und neuroimmunologische Faktoren. Dissertation, 2010
- [Qua63] Quay, W. B.: Circadian rhythm in rat pineal serotonin and its modifications by estrous cycle and photoperiod. In *General and comparative endocrinology*, 1963, 3, S. 473-479
- [Rad13] Radiant Zemax LLC: OCL-310, Datenblatt zum NFMS Model: 800, Redmond USA, 2013
- [Raz11] Razali, N. M.; Wah, Y. B.: Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. In *Journal of statistical modeling and analytics*, 2011, 2, S. 21-33
- [Rea02a] Rea, M. S.: Light - Much More Than Vision. In *Cancer*, 2002, 13, S. 14
- [Rea02b] Rea, M. S.; Figueiro, M. G.; Bullough, J. D.: Circadian photobiology: an emerging framework for lighting practice and research. In *Lighting Research and Technology*, 2002, 34, S. 177-187
- [Red08] Rédei, G. P.: Encyclopedia of Genetics, Genomics, Proteomics and Informatics. Springer Science+Business Media, Dordrecht, 2008, S. 2088

Anhang

- [Reh97] Rehkämper, G.; Görlach, A.: Visual discrimination in adult dairy bulls. In Journal of dairy science, 1997, 80, S. 1613-1621
- [Reh98] Rehkämper, G.; Görlach, A.: Visual Identification of Small Sizes by Adult Dairy Bulls. In Journal of dairy science, 1998, 81, S. 1574-1580
- [Reh00] Rehkämper, G. et al.: Visual perception and stimulus orientation in cattle. In Vision Research, 2000, 40, S. 2489-2497
- [Rei12] Reichrath, J.: Die Haut im Spannungsfeld der positiven und negativen UV-Wirkungen. Siebentes Symposium Licht und Gesundheit; Eine Sondertagung der TU Berlin und der DAfP, DGP und LiTG, Berlin, 2012, S. 77-78
- [Rei96] Reim, M.: Augenheilkunde. Enke, Stuttgart, 1996, S. 48
- [Rek99] Reksen, O. et al.: Effects of photointensity and photoperiod on milk yield and reproductive performance of Norwegian red cattle. In Journal Dairy Science, 1999, 82; S. 810-816
- [Ric06] Richter, T.; Busch, B. Hrsg.: Krankheitsursache Haltung. Beurteilung von Nutztierställen - ein tierärztlicher Leitfaden. Enke, Stuttgart, 2006
- [Rio89] Riolo, J. A. et al.: Colour perception in fighting cattle. In Applied Animal Behaviour Science, 1989, 23, S. 199-206
- [Rod98] Rodieck, R. W.: The first steps in seeing. Sinauer Assoc, Sunderland, Mass., 1998, S. 32
- [Roe95] Röhler, R.: Sehen und Erkennen. Psychophysik des Gesichtssinnes. Springer, Berlin, 1995, S. 45-152
- [Ros16] Rosemann, A. in Baer, R.; Barfuß, M.; Seifert, D. Hrsg.: Beleuchtungstechnik. Huss-Medien GmbH, Berlin, 2016, S. 401-413
- [Ryb89] Ryba, N.; Uhl, R.: In vitro dark adaptation and preservation of electrical light responses in the retina from bovine eyes. In Experimental brain research, 1989, 74, S. 618-624
- [Sal15] SaluVet GmbH: Fruchtbare Kühe – welche Rolle die Leber dabei spielt., Bad Waldsee, 2015, S. 1-2
- [Sch08] Schiviz, A. N. et al.: Retinal cone topography of artiodactyl mammals: influence of body height and habitat. In Journal of Comparative Neurology, 2008, 507, S. 1336-1350.

Anhang

- [Sch09] Schrader, L.: Tierschutz und Tierhaltung in der Milchviehhaltung. In Züchtungskunde, 2009, 81, S. 414-420
- [Sch12a] Schäfer, T. et al. in Licht 2012. 20. Gemeinschaftstagung, 11. bis 14. September 2012, Technische Universität Berlin, Tagungsband. LiTG, Berlin, 2012, S. 442-449
- [Sch13] Schiefler, I.: Greenhouse gas and ammonia emissions from dairy barns. Inaugural-Dissertation, 2013
- [Sch14] Schwenzfeier-Hellkamp, E. et al.: Performance Quality Label für LED-Leuchten (PQL): Schlussbericht zum IGF-Vorhaben, 2014, S. 1-69
- [Sch15] Schiller, C.: Untersuchungen über spektrale Kontrastempfindlichkeitsfunktionen des menschlichen Auges im mesopischen Bereich und ihre Einflussparameter. Dissertation, 2015, S. 8
- [Sch16] Schierz, C. in Baer, R.; Barfuß, M.; Seifert, D. Hrsg.: Beleuchtungstechnik. Huss-Medien GmbH, Berlin, 2016, S. 71-79
- [Sch53] Schreiber, G.: Untersuchung über den Einfluß der Stallverhältnisse auf das Fortpflanzungsgeschehen der Rinder. In Züchtungskunde, 1953, S. 107-121
- [Scz11] Sczepek, J.: Visuelle Wahrnehmung. Eine Einführung in die Konzepte Bildentstehung, Helligkeit und Farbe, Raumtiefe, Größe, Kontrast und Schärfe. Books on Demand, Nordstedt, 2011, S. 65-94
- [See02] Seedorf, J.; Hartung, J. Hrsg.: Stäube und Mikroorganismen in der Tierhaltung. Landwirtschaftsverl., Münster-Hiltrup, 2002, S. 10-11
- [Sha68] Shapiro, S. S.; Wilk, M. B.; Chen, H. J.: A comparative study of various tests for normality. In Journal of the American statistical association, 1968, 63, S. 1343-1372
- [Sja10] Sjaastad, Ø. V.; Sand, O.; Hove, K.: Physiology of domestic animals. Scandinavian Veterinary Press, Oslo, 2010, S. 211-212
- [Spe16] Sperling, A. in Baer, R.; Barfuß, M.; Seifert, D. Hrsg.: Beleuchtungstechnik. Huss-Medien GmbH, Berlin, 2016, S. 176-177
- [Sta15] Statistisches Bundesamt: Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Viehbestand. Fachserie 3 Reihe 4.1, 2015

Anhang

- [Sta18] Statistisches Bundesamt: Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Viehbestand. Fachserie 3 Reihe 4.1, 2018.
- [Ste76] Steiger, A.; Mehlhorn, G.: Erhöhung der Fortpflanzungsleistung beim Rind durch richtige Ausnutzung des Lichtes. In Tierzucht: Fachzeitschrift für Tierzucht u. Haltung, 1976, S. 436-438
- [Ste06] Steigerwald, K.: Sehleistung des Vogelauges - Perspektiven und Konsequenzen für die Haltung von Zier- und Wirtschaftgeflügel unter Kunstlichtbedingungen, Dissertation, München, 2016, S. 275-281
- [Ste17] Stego: Druckausgleich-Kabelverschraubung. Technisches Datenblatt, 2017
- [Swi10] Swinkels, G. L. A. M.: Optimale verlichting van melkveestallen. Bijlage 4: Simulaties, Wageningen, 2010, S. 76
- [Sze88] Szél, Á.; Diamantstein, T.; Röhlich, P.: Identification of the Blue-Sensitive Cones in the Mammalian Retina by Anti-Visual Pigment Antibody. In Journal of Comparative Neurology, 1988, 273, S. 593-602
- [Tim16] Timischl, W.: Mathematische Methoden in den Biowissenschaften. Eine Einführung mit R. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2016, S. 339
- [Vis99] Visser, E. K.; Beersma, D. G. M.; Daan, S.: Melatonin Suppression by Light in Humans Is Maximal When the Nasal Part of the Retina Is Illuminated. In Journal of biological rhythms, 1999, 14, S. 116-121
- [vdZ05] van der Zypen, E. in Graumann, W.: Sinnessysteme, Haut, ZNS, periphere Leitungsbahnen. mit 38 Tabellen. Schattauer, Stuttgart, 2005, Seite 43
- [vOo12] van Oosterhout, F. et al.: The effect of light colour and photoperiod on milk production and behaviour of dairy cows, 2012, S. 31
- [Voe14] Völker, D.: Erfolgreich füttern. Mehr Milch durch gutes Lichtmanagement. In Bauernblatt, 2014, S. 44
- [Voe16] Völker S. in Baer, R.; Barfuß, M.; Seifert, D. Hrsg.: Beleuchtungstechnik. Huss-Medien GmbH, Berlin, 2016, S. 22 - 29

Anhang

- [Vos15] Vossloh-Schwabe Deutschland GmbH: Chemische Unverträglichkeiten. Auswirkungen auf LEDs. Anwendungshinweis, https://www.vossloh-schwabe.com/fileadmin/user_upload/Download/Produkte/Chemische_Unvertraeglichkeiten_DE.pdf, letzter Zugriff 16.04.2018
- [Wal05] Wall, E. H. et al.: Exposure to Short Day Photoperiod During the Dry Period Enhances Mammary Growth in Dairy Cows. In *Journal Dairy Science*, 2005, 88, S. 1994-2003
- [Wal13] Walsh, C. M. et al.: Blue light from light-emitting diodes directed at a single eye elicits a dose-dependent suppression of melatonin in horses. In *Veterinary Journal*, 2013, 196, S. 231-235
- [Weh13] Wehner, R.; Gehring, W. J.: *Zoologie*. Georg Thieme Verlag KG, 2013, S. 369-380
- [Wes11] West, K. E. et al.: Blue light from light-emitting diodes elicits a dose-dependent suppression of melatonin in humans. In *Journal of applied physiology*, 2011, 110, S. 619-626
- [Wri13] Wright, J.; Shelford, T.: *Light Spectrum and its Implications on Milk Production*, 2013
- [Wie10] Wiesner, C.: *Verhaltensanalyse - Even-Sampling-Verfahren*. Moduleinheit Selbstbeobachtung, Seminar Interview und Beobachtung, Universität Freiburg, WS 09/10
- [Win09] Winckler, C. in Hoy, S. Hrsg.: *Nutztierethologie*. 35 Tabellen. Ulmer, Stuttgart, 2009, S.78-104
- [You68] Yousef, M. K.; Hahn, L.; Johnson, H. D. in Hafez, E. S. E. Hrsg.: *Adaptation of domestic animals*. Lea & Febiger, Philadelphia, 1968, S. 234
- [Zeh82] Zehle, H. H.: Lichtregime und Fruchtbarkeit bei Kühen. In *Monatshefte für Veterinärmedizin*, 1982, S. 877-880
- [Zen12] Zentner, E.: *Stallklima in Rinderstallungen*. Grundlagen und praktische Erhebungen, Gumpenstein, 2012, S. 5-32
- [Zim15] Zimmer, R.: *Handbuch der Sinneswahrnehmung*. Grundlagen einer ganzheitlichen Bildung und Erziehung. Verlag Herder GmbH, 2015, S. 66

Verordnungen, Richtlinien, Normen und Standards

- [ASAE344.3] American Society of Agricultural and Biological Engineers: Lighting Systems for Agricultural Facilities. ASABE, St. Joseph USA, 2005, S. 689
- [ASRA3.4] Technische Regeln für Arbeitsstätten - Beleuchtung. ASR A3.4, 2011, S. 15
- [DIN5031-2] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Strahlungsbewertung durch Empfänger. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1982-03-00, S. 2-3
- [DIN5031-3] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1982-03-00, S. 1-2
- [DIN5031-5] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Temperaturbegriffe. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1982-03-00, S. 1
- [DIN5031-10] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 10: Photobiologisch wirksame Strahlung, Größen, Kurzzeichen und Wirkungsspektren. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015-08-00, S. 42
- [DIN5031-100] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015-08-00, S. 27
- [DIN5032-4] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Lichtmessung - Teil 4: Messungen an Leuchten. Beuth Verlag GmbH, 1999-01-00, S. 5-6
- [DIN5032-7] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Lichtmessung - Teil 7: Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessgeräten. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2017-02-00, S. 4-8
- [DIN5033-1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Farbmessung - Teil 1: Grundbegriffe der Farbmetrik. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2017-10-00, S. 8
- [DIN5035-6] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Beleuchtung mit künstlichem Licht - Teil 6: Messung und Bewertung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2006-11-00, S. 7

Anhang

- [DIN6169-1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Farbwiedergabe; Allgemeine Begriffe. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1976-01-00, S. 1
- [DIN6169-2] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Farbwiedergabe; Farbwiedergabe-Eigenschaften von Lichtquellen in der Beleuchtungstechnik. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1976-02-00, S. 6-9
- [DIN12464-1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011-08-00, S. 10-28
- [DIN12665] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Licht und Beleuchtung – Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung. Beuth Verlag GmbH, 2016-09-00, S. 47
- [DIN18040-2] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Barrierefreies Bauen - Planungsgrundlagen - Teil 2: Wohnungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011-09-00, S. 21
- [DIN32975] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Gestaltung visueller Informationen im öffentlichen Raum zur barrierefreien Nutzung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009-12-00, S. 7-8
- [DIN60529] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014-09-00, S. 11
- [EG/2006/95] Richtlinie 2006/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten betreffend elektrische Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen, 2006.
- [TierSchNutzV] Verordnung zum Schutz landwirtschaftlicher Nutztiere und anderer zur Erzeugung tierischer Produkte gehaltener Tiere bei ihrer Haltung (Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung). TierSchNutzV, 2017, S. 5-7

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Testfarben zur Bestimmung des Farbwiedergabeindex nach DIN 6169-2 [Kha19]	9
Abbildung 2.2 (links): Repräsentative Dichteverteilung des S-Zapfens Rind mit eingefügter Lage- und Richtungsbezeichnung [Bearbeitete Grafik auf Datengrundlage [Sch08]]	11
Abbildung 2.3 (rechts): Repräsentative Dichteverteilung des M/L-Zapfens Rind mit eingefügter Lage- und Richtungsbezeichnung [Bearbeitete Grafik auf Datengrundlage [Sch08]]	11
Abbildung 2.4 (links): Beispiel einer normalen (nicht VOC degradierten) LED [Cre18]	23
Abbildung 2.5 (rechts): Beispiel einer VOC degradierten LED [Cre18].....	23
Abbildung 4.1 (links): Frontansicht der Demonstrationsleuchte mit den hervorgehobenen LED-Bereichen „Cow White“ und „Farmer White“ LEDs [eigene Darstellung].....	38
Abbildung 4.2 (rechts): Rückwärtige Ansicht der Demonstrationsleuchte [eigene Darstellung]	38
Abbildung 4.3: Spektraler Verlauf ausgewählter Messreihen in den „Extremeinstellungen“ („weiß“ und „blau“ jeweils in Kombinationen mit „0 V“ und „10 V“) [eigene Darstellung]	40
Abbildung 4.4: Vergleich zwischen den gemessenen Intensitäten der Demonstrationsleuchte und der Sensitivität des Rinderauges [eigene Darstellung, nach [Jac98]].....	41
Abbildung 4.5 (links): Schematische Darstellung eines Goniometertyps B [Ins19]	42
Abbildung 4.6 (rechts): Nahfeldgoniometer (Typ B) im lichttechnischen Labor der Fachhochschule Bielefeld [eigene Aufnahme].....	42
Abbildung 4.7 (links): Lichtstärke-Verteilungskurve der vermessenen Demonstrationsleuchte in Polar-Form Darstellung [eigene Darstellung]	43
Abbildung 4.8 (rechts): Lichtstärke-Verteilungskurve der vermessenen Demonstrationsleuchte in Linear-Form Darstellung [eigene Darstellung]	43
Abbildung 5.1: Schematischer Grundriss des Versuchsstalls VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]	51
Abbildung 5.2: Schematischer Querschnitt des Versuchsstalls VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]..	52
Abbildung 5.3: Skizzierung der Bestandsbeleuchtung im Versuchsstall des VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]	55
Abbildung 5.4: Skizzierung der maximalen Ausdehnung des Lichtkegels im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]	60
Abbildung 5.5 (links): Beleuchtungsstärkemessinstrument und Stativ in der Frontansicht [eigene Aufnahme].....	62
Abbildung 5.6 (mittig): Detailaufnahme der Anzeigeeinheit des Beleuchtungsstärkemessinstruments und der angebrachten Dosenlibelle [eigene Aufnahme]	62
Abbildung 5.7 (rechts): Einsatz des Beleuchtungsstärkemessinstruments und des Stativs für Beleuchtungsstärkemessungen (Demonstrationszweck am Tag) [eigene Aufnahme]..	62
Abbildung 5.8 (links): Ausgelegte Messpunktmarkierungen für Beleuchtungsstärkemessungen im Funktionsbereich „Fressen“ [eigene Aufnahme]	63

Anhang

Abbildung 5.9 (rechts): Ausgelegte Messpunktmarkierungen für Beleuchtungsstärkemessungen in den Funktionsbereichen „Liegen“ und „Laufen“ [eigene Aufnahme].....	63
Abbildung 5.10: Skizzierung der eingefügten Berechnungsflächen und -raster sowie der vier Messfelder im simulierten Versuchsstall VBZL Haus [eigene Darstellung]	69
Abbildung 5.11: Skizzierung der prägnanten Stellen im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]	70
Abbildung 5.12: Skizzierung der prägnanten Stelle „Fressgitter“ Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]	71
Abbildung 5.13: Skizzierung der prägnanten Stelle „Tränke“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]	71
Abbildung 5.14: Skizzierung der prägnanten Stelle „Liegebox“ (Betreten) im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]	72
Abbildung 5.15: Skizzierung der prägnanten Stelle „Liegebox“ (Ruhe) im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]	72
Abbildung 5.16: Skizzierung der prägnanten Stelle „Durchgang“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]	73
Abbildung 5.17: Skizzierung der Zu- und Abgangsmöglichkeiten der ausgewählten Beobachtungsfläche im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]	76
Abbildung 6.1: Falschfarbendarstellung des simulierten Versuchsstalls VBZL Haus [eigene Darstellung, erstellt mit dem Programm DIALux 4.12]	82
Abbildung 6.2: Mittlere Beleuchtungsstärke im Verlauf der Alterung in den Bewertungsflächen Messfeld 1 bis Messfeld 4 im Versuchsstall VBZL Haus Düsse.....	86
Abbildung 6.3: Grafische Darstellung der Gleichmäßigkeit im Verlauf der Alterung in den Bewertungsflächen Messfeld 1 bis Messfeld 4 im Versuchsstall VBZL Haus Düsse	87
Abbildung 6.4: Mittlerer Beleuchtungsstärke E_m bei dem Bestandskonzept (Natriumdampf) und dem neuen Beleuchtungskonzept (LED) im Versuchsstall VBZL Haus Düsse.....	88
Abbildung 6.5: Gleichmäßigkeit g_1 bei dem Bestandskonzept (Natriumdampf) und dem neuen Beleuchtungskonzept (LED) im Versuchsstall VBZL Haus Düsse.....	89
Abbildung 6.6: Darstellung der messtechnisch erfassten Leuchtdichten und der berechneten Michelson-Kontraste an der prägnanten Stelle „Fressgitter“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]	90
Abbildung 6.7: Darstellung der messtechnisch erfassten Leuchtdichten und der berechneten Michelson-Kontraste an der prägnanten Stelle „Tränke“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]	90
Abbildung 6.8: Darstellung der messtechnisch erfassten Leuchtdichten und der berechneten Michelson-Kontraste an der prägnanten Stelle „Hochbox - Stufe“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]	91

Anhang

Abbildung 6.9: Darstellung der messtechnisch erfassten Leuchtdichten und der berechneten Michelson-Kontraste an der prägnanten Stelle „Hochbox - Ruhen“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung].....	91
Abbildung 6.10: Darstellung der messtechnisch erfassten Leuchtdichten und der berechneten Michelson-Kontraste an der prägnanten Stelle „Tiefbox - Stufe“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]	92
Abbildung 6.11: Darstellung der messtechnisch erfassten Leuchtdichten und der berechneten Michelson-Kontraste an der prägnanten Stelle „Durchgang - angrenzend Tiefbox 6“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]	92
Abbildung 6.12: Darstellung der messtechnisch erfassten Leuchtdichten und der berechneten Michelson-Kontraste an der prägnanten Stelle „Durchgang - angrenzend Tiefbox 6“ im Versuchsstall VBZL Haus Düsse [eigene Darstellung]	93
Abbildung 6.13: Mittlere Häufigkeit aller erfasster Verhaltensweisen im stündlichen Intervall bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung.....	96
Abbildung 6.14: Mittlere Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Stehen bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung	98
Abbildung 6.15: Mittlere Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Komfortverhalten bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung.....	99
Abbildung 6.16: Mittlere Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Sozialverhalten bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung.....	101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Schutzart durch ein Gehäuse – IP-Code erste Kennziffer [DIN60529]	21
Tabelle 2.2: Schutzart durch ein Gehäuse – IP-Code zweite Kennziffer [DIN60529]	21
Tabelle 3.1: Regionale Zuordnung aller zurückgemeldeten Fragebögen.....	27
Tabelle 3.2: Regionale Zuordnung der rückgemeldeten Fragebögen nach eingefügten Auswahlkriterien	27
Tabelle 3.3: Statistische Auswertung (Häufigkeit) der Frage bezüglich der Motivation zur Optimierung der Stallbeleuchtung	28
Tabelle 3.4: Statistische Auswertung (Häufigkeit und Verteilung) der Frage zur Einschätzung der eigenen Beleuchtung.....	28
Tabelle 3.5: Statistische Auswertung (Häufigkeit und Verteilung) der Frage zur Bedeutung der Helligkeit, Lichtfarbe, Energieeffizienz, Wartungsfreundlichkeit, langen Lebensdauer sowie einer schnellen Einschaltzeit.....	29
Tabelle 3.6: Statistische Auswertung (Häufigkeit und Verteilung) der Frage zur Erwartung an Lebens- und Mindestgarantiedauer	29
Tabelle 3.7: Statistische Auswertung (Häufigkeit und Verteilung) der Frage zu den durchschnittlichen Beleuchtungsstunden.....	30
Tabelle 3.8: Statistische Auswertung (Häufigkeit) der Frage zum Wunsch einer dimmbaren Leuchte...	30
Tabelle 3.9: Statistische Auswertung (Häufigkeit) der Frage zum Wunsch der Nachtbeleuchtung	30
Tabelle 3.10: Statistische Auswertung (Häufigkeit und Verteilung) der Frage zum Wunsch der Lichtsteuerung.....	31
Tabelle 3.11: Gegenüberstellung der Bedürfnisse und Qualitätsmerkmale mit den daraus abgeleiteten Anforderungen einer bedarfsorientierten Leuchte für Mensch und Rind.....	35
Tabelle 4.1: Übersicht der durchgeführten Messreihen mit der Demonstrationsleuchte in der Inte- grationskugel der FH Bielefeld	40
Tabelle 4.2: Messtechnisch erfasste Anforderungen als Auszug ausgewählter Messreihen bei „Extremeinstellungen“ („weiß“ und „blau“ jeweils in Kombinationen mit „0 V“ und „10 V“)	41
Tabelle 4.3: Messtechnisch erfasste Leistungsdaten der Demonstrationsleuchte und die daraus berechnete Effizienz als Auszug ausgewählter Messreihen bei „Extremeinstellungen“ („weiß“ und „blau“ jeweils in Kombinationen mit „0 V“ und „10 V“).	44
Tabelle 4.4: Gegenüberstellung der abgeleiteten Anforderungen mit den messtechnisch erfassten Kenngrößen einer bedarfsorientierten Leuchte für Mensch und Rind.....	45
Tabelle 5.1: Gegenüberstellung der Bedürfnisse und Qualitätsmerkmale mit den daraus abgeleiteten Anforderungen einer bedarfsorientierten Leuchte für Mensch und Rind.....	49
Tabelle 5.2: Lage der Eckpunkte (x-, y- und z-Werte) des simulierten Versuchsstalls VBZL Haus Düsse.	52

Anhang

Tabelle 5.3: Einstellungen zum Melkanrecht des automatischen Melksystems im Versuchsstall VBZL Haus Düse	53
Tabelle 5.4: Normative Klasseneinteilung physikalischer Photometer [DIN5032-7]	61
Tabelle 5.5: Lichttechnische Auswertung der prozentualen Abweichungen verschiedener Messraster zu einem Referenzmessraster mit der Messrastergröße 0,1 m x 0,1 m am Beispiel eines Musterstalls.....	65
Tabelle 5.6: Lichttechnische Auswertung der durchschnittlichen prozentualen Abweichungen der Mittelwerte Beleuchtungsstärke und Gleichmäßigkeiten über ausgewählte Stallversionen.....	66
Tabelle 5.7: Bezeichnung, Lage und Größe (x-, y- und z-Werte) der elf eingefügten Berechnungsflächen im simulierten Versuchsstall VBZL Haus	67
Tabelle 5.8: Bezeichnung, Lage und Größe (x-, y- und z-Werte) der vier eingefügten Messfelder im simulierten Versuchsstall VBZL Haus Düse.....	68
Tabelle 5.9: Bezeichnung, Lage, Größe (x-, y- und z-Werte) und Anzahl der Berechnungsraster sowie die Zuordnung der Berechnungspunkte am Beispiel des definierten Messfelds 1 im Versuchsstall VBZL Haus Düse	68
Tabelle 5.10: Definition der prägnanten Stellen mit Zuordnung der Funktionsbereiche und den gestellten Anforderungen	70
Tabelle 5.11: Darstellung der ausgewählten Fokustiere im Versuchsstall VBZL Haus Düse	75
Tabelle 5.12: Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Versuchsphasen	77
Tabelle 5.13: Beschreibung der ausgewählten Verhaltensweisen.....	78
Tabelle 5.14: Statistische Angaben zur Schiefe, Wölbung und Signifikanz zur Normalverteilung der erfassten Verhaltensweisen im stündlichen Intervall der unterschiedlichen Versuchsphasen mit Natriumdampf- und LED-Beleuchtung	79
Tabelle 6.1: Lage der eingefügten Leuchten in dem simulierten Versuchsstall VBZL Haus Düse	81
Tabelle 6.2: Zusammengefasste Simulationsergebnisse der eingefügten Bewertungsflächen im simulierten Versuchsstall VBZL Haus	82
Tabelle 6.3: Simulationsergebnisse der Beleuchtungsstärke in den Bewertungsflächen Messfeld 1 bis Messfeld 4 des Versuchsstall VBZL Haus.....	83
Tabelle 6.4: Zusammengefasste Messergebnisse des neuen Beleuchtungskonzepts der Bewertungsflächen Messfeld 1 bis Messfeld 4 im Versuchsstall VBZL Haus Düse	84
Tabelle 6.5: Abweichungen (absolute Darstellung) zwischen simulierten und messtechnisch erfassten Werten der Beleuchtungsstärke in den Bewertungsflächen Messfeld 1 bis Messfeld 4 im Versuchsstall VBZL Haus Düse	85
Tabelle 6.6: Abweichungen (relative Darstellung) zwischen simulierten und messtechnisch erfassten Werten der Beleuchtungsstärke in Bewertungsflächen Messfeld 1 bis Messfeld 4 im Versuchsstall VBZL Haus Düse	85

Anhang

Tabelle 6.7: Mittlere Beleuchtungsstärke und deren Gleichmäßigkeit im Verlauf der Alterung in Bewertungsflächen Messfeld 1 bis Messfeld 4 im Versuchsstall VBZL Haus Düsse	86
Tabelle 6.8: Vergleich der mittleren Beleuchtungsstärke E_m und deren Gleichmäßigkeit g_1 bei dem Bestandskonzept (Natriumdampf) und dem neuen Beleuchtungskonzept (LED) im Versuchsstall VBZL Haus Düsse	88
Tabelle 6.9: Statistische Auswertung (Häufigkeit und Verteilung) der Frage 1: „Wie bewerten Sie die aktuelle Beleuchtung im Stall?“	93
Tabelle 6.10: Statistische Auswertung (Häufigkeit) der Frage 2: Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als positiv (Natriumdampfbeleuchtung)?	94
Tabelle 6.11: Statistische Auswertung (Häufigkeit) der Frage 2: Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als positiv (LED-Beleuchtung)?	94
Tabelle 6.12: Statistische Auswertung (Häufigkeit) der Frage 3: Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als negativ (Natriumdampfbeleuchtung)?	95
Tabelle 6.13: Statistische Auswertung (Häufigkeit) der Frage 3: Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als negativ (LED-Beleuchtung)?	95
Tabelle 6.14: Statistische Kennzahlen der erfassten Verhaltensweisen im stündlichen Intervall in den unterschiedlichen Versuchsphasen bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung	97
Tabelle 6.15: Statistische Angaben zur Signifikanz der Teststatistik und der zweiseitig asymptotischen Signifikanz der erfassten Beobachtungen im stündlichen Intervall	97
Tabelle 6.16: Statistische Kennzahlen der Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Stehen bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung	98
Tabelle 6.17: Statistische Angaben zur Signifikanz der Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Stehen bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung	99
Tabelle 6.18: Statistische Kennzahlen der Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Komfortverhalten bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung	100
Tabelle 6.19: Statistische Angaben zur Signifikanz der Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Komfortverhalten bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung	100
Tabelle 6.20: Statistische Kennzahlen der Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Sozialverhalten bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung	101
Tabelle 6.21: Statistische Angaben zur Signifikanz der Häufigkeit der beobachteten Verhaltensweise Sozialverhalten bei Natriumdampf- und LED-Beleuchtung	102

I. Fragebogen „Zukunftsorientierter Landwirt - Optimierung der Beleuchtung in der Milchviehhaltung“

Fragebogen
„Zukunftsorientierter Landwirt – Optimierung der Beleuchtung
in der Milchviehhaltung“



1. Sind Sie an der Optimierung Ihrer Stallbeleuchtung zur Verbesserung des Tierwohls interessiert?

Ja Nein

Falls ja, warum?

- Steigerung der Milchleistung Verbesserung der Arbeitsbedingungen
 Optimierung des Tierwohls Steigerung der Energieeffizienz

2. Wie beurteilen Sie die Beleuchtung in Ihrem Milchviehstall?

(1=sehr gut; 2=gut; 3=befriedigend; 4=ausreichend; 5=mangelhaft; 6=ungenügend)

1 2 3 4 5 6

3. Wie beurteilen Sie die Beleuchtung in Ihrem Melkstand?

(1=sehr gut; 2=gut; 3=befriedigend; 4=ausreichend; 5=mangelhaft; 6=ungenügend)

1 2 3 4 5 6

4. Wie wichtig ist Ihnen in der Beleuchtung...?

Funktionsbereich	sehr wichtig	wichtig	eher wichtig	eher unwichtig	unwichtig	völlig unwichtig
Helligkeit	<input type="radio"/>					
Lichtfarbe	<input type="radio"/>					
Energieeffizienz	<input type="radio"/>					
Wartungsfreundlichkeit	<input type="radio"/>					
lange Lebensdauer	<input type="radio"/>					
schnelle Einschaltzeit	<input type="radio"/>					

5. Welche weiteren Aspekte sind Ihnen bei der Beleuchtung wichtig?

6. Welche Lebensdauer erwarten Sie von Ihrem Leuchtmittel? Jahre

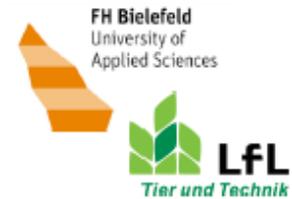
7. Welche Lebensdauer erwarten Sie von Ihrer Leuchte/Armatur? Jahre

8. Welche Mindestgarantiedauer erwarten Sie von einer Leuchte/Armatur? Jahre

9. Wünschen Sie sich eine dimmbare Leuchte? Ja Nein

Begründung:

Fragebogen
„Zukunftsorientierter Landwirt – Optimierung der Beleuchtung
in der Milchviehhaltung“



10. Wünschen Sie sich eine Nachtbeleuchtung für...?

- a) Ihr Milchvieh: Ja Nein
 b) die Tier- und Stallkontrolle: Ja Nein

11. Welche Lichtfarbe halten Sie in den jeweiligen Funktionsbereichen am geeignetsten?

Funktionsbereich	„warmweißes Licht“ (<3.300K)	„neutralweißes Licht“ (3.300 K bis 5.300 K)	„kaltweißes bzw. tageslichtweißes Licht“ (> 5.300 K)	Keine Angabe möglich
Futtertisch	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Laufbereich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Liegebereich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Jungviehaufzucht	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Melkstand	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Büroräume	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

12. Wie viel Stunden am Tag sollten die jeweiligen Arbeitsbereiche beleuchtet werden?

Funktionsbereich	Anzahl der Beleuchtungsstunden pro Tag		Keine Angabe möglich
	Juni	Dezember	
Futtertisch	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Laufbereich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Liegebereich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Jungviehaufzucht	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Melkstand	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Büroräume	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

13. Wie sollte das Licht in den jeweiligen Arbeitsbereichen geschaltet werden?

Funktionsbereich	Lichtschafter	Zeitschaltuhr/ Dämmerungsschalter	In der Leuchte integrierte Steuerung	Keine Angabe möglich
Futtertisch	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Laufbereich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Liegebereich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Jungviehaufzucht	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Melkstand	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Büroräume	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

14. Wie wurde die Anzahl der benötigten Leuchten für Ihren Milchviehstall ermittelt?

- Nach Empfehlung eines Beraters/Verkäufers
- Durch eine Beleuchtungssimulation
- Durch eine Probebeleuchtung
- Durch den Installateur bzw. den örtlichen Elektriker
- Nach Gefühl
-

Fragebogen
„Zukunftsorientierter Landwirt – Optimierung der Beleuchtung
in der Milchviehhaltung“



15. Wie häufig werden die Leuchten in Ihrem Milchviehstall gereinigt?
(Mehrfachnennungen möglich)

- | | |
|---------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> monatlich | <input type="checkbox"/> halbjährlich |
| <input type="checkbox"/> jährlich | <input type="checkbox"/> alle 2 Jahre |
| <input type="checkbox"/> alle 3 Jahre | <input type="checkbox"/> seltener als alle 3 Jahre |

16. Planen Sie zukünftig die Beleuchtung im Milchviehstall zu erneuern?

Ja. Begründung: _____

Ich plane eine neue Beleuchtung mit:

- | |
|---|
| <input type="checkbox"/> Leuchtstofflampen („Neonröhren“) |
| <input type="checkbox"/> Quecksilber- oder Halogenmetaldampflampen („weißes Licht“) |
| <input type="checkbox"/> Natrium-Hochdruckdampflampen („gelbes Licht“) |
| <input type="checkbox"/> LED |
| <input type="checkbox"/> _____ |

Die Erneuerung plane ich in den nächsten _____ Jahren.

Nein. Begründung: _____

17. Wie viele Liegeboxen befinden sich in Ihrem Stall? _____ Liegeboxen

18. Wie hoch ist in etwa Ihre Firsthöhe im Milchviehstall? _____ m

19. Wie hoch ist in etwa Ihre Traufhöhe im Milchviehstall? _____ m

20. Was für ein Stallsystem bewirtschaften Sie?

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Anbindestall | <input type="checkbox"/> Liegeboxenlaufstall |
| <input type="checkbox"/> Fressliegeboxenstall | <input type="checkbox"/> Tieflaufstall |

21. In welchem Bundesland liegt Ihr Milchviehstall?

Vielen Dank für Ihre Teilnahme an der Fragebogenerhebung!

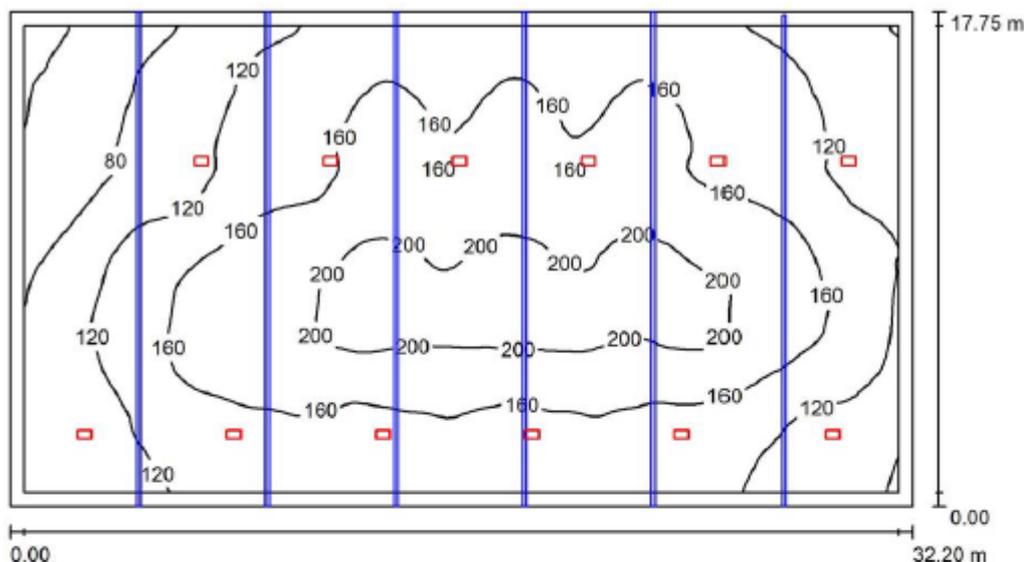
Für Rückfragen stehe ich Ihnen gerne zur Verfügung

Fachhochschule Bielefeld
Michael Schneider
Wilhelm-Bertelsmann-Str. 10
33602 Bielefeld
E-Mail: michael.schneider@fh-bielefeld.de
Telefon: 0521-106-7385
Telefax: 0521-106-7160

Prof. Dr. Ing. Eva Schwenzfeier-Hellkamp, Daniel Werner, Michael Schneider
FH Bielefeld, Fachbereich IuM, E-Mail: Michael.Schneider@fh-bielefeld.de

II. Ergebnisse der Beleuchtungssimulation

Lichttechnische Zusammenfassung



Raumhöhe: 4.900 m, Montagehöhe: 4.700 m, Wartungsfaktor: 0.90

Werte in Lux, Maßstab 1:231

Fläche	ρ [%]	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	g_1
Grundfläche	/	147	29	215	0.200
Boden	10	136	24	213	0.179
Decke 1	50	11	9.95	13	0.881
Wände (4)	9	96	6.48	455	/

Grundfläche:

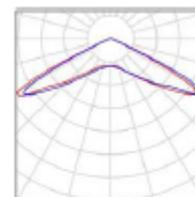
Höhe: 0.200 m
 Raster: 128 x 128 Punkte
 Randzone: 0.500 m

Leuchten-Stückliste

Nr.	Stück	Bezeichnung (Korrekturfaktor)	Φ (Leuchte) [lm]	Φ (Lampen) [lm]	P [W]
1	12	DeLaval (1.000)	10018	9953	1.0
Gesamt:			120213	119436	12.0

12 Stück DeLaval
 Artikel-Nr.:
 Lichtstrom (Leuchte): 10018 lm
 Lichtstrom (Lampen): 9953 lm
 Leuchtenleistung: 1.0 W
 Leuchtenklassifikation nach DIN: A20
 CIE Flux Code: 27 81 99 100 101
 Bestückung: 1 x LED (Korrekturfaktor 1.000).

Ein Leuchtenbild entnehmen Sie bitte unserem Leuchtenkatalog.

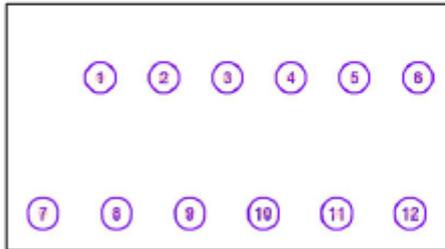


Anhang

Koordinatenliste der Leuchten

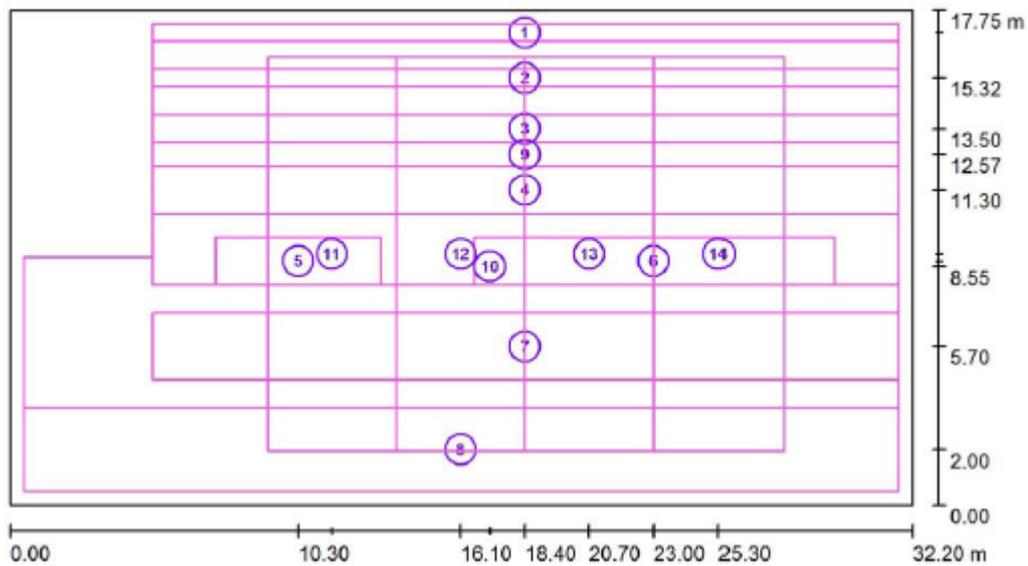
DeLaval

10018 lm, 1.0 W, 1 x 1 x LED (Korrekturfaktor 1.000).



Nr.	Position [m]			Rotation [°]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	6.836	12.400	4.700	0.0	0.0	90.0
2	11.448	12.400	4.700	0.0	0.0	90.0
3	16.059	12.400	4.700	0.0	0.0	90.0
4	20.671	12.400	4.700	0.0	0.0	90.0
5	25.283	12.400	4.700	0.0	0.0	90.0
6	29.894	12.400	4.700	0.0	0.0	90.0
7	2.667	2.573	4.700	0.0	0.0	90.0
8	8.000	2.573	4.700	0.0	0.0	90.0
9	13.333	2.573	4.700	0.0	0.0	90.0
10	18.667	2.573	4.700	0.0	0.0	90.0
11	24.000	2.573	4.700	0.0	0.0	90.0
12	29.333	2.573	4.700	0.0	0.0	90.0

Übersicht der Berechnungsflächen (Berechnungsflächenliste)



Maßstab 1 : 231

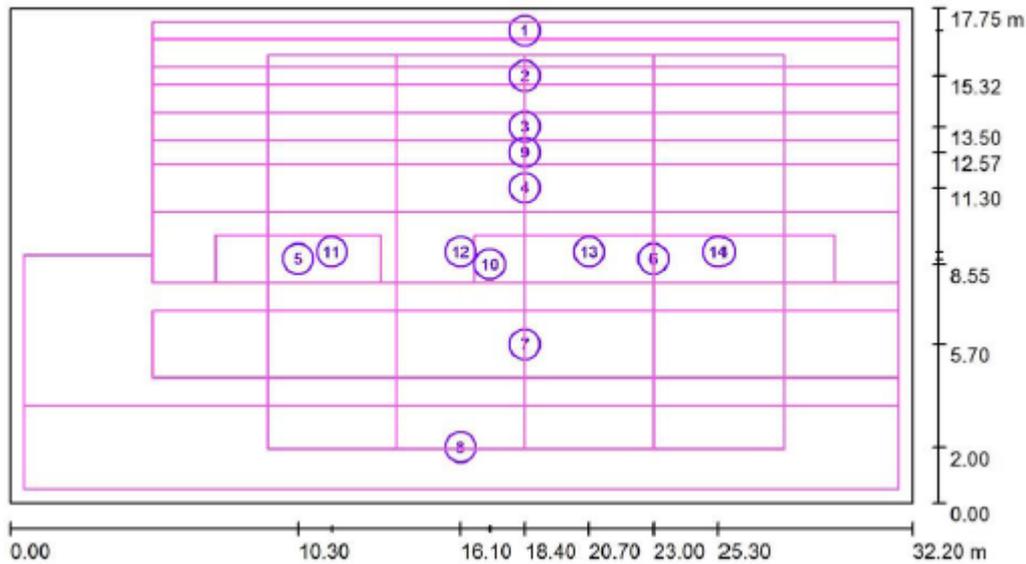
Berechnungsflächenliste

Nr.	Bezeichnung	Position [m]			Größe [m]		Rotation [°]		
		X	Y	Z	L	B	X	Y	Z
1	Besuchergang	18.400	16.950	0.200	26.600	0.600	0.000	0.000	0.000
2	Kopfbereich	18.400	15.325	0.200	26.600	0.650	0.000	0.000	0.000
3	Hochboxen	18.400	13.500	0.200	26.600	1.000	0.000	0.000	0.000
4	Laufbereich H-T	18.400	11.300	0.200	26.600	1.700	0.000	0.000	0.000

Berechnungsflächenliste

Nr.	Bezeichnung	Position [m]			Größe [m]		Rotation [°]		
		X	Y	Z	L	B	X	Y	Z
5	Tiefboxen 1-6	10.300	8.750	0.200	5.900	1.700	0.000	0.000	0.000
6	Tiefboxen 7-18	23.000	8.750	0.200	12.800	1.700	-0.500	0.000	0.000
7	Laufbereich T-F	18.400	5.700	0.200	26.600	2.400	0.000	0.000	0.000
8	Futtertisch	16.100	2.000	0.200	31.200	3.000	0.000	0.000	0.000
9	Hauptgebäude	18.400	12.575	0.200	26.600	9.350	0.000	0.000	0.000
10	Nutzfläche gesamt	17.150	8.550	0.200	31.200	16.750	0.000	0.000	0.000
11	Messfeld 1	11.500	9.000	0.200	4.600	14.150	0.000	0.000	0.000
12	Messfeld 2	16.100	9.000	0.200	4.600	14.150	0.000	0.000	0.000
13	Messfeld 3	20.700	9.000	0.200	4.600	14.150	0.000	0.000	0.000
14	Messfeld 4	25.300	9.000	0.200	4.600	14.150	0.000	0.000	0.000

Ergebnisübersicht der Berechnungsflächen



Maßstab 1 : 231

Berechnungsflächenliste

Nr.	Bezeichnung	Typ	Raster	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	g_1	g_2
1	Besuchergang	senkrecht	128 x 4	117	74	136	0.635	0.543
2	Kopfbereich	senkrecht	128 x 4	136	88	163	0.645	0.540
3	Hochboxen	senkrecht	128 x 8	148	95	175	0.642	0.542
4	Laufbereich H-T	senkrecht	128 x 8	155	96	187	0.618	0.513
5	Tiefboxen 1-6	senkrecht	32 x 16	190	157	215	0.825	0.731
6	Tiefboxen 7-18	senkrecht	64 x 8	196	141	216	0.722	0.652
7	Laufbereich T-F	senkrecht	128 x 16	185	104	213	0.564	0.490
8	Futtertisch	senkrecht	128 x 16	129	76	162	0.592	0.471
9	Hauptgebäude	senkrecht	128 x 64	153	72	217	0.469	0.331

Berechnungsflächenliste

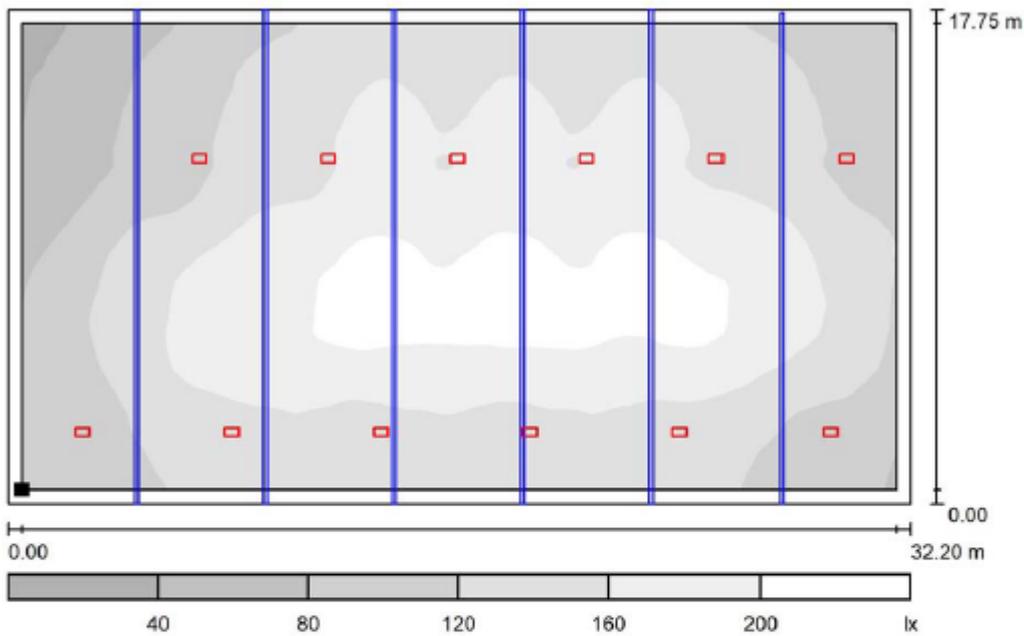
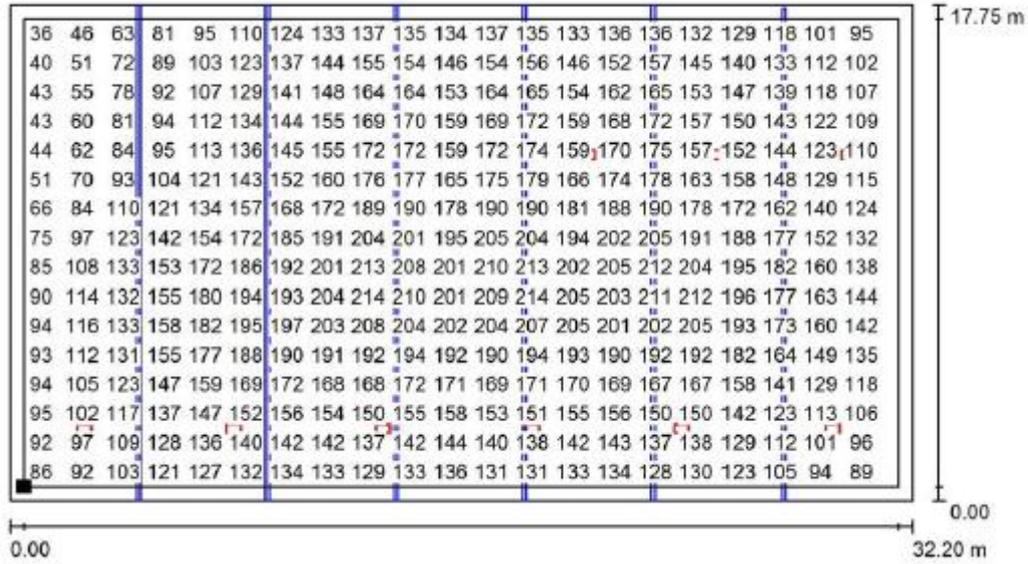
Nr.	Bezeichnung	Typ	Raster	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	g_1	g_2
10	Nutzfläche gesamt	senkrecht	64 x 128	153	73	216	0.475	0.337
11	Messfeld 1	senkrecht	32 x 64	174	126	217	0.729	0.584
12	Messfeld 2	senkrecht	32 x 64	179	139	216	0.778	0.644
13	Messfeld 3	senkrecht	32 x 64	179	139	215	0.779	0.647
14	Messfeld 4	senkrecht	32 x 64	169	114	214	0.678	0.535

Zusammenfassung der Ergebnisse

Typ	Anzahl	Mittel [lx]	Min [lx]	Max [lx]	g_1	g_2
senkrecht	14	158	72	217	0.45	0.33

Anhang

Ergebnisübersicht als Wertegrafik und Darstellung der Grundfläche in Graustufen



Maßstab 1 : 231

Lage der Fläche im Raum:
 Nutzebene mit 0.500 m Randzone
 Markierter Punkt:
 (0.500 m, 0.500 m, 0.200 m)



Raster: 128 x 128 Punkte

E_m [lx]
147

E_{min} [lx]
29

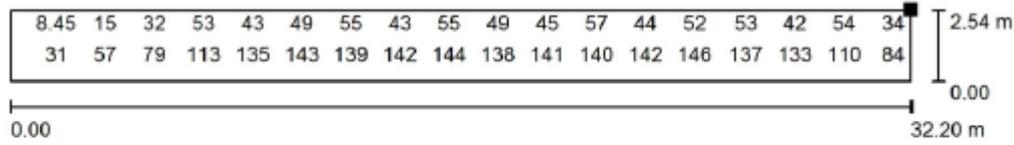
E_{max} [lx]
215

g_1
0.200

g_2
0.136

Anhang

Ergebnisübersicht als Wertegrafik der Nordseite



Werte in Lux, Maßstab 1 : 231

Nicht alle berechneten Werte können dargestellt werden.

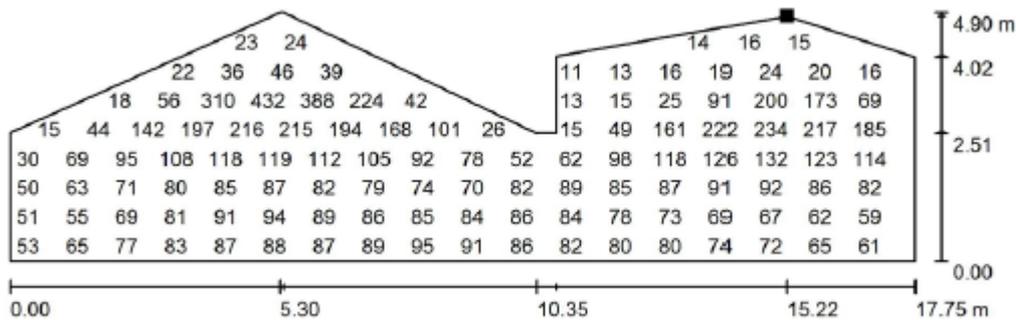
Lage der Fläche im Raum:
 Markierter Punkt:
 (32.200 m, 17.750 m, 2.536 m)



Raster: 128 x 16 Punkte

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	g_1	g_2
85	7.22	149	0.084	0.049

Ergebnisübersicht als Wertegrafik der Ostseite



Werte in Lux, Maßstab 1 : 127

Nicht alle berechneten Werte können dargestellt werden.

Lage der Fläche im Raum:
 Markierter Punkt:
 (32.200 m, 2.527 m, 4.834 m)

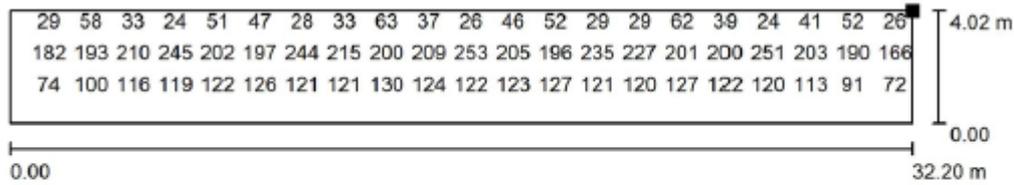


Raster: 128 x 128 Punkte

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	g_1	g_2
87	6.48	455	0.074	0.014

Anhang

Ergebnisübersicht als Wertegrafik der Südseite



Werte in Lux, Maßstab 1 : 231

Nicht alle berechneten Werte können dargestellt werden.

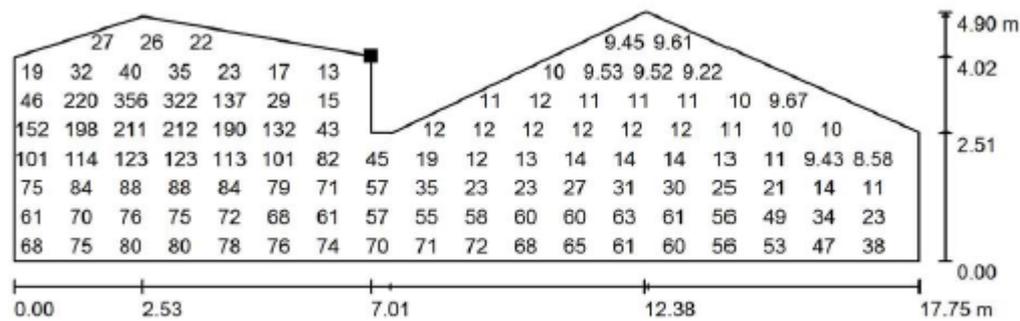
Lage der Fläche im Raum:
 Markierter Punkt:
 (0.000 m, 0.000 m, 4.020 m)



Raster: 128 x 32 Punkte

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	g_1	g_2
131	15	405	0.116	0.037

Ergebnisübersicht als Wertegrafik der Westseite



Werte in Lux, Maßstab 1 : 127

Nicht alle berechneten Werte können dargestellt werden.

Lage der Fläche im Raum:
 Markierter Punkt:
 (0.000 m, 7.015 m, 4.042 m)



Raster: 128 x 128 Punkte

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	g_1	g_2
54	7.13	368	0.133	0.019

III. Ergebnisse der lichttechnischen Vermessungen

Ergebnisse der lichttechnischen Vermessung vom 03.12.2015, LED, sauber

Messung 03.12.2015 (sauber)	Messfeld 1				Messfeld 2				Messfeld 3				Messfeld 4			
Kopfbereich	187	126	142	154	151	122	106	150	163	130	152	140	149	117	131	141
	118	119	171	189	176	182	122	143	172	158	110	173	165	165	97	118
Hochboxen	171	175	179	85	176	185	156	110	153	143	134	97	173	169	116	71
	175	181	120	178	188	183	176	175	159	134	125	161	188	175	168	154
	87	187	118	118	180	188	170	156	161	146	134	160	188	175	168	154
Laufbereich H-T	184	187	179	189	180	192	185	169	168	169	130	169	187	182	158	139
	193	199	189	191	155	194	163	164	170	175	139	174	166	162	170	137
	206	215	220	170	193	153	188	205	209	167	152	211	168	162	170	150
Tiefboxen	198	201	180	124	107	111	144	130	197	190	220	193	161	190	134	158
	130	215	170	130	113	109	167	201	189	199	125	174	150	190	157	172
	200	199	174	156	119	115	160	195	149	183	213	138	122	167	183	158
	167	161	168	195	165	151	172	135	110	169	178	113	147	167	150	163
Laufbereich T-F	170	202	158	175	178	191	129	176	176	186	151	167	172	182	153	126
	173	170	196	135	174	164	161	164	195	175	165	129	184	161	136	90
	91	94	91	90	112	117	136	105	138	105	140	109	130	86	107	78
Futtertisch	163	166	169	170	175	181	172	166	167	160	157	164	174	164	145	134
	178	170	167	170	175	175	163	161	162	171	161	160	157	156	151	131

\bar{E} 164
 E_{min} 85
 E_{max} 220
 g_1 0,52
 g_2 0,39

\bar{E} 159
 E_{min} 105
 E_{max} 205
 g_1 0,66
 g_2 0,51

\bar{E} 159
 E_{min} 97
 E_{max} 220
 g_1 0,61
 g_2 0,44

\bar{E} 152
 E_{min} 71
 E_{max} 190
 g_1 0,47
 g_2 0,37

Ergebnisse der lichttechnischen Vermessung vom 18.10.2016, LED, verschmutzt

Messung 18.10.2016 (verschmutzt)	Messfeld 1				Messfeld 2				Messfeld 3				Messfeld 4			
Kopfbereich	147	125	162	164	151	126	141	170	152	125	160	157	140	110	132	122
	194	198	128	191	200	196	131	173	203	180	124	187	177	172	112	143
Hochboxen	200	197	200	183	199	213	204	189	195	170	152	133	181	118	138	136
	190	185	190	192	178	115	208	200	160	156	152	202	194	165	170	145
	202	167	201	203	213	212	199	191	189	180	153	178	197	172	161	148
Laufbereich H-T	147	167	177	153	161	178	182	191	207	187	157	174	202	187	160	141
	195	220	213	210	210	162	219	216	208	193	150	187	189	176	172	158
	223	230	214	185	182	163	203	348	209	206	155	197	154	160	164	163
Tiefboxen	218	215	223	170	110	150	174	156	232	314	229	196	169	181	162	160
	204	227	224	169	117	137	175	225	313	227	197	198	160	189	158	150
	207	209	197	164	111	134	197	212	170	216	178	188	120	166	147	159
	134	120	183	157	155	150	175	136	127	137	193	148	139	106	131	97
Laufbereich T-F	157	215	186	185	212	199	172	176	203	197	160	149	179	81	148	119
	199	194	195	201	286	187	191	149	185	145	167	165	184	155	138	110
	132	151	120	87	144	128	132	129	135	98	90	137	135	88	156	143
Futtertisch	175	169	186	191	183	183	164	167	166	176	160	154	160	144	135	137
	168	179	172	176	181	184	169	164	162	166	156	154	151	147	147	129

\bar{E} 183
 E_{min} 87
 E_{max} 230
 g_1 0,48
 g_2 0,38

\bar{E} 177
 E_{min} 110
 E_{max} 348
 g_1 0,62
 g_2 0,32

\bar{E} 175
 E_{min} 90
 E_{max} 314
 g_1 0,51
 g_2 0,29

\bar{E} 151
 E_{min} 81
 E_{max} 202
 g_1 0,54
 g_2 0,40

Anhang

Ergebnisse der lichttechnischen Vermessung vom 03.11.2016, LED, gereinigt

Messung 03.11.2016 (gereinigt)	Messfeld 1				Messfeld 2				Messfeld 3				Messfeld 4			
Kopfbereich	142	125	161	163	145	125	143	172	160	128	164	163	139	109	140	132
	193	197	130	196	193	196	133	172	197	182	127	193	185	178	110	151
Hochboxen	198	195	151	170	197	202	200	180	193	164	162	145	179	183	134	129
	141	205	194	179	145	206	203	202	138	176	153	187	144	185	179	157
	194	207	196	198	214	214	195	194	204	193	164	185	206	194	172	158
Laufbereich H-T	150	202	127	205	170	152	212	210	213	205	166	183	216	195	170	150
	186	205	196	129	127	204	210	221	224	314	181	182	186	173	183	165
	233	231	234	187	119	167	198	233	217	199	173	216	168	180	170	177
Tiefboxen	215	219	226	160	119	148	203	187	230	218	208	201	169	188	177	188
	165	219	185	178	125	147	189	232	170	243	203	183	159	199	203	170
	212	218	140	172	134	152	183	187	209	232	157	175	160	197	170	165
	187	198	205	175	174	164	167	205	162	184	151	140	163	175	187	176
Laufbereich T-F	189	327	182	190	123	207	152	183	211	198	170	185	170	198	160	131
	211	204	215	203	203	194	204	160	216	185	182	131	194	178	150	107
	150	137	91	115	100	88	97	76	162	98	97	116	142	93	90	113
Futtertisch	160	172	174	180	178	196	172	173	165	167	183	165	180	174	151	132
	173	181	177	180	185	193	178	171	170	176	167	163	162	157	155	136
\bar{E}	184				174				180				163			
E_{min}	91				76				97				90			
E_{max}	327				233				314				216			
g_1	0,49				0,44				0,54				0,55			
g_2	0,28				0,33				0,31				0,42			

Ergebnisse der lichttechnischen Vermessung vom 07.11.2016, LED, verschmutzt

Messung 07.11.2017 (verschmutzt)	Messfeld 1				Messfeld 2				Messfeld 3				Messfeld 4			
Kopfbereich	159	131	120	167	158	122	104	163	162	137	102	136	156	116	111	109
	178	182	122	187	174	183	118	140	180	167	137	185	173	170	103	148
Hochboxen	187	184	140	145	182	196	179	102	180	170	154	110	184	179	137	116
	151	198	182	183	137	196	204	178	140	175	172	210	146	186	180	151
	189	187	174	178	196	200	191	194	190	174	203	205	204	195	170	152
Laufbereich H-T	189	207	199	180	205	213	199	204	199	178	212	208	215	198	175	163
	196	210	204	199	195	195	193	216	227	194	220	214	194	187	184	149
	211	215	210	177	162	171	202	221	237	223	225	220	186	196	191	177
Tiefboxen	201	200	187	170	116	125	160	159	216	185	211	212	148	168	191	171
	193	211	184	162	119	130	180	193	135	225	208	190	151	194	160	160
	198	187	175	159	145	108	157	165	190	218	201	180	144	195	186	175
	134	118	145	115	181	156	167	93	199	144	178	175	200	98	170	174
Laufbereich T-F	200	183	194	199	186	188	119	188	206	118	182	143	202	182	163	138
	186	212	172	188	207	197	156	172	186	203	163	180	187	198	164	139
	106	114	163	120	180	150	214	130	154	168	173	127	165	158	168	119
Futtertisch	164	180	182	169	170	160	166	173	175	172	182	175	179	173	184	184
	153	169	171	171	171	172	172	170	172	173	184	179	175	176	183	180
\bar{E}	175				169				181				168			
E_{min}	106				93				102				98			
E_{max}	215				221				237				215			
g_1	0,61				0,55				0,56				0,58			
g_2	0,49				0,42				0,43				0,46			

Anhang

Ergebnisse der lichttechnischen Vermessung vom 09.11.2017, LED, gereinigt

Messung 09.11.2017 (gereinigt)	Messfeld 1				Messfeld 2				Messfeld 3				Messfeld 4			
Kopfbereich	163	136	150	169	168	129	97	172	169	141	112	167	163	136	111	169
	179	186	126	169	178	183	122	150	175	170	130	182	176	173	104	149
Hochboxen	184	185	123	124	195	196	148	146	186	171	133	103	187	183	93	103
	135	199	180	187	145	195	202	199	131	174	169	184	144	186	178	157
Laufbereich H-T	153	171	194	205	206	204	181	201	193	195	207	210	195	193	200	195
	153	165	195	181	214	214	191	217	206	203	221	225	200	198	210	203
	166	182	190	203	213	223	196	227	210	208	213	209	202	199	213	206
Tiefboxen	218	222	220	171	124	127	232	225	239	231	232	225	179	198	192	177
	211	211	192	177	110	120	147	167	247	236	200	210	174	151	177	170
	202	224	141	164	121	133	155	216	203	214	180	198	134	194	156	157
	180	210	188	164	127	145	178	233	200	131	200	149	131	188	196	172
Laufbereich T-F	190	124	160	164	174	168	187	165	180	188	181	139	150	141	152	135
	181	211	181	182	204	212	167	168	205	200	172	176	179	194	175	139
	187	191	186	195	179	188	190	187	206	181	169	169	195	184	160	133
	128	189	179	116	155	178	185	96	198	145	122	166	152	128	154	122
Futtertisch	151	180	180	174	163	172	177	172	172	194	189	187	182	179	168	167
	164	171	170	173	175	170	170	171	172	182	180	177	170	178	183	170

\bar{E} 176
 E_{min} 116
 E_{max} 224
 g_1 0,66
 g_2 0,52

\bar{E} 174
 E_{min} 96
 E_{max} 233
 g_1 0,55
 g_2 0,41

\bar{E} 184
 E_{min} 103
 E_{max} 247
 g_1 0,56
 g_2 0,42

\bar{E} 169
 E_{min} 93
 E_{max} 213
 g_1 0,55
 g_2 0,44

Ergebnisse der lichttechnischen Vermessung vom 11.11.2018, LED, verschmutzt

Messung 11.01.2018 (verschmutzt)	Messfeld 1				Messfeld 2				Messfeld 3				Messfeld 4			
Kopfbereich	181	177	172	176	181	179	168	167	167	173	171	168	170	169	168	150
	177	165	187	175	169	169	169	168	179	161	176	169	84	162	154	147
Hochboxen	103	95	115	74	125	131	106	75	128	142	145	71	141	107	76	131
	127	193	198	154	200	134	187	149	192	171	172	125	202	180	153	115
Laufbereich H-T	183	214	154	164	201	192	172	209	178	182	176	178	169	200	171	141
	111	170	143	149	167	150	134	119	110	108	166	117	164	164	179	180
	201	199	163	157	126	100	158	185	190	221	179	118	164	197	168	139
Tiefboxen	205	214	169	155	114	84	168	219	206	229	202	169	155	194	175	174
	215	207	208	155	111	129	214	169	230	236	233	195	163	199	180	173
	192	218	223	155	135	195	201	213	232	225	228	218	169	195	191	175
	199	132	181	199	196	210	212	212	199	164	203	195	202	171	163	170
Laufbereich T-F	149	203	191	196	212	216	201	187	206	191	187	205	211	191	141	147
	192	195	187	190	199	199	187	188	192	181	199	204	179	178	168	146
	187	195	179	179	142	193	198	198	179	172	172	200	131	175	176	154
	181	184	149	118	184	197	187	130	176	159	153	137	182	178	135	89
Futtertisch	173	180	119	167	177	181	116	133	168	163	122	182	172	170	105	150
	145	122	155	149	154	120	121	152	154	129	162	118	140	111	131	142

\bar{E} 170
 E_{min} 74
 E_{max} 223
 g_1 0,43
 g_2 0,33

\bar{E} 167
 E_{min} 75
 E_{max} 219
 g_1 0,45
 g_2 0,34

\bar{E} 175
 E_{min} 71
 E_{max} 236
 g_1 0,41
 g_2 0,30

\bar{E} 160
 E_{min} 76
 E_{max} 211
 g_1 0,47
 g_2 0,36

IV. Ergebnisse der Befragungsaktion LED- / NAV-Beleuchtung

Antworten zur Frage 2 „Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als positiv?“ (LED-Beleuchtung)

Mitarbeiter	<ul style="list-style-type: none"> • ist für das menschliche Auge sehr angenehm, gar nicht grell • gute Ausleuchtung, Strom sparen • beim Arbeiten im Stall ist es taghell • Helligkeit, wirkt beruhigend • man sieht im Stall besser • sehr hell
Auszubildende	<ul style="list-style-type: none"> • angenehmes Licht, ähnelt dem Tageslicht, hell • alles gut beleuchtet, keine dunklen Ecken, sehr helles Licht • ideales Orientierungslicht, energiesparend • mehr Licht, bessere Übersicht im Stall • positiv finde ich das weiße/klare Licht, sehr hell • ruhige Atmosphäre für die Kühe • die klare Sicht, schönes Empfinden des Lelystalls

Antworten zur Frage 2 „Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als positiv?“ (NAV-Beleuchtung)

Mitarbeiter	<ul style="list-style-type: none"> • warmes Licht, kein zweifarbiger Schattenwurf • Helligkeit • kein Blaustich, gemütlich, gute Ausleuchtung • kein Blaustich, gute Ausleuchtung
Auszubildende	<ul style="list-style-type: none"> • warmes Licht • nicht blendend

Antworten zur Frage 3 „Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als negativ?“ (LED-Beleuchtung)

Mitarbeiter	<ul style="list-style-type: none"> • Anschaffungskosten?! Laufende Kosten?! • bei Sonnenschein teilweise Licht an • Optik von Aussen, leicht blaues Licht • sehr kühl und klinisch im ersten Moment, gewöhnungsbedürftig zu Beginn • farblicher Schattenwurf, sehr grell, wenn man richtig in die Leuchte schaut
Auszubildende	<ul style="list-style-type: none"> • grell, wenn man direkt hineinguckt, besonders morgens ;-) • grell + kaltes Licht, bei schlechtem Wetter ungemütlich • grell • vereinzelt doppelter Schatten • etwas zu grell

Antworten zur Frage 3 „Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als negativ?“ (NAV-Beleuchtung)

Mitarbeiter	<ul style="list-style-type: none"> • nicht ganz so hell • schlechte Unterschiede in der Wahrnehmung verschiedene Farben (Milch, Blut, Wasser + Urin) • schwierig zu putzen, Nistplatz für Vögel • zu dunkel unangenehm • schwer zu putzen • gegenüber zu LED zu dunkel
Auszubildende	<ul style="list-style-type: none"> • zu dunkel, schlecht für die Bewertung der Tiere, also schlechte Übersicht, kaum Kontraste (farblich) • zu dunkel • zu dunkel, keine Übersicht für Mensch und Tier • dunkle Ecken • zu dunkel, keine gute Übersicht • zu dunkel • zu dunkel zum Arbeiten

Eidesstattliche Erklärung / Declaration under Oath

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I declare under penalty of perjury that this thesis is my own work entirely and has been written without any help from other people. I used only the sources mentioned and included all the citations correctly both in word or content.

Delbrück, den 19. Februar 2019



Daniel Werner

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name, Vorname: Werner, Daniel
Geburtsdatum: 17.07.1984
Geburtsort: Paderborn
Familienstand: verheiratet, eine Tochter

Beruflicher Werdegang

seit 20.02.11 Wissenschaftlicher Mitarbeiter (WMA) im Institut für Technische Energie-Systeme der Fachhochschule Bielefeld im Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Mathematik

- WMA im BMEL / LR Forschungsprojekt: „Innovative LED-Leuchte für erhöhte Anforderungen in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung“ (Inno-LED_4_Livestock), seit 01.08.17
- Laborverantwortlicher Mitarbeiter des Labors für Intelligente Licht- und Energiesysteme, seit 01.08.16
- WMA im BMEL / LR Forschungsprojekt: „Intelligente LED Leuchte für die Funktionsbereiche „Fressen“, „Liegen“ und „Laufen“ in der Milchviehhaltung“ (I_LED_Milchvieh), 08.08.14 - 31.07.17
- Geschäftsstellenleiter des Forschungsschwerpunkts Intelligente Technische EnergieSysteme (FSP ITES), 01.01.14 - 31.07.16
- Wissenschaftliche Betreuung des Klimaparks Rietberg, 20.02.11 - 31.12.13
- WMA im BMBF Forschungsprojekt „Kommunen in neuem Licht – Lichtkonzept Historischer Stadtkern Rietberg“, 01.04.11 - 31.05.13
- WMA im hochschulintern geförderten Forschungsprojekt „Intelligentes optisches LED Leitsystem“, 01.07.12 - 31.12.13

Lehraufträge an der Fachhochschule Bielefeld:

- Effiziente Lichttechnik, Studiengang Regenerative Energien (4 SWS Seminar und Praktikum), seit SoSe 15
- Regenerative Energiewirtschaft, Studiengang Regenerative Energien (2 SWS Seminar), WiSe 12/13 - WiSe 17/18

Lebenslauf

01.09.10 - 31.12.10: Werksverträge im Forschungsbereich LED-Technologie bei Prof. Dr.-Ing. Eva Schwenzfeier-Hellkamp, Fachhochschule Bielefeld, Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Mathematik

WiSe 06/07 - SoSe 10: Diplomstudium an der Fachhochschule Bielefeld, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik, Elektrotechnik Fachrichtung Regenerative Energien:

- Diplomarbeit „Technische und wirtschaftliche Einsatzmöglichkeiten von LED-Beleuchtungssystemen in GOLDBECK Produkten“, erstellt in dem Unternehmen GOLDBECK Süd GmbH, Abt. Gebäudetechnik, prämiert mit dem E.ON Westfalen Weser Energy Award 2010
- Praxisphase, GOLDBECK Süd GmbH, Abt. Gebäudetechnik

22.08.05 - 20.06.06: Fachhochschulreife, Richard-von-Weizsäcker-Berufskolleg Paderborn, Fachabitur Fachrichtung Technik, Schwerpunkt Elektrotechnik

01.08.01 - 21.08.05: Ausbildung zum Elektroinstallateur mit anschließender Geselleneinstellung, Firma Haustechnik Klaus Hoffmann, Delbrück-Ostenland

Delbrück, den 19. Februar 2019



Daniel Werner