

Jan Krüger

**Einfluss des Gütemerkmals Lichtrichtung und Schattigkeit
auf Störwirkung und visuellen Diskomfort**

Schriften der Ilmenauer Lichttechnik

Herausgegeben von
Prof. Dr. Christoph Schierz,
Fachgebiet Lichttechnik
an der Technischen Universität Ilmenau.

Band 23

Diese Reihe setzt ab dem Band 20 die „*Publikationsreihe des
Fachgebietes Lichttechnik in Ilmenau*“ fort.

**Einfluss des Gütemerkmals
Lichtrichtung und Schattigkeit
auf Störwirkung und
visuellen Diskomfort**

Jan Krüger



Universitätsverlag Ilmenau

2018

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung:	27. Juni 2017
1. Gutachter:	Univ.-Prof. Dr. sc. nat. habil. Christoph Schierz (Technische Universität Ilmenau)
2. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Paul W. Schmits (HAWK Hochschule Hildesheim/Holzminde/Göttingen)
3. Gutachter:	Dir. u. Prof. Dr. Armin Windel (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund)
Tag der Verteidigung:	07. Februar 2018

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

<http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

readbox unipress

in der readbox publishing GmbH

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://unipress.readbox.net>

ISSN 2513-1656

ISBN 978-3-86360-180-5 (Druckausgabe)

URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018000092](http://nbn:de:gbv:ilm1-2018000092)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	Abstract	8
1.2	Zusammenfassung	10
1.3	Aufbau und Struktur der Arbeit	12
1.4	Themenstellung und Einordnung	17
2	Theorieteil: Das Gütemerkmal Lichtrichtung und Schattigkeit	23
2.1	Wissenschaftliche Perspektive auf die Bedeutung von Lichtrichtung und Schattigkeit für die visuelle Wahrnehmung	23
2.2	Lichtrichtung und Schattigkeit in Normung und Gesetzgebung	33
2.3	Stand der Technik	37
2.4	Betrachtung von Lichtrichtung und Schattigkeit unter dem Paradigma des visuellen Diskomforts	43
2.4.1	Visueller Diskomfort	43
2.4.2	Zusammenhänge zwischen dem Gütemerkmal Lichtrichtung und Schattigkeit und dem visuellen Diskomfort	49
2.4.3	Herleitung der Hypothesen	53

3 Praxisteil: Wirkung von Lichtrichtung und Schattigkeit im Laborversuch	92
3.1 Darstellung der Teilversuche	92
3.1.1 Versuchsübergreifende Methodik	92
3.1.2 Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf Formwahrnehmung	103
3.1.3 Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf visuell-motorische Leistung	120
3.1.4 Einfluss von Mehrfachschatten bei Leseaufgaben	135
4 Schlussfolgerungen	155
4.1 Zusammenfassende Bewertung	155
4.2 Praxisempfehlungen	165
4.3 Weiterführender Forschungsbedarf	187
Abbildungsverzeichnis	193
Tabellenverzeichnis	195
Formelverzeichnis	196
Im Rahmen der Dissertation entstandene Veröffentlichungen	197
Literatur	219
Anhang	220

Abkürzungsverzeichnis

ASR	Technische Regel für Arbeitsstätten
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
CIE	Internationale Beleuchtungskommission (Commission Internationale de l'Éclairage)
ERP	Ereigniskorrelierte Potentiale (event-related potentials)
fMRI	funktionelle Magnetresonanztomographie (functional magnetic resonance imaging)
FrACT	Freiburg Vision Test
GEE	Generalized Estimating Equations (Verallgemeinerte Schätzungsgleichungen)
IfADo	Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund
L1-L7	Leuchte 1 bis Leuchte 7 gem. Abbildung 4.4
LED	lichtemittierende Diode
LiTG	Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V.
RMSE	Root-mean-square error
R^2	Determinationskoeffizient
TMS	transcranial magnetic stimulation

1 Einleitung

1.1 Abstract

The research work investigates the influence of shadow characteristics on various work tasks such as reading, visual-motor work and shape recognition. The experiments were designed to identify possible links between shadow characteristics and visual discomfort. Therefore, in addition to objective performance parameters, subjective measures of effort as well as visual complaints were recorded for the aforementioned work tasks.

In the analysis of the three experiments, significant effects of light direction and shadow characteristics could be derived from objective measures of performance. Depending on the type of task, it was shown that this lighting quality criterion can act as contributing factor for disturbance and visual discomfort.

The results of all three experiments are interpreted within the context of an overarching psychological framework, through which the regulation of work performance can be explained. The „Compensatory Control Model“ describes the regulation of work performance at high workload and stress conditions taking into account the subjectively experienced effort. In the model, unfavorable lighting conditions served as a stressor, which created higher requirements for the task execution. Using the model, compensation effects (performance and effort compensation) can be explained, which could be observed in the subjects. The model links lighting quality criteria with safety and health at work.

Particularly against the background of the increasing spread of LED technology with its characteristic features, such as the small source size and the strong directionality of the light, the need for a stronger investigation of this lighting quality criterion is pointed out. In the sections of the theoretical part, the problem is brought to the attention that light direction and shadow characteristics are hardly taken into account in standardization and regulation as factors for perception, visual fatigue or visual discomfort.

Practical recommendations are given in the last part of the research report. On one hand the practical recommendations concern the need for adaptation of light direction and shadow characteristics to the type of work task. On the other hand, recommendations for lighting and luminaire design are given.

1.2 Zusammenfassung

In dieser Forschungsarbeit wurde der Einfluss des Gütemerkmals Lichtrichtung und Schattigkeit bei verschiedenen Arbeitstätigkeiten wie Lesetätigkeit, visuell-motorischer Arbeit und Formerkennung untersucht. Die Versuche waren darauf ausgerichtet, mögliche Zusammenhänge des Gütemerkmals mit dem visuellen Diskomfort aufzuzeigen. Bei allen Arbeitstätigkeiten wurden daher neben objektiven Leistungsparametern subjektive Beanspruchungsdaten sowie visuelle Beschwerden erfasst.

Bei der Analyse der Teilversuche konnten signifikante Wirkungen von Lichtrichtung und Schattigkeit auf objektive Leistungsparameter der visuellen Wahrnehmung abgeleitet werden. In Abhängigkeit der Arbeitsaufgabe zeigten sich unterschiedliche Stufen der Beeinträchtigung, welche das Gütemerkmal mit Störwirkung und visuellem Diskomfort in Verbindung bringen.

Die Ergebnisse der drei Teilversuche wurden in ein übergreifendes, psychologisches Modell eingeordnet, welches die Auswirkungen auf die Gesundheit von Beschäftigten erklärt und die Relevanz des Gütemerkmals für den Arbeitsschutz darstellt. Das Regelkreismodell beschreibt die Regulierung von Arbeitsleistung bei hoher Arbeitslast und Stressbedingungen unter Berücksichtigung der subjektiv erlebten Anstrengung. Im Modell fungierten die Beleuchtungsbedingungen als Stressor, welche höhere Anforderungen bei der Aufgabenausführung hervorriefen. Mithilfe des Modells können Kompensationseffekte (Leistungs- und Beanspruchungskompensation) erklärt werden, welche bei den Probanden beobachtet werden konnten.

Besonders vor dem Hintergrund der zunehmenden Verbreitung der LED-Technologie mit ihren charakteristischen Merkmalen, wie der kleinen Quellengröße und der starken Gerichtetheit des Lichts wird die Notwendigkeit nach einer stärkeren Untersuchung dieses Gütemerkmals aufgezeigt. In den einzelnen Abschnitten des Theorie-teils wird sukzessive zu einer Problemstellung hingeführt. Diese betrifft den Umstand, dass Lichtrichtung und Schattigkeit in Normung und Regelsetzung als Faktoren für Wahrnehmung, visuelle Ermüdung bzw. visuellen Diskomfort kaum Berücksichtigung finden.

Nicht zuletzt werden Praxisempfehlungen ausgesprochen und weiterführender Forschungsbedarf aufgezeigt. Die Praxisempfehlungen betreffen einerseits die Anpassung von Lichtrichtung und Schattigkeit an den Kontext der Arbeitsaufgabe und andererseits Empfehlungen für die Lichtplanung und Leuchtengestaltung.

1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit

In den einzelnen Abschnitten des Theorieteils wird zunächst die wissenschaftliche Perspektive auf das Gütemerkmal Lichtrichtung und Schattigkeit dargestellt. Hierbei wird deutlich gemacht, dass sich Schatten komplex und vielfältig auf die Perzeption auswirken (beispielsweise auf Farbwahrnehmung [Winkler et al., 2015], Formwahrnehmung [Kleffner und Ramachandran, 1992], Kantenerkennung [Baxandall, 1995], Bewegungswahrnehmung [Mamassian et al., 1998] oder räumliche Tiefenwahrnehmung [Allen, 1999]). Demgegenüber wird das Gütemerkmal aus Perspektive der Normung und Regelung dargestellt und der Stand der Technik aufgezeigt. Dabei wird deutlich, dass Lichtrichtung und Schattigkeit im Vergleich zu anderen Gütemerkmalen der Beleuchtung eine untergeordnete Rolle spielen und deren Bedeutung für die Wahrnehmung großteils unberücksichtigt bleibt. Im Gegensatz zu anderen Gütemerkmalen wie Beleuchtungsniveau, Farbwiedergabe, Blendung oder Gleichmäßigkeit finden sich im Normen- und Regelwerk lediglich qualitative Anforderungen an Lichtrichtung und Schattigkeit. Im Kontext „des Wandels der Beleuchtung in Arbeitsstätten“ wird das Gütemerkmal mit neuen LED-Beleuchtungstechnologien in Verbindung gebracht und verdeutlicht, dass die charakteristischen Eigenschaften der LED [Knoop, 2011] eine nähere Auseinandersetzung mit diesem Gütemerkmal notwendig machen. Zum Abschluss des Theorieteils wird begründet, warum das Gütemerkmal stärker unter dem Paradigma des visuellen Diskomforts und der Störwirkung betrachtet werden sollte. Dazu werden Verbindungen zwischen Lichtrichtung und Schattigkeit und anderen bekannten Faktoren des visuellen Diskomforts hergestellt (z. B. Gleichmäßigkeit im Bereich der Sehaufgabe).

Im anschließenden Praxisteil werden anhand dreier Laborversuche mögliche Verbindungen des Gütemerkmals zum visuellen Diskomfort ermittelt. Es wurden drei Teilversuche durchgeführt, in denen der Einfluss auf die Formwahrnehmung [Krüger und Schierz, 2016b], die visuell-motorische Leistung [Krüger und Schierz, 2016a] sowie die Sehleistung bei einer Lese-Vergleichsaufgabe [Krüger et al., 2014] untersucht wurde. In den Versuchen erzeugten die Beleuchtungsbedingungen verschiedene Stufen der visuellen Beeinträchtigung, welche hinsichtlich der Schwere der Beeinträchtigung in nachfolgende Rangfolge gebracht werden können (Abbildung 1.1):

1. Beeinträchtigung der visuellen Wahrnehmung ohne Einfluss auf subjektiv erlebte Anstrengung (Teilversuch zum Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf Formwahrnehmung)
2. Beeinträchtigung der visuellen Wahrnehmung mit Einfluss auf subjektiv erlebte Anstrengung und resultierender Beanspruchungskompensation (Teilversuch zum Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf visuell-motorische Leistung)
3. Beeinträchtigung der visuellen Wahrnehmung mit Einfluss auf subjektiv erlebte Anstrengung und zusätzlichen visuellen Beschwerden (Teilversuch zum Einfluss von Mehrfachschaten bei Leseaufgaben)

Die Versuchsergebnisse demonstrieren, dass Lichtrichtung und Schattigkeit kontextabhängig betrachtet und auf die Arbeitsaufgabe angepasst werden müssten. Hinsichtlich der Eignung der Beleuchtungsbedingungen für unterschiedliche Arbeitsaufgaben zeigt sich ein komplexes Bild. Beleuchtungsbedingungen, die eine Aufgabe unterstützen, können sich bei anderen störend auswirken. Beispielsweise können

Grad der Beeinträchtigung	Störwirkung		Visueller Diskomfort
Visuelle Beschwerden	☒	☒	✓
Subjektive Anstrengung	☒	✓	✓
Objektiver Leistungsparameter	✓	✓	✓
	Formwahrnehmung (Gauge Figure Task)	Visuell-motorische Leistung (Purdue Pegboard Test)	Sehleistung (Numerical Verification Task)
Teilversuch	Formbewertung eines 3D-Objektes	Kleinteilige Montagearbeit	2D-Lese-Vergleichsaufgabe

✓ = signifikanter Einfluss des Gütemerkmals Lichtrichtung Schattigkeit

☒ = kein Einfluss des Gütemerkmals Lichtrichtung und Schattigkeit

Abbildung 1.1: Stufen der Beeinträchtigung

sich harte Schatten einer einzelnen gerichteten Punktlichtquelle bei einer Lese-Vergleichs-Aufgabe negativ auf Sehleistung und Sehkomfort auswirken, wohingegen dieselbe Beleuchtungsbedingung die korrekte Formwahrnehmung von 3D-Objekten am besten unterstützt. Extreme Mehrfachschatten (mit hoher Schattenanzahl, Tiefe und Schärfe) von LED-Arrays führten zu besserer visuell-motorischer Leistung und geringerer subjektiver Anstrengung als das gerichtete Licht einer separaten Punktlichtquelle mit Einzelschatten.

Weiterhin lässt sich aus den unterschiedlichen Stufen der Beeinträchtigung (Abbildung 1.1) ableiten, dass nicht alle Versuchsergebnisse dem visuellen Diskomfort zugeordnet werden bzw. mit Augenermüdung erklärt werden können. Die Versuche zur Formwahrnehmung und zur visuell-motorischen Leistung betreffen eine direkte, externe Störung der visuellen Wahrnehmung durch die Beleuchtung, die nicht notwendigerweise zu Diskomfort oder Augenermüdung führen muss, sondern den Handlungsablauf beeinträchtigt. Hier kann

vermutet werden, dass Beleuchtungsbedingungen dann als visueller Störfaktor Einfluss auf das Wohlbefinden haben können, wenn sie den Beschäftigten das Ausführen von Arbeitshandlungen erschweren und damit zusätzlicher Aufwand entsteht oder zur Erreichung eines definierten Ziels vermehrte Anstrengung notwendig wird.

Die Bedeutung von Umweltfaktoren wie der Beleuchtung für die Handlungsregulation bei der Arbeitserfüllung stellt Schierz [Schierz, 2006] dar. Die Handlungsregulationstheorie nach Hacker [Hacker, 1998] impliziert unter anderem, dass situative Faktoren die für das Arbeitshandeln notwendigen Regulationsprozesse behindern können [Leitner et al., 1987]. Sogenannte „Regulationshindernisse“ erfordern vom Beschäftigten zusätzliche Regulationskapazität, die dann für die Erfüllung der eigentlichen Arbeitsaufgabe nicht mehr zur Verfügung steht [Sonnentag und Frese, 2002]. Der entstehende Zusatzaufwand meint damit die zusätzliche Zeit, die eine Person benötigt, um mit Regulationshindernissen umzugehen. Die einzelnen situativen Erschwerungen müssen nicht notwendigerweise als störend empfunden werden, können sich aber aufsummieren und langfristig das Wohlbefinden von Beschäftigten beeinträchtigen [Oesterreich, 1998]. Ungünstige Arbeitsbedingungen können demnach dazu führen, dass Personen dieselbe Leistung nur unter erhöhter Anstrengung erreichen können. In Analogie zu einem kybernetischen Regelkreis beschreiben Carver und Scheier menschliches Verhalten als durch Feedbackprozesse gesteuertes Verhalten [Carver und Scheier, 1981]. Auf die Handlungsschleife können äußere Bedingungen und Umstände als Störungskomponenten einwirken. Ungünstige Beleuchtungsbedingungen könnten eine solche Störungskomponente sein.

Beispielsweise deuten die Ergebnisse des Versuchs zur visuell-motorischen Leistung auf eine Beanspruchungskompensation. Be-

stimmte Beleuchtungssituationen riefen eine höhere Beanspruchung bei den Versuchsteilnehmern hervor, was sich in einem Trend zu einem Leistungsabfall widerspiegelte. Die objektiven Leistungsdaten zeigen bei jenen Beleuchtungssituationen eine Tendenz zu einem Leistungsabfall, in denen die subjektiven Beanspruchungsdaten deutlich höhere Werte aufweisen. Hier kann vermutet werden, dass die Versuchsperson nicht bereit war, eine höhere Beanspruchung zum Leistungserhalt in Kauf zu nehmen, stattdessen wurde die höhere Beanspruchung teilweise mit einem Leistungsabfall kompensiert.

Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse werden die Verbindungen zur Störwirkung und visuellem Diskomfort deutlich, daher wird an die im Theorieteil geschilderte Betrachtungsweise zur Störwirkung und visuellem Diskomfort angeknüpft. Obwohl wenige Studien existieren, welche die Auswirkung der speziell durch Beleuchtungsbedingungen verursachten zusätzlich erforderlichen Anstrengung betrachten, ist von einem entsprechenden Wirkungsgefüge auszugehen.

Im letzten Teil des Forschungsberichtes werden Praxisempfehlungen abgeleitet. Dazu werden grundlegende Schattengesetze bei der Entstehung von LED-Mehrfachschatten erläutert und Empfehlungen zur Vermeidung dieser gegeben. Nicht zuletzt enthält der Schlussteil Empfehlungen für den weiterführenden Forschungsbedarf. Hier werden verschiedene Ansätze aus den einzelnen Teilversuchen aufgegriffen und in ihrer Übertragbarkeit auf andere lichttechnische Fragestellungen dargestellt. Beispielsweise kann die Ermittlung von dominanten Ortsfrequenzen mithilfe von Image Processing Methoden (Teilversuch: Einfluss von Mehrfachschatten bei Leseaufgaben) dazu dienen, eventuelle Risiken für akute visuelle Beschwerden am Arbeitsplatz vorherzusagen. Hier wird eine Umsetzung in einer kamerabasierten App vorgeschlagen.

Weiterhin wird die Methode zur Ermittlung der wahrgenommenen Objektform (Teilversuch: Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf Formwahrnehmung) als Bewertungsinstrument für bestehende oder zukünftige Modelling-Indizes vorgeschlagen. Das Modelling dient der besseren Interpretierbarkeit von Gesichtszügen und unterstützt die Kommunikation besonders im Bürokontext. Die Methode richtet sich an den, im CIE-Report „Review of Lighting Quality Measures for Interior Lighting with LED Lighting Systems“ [CIE 205:2013, 2013] formulierten, Forschungsbedarf zum Thema Modelling of Faces.

1.4 Themenstellung und Einordnung

Eine wesentliche Zielsetzung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) ist die Beobachtung aktueller Technikentwicklungen und die kritische Auseinandersetzung mit den Folgen neuer Technologien. Mehr als ein Jahrhundert nach Einführung der Glühlampe ist es die LED, welche die Beleuchtung von Arbeitsstätten revolutioniert. Vor dem Hintergrund der Ökodesignrichtlinie 2009/125/EG steht bei der Umrüstung der Beleuchtung auf moderne LED-Leuchten meist das Energieeinsparpotenzial im Vordergrund. Die hohe Effizienz von LED-Lampen und Leuchten bringt Energieeinsparungen in großem Ausmaß. Darüber hinaus bietet die LED vielfältige Optionen zur Steuerung von Dimmzustand, Farbtemperatur und Lichtverteilung sowie neue Freiheitsgrade in der Leuchtengestaltung. Bei der Beleuchtung von Arbeitsplätzen eröffnet der Einsatz von LED-Technik neue Möglichkeiten zur Dynamisierung der Beleuchtung. Aktuell befindet sich eine große Vielfalt von LED-Produkten am Markt, welche sich teilweise stark in ihrer Lichtqualität unterscheiden. Zur Bewertung existieren die sogenannten Gütemerkmale der Beleuchtung. Dazu zählen Beleuchtungsniveau, Blendung, Farbwiedergabe,

Flimmern, Lichtfarbe, Gleichmäßigkeit sowie Lichtrichtung und Schattigkeit [CIE 205:2013, 2013]. Die Anforderungen an die Güteermale richten sich nach der Art der Sehaufgabe, sie sollen Sehleistung und Sehkomfort sicherstellen. Beispielsweise soll das Beleuchtungsniveau ausreichend Licht für die Ausführung der Arbeitsaufgabe bereitstellen, wohingegen durch die Berücksichtigung von Flimmern und Blendung längerfristig Augenbeschwerden vermieden werden sollen. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Grundsatz der ganzheitlichen Betrachtung aller Güteermale, wobei die Gesamtheit aller Güteermale für Lichtqualität steht.

Mit Bezug auf den technologischen Wandel der Beleuchtung in Arbeitsstätten wird die Berücksichtigung des Güteermals Lichtrichtung und Schattigkeit zunehmend zur Notwendigkeit. Eine Ursache dafür sind die charakteristischen Merkmale von LED-Lichtquellen [Knoop, 2011]. Das gerichtete Licht von LED-Arrays mit vielen, dicht angeordneten Lichtpunkten erzeugt Lichtfelder, welche sich deutlich von denen klassischer Lampen- und Leuchtentechnologien unterscheiden können [Krüger und Schierz, 2016b]. Knoop verdeutlicht, dass Licht emittierende Dioden wegen charakteristischer Merkmale wie der kleinen Quellengröße oder der starken Gerichtetheit des Lichts mit keiner, bisher gebräuchlichen Beleuchtungstechnologie, vergleichbar sind [Knoop, 2011]. Des Weiteren machen Xue et al. darauf aufmerksam, dass der Lichtstrom einer einzelnen LED in der praktischen Anwendung oft nicht ausreichend ist, um Anforderungen bestimmter Arbeitsaufgaben an das Beleuchtungsniveau erfüllen zu können. Daher werden heute und zukünftig verstärkt Leuchten mit LED-Arrays oder high-power-LEDs zum Einsatz kommen [Xue et al., 2016].

Am Beispiel der gleichmäßigen Ausleuchtung einer Fläche mit einem LED-Array soll verdeutlicht werden, dass die Berücksichtigung des Gütemerkmals Lichtrichtung und Schattigkeit aus technologischer Sicht erforderlich ist. Im Herstellungsprozess werden LEDs für gewöhnlich mit einer Primäroptik ausgestattet, mit dem Ziel die Effizienz der Lichtauskopplung zu verbessern und die empfindlichen Bestandteile zu schützen. Mit der Primäroptik soll eine diffus strahlende Fläche erzeugt werden. Das Lichtbündel der LED besitzt dann eine hohe Lichtstärke in der zentralen Region, welche aufgrund von Streueffekten, zum Rand hin abfällt [Jacobson und Gengelbach, 2002]. Um die Lichtqualität zu erhöhen und eine bessere Kontrolle über den Strahlengang zu erhalten, kommen anschließend Sekundäroptiken zum Einsatz, die das Licht bündeln. Der Einsatz von Sekundäroptiken erzeugt gerichtetes Licht und begünstigt die Entstehung von Mehrfachschatten [Kuo et al., 2011].

Die gleichmäßige Ausleuchtung einer Fläche mit LEDs kann demzufolge entweder mit weit strahlenden LEDs oder mit dichter angeordneten eng strahlenden LEDs erreicht werden. Für die weit strahlenden LEDs wird das gaußsche Strahlenbündel aufgeweitet, um den zentralen Bereich des Bündels für die Beleuchtung der Fläche zu verwenden [Ramane und Shaligram, 2011]. Im Vergleich zur Beleuchtung mit mehreren LEDs hat dieser Ansatz den Nachteil einer verringerten Effizienz, da nur noch ein Teil des gesamten Lichtstroms die zu beleuchtende Fläche erreicht. Werden hohe Anforderungen an die gleichmäßige Ausleuchtung einer Fläche bei gleichzeitig hoher Effizienz gestellt, ist der Einsatz von gerichtetem Licht von Vorteil. Demzufolge erlaubt die Kontrollierbarkeit der Lichtrichtung mit Sekundäroptiken (wie Freiformlinsen oder speziellen Reflektoren) die gezielte Ausleuchtung bestimmter Bereiche des Arbeitsplatzes mit gerichtetem Licht.

Mit der Forderung nach immer energieeffizienteren Lichtlösungen sind diese Systeme einer raumbezogenen Allgemeinbeleuchtung überlegen. Allerdings sollte dem Gütemerkmal Lichtrichtung und Schattigkeit bei diesen Lichtlösungen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Vermeintliche Energieeinsparungen können zu Lasten der Lichtqualität gehen und die Gleichmäßigkeit außerhalb des Bereiches der Sehaufgabe nachteilig beeinflussen. Dabei kann fehlendes Licht an Decken und Wänden einen „Höhleeffekt“ hervorrufen.

In Ergänzung zu den technologischen Veränderungen und den gestiegenen Energieanforderungen an die Beleuchtung von Arbeitsstätten bestehen aus wissenschaftlicher Perspektive zahlreiche Wissenslücken hinsichtlich des Gütemerkmals.

Eine dieser Wissenslücken betrifft den Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf die visuelle Wahrnehmung und den Sehkomfort, welche in dieser Arbeit adressiert wird. Beispielsweise berichten Wu et al. und Kuo et al. [Wu et al., 2011],[Kuo et al., 2011] von auftretenden Wahrnehmungsstörungen wie Unschärfe und Doppelbildern bei Beleuchtungsbedingungen mit Mehrfachschatten. Die Ursachen dieser Wirkungen sind bisher kaum untersucht.

Ein weiterer Forschungsaspekt, der in den vorliegenden Untersuchungen behandelt wird, betrifft die Zusammensetzung des Lichtfeldes. Bei der gleichmäßigen Ausleuchtung von Arbeitsbereichen wird der Zusammensetzung des Lichtfeldes nur wenig Bedeutung beigemessen. Dabei scheint es nebensächlich, ob Bereiche der Sehaufgabe mit konventionellen Spiegelrasterleuchten oder LED-Rasterleuchten (von einer Vielzahl separierter Einzellichtquellen) beleuchtet werden. Auch Photometer oder Leuchtdichtekameras sind nicht in der Lage, die Zusammensetzung des Lichts auf einer beleuchteten Arbeitsfläche zu

entschlüsseln. Erst wenn ein Schatten werfender Körper in das Lichtfeld gebracht wird, offenbart sich durch Schattentiefe, Schattenschärfe, Schattenanzahl sowie deren Ausdehnung die Zusammensetzung des Lichts [Norden, 1933]. Mit dem Einsatz gerichteten Lichts von LED-Arrays gewinnt die Betrachtung und Analyse der Einzelbestandteile eines Lichtfeldes an Bedeutung. Eine zentrale Rolle spielen dabei die Anzahl der Lichtquellen und deren Gerichtetheit.

In einem BAuA-Gutachten zum „Stand von Wissenschaft und Technik bei neuen Beleuchtungstechnologien am Arbeitsplatz“ formulieren Schierz et al. Forschungsbedarf zum Gütemerkmal und stellen fest: „Modelling und Schattigkeit wurde in den 1970er Jahren stark untersucht, seither ist das Interesse dafür etwas eingeschlafen.“ [Schierz et al., 2011](S.145).

Nicht zuletzt tangiert das Gütemerkmal Lichtrichtung und Schattigkeit weitere Teilgebiete der Beleuchtung, welche aktuell im Fokus der Öffentlichkeit stehen. Dazu gehören beispielsweise die melanopischen Lichtwirkungen. Diesbezüglich wird vermutet, dass mit der Variation des gerichteten und diffusen Lichtanteils, die vertikale Beleuchtungsstärke am Auge und damit, die Stärke der Lichtwirkung beeinflusst werden kann. In diesem Zusammenhang sei auch auf den fortschreitenden Trend zur Dynamisierung von Beleuchtungsbedingungen hingewiesen [Krüger, 2014a]. Derzeit beschränken sich dynamische Beleuchtungssysteme auf die Variation von Dimmzustand und Lichtfarbe. Es existieren erste Lösungen, bei denen die Lichtverteilung örtlich verändert wird. Für die Zukunft naheliegend sind eine fortschreitende Dynamisierung von Licht und die Schaffung neuer Freiheitsgrade in der Beleuchtung. Ein bisher wenig beachteter Freiheitsgrad bei der Dynamisierung der Beleuchtung ist die Veränderung der Lichtrichtung.

Auch der dynamische Wechsel von gerichtetem und diffusem Licht ist selten untersucht [Fleischer et al., 2000b], [Fleischer et al., 2000a], [Fleischer, 2001], [Moeller et al., 2011], [Stefani et al., 2011]. In Anbetracht des Einsatzes von tageslichtsimulierenden Decken, Lichtpaneelen oder virtuellen Fenstern gewinnt die Berücksichtigung von Diffusität und Gerichtetheit zunehmend an Gewicht [Mangkuto et al., 2014]. Die hier behandelten visuellen Wahrnehmungsmechanismen zur Formwahrnehmung, visuell-motorischen Arbeit oder Lesetätigkeit werden durch diese innovativen Lichtlösungen gleichermaßen beeinflusst und sollten bei der Gestaltung biologisch wirksamer Beleuchtung nicht unberücksichtigt bleiben.

2 Theorieteil: Das Gütemerkmal Lichtrichtung und Schattigkeit

2.1 Wissenschaftliche Perspektive auf die Bedeutung von Lichtrichtung und Schattigkeit für die visuelle Wahrnehmung

Gibson betrachtet Schatten aus einer evolutionären Perspektive und macht darauf aufmerksam, dass sich mit dem Sonnenstand verändernde Schatten, eine immer wiederkehrende Bedingung unserer visuellen Umwelt, darstellen, welche die Entwicklung unseres visuellen Systems geprägt haben muss.

„But the fact is that shifting shadows and a moving sun are regularities of ecological optics whether or not they are ever noticed by any animal. They have set the conditions for the perception of the terrain by terrestrial animals since life emerged from the sea. They make certain optical information available.“ [Gibson, 1979] (S.91).

Auch Baxandall äußert die Vermutung, dass Schatten eine zentrale Rolle in unserer Wahrnehmung spielen müssen.

„The conviction common to all Enlightenment parties - nativist, empiricist, sensationalist, materialist, associationist - that shadow must somehow be quiet central to our perception of the world, whatever the means and basis of our interpreting it, is so firm and compelling that effort is needed to disengage“ [Baxandall, 1995] (S. 32).

Im anschließenden Abschnitt soll ausgeführt werden, dass Schlagschatten und Schattierungen in der Tat Träger vielfältiger Informationen sein können, welche bei zahlreichen Prozessen der visuellen Wahrnehmung in Bezug genommen werden. Zunächst soll aber eine Definition des Konstrukts Lichtrichtung und Schattigkeit vorgenommen werden.

Wird in den nachfolgenden Kapiteln von Schattigkeit gesprochen, dann sind darunter zunächst alle unterschiedlichen Schattenformen zusammengefasst. Die Schattigkeit beinhaltet Schattierungen, die aufgrund der Form des Objektes durch Leuchtdichteunterschiede auf seiner Oberfläche gekennzeichnet sind (z. B. Schattierungen auf einer Skulptur). Sie beinhaltet weiterhin den Schlagschatten, der von einem Objekt auf eine Projektionsfläche fällt, als auch den Fremdschatten, bei denen der Schlagschatten auf einen anderen Körper fällt. Was diese Schatten alle gemeinsam haben ist, dass es sich um einen begrenzten Oberflächenbereich handelt, „auf dem die Leuchtdichte gegenüber dem Umfeld dadurch vermindert ist, dass ein die Lichtausbreitung behindernder Körper zwischen Lichtquelle und dem betrachteten Oberflächenstück tritt“ [Haeger, 1975] (S.15). Was aus dieser Definition deutlich wird ist, dass es sich bei der Schattigkeit lediglich um einen Leuchtdichteunterschied handelt. „Für die Schattigkeit spielt die Einfallrichtung keine Rolle, denn sie verhält sich bei schrägem Lichteinfall nicht anders als bei senkrechtem“ [Norden, 1933](S.66). Hierbei sollte nicht vernachlässigt werden, dass die Lage und die Ausdehnung der Schatten von der Lichtrichtung abhängig sind. Daher erscheint es sinnvoll, die beiden Aspekte Lichtrichtung und Schattigkeit in den nachfolgenden Betrachtungen nicht voneinander zu trennen.

Die folgende Auflistung verdeutlicht die vielfältigen Wahrnehmungsmechanismen, die von Lichtrichtung und Schattigkeit beeinflusst werden:

- Formwahrnehmung:
 - Form von Objekten (z. B. shape from shading, shape from cast shadows) [Kleffner und Ramachandran, 1992]
 - Modelling von Gesichtern [Boyce et al., 1999], [Veitch et al., 1996]
 - Rauigkeit von Oberflächen [Ho et al., 2006]
- Kantenerkennung (edge perception) [Baxandall, 1995]
- Entfernungswahrnehmung [Pont et al., 2011], [Allen, 1999], [Allen, 2000]
- Bewegungswahrnehmung [Katsuyama et al., 2011], [Mamassian et al., 1998]
- Visuelle Suche [Rensink und Cavanagh, 2004], [Porter et al., 2010]
- Raumwirkung [Flynn et al., 1979]
- Farbwahrnehmung [Winkler et al., 2015]
- Selbsterkennung (self recognition) [Sartori und Castiello, 2013], [Cameron und Gallup Jr, 1988]

Formwahrnehmung:

Die bekannteste Wirkung von Lichtrichtung und Schattigkeit im Bereich der Lichttechnik ist wahrscheinlich jene auf die Formwahrnehmung und Körperwiedergabe. Im Folgenden soll nur ein kleiner Ausblick auf die Formwahrnehmung gegeben werden, da diese im Abschnitt 2.4.3 intensiver behandelt wird.

Gibson erklärt die Entstehung von Schattierungen auf Oberflächen anhand der Orientierung von Flächen relativ zur Beleuchtungsrichtung: „The illumination of any face of the layout relative to adjacent

faces depends on its inclination to the prevailing illumination. Crudely speaking, the surface that „faces the light“ gets more than its neighbor. More exactly, a surface perpendicular to the prevailing illumination gets the most, a surface inclined to it gets the least“ [Gibson, 1979] (S. 88). In seiner Dissertation beschreibt Haeger die Bedeutung von Schatten für das „plastische Sehen und die Erkennbarkeit räumlicher Objekte“ (S. 6). In diesem Zusammenhang macht er auf die gezielte Nutzung dieser Wirkungen für die Beleuchtung in Museen, „Fernseh- und Photostudios, Schaufenster-, Geschäfts-, Zeichen- und Schulräumen“ aufmerksam [Haeger, 1975] (S. 6). Aus den von Haeger benannten Beispielen geht der Stellenwert von Lichtrichtung und Schattigkeit für das Modelling und ästhetische Erscheinungsbild von Personen hervor. Solche Aspekte stehen insbesondere bei der Beleuchtung von Büro- und Besprechungsräumen im Vordergrund. Juslen und Tenner vermuten sogar, dass Lichtrichtung und Schattigkeit die zwischenmenschliche Kommunikation beeinflussen können [Juslen und Tenner, 2005].

Trotz der Bekanntheit dieser Wirkungen sind praktische Untersuchungen zum Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf die Formerkennung selten zu finden. Norden verweist auf Untersuchungen von Kuhn, in denen bei verschiedenen Beleuchtungsbedingungen Versuche zur korrekten Aussortierung von Schraubenmuttern und Nägeln von einem Laufband bzw. aus Behältern durchgeführt wurden [Norden, 1933]. In diesen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Fehleranzahl durch die richtige Wahl von Lichtrichtung und Schattigkeit gezielt beeinflusst werden konnte.

Neben der Körperwiedergabe von Bauteilen bei manuellen Montagetätigkeiten spielt die Oberflächenbeschaffenheit und Rauigkeit von Oberflächen im Rahmen der Qualitätssicherung häufig eine bedeutende

Rolle an Industriearbeitsplätzen. Die Rauigkeit beschreibt die Form, die Größe und die Verteilung von Elementen auf einer Oberfläche, sie kann haptisch und visuell klassifiziert werden [Ho et al., 2006]. Die Erkennbarkeit von Feinstrukturen, wie Körnigkeit und Rauigkeit von Oberflächen, ist eng mit der Formwahrnehmung verknüpft. Diesbezüglich beschreibt Boyce: „Lighting can do little to change the visual size of twodimensional objects but shadows can be used to enhance the effective visual size of some three-dimensional objects“ [Boyce, 2003] (S. 125). Durch die Gerichtetheit des Lichts und einen flachen Lichteinfall auf die Oberfläche werden feine Eigenschatten erzeugt, welche den Kontrast feiner Oberflächendetails erhöhen. Beispielsweise kann damit die Unterscheidung verschiedener Werkstoffe erleichtert werden. Ho et al. untersuchten den Einfluss der Lichteinfallrichtung auf die wahrgenommene Oberflächenrauigkeit und kommen zu dem Ergebnis, dass Oberflächen bei flachem Lichteinfall als rauer empfunden werden [Ho et al., 2006]. Ho et al. benennen vier beleuchtungsabhängige visuelle Reize, welche eine hohe Korrelation mit der wahrgenommenen Oberflächenrauigkeit aufweisen. Dazu gehören:

- Das Verhältnis von beschatteter zu unbeschatteter Fläche
- Die Variationsbreite der Leuchtdichte auf den unbeschatteten Flächen
- Die mittlere Leuchtdichte der unbeschatteten Flächen
- Der Texturkontrast

Weiterhin untersuchte Schneider den Einfluss gerichteter und diffuser Beleuchtung bei industriellen Prüftätigkeiten [Schneider, 2010]. Dabei wurden in scheibenförmige Prüfkörper verschiedener Materialien und Oberflächenrauigkeiten, Landoltringe eingraviert. Anschließend wurde

die Detektionsleistung bei unterschiedlichen Betrachtungswinkeln und Beleuchtungsbedingungen ermittelt. Eine wesentliche Erkenntnis der Doktorarbeit war, dass der Betrachtungswinkel einen größeren Einfluss auf die Detektionsleistung hatte als die Beleuchtung [Schneider, 2010].

Kantenerkennung:

Ähnlich, wie Mikro-Eigenschaften auf einer Oberfläche Hinweise über die Feinstruktur der Oberfläche geben können, können Schlagschatten auf Makroebene die Erkennbarkeit von Objektkanten verbessern. Lenz und Roder erläutern die Bedeutung dieses Effekts am Beispiel von Treppen und erklären, dass Schlagschatten die Erkennbarkeit von Stufenkanten sowohl positiv als auch negativ beeinflussen können [Lenz und Roder, 1996]. Auch Haeger adressiert die Trittsicherheit in Abhängigkeit der Schattenbildung und stellt fest, dass ungünstige Schlagschatten auf Treppen Schrittrhythmusstörungen und Unfallgefahren verursachen können [Haeger, 1975]. Je nachdem welche Detailskala das visuelle System auswertet, können scharfe Schlagschatten einerseits Kanten anzeigen, andererseits können unscharfe Kanten als weiche Schatten diffuser Beleuchtung interpretiert werden [May und Georgeson, 2007].

Entfernungswahrnehmung:

Neben der Bedeutung für die Formwahrnehmung und Kantenerkennung spielen Schlagschatten eine Rolle bei der Einschätzung von Entfernungen sowie der Bewertung von Lage und Größe dreidimensionaler Objekte in einem räumlichen Layout [Pont et al., 2011]. Beispielsweise beinhaltet der Schlagschatten unter einem „schwebenden“ Objekt Hinweise über dessen Abstand von der Grundfläche (z. B. der Abstand eines Fahrzeugunterbodens zur Fahrbahn). Weiterhin legen die Untersuchungen von Allen nahe, dass Schlagschatten von

senkrecht aus dem Boden ragenden Stäben Hinweise auf deren Entfernung vom Beobachter geben [Allen, 1999]. In der Studie von Allen hatten Versuchspersonen die Aufgabe, mit dem Blick in eine Schattenkammer Entfernungen von Stäben einzuschätzen. Dabei projizierten die Stäbe, je nach Versuchsbedingungen entweder einen Schlagschatten oder auch nicht. In den Versuchsbedingungen ohne Schlagschatten stellte Allen häufigere Fehleinschätzungen der Entfernung fest. In einer Anschlussstudie untersuchte Allen darüber hinaus die Rolle des Schlagschattenwinkels als Hinweis für die wahrgenommene Objektentfernung [Allen, 2000].

Bewegungswahrnehmung:

Eng verknüpft mit den Studien zur Entfernung und Abstandseinschätzung von Schatten werfenden Objekten sind Studien zur Bewegungswahrnehmung bei Schatten werfenden Objekten. Häufig kommt in diesen Studien die „Ball-in-a-box“-Simulation zur Anwendung [Kersten et al., 1997]. In der Simulation wird den Versuchspersonen ein, sich bewegendes Ball in einer 3D-Landschaft, dargeboten. Dabei scheint sich der Ball in Abhängigkeit vom Ort des Schlagschattens zu bewegen. Die Bewegungen des Schlagschattens bzw. des Objekts sind korreliert und durch die Lichtquelle scheinbar verbunden. Beispielsweise haben Mamassian et al. in Versuchen mit der „Ball-in-a-box“-Simulation demonstriert, dass die örtliche Veränderung des Schlagschattens eine scheinbare Bewegung des Objektes nach sich ziehen kann [Mamassian et al., 1998]. Ähnlich wie bei der Formwahrnehmung vermuten Mamassian et al., dass das visuelle System eine Annahme über ein stationäres Lichtfeld zugrunde legt (feste Position der Lichtquelle), von welcher auf die Bewegung von Körpern geschlossen werden kann. Taya und Miura gehen noch einen Schritt weiter und vermuten, dass Schlagschatten die wahrgenommene Bewegungstrajek-

torie von Objekten beeinflussen [Taya und Miura, 2010]. Dazu zeigten Taya und Miura Probanden drei unterschiedliche „Ball-in-a-box“-Simulationen in denen sich der Ball entweder ohne Schlagschatten, mit Schlagschatten bei fester Lichtquellenposition oder mit Schlagschatten bei veränderlicher Lichtquellenposition bewegte. Die Autoren kommen zu der Erkenntnis, dass Schlagschatten vom visuellen System benutzt werden, um die zukünftige Position eines, sich bewegenden, Objektes vorherzusagen [Taya und Miura, 2010]. Gestützt werden die Ergebnisse von Taya und Miura durch Untersuchungen von Katsuyama et al. Katsuyama et al. zeigten, in einem fMRI-Scanner liegenden Probanden, die „Ball-in-a-box“-Simulation. Die Studie ergab, dass dabei Hirnareale aktiviert wurden, die mit der Vorhersage von Bewegungsbahnen assoziiert sind. Darüber hinaus wurden die fMRI-Messdaten separat nach den folgenden drei Schritten der Informationsverarbeitung analysiert:

- Separation der Schattenregion vom Hintergrund (Erkennung des Schlagschattens)
- Verknüpfung von Schlagschatten mit dem Schatten werfenden Objekt („shadow correspondence problem“)
- Ableitung des räumlichen Layouts aus diesen Beziehungen

Die Analyse dieser Daten ergab, dass die wahrgenommene Balltrajektorie durch Schlagschatten stabilisiert wird und die Position des Balls im räumlichen Layout in der Schattenbedingung präziser bestimmt werden konnte. Demnach stellen Schlagschatten in dynamischen Szenen starke Tiefenreize dar [Katsuyama et al., 2011]. In einer Übersichtsarbeit zu diesem Thema fassen Mamassian et al. zusammen, dass die Tiefenreize statischer Schatten die Grundlage für die Bewegungswahrnehmung durch Schlagschatten darstellen [Mamassian et al., 1998]. Im Grunde handelt es bei der Bewegungswahrnehmung durch Schlagschatten um eine Erweiterung der statischen Betrachtungsweise.

Visuelle Suche:

Neben den bisher benannten „prominenten“ Einflüssen von Lichtrichtung und Schattigkeit auf die visuelle Wahrnehmung existieren eine Reihe von Schattenwirkungen, die bislang wenig untersucht sind. Dazu zählt beispielsweise deren Einfluss auf die visuelle Suche. Experimente von Porter et al. oder Rensik et al. zeigen, dass Schlagschatten die Genauigkeit bzw. Trefferquote beim Aussortieren von Fremdkörpern aus einer Vielzahl ähnlicher Elemente verbessern können. Bei Rensik et al. zeigte sich dabei allerdings in der Regel eine Abnahme der Suchgeschwindigkeit beim Vorhandensein von Schlagschatten [Rensink und Cavanagh, 2004]. Rensik et al. vermuten, dass ein früher visueller Mechanismus Schlagschatten erkennt, um sie für den Prozess der visuellen Suche auszuschließen. Nach Rensik et al. können dadurch Leuchtdichteunterschiede bei der Objekterkennung unberücksichtigt bleiben. Im Gegensatz dazu führen Porter et al. die reduzierte Suchgeschwindigkeit darauf zurück, dass das visuelle System probiert, zwischen Schlagschatten und Materialänderungen zu unterscheiden [Porter et al., 2010]. Wobei dieser Unterscheidungsprozess eine größere Verarbeitungskapazität benötigen soll, welche sich in der Suchgeschwindigkeit widerspiegelt. Weiterhin konnten Porter et al. zeigen, dass die Verlangsamung der visuellen Suche in der Schattenbedingung mit einer größeren Anzahl von Augenbewegungen einhergeht. Diese Veränderungen sollen auf eine Anpassung der Suchstrategie hindeuten und mit einem entscheidungsbasierten Verarbeitungsprozess im Zusammenhang stehen [Porter et al., 2010].

Raumwirkung:

Eine weitere wichtige aber wenig untersuchte Rolle von Lichtrichtung und Schattigkeit kommt der Raumwirkung zu [Loe et al., 1994]. In den 1970ern machten Flynn et al. erstmals Untersuchungen zur

Raumwirkung bei verschiedenen Beleuchtungssituationen. In diesen Untersuchungen bewerteten Versuchspersonen die Raumwirkung anhand von Fragebögen. Eine anschließende Faktorenanalyse ergab, dass die Versuchspersonen Räume bevorzugten, die „interessant“ und „hell“ wirkten. Dabei waren interessante Lichtszenen durch einen gewissen Grad an Ungleichmäßigkeit und Bereiche von Licht und Schatten gekennzeichnet [Flynn et al., 1979].

Farbwahrnehmung:

In einer neueren Untersuchung wird davon ausgegangen, dass Lichtrichtung und Schattigkeit auch mit der Farbwahrnehmung im Zusammenhang stehen können [Winkler et al., 2015]. Wie in den Studien zur Bewegungs- und Formwahrnehmung vermuten Winkler et al., dass das visuelle System für die Farbwahrnehmung Annahmen über die Beleuchtung trifft. Diese Annahmen betreffen die Gerichtetheit des Lichts sowie deren Lichtfarbe. Winkler et al. erläutern, dass gerichtetes Licht aus evolutionärer Perspektive eher eine gelbliche, warmweiße Lichtfarbe aufweist, wohingegen diffuses Licht eher mit bläulichem, kaltweißem Licht in Verbindung gebracht wird. Winkler et al. erläutern weiter, dass das visuelle System diesen „bläulichen“ oder „gelblichen“ Farbeindruck der Beleuchtung bei der Farbwahrnehmung herausrechnet, also eine Farbkorrektur vornimmt.

Selbsterkennung:

Im letzten Abschnitt dieses Kapitels soll eine Analogie zwischen Schlagschatten und Spiegeln hergestellt werden. Ähnlich wie Spiegel können Schlagschatten zur Selbsterkennung beitragen [Cameron und Gallup Jr, 1988]. Untersuchungen dazu führten Cameron und Gallup an Säuglingen durch. Zwar machen Cameron und Gallup darauf aufmerksam, dass Spiegelbilder eine größere Informa-

tionsvielfalt beinhalten (z. B. Farbe und Detailreichtum), aber im Vergleich zu Schlagschatten ähnliche Selbsterkennungseffekte hervorrufen. Möglicherweise bildet die Spiegelanalogie eine Verbindung zu den Versuchsergebnissen von Sartori und Castiello, auf welche im Abschnitt 2.4.3 zum Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf die visuell-motorische Leistung eingegangen wird. Sartori und Castiello zeigten, dass Schlagschatten der eigenen Gliedmaßen Spiegelneurone aktivieren können und Schlagschatten damit als Repräsentationen des eigenen Körpers anerkannt werden [Sartori und Castiello, 2013].

2.2 Lichtrichtung und Schattigkeit in Normung und Regelsetzung

Im nachfolgenden Abschnitt wird dargestellt, wie das Gütemerkmal Lichtrichtung und Schattigkeit in Normung und Regelsetzung behandelt wird. Zunächst wird aufgezeigt, welche Wirkungen Eingang in das Regel- und Normenwerk gefunden haben. Anschließend wird auf die Gestaltungsempfehlungen sowie die Messmöglichkeiten eingegangen.

Im Allgemeinen diskutiert das Normen- und Regelwerk die folgenden Einflüsse von Lichtrichtung und Schattigkeit:

- Körperwiedergabe und Modelling
- Sehleistungsminderung durch Überdeckung von Bereichen der Sehaufgabe mit Schlagschatten (z. B. Verdeckung von Gefahrenbereichen)
- Lichtdruck durch stark gerichtetes Licht
- perzeptuelle Konfusion (Überholende Schatten in Pflegeeinrichtungen, Mehrfachschatten)
- Raumwirkung

Aus Perspektive staatlicher Vorschriften und Regelungen thematisiert lediglich die ASR A3.4 das Gütemerkmal Lichtrichtung und Schattigkeit. Darin werden die Wirkungen Körperwiedergabe und Sehleistungsminderung durch Abschattung von Gefahrenbereichen benannt: „Schatten ermöglicht die räumliche Wahrnehmung. Durch angemessene Schattigkeit können Gegenstände in ihrer Form und Oberflächenstruktur leichter erkannt werden. Schatten, die Gefahrenquellen überdecken, dürfen nicht zu Unfallgefahren führen“ [ASR A3.4, 2011] (S. 9).

Im Bereich der Normung wird das Gütemerkmal häufiger und detaillierter in Betracht gezogen. Im Vordergrund steht dabei das Modelling sowie die Körperwiedergabe. Die ausführlichsten Beschreibungen zum Modelling sind in der Normenreihe DIN EN 12464 zu finden. In DIN EN 12464-1 heißt es: „Das allgemeine Erscheinungsbild eines Innenraumes verbessert sich, wenn seine baulichen Merkmale, die Menschen sowie die Gegenstände darin so beleuchtet werden, dass Form und Struktur deutlich und gefällig gezeigt werden“ [DIN EN 12464-1, 2011] (S. 16). In Ergänzung macht DIN EN 12464-2 darauf aufmerksam, dass Lichtrichtung und Schattigkeit „ein wesentliches Merkmal der Beleuchtungsqualität für praktisch alle Anwendungen“ [DIN EN 12464-2, 2014] (S. 12) ist. Auch bei den ergonomischen Anforderungen an Bildschirmarbeitsplätzen wird Wert auf ein gutes Modelling gelegt [DIN EN ISO 9241-6, 2001]: „Um Gesichter, Objekte und Oberflächenstrukturen leichter erkennbar zu machen, sollte die Beleuchtung einen angemessenen Modellierungseffekt erzielen, wozu ein bestimmter Anteil an gerichtetem Licht erforderlich ist“ (S. 22).

Ähnlich wie im staatlichen Regelwerk findet sich auch im Normenwerk der Hinweis darauf, dass die Sehleistung durch Abschattung von Bereichen der Sehaufgabe herabgesetzt werden kann. Dies kann mit einem erhöhten Unfallrisiko verbunden sein. In DIN EN ISO 12100 zur Sicherheit von Maschinen heißt es dazu „Flackern, Blenden, Schattenbildung und Stroboskopeffekte müssen vermieden werden, falls sie ein Risiko herbeiführen können“ [DIN EN ISO 12100, 2011] (S. 34). Insbesondere bei der maschinenintegrierten Beleuchtung muss darauf geachtet werden, dass „störende Schatten auf der Sehaufgabe vermieden werden“ [DIN EN 1837, 2009](S. 3). DIN 5035-3 behandelt Beleuchtungsbedingungen im Gesundheitswesen [DIN 5035-3, 2006]. In DIN 5035-3 heißt es: „Deckenleuchten für die Operations-Umfeldbeleuchtung sollten möglichst nahe rings um den Operationstisch angeordnet werden, um die Blendung zu reduzieren und die Abschattung des Operationsfeldes durch das Operations-Team gering zu halten“.

Neben dem Risiko der Sehleistungsminderung wird in DIN EN 12464-2 darauf hingewiesen, dass je nach Arbeitsaufgabe und Anwendungskontext, Schlagschatten einer bestimmten Lichtrichtung auch zur Verbesserung der Sehleistung führen können: „Beleuchtung aus einer bestimmten Richtung kann Einzelheiten innerhalb einer Sehaufgabe zum Vorschein bringen, ihre Sichtbarkeit erhöhen und die Durchführung der Aufgabe erleichtern“ [DIN EN 12464-2, 2014] (S. 12). Auch bei der maschinenintegrierten Beleuchtung [DIN EN 1837, 2009] wird darauf hingewiesen, dass die Lichtrichtung „eine der Sehaufgaben entsprechende Formerfassung ermöglichen“ muss (S. 3)

Bemerkenswert ist, dass sich im Normenwerk Hinweise auf Schattenwirkungen finden lassen, für welche die perzeptuellen Mechanismen bislang noch unbekannt sind. Dazu zählt beispielsweise die Wahrnehmung von

„Lichtdruck“. In DIN 5035-7 wird erklärt: „Der Einsatz von Leuchten mit tief strahlender Lichtstärkeverteilung bzw. von unten offenen Leuchten mit direktem Blick auf Lampen und/oder deren Spiegelbilder führen zu Reflexblendung auf den Arbeitsmitteln, zu starker und harter Schattenbildung, unausgewogenem Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Beleuchtungsstärke, zu hohen Beleuchtungsstärken auf Augenbrauen, Nase und Wangen (Lichtdruck), Problemen bei Brillenträgern“ [DIN 5035-7, 2004] (S. 25). Weitere Beispiele für, durch Lichtrichtung und Schattigkeit verursachte, Wahrnehmungsbeschwerden betreffen das Auftreten von Mehrfachschatten [DIN EN 12464-1, 2011]: „Mehrfachschatten, die durch gerichtetes Licht aus mehr als einer Position erzeugt werden, sollten vermieden werden, da sie zu verwirrenden visuellen Effekten führen können“ (S. 16).

In DIN SPEC 67600 wird dafür sensibilisiert, dass bei Personengruppen mit Wahrnehmungsbeeinträchtigungen (z. B. Demenzpatienten) Schlagschatten perzeptuelle Konfusion hervorrufen können: „Für Patienten mit Demenz muss bei direkt strahlenden Leuchten darauf geachtet werden, dass sehr dominante und sogenannte überholende Schatten Ängste hervorrufen und die Bewegung einschränken können“ [DIN SPEC 67600, 2013] (S. 31).

Nicht zuletzt behandelt DIN 5035-7 den Einfluss des Gütemerkmals auf die Raumwirkung. Hierbei wird deutlich, dass stark diffuse Beleuchtung zu visueller Monotonie beitragen kann „Bei Indirektbeleuchtung entsteht im Allgemeinen eine diffuse und schattenarme Lichtatmosphäre, die zu einem monotonen Raumeindruck führen kann, aufgrund zu hoher Deckenleuchtdichte ein ungünstiges Verhältnis zwischen der Leuchtdichte von Arbeitsgut sowie Arbeitsmitteln und der Leuchtdichte der Raumdecke“ [DIN 5035-7, 2004] (S. 25).

Hinsichtlich der Gestaltungsempfehlungen für Lichtrichtung und Schattigkeit wird deutlich, dass sich diese im Allgemeinen nicht nach der Arbeitsaufgabe richten, sondern globale Empfehlungen darstellen, welche unabhängig von der Tätigkeit zu sein scheinen. In den unterschiedlichen Normen herrscht Konsens darüber, dass harte Schatten vermieden werden sollen und eine Ausgewogenheit von gerichtetem und diffusem Licht von Vorteil ist [DIN EN 12464-1, 2011][DIN EN ISO 9241-6, 2001]. Ergänzend wird in DIN EN 12464-2 festgestellt, dass Licht einer dominanten Richtung vorteilhaft für das Modelling sein kann: „Dies wird erreicht, wenn das Licht hauptsächlich aus einer Richtung kommt; dann bilden sich die eindeutigen Schatten, die für ein gutes Modelling so wichtig sind“ [DIN EN 12464-2, 2014] (S. 12). Es kann festgehalten werden, dass im Normen- und Regelwerk nur sehr wenige qualitative Empfehlungen für die Gestaltung von Lichtrichtung und Schattigkeit enthalten sind.

Auch in Bezug auf die Messbarkeit des Gütemerkmals wird deutlich, dass bisher keine präzise Messmethode existiert, lediglich das Verhältnis von zylindrischer und horizontaler Beleuchtungsstärke wird als Indikator angeführt. DIN EN 12464-1 empfiehlt einen Wert zwischen 0,30 und 0,60 für das Modelling [DIN EN 12464-1, 2011].

2.3 Stand der Technik

Im Vergleich zu historischen Beleuchtungsvorschriften ist die Bedeutung von Lichtrichtung und Schattigkeit mit ihrer Rolle für die Wahrnehmung des Menschen im aktuellen Normen- und Regelwerk verloren gegangen. Norden weist auf die Leitsätze der Deutschen Beleuchtungstechnischen Gesellschaft (Vorläufer der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft, LiTG) hin, in denen konkrete Vorschriften für Lichtrichtung

und Schattigkeit enthalten waren [Norden, 1933]. Er führt Beispiele auf, in denen der Übergang von einer „vollständig beleuchteten zu dem beschatteten Teil einer Fläche nicht plötzlich, sondern allmählich oder stufenweise“ (S. 49) erfolgen sollte. In Bezug auf die Lichtrichtung verweist Norden auf eine Vorschrift, in der „der Lichteinfall so steil wie möglich sein soll“ (S. 65), damit bei einseitigem Lichteinfall störende Schattenbildungen vermindert werden können.

Derzeitige Normen und Regeln unterschätzen die Bedeutung der Schattigkeit und ihre Rolle für die Wahrnehmung des Menschen. Die Rolle dieses Gütemerkmals wird in Normen und Regeln auf die Körperwiedergabe, das Modelling und die Verdeckung von Gefahrenbereichen durch Schlagschatten reduziert.

Eine mögliche Begründung dafür gibt Haeger, indem er sich auf die Untersuchungen von Hoffmann und Kardos bezieht: „Der Schatten drängt sich als Sehgestalt nicht ohne Weiteres auf. Er fordert ein direkt auf ihn gerichtetes Betrachten gewöhnlich nicht heraus“ [Haeger, 1975] (S. 9). Ähnlich verhält es sich mit der Lichtrichtung. Obwohl der Mensch in der Lage ist, die Lichtrichtung in Beleuchtungsszenarien festzustellen, sind sich Beobachter nur nachrangig über die Lichtrichtung bewusst [Koenderink et al., 2007]. Van Doorn et al. weisen darauf hin, dass Lichtrichtung bzw. Lichtfelder nur selten in verbalen Beschreibungen erwähnt werden [van Doorn et al., 2011a]. Eine weitere Begründung für die untergeordnete Rolle der Schattigkeit könnte der langjährige Einsatz von Leuchtstoffröhren sein. Schober beschreibt: „Die Leuchtstofflampen sind nicht, wie alle bisher benannten natürlichen und künstlichen Lichtquellen, punktförmig oder großflächig, sondern linienhaft ausgedehnt.“ [Schober, 1960] (S. 187). In der Folge bilden Leuchtstoffröhren längliche weniger auffällige Schatten aus. Sie erzeugen eine eher indirekte und schattenarme Beleuchtung.

Eine weitere Auffälligkeit des aktuellen Normen- und Regelwerks betrifft die Anforderungen an Lichtrichtung und Schattigkeit. Diese sind weitestgehend in qualitativer Form formuliert. Liedtke macht darauf aufmerksam, dass Kennzahlen zur Quantifizierung dieses Gütemerkmals bisher noch fehlen [Liedtke, 2011]. In der wissenschaftlichen Literatur existieren eine Reihe von Beschreibungsansätzen, von denen lediglich das Verhältnis von zylindrischer zu horizontaler Beleuchtungsstärke, als vereinfachtes Maß für das Modelling, Eingang in die praktische Lichtanwendung gefunden hat. Diese vereinfachte Sichtweise auf das Gütemerkmal kann je nach Anwendungsfall mit Problemen behaftet sein. Schon 1930 machte Arndt darauf aufmerksam, dass die Beleuchtung im Allgemeinen als Flächenproblem behandelt wird, aber „zweifelloso ein Raumproblem“ sei [Arndt, 1930b] (S. 537). Auch heute sind die Bewertungskriterien der Beleuchtung nicht in der Lage, die Lichtrichtung und Schattigkeit angemessen zu beschreiben. Eine Zusammenstellung verschiedener Beschreibungsansätze für Lichtrichtung und Schattigkeit ist in Abbildung 2.1 zusammengestellt. Zur Verdeutlichung der Komplexität des Problems soll kurz auf die bedeutendsten Beschreibungsansätze eingegangen werden.

In den 1920ern haben sich Gershun [Gershun, 1936], Arndt [Arndt, 1930a] und Lingenfelder [Lingenfelder, 1928] mit der Beschreibung von Lichtrichtung und Schattigkeit beschäftigt. Helwig beschreibt die Lichtfeldtheorie nach Gershun als „Analogie zur Theorie des elektrischen Feldes“ [Helwig, 1950] (S. 14), in der die Gesamtheit von Werten einer physikalischen Größe ein Feldbild darstellen. Die einzelnen Feldlinien sind dabei räumliche Kurven, die die verschiedenen Lichtrichtungen an einem betrachteten Punkt angeben. Lingenfelder verwendet diesen Ansatz zur Einführung eines „Beleuchtungsverteilungskörpers“, bei dem von einem Punkt aus

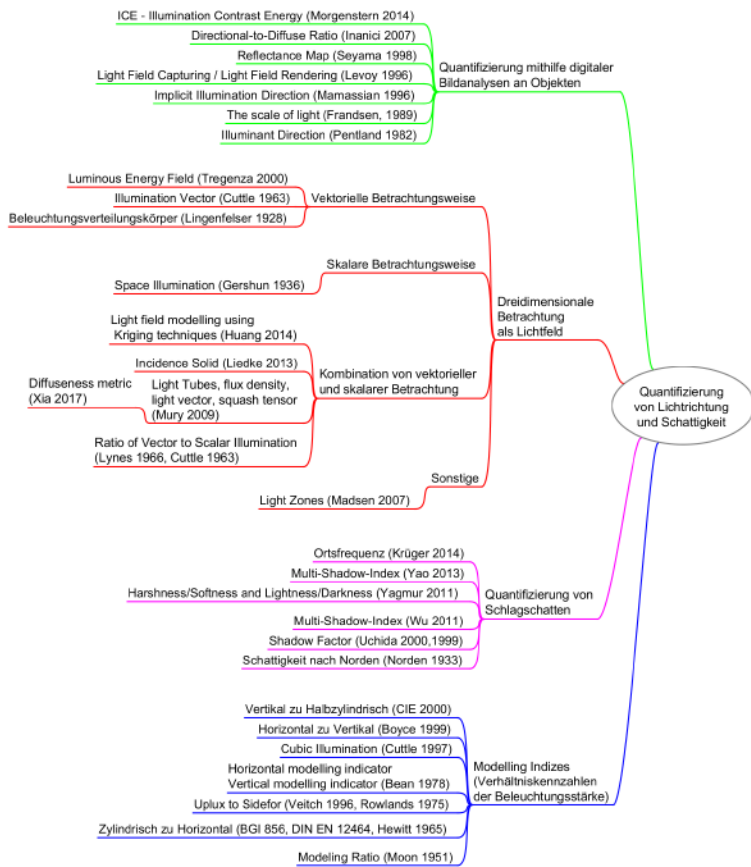


Abbildung 2.1: Bewertungsmethoden für Lichtrichtung und Schattigkeit

in jeder Richtung eine Strecke mit dem zugehörigen Beleuchtungsstärkewert aufgetragen wird (Beschreibung nach Hellwig, 1950). Bei der von Arndt eingeführten Raumhelligkeit [Arndt, 1928] werden die Beleuchtungsstärken für alle Einstrahlrichtungen in einem Punkt zu einer mittleren Beleuchtungsstärke zusammenfasst (sphärische Beleuchtungsstärke). Vergleichbar mit einem in einer opalen Glaskugel befindlichen Beleuchtungsstärkemesser wird das einfallende Licht bei der Raumhelligkeit über den gesamten Raumwinkel integriert. Im Vergleich zum Beleuchtungsverteilungskörper macht dieser Wert allerdings keine Aussage zur Lichtrichtung, er beschreibt lediglich die Summe aller Beleuchtungsstärken im betrachteten Punkt. Während es sich bei dem Beleuchtungsstärkeverteilungskörper nach Lingenfelter um eine vektorielle, richtungsabhängige Beschreibung handelt, ist die Raumhelligkeit nach Arndt eine skalare Größe. Hellwig fasst beide Ansätze zu einem „Maß für die Schattigkeit“ zusammen.

Trotz intensiver Überlegungen über die Beschreibung von Lichtfeldern hat sich in der Forschung sowie in der praktischen Lichtanwendung keine der betrachteten Sichtweisen durchgesetzt, auch in wissenschaftlichen Studien zur Lichtrichtung und Schattigkeit kommen in der Regel vereinfachte Kennzahlen wie das Verhältnis von zylindrischer zu horizontaler Beleuchtungsstärke zum Einsatz. Ein weiteres Problem betrifft die Vereinbarkeit der physikalischen Beschreibung mit der einfachen Messbarkeit. Für den kommerziellen Einsatz sind praktisch keine Messgeräte für dieses Gütemerkmal verfügbar, lediglich in einigen wenigen Forschungseinrichtungen sind Spezialgeräte vorhanden (z. B. Cubic Illumination Meter [Cuttle, 1997], Plenopter [Mury et al., 2009], Messgerät zur Bestimmung der Raumhelligkeit [Arndt, 1928], Schattenmesser mit Normalschattenwerfer [Norden, 1933], Messgerät zur Bestimmung des Beleuchtungsstärkevektors [Cuttle et al., 1963], Light Field Camera [Levoy und Hanrahan, 1996]).

Auf nähere Analysen und Gegenüberstellungen der unterschiedlichen Beschreibungsansätze soll in dieser Arbeit verzichtet werden. Betrachtungen zur Vereinbarkeit verschiedener Ansätze sowie den Vor-/Nachteilen und Messbarkeit sind in den Arbeiten von Liedtke zu finden (z. B. [Liedtke et al., 2013]). Für den interessierten Leser wurden die aktuell existierenden Beschreibungsansätze mit ihren entsprechenden Literaturangaben in Abbildung 2.1 zusammengefasst. Die Ansätze wurden anhand der nachfolgenden Struktur kategorisiert:

- Modelling Indizes: [Moon und Spencer, 1951], [BGI 856, 2008], [DIN EN 12464-1, 2011], [Hewitt et al., 1965], [Veitch et al., 1996], [Rowlands und Loe, 1975], [Bean, 1978], [Cuttle, 1997], [Boyce et al., 1999], [CIE 140-2000, 2000]
- Quantifizierung von Schlagschatten: [Norden, 1933], [Uchida und Ohtani, 1999], [Uchida und Ohtani, 2000], [Wu et al., 2011], [Yagmur und Öztürk, 2011], [Yao et al., 2013], [Krüger et al., 2014]
- Quantifizierung von Lichtrichtung und Schattigkeit mithilfe digitaler Bildanalysen an Objekten: [Morgenstern et al., 2014], [Inanici, 2007], [Seyama und Sato, 1998], [Levoy und Hanrahan, 1996], [Mamassian und Kersten, 1996], [Frandsen, 1987], [Pentland, 1982]
- Dreidimensionale Betrachtung als Lichtfeld:
 - Vektorielle Betrachtungsweise: [Tregenza, 2000], [Cuttle et al., 1963], [Lingenfelter, 1928]
 - Skalare Betrachtungsweise: [Gershun, 1936]

- Kombination von vektorieller und skalarer Betrachtung:
[Huang und Sanderson, 2014], [Liedtke et al., 2013],
[Xia et al., 2017b], [Xia et al., 2017a], [Mury et al., 2009],
[Lynes et al., 1966], [Cuttle et al., 1963]
- Sonstige: [Madsen, 2007]

Zum Ende dieses Abschnitts soll mit Blick auf den Praxisteil dafür sensibilisiert werden, dass im Normen- und Regelwerk sowie in der praktischen Lichtenwendung kaum Verbindungen zum visuellen Diskomfort hergestellt werden und sich wenige Hinweise darauf finden lassen, dass Lichtrichtung und Schattigkeit Quelle visueller Ermüdung sein können. Mögliche Verbindungen zum visuellen Diskomfort sollen im nächsten Abschnitt dargestellt werden.

2.4 Betrachtung von Lichtrichtung und Schattigkeit unter dem Paradigma des visuellen Diskomforts

2.4.1 Visueller Diskomfort

Eingangs soll darauf aufmerksam gemacht werden, dass die Vermeidung von visuellem Diskomfort als eine wesentliche Aufgabe des Arbeitsschutzes angesehen werden sollte. Oft wird von Arbeitsschützern die Meinung vertreten, dass Aspekte des Komforts über die Schutzziele des Arbeitsschutzes hinaus gehen und die Vermeidung von visuellem Diskomfort damit keine vorrangige Aufgabe des Arbeitsschutzes sei. Dieser Ansichtweise liegt die falsche Vorstellung zugrunde, dass visueller Komfort die reine Abwesenheit von visuellem Diskomfort darstellt und die Vermeidung von visuellem Diskomfort dem visuellen Komfort und Wohlbefinden gleichgesetzt werden kann. In Hinblick auf den Arbeitsschutz, ist es von besonderer Bedeutung visuellen Komfort und visuellen Diskomfort separat zu betrachten und diese nicht als

Kontinuum anzusehen. Boyce verdeutlicht den Unterschied zwischen Komfort und Diskomfort an dem Beispiel eines ergonomischen Autositzes [Boyce, 2003]. Dabei wird der Diskomfort an Gefühlen, wie Schmerzen oder Taubheit festgemacht, wohingegen der Komfort mit Wohlbefinden und Ästhetik zusammenhängt.

Zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten verdeutlichen, dass es sich beim visuellen Diskomfort bzw. der visuellen Ermüdung um einen schwer zu fassenden Untersuchungsgegenstand handelt. Hopkinson und Collins beschreiben, dass der gesamte visuelle Prozess betrachtet werden muss, um die Ursachen visueller Ermüdung verstehen und eingrenzen zu können [Hopkinson und Collins, 1970]. Dieser visuelle Prozess umfasst vielfältige Zwischenstufen, die sich in ihren Wirkungsmechanismen gänzlich unterscheiden. Nach Hopkinson und Collins gehört zu diesen Zwischenstufen beispielsweise die Ausrichtung der relevanten Details der Sehaufgabe in den Bereich der größten Rezeptordichte auf der Netzhaut. Möglicherweise sind hierzu die Bewegung von Kopf und Auge notwendig, was wiederum die dafür verantwortliche Muskulatur des Auges bzw. des Nackens ins Spiel bringt. Darüber hinaus muss der Zillarmuskel, zur Fokussierung und Krümmung der Augenlinse, in Gang gesetzt werden und die Irismuskulatur die Pupille kontrahieren. Nicht zuletzt erfolgt die Weiterleitung in verschiedene Hirnareale und die Signalverarbeitung. Ferguson et al. erläutern weiter, dass die visuelle Kapazität auch von der Aufmerksamkeit und der allgemeinen Gesundheit abhängen [Ferguson et al., 1974].

Aus psychologischer Perspektive kann das Auftreten von visuellem Diskomfort von der persönlichen Einstellung, den Erwartungen oder dem Kontext einer Beleuchtungssituation beeinflusst werden (z.B. Negativattribution) [Schierz, 2002]. Hierbei können sich positive

oder negative Einstellungen gegenüber der Beleuchtung auf subjektive und objektive Maße des Wohlbefindens oder der Leistung auswirken.

Erschwerend kommt hinzu, dass individuelle Faktoren wie Alter oder Sehfehler eine visuelle Ermüdung begünstigen können [Schierz, 2003]. Bedwell betont, dass Kurzsichtigkeit, Weitsichtigkeit, Hornhautverkrümmung, Alterssichtigkeit oder Probleme beim Stereosehen Risikofaktoren für die visuelle Ermüdung darstellen [Bedwell, 1972]. Bedwell beschreibt, dass die Bilder auf der linken und rechten Netzhaut zunächst auf korrespondierende Netzhautbereiche abgebildet sein müssen, weiterhin sollten diese dieselbe Schärfe aufweisen (gleicher Akkommodationszustand und Öffnung der Pupillenweite). Sollten diese Bedingungen nicht gleichzeitig erfüllt sein, kann es zu binokularer Konfusion kommen und das dominante Auge könnte stärker beansprucht werden, was mit stärkerer visueller Ermüdung einhergehen kann [Bedwell, 1972].

Aus den Beschreibungen wird deutlich, dass die Ursachen der visuellen Ermüdung auf verschiedensten Ebenen (z. B. Physiologie, Rezeption, Perzeption) liegen können. Demnach kann sich die Definition der visuellen Ermüdung nicht auf Augenbewegungen, Fixierungen und Fokussierungen beschränken sondern muss wahrnehmungsseitig die perzeptuelle Ermüdung einschließen [Ferguson et al., 1974]. Auch Schierz et al. machen darauf aufmerksam, dass es schwierig sei, visuelle Ermüdung von allgemeiner, zentralnervöser Ermüdung zu trennen. Darüber hinaus wird auf die Rolle der Motivation und die Bereitschaft zur Anstrengung hingewiesen [Schierz et al., 2011]. Ebenso erläutern Carmichael und Dearborn, dass zwischen dem subjektiven Gefühl der Ermüdung (erlebte Anstrengung) und dem effektiven Fortgang der Arbeit (Arbeitsleistung) getrennt werden

muss [Carmichael und Dearborn, 1947]. Carmichael und Dearborn verdeutlichen diesen Umstand am Beispiel von „ergographischen Kurven“, welche beim kontinuierlichen Heben von Lasten über eine definierte Distanz, mit einer bestimmten Frequenz und einer bestimmten Wiederholungsanzahl ermittelt wurden. Die Kurven zeigen eine harmonische Schwingung, in welcher sich nach einer gewissen Zeit ein Leistungsabfall in Form einer Dämpfung einstellt. Dieser Leistungsabfall wurde als Ermüdung oder „work decrement“ interpretiert. Carmichael und Dearborn betonen, dass bei dieser Sichtweise die Motivation des Beschäftigten unberücksichtigt bleibt und die Ermüdung aus psychologischer und physiologischer Perspektive gleichzeitig betrachtet werden muss. Die Untersuchungen zeigen außerdem, dass sich nach einer kurzen Arbeitsperiode keine Effekte der subjektiv erlebten Anstrengung abzeichnen und diese erst nach längerer Zeit deutlich werden. Die Erläuterungen demonstrieren, dass bei der Erfassung von Ermüdungseffekten zwischen physiologischen Parametern, psychologischen Parametern und Arbeitsleistung unterschieden werden sollte. Relativierend fügen Carmichael und Dearborn hinzu, dass es trotz einer Erfassung biochemischer Parameter und verbaler Äußerungen schwierig sein kann, eine Korrelation zwischen diesen herzustellen und die ursächlichen physiologischen Mechanismen oft unerfasst bleiben.

Aus den Analogiebetrachtungen zur visuellen Arbeit und physischen Arbeit wird deutlich, dass der „allgemeine Ermüdungsbegriff“ die Grundlage für eine Definition der visuellen Ermüdung darstellt. Eine Definition der visuellen Ermüdung müsste demnach, ähnlich wie die Definition nach Bills [Bills, 1937], folgende Elemente enthalten:

- Subjektivität (Gefühle der Erschöpfung, Einstellung gegenüber der Aufgabe)

- Organisch und physiologische Veränderungen
- Veränderungen in Qualität und Quantität der Arbeitsleistung

Eine Zusammenstellung verschiedener Definitionen zur „allgemeinen Ermüdung“ ist in Carmichael und Dearborn [Carmichael und Dearborn, 1947] und Ferguson et al. [Ferguson et al., 1974] zu finden. An dieser Stelle soll jedoch zum Spezialfall der visuellen Ermüdung bzw. zum visuellen Diskomfort übergeleitet werden.

In der Literatur lassen sich unterschiedliche Begrifflichkeiten für die visuelle Ermüdung finden, dazu gehören eye strain, visual fatigue, visual discomfort, visual stress oder asthenopic complaints. Hopkinson und Collins weisen darauf hin, dass hinsichtlich der visuellen Ermüdung Uneinigkeit besteht: „there is no common agreement that ‘visual fatigue’ really exists, or, if it does exist, that it can be measured by any objective means“ [Hopkinson und Collins, 1970] (S. 129). Bei der Analyse der Definitionen sowie der Gegenüberstellung der benannten Begriffe konnte kein konsistentes Muster für deren Handhabung erkannt werden. Daher sollen die Bezeichnungen visuelle Ermüdung und visueller Diskomfort in dieser Arbeit als gleichbedeutend angesehen werden.

In Hinblick auf die Messung und Erfassung visueller Ermüdung verweisen Hopkinson und Collins auf zwei unterschiedliche Methoden zur Quantifizierung. Historisch gesehen wurden einerseits rein visuelle Funktionen betrachtet, andererseits wurden physiologische Funktionen (also messbare Funktionen des Auges oder eines anderen Organs) herangezogen [Hopkinson und Collins, 1970]. Zu den visuellen Funktionen zählen Performance-Tests in denen die Quantität (z. B.

Fehleranzahl), Ausführungsgeschwindigkeit oder Variabilität erfasst werden. Dazu gehören beispielsweise Kontrastdiskrimination oder Flimmerverschmelzungsfrequenz. Wie am Beispiel der allgemeinen Ermüdung bereits erläutert wurde, besteht bei Performance-Tests das Problem, dass diese stark von der Motivation beeinflusst werden. Es wird festgestellt, dass bei mentalen Aktivitäten, oft kein Abfall der Performance beobachtet werden kann, obwohl der Proband Gefühle von Ermüdung empfindet. Boyce fügt hinzu, dass zusätzlich zur Motivation weitere Faktoren Einfluss auf die Performance haben können: „There can be no doubt that motivation can affect task performance and little doubt that lighting conditions can affect motivation, but so do many other factors. These other influences ensure that while lighting may sometimes affect performance by changing motivation, it is unlikely to have any effect that is consistent across individuals or even across time with the same individual, until extreme conditions are reached.“ [Boyce, 2003] (S. 186).

Zur zweiten Kategorie der physiologischen Funktionen gehören beispielsweise die Messung von Muskelaktionspotential und Spannung, Augenbewegungen, Akkommodationsbreite und Zeit [Hopkinson und Collins, 1970]. Zusammenfassend machen Hopkinson und Collins dennoch darauf aufmerksam, dass keine der aufgeführten Methoden die visuelle Ermüdung vollumfänglich abbilden kann.

Ein weiterer Ansatzpunkt zur Beschreibung visueller Ermüdung betrifft die Erfassung sehbedingter Beschwerden [Sheedy, 2007]. „Asthenopische Beschwerden sind Augenbeschwerden, die nach Erbringen hoher Sehleistungen auftreten. Gehen sie einher mit einer Störung des Sehvorgangs, spricht man auch von visueller Ermüdung“ [Schierz, 2003]

(S.16). Nach Weston können drei Symptome von visueller Ermüdung unterschieden werden [Weston, 1962]:

- Ocular (Augenreizung): Brennen, Tränen und Jucken der Augen
- Visual (Sehbeschwerden): Störung des scharfen Sehens, Doppelsehen, Unschärfe, Farbsäume
- General (zerebrale Beschwerden): Kopfschmerzen, Übelkeit, Schwindel, Verwirrung

2.4.2 Zusammenhänge zwischen dem Gütemerkmal Lichtrichtung und Schattigkeit und dem visuellem Diskomfort

Im folgenden Abschnitt soll nun auf die Ursachen von visuellem Diskomfort eingegangen werden. Das Augenmerk liegt dabei auf dem Gütemerkmal Lichtrichtung und Schattigkeit und wie dieses mit dem visuellen Diskomfort in Wechselwirkung treten kann. Es wird dargestellt, dass Lichtrichtung und Schattigkeit auch Quellen von visuellem Diskomfort sein können. Boyce benennt vier Ursachen, die das Auftreten von visuellem Diskomfort begünstigen können [Boyce, 2003]:

- Erschwerung der Sehaufgabe
- Ablenkung
- Reizüberflutung oder Reizarmut
- Perzeptuelle Konfusion

Boyce beschreibt, dass die Beleuchtungsbedingungen dem visuellen System ermöglichen sollen jene Informationen aus der visuellen Umgebung zu extrahieren, die für den Fortgang der Arbeit notwendig sind. Eine Erschwerung der Sehaufgabe kann beispielsweise dann auftreten,

wenn Schlagschatten Details der Sehaufgabe überdecken und deren Kontrast reduzieren, dies kann bei Schlagschatten auf Treppen der Fall sein. Weiterhin kann darüber spekuliert werden, dass das Fehlen von Tiefenreizen für die Form- und Tiefenwahrnehmung eine Erschwerung der Sehaufgabe darstellt.

Eine andere Quelle visuellen Diskomforts kann in einer Ablenkung von der eigentlichen Sehaufgabe begründet liegen. Ablenkung kann in dem Sinne verstanden werden, dass Objekte, die Aufmerksamkeit auf sich ziehen, bewusst ignoriert werden müssen [Boyce, 2003]. Diesbezüglich wird eine Verbindung zur Gleichmäßigkeit im Bereich der Sehaufgabe gesehen, welche durch Lichtrichtung und Schattigkeit beeinflusst sein kann. Beispielsweise könnte ein harter Schlagschatten neben der Sehaufgabe zu Ablenkung und perzeptueller Konfusion führen. Ein scharfer Leuchtdichteabfall an der Schattenkante könnte vom visuellen System als Materialänderung interpretiert werden und visuelle Verwirrung hervorrufen. Boyce verweist auf Studien in denen Gleichmäßigkeiten der Beleuchtungsstärke von größer als 0,7 auf einem Tisch von den meisten Personen als akzeptabel erachtet werden. Diese Studienergebnisse sollten auch bei Schattenkontrasten berücksichtigt werden.

Ein weiterer Zusammenhang zur Gleichmäßigkeit wird bei Blickwechseln zwischen beschatteten und unbeschatteten Bereichen der Sehaufgabe gesehen, welche eine ständige Umadaptation erfordern können.

Als dritten Punkt nennt Boyce die Reizüberflutung bzw. Reizarmut, in diesem Zusammenhang sei darauf aufmerksam gemacht, dass vollkommen diffuse Beleuchtung einen hohen Grad an Gleichmäßigkeit hervorruft und Reizarmut begünstigen kann. Sato et al. weisen darauf hin, dass monotone und triste Beleuchtung zu Stress führen kann

und die Aufmerksamkeit beeinflusst [Sato et al., 1989]. Weiterhin beschreibt Schober die störende Wirkung fehlender Schattenbildung am Beispiel eines Schalterraumes in einer Großbank, welcher mit einer vollkommen indirekten Beleuchtung ausgestattet war [Schober, 1953]. Schober erläutert, dass die Beschäftigten nur schwer im Stande waren, einzelne Münzen voneinander zu unterscheiden, weil der „Eindruck des Reliefs verlorenging“ (S. 492).

Als letzte Ursache von visuellem Diskomfort führt Boyce die perzeptuelle Konfusion an. Bezogen auf Schlagschatten können wahrgenommene Leuchtdichteveränderungen, die nicht mit den subjektiv vermuteten Reflexionseigenschaften einer Oberfläche übereinstimmen, zu perzeptueller Konfusion führen. Beispiele für einen solchen Umstand sind die Bildung von Mehrfachschatten. Aus anekdotischen Berichten ist bekannt, dass Mehrfachschatten „Geisterbilder“ und visuelle Ermüdung hervorrufen können [Wu et al., 2011], [Kuo et al., 2011]. Auch Schober berichtet von Sehstörungen bei Mehrfachschatten und beschreibt, dass die Erkennbarkeit von Körperformen durch Mehrfachschatten behindert sein kann [Schober, 1953].

Die vorausgegangenen Erläuterungen verdeutlichen, dass Lichtrichtung und Schattigkeit als Einflussvariablen für den visuellen Diskomfort angesehen werden können. Die Ergebnisse des Praxisteils verdeutlichen außerdem, dass Lichtrichtung und Schattigkeit Störwirkungen hervorrufen können, bei denen die visuelle Wahrnehmung beeinträchtigt wird, ohne sehbedingte Beschwerden oder Wahrnehmungsstörungen hervorzurufen. Die auftretende Störwirkung lässt sich von Veränderungen in der subjektiv erlebten Anstrengung ableiten, welche sich in Form einer Belastungs- oder Beanspruchungskompensation auf die Arbeitsleistung niederschlägt. Die Störwirkung kann daher als eine

psychische Arbeitsbelastung angesehen werden. Schierz erläutert, dass das Belastungs-Beanspruchungsprinzip für informatorische Umweltfaktoren zu kurz greift und dieses eher auf Ursache-Wirkungsbeziehungen wie der Schädigung durch UV-Strahlung anwendbar ist [Schierz, 2006] (S. 57). Nach Schierz sollte zur Erklärung psychischer Arbeitsbelastungen durch informatorische Umweltfaktoren (z. B. Beleuchtung) ein Regelkreis-Modell mit Rückkopplung zur Anwendung kommen. Solche Modelle sind aus der arbeitspsychologischen Handlungsregulation oder der Mensch-Maschine-Interaktion bekannt [Schierz, 2006].

Bezogen auf Lichttrichtung und Schattigkeit können ungünstige Beleuchtungsbedingungen das Ausführen von Arbeitshandlungen erschweren und damit zusätzlichen Aufwand hervorrufen oder zur Erreichung eines definierten Ziels vermehrte Anstrengung erfordern (ohne das dabei die Sehleistung beeinträchtigt wird). In Hinblick auf die Störwirkung wäre es denkbar, dass Schatten unter ungünstigen Bedingungen sogenannte „Regulationshindernisse“ darstellen, welche zusätzliche Zeit zur Umgehung erfordern. Obwohl kaum Studien bekannt sind, welche die Auswirkung der speziell durch Beleuchtungsbedingungen verursachten zusätzlich erforderlichen Anstrengung bzw. des zusätzlichen Aufwands auf die visuelle Wahrnehmung betrachten, ist ein entsprechendes Wirkungsgefüge denkbar.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit soll das Prinzip der Störwirkung nochmals an einem fiktiven Beispiel der Blendung (E-Mail Korrespondenz mit Ch. Schierz vom 19.11.2015) verdeutlicht werden:

Eine blendende Lichtquelle in der Umgebung kann als erschwerender bzw. störender Faktor wirken. Ein Beschäftigter könnte der Blendquelle mit seinen Augenbewegungen ausweichen, wenn er sich darüber bewusst ist, dass diese seine Helligkeitsadaptation stört. Durch diese Maß-

nahme bleibt die Sehleistung unbeeinträchtigt, jedoch wird dabei das nutzbare Blickfeld eingeschränkt. In der Folge kann sich dieser Umstand in einer subjektiven Störungsbewertung äußern.

Aus diesem Beispiel wird deutlich, dass die Situation mit Hilfe problembezogener Copingstrategien aktiv verändert werden kann, z. B. durch ein Ausweichen der blendenden Lichtquelle. In solchen Fällen muss die Lichtbedingung nicht zu Augenbeschwerden führen, aber die Bewältigung der Situation ist für den Beschäftigten mit zusätzlichem Aufwand bzw. zusätzlicher Anstrengung verbunden.

Vor dem Hintergrund der Definition der visuellen Ermüdung und den Überlegungen zur Störwirkung wurde die Entscheidung getroffen, den visuellen Diskomfort bzw. eventuell auftretende Störwirkungen bei den praktischen Untersuchungen dieser Arbeit auf drei unterschiedlichen Ebenen zu erfassen. Diese Ebenen betreffen zum einen die Erhebung subjektiver Empfindungen mithilfe einer Ratingskala zur subjektiv erlebten Anstrengung [Eilers et al., 1986], zum Zweiten die Erhebung eines objektiven Arbeitsleistungsparameters und zum Dritten die Erfassung von Wahrnehmungsstörungen und sehbedingten Beschwerden [Conlon et al., 1999]. Alle drei Faktoren werden in der zusammenfassenden Bewertung (Abschnitt 4.1) versuchsübergreifend in dem „Compensatory control model of performance regulation“ [Hockey, 1997] in ihrem Wirkungszusammenhang dargestellt.

2.4.3 Herleitung der Hypothesen

Störwirkung von Lichtrichtung und Schattigkeit bei der Formwahrnehmung

Anknüpfend an die dargestellten Zusammenhänge zwischen Schattigkeit und visuellem Diskomfort sollen im Rahmen der Hypothesenherlei-

tung weiterführende Verbindungen zum visuellen Diskomfort und der Störwirkung hergestellt werden.

Bei der Formwahrnehmung werden die dreidimensionalen Objektstrukturen in ein zweidimensionales Lichtmuster auf der Netzhaut transformiert [Gibson, 1979]. Diesem Retinabild müssen anschließend 3D-Informationen extrahiert werden, dazu stehen dem visuellen System eine Vielzahl von Informationsquellen zur Verfügung, dazu zählen:

- Schattierungen
- Schlagschatten
- Außenkontur
- Textur
- Oberflächeneigenschaften
- Objektbewegung
- Disparität vom Stereosehen
- Lichtrichtung und Art der Lichtquelle

Trotz dieser Vielzahl von Formreizen handelt es sich bei der Formwahrnehmung oft um eine unterbestimmte Wahrnehmungsaufgabe. Ursache dafür ist die Tatsache, dass die oben benannten Reize mehrdeutig sein können. Beispielsweise können unterschiedliche geometrische Strukturen dasselbe optische Muster erzeugen [Todd, 2004]. Khang et al. machen darauf aufmerksam, dass diese Unterbestimmtheit durch zusätzliche Hinweise wie Schlagschatten, Außenkonturen, Disparität vom Stereosehen, glänzende Highlights auf der Objekt Oberfläche oder durch Objekttextur aufgelöst werden können [Khang et al., 2007]. Stehen dem visuellen System jedoch keine dieser Informationen zur

Auflösung der Mehrdeutigkeiten zur Verfügung, so müssen Annahmen über unbestimmte Faktoren getroffen werden. In erster Linie betreffen diese Annahmen die Struktur des Lichtfeldes und die Eigenschaften der Lichtquelle, z. B. Intensität, Richtung, spektrale Zusammensetzung, Diffusität oder Anzahl der Lichtquellen. Untersuchungen von Kleffner und Ramachandran zeigen, dass folgende Annahmen vom visuellen System getroffen werden, sofern die zu bewertenden Objekte in der Szene keine eindeutigen Informationen über das Lichtfeld beinhalten [Kleffner und Ramachandran, 1992]:

- Eine einzelne Lichtquelle beleuchtet die gesamte Szene (single light source constraint).
- Das Licht scheint von oben (light from above constraint).
- Die Lichtquelle befindet sich an einer fixierten Position (keine Bewegung der Lichtquelle) [Mamassian et al., 1998].

Darüber hinaus kann das visuelle System bestimmte Homogenitätsannahmen hinsichtlich des Bewertungsobjektes treffen (z. B. gleichbleibende Reflexionseigenschaften über die gesamte Objektfläche).

In realen Beleuchtungsszenen werden diese Annahmen häufig verletzt. Insbesondere beim Einsatz von LED-Lichtquellen können durch die charakteristischen Eigenschaften wie der kleinen Quellengröße oder der starken Gerichtetheit des Lichts [Knoop, 2011] komplexe Lichtfelder entstehen. In der Praxis können die Anforderungen an die Beleuchtung häufig nicht durch Lampen mit einer einzelnen high-power-LED erfüllt werden, aus diesem Grund zeigt sich der Trend zum Einsatz von LED-Arrays in der LED-Entwicklung [Xue et al., 2016]. LED-Arrays

können dabei aus einer Vielzahl örtlich getrennter Lichtpunkte aufgebaut sein, welche gerichtetes Licht abgeben. Diese Lichtquellen erzeugen ein ungewöhnliches Lichtfeld, so entsteht durch die große leuchtende Fläche der Eindruck einer diffusen Lichtquelle, die sich jedoch aus vielen einzelnen gerichteten Lichtbündeln der einzelnen Lichtpunkte aufbaut und Mehrfachschatten verursachen kann. Betrachtet man zusätzlich das Sekundärlichtfeld, welches durch Interreflexionen am Objekt und mit der Umgebung entstehen, wird das Lichtfeld um ein vielfaches komplizierter. Für das visuelle System manifestiert sich die Komplexität des Lichtfeldes in erster Linie in Form von Schattierungen und Schlagschatten. Im nachfolgenden Abschnitt zum Thema „shape from shading“ wird erläutert, dass Schattierungen auf Objekten durch das Zusammenspiel von Oberflächengeometrie und Lichteinfallswinkel entstehen. Viele unterschiedliche Lichteinfallsrichtungen auf einem Bewertungsobjekt werden demzufolge zu einer komplexen Schattierung führen. Diesbezüglich kann spekuliert werden, dass durch LED-Arrays verursachte komplexe Schattierungen auf einem Bewertungsobjekt die Formwahrnehmung erschweren. Ein weiterer für die Formwahrnehmung wesentlicher Faktor ist der Schlagschatten eines Objektes, auch dieser wird durch die Komplexität des Lichtfeldes beeinflusst. Hinweise auf ein komplexes Lichtfeld geben u. a. Mehrfachschatten. Lange vor dem LED-Zeitalter war bekannt, dass Mehrfachschatten von mehreren Punktlichtquellen die Erkennbarkeit von Körperformen behindern können [Schober, 1953]. Aus evolutionärer Perspektive kann weiterhin argumentiert werden, dass natürliche Lichtfelder wie das Sonnenlicht eine eher uniforme Struktur aufweisen bzw. eine divergente im Fall von Kerzenlicht oder Feuer [van Doorn et al., 2011b]. Die heutigen Lichtfelder unterscheiden sich demnach beachtlich von jenen Bedingungen, unter denen sich das menschliche Auge entwickelt hat. Die vorliegenden Untersuchungen dienen daher dem Zweck erstmals zu untersuchen,

wie das visuelle System mit dieser Komplexität in realen Lichtszenen umgeht und diese bei der Formwahrnehmung berücksichtigt.

In den folgenden Abschnitten soll zunächst erläutert werden, wie die in der Aufzählung oben genannten Tiefenreize zur Formwahrnehmung beitragen.

Shape from Shading:

Schattierungen auf Objekten entstehen durch die Wechselwirkung von Einfallswinkel des gerichteten Lichts und der Oberflächenneigung. Beispielsweise repräsentiert die Leuchtdichteverteilung, welche durch parallele Lichtstrahlen auf der Oberfläche eines Objekts mit Lambert'schen Reflexionseigenschaften erzeugt wird, dessen geometrische Struktur [Horn und Brooks, 1989].

Die Erkenntnisse zur Formwahrnehmung durch Schattierungen stammen in erster Linie von Untersuchungen an „kreisrunden Scheiben“ mit einem linearen Leuchtdichtegradient, einem Standard Stimulus aus der Psychophysik, welcher je nach angenommener Lichtrichtung als „Cups“ oder „Caps“ wahrgenommen werden können. In den Versuchen konnten durch die Aussagen der Versuchspersonen über deren Wahrnehmung als „Cups“ oder „Caps“ Rückschlüsse über das angenommene Lichtfeld gezogen werden.

Kleffner und Ramachandran machen darauf aufmerksam, dass es sich beim „shape from shading“ um einen „early visual process“ handelt, der noch vor dem Prozess der Gruppierung und Bewegungswahrnehmung stattfindet [Kleffner und Ramachandran, 1992]. In diesem Zusammenhang weist sie auf das Prinzip des Countershadings in der Natur hin. Dabei weisen einige Tierarten an ihrer Unterseite eine hellere Körperfarbe auf, als an der Oberseite. Das Countershading soll der natürlichen auftretenden Schattierung am Körper entgegenwirken. In ihren Experimenten zeigen Kleffner und Ramachandran, dass „shape

from shading“ einen „Pop-Out-Effekt“ hervorrufen kann, welcher eine Abhebung vom Hintergrund des Objekts verursacht. Nach Kleffner und Ramachandran soll das Countershading diesen „Pop-Out-Effekt“ vermeiden, um damit die Erkennbarkeit für Fressfeinde zu reduzieren. Weiterhin sind Tierarten bekannt, welche sich einen umgedrehten Countershadingeffekt zu Nutze machen, weil sie kopfüber an Bäumen hängen. Spezielle Kraken sind in der Lage, ihr Shading zu verändern, wenn sie auf den Kopf gedreht werden. Daraus leiteten Kleffner und Ramachandran ab, dass neuronale Elemente existieren, die auf die Extraktion von „shape from shading“ Reizen spezialisiert sind.

Lichtrichtung:

Den Einfluss unterschiedlicher Lichtrichtungen auf die Formkonstanz untersuchten Nefs et al. an computergenerierten Bildern von Objekten mit Lambert’schen Reflexionseigenschaften [Nefs et al., 2005]. Aufgrund der Tatsache, dass bei Veränderungen der Lichtrichtung eine andere Körperseite der Lichtquelle zugeneigt ist, resultiert aus einer anderen Lichtrichtung automatisch ein neues Shading-Muster. Dieses veränderte Shading-Muster führte in den Untersuchungen von Nefs et al. zu unterschiedlichen Formwahrnehmungen am selben Objekt. Auch Koenderink et al. [Koenderink et al., 1996a], [Koenderink et al., 1996b] konnten zeigen, dass eine Veränderung der Beleuchtungsrichtung in Bildern eine Veränderung des wahrgenommenen „piktorischen Reliefs“ hervorruft. Darüber hinaus ist das visuelle System fähig, aus Veränderungen des Shading-Musters auf Veränderungen der Lichtrichtung zu schließen. In den Versuchen von Gerhard und Maloney [Gerhard und Maloney, 2010] waren Probanden in der Lage, die Trajektorie einer sich bewegenden Lichtquelle aus den dynamischen Veränderungen der Schattierungen abzuleiten.

Art der Lichtquelle:

Eingangs wurde bereits darauf aufmerksam gemacht, dass das visuelle System bei fehlenden Informationen über das Lichtfeld Annahmen trifft. Dabei wurde allerdings nicht weiter präzisiert, was für eine Lichtquelle das visuelle System zugrunde legt. Unterschiedliche Untersuchungen vermuten entweder eine gerichtete [Kleffner und Ramachandran, 1992] oder diffuse Lichtquelle [Langer und Bühlhoff, 2000]. Schofield et al. hingegen vermuten eine gemischte Lichtquelle mit gerichteten und diffusen Anteilen, deren Komponenten mit einer bestimmten Gewichtung kombiniert werden [Schofield et al., 2011]. Auch Koenderink et al. stellen die Behauptung auf, dass Beobachter bei der Formwahrnehmung eine Vorstellung von dem physikalischen Lichtfeld haben [Koenderink et al., 2007]. In ihren Versuchen zeigen Koenderink et al., dass Versuchspersonen in der Lage waren, die Schattierungen eines Testobjektes in einer Lichtszene anzupassen, bis das Testobjekt als Teil der beleuchteten Szene erschien. Die Probanden trafen dabei nahezu korrekte Annahmen über Lichtrichtung, Diffusität sowie Intensität der Lichtquelle.

Schlagschatten:

Die Form eines Schlagschattens kann 3D-Informationen über ein Schatten werfendes Objekt beinhalten. Dabei wird der Schlagschatten beeinflusst durch Lichtrichtung, Objektform, Relief der Projektionsfläche sowie dem Zusammenspiel von Position der Lichtquelle, Objekt und Projektionsfläche [Cavanagh und Leclerc, 1989]. Im Wesentlichen gibt es zwei Eigenschaften von Schlagschatten, die von primärem Interesse für die Formwahrnehmung sind. Das sind dessen Form sowie dessen Qualität (Farbe, Textur, Helligkeit, Bewegung). Wenn das visuelle System in der Lage ist, das „shadow correspondence problem“ zu lösen, also einen Schlagschatten dem

Schatten werfenden Objekt zuzuordnen, dann können Schlagschatten dazu beitragen, Oberflächenmehrdeutigkeiten aufzulösen. Beispielsweise gibt ein Schlagschatten Informationen über die Richtung und Gerichtetheit des Lichts. Diese Informationen können dazu verwendet werden, die Unbestimmtheit von Schattierungen aufzulösen [Cavanagh und Leclerc, 1989]. Weiterhin zeigen die Untersuchungen von Norman et al. [Norman et al., 2009], dass Schlagschatten von Objekten allein ähnlich informativ sein können, wie ein schattiertes Objekt. Norman et al. demonstrieren, dass selbst verzerrte Schatten auf gekrümmten Projektionsflächen zur Formwahrnehmung und Objekterkennung beitragen können.

Castiello untersuchte die Erkennungsgeschwindigkeit von Objekten mit inkongruenten Schlagschatten, welche einen Widerspruch zu den Objektschattierungen bzw. der Objektform darstellten [Castiello, 2001]. In den Untersuchungen wurden Objekte mit Schlagschatten dargeboten, welche nicht vom Objekt stammen konnten oder welche eine andere Lichtrichtung anzeigten als die Schattierungen auf dem Objekt. Im Ergebnis stellte Castiello fest, dass sich die Objekterkennungsgeschwindigkeit bei inkongruenten Schatten verschlechterte und dass auch Objekte mit fehlenden Schlagschatten eine längere Erkennungsdauer benötigen [Castiello, 2001].

Silhouette:

Beim Beitrag der Objektsilhouette zur Formwahrnehmung handelt es sich im Prinzip um einen Spezialfall der Schlagschattenbetrachtungswiese. Fallen die Beobachtungsrichtung mit der Lichteinfallrichtung exakt überein, so können der Schlagschatten und die Silhouette dieselbe Ausprägung aufweisen [Norman et al., 2009]. Hayward untersuchte die Formerkennung anhand der Außenkontur eines Objektes und stellt

fest, dass die Objektsilhouette selbst bei unterschiedlichen Blickpositionen zur wahrgenommenen Formkonstanz beiträgt [Hayward, 1998]. Hayward vermutet, dass Silhouetten von unbekanntem Blickpunkten vom visuellen System durch eine Linearkombination von bekannten Blickpunkten interpoliert werden können.

Shape from Texture/Material:

Nicht zuletzt soll auf die Rolle von Textur und Material eingegangen werden. Khang et al. untersuchten die Formwahrnehmung an Objekten mit unterschiedlichen Reflexionseigenschaften und kommen zu dem Erkenntnis, dass die Formwahrnehmung hauptsächlich auf Schattierungen beruht [Khang et al., 2007]. Khang et al. vermuten, dass das visuelle System Helligkeitsgradienten analysiert und stärkere Kontraste eine stärkere Tiefenwahrnehmung hervorrufen. Das visuelle System analysiert demnach keine Reflexionseigenschaften [Khang et al., 2007]. Jedoch bestimmen die Reflexionseigenschaften die Ausprägung der Leuchtdichtegradienten und beeinflussen damit die wahrgenommene Objektform.

Weiterhin geben Wijntjes et al. zu bedenken, dass der Einfluss der Reflexionseigenschaften auf das Shading keinesfalls als unidirektional betrachtet werden sollte [Wijntjes et al., 2012]. Gleichmaßen können die Beleuchtungsbedingungen die Wahrnehmung der Materialeigenschaften beeinflussen. Beispielsweise kann ein glänzendes Objekt in einer vollkommen diffusen Umgebung als matt wahrgenommen werden [Wijntjes et al., 2012]. Ebenso kann die Lichtrichtung die wahrgenommene Oberflächenrauigkeit beeinflussen [Ho et al., 2006].

Zur Integration dieser unterschiedlichen Tiefenreize liegen bislang wenig Erkenntnisse vor. Durch den vorangegangenen Textabschnitt wird deutlich, dass diese Reize nicht unabhängig voneinander sind und sich teil-

weise gegenseitig beeinflussen können. Diese Tatsache macht es schwierig die Einflüsse getrennt voneinander zu analysieren und im Experiment zu kontrollieren. Generell zeigt sich aber eine Tendenz dahingehend, dass eine größere Anzahl an Forminformationen zu einem kleineren Fehler bei der Formwahrnehmung führen [Norman et al., 1995].

Störwirkung von Lichtrichtung und Schattigkeit bei visuell-motorischen Arbeitsaufgaben

Die Bedeutung von Beleuchtungsbedingungen für visuell-motorische Arbeitsaufgaben ist bislang selten untersucht worden. Bei Beleuchtungsstudien im betrieblichen Kontext stehen häufig zweidimensionale Arbeitsaufgaben im Vordergrund, in denen die Auswirkungen des Beleuchtungsniveaus auf die Sehleistung untersucht werden. Eine der wenigen Untersuchungen, welche den Einfluss der Beleuchtung auf die visuell-motorische Leistung bei industrieller Montagearbeit untersuchte, stammt von Lindner [Lindner, 1976]. Im Mittelpunkt von Lindners Untersuchungen stand das Beleuchtungsniveau und dessen Effekt auf die visuell-motorische Leistung. Für den Versuch wurde eine spezielle Vorrichtung entwickelt, in welche Zylinderschrauben mit einem Schlitzschraubendreher eingedreht werden mussten. Die Schrauben unterschieden sich im Schlitzdurchmesser und wurden im 90-Grad-Winkel entweder nach rechts oder links eingeschraubt. Sobald die Probanden eine Schraube korrekt montiert hatten, leuchtete eine Indikatorlampe auf, welche den richtigen Schraubensitz anzeigte. Lindner varrierte die Beleuchtungsstärke und ermittelte die benötigte Zeit zur Ausführung der Arbeitsaufgabe. Er stellte eine Leistungssteigerung mit Erhöhung der Beleuchtungsstärke fest. Weiterhin macht er darauf aufmerksam, dass sich die Beleuchtungsstärkeveränderungen auf die visuell-motorische Leistung weniger stark auswirkten, als auf die reine Sehleistung. Möglicherweise steht diese Beobachtung im

Zusammenhang mit der „two visual systems theory“ von Goodale und Milner [Goodale und Milner, 1992], auf welche in den nachfolgenden Abschnitten detaillierter eingegangen werden soll.

Die folgenden Abschnitte sollen die Bedeutung von Lichtrichtung und Schattigkeit für die manuelle Handlungsausführung verdeutlichen. Hierbei werden zwei unterschiedliche Linien der Argumentation verfolgt. Eine Argumentationslinie betrifft die Schlagschatten und Schattierungen des zu manipulierenden Objektes. Es wird verdeutlicht, dass Schlagschatten und Schattierungen auf Objekten Handlungsaufforderungen (Affordanzen) für die Handlungsausführung geben. Dabei enthalten sie separate Informationen für die Greifbewegung und Hinlangbewegung.

Die zweite Argumentationslinie betrifft die Rolle von Schlagschatten der eigenen Gliedmaßen für das visuelle System. Hier wird dargestellt, dass Schlagschatten der eigenen Gliedmaßen vom visuellen System als „high priority objects“ [Pavani et al., 2014] behandelt werden, welche die Aufmerksamkeit auf das Schatten werfende Körperteil fokussieren („attentional cueing effect“ [Pavani und Galfano, 2015]).

Ausgehend von diesen beiden Argumentationslinien wird anschließend die Integration unterschiedlicher visueller Informationsquellen (z. B. Stereosehen, Schatten) bei der Handlungsausführung betrachtet und daran die Hypothese für den Laborversuch abgeleitet.

Schlagschatten der eigenen Gliedmaßen und motorische Aufmerksamkeit:

Der nachfolgende Abschnitt soll zeigen, dass Schlagschatten als Erweiterung des eigenen Körpers (embodiment) wirken können [Kuylen et al., 2014].

Zur Verdeutlichung kann man sich diese Erweiterung beispielsweise als Greifzange vorstellen, welche eine Armverlängerung darstellt, um Dinge vom Boden aufheben zu können. Die Greifzange erzeugt dabei ein dreidimensionales taktiler Feedback. In ähnlicher Weise erzeugt der Schlagschatten der eigenen Gliedmaßen ein visuelles zweidimensionales Feedback im motorischen System und richtet die Aufmerksamkeit auf das Schatten werfende Körperteil. Dabei werden die Schatten der eigenen Gliedmaßen mit einer höheren Priorität vom visuellen System verarbeitet, als Schatten von anderen Objekten. Demzufolge unterscheiden sich Schatten des eigenen Körpers von Schlagschatten fremder Objekte [Pavani und Galfano, 2015].

Die Aufmerksamkeitslenkung von Schlagschatten der eigenen Gliedmaßen auf das Schatten werfende Körperteil wird besonders in den Versuchen von Pavani und Castiello verdeutlicht. In ihren Untersuchungen aus dem Jahr 2004 hatten Probanden die Aufgabe, Druckreize an den Fingerspitzen zu detektieren [Pavani und Castiello, 2004]. Die Probanden saßen dazu an einem Tisch, mit ihren Armen in einer erhöhten Armablage. An den Fingern waren Aktoren befestigt, die einen Druckreiz auf die Finger ausüben konnten. Die Versuchspersonen hatten die Aufgabe anzuzeigen, an welcher Hand und zu welchem Zeitpunkt ein Druckreiz auftrat. Je nach Versuchsbedingung wurde eine Hand separat mit einer Lichtquelle beleuchtet, wodurch auf den Tisch ein Schatten der Hand projiziert wurde. Obwohl der Schlagschatten der Hand für die Detektion eines Druckreizes keinerlei Bedeutung hatte, zeigten sich schnellere Reaktionszeiten auf den Druckreiz an der Schatten werfenden Hand.

Zu vergleichbaren Ergebnissen kamen Galfano und Pavani, sie vergleichen den Effekt mit Situationen, in welchen die Aufmerksamkeit durch Blickbewegungen in eine bestimmte Richtung gewendet ist, um

die von dort kommenden Informationen besser aufnehmen zu können [Galfano und Pavani, 2005]. Pavani und Castiello leiteten ab, dass Schlagschatten die Aufmerksamkeit auf die Schatten werfende Hand fokussieren.

Ergänzend zu diesen Ergebnissen wurde gezeigt, dass visuelle Störreize in unmittelbarer Nähe des Schlagschattens die taktile Aufmerksamkeit behindern können [Pavani und Castiello, 2004]. Demnach wirkt ein Störreiz am Schlagschatten in vergleichbarer Weise wie ein Störreiz am betreffenden Körperteil selbst. In den oben beschriebenen Versuchen bekamen die Versuchspersonen neben einem Druckreiz am Finger zusätzlich einen visuellen Störreiz dargeboten, den sie ignorieren sollten. Als visueller Störreiz fungierte eine am Finger befestigte LED. Das plötzliche Aufleuchten der LED am Finger sollte vom Probanden ignoriert werden, wohingegen der Druckreiz angezeigt werden sollte. Im Ergebnis zeigte sich, dass die aufblinkende LED die Erkennung des Druckreizes stört. Interessanterweise zeigte sich derselbe Störeffekt auch dann, wenn die blinkende LED nicht am Finger selbst, sondern in unmittelbarer Nähe des Schlagschattens der Hand dargeboten wurde. Demnach können diese Interferenzeffekte sowohl an der Hand selbst als auch am Schlagschatten ausgelöst werden.

Im Jahr 2007 wurde in einem weiteren Versuch mit ähnlichem Versuchsaufbau untersucht, ob Schlagschatten die Aufmerksamkeit nicht nur für taktile Reize verbessern, sondern auch für die visuelle Reizerkennung [Pavani und Galfano, 2007]. Zu diesem Zweck wurden anstatt der Druck-Aktoren einzelne LEDs an den Fingerspitzen der Probanden befestigt. Die Probanden hatten wieder die Aufgabe anzuzeigen, wann und an welchem Finger eine LED aufleuchtete. Dabei sollte untersucht werden, ob eine aufblinkende LED an einer Schatten werfenden Hand schneller detektiert wird, als an einer Hand, die keinen Schlagschatten

wirft. Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus 2004 zeigte sich bei diesen visuellen Reizen kein Effekt.

Schlagschatten richten demnach die Aufmerksamkeit auf taktile Reize, aber nicht auf visuelle Reize. Die Autoren vermuteten daraufhin, dass Schlagschatten und motorisches System miteinander verknüpft sein müssen. Zu einem späteren Zeitpunkt soll im Rahmen der „two visual systems theory“ [Goodale et al., 1991] noch einmal auf diesen Punkt zurückgekommen werden.

Aus den Untersuchungen von Pavani und Galfano gehen außerdem zwei wichtige Voraussetzungen hervor, die für den Effekt der gerichteten Aufmerksamkeit erfüllt sein müssen. Pavani und Galfano konnten zeigen, dass der Effekt nur dann funktioniert, wenn:

- der Schlagschatten optische Ähnlichkeit mit dem Schatten werfenden Körperteil besitzt und
- zusätzlich eine Ort-Zeit-Korrelation zwischen Schattenprojektion und Körperteil besteht.

Zu dieser Erkenntnis gelangten die Autoren nachdem den Versuchspersonen Handschuhe anzogen wurden, welche die natürliche Handform des Schlagschattens verhüllten. Die Autoren vermuteten, dass das visuell-motorische System den deformierten Schlagschatten nicht mehr dem Körperteil zuordnen kann. Es wird vermutet, dass das visuelle System nicht in der Lage ist, das „shadow correspondence problem“ [Mamassian, 2004] zu lösen. Dabei muss eine Verbindung zwischen Schlagschatten und Schatten werfenden Körperteil hergestellt werden. Ähnliche Ergebnisse zeigten sich bei einem künstlichen, aufgezeichneten Schlagschatten der Hand, auch dieser wurde vom visuell-motorischen System nicht in seiner Zugehörigkeit zum Körper erkannt, weil die

zweite, der oben genannten Bedingungen (die Ort-Zeit-Korrelation) verletzt war.

Hinweise auf eine mögliche neurologische Basis für die vorbenannten Ergebnisse liefern Sartori und Castiello, welche die Aktivierung von Spiegelneuronen bei der Beobachtung von motorischen Handlungen untersuchte [Sartori und Castiello, 2013]. Mithilfe der TMS (transcranial magnetic stimulation) sowie der Elektromyografie zeigten Sartori und Castiello, dass visuell-motorische Neuronen bei der Beobachtung von Handbewegungen das motorische System aktivieren können und dabei auch Schatteninformationen mit einfließen.

Schlagschatten und Schattierungen von Objekten als Affordanzen:

Erste Hinweise auf die Verwendung von Schatten und Schattierungen als Affordanzen gibt Gibson in seiner „Theory of direct perception“ [Gibson, 1979]: „The shapes and sizes of objects, in fact, are perceived in relation to the hands, as graspable or not graspable, in term of their affordances for manipulation.“ (S. 224). Gordon erklärt den Begriff der Affordanz [Gordon, 2004] als Sinnhaftigkeit eines visuellen Merkmals für die Handlungsausführung. Demzufolge können Affordanzen als Handlungsaufforderungen für die Manipulation von Objekten verstanden werden. Dabei kann es sich um Informationen höherer Ordnung handeln, die sich nicht unmittelbar an einem physikalischen Merkmal festmachen lassen.

Für die motorische Handlungsausführung sind in erster Linie die Eigenschaften des zu manipulierenden Objektes (z. B. Bauteil bei Montagearbeit) von Interesse. Die Eigenschaften des Objekts können in zwei Kategorien aufgeteilt werden [Bonfiglioli und Pavani, 2004]:

- intrinsische Objekteigenschaften: z. B. Objektform, Textur, Material, Gewicht
- extrinsische Objekteigenschaften: z. B. Orientierung, Anordnung, Abstand zu benachbarten Objekten (Einbettung in das räumliche Layout)

Des Weiteren können für die Handlungsausführung zwei Bewegungsarten unterschieden werden:

- Greifen: z. B. Abstandsveränderung zwischen Daumen und Zeigefinger
- Hinlangen: z. B. Bewegungsbahn des Arms zum Objekt, Bewegungs-geschwindigkeit des Arms

Jede dieser beiden Objekteigenschaften hat eine Bedeutung für jeweils eine der genannten Bewegungsarten. Beispielsweise besitzen die intrinsischen Objekteigenschaften wie die Objektform Relevanz für den Greifvorgang [Bonfiglioli und Pavani, 2004]. Die Objektform bestimmt den Abstand zwischen Daumen und Zeigefinger während des Greifvorgangs.

Die extrinsischen Eigenschaften hingegen sind für das Hinlangen von Bedeutung [Bonfiglioli und Pavani, 2004]. Zum Hinlangen werden Informationen benötigt, welche die räumliche Einbettung des Objekts in die Szene beschreiben, z. B. Abstand und Lage des Objekts. Interessant ist nun die Tatsache, dass Schlagschatten sowie Schattierungen Informationen über extrinsische als auch über intrinsische Objekteigenschaften beinhalten. Wie bereits im Abschnitt 2.1 gezeigt wurde, geben Schlagschatten Informationen über Entfernung und Abstand zwischen Objekten. Weiterhin trägt die Schattierung von Objekten

(„shape from shading“) zur Formwahrnehmung bei. Dieser Argumentationslinie folgend, können Schlagschatten und Schattierungen Handlungsaufforderungen für motorische Tätigkeiten geben.

Die Idee, Schlagschatten und Schattierungen als handlungsleitende Reize zu verstehen, soll zunächst am Beispiel einer Windows-Benutzeroberfläche verdeutlicht werden. In Abbildung 2.2 ist der waagerechte Slider schattiert sowie der Hintergrundbereich des Fensters durch einen weichen Schlagschatten gekennzeichnet. Die Schattierungen des Sliders kennzeichnen das Bedienteil als konvex geformten, hervorstehenden Schieber. Der Eindruck einer konvexen Wölbung entsteht durch die „light from above“-Annahme des visuellen Systems, wobei die Oberseite des Schiebers heller und die Unterseite dunkler schattiert sind. Die Schattierung erzeugt einen „Pop-Out-Effekt“ [Kleffner und Ramachandran, 1992] wie er aus „shape from shading“-Experimenten mit konvexen und konkaven Wölbungen („cups and caps“) bekannt ist. Beim Benutzer erzeugen die Schattierungen den Eindruck der Greifbarkeit und Verschiebbarkeit. Der Schlagschatten im hinteren Bereich soll das Fenster vom weißen Hintergrund abheben, er verdeutlicht, dass es sich im Vordergrund befindet und manipuliert werden kann.

Dass Schlagschatten motorische Handlungen beeinflussen können, zeigten Bonfiglioli und Pavani im Rahmen eines Laborversuchs [Bonfiglioli und Pavani, 2004]. Im Versuch wurden Probanden normale Alltagsgegenstände präsentiert, wobei die Schlagschatten dieser Objekte im Versuchsdesign variiert wurden. Die Manipulation des Schlagschattens wurde mithilfe eines Projektors erreicht, welcher einen beliebigen Schatten von unten gegen eine Mattscheibe projizieren konnte, auf welcher sich das reale Objekt befand. Dieses Versuchsset-



Abbildung 2.2: Schatten und Schattierungen als Handlungsaufforderungen (Affordanzen)

ting erlaubte es den Forschern, Schlagschatten zu erzeugen, welche nicht vom Objekt abstammen konnten (inkongruente Schatten). Zusätzlich zur Schattenform (kongruent vs. inkongruent) wurde die Richtung des Schattens verändert (links vs. rechts). Die Probanden hatten die Aufgabe das Objekt mit den Händen zu greifen, sobald die Sicht durch eine Shutter-Brille vom Versuchsleiter freigegeben wurde. Ziel des Versuches war es, den Einfluss des Schattens auf die motorische Ausführung zu untersuchen. Dazu wurden optische Marker mit einer Motion Camera während der Ausführung überwacht. Im Ergebnis zeigte sich, dass der Greifvorgang der Hand nicht von den Schlagschatten beeinflusst wurde, hingegen aber die Bewegungstrajektorie des Arms zum Objekt. Zur Analyse der Trajektorie wurde eine optimale Bewegungsbahn berechnet und die Abweichung zur realen

Bewegungsbahn bestimmt. Die Autoren waren nicht in der Lage zu zeigen, dass sich inkongruente Schatten nachteilig auf die Handlungsausführung auswirken. Jedoch konnten systematische Unterschiede in den Bewegungsbahnen festgestellt werden, woraus die Autoren ableiten, dass Schlagschatten die Bewegungskomponente beeinflussen. Neben der motorischen Aufgabe sollten die Versuchspersonen in einem weiteren Teilversuch eine perzeptuelle Aufgabe lösen. Dabei sollten die dargebotenen Objekte so schnell wie möglich verbal benannt werden. Wieder wurden die Schlagschatten variiert. Im Ergebnis zeigte sich kein Effekt des Schlagschattens auf die Objekterkennungsgeschwindigkeit. Bonfiglioli und Pavani leiten daraus ab, dass zwischen einer motorischen Analyse und einer Wahrnehmungsanalyse des Zielobjekts unterschieden werden muss. Die Autoren vermuten, dass Schlagschatten nicht für die Wahrnehmung ausgewertet werden, wohl aber für die Motorik.

Damit knüpfen Sartori und Castiello an die einflussreiche „two visual systems theory“ (two-streams hypothesis) an [Goodale et al., 1991]. Die Theorie vermutet, dass visuelle Informationen über die folgenden zwei unterschiedlichen Pfade aufgenommen werden können:

- Ventraler Pfad = visueller Pfad (inferotemporal cortex)
- Dorsaler Pfad = visuell-motorischer Pfad (posterior parietal cortex)

Ursprünglich stammt die Theorie von Mishkin und Ungerleider [Mishkin und Ungerleider, 1982], welche diese Erkenntnisse von Untersuchungen an Affen abgeleitet haben. Goodale und Milner [Goodale und Milner, 1992] übertrugen die Theorie auf den Menschen. Sie adressieren zwei Pfade, wobei der visuelle Pfad für die bewusste Wahrnehmung von Objekteigenschaften verantwortlich sein soll

und der visuell-motorische Pfad für die unbewusste Aufnahme von handlungsrelevanten Informationen. Nach Goodale und Milner ist der dorsale Pfad an der visuellen Verarbeitung für die Kontrolle von motorischen Handlungen beteiligt. Demgegenüber soll der ventrale Pfad für die visuelle Verarbeitung zuständig sein.

Gestützt wird die Theorie durch Untersuchungen an Patienten mit Schädigungen am dorsalen bzw. ventralen Pfad. Beispielsweise untersuchten Carey et al. einen Patienten, dessen ventraler (visueller, bewusster) Pfad nach einem CO₂-Unfall geschädigt wurde [Carey et al., 1998]. Der Patient hatte die Aufgabe, Blöcke in verschiedenen Entfernungen zu greifen (visuell-motorisch, unbewusst) sowie deren Entfernung verbal (visuell, bewusst) einzuschätzen. Im Versuch konnte gezeigt werden, dass die visuell-motorischen Fähigkeiten des Patienten eine normale Sensitivität aufwiesen, wobei die Wahrnehmung und verbale Einschätzung von Entfernungen gestört war. Der Patient war demnach nicht in der Lage, Entfernungen verbal zu schätzen, konnte die motorischen Handlungen aber problemlos ausführen.

Mit der Vorstellung von Schatten als Affordanzen kann spekuliert werden, dass Schatten über den dorsalen Pfad verarbeitet werden, nicht aber über den ventralen Pfad. Diese Annahme würde weiterhin erklären, warum Beobachter sich Schlagschatten und Schattierungen nicht bewusst machen, diese aber dennoch motorische Handlungen beeinflussen können.

Reizintegration:

Die Kernaussage des kommenden Abschnittes betrifft die Annahme, dass eine höhere Anzahl an handlungsrelevanten Informationen sich vorteilhaft auf die motorische Handlungsausführung auswirkt. Im weiteren Sinne geht es demnach um die Frage, wie eine Hinzugabe

oder Entfernung von Schatteninformationen die motorische Handlungsausführung beeinflusst. Diese Frage soll anhand verschiedener Studien zur Reizintegration geklärt werden.

In den vorangegangenen Abschnitten wurde dargestellt, dass für die Bewegung des Hinlangens Tiefeninformationen notwendig sind und diese teilweise von Schlagschatten bereitgestellt werden können. Andere Reize für die Tiefenwahrnehmung sind beispielsweise die Disparität beim Stereosehen. Für die Greifbewegung können Schattierungen, die Außenkontur oder Textur von Bedeutung sein. Es wird deutlich, dass dem visuellen System eine Vielfalt von Reizen zur Verfügung stehen, die teilweise redundante Informationen beinhalten. Um eine Hypothese über den Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit ableiten zu können, muss geklärt werden, wie die Reizvielfalt bei der Handlungsausführung berücksichtigt wird. Bülthoff und Mallot schlagen folgende 4 Prinzipien der Reizintegration vor [Bülthoff und Mallot, 1988]:

- Accumulation: Hierbei werden Tiefeninformationen zusammengefasst und angesammelt. Die Ansammlung muss dabei nicht notwendigerweise additiv erfolgen.
- Cooperation: In diesem Fall bestätigen sich verschiedene Tiefeninformationen gegenseitig, synergetisch.
- Disambiguation: Dabei reduziert ein Reiz die Mehrdeutigkeit eines zweiten Reizes.
- Veto: Hierbei kann ein Reiz einen unzweifelhaften Charakter haben. In der Folge können andere Reize in ihrer Bedeutung überflüssig werden.

Nachfolgend sollen einige Untersuchungen dargestellt werden, in denen diese Formen der Reizintegration überprüft wurden. In den Experimen-

ten von Bülthoff und Mallot wurde die Integration folgender Tiefenreize untersucht: Stereo, Shading und Objektkanten. Dazu wurden den Versuchspersonen an einem Computerdisplay dreidimensionale Ellipsoide dargeboten, welche Shading-Reize sowie Stereoinformationen beinhalten. Ein Stereoeffekt konnte durch den Einsatz von Shutterbrillen erreicht werden. Die Reizintegration wurde anhand der subjektiv wahrgenommenen Objektiefe quantifiziert. Ähnlich wie bei der „gauge figure task“ (siehe Abschnitt 3.1.2) wurde die wahrgenommene Objektiefe mithilfe eines Cursors eingestellt und anschließend eine wahrgenommene Oberfläche rekonstruiert. Im Ergebnis der Studie stellen Bülthoff und Mallot ein Reizintegrationsmodell vor, in welchem die Kanteninformationen in Kombination mit Stereosehen den stärksten Tiefeneffekt hervorriefen. Für den Fall, dass das Bewertungsobjekt keine Objektkanten aufwies, erzeugte das Stereosehen in Kombination mit Shading-Reizen 70% der Tiefenwahrnehmung [Bülthoff und Mallot, 1988]. Demnach hat das Shading im binokularen Kontext einen großen Einfluss auf die Tiefenwahrnehmung. Hingegen wirkt das Shading bei monokularen Bedingungen nur als schwacher Tiefenreiz. In Übereinstimmung zeigen Ergebnisse von Todd und Mingolla, dass die reale Objektiefe bei monokularen Shading-Reizen bis zu 50% unterschätzt wird [Todd und Mingolla, 1983]. Die wichtigsten Reize für Tiefenwahrnehmung sind in der Reihenfolge demnach:

1. Kanteninformationen beim binokularen Sehen
2. „Shape from shading“ beim binokularen Sehen
3. „Shape from shading“ ohne Stereoinformationen

Ergänzend versuchten Bülthoff und Mallot neben der Reizhierarchie die Verknüpfungsarten aufzuklären. Sie kommen zu der Erkenntnis, dass es sich bei der Integration um eine Kombination von den oben

genannten Modellen handeln muss. Wichtigste Verknüpfungsform ist dabei jedoch die additive Verknüpfung so, dass die wahrgenommene Objektiefe mit einer zunehmenden Anzahl von Tiefenreizen zunimmt.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen von Bühlhoff und Mallot untersuchte Knill die Reizintegration nicht nur bei der visuellen Wahrnehmung, sondern zusätzlich bei motorischen Handlungen [Knill, 2005]. Knill geht in seiner Studie von der Annahme aus, dass sich die Wahrnehmung des visuellen Systems von der Wahrnehmung des visuell-motorischen Systems unterscheidet. Im Experiment sollten Neigungen einer Fläche eingeschätzt werden. Die wahrgenommenen Neigungen wurden mithilfe zweier unterschiedlicher Methoden ermittelt. Eine Methode umfasste die Quantifizierung der wahrgenommenen Neigung mithilfe einer motorischen Handlung, die andere Methode war rein perzeptueller Natur ohne motorischem Anteil. Die Unterscheidung der beiden Methoden sollte die Gegenüberstellung von motorischer und visueller Reizintegration ermöglichen. Bei den Reizen für die Flächenneigung wurde zwischen monokularen und binokularen Reizen unterschieden. Einerseits wurde die wahrgenommene Flächenneigung durch die Textur der Oberfläche verändert (monokularer Reiz) andererseits durch die Disparität beim Stereosehen (binokularer Reiz). Um herauszufinden, welcher der beiden Reize bei der Wahrnehmung der Oberflächenneigung den Vorrang erhält, wurde ein Konflikt zwischen den Reizen erzeugt. Monokulare und binokulare Reize wurden gleichzeitig dargeboten, beinhalteten aber gegensätzliche Informationen. Dabei zeigte der monokulare Reiz eine andere Flächenneigung an als der binokulare. Anhand der Probandenreaktion konnte durch diesen Entscheidungskonflikt abgeleitet werden, welche Reize den Vorrang erhalten. Relativierend muss hinzugefügt werden, dass Knill bei dem beschriebenen Entscheidungskonflikt keine Informationen über die Reizstärken gibt.

Hinsichtlich der Reizintegration konnten folgende Erkenntnisse aus dem Versuch abgeleitet werden. Generell herrscht Einigkeit darüber, dass das visuelle System Reize in ihrer Wahrscheinlichkeit berücksichtigt und ähnlich wie ein „Bayesian Estimator“ arbeitet. Knill macht weiterhin darauf aufmerksam, dass die Integration von Tiefenreizen insbesondere bei motorischen Aufgaben noch nicht geklärt sei. Die Versuchsergebnisse lassen darauf schließen, dass Mono- und Stereoreize bei motorischer und perzeptueller Wahrnehmungsaufgabe in ähnlicher Weise verarbeitet werden, jedoch scheinen Stereoreize bei Handbewegungen eine größere Rolle zu spielen. Knill leitet ab, dass besonders die Anpassung der Öffnungsweite zwischen Daumen und Zeigefinger vom Stereosehen abhängt, wobei der Transport (also das Bringen) weniger von Stereoreizen beeinflusst wird.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Reizintegration ein komplexes Problem darstellt. Einerseits hängt sie davon ab, welche Informationen vorhanden sind, andererseits davon, wie statistisch wahrscheinlich diese Reize zueinander sind und darüber hinaus von der Aufgabe, die mit den Informationen bewerkstelligt werden soll (motorische Arbeit oder rein visuelle Arbeit). Die Versuche zeigen, dass binokularen Reizen bei geringen Neigungen mehr Aufmerksamkeit zukommt und bei stärkeren Neigungen eher monokulare Reize wie Textur in den Vordergrund rücken.

Statistisch gesehen steigt die Fehlerwahrscheinlichkeit bei kleinen Neigungen und monokularen Reizen in der Tat an. Das visuelle System bewerkstelligt hierbei eine optimale Reizintegration. Demnach verändert es die Wichtung bei der Integration von Tiefenreizen je nach Aufgabe. Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, ob es sich um eine reine Wahrnehmungsaufgabe handelt oder eine motorische Aufgabe.

Die Studie von Knill ist deshalb von Interesse für die Überlegungen zum Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf visuell-motorische Leistung, weil es sich bei Schlagschatten und Schattierungen ebenfalls um monokulare Reize handelt. Es kann vermutet werden, dass Schlagschatten und Schattierungen vom visuellen System ähnlich wie die Textur-Reize aus der Studie von Knill behandelt werden. Die Studie zeigt weiter, dass monokulare Reize signifikant motorische Handlungen beeinflussen können, auch wenn gleichzeitig Stereoreize vorhanden sind. Ein weiteres relevantes Fazit der Studie betrifft die unterschiedliche Reizwichtung des visuellen Systems bzw. des visuell-motorischen Systems. Diese Erkenntnisse unterstützen die „two visual systems theory“, welche im Abschnitt zur Wirkung von Schlagschatten und Schattierungen als Affordanzen bereits näher erläutert wurde.

Eine weitere Studie, welche die Reizintegration von monokularen und binokularen Reizen untersuchte, stammt von Keefe et al. [Keefe et al., 2011]. In ihren Versuchen widerlegten Keefe et al. die Annahme, dass sich das visuell-motorische System bei Greifbewegungen allein auf Stereoreize verlässt (binocular specialism). Die „binocular specialism theory“ besagt, dass der Ausschluss von monokularen Tiefenreizen keinen Einfluss auf die Wahrnehmung hat, da diese vom visuellen System nicht ausgewertet werden. Im Gegensatz dazu geht die „cue integration theory“ davon aus, dass Mono- und Stereoinformationen integriert werden, um die Gesamtwahrscheinlichkeit für eine korrekte Wahrnehmung zu erhöhen. Die „cue integration theory“ nimmt an, dass das visuelle System eine Gesamtunsicherheit für die zur Handlungsausführung benötigten Tiefenreize berechnet.

In Hinblick auf motorische Handlungen könnte diese Gesamtunsicherheit in Form eines Sicherheitspuffers, z. B. in der Griffweite, wirksam

werden. Genau wie Knill [Knill, 2005] macht Keefe darauf aufmerksam, dass „cue integration“-Modelle lediglich für reine Wahrnehmungsaufgaben untersucht wurden, jedoch nicht für visuell-motorische Handlungen.

Zum Nachweis ihrer Annahmen führten Keefe et al. mehrere Experimente durch, in denen sie zwischen rein perzeptuellen Wahrnehmungsaufgaben und motorischen Aufgaben unterschieden. Im Ergebnis zeigte sich bei den reinen Wahrnehmungsaufgaben, dass die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der Wahrnehmung von der bereitgestellten Informationsmenge (weniger Tiefenreize = größere Fehler) sowie von der Entfernung der Sehaufgabe abhängt. Beispielsweise zeigten Keefe et al., dass die Wahrscheinlichkeit für Wahrnehmungsfehler beim Stereosehen mit größerer Entfernung ansteigt. Dies ist einleuchtend, da die Disparität beim Stereosehen mit zunehmender Entfernung abnimmt. Aus den Ergebnissen von Keefe et al. wird deutlich, mit welcher Präzision das visuelle System monokulare und binokulare Reize verknüpft.

Würde sich das visuelle System allein auf Stereoreize verlassen, würden mit zunehmender Entfernung mehr Wahrnehmungsfehler auftreten, da die Verlässlichkeit von Stereoreizen in der Entfernung einbricht. Würde sich das visuelle System hingegen allein auf monokulare Reize verlassen, würde sich mit zunehmender Entfernung ebenfalls eine größere Fehlerrate einstellen, da diese ebenfalls mit steigender Entfernung weniger verlässlich werden. Allerdings weisen monokulare Tiefenreize bei weitem keinen so starken Einbruch auf wie Stereoreize [Keefe et al., 2011]. Um die Fehlerwahrscheinlichkeit zu kompensieren vereint das visuelle System beide Reize in geschickter Weise.

Bei der motorischen Reizintegration stellten Keefe et al. im Wesentlichen dieselben Ergebnisse fest, wie bei der eben beschriebenen rein visuellen Reizintegration. Eine größere Unsicherheit in der Tiefenwahrnehmung wurde hier durch die Vergrößerung der Griffweite bei einer Greifaufgabe quantifiziert.

Die wichtigste Erkenntnis der Studie ist demnach, dass das visuelle System sowie das visuell-motorische System sich beim Greifen bzw. der Wahrnehmung nicht allein auf Stereoreize verlassen, sondern Monoinformationen einen deutlichen Anteil an der Unsicherheit und am Sicherheitspuffer haben. Weiterhin stellt Keefe fest, dass die motorische Handlung bzw. die Wahrnehmung von der Unsicherheit der Einzelreize sowie der Tätigkeit (perzeptuell vs. motorisch) abhängen.

Als letzte Studie zur Reizintegration sei auf die Ergebnisse von Watt und Bradshaw verwiesen [Watt und Bradshaw, 2000]. In ihrer Studie hatten Probanden die Aufgabe, Objekte unterschiedlicher Größe und Entfernung zu greifen. Die Greif- und Hinlangbewegung wurde dabei via „motion tracking“ von einer Infrarotkamera aufgezeichnet. Watt und Bradshaw unterschieden die folgenden vier Versuchsbedingungen: beleuchtet mono, beleuchtet stereo, unbeleuchtet mono, unbeleuchtet stereo. In den Versuchsbedingungen ohne Beleuchtung wurde die Aufgabe in völliger Dunkelheit durchgeführt, wobei lediglich das Objekt leuchtete und wenige Marker an der Hand. Watt und Bradshaw beobachteten in ihren Versuchen, dass die Entfernung von Stereoinformationen einen Einfluss auf das Greifen hat, nicht jedoch auf das Hinlangen. Außerdem wurde festgestellt, dass bei der Entfernung aller Informationen (Dunkelsituation) zusätzlich die Hinlangkomponente beeinflusst wurde. Hierbei spielte es keine Rolle, ob die Szene monokular oder binokular dargeboten wurde. Darüber hinaus waren

in den unbeleuchteten Situationen die Griffweiten größer als in den beleuchteten Situationen. Trotz der fehlenden Informationen konnten diese Handlungen auch in den Dunkelsituationen zuverlässig durchgeführt werden. Weiterhin wurde beobachtet, dass sich die Griffweite bei der Mono-Bedingung weiter öffnete, als in der Stereo-Bedingung. In Übereinstimmung mit den oben beschriebenen Versuchen resultierte eine Reduzierung der Anzahl von Tiefeninformationen in einer größeren Griffweite.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass neben den oben diskutierten monokularen Reizen weitere Tiefenreize existieren, die zur Tiefenwahrnehmung beitragen. Nach Schober stellen insbesondere folgende Reize ein Hilfsmittel für das einäugige Raumsehen dar [Schober, 1953]:

- Sehgröße und scheinbare Größe bekannter Dinge
- Teilweise Verdeckung von Gegenständen durch davorstehende
- Verteilung von Licht und Schatten
- Anordnung der Einzelheiten im Sehraum
- Verhalten von Objekten bei Bewegung
- Akkommodation
- Sichtverhältnisse der Luft
- Farbenverteilung
- Perspektive

Zusammenfassung der Kernaussagen:

1. Die Kernaussage des Abschnittes „Schlagschatten der eigenen Gliedmaßen und motorische Aufmerksamkeit“ lautet, dass kongruente und örtlich-zeitlich korrelierte Schlagschatten der eigenen Gliedmaßen die Aufmerksamkeit auf das ausführende Körperteil lenken.
2. Die Kernaussage des Abschnittes „Schlagschatten und Schattierungen von Objekten als Affordanzen“ lautet, dass Schlagschatten und Schattierungen handlungsrelevante Informationen beinhalten, dabei handelt es sich vorwiegend um Tiefeninformationen.
3. Die Kernaussage des Abschnittes „Reizintegration“ lautet, je mehr Tiefeninformationen vorliegen, desto kleiner ist der Sicherheitspuffer, der bei der Handlungsausführung eingeplant wird.

Im ersten Abschnitt wurde gezeigt, dass Schlagschatten der eigenen Gliedmaßen die Aufmerksamkeit auf das Schatten werfende Körperteil lenken und die Reaktionsfähigkeit dieses Körperteils erhöhen.

Im zweiten Abschnitt wurde gezeigt, dass Schlagschatten und Schattierungen handlungsrelevante Informationen über extrinsische und intrinsische Objekteigenschaften beinhalten und somit als Affordanzen verstanden werden können, welche Handlungsaufforderungen geben. Die „two visual systems theory“ vermutet weiterhin, dass man sich diesen handlungsrelevanten Reizen nicht unbedingt bewusst werden muss.

Die Studien des dritten Abschnittes zur Reizintegration zeigen, dass Monoinformationen wie Schatten und Schattierungen einen Einfluss auf die Handlungsausführung haben.

Überträgt man die Ergebnisse der Studien von Keefe et al., Knill sowie Watt und Bradshaw auf die Bedeutung von Schatteninformationen für die motorische Handlungsausführung, so kann davon ausgegangen werden, dass Schlagschatten und Schattierungen zusätzliche Tiefeninformationen darstellen, welche die Gesamtunsicherheit bei der Tiefenwahrnehmung reduzieren. Eine Hinzugabe von Schatteninformationen müsste sich demnach in einer reduzierten Griffweite äußern (geringerer Sicherheitspuffer in der Handlungsausführung). Die reduzierte Griffweite könnte sich in einer kürzeren Ausführungsdauer bei visuell-motorischen Arbeitsaufgaben widerspiegeln. Andererseits müsste eine Reduktion von Tiefeninformationen (eine Entfernung von Schlagschatten und Schattierungen) in einer größeren Griffweite resultieren. Eine größere Griffweite könnte eine längere Ausführungsdauer bei visuell-motorischen Arbeitsaufgaben zur Folge haben. Hinsichtlich des Auftretens von Mehrfachschatten kann die Vermutung angestellt werden, dass diese das „shadow correspondence problem“ verletzen. Aufgrund der Unnatürlichkeit von Mehrfachschatten könnte dem visuellen System die Zuordnung des Schlagschattens zum Schatten werfenden Objekt misslingen. Daraufhin würde das visuell-motorische System diese Schatteninformationen ignorieren, was wiederum einer Reduktion von Tiefeninformationen gleichkommen würde und in einer verschlechterten visuell-motorischen Leistung resultiert.

Durch Lichtrichtung und Schattigkeit verursachter visueller Diskomfort bei Leseaufgaben

Zielstellung dieses Abschnittes ist es darzulegen, dass Lichtrichtung und Schattigkeit unmittelbaren Einfluss auf den visuellen Diskomfort haben können. Am Beispiel der Mehrfachschattenbildung soll demonstriert werden, dass bestimmte Merkmale von Mehrfachschatten Auslöser von visuellem Diskomfort sein können. Kuo et al. [Kuo et al., 2011]

machen darauf aufmerksam, dass die Mehrfachschattenbildung einen „signifikanten Einfluss auf das menschliche Sehvermögen hat“ (S. 233). Sie stellen fest, dass Mehrfachschatten über eine längere Betrachtungsdauer hinweg Augenermüdung und „Geisterbilder“ hervorrufen (S. 234). Auch Wu et al. [Wu et al., 2011] berichten von visuellem Diskomfort verursacht durch LED-Mehrfachschatten. Eine wissenschaftlich fundierte Begründung für diese anekdotischen Berichte liegt bisher nicht vor. Daher soll in den nachfolgenden Abschnitten ein Begründungsansatz formuliert werden.

In wahrnehmungspsychologischen Experimenten konnte gezeigt werden, dass die allgemeine Bevölkerung bestimmte Muster und Bilder als unkomfortabel empfindet [O’Hare und Hibbard, 2011], [Fernandez und Wilkins, 2008]. Beispielsweise können periodische Muster aus Streifen, ähnlich wie sie bei Mehrfachschatten auftreten, Kopfschmerzen, Unschärfe und Bewegungszusammenbrüche [Cohn und Lasley, 1990] hervorrufen. Darüber hinaus können Text sowie bestimmte Farbkombinationen und flimmernde Muster visuellen Diskomfort verursachen [Wilkins, 2015]. In verschiedenen Untersuchungen wurde herausgefunden, dass dabei die Ortsfrequenz, der Kontrast und die Größe des Musters den visuellen Diskomfort bestimmen. Der physikalische Parameter der Ortsfrequenz beschreibt, wie stark sich eine Eigenschaft (z. B. die Leuchtdichte) über eine bestimmte Strecke/Fläche verändert. Generell weisen Bilder mit feinen Details und scharfen Kanten einen größeren Anteil an höheren Ortsfrequenzen auf. Bilder in denen sich die Eigenschaften langsam über eine Fläche verändern (grobe ausgedehnte Details) weisen eher einen geringeren Anteil an hohen Ortsfrequenzen auf.

Feine Details sind demnach durch eine hohe Ortsfrequenz gekennzeichnet und gröbere Veränderungen durch niedrigere Ortsfrequenzen. Die Ortsfrequenz kann in Zyklen pro Bild oder Zyklen pro Grad Sehwinkel (cpd) beschrieben werden.

Wilkins erläutert, dass das visuelle System an natürliche Bilder angepasst sei [Wilkins, 2015]. Statistische Bildanalysen haben ergeben, dass natürliche Bilder (z.B. Naturszenen) eine charakteristische, immer wiederkehrende Bildstatistik aufweisen. Diese Statistik betrifft die Verteilung der im Bild enthaltenen Ortsfrequenzen mit ihren dazugehörigen Amplituden. Wilkins beschreibt, dass in natürlichen Bildern die Bildkomplexität über der Ortsfrequenz konstant bleibt [Wilkins, 2015]. Dies bedeutet, dass der Kontrast (die Amplitude) bei feineren Details (hohen Ortsfrequenzen) absinkt. Dieser Abfall der Amplitude ist proportional zum Kehrwert der Ortsfrequenz ($1/f$). Wenn man die Ortsfrequenzen eines natürlichen Bildes über der Amplitude in einem Diagramm in log-log-Koordinaten aufträgt, dann ergibt sich eine fallende Gerade mit einem Anstieg von 1 [O'Hare und Hibbard, 2011]. Einer Reihe von Studien zur Folge ist das visuelle System darauf optimiert, Bilder mit einer $1/f$ -Verteilung zu decodieren.

Wilkins macht weiterhin darauf aufmerksam, dass visueller Diskomfort besonders dann auftreten kann, wenn die Statistik eines retinalen Bildes, von der Statistik eines natürlichen Bildes, abweicht. In einer Studie von O'Hare und Hibbard [O'Hare und Hibbard, 2011] wurden gezielt Bilder erzeugt, welche von der $1/f$ -Statistik abwichen und eine Konzentration von Ortsfrequenzen in bestimmten Frequenzbereichen aufwiesen. Dabei wurden die Auswirkungen auf den visuellen Diskomfort studiert. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass der

empfundene visuelle Diskomfort nicht allein von einer Abweichung von der natürlichen Verteilung abhängt, sondern zusätzlich von der Ortsfrequenz. Auch Juricevic et al. [Juricevic et al., 2010] zeigten, dass andere Anstiege, welche von der $1/f$ -Verteilung abweichen, den visuellen Diskomfort begünstigen. Gemäß der Aussagen von Juricevic et al. vergrößerte sich der visuelle Diskomfort für größere sowie kleinere Anstiege als 1.

Wilkins et al. [Wilkins et al., 1984] stellten fest, dass eine Konzentration von Ortsfrequenzen in einem Bereich zwischen 2-8 Zyklen pro Schwinkel als unkomfortabel empfunden wird. Fernandez und Wilkins [Fernandez und Wilkins, 2008] fanden heraus, dass eine Konzentration von Ortsfrequenzen um 3 Zyklen pro Schwinkel besonders zum visuellen Diskomfort beitragen. Außerdem machen Fernandez und Wilkins darauf aufmerksam, dass in diesem Frequenzbereich die Wahrscheinlichkeit für epileptische Anfälle bei visuell empfindlichen Personen erhöht wird. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der empfundene visuelle Diskomfort mit einer Abweichung von der natürlichen Verteilung, den dominanten Ortsfrequenzen sowie dem Kontrast erklärt werden kann. Die Autoren betonen, dass diese Ergebnisse nicht allein auf klinische Gruppen beschränkt werden können, sondern die allgemeine Bevölkerung betreffen.

Die physiologische Basis für die dargestellten Erkenntnisse bildet die Kanaltheorie nach Campbell und Robson [Campbell und Robson, 1968]. Nach Campbell und Robson existieren im visuellen Nervensystem Bereiche, welche selektiv sensitiv für bestimmte Bandbreiten von Ortsfrequenzen sind. Dabei reagieren spezialisierte Neuronen und rezeptive Felder nur auf bestimmte Ortsfrequenzintervalle. Die Arbeitsweise des visuellen Systems kann

mit Kanälen oder Filtern verglichen werden, welche nur bestimmte Ortsfrequenzen verarbeiten [Campbell und Robson, 1968].

Umfangreiche wissenschaftliche Untersuchungen haben ergeben, dass die Bilder auf der Netzhaut nicht ausschließlich nach geometrischen Eigenschaften decodiert werden, sondern ebenfalls anhand von Ortsfrequenzen [Harvey et al., 1983]. Nach Harvey et al. stellt die Ortsfrequenz einen wichtigen Faktor für die Wahrnehmung von Sehreizen dar. Die interne Repräsentation eines visuellen Reizes kann mit einer Zerlegung des Reizes in unterschiedliche Ortsfrequenzen, Kontraste, Orientierungen und Phasen erklärt werden. Eine beispielhafte Dekomposition eines Bildes in die vorherrschenden Ortsfrequenzen mithilfe der Fouriertransformation ist in den Tabellen 2.1, 2.2 und 2.3 dargestellt. Bei der visuellen Wahrnehmung entscheidet die Absicht einer „Sehhandlung“, welche dieser Frequenzskalen ausgewertet wird. Soll im Notfall das Gebäude über einen mit Sicherheitsbeleuchtung beleuchteten Fluchtweg verlassen werden, so wird das visuelle System eine grobe Frequenzskala auswerten, da genaue Details für das Verlassen des Gebäudes nachrangig sind. Demgegenüber sind für einen Uhrmacher sehr kleine Details von Bedeutung, was die Auswertung feiner Frequenzskalen erfordert.

Die Ursache für das Auftreten von visuellem Diskomfort bei unnatürlichen Bildern könnte in dieser Arbeitsweise des visuellen Systems begründet liegen. Nach Field sind die Bandbreiten der Frequenzkanäle im visuellen System auf natürliche Bilder angepasst [Field, 1994]. Bei Bildern mit einer $1/f$ -Statistik wird über alle Kanäle dieselbe Informationsmenge transportiert. Im Unterschied dazu werden bei Bildern, die von der Statistik abweichen, unterschiedliche Informationsmengen transportiert. Diese Ineffizienz bei der Reizverar-

Tabelle 2.1: Bestimmung dominanter Ortsfrequenzen in Linienmustern



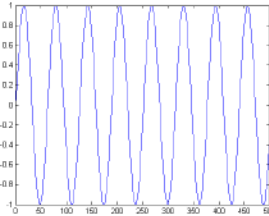
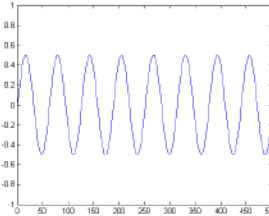
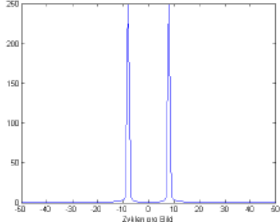
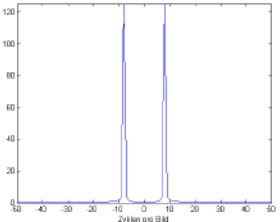
Funktion	$\sin(x)$	$0.5 \sin(x)$
Grating		
horizontaler Helligkeitsverlauf		
Amplitudenspektrum		

Tabelle 2.2: Tabellenfortführung: Bestimmung dominanter Ortsfrequenzen in Linienmustern

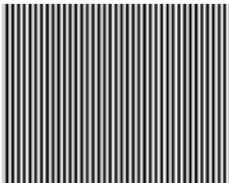
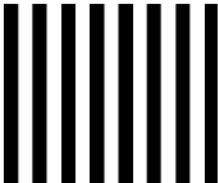
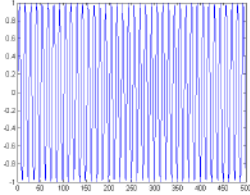
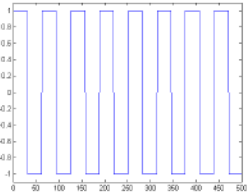
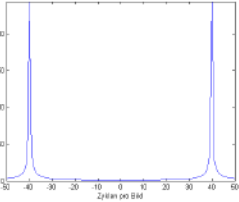
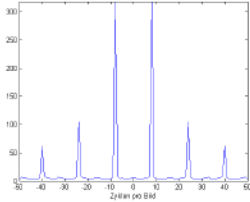
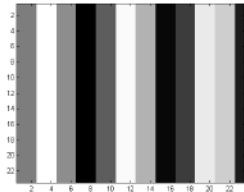
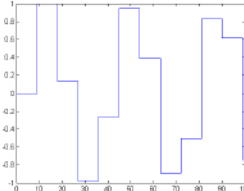
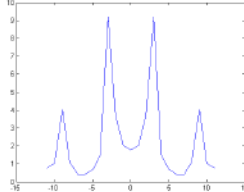
Funktion	$\sin(5x)$	Rechteck
Grating		
horizontaler Helligkeitsverlauf		
Amplitudenspektrum		

Tabelle 2.3: Tabellenfortführung: Bestimmung dominanter Ortsfrequenzen in Linienmustern

Funktion	Sinusstufen
Grating	
horizontaler Helligkeitsverlauf	
Amplitudenspektrum	

beitung kann ein metabolisches Ungleichgewicht im Gehirn erzeugen [Wilkins, 2015]. Betrachtet man die Verteilung der neuronalen Antwortrate auf der Netzhaut, dann zeigt sich eine Ungleichverteilung [O’Hare und Hibbard, 2011]. Während einige Neuronen stark aktiviert werden, bleiben andere passiv. Die Signalverarbeitung wird komplexer und erzeugt einen größeren metabolischen Aufwand im Gehirn. Wilkins [Wilkins, 2015] stützt die Vermutungen auf fMRI-Studien in denen gezeigt wurde, dass sich der Sauerstoffgehalt des Blutes, welches den visuellen Cortex erreicht, mit der Bildstatistik verändert.

Weiterhin wird vermutet, dass eine Konzentration um 3 Zyklen pro Sehwinkel die neuronalen Reaktionen verstärken [O’Hare und Hibbard, 2011] und eine besonders starke Erregung stattfindet. Diese Erkenntnisse zum visuellem Diskomfort stehen im Einklang mit Untersuchungen zur Hirnaktivität bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen. Delplanque et al. [Delplanque et al., 2007] verweisen auf ERP-Studien (event-related potentials), welche eine starke Abhängigkeit der dargebotenen Ortsfrequenz aufweisen [Baas et al., 2002], [Kenemans et al., 2000]. Auch in fMRI-Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass bestimmte Hirnareale für diese Ortsfrequenzen eine erhöhte Empfindlichkeit aufweisen [Singh et al., 2000].

Da es sich bei Mehrfachschatten um ein periodisches Muster handelt, welches sich gut mit dem physikalischen Faktor der Ortsfrequenz beschreiben lässt und dieser eine direkte Verbindung zum visuellen Diskomfort besitzt, wird vermutet, dass anhand der dominanten Ortsfrequenz eines Mehrfachschattenmusters, das Risiko für das Auftreten von visuellem Diskomfort abgeschätzt werden kann. Die Ortsfrequenz eines Mehrfachschattenmusters beschreibt die „Anzahl der Kanten“ bzw.

„Schattenstufen“ pro Grad Sehwinkel. Sehr feine und dichte Mehrfachschaten sind durch eine hohe Ortsfrequenz gekennzeichnet, wohingegen ausgedehnte Mehrfachschaten durch eine geringe Ortsfrequenz charakterisiert werden können. Es wird vermutet, dass Mehrfachschaten mit dominanten Ortsfrequenzen zwischen 2-8 Zyklen pro Sehwinkel (gemäß [Wilkins et al., 1984], [Fernandez und Wilkins, 2008]) mit einem höheren Risiko für visuellen Diskomfort einhergehen.

3 Praxisteil: Wirkung von Lichtrichtung und Schattigkeit im Laborversuch

3.1 Darstellung der Teilversuche

3.1.1 Versuchsübergreifende Methodik

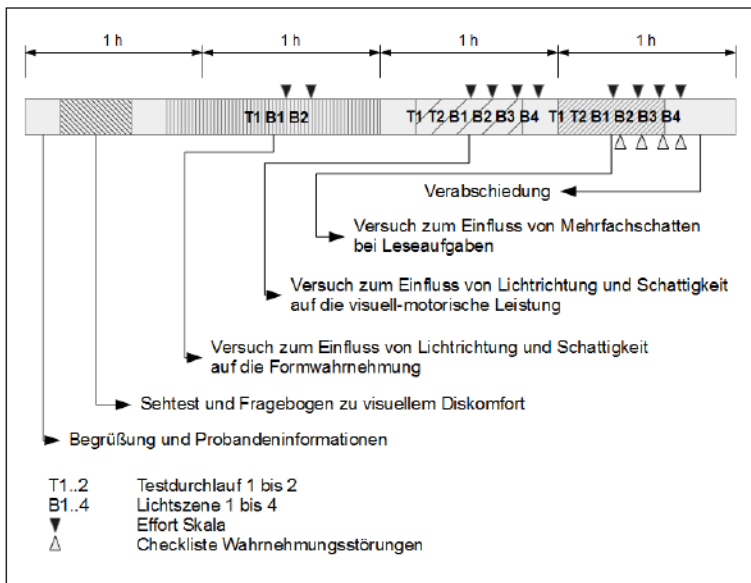


Abbildung 3.1: Versuchsablauf

Im Folgenden sollen wiederkehrende Methoden und Versuchsbedingungen der Teilversuche des Praxisteils zusammengefasst werden. Alle Teilversuche wurden in einem experimentellen Laborsetting untersucht. Die Experimente wurden als Wiederholungsmessungen (repeated measures) durchgeführt, wobei jede Versuchsperson alle

Versuchsbedingungen in randomisierter Reihenfolge durchlief. Die Studie setzte sich aus drei Testbatterien zusammen (Abbildung 3.1). Insgesamt wurde für jeden Versuchsteilnehmer eine Versuchsdauer von ca. 3,5 bis 4 Stunden eingeplant. Für Ihre Teilnahme erhielten die Probanden eine Aufwandsentschädigung von 40 €. Jede der Testbatterien umfasste eine andere Arbeitsaufgabe für den Versuchsteilnehmer. Alle Testbatterien wurden bei unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen mehrfach durchlaufen, wobei Lichtrichtung und Schattigkeit systematisch variiert wurden.

Raumlayout und allgemeine Versuchsbedingungen:

Die Versuche dieses Forschungsprojektes wurden im Technikum der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin in Dortmund (Friedrich-Henkel-Weg 1-25) durchgeführt. Der Versuchsstand befand sich in einem, als Akustiklabor genutzten, Messraum, welcher mit einer leichten akustischen Dämmung ausgekleidet war (Abmessungen: 8 m x 6 m x 4 m). Aufgrund der Tatsache, dass die akustische Wahrnehmung auch andere Wahrnehmungsmechanismen beeinflusst (z. B. Orientierung), konnten bei einer Versuchsdauer von 3,5-4 Stunden in dem reflexionsarmem Raum, Wechselwirkungen und Einflüsse auf Wahrnehmung und subjektiv erlebte Anstrengung nicht ausgeschlossen werden. Andererseits wurden dadurch akustische Störungen während der Versuchsdurchführung vermieden. Der Versuchsraum war mit einer zugluftfreien Klimaanlage ausgestattet, welche für ein behagliches Raumklima optimiert wurde. Vor und während der Versuche wurden stets Beleuchtungsbedingungen gewährleistet, welche ein sicheres Begehen des Versuchsraums ermöglichten. Aufgrund der Blickrichtung der Probanden sowie der großen Anbringungshöhe der Leuchten konnten Blendung sowie eine Schädigung der Netzhaut durch thermische Strahlung oder Blaulichtgefährdung der gerichteten LED-Beleuchtung

ausgeschlossen werden. Die Beleuchtung hatte eine ähnlichste Farbtemperatur von ca. 4000 K, akute aktivierende Effekte sowie Einflüsse auf die innere Uhr und das circadiane System waren nicht zu erwarten. Während des gesamten Versuchszeitraumes wurde der Proband durch den Versuchsleiter beaufsichtigt, welcher sich im Vorraum befand. Der Vorraum hatte eine direkte Sichtverbindung in den Versuchsraum und zum Probanden. Vom Vorraum wurde die Beleuchtungsanlage sowie der Fortgang des Versuchs beobachtet und gesteuert.

Zur Fixierung der Beobachterposition wurde bei den Versuchen eine Kinnstütze verwendet, dabei konnte es zu einer erhöhten Belastung des Nacken- und Schulterbereichs kommen. Ein individuell einstellbarer Bürostuhl sollte die Belastungen minimieren. Darüber hinaus sah der Versuchsplan zahlreiche Pausen vor, in denen der Kopf nicht auf der Kinnstütze abgestützt werden musste. Während dieser Zeiträume erläuterte der Versuchsleiter die Teilaufgaben bzw. der Proband füllte Fragebögen aus.

Ein schematisches Raumlayment ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Teilversuche wurden an drei unterschiedlichen Stationen durchgeführt, welche in Abbildung 3.2 mit roten Punkten gekennzeichnet sind.

Allgemeine Beleuchtungsbedingungen und Beleuchtungssystem:

Eine detaillierte Beschreibung des verwendeten Beleuchtungssystems mit zahlreichen Messdaten und Simulationen wurde im Rahmen einer Abschlussarbeit zum Weiterbildungsstudiengang „Lichtanwendung“ an der TU Ilmenau angefertigt [Krüger, 2014b]. Aus diesem Grund soll in dieser Arbeit nur auf die wichtigsten Eckdaten des Beleuchtungssystems eingegangen werden.

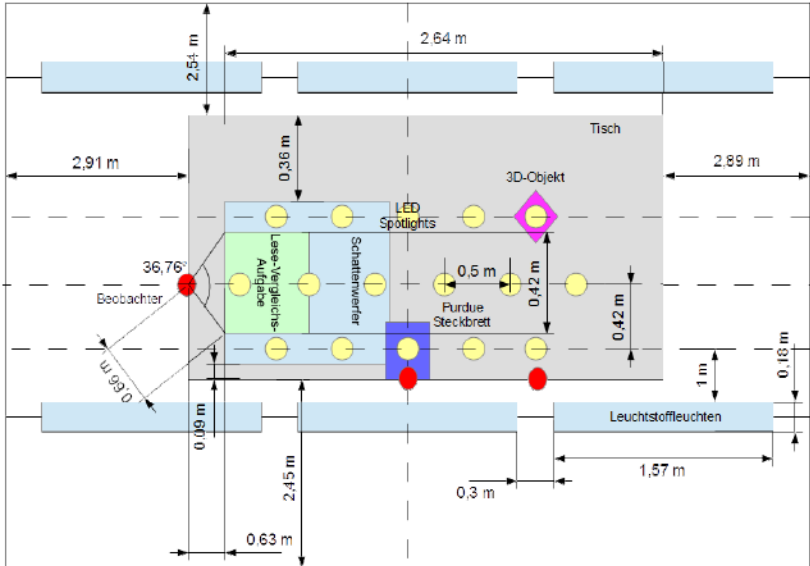


Abbildung 3.2: Raumlayout

Die wichtigste Anforderung an das Beleuchtungssystem betrifft die Möglichkeit einer dynamischen Veränderung von Dimmzustand, Anteil an gerichtetem und diffusem Licht sowie Lichtrichtung. Das System wurde daher aus zwei Komponenten aufgebaut. Der diffuse Beleuchtungsanteil wurde mit 6 Leuchtstoffleuchten realisiert, die jeweils zwei T8-Leuchtstoffröhren beinhalten (OSRAM LumiLux T8 L 58 W/840, 5200 lm). Über ein DALI-Vorschaltgerät können die Leuchten in ihrem Dimmzustand angepasst werden. Für die gerichtete Beleuchtung wurden Leuchten des Herstellers RCL (Typ DR8) verwendet und in hexagonaler Anordnung angebracht (siehe Abbildung 3.2). Bei der Leuchte handelt es sich um ein LED-Spotlight, welches an Stromschienen befestigt und über das DMX-Protokoll im

Dimmzustand verändert werden kann. Eine Besonderheit der verwendeten LED-Strahler besteht darin, dass diese unabhängig voneinander rotiert und gekippt werden können. Dies ermöglicht ein gezieltes Setzen von Anstrahlpunkten sowie die kontrollierte Überlagerung von Lichtkegeln. Durch schrittweise Rotation der LED-Leuchte in 0,7-Grad-Schritten wurde unter Beachtung der photometrischen Grenzentfernung (ca. 3 m) die Lichtstärkeverteilungskurve ermittelt (siehe Abbildung 3.3). Aus den Messdaten der Lichtstärkeverteilungskurve kann ein Halbwertswinkel von ca. $5,1^\circ$ abgeleitet werden. Der vom Hersteller angegebene Abstrahlwinkel von 11° kann damit als hinreichend genau angenommen werden. Darüber hinaus wurde das Spektrum der LED-Leuchten vermessen (Abbildung 3.4). Für die notwendigen Beleuchtungsstärkemessungen bzw. die Messungen zur spektralen Zusammensetzung wurden Messgeräte der Firma Gigahertz verwendet (Gigahertz BTS256-E, Gigahertz X1-1 Optometer). Alle Leuchten wurden über Stromschienen (EUTRAC) mit der Steuerung (EUTRAC NetComposer) verbunden. Zur Befestigung der Stromschienen wurde ein Traversensystem aufgebaut. Die Stromschienen bieten die Möglichkeiten einer unkomplizierten Anpassung von Anordnung und Abstand der Leuchten. Die Leuchten waren in einer Höhe von 2,7 m (LED-Leuchten) bzw. 2,8 m (Leuchtstofflampen) über dem Bereich der Schaufgabe befestigt (siehe Abbildung 3.11). Abbildung 3.5 verdeutlicht den Aufbau des Beleuchtungssystems. Beim Betrachten von Abbildung 3.5 wird deutlich, dass das System auf Mikro- und Makroebene als LED-Array verstanden werden kann. Das LED-Array innerhalb der LED-Spotlights diente der Erzeugung von Mehrfachschatten bei Aufgaben mit großer Schattenwerferhöhe (z. B. im Versuch zum Einfluss von Mehrfachschatten bei Leseaufgaben). Dahingegen diente die hexagonale Anordnung der LED-Leuchten auf den Stromschienen der Erzeugung von Mehrfachschatten bei

Teilversuchen mit geringer Schattenwerferhöhe (z. B. im Versuch zum Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf visuell-motorische Leistung). Entsprechende Gesetzmäßigkeiten zur Entstehung von Mehrfachschatten werden in Kapitel 4.2 erläutert.

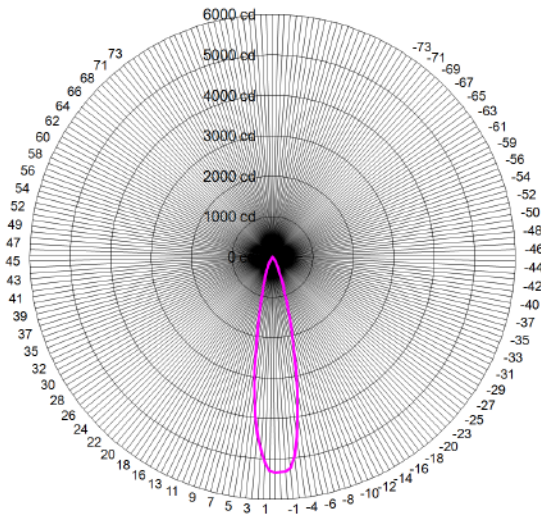


Abbildung 3.3: Lichtstärkeverteilungskurve der LED-Leuchten

Mit diesen vielfältigen Steuerungsmöglichkeiten sollte sichergestellt werden, dass die folgenden charakteristischen Merkmale eines Schattens gezielt verändert werden konnten:

- Tiefe des Schattens: Die Tiefe eines Schattens beschreibt die „Größe des Kontrastes zwischen dem beschatteten und dem unbeschatteten Teil einer Fläche, also einen aus den Beleuchtungsstärkewerten an verschiedenen Stellen gebildeten Quotienten“ [Lingenfelser, 1928] (S. 316).

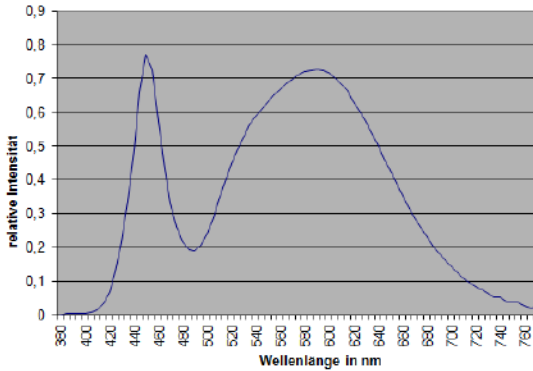


Abbildung 3.4: Spektrum der LED-Leuchten

- Anzahl der Schatten: Nach Haeger setzen Doppelschatten bzw. Mehrfachschatten mindestens zwei Lichtquellen voraus. Die Anzahl der Schatten ergibt sich damit aus der Anzahl der Lichtquellen. Mehrfachschatten entstehen dadurch, „dass sich zwei (bzw. mehrere) Einzelschatten in ihrer ganzen oder teilweisen Ausdehnung einander überdecken, d. h. wenn sie dasselbe Raum- oder Flächenstück einnehmen“ [Haeger, 1975] (S. 17).
- Schattenschärfe bzw. Leuchtdichtegradient: Nach Lingenfelder „versteht man unter der Schärfe des Schattens den Verlauf der Beleuchtungsstärke auf einer teilweise beschatteten Fläche“ [Lingenfelder, 1928] (S. 316/317). Dabei lassen sich zwei Fälle unterscheiden, „ein stetiger oder ein unstetiger Übergang von höheren zu niedrigeren Werten der Beleuchtungsstärke“. Weiche Schatten sind durch stetige Übergänge gekennzeichnet, wohingegen Mehrfachschatten einen stufenförmigen, unstetigen Übergang aufweisen.



Abbildung 3.5: Beleuchtungssystem

Neben der systematischen Veränderbarkeit der aufgeführten Schattenparameter wurden weitere Anforderungen an das Beleuchtungssystem gestellt, welche aus der Technischen Regel für Arbeitsstätten ASR A3.4 abgeleitet wurden [ASR A3.4, 2011]. Diese Anforderungen sollten auch während der Variation der Schattenparameter erfüllt bleiben, um ungewollte Einflüsse auf die abhängigen Variablen der Teilversuche zu minimieren.

- Die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke ($U_0 = \frac{E_{min}}{E}$) im Bereich der Sehaufgabe durfte einen Mindestwert von 0,6 nicht unterschreiten.
- Der Mindestwert der Beleuchtungsstärke (nach ASR A3.4) im Bereich der Sehaufgabe sollte 500 lx nicht unterschreiten. Weiterhin

sollte das Beleuchtungsniveau innerhalb der einzelnen Teilversuche zwischen den unterschiedlichen Beleuchtungssituationen nahezu konstant bleiben.

- Die Farbwiedergabe der Leuchten durften einen Farbwiedergabeindex von $R_a = 80$ nicht unterschreiten, weiterhin sollten alle Leuchten dieselbe Farbtemperatur aufweisen.
- Blendung und Schleierreflexionen durch LED-Strahler waren zu vermeiden.
- Das Auftreten von direkt wahrnehmbarem Flimmern und stroboskopischen Effekten sollte insbesondere bei gedimmter LED-Beleuchtung ausgeschlossen werden.

Aus Kostengründen wurden Anforderungen an die Gleichmäßigkeit im Umgebungsbereich teilweise vernachlässigt. Diffuse Beleuchtungsszenarien erzeugten generell eine höhere Gleichmäßigkeit im Umgebungsbereich als gerichtete Beleuchtungssituationen. Die Einflüsse unterschiedlicher Umgebungsleuchtdichten wurden teilweise durch Restriktion des Gesichtsfeldes minimiert. Beispielsweise wurden Versuchspersonen beim Purdue-Steckbrett-Test gebeten, sich auf den gut ausgeleuchteten Bereich des Steckbretts zu konzentrieren. Weiterhin wurden, beim Versuch zum Einfluss von Mehrfachschatten bei Leseaufgaben, die Anforderungen an die Gleichmäßigkeit im Bereich der Sehaufgabe teilweise verletzt, eine Diskussion dazu ist im Abschnitt 3.1.4 zu finden.

Subjektiv erlebte Anstrengung:

Als Verfahren zur Erfassung des subjektiv erlebten Beanspruchungsempfindens wurde eine visuelle Analogskala nach Eilers et al. verwendet [Eilers et al., 1986]. Die Skala beinhaltete 7 Skalaankerpunkte (von

ausserordentlich anstrengend bis kaum anstrengend). Die Orte der Skalenankerpunkte wurden von Eilers et al. unter Zuhilfenahme der Größenschätz-Methode bereits festgelegt. Ein Exemplar dieser Effortskala ist dem Anhang beigelegt.

Erhebung von Symptomen des visuellen Diskomforts:

Im Rahmen der Vorversuche wurde bei jedem Teilversuch das Auftreten visueller Beschwerden kontrolliert. Bei den Teilversuchen zur Formwahrnehmung und zur visuell-motorischen Leistung ergaben sich keine Hinweise auf visuelle Beschwerden. Aus diesem Grund kam, in den hier dargestellten Hauptversuchen, lediglich im Versuch zur Leseaufgabe bei Mehrfachschaten ein Fragebogen zur Erfassung von Symptomen des visuellen Diskomforts zum Einsatz. Nach einem Screening verschiedener Erhebungsinstrumente (Zusammenstellung nach Rajabi-Vardanjani et al. [Rajabi-Vardanjani et al., 2014]) erschien die Anwendung der Fragebögen nach Conlon et al. am geeignetsten [Conlon et al., 1999]. Die Erhebung des visuellen Diskomforts erfolgte in zwei Stufen. Zunächst wurde im Eingangsfragebogen von jedem Versuchsteilnehmer die allgemeine Neigung zu visuellem Diskomfort im Alltag ermittelt. Dabei wurden somatische Beschwerden, Wahrnehmungs- und Leistungsdefizite bei Lesetätigkeit bzw. bei der Exposition mit unterschiedlichen Lichtquellen erfragt [Conlon et al., 1999]. Ein zweiter Fragebogen, welcher nach jeder Beleuchtungssituation des Teilversuchs zur Leseaufgabe ausgefüllt wurde, erfasste das Auftreten von Wahrnehmungsbeschwerden während des Teilversuchs. Die Anzahl der berichteten Wahrnehmungsstörungen während der Ausführung der Arbeitsaufgabe diente als Maß für den visuellen Diskomfort. Hintergrund dieser Vorgehensweise war die Annahme, dass Versuchsteilnehmer mit einem stärkeren Hang

zu visuellem Diskomfort eine größere Sensitivität für Effekte von Mehrfachschaten aufzeigen könnten. Beide Fragebögen sind dem Anhang beigelegt.

Probanden:

Zur Anwerbung des Probandenkollektivs wurden Aushänge in Dortmunder Universitäten angebracht. Die Koordinierung und Terminvergabe erfolgte unter Mithilfe des BAuA-Callcenters. Bei der Zusammensetzung des Probandenkollektivs wurde auf eine gleichmäßige Altersverteilung geachtet. Die Ausschlusskriterien für Studienteilnehmer sind nachfolgend aufgeführt.

- Epilepsie- und Migräneneigung oder Photosensitivität
- Beeinträchtigte Sehleistung
- Starke körperliche oder mentale Behinderung
- Schwangerschaft
- Alter unter 18 oder über 35

Die Eignung der Probanden wurde vorab am Telefon erfragt. Als letztes Kriterium zur Auswahl der Studienteilnehmer wurden zwei kurze Sehtests am Tag der Versuchsdurchführung, vor Beginn der Versuche, vorgesehen. Die Tests umfassten einen Sehschärfetest sowie einen Test zur Kontrastempfindlichkeit. Ähnlich wie beim Augenoptiker wurde der Proband beim Sehschärfetest gebeten, kleiner werdende Buchstaben auf einer Sehprobentafel vorzulesen [Snellen, 1862]. Beim Kontrastempfindlichkeitstest [Bach, 1996] (Freiburg Vision Test (FrACT)) wurden die Versuchspersonen gebeten, die Ausrichtung eines Linienmusters zu erkennen. Der Kontrastempfindlichkeitstest

wurde an einem (mit Spyder 3) leuchtdichtekalibrierten EIZO-Bildschirm durchgeführt. Der Test wurde bei fünf unterschiedlichen Ortsfrequenzen (1, 3, 5, 11, 15 cpd) jeweils 24-mal wiederholt. Ein Schwellenkontrast von kleiner 2% wurde für alle Ortsfrequenzen als Teilnahmevoraussetzung festgelegt. Die Tests dienen lediglich zur Kontrolle der gemachten Angaben im Telefoninterview. Insgesamt nahmen 49 Probanden im Alter von 20-35 Jahren am Versuch teil.

Ethik:

Alle Versuche wurden am 02.10.2014 durch die Ethikkommission des Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund (IfADo) bewilligt.

3.1.2 Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf Formwahrnehmung

Hypothese

Die Beleuchtung von Objekten mit komplexen Lichtfeldern (z. B. Array von Lichtquellen) erzeugt einen größeren Fehler bei der Formwahrnehmung als der Einsatz einfacher Lichtfelder (z. B. einzelne Punktlichtquelle bzw. diffuse Lichtquelle).

Versuchsdesign

Im Laborversuch sollte der Einfluss eines komplexen LED-Array-Lichtfeldes auf die Formwahrnehmung in einer realen Beleuchtungssituation untersucht werden. Die Beleuchtungsbedingungen umfassten dazu drei unterschiedliche Lichtszenen (gerichtet, diffus, gerichtet mit Mehrfachschatten). Eine Charakterisierung der Lichtszenen mit Leuchtdichteaufnahmen des Bewertungsobjektes sind in den Tabellen 3.1 und 3.2 zusammengefasst. Bei der Auswahl der Lichtrichtung

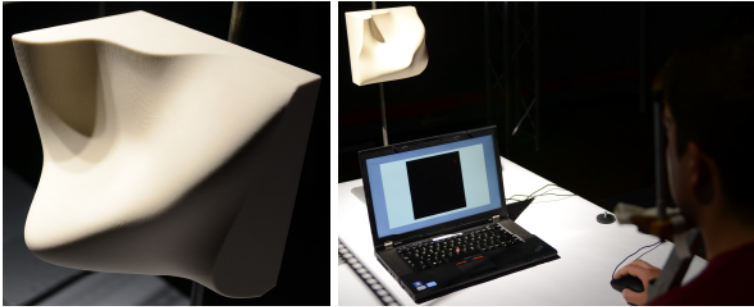
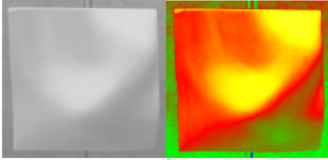
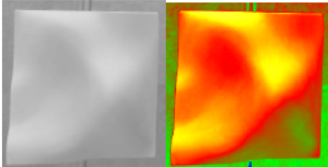
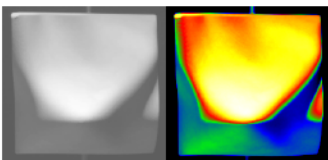
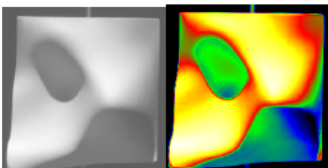


Abbildung 3.6: Versuchsstand mit 3D-Objekt

wurde darauf geachtet, dass neben den Schattierungen auch Eigenschatten auf der Objektoberfläche erzeugt werden. In den Abbildungen der Tabellen 3.1 und 3.2 sind je nach Lichtszene Mehrfachschatten und Einzelschatten auf der Objektoberfläche erkennbar. Die mittlere Leuchtdichte auf der Objektoberfläche betrug in allen Lichtszenen $70\text{-}80\text{cd}/\text{m}^2$. Des Weiteren sind in den Tabellen 3.1 und 3.2 die vertikalen und zylindrischen Beleuchtungsstärken angegeben, welche am Aufstellungsort des Bewertungsobjektes gemessen wurden. Die zylindrische Beleuchtungsstärke wurde näherungsweise aus den Messungen der vertikalen Beleuchtungsstärken in den 4 Raumrichtungen bestimmt ($E_Z \approx \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 E_{vi}$).

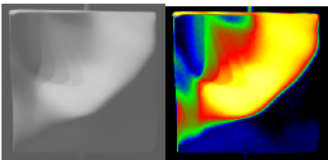
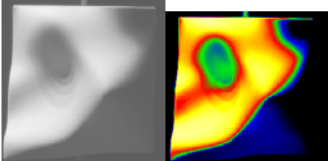
Jede Versuchsperson bewertete dasselbe Objekt in zwei unterschiedlichen Beleuchtungssituationen. Um Erinnerungseffekte zu vermeiden, wurde das Objekt beim zweiten Bewertungsdurchlauf um 90 Grad verdreht. Den Probanden wurde mitgeteilt, dass sie im zweiten Durchlauf ein neues Objekt bewerten würden. Somit ergab sich ein balancierter Messwiederholungsplan mit 2 Wiederholungen.

Tabelle 3.1: Charakterisierung der Lichtszenen

Szene	Kamera- und Leuchtdichtebild	Beschreibung	E_v in lx	E_z/E_h
diffus		diffuse Beleuchtung von Leuchtstoffröhren	305	0,37
diffus		Objekt um 90° gedreht	305	0,37
gerichtet		gerichtetes Licht eines separaten LED Spotlights	155	0,16
gerichtet		Objekt um 90° gedreht	155	0,16

Die zugehörige Leuchtdichteskala ist in Abbildung 4.9 dargestellt

Tabelle 3.2: Tabellenfortführung: Charakterisierung der Lichtszenen

Szene	Kamera- und Leuchtdichtebild	Beschreibung	E_v in lx	E_z/E_h
gerichtet mit Mehrfachschatten		gerichtetes Licht 5 separater LED Punktlichtquellen	188	0,17
gerichtet mit Mehrfachschatten		Objekt um 90° gedreht	188	0,17

Die zugehörige Leuchtdichteskala ist in Abbildung 4.9 dargestellt

Nach Koenderink et al. können bei den Methoden für die Formwahrnehmung zwei Herangehensweisen unterschieden werden [Koenderink J. et al., 2001]. Entweder werden globale oder lokale Formeinschätzungen vorgenommen. Darüber hinaus muss entschieden werden, ob die Tiefe zweier benachbarter Punkte, die Neigung bzw. Orientierung eines Flächenteils oder die Krümmung einer Oberfläche eingeschätzt werden soll. Je nach Herangehensweise haben sich die folgenden drei Methoden¹ bewährt [Koenderink J. et al., 2001]:

- „Gauge figure task“ (wird in den folgenden Abschnitten beschrieben)
- „Pairwise depth-comparison task“: Hierbei sind zwei Punkte auf einer Objektoberfläche markiert und der Beobachter muss im

¹Eine bildliche Darstellung der Methoden ist in [Todd, 2004] zu finden.

Rahmen eines paarweisen Vergleiches entscheiden, welcher der beiden Punkte die größere Tiefe aufweist.

- „Cross-section replica task“: Vergleichbar mit einer auf einen Berggipfel führenden Seilbahn wird dem Beobachter eine Reihe von Punkten entlang einer Geraden (Seilstrecke) angezeigt. Mit einer Höhenanpassung der Punkte entlang dieser Seilstrecke wird durch den Probanden ein eindimensionales Höhenprofil erstellt.

Die Idee hinter den Methoden zur Formerrfassung ist es, eine 3D-Struktur in viele kleine Teile aufzusplitten, wobei jedes einzelne Teil mit einem bestimmten Merkmal beschrieben wird, z. B. Tiefe oder Orientierung [Todd, 2004]. Aus den gewonnenen Daten lassen sich anschließend subjektiv wahrgenommene Oberflächenreliefs berechnen.

Ein Vergleich der unterschiedlichen Methoden ergab eine ähnlich hohe Ergebnisqualität bei allen Methoden [Koenderink J. et al., 2001]. Nach Aussage der Probanden soll es sich bei der „gauge figure task“ um die natürlichste und am einfachsten durchzuführende Aufgabe handeln, daher wurde diese Methode für den Versuch ausgewählt. Ein weiterer Vorteil der „gauge figure task“ ist deren hohe Test-Retest-Reliabilität sowie die erprobte Anwendungsvielfalt bei unterschiedlichsten Formbewertungsaufgaben [Norman et al., 2006]. Weiterhin wurden in den Studien von Mamassian sowie Farley bereits ausführliche Fehlerbetrachtungen zur „gauge figure task“ durchgeführt [Mamassian und Kersten, 1996], [Farley et al., 1995].

Die „gauge figure task“ stammt ursprünglich von Koenderink [Koenderink et al., 1992] und wurde von Wijntjes in einem MATLAB-Programm umgesetzt [Wijntjes, 2012], welches für diesen Versuch zum Einsatz kam. Für den Einsatz in realen Beleuchtungsszenen wurde die „gauge figure task“ ein wenig modifiziert [Krüger, 2013a]. Auf

einem Bildschirm, welcher unter dem realen Objekt platziert wurde (Abbildung 3.6), wurde den Versuchspersonen eine Silhouette des zu bewertenden Körpers dargeboten auf welcher die „gauge figure task“ durchzuführen war. Die Silhouette beinhaltete neben der Außenkontur des Objektes keine weiteren visuellen Informationen über die Objektform (z. B. Schattierungen, Kanten, Texturen). Die Probanden hatten die Aufgabe, an 187 auf dem Bildschirm vorgegebenen Messpunkten eine Messfigur in ihrer Neigung einzustellen. Die Darbietung der Messpunkte erfolgte in randomisierter Abfolge. Bei der Messfigur handelte es sich um eine Kreisfläche mit Normalenvektor, welche durch die Bewegung der Mouse in ihrer Neigung eingestellt werden konnte. Aus der Beobachterposition nahm die Messfigur einen Sehwinkel von ca. $0,4^\circ$ ein. Die Neigung der Messfigur sollte am jeweiligen Bewertungspunkt ungefähr an die Flächenneigung des Objektes in der realen Beleuchtungssituation angepasst werden. Der Proband musste die Formbewertung mittels Blickwechseln zwischen Objekt und Bildschirm durchführen. Zusätzlich zur Formbewertung wurde die subjektiv erlebte Anstrengung mithilfe einer visuellen Analogskala nach Eilers et al. erfasst [Eilers et al., 1986].

Während der Bewertungsaufgabe befanden sich die Probanden im Versuchsraum. Damit bestand für die Probanden die Möglichkeit, Position und Anzahl der Leuchten einer Lichtszene nachzuvollziehen und damit eventuell Annahmen über das vorherrschende Lichtfeld zu treffen.

Bei der Gestaltung des zu bewertenden 3D-Objektes wurde Wert darauf gelegt, dass das Objekt konvexe und konkave Bereiche besitzt sowie Sattelpunkte und Wendestellen aufweist. Das Objekt wurde in CATIA V5R16 als CAD-Modell entworfen und anschließend von einem 3D-

Drucker ausgedruckt. Diese Vorgehensweise bot den Vorteil, dass durch das CAD-Modell ein Referenzmodell mit den realen Oberflächendaten für den Vergleich mit den Probandenergebnissen zur Verfügung stand. Das Objekt hatte die Abmessungen von 18 cm x 18 cm x 18 cm und wurde in einer Entfernung von 1,5 m zum Probanden präsentiert. Die Kopfposition wurde dabei mit einer Kinnstütze fixiert.

Ergebnisse und Interpretation

Um die Ähnlichkeit der subjektiv wahrgenommenen Objektformen mit dem realen Daten des CAD-Modells vergleichen zu können, wurde der root-mean-square error (RMSE) sowie der Determinationskoeffizient R^2 berechnet. RMSE sowie R^2 stellen Maße für die Ähnlichkeit bzw. Abweichung zwischen wahrgenommener Objektform und Modell dar. Ein kleiner RMSE repräsentiert eine hohe Ähnlichkeit, wohingegen ein großer RMSE starke Abweichungen von der Objektform beschreibt. Demgegenüber weist ein großer Determinationskoeffizient auf eine hohe Ähnlichkeit hin. Zur Berücksichtigung von individuellen Unterschieden bei der Tiefenskalierung schlagen Koenderink et al. [Koenderink J. et al., 2001] und Todd [Todd, 2004], für die Berechnung der Determinationskoeffizienten, die Anwendung einer affinen Transformation vor. Diese Empfehlungen wurden in den Berechnungen umgesetzt. Bei der Formwahrnehmung beschreibt die affine Transformation eine Überführung des realen Objektes in ein virtuelles Modell. Diese Transformation ist individuell unterschiedlich. Eine Besonderheit der affinen Transformation liegt darin, dass die geometrischen Verhältnisse gewahrt werden. Beispielsweise bleibt ein Satz von parallelen Linien parallel. Winkel oder Abstände können sich verändern, aber das Verhältnis, in welchem sich diese Veränderungen vollziehen, bleibt konstant. Die affine Transformation beschreibt eine Skalierung (z. B. Vergrößerung oder Verkleinerung). Die affine Trans-

formation kann im Rahmen einer multiplen Regression nachgewiesen werden. Beim Vergleich zweier Oberflächen wird geprüft, ob eine Oberfläche ein skaliertes Abbild der Referenzoberfläche darstellt.

Für die statistische Analyse wurden verallgemeinerte Schätzungsgleichungen zur Anwendung gebracht (lineares GEE-Modell in SPSS 23). Das Modell beinhaltet den RMSE als abhängige Variable sowie die Beleuchtung, den Versuchsdurchlauf und die Objektdrehung als Faktoren. Zusätzlich wurde die subjektiv erlebte Anstrengung als Kovariate in das Modell aufgenommen (siehe Tabellen 3.3 und 3.4).

Tabelle 3.3: Informationen zu kategorialen Variablen

			N	Prozent
Faktor	Beleuchtung	Mehrfachschatten	32	32,65%
		gerichtet	33	33,67%
		diffus	33	33,67%
		Gesamt	98	100%
	Durchlauf	2	49	50%
		1	49	50%
		Gesamt	98	100%
	Objektdrehung	um 90 Grad gedreht	49	50%
		aufrecht	49	50%
		Gesamt	98	100%

Die statistischen Analysen ergaben signifikante Effekte für die Beleuchtung sowie für den Versuchsdurchlauf. Tabelle 3.5 zeigt die Koeffizienten für das Regressionsmodell. Für die Objektdrehung sowie die subjektiv erlebte Anstrengung ergaben sich keine signifikanten Effekte. Obwohl die Probanden vor Beginn der Versuchsdurchläufe mit der Formbewertungsmethode vertraut gemacht wurden, zeigte sich in den anschließenden zwei Versuchsdurchläufen ein signifikanter

Tabelle 3.4: Informationen zu stetigen Variablen

		N	Mini- mum	Maxi- mum	Mittel- wert	Std.- Abw.
Abh. Variable	RMSE	98	0,1618	0,9559	0,4269	0,1768
Kovariate	Subj. Anstren- gung	98	6	177	79,0204	37,1386

Lerneffekt. Weiterhin ergaben paarweise Vergleiche zwischen den Lichtszenen signifikante Unterschiede in der Objektform zwischen der Lichtszene mit dem komplexen Lichtfeld des LED-Arrays (gerichtet mit Mehrfachschatten) und der gerichteten Beleuchtungssituation ($p = 0,001$) sowie der diffusen Beleuchtungssituation ($p = 0,01$). Kein Unterschied zeige sich bei der Formwahrnehmung zwischen gerichteter und diffuser Beleuchtung ($p = 0,717$). Tabelle 3.6 und Tabelle 3.7 illustrieren die Ergebnisse. Ergänzend zu den Darstellungen in Tabelle 3.6 und Tabelle 3.7 sind in Tabelle 3.8 die zugehörigen Daten zur deskriptiven Statistik der Oberflächenfits angegeben.

Interessant ist die Erkenntnis, dass sich durch die Objektdrehung die Formwahrnehmung nicht veränderte. Das entstandene Shading-Muster nach der Objektdrehung kann mit dem Shading-Muster nach einer Lichtrichtungsveränderung von 90° gleichgesetzt werden. Unklar bleibt hierbei allerdings, ob sich die Formwahrnehmung bei seitlichem Lichteinfall, trotz identischen Shading-Musters, verändern würde, wenn das visuelle System eine „von oben scheinende Lichtquelle annimmt“.

Stellt man diese Versuchsergebnisse denen anderer Forschergruppen gegenüber, welche den Einfluss der Lichtrichtung auf die Formwahrneh-

Tabelle 3.5: Parameterschätzer

Parameter	Regressions- koeffizient	Standard- Fehler	Signifikanz
Konstanter Term	0,4572	0,0489	0,0000
Beleuchtung (Mehrfachschatten)	0,0901	0,0351	0,0102
Beleuchtung (gerichtet)	-0,0141	0,0389	0,7174
Beleuchtung (diffus)	0		
Durchlauf 2	-0,1275	0,0267	0,0000
Durchlauf 1	0		
Objektdrehung (gedreht)	-0,0099	0,0281	0,7252
Objektdrehung (aufrecht)	0		
Subjektive Anstrengung	0,0002	0,0005	0,7129

Tabelle 3.6: Subjektiv wahrgenommene Objektformen in Abhängigkeit der Lichtszene

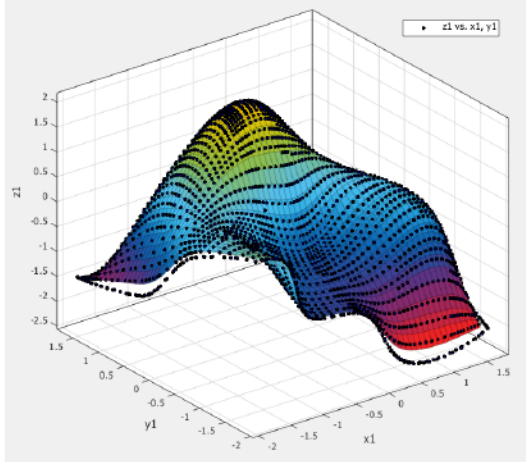
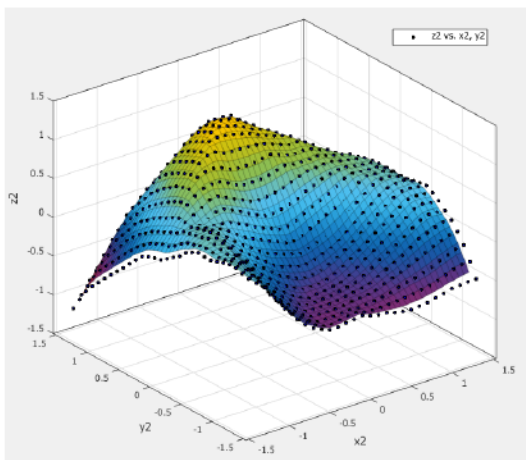
Sze- ne	Gemittelte subjektiv wahrgenommene Objektform	RM- SE Mit- tel- wert	R^2 Mit- tel- wert
CAD Mo- dell		0	1
Diffus		0,39	0,75

Tabelle 3.7: Tabellenfortführung: Subjektiv wahrgenommene Objektformen in Abhängigkeit der Lichtszene

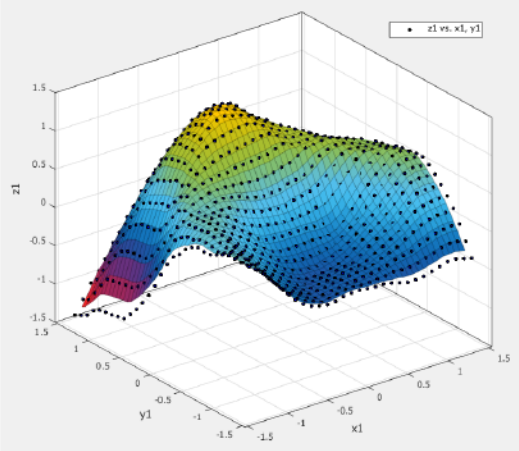
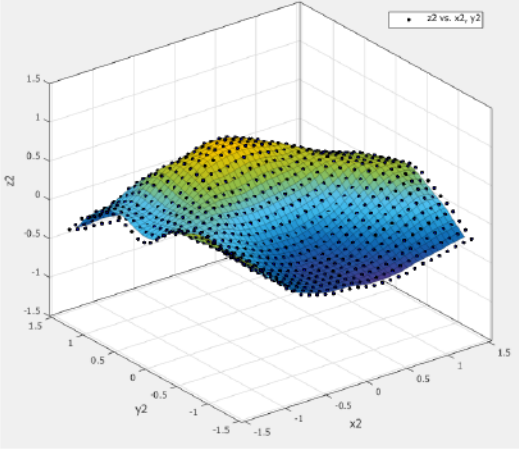
Sze- ne	Gemittelte subjektiv wahrgenommene Objektform	RM- SE Mit- tel- wert	R^2 Mit- tel- wert
Ge- rich- tet		0,40	0,76
Mehr- fach- schat- ten		0,49	0,63

Tabelle 3.8: Deskriptive Statistik zu den Oberflächenfits

	Spannweite	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-Fehler	Std.-Abw.
Diffus	2,37	-1,16	1,21	0,1795	0,0165	0,4796
Mehrfachschatten	1,65	-0,95	0,70	0,0926	0,0105	0,3056
Gerichtet	2,71	-1,39	1,32	0,2039	0,0179	0,5194
Modell	3,68	-1,32	2,36	0,3337	0,0296	0,8601

mung untersucht haben, so stehen diese Ergebnisse im Widerspruch. Durch die Drehung des Objektes entsteht ein anderes Shading-Muster, welches sich auch in den Leuchtdichteaufnahmen von den Tabellen 3.1 und 3.2 widerspiegelt. Trotz des neuen Shading-Musters konnten in diesem Versuch keine Veränderungen in der Formwahrnehmung festgestellt werden. Untersuchungen von Nefs et al. [Nefs et al., 2005] oder Koenderink et al. [Koenderink et al., 1996a], [Koenderink et al., 1996b] zeigten hingegen eine Veränderung der wahrgenommenen Objektform mit der Beleuchtungsrichtung.

Für diese Diskrepanz sind zwei Begründungen denkbar. Einerseits könnten die Veränderungen in der Formwahrnehmung bei den Versuchen von Nefs et al. und Koenderink et al. auf einen Konflikt zwischen der, vom visuellen System angenommenen, Lichtrichtung und der realen Lichtrichtung zurückzuführen sein. In den hier dargestellten Versuchen schien das Licht immer von oben auf das Bewertungsobjekt, wobei die angenommene Lichtrichtung des visuellen Systems mit der realen Lichtrichtung (mutmaßlich) zusammenpassten. Diese Frage ließe sich klären, wenn man im Rahmen eines weiteren Laborversuchs die

Formwahrnehmung eines Shading-Musters bei seitlichem Lichteinfall mit der Formwahrnehmung desselben Shading-Musters bei Lichteinfall von oben vergleicht.

Eine weitere mögliche Begründung für diese Diskrepanzen könnte im Versuchsdesign begründet liegen. In den Untersuchungen von Nefs et al. und Koenderink et al. wurde die Formwahrnehmung anhand zweidimensionaler Bilder untersucht. Koenderink et al. beschreiben diese Bedingungen als „pictorial space“. Ein weiterer besonderer Unterschied in den Versuchsdesigns liegt darin, dass die verwendeten Bilder in den zitierten Studien keine Informationen über das Lichtfeld beinhalteten. Wie im Abschnitt zur Hypothesenherleitung beschrieben, mussten die Probanden Annahmen über das Lichtfeld und die Lichtrichtungsveränderungen treffen, um das unterbestimmte Problem der Formwahrnehmung lösen zu können. Die hier beschriebenen Versuche fanden jedoch unter „full cue conditions“ statt. Die Probanden hatten die Möglichkeit, sich eine Vorstellung über das Lichtfeld zu bilden, da die Leuchten, deren Neigung und Anordnung für die Probanden sichtbar waren. In der Folge musste das visuelle System keine Annahmen über das Lichtfeld treffen, was die Unterbestimmtheit der Formwahrnehmungsaufgabe reduzierte und in einer Formkonstanz resultierte, die invariant von der Lichteinfallrichtung bzw. der Objektdrehung war. Darüber hinaus werden diese Vermutungen gestützt durch Untersuchungen von Christou und Koenderink in denen festgestellt wurde, dass die Formkonstanz bei Veränderungen der Beleuchtungsrichtung sich verbesserte, wenn Interreflexionen und Textur zur den Schattierungen hinzugefügt wurden [Christou und Koenderink, 1997].

Die Erläuterungen machen die Besonderheit des Versuchsdesigns deutlich. In „shape from shading“-Experimenten werden häufig zweidimensionale Reize betrachtet, welche mit Raytracingprogram-

men erzeugt wurden. Dabei werden Randbedingungen wie uniforme Lichtfelder mit parallelen Lichtstrahlen oder ideal Lambert'sche Oberflächen festgelegt [van Doorn et al., 2011b]. Weiterhin bleiben häufig Mehrfachreflexionen aus der Umgebung unberücksichtigt. Diese Restriktionen stellen seltene Sonderfälle der visuellen Umwelt dar. Hingegen wurde im vorliegenden Versuch der Einfluss realer Lichtszenen untersucht.

Weiterhin verdeutlichen die Versuchsergebnisse eine Verschlechterung der Formwahrnehmung bei einem komplexen Lichtfeld mit gerichtetem Licht von mehreren LED-Punktlichtquellen. Die Verschlechterung der Formwahrnehmung geht dabei nicht mit einer höheren Beanspruchung einher. Als Ursache für diesen Effekt kann vermutet werden, dass das Lichtfeld der LED-Arrays zu komplex für das visuelle System ist. Es kann angenommen werden, dass das visuelle System versucht, das Problem der Formwahrnehmung mit einem uniformen Lichtfeld zu erklären [van Doorn et al., 2011b] und dabei Fehler in der Formwahrnehmung entstehen. In der Einleitung wurde auf Studien verwiesen ([Kleffner und Ramachandran, 1992], [Langer und Bülhoff, 2000], [Schofield et al., 2011], [Kartashova et al., 2016]), welche zeigen, dass das visuelle System unter bestimmten Bedingungen eine Standardlichtquelle annimmt. Bekräftigt werden diese Vermutungen durch Untersuchungen von Ostrovski et al. Ostrovski et al. machten darauf aufmerksam, dass das physikalische Lichtfeld auch fehlinterpretiert werden kann und beschreibt, dass Menschen Inkonsistenzen in der Beleuchtung häufig ignorieren [Ostrovsky et al., 2005]. Weiterhin zeigen van Doorn et al., dass die Formwahrnehmung bei rotierenden und deformierten Lichtfeldern beeinträchtigt sein kann [van Doorn et al., 2012]. Auch Kartashova et al. kommen in ihren Untersuchungen zu vergleichbaren Ergebnissen. Kartashova et al.

stellen fest, dass Probanden die grundsätzliche Struktur des Lichtfeldes erkennen, aber subtile Veränderungen wie Interreflexionen vernachlässigen [Kartashova et al., 2016]. Demnach trifft das visuelle System vereinfachte Annahmen über das Lichtfeld und vernachlässigt dabei das Sekundärlichtfeld. Der Studie von Kartashova et al. liegt ebenfalls die Annahme zugrunde, dass Beobachter eine Vorstellung über Lichtrichtung, Intensität und Diffusität der Beleuchtung an einem Punkt im Raum haben. Im Gegensatz zu den hier dargestellten Untersuchungen verfolgten Kartashova et al. einen entgegengesetzten Ansatz, um Annahmen des Beobachters über das Lichtfeld abzuleiten. Versuchspersonen hatten die Aufgabe, an verschiedenen Punkten im Raum die Schattierung einer Kugel einzustellen, bis die Kugel als Teil der Szene erschien. Dabei sollten Lichtrichtung, Intensität und Diffusität berücksichtigt werden. Anhand dieser drei Parameter konnte anschließend das „mentale Lichtfeld“ rekonstruiert werden. Vergleichend wurden das mentale und reale Lichtfeld gegenübergestellt. Im Kontrast zu dem hier vorgestellten Ansatz war die Geometrie des Bewertungsobjektes (Kugel) bekannt. Anhand der subjektiv eingestellten Schattierungen wurden Rückschlüsse auf das mentale Lichtfeld geschlossen. Demgegenüber war beim vorliegenden Versuch die Objektgeometrie unbekannt. Aus der Abweichung der subjektiv wahrgenommenen Objektform von der realen Objektgeometrie wurden Rückschlüsse auf das mentale Lichtfeld abgeleitet. Trotz der Unterschiede im Versuchsdesign bekräftigen sich die Studien in ihren Ergebnissen.

Nicht zuletzt soll an dieser Stelle noch auf die Ergebnisse von Kleffner und Ramachandran eingegangen werden, die feststellten, dass bei Konflikten zwischen widersprüchlichen Formreizen die Tiefenwahrnehmung reduziert wird [Kleffner und Ramachandran, 1992]. Kleffner und Ramachandran konnten zeigen, dass kongruente Schattierungen

von Lichtfeldern einheitlicher Lichtrichtung einen stärkeren Tiefeneffekt hervorriefen als inkongruente Schattierungen von physikalisch unmöglichen Lichtfeldern. Ein ähnlicher Effekt kann qualitativ aus den Abbildungen der Tabelle 3.6 abgelesen werden. Hier zeigt sich eine reduzierte Objektiefe beim komplexen Lichtfeld.

Die Erkenntnisse aus diesem Versuch haben besondere Bedeutung für Tätigkeiten, bei denen es auf eine möglichst realitätsnahe Formwahrnehmung ankommt. Beispielsweise könnten die Erkenntnisse Relevanz für das Modelling von Gesichtern besitzen. Juslen und Tenner machen darauf aufmerksam, dass die Erscheinung und Interpretierbarkeit von Gesichtszügen zwischenmenschliche Beziehungen sowie das Teamwork im Bürokontext beeinflussen können [Juslen und Tenner, 2005]. Auch bei Videokonferenzen spielt das Modelling eine besondere Bedeutung [Boyce et al., 1999]. Darüber hinaus wird in einem aktuellen CIE-Report zum Thema „Review of Lighting Quality Measures for Interior Lighting with LED Lighting Systems“ [CIE, 2013] darauf aufmerksam gemacht, dass für das Modelling von Gesichtern ein Bewertungskriterium benötigt wird. Die hier vorgestellte Methode zur Erfassung der Formwahrnehmung könnte dazu verwendet werden, verschiedene Modelling Indizes miteinander zu vergleichen und gegenüberzustellen. In einem solchen Anwendungsfall müsste zusätzlich zur Formwahrnehmung durch den Beobachter noch die Lichtqualität erfasst werden, die von der beleuchteten Person empfunden wird. Eine solche Vorgehensweise könnte fragebogenbasierte Erhebungsmethoden (z. B. [Veitch et al., 1996], [Boyce et al., 1999]) zum Modelling ergänzen bzw. objektivieren. Für die praktische Beleuchtungsgestaltung kann es von Vorteil sein, dem visuellen System ein einfaches Lichtfeld bereitzustellen, um eine realitätsnahe Formwahrnehmung zu unterstützen.

3.1.3 Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf visuell-motorische Leistung

Hypothese

Beleuchtung, die zu einer einfachen Schattenbildung beiträgt (z. B. Einzelschatten), verbessert die visuell-motorische Leistung im Vergleich zu einer Beleuchtung mit komplexer Schattenbildung (z. B. Mehrfachschatten). Des Weiteren wird von einem Einfluss der Sehbedingung ausgegangen. Es wird angenommen, dass Interaktionen der Beleuchtung mit den Sehbedingungen auftreten werden, wobei sich unter monokularen Ausführungsbedingungen der Unterschied der visuell-motorischen Leistungen zwischen den Beleuchtungsbedingungen vergrößern wird.

Versuchsdesign

Der Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf die visuell-motorische Leistung wurde mithilfe des Purdue-Steckbrett-Tests untersucht (Abbildung 3.7). Der Purdue-Steckbrett-Test [Tiffin und Asher, 1948] ist ein Verfahren zur Bestimmung der Handgeschicklichkeit. Ursprünglich wurde der Test zur Personalauswahl in der Elektro- und Fabrikarbeit eingesetzt. Der Test ist aus einer Serie von vier Teilversuchen aufgebaut, in welchen Versuchspersonen die Aufgabe haben, kleine Stifte in vorgefertigte Löcher eines Steckbretts einzustecken. Teilversuch 1 umfasst das Einstecken von Stiften mit der linken Hand, Teilversuch 2 mit der rechten Hand und Teilversuch 3 mit beiden Händen gleichzeitig. Im vierten Teilversuch hat die Versuchsperson die Aufgabe, Baugruppen aus Stiften, Hülsen und Unterlegscheiben zusammenzubauen. Als Maß für die motorische Leistung wird ein Gesamtpunktwert aus den vier Teilversuchen berechnet. Dieser Punktwert beschreibt die Anzahl der gesteckten Stifte bzw. zusammengebauten Baugruppen für ein festgelegtes Zeitintervall



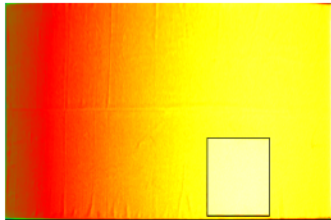
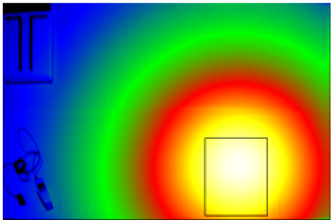
Abbildung 3.7: Versuchssetting Purdue-Steckbrett

(30 Sek. bzw. 1 Min.). Um Lerneffekte während der Wiederholung der Arbeitsaufgabe zu vermeiden, wurden alle einzelnen Teilaufgaben vor Beginn des Versuches von jeder Versuchsperson zweimal durchlaufen. Anschließend erfolgte die Ermittlung der visuell-motorischen Leistung in vier Wiederholungsmessungen bei vier unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen.

Während des Versuches wurde die Kopfposition mithilfe einer Kinnstütze fixiert. Um mögliche Überlagerungen von Effekten der Beleuchtung mit Effekten des Stereosehens näher betrachten zu können, wurden zusätzlich zur Beleuchtung zwei Sehbedingungen (binokulares Sehen und monokulares Sehen) in das Versuchsdesign aufgenommen.

Insgesamt beteiligten sich 47 Teilnehmer an der Studie, davon bearbeiteten 24 Versuchspersonen den Test mit einer Augenklappe (monokulares Sehen), wohingegen weitere 23 Versuchspersonen die Beleuchtungssituationen ohne Augenklappe durchliefen (binokulares Sehen). Während der Wiederholungsmessungen wurde die Reihenfolge der Beleuchtungssituationen randomisiert. Die Beleuchtungsbedingungen wurden qualitativ nach ihrer Schattigkeit unterschieden. Eine Charakterisierung der Lichtszenen ist in Tabelle 3.9 und Tabelle 3.10 zusammengefasst. Für jede Lichtszene wurden die horizontalen Beleuchtungsstärken sowie die zylindrischen Beleuchtungsstärken an verschiedenen Bewertungspunkten auf dem Steckbrett (im Bereich der Sehaufgabe) bestimmt. Die zylindrische Beleuchtungsstärke wurde näherungsweise ermittelt ($E_Z \approx \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 E_{vi}$). Die Tabellen beinhalten Leuchtdichteaufnahmen des Bereichs der Sehaufgabe aus der Vogelperspektive (Draufsicht von oben auf den Tisch). Das Rechteck kennzeichnet die Fläche, an welcher sich das Steckbrett während des Versuches befand.

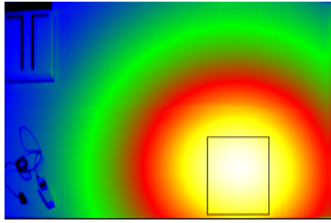
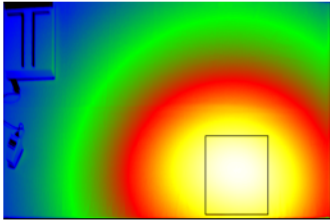
Tabelle 3.9: Charakterisierung der Lichtszenen

Szene	diffus	gerichtet
Leuchtdichtebild		
Beschreibung	diffuse Beleuchtung von Leuchtstoffröhren	stark gerichtetes Licht eines einzelnen LED Spotlights
E_h in lx	1792	1875
U_o	0,88	0,36
E_z/E_h	0,52	0,19

Die zugehörige Leuchtdichteskala ist in Abbildung 4.9 dargestellt.

Die Beleuchtungssituation „diffus“ beinhaltete diffuses Licht von Leuchtstoffröhren, welche einen weichen Schatten der Hände erzeugten. Die Beleuchtungssituation „gerichtet“ wurde von einem einzelnen LED-Spotlight erzeugt. Der Schlagschatten der Hände zeigte dabei keine Mehrfachschatten, sondern lediglich einen scharfen und harten Einzelschatten. Die Beleuchtungssituationen „moderate Mehrfachschatten“ und „extreme Mehrfachschatten“ wurden mithilfe mehrerer LED-Spotlights erzeugt, wobei sich scharfe Mehrfachschatten bildeten. Einziger Unterschied zwischen diesen beiden Beleuchtungssituationen war die Anzahl der Leuchten, aus denen sich der Mehrfachschatten aufbaute. In der Beleuchtungssituation „moderate Mehrfachschatten“ wurde der Mehrfachschatten durch 5 Leuchten erzeugt, wohingegen in der Beleuchtungssituation „extreme Mehrfachschatten“ die Mehrfach-

Tabelle 3.10: Tabellenfortführung: Charakterisierung der Lichtszenen

Szene	moderate Mehrfachschatten	extreme Mehrfachschatten
Leuchtdichtebild		
Beschreibung	gerichtetes Licht 5 separater LED Spotlights	gerichtetes Licht 10 separater LED Spotlights
E_h in lx	1885	1957
U_o	0,42	0,44
E_z/E_h	0,24	0,26

Die zugehörige Leuchtdichteskala ist in Abbildung 4.9 dargestellt.

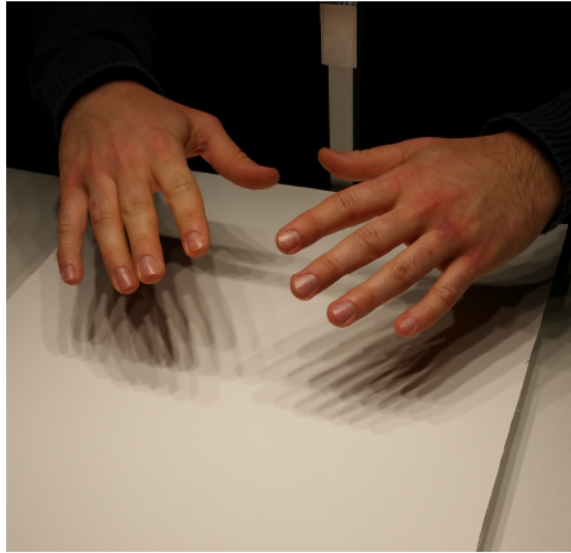


Abbildung 3.8: Schlagschatten der Hände in der Lichtszene mit extremen Mehrfachschatten

schatten durch 10 Leuchten erzeugt wurden. Abbildung 3.8 zeigt den Schlagschatten der Hände in der Beleuchtungssituation mit extremen Mehrfachschatten.

Die mittlere Leuchtdichte und Gleichmäßigkeit im Bereich des Steckbretts wurde für alle Beleuchtungsbedingungen konstant gehalten. Das Beleuchtungsniveau betrug in allen Beleuchtungssituationen ca. 1900 lx. Mit einer Anordnung der Leuchten außerhalb des Gesichtsfeldes der Probanden konnten störende Blendungswirkungen vermieden werden. Weiterhin wurde die Lichtrichtung in allen Beleuchtungssituationen derart eingestellt, dass die Schlagschatten beider Hände immer in das Zentrum der Sehaufgabe projiziert wurden. Damit sollte sicher-

gestellt werden, dass die Schlagschatten bei Durchführung der Arbeitsaufgabe unabhängig von linker oder rechter Hand immer in den Bereich der Sehaufgabe fallen.

Bei der Auswahl des statistischen Modells für die Auswertung der Versuchsergebnisse wurde besonderen Wert auf die Berücksichtigung der Korrelation innerhalb der Probanden bei den Wiederholungsmessungen gelegt. Daher wurden für die statistische Analyse verallgemeinerte Schätzungsgleichungen zur Anwendung gebracht (GEE-Modell in SPSS 23). Für das GEE-Modell wurden zwei Hierarchieebenen festgelegt. Hierbei bildeten die Probanden die obere (Subjektvariable) und die Versuchsdurchläufe die untere (Innersubjektvariable) Ebene. Als Struktur der Korrelationsmatrix wurde eine unstrukturierte Korrelationsmatrix gewählt, weil eine unabhängige Korrelationsmatrix (SPSS-Voreinstellung) unkorrelierte Residuen voraussetzen würde. Weiterhin bieten GEE-Modelle die Möglichkeit für die Kovarianzmatrix einen robusten Schätzer zu wählen, was bei der relativ kleinen Probandenzahl einen Vorteil gegenüber dem linear-mixed-model Ansatz darstellt.

Ergebnisse und Interpretation

Das Modell für die visuell-motorische Leistung beinhaltete die Faktoren Geschlecht, Sehbedingung, Versuchsdurchlauf, Beleuchtung sowie die subjektiv erlebte Anstrengung als Kovariate (siehe Tabelle 3.11 und 3.12). Im Rahmen der statistischen Analyse wurden, für die abhängige Variable der visuell-motorischen Leistung, die Histogramme der Residuen inspiziert, welche keine Ausreißer aufwiesen, gut symmetrisch und annähernd normal verteilt waren. Das Regressionsmodell kann demnach als brauchbar angesehen werden. Signifikante Effekte ergaben sich für den Versuchsdurchlauf, die Beleuchtung und die Anstrengung.

Tabelle 3.11: Informationen zu kategorialen Variablen

			N	Prozent
Faktor	Geschlecht	männlich	83	47,98%
		weiblich	90	52,02%
		Gesamt	173	100%
	Sehbedingung	mono	90	52,02%
		stereo	83	47,98%
		Gesamt	173	100%
	Versuchsdurchlauf	1	44	25,43%
		2	44	25,43%
		3	42	24,28%
		4	43	24,86%
		Gesamt	173	100%
	Beleuchtung	diffus	44	25,43%
		gerichtet	43	24,86%
		Mehrfachschatten	43	24,86%
		moderat Mehrfachschatten	43	24,86%
		extrem	43	24,86%
Gesamt	173	100%		

Tabelle 3.12: Informationen zu stetigen Variablen

		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-Abw.
Abh. Variable	visuell-motorische Leistung	173	64	110	87,2080	9,2850
Kovariate	Anstrengung	173	3	155	59,3641	33,8722

Die Unterscheidung zwischen den Sehbedingungen sowie zwischen den Geschlechtern ergab keine signifikanten Differenzen. Hinsichtlich der Sehbedingung weisen die Regressionskoeffizienten des Modells tendenziell auf eine schlechtere visuell-motorische Leistung bei monokularen Ausführungsbedingungen hin (Tabelle 3.13). Weiterhin zeigten Männer eher schlechtere Leistungen beim Steckbretttest als Frauen. Wie bereits erwähnt, erreichten diese beiden Effekte keine Signifikanz.

Obwohl die Probanden vor Beginn der Versuchsdurchläufe den Steckbretttest einschließlich aller Teilaufgaben zweimalig durchliefen, zeigte sich in den anschließenden vier Versuchsdurchläufen ein signifikanter Lerneffekt. Der Lerneffekt äußerte sich in einer, mit der Zeit schwächer werdenden Verbesserung von Versuchsdurchlauf 1 nach Versuchsdurchlauf 4 ($p < 0,001$).

Die Wirkung der Beleuchtung auf die visuell-motorische Leistung ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Die Abbildung 3.9 zeigt die geschätzten Randmittel aus dem verallgemeinerten linearen Modell für die visuell-motorische Leistung. Aufgrund des mehrfaktoriellen Designs sind diese Werte die besseren Schätzer für die Mittelwerte der Stichprobe, darüber hinaus wird der Hypothesentest auf Grundlage der geschätzten Randmittel durchgeführt. Abbildung 3.9 und Tabelle 3.14 verdeutlichen, dass Probanden bei gerichteter Beleuchtung mit extremen Mehrfachschatten die besten Ergebnisse im Steckbretttest erzielten. Paarweise Vergleiche aller Beleuchtungssituationen ergaben signifikante Unterschiede lediglich zwischen Beleuchtungsbedingungen mit extremen und moderaten Mehrfachschatten ($p = 0,04$). Hauptsächlich ist die Variation der visuell-motorischen Leistung auf die persönlichen Eigenheiten der Probanden zurückzuführen und weniger auf die Beleuchtungsbedingungen. Die visuell-motorische

Tabelle 3.13: Parameterschätzer

Parameter	Regressions- koeffizient	Standard- Fehler	Signifikanz
Konstanter Term	97,0361	2,0074	0,0000
Geschlecht (männlich)	-3,6603	2,3576	0,1205
Geschlecht (weiblich)	0		
Sehbedingung (mono)	-1,0454	2,4486	0,6694
Sehbedingung (stereo)	0		
Versuchsdurchlauf 1	-4,2412	0,8661	0,0000
Versuchsdurchlauf 2	-2,3406	0,7558	0,0020
Versuchsdurchlauf 3	-1,4630	0,7608	0,0545
Versuchsdurchlauf 4	0		
Beleuchtung (diffus)	-0,4453	0,7104	0,5307
Beleuchtung (gerichtet)	-1,2264	0,8158	0,1328
Beleuchtung (Mehrfachschatten moderat)	-1,3226	0,6432	0,0398
Beleuchtung (Mehrfachschatten extrem)	0		
Anstrengung	-0,0746	0,0287	0,0095

Leistung der Probanden scheint im Wesentlichen darauf zu beruhen, inwieweit diese zu Anstrengungen bereit waren. Es kann festgehalten werden, dass die Probanden die visuell-motorische Leistung unter allen Beleuchtungsbedingungen nahezu konstant gehalten haben. Aus den Verläufen kann weiterhin abgeleitet werden, dass sich bei höherer subjektiver Anstrengung ein Trend zu einer reduzierten visuell-motorischen Leistung zeigt.

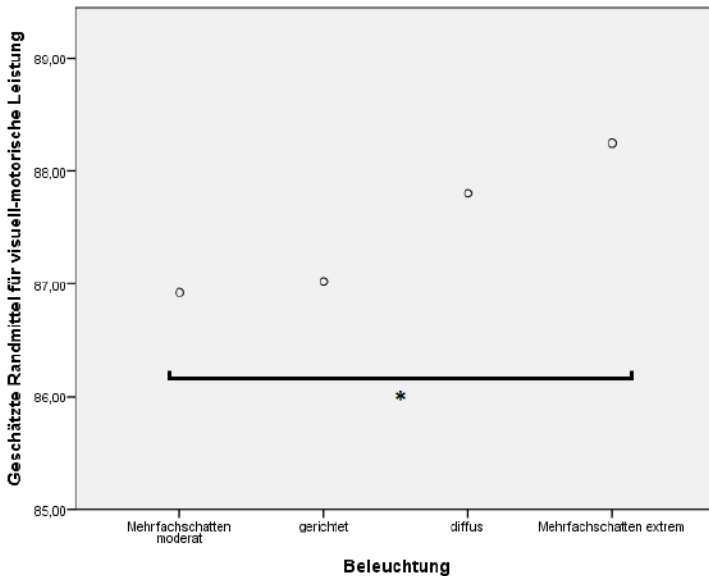


Abbildung 3.9: Visuell-motorische Leistung in Abhängigkeit der Beleuchtung (* signifikante Unterschiede)

Die subjektiv erlebte Anstrengung ist die zweite wesentliche, signifikante Variable im Modell ($p = 0,009$). Um die Anstrengung in Abhängigkeit der Beleuchtung betrachten zu können (Abbildung 3.10

Tabelle 3.14: Geschätzte Randmittel für visuell-motorische Leistung

Beleuchtung	Mittelwert	Standard-Fehler
diffus	87,8006	1,4798
gerichtet	87,0195	1,3435
Mehrfachschatten moderat	86,923	1,2502
Mehrfachschatten extrem	88,2459	1,2858

und Tabelle 3.16), wurde das oben beschriebene statistische Modell (Tabelle 3.11) nochmals mit der Anstrengung als abhängiger Variable und der motorischen Leistung als Kovariate berechnet (siehe Tabelle 3.15).

Tabelle 3.15: Ergänzende Modellrechnung mit subjektiver Anstrengung als abhängiger Variable

		N	Mini- mum	Maxi- mum	Mittel- wert	Std.- Abw.
Abh. Variable	Anstren- gung	173	3	155	59,3641	33,8722
Kovaria- te	visuell- motorische Leistung	173	64	110	87,2081	9,2850

Die geschätzten Randmittel der subjektiv erlebten Anstrengung sind in Abbildung 3.10 dargestellt. Es kann abgelesen werden, dass die gerichtete Beleuchtung der einzelnen LED-Punktlichtquelle die größte subjektive Anstrengung erzeugte. Im Gegensatz dazu führte das diffuse Licht zur geringsten subjektiv erlebten Anstrengung.

Die Versuchsergebnisse lassen sich vor dem Hintergrund der Beanspruchungskompensation erläutern. Die Diagramme deuten darauf hin, dass gerichtetes Licht sowie gerichtetes Licht mit moderaten Mehrfachschatten eine stärkere Ermüdung hervorrufen. Nach Haider und Rohmert

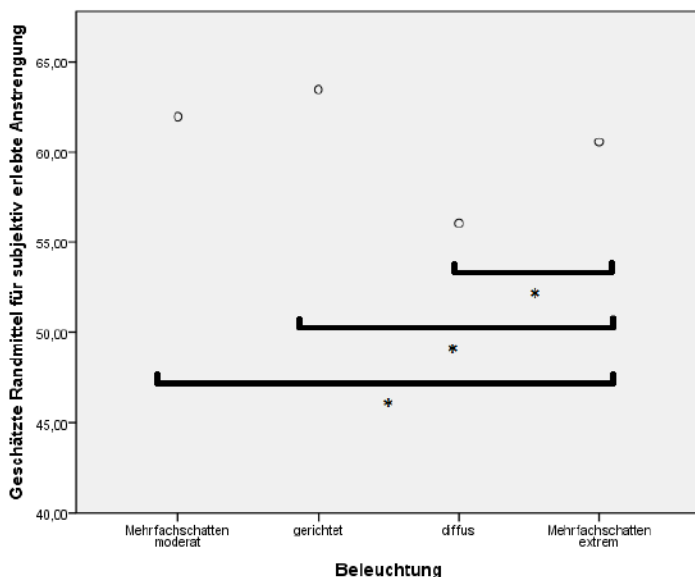


Abbildung 3.10: Subjektiv erlebte Anstrengung in Abhängigkeit der Beleuchtung (* signifikante Unterschiede)

[Haider und Rohmert, 1978] ist die Phase der Ermüdung gekennzeichnet durch eine erhöhte Willensanstrengung mit einhergehender Beanspruchungszunahme sowie einer Leistungsstreuung mit Trend zur Leistungsabnahme. Haider und Rohmert unterscheiden 4 Kompensationsphasen: Stabilität, Anstrengung, Ermüdung und Leistungszusammenbruch (siehe Tabelle 3.17). Dabei ordnen sie die beiden erstgenannten Phasen der Leistungskompensation zu und die letztgenannten Phasen der Beanspruchungskompensation. Weiterhin machen Haider und Rohmert darauf aufmerksam, dass der Beanspruchungskompensation nicht unbedingt eine Phase der Leistungskompensation vorausgehen muss, sondern Versuchspersonen direkt mit einer Beanspruchungskompen-

Tabelle 3.16: Geschätzte Randmittel für subjektiv erlebte Anstrengung

Beleuchtung	Mittelwert	Standard-Fehler
diffus	56,0575	4,8093
gerichtet	63,4628	5,0403
Mehrfachschatten moderat	61,9544	4,9424
Mehrfachschatten extrem	60,5572	4,6053

sation auf Versuchsbedingungen reagieren können. In den Daten des Steckbrettversuchs zeigt sich eine nahezu konstante visuell-motorische Leistung mit einer Tendenz zu einem Leistungsabfall bei höheren Beanspruchungswerten, daher könnte es sich hierbei um die Phase der Ermüdung handeln.

Tabelle 3.17: Kompensationsphasen nach Haider

Art der Kompensation	Leistungs-kompensation		Beanspruchungs-kompensation	
	Stabilität	Anstren-gung	Ermüdung	Leistungs-zusammenbruch
Kompen-sations-phasen				
Mess-größen				
Aktiviert-heit	Konstanz	Willens-anstren-gung	Willen-sermüdung	Resignati-on
Beanspru-chung	Konstanz	Beanspru-chungszu-nahme	Beanspru-chungszu-nahme	Erholung
Leistung	Konstanz	Konstanz	Leistungs-streuung	Leistungs-abfall

Es stellt sich jedoch die Frage, warum die subjektive Anstrengung bei extremen Mehrfachschatten sowie bei diffuser Beleuchtung deutlich

geringere Werte zeigt. Diesbezüglich kann nur spekuliert werden, dass unter diesen Beleuchtungsbedingungen das „shadow correspondence problem“ nicht mehr gelöst werden kann. Möglicherweise erkennt das visuelle System einen weichen (bzw. extremen) Schlagschatten nicht mehr als Teil des eigenen Körpers an, in der Folge wird in diesen Beleuchtungssituationen weniger Verarbeitungskapazität benötigt. Hingegen erhöht sich bei der gerichteten Beleuchtung, durch die Anerkennung des Schlagschattens als Repräsentation der eigenen Hand, die Informationsmenge und damit die Belastung für das visuelle System. Die reduzierte visuell-motorische Leistung könnte eine Folge der erhöhten Beanspruchung darstellen.

Weiterhin liefert diese Betrachtungsweise eine mögliche Erklärung für den Umstand, dass die visuell-motorische Leistung bei der moderaten Mehrfachschattensituation sich signifikant von der extremen Situation unterschied. Werden moderate Mehrfachschatten vom visuellen System gerade noch als Repräsentationen der eigenen Gliedmaßen anerkannt, so werden extreme Mehrfachschatten der Gliedmaßen möglicherweise nicht mehr als Repräsentationen akzeptiert.

Insgesamt ließen die theoretischen Vorüberlegungen eine größere Wirkung von Lichtrichtung und Schattigkeit auf die visuell-motorische Leistung erwarten. Bemerkenswert ist dennoch, dass die Beleuchtung einen stärkeren Einfluss hatte als die Sehbedingung (monokular vs. binokular). Zwar deuten die Regressionskoeffizienten tendenziell auf eine schlechtere visuell-motorische Leistung bei monokularen Ausführungsbedingungen hin, dennoch wurde eine stärkere Interaktion zwischen Beleuchtung und Sehbedingung vermutet. Bei der Versuchsplanung wurde angenommen, dass das visuelle System bei fehlenden stereoskopischen Tiefenreizen stärkeres Gewicht auf pikto-

rielle Tiefeninformationen wie Schlagschatten legt. Zusammenfassend muss festgehalten werden, dass die eingangs aufgestellte Hypothese auf ganzer Linie abgelehnt werden muss.

Für die Beleuchtungspraxis bei manuellen Arbeiten (z. B. Montagetätigkeit) wird dennoch davon ausgegangen, dass dem visuell-motorischen System einerseits die handlungsrelevanten Schatteninformationen zur Verfügung gestellt werden sollten, andererseits hohe Beanspruchungen vermieden werden müssen. Im realen Arbeitskontext wäre es vorstellbar, dass Beschäftigte anstatt mit Beanspruchungskompensation mit Leistungskompensation reagieren. Dabei könnten durch die Beleuchtung verursachte gesteigerte Anforderungen an das visuelle System über eine Leistungsreduktion kompensiert werden. Als Mittelweg wird daher eine Balance von gerichteter und diffuser Beleuchtung als sinnvoll erachtet.

3.1.4 Einfluss von Mehrfachschatten bei Leseaufgaben

Hypothese

Die dominante Ortsfrequenz eines periodischen Schattenmusters beschreibt den Einfluss auf den empfundenen visuellen Diskomfort (subjektiv erlebte Anstrengung bzw. Anzahl der Wahrnehmungsstörungen). Dabei werden Ortsfrequenzen im Bereich zwischen 2 und 8 cpd als besonders unangenehm empfunden.

Versuchsdesign

Mit Hilfe eines gitterähnlichen Schattenwerfers (Abbildung 3.12) wurden periodische Schattenmuster mehrerer unterschiedlicher Ortsfrequenzen erzeugt (z. B. 1/2/4 cpd). Um den Sehwinkel während der Sehaufgabe zu kontrollieren, wurde die Beobachterposition mit einer Kinnstütze fixiert. Der Kontrast des Schattenmusters konnte aus

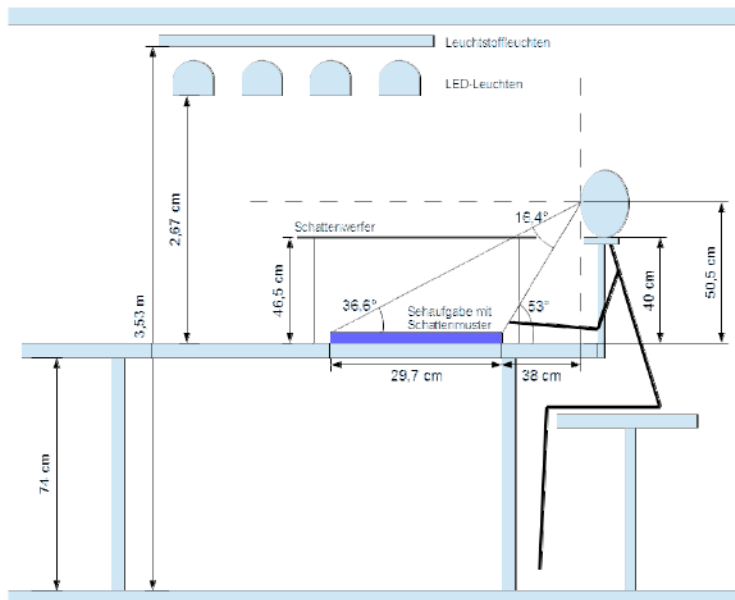


Abbildung 3.11: Abmaße des Versuchsstandes

technischen Gründen nicht kontrolliert werden, was eine Schwäche dieses Versuchsdesigns darstellt. Beispielsweise konnten in den Mehrfachschattensituationen keine vergleichbaren Schattenkontraste erzeugt werden, wie in der gerichteten Beleuchtungssituation. Auch der Schattenkontrast der diffusen Beleuchtung war nicht mit den Mehrfachschattensituationen in Übereinstimmung zu bringen. Zwar war es möglich den Dimmzustand der Leuchten anzupassen, jedoch hätte sich diese Maßnahme wiederum auf die mittlere Leuchtdichte im Bereich der Schaufgabe ausgewirkt. Aus diesen Gründen wurde entschieden, allein die mittleren Leuchtdichten im Bereich der Schaufgabe mit ca. 150 cd/m^2 konstant zu halten. Weiterhin war es nicht möglich, die $1/f$ -Verteilung der Schattenmuster systematisch

zu variieren. Da die Abweichung der $1/f$ -Verteilung aber gleichzeitig mit einer Konzentration von Ortsfrequenzen in einem bestimmten Frequenzbereich einhergeht, wurde als Haupteinflussfaktor für den visuellen Diskomfort lediglich die dominante Ortsfrequenz betrachtet. Diesbezüglich sei weiterhin darauf aufmerksam gemacht, dass die Kontrolle der Verteilung von Ortsfrequenzen bei solchen vereinfachten Reizen, wie den hier untersuchten Schattenmustern, nicht sinnvoll ist. Eine Kontrolle der Verteilung der Ortsfrequenzen ist insbesondere dann sinnvoll, wenn es sich um komplexe Bilder handelt, welche eine große Bandbreite von Ortsfrequenzen enthalten.

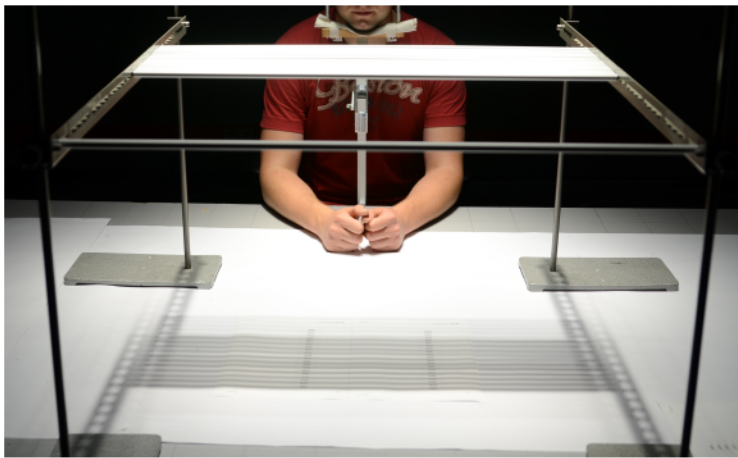


Abbildung 3.12: Versuchsstand Schattenwerfer

Zur Erfassung der Sehleistung wurden die Versuchspersonen ($N=49$) gebeten, 20 Zahlenpaare zu vergleichen und Fehler anzuzeigen („numerical verification task“ [Rea, 1981]). Die Sehaufgabe wurde mit unterschiedlichen Vergleichslisten viermal wiederholt. In Summe durchlief jede Person 4 Beleuchtungssituationen mit jeweils 4 Durchläufen

pro Lichtszene (16 Vergleichslisten pro Proband). Die Vergleichslisten enthielten im Mittel 3-5 Fehler pro Seite. Nicht erkannte Fehler sowie fälschlicherweise erkannte Fehler wurden vom Versuchsleiter ermittelt. Zusätzlich wurde die benötigte Zeit für 20 Vergleiche gemessen. Anschließend wurde ein Score für die Sehleistung berechnet [Rea und Ouellette, 1991].

$$\text{Score} = \frac{(20 - \text{Fehler}) \cdot 100}{\text{Zeit} + 5}$$

Um die Sehleistung bei der Lese-Vergleichsaufgabe durch die Überlagerung mit dem Schattenmuster nicht zu beeinträchtigen, wurden die Leuchtdichteaufnahmen der Lichtszenen (Tabelle 3.18) daraufhin überprüft, ob der Sehzeichenkontrast an keiner Stelle eine Schwelle von 0,4 unterschreitet.

$$C = \frac{L_{\text{Hintergrund}} - L_{\text{Sehzeichen}}}{L_{\text{Hintergrund}}}$$

Die Untersuchungen von Rea und Ouellette [Rea und Ouellette, 1991] zeigen, dass die Sehleistung bei der Lese-Vergleichsaufgabe in erster Linie vom Sehzeichenkontrast und der Hintergrundleuchtdichte abhängen. Nach Rea und Ouellette sind bei Hintergrundleuchtdichten von über 50 cd/m^2 in Kombination mit einem minimalen Sehzeichenkontrast von 0,3 keine Beeinträchtigungen der Sehleistung zu erwarten, da die Sehleistung bei Kontrasten über 0,3 ein Plateau ausbildet.

Darüber hinaus wurde in den Vorversuchen mithilfe ortsaufgelöster Leuchtdichtemessungen der Einfluss der Lichteinfallrichtung, des Betrachtungswinkels, der Reflexionseigenschaften des Papiers sowie der Tinte auf den Sehzeichenkontrast untersucht. Im Ergebnis erwies sich tintenstrahlbedrucktes, mattes Recyclingpapier am geeignetsten für den Versuch. Zusätzlich verhinderte eine schwarze Pappplatte vor der Brust der Probanden Reflexionen der Kleidung auf die Sehaufgabe.

In Ergänzung zur Sehleistung wurde der visuelle Diskomfort mit Hilfe eines Fragebogens erhoben. In Anlehnung an die Untersuchungen von Wilkins und Nimmo-Smith [Wilkins und Nimmo-Smith, 1984] und Conlon et al. [Conlon et al., 1999] wurden Wahrnehmungsstörungen mit einer Checkliste abgefragt (siehe Anhang). Die Anzahl der bestätigten Wahrnehmungsstörungen wurde erfasst und aufsummiert. Folgende Wahrnehmungsstörungen wurden abgefragt: Farberscheinungen, Bewegungen, Flimmern, Biegung des Schattenmusters, Unschärfe, Auftreten heller/dunkler Flecken, plötzliches Verschwinden/Auftauchen des Schattenmusters, Schwindelgefühl, Augenermüdungen, Kopfschmerzen. Abschließend wurde mit einer 7-stelligen-Likert-Skala (sehr angenehm – sehr unangenehm) abgefragt, wie komfortabel das Schattenmuster empfunden wurde.

Zur Bestimmung der dominanten Ortsfrequenzen der Schattenmuster wurde ein MATLAB-Programm entwickelt. Im Programm wurden die Daten der ortsaufgelösten Leuchtdichtemessungen (Tabelle 3.18) eingelesen und anschließend einer Fast-Fourier-Transformation unterzogen. Die Ergebnisse der Fouriertransformation sind in Tabelle 3.19 und Tabelle 3.20 dargestellt. Für die Berechnungen wurde ein horizontaler Leuchtdichteverlauf entlang einer Strecke von 15 cm (3000 Datenpunkte) in der Mitte der Leuchtdichteaufnahme ausgewählt. Der Leuchtdichteverlauf entlang dieser Linie ist in der dritten Spalte von Tabelle 3.19 und Tabelle 3.20 dargestellt. Das Amplitudenspektrum mit den dominanten Ortsfrequenzen ergab sich aus dem Betrag der Fouriertransformation dieses Leuchtdichteverlaufs. Es ist in der vierten Spalte von Tabelle 3.19 und Tabelle 3.20 abgebildet. Zusätzlich zur Fouriertransformation entlang einer Linie wurden zweidimensionale Fouriertransformationen über ausgewählte Bildausschnitte berechnet, um die

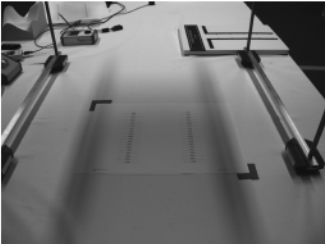
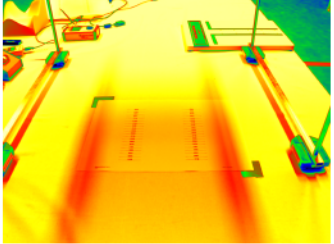
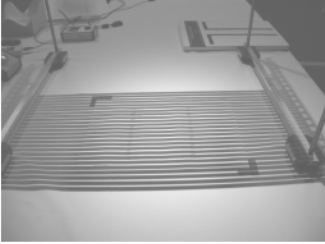
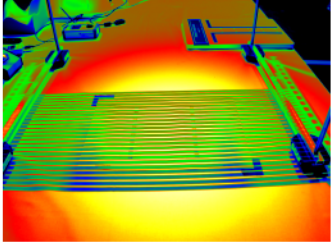
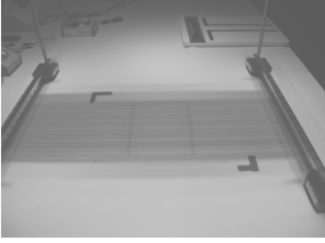
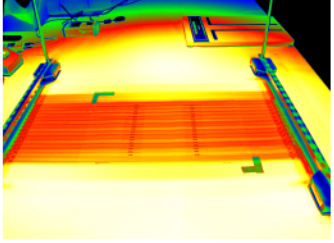
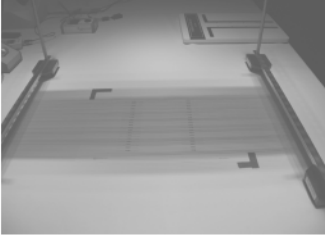
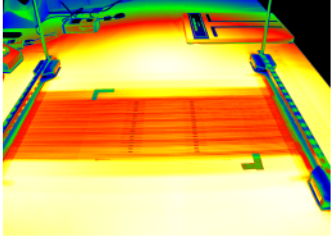
Amplitudenspektren der eindimensionalen Fouriertransformationen auf einem zweiten unabhängigen Berechnungsweg zu verifizieren.

Betrachtet man die Aufnahmen in Tabelle 3.19 und Tabelle 3.20, so wird deutlich, dass der gitterähnliche Schattenwerfer in der diffusen Beleuchtungssituation einen weichen Schlagschatten erzeugt. Die einzelnen Stäbe des Schattenwerfers werden nicht im Leuchtdichteverlauf des Schattenmusters abgebildet. Bis zur Mitte der Sehaufgabe lässt sich ein Leuchtdichteabfall mit anschließendem Anstieg ablesen. Damit ergibt sich eine sehr niedrige Ortsfrequenz mit ca. einem halben Zyklus pro Bild (ca. 0,06 cpd). Die Ortsfrequenz ist so klein, dass sie nicht im Amplitudenspektrum abgelesen werden kann. Im Gegensatz dazu zeigt sich bei der gerichteten Beleuchtungssituation ein nahezu rechteckiger Leuchtdichteverlauf (vgl. Tabelle 2.2 und Tabelle 2.3). Jeder einzelne Stab des Schattenwerfers erzeugt einen separaten, scharfen Schlagschatten. Aus dem Amplitudenspektrum wird deutlich, dass der Rechteckverlauf durch eine Addition zweier Ortsfrequenzen mit 1,15 cpd und 2,3 cpd rekonstruiert werden kann.

Die beiden Mehrfachschattensituationen (Tabelle 3.20) unterscheiden sich im Wesentlichen in der Feinheit des Schattenmusters und der Anzahl der erzeugten Schattenstufen. In der extremen Mehrfachschattensituation liegen die Schattenstufen dichter beieinander, was sich in einer hohen Ortsfrequenz von 4,35 cpd widerspiegelt. Dagegen verschwimmen die Schattenstufen der moderaten Mehrfachschattensituation zu einem unschärferen Verlauf mit einer geringeren Ortsfrequenz von 1,45 cpd. Auch die unterschiedlichen Kontraste der Schattenmuster werden in den Diagrammen deutlich.

Zum Ende des Methodenteils soll kurz darauf eingegangen werden, aus welchen Gründen beim Versuchsdesign Bedingungen gewählt wurden,

Tabelle 3.18: Charakterisierung der Lichtszenen

Szene	Schattenmuster	Leuchtdichteaufnahme
diffus		
gerichtet		
moderate Mehrfachschatten		
extreme Mehrfachschatten		

Die zugehörige Leuchtdichteskala ist in Abbildung 4.9 dargestellt.

Tabelle 3.19: Analyse der Schattenmuster

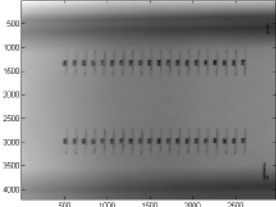
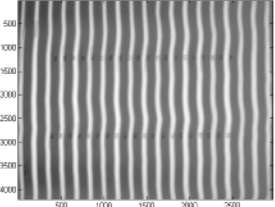
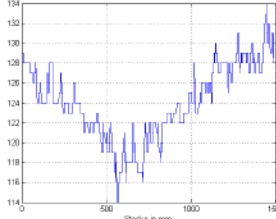
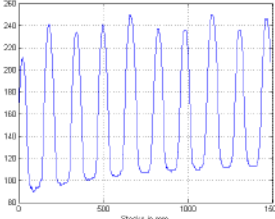
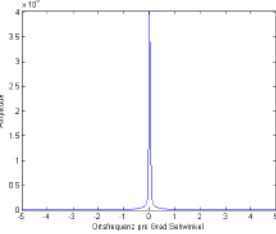
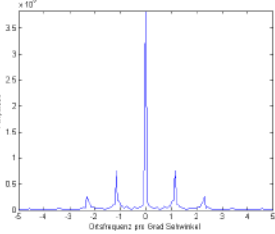
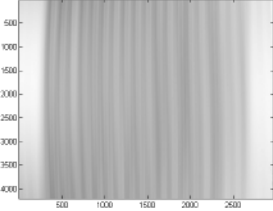
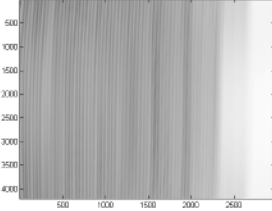
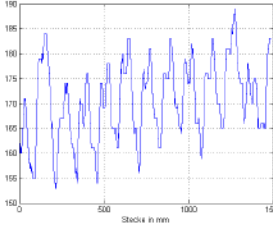
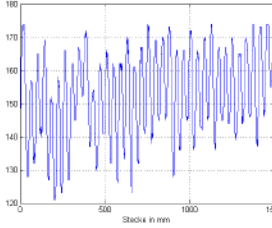
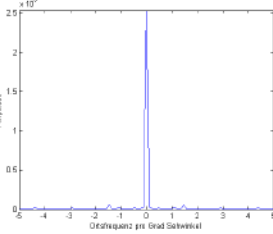
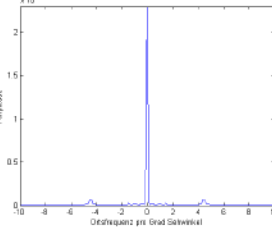
Szene	diffus	gerichtet
Schattenmuster		
horizontaler Helligkeitsverlauf		
Amplitudenspektrum		
Dominante Ortsfrequenz	0,06 cpd	1,15 cpd und 2,3 cpd

Tabelle 3.20: Tabellenfortführung: Analyse der Schattenmuster

Szene	moderate Mehrfachschatten	extreme Mehrfachschatten
Schattenmuster		
horizontaler Helligkeitsverlauf		
Amplitudenspektrum		
Dominante Ortsfrequenz	1,45 cpd	4,35 cpd

welche in Arbeitsstätten eher selten auftreten werden. Diese Bedingungen betreffen einerseits die Ausdehnung des Schattenmusters sowie die direkte Überlagerung der Sehaufgabe mit dem Schattenmuster. Im realen Bürokontext wäre es denkbar, dass Schlagschatten von Objekten (z.B. erzeugt durch Stehleuchten) eher in der Peripherie der Sehaufgabe auftreten und tendenziell einen langfristigen Einfluss auf den visuellen Diskomfort nehmen können. Ziel dieses Versuches war es, im Sinne eines „Proof-of-Concept“ nachzuweisen, dass Schlagschatten in einem kurzen Versuchszeitraum einen Effekt auf den visuellen Diskomfort hervorrufen können. Vor diesem Hintergrund wurden gezielt erschwerte Sehbedingungen ausgewählt.

Ergebnisse und Interpretation

Für die statistische Analyse wurden wiederum verallgemeinerte Schätzungsgleichungen zur Anwendung gebracht (GEE-Modell in SPSS 23). Das lineare Modell für normalverteilte Daten beinhaltete den Sehleistungsscore als abhängige Variable sowie die Beleuchtung, den Versuchsdurchlauf und das Geschlecht als Faktoren (Tabelle 3.21). Zusätzlich wurden die subjektiv erlebte Anstrengung sowie die Anzahl der Wahrnehmungsstörungen als Kovariate in das Modell aufgenommen (Tabelle 3.22).

Signifikante Effekte ergaben sich für das Geschlecht ($p = 0,008$), die Beleuchtung ($p < 0,02$) sowie die Anstrengung ($p = 0,038$). Keine signifikanten Unterschiede zeigten sich hinsichtlich der Anzahl der Wahrnehmungsstörungen sowie der Versuchsdurchläufe (Tabelle 3.23).

Obwohl die subjektiv erlebte Anstrengung nur als Kovariate im Modell betrachtet wurde, soll zunächst auf diese eingegangen werden, da diese Erkenntnisse eine mögliche Begründung für die Ergebnisse der

Tabelle 3.21: Informationen zu kategorialen Variablen

			N	Prozent
Faktor	Geschlecht	männlich	100	51,02%
		weiblich	96	48,98%
		Gesamt	196	100%
	Versuchsdurchlauf	1,00	49	25,00%
		2,00	49	25,00%
		3,00	49	25,00%
		4,00	49	25,00%
		Gesamt	196	100%
	Beleuchtung	diffus	48	24,49%
		gerichtet	49	25,00%
		moderate		
		Mehrfachschatten	49	25,00%
		extreme		
		Mehrfachschatten	50	25,51%
		Gesamt	196	100%

Tabelle 3.22: Informationen über stetige Variablen

		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-Abw.
Abhängige Variable	Schleis- tung	196	13,9287	75,3385	39,4159	12,4491
Kovariate	Anstren- gung	196	3	189	68,0357	43,2551
Kovariate	Wahrneh- mungs- störungen	196	0	7	0,9948	1,4901

Tabelle 3.23: Parameterschätzer

Parameter	Regressions- koeffizient	Standard- Fehler	Signifi- kanz
Konstanter Term	36,2141	2,1111	0,0000
Geschlecht (männlich)	8,5807	3,2125	0,0076
Geschlecht (weiblich)	0		
Versuchsdurchlauf 1	-0,2317	0,6375	0,7162
Versuchsdurchlauf 2	0,0294	0,4444	0,9473
Versuchsdurchlauf 3	-0,2487	0,3623	0,4924
Versuchsdurchlauf 4	0		
Beleuchtung (diffus)	0,8136	0,5535	0,1416
Beleuchtung (gerichtet)	-1,6716	0,5440	0,0021
Beleuchtung (Mehrfachschatten moderat)	1,0970	0,4983	0,0277
Beleuchtung (Mehrfachschatten extrem)	0		
Anstrengung	-0,0211	0,0101	0,0376
Anzahl der Wahrneh- mungsstörungen	0,3189	0,1977	0,1067

abhängigen Variable Sehleistung liefern. Bezogen auf die subjektiv erlebte Anstrengung zeigten sich die größten Werte bei der gerichteten Beleuchtung sowie bei der gerichteten Beleuchtung mit extremen Mehrfachschaten. Nahezu identische Werte zeigten sich zwischen der gerichteten Beleuchtung mit moderaten Mehrfachschaten und diffuser Beleuchtung. Interessant ist die Tatsache, dass die Anzahl der berichteten Wahrnehmungsstörungen ein ähnliches Muster zeigen, wie die subjektiv erlebte Anstrengung (Abbildung 3.13). Es kann vermutet werden, dass Wahrnehmungsstörungen sowie Anstrengung zusammenhängen. Aus dem Streudiagramm (Abbildung 3.14) kann eine mittlere Korrelation zwischen subjektiv erlebter Anstrengung und der Anzahl der Wahrnehmungsstörungen abgelesen werden. Bei der gerichteten Beleuchtung sowie der Mehrfachschatenbeleuchtung wurden häufiger Wahrnehmungsstörungen berichtet als bei der diffusen oder moderaten Mehrfachschatenbeleuchtung. Die Mittelwerte der subjektiv erlebten Anstrengung sowie der Anzahl der Wahrnehmungsstörungen sind in Abbildung 3.13 dargestellt.

In Anlehnung an die Analysen von O'Hare und Hibbard wären die folgenden drei Erklärungsansätze für diese Ergebnisse denkbar [O'Hare und Hibbard, 2011]:

1. In Übereinstimmung mit der eingangs aufgestellten Hypothese erzeugten die Schattenmuster mit dominanten Ortsfrequenzen im Bereich zwischen 2 und 8 cpd [Fernandez und Wilkins, 2008] den größten visuellen Discomfort (gerichtet 2,3 cpd; extreme Mehrfachschaten 4,35 cpd). Die Schattenmuster weichen von der natürlichen Bildstatistik ab und weisen eine Energiekonzentration im Bereich von 2 cpd bzw. 4 cpd auf. Mögliche Folgen könnten ein Ungleichgewicht

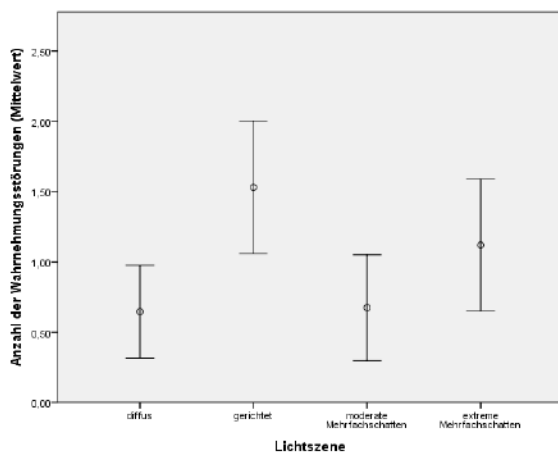
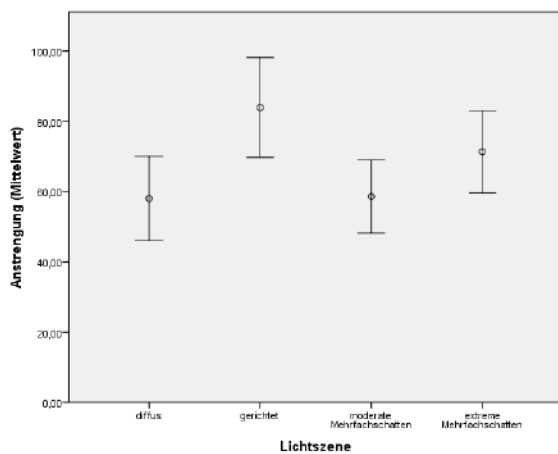


Abbildung 3.13: Wahrnehmungsstörungen und subjektiv erlebte Anstrengung

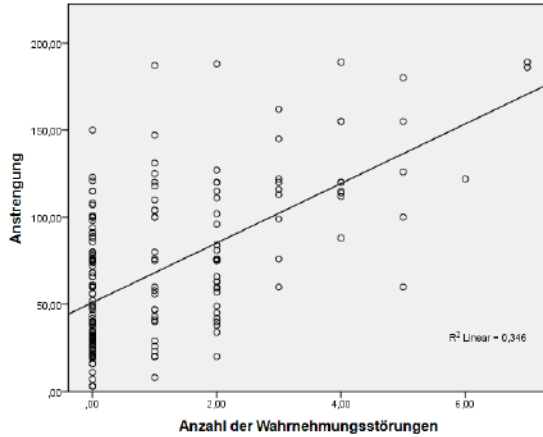


Abbildung 3.14: Streudiagramm: erlebte Anstrengung vs. Anzahl der Wahrnehmungsstörungen

bei der Informationsübertragung über die verschiedenen Ortsfrequenzkanäle des visuellen Systems sein bzw. eine verstärkte Anregung des visuellen Cortex. Weiterhin könnte der stärkere Schattenkontrast in der gerichteten Beleuchtungssituation dazu geführt haben, dass die Anstrengungswerte bzw. die Anzahl der berichteten Wahrnehmungsstörungen jene von denen der extremen Mehrfachschattensituation überschreiten.

2. Als zweite mögliche Begründung kommen Akkommodationschwierigkeiten infrage. Möglicherweise haben die Schattenmuster Probleme bei der Fokussierung auf die Sehaufgabe erzeugt. Es ist bekannt, dass Unschärfe und Akkommodationsprobleme mit visueller Ermüdung assoziiert sein können [O'Hare und Hibbard, 2013]. Gegen diese Begründung spricht allerdings, dass insbesondere die gerichtete Beleuchtungssituation

sowie die extreme Mehrfachschattensituation harte Schatten mit scharfen Kanten erzeugten. Lediglich das Schattenmuster mit den moderaten Mehrfachschatten erschien, vom subjektiven Eindruck her, unscharf. Jedoch erzeugten die moderaten Mehrfachschatten im Vergleich zur diffusen Beleuchtungssituation keine erhöhten Werte subjektiv erlebter Anstrengung.

3. Die Ungleichmäßigkeit im Bereich der Sehaufgabe ist eine weitere mögliche Ursache für die Versuchsergebnisse. Boyce macht darauf aufmerksam, dass Ungleichmäßigkeit im Bereich der Sehaufgabe zu Ablenkung und perzeptueller Konfusion führen kann [Boyce, 2003], diese beiden Symptome können Auslöser von visuellem Diskomfort sein. Aus Untersuchungen mit unterschiedlicher Schreibtischbeleuchtung ist bekannt, dass eine Gleichmäßigkeit von größer als 0,7 auf einem Tisch von den meisten Beobachtern als akzeptabel erachtet wird [Saunders, 1969]. Demgegenüber können Beleuchtungsbedingungen, die einen scharfen Leuchtdichteabfall hervorrufen zu perzeptueller Konfusion führen [Boyce, 2003], beispielsweise, wenn diese für eine Materialänderung gehalten werden.

Aufgrund der Tatsache, dass in den vorliegenden Versuchen eine Gleichmäßigkeit von 0,7 in allen Versuchsbedingungen unterschritten wurde, sind die Begründungen 1 und 3 besonders naheliegend. Nichtsdestotrotz zeigen die Versuchsergebnisse, dass selbst bei einer Versuchsdauer von nur ca. 8-12 Minuten pro Lichtszene bereits Beeinträchtigungen des Sehkommforts auftreten können.

Nach den Betrachtungen zum visuellen Diskomfort sollen nun die Ergebnisse zur abhängigen Variable Sehleistung betrachtet werden. Die paarweisen Vergleiche ergaben einerseits eine signifikant bes-

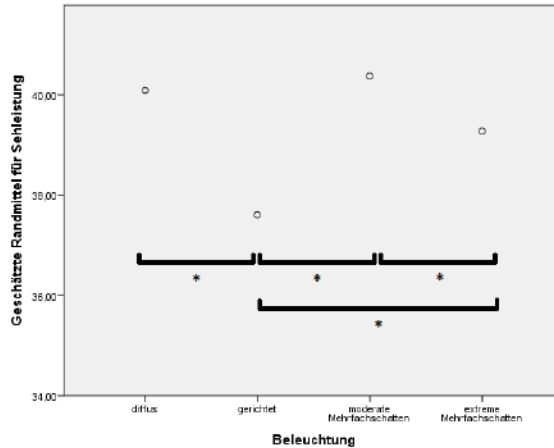


Abbildung 3.15: Sehleistung in Abhängigkeit der Beleuchtungssituation (* signifikante Unterschiede)

sere Sehleistung bei männlichen Versuchsteilnehmern ($p = 0,008$) andererseits ergaben sich Unterschiede für die unterschiedlichen Beleuchtungssituationen. In Abbildung 3.15 sind die geschätzten Randmittel (Tabelle 3.24) über der Beleuchtungssituation aufgetragen. Interessanterweise zeigt sich bei der Sehleistung derselbe Trend wie in den Daten zum visuellen Diskomfort. Die besten Sehleistungen ergaben sich für die diffuse Beleuchtungssituation sowie das Schattennmuster mit moderaten Mehrfachschatten. Die schlechteste Sehleistung zeigte sich beim gerichteten Schattennmuster.

Auch für diese Ergebnisse sollen wieder zwei mögliche Begründungen dargelegt werden.

1. Zum einen könnte die Reduktion des Sehzeichenkontrasts durch die Überlagerung des Sehzeichens für den Abfall der Sehleistung

Tabelle 3.24: Geschätzte Randmittel für Sehleistung

Beleuchtung	Mittelwert	Standard-Fehler
diffus	40,0864	1,71443
gerichtet	37,6012	1,62410
moderate Mehrfachschatten	40,3698	1,62403
extreme Mehrfachschatten	39,2728	1,51312

in den Beleuchtungssituationen mit den stärkeren Schattenkontrasten verantwortlich sein. Jedoch wurde bei der Vermessung aller Schattenmuster darauf geachtet, dass die Schwankungen der Sehzeichenkontraste, gemäß des „model of relative visual performance“ [Rea und Ouellette, 1991], niemals das Plateau konstanter Sehleistung verlassen. Diesbezüglich wäre zu erwarten gewesen, dass ein Sehleistungsabfall ausbleibt, dennoch kann der Einfluss unterschiedlicher Schattenkontraste auf die Sehleistung nicht ausgeschlossen werden.

2. Zum anderen könnten die Ergebnisse zum visuellen Diskomfort bzw. der erlebten Anstrengung einen Einfluss auf die Sehleistung gehabt haben. Leider kann mit diesem Versuchsdesign und den angewandten statistischen Modellen keine Ursache-Wirkungs-Richtung bestimmt werden. Daher kann diesbezüglich nur spekuliert werden, dass ähnlich wie in den Versuchen zur visuell-motorischen Leistung, eine Beanspruchungskompensation [Haider und Rohmert, 1978] stattgefunden hat. Die Streudiagramme aus Abbildung 3.16 deuten auf einen geringeren Sehleistungsscore bei größerer Anstrengung bzw. einer größeren Anzahl von Wahrnehmungsstörungen.

Im Endeffekt verhindert die fehlende Kontrolle des Schattenkontrasts eine endgültige Begründung. Wäre der Schattenkontrast in allen Be-

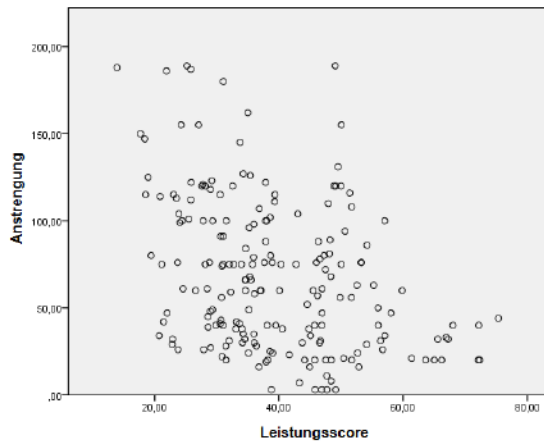
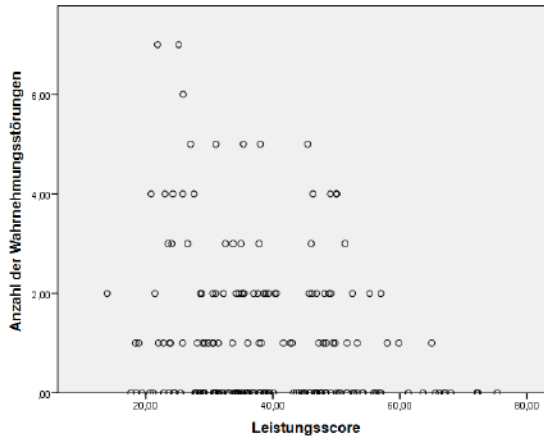


Abbildung 3.16: Streudiagramme: Anstrengung bzw. Anzahl der Wahrnehmungsstörungen vs. Sehleistung (Score)

leuchtungssituationen konstant geblieben, hätte die Kontrastreduktion als Ursache für den Sehleistungsabfall ausgeschlossen werden können. Im Rahmen der Vorversuche wurde dieses Versuchsdesign unter vereinfachten Bedingungen getestet, wobei auch der Schattenkontrast kontrolliert wurde. Diese Möglichkeit bestand, da im Vorversuch lediglich zwei Mehrfachschattensituationen mit 3 cpd und 1 cpd miteinander verglichen wurden [Krüger et al., 2014]. In diesem Versuch zeigte sich in Übereinstimmung mit dem „model of relative visual performance“ [Rea und Ouellette, 1991] kein Einfluss der Kontrastreduktion auf die Sehleistung.

4 Schlussfolgerungen

4.1 Zusammenfassende Bewertung

In der zusammenfassenden Bewertung sollen die Ergebnisse aller drei Teilversuche in ein übergreifendes, psychologisches Modell eingeordnet werden, welches die Auswirkungen auf die Gesundheit von Beschäftigten erklärt und die Relevanz des Gütemerkmals für den Arbeitsschutz darstellt. Bei dem übergeordneten Modell handelt es sich um das „Compensatory control model of performance regulation“ [Hockey, 1997], welches in Abbildung 4.1 dargestellt ist. Nach einer Beschreibung des Modells, werden Parallelen zu den Versuchsergebnissen gezogen. Zum Abschluss dieses Abschnitts erfolgt eine kritische Reflexion der vorliegenden Arbeit.

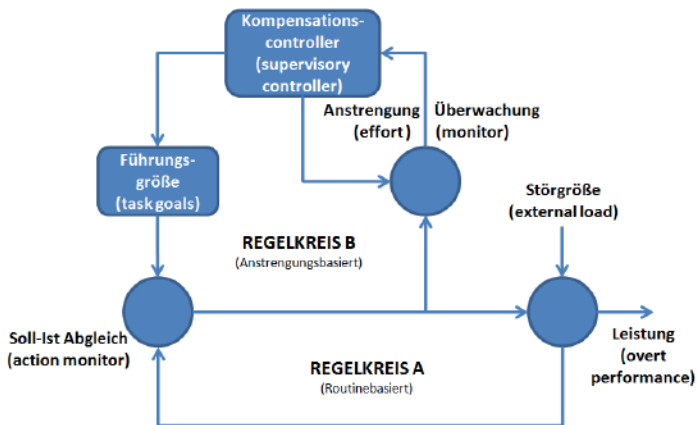


Abbildung 4.1: Compensatory control model of performance regulation nach Hockey (1997)

Compensatory control model of performance regulation nach Hockey:

Beim „Compensatory control model of performance regulation“ handelt es sich um ein Regelkreismodell, welches aus verschiedenen Studien zur menschlichen Leistungsregulation abgeleitet wurde. Es beschreibt die Regulierung von Arbeitsleistung unter hoher Arbeitslast und Stressbedingungen. Stress wird dabei als Dissens zwischen gefühlter, erwarteter Leistung und gefühlter, aktueller Leistung definiert. Im Modell geht es um vom Probanden aktiv gesteuerte Prozesse zur Leistungsregulation, welche Kompensationseffekte beinhalten, die mit der subjektiv erlebten Anstrengung im Zusammenhang stehen: „The energetical-control framework argues that the maintenance of performance stability under demanding conditions is an active process under the control of the individual, requiring the management of cognitive resources through the mobilisation of mental effort.“ (S. 78). Im Rahmen dieser Arbeit soll die Beleuchtung als externe Störgröße im Modell angenommen werden, welche höhere Anforderungen bei der Aufgabenausführung hervorruft und damit im Sinne des Modells „Stress“ hervorruft.

Das Modell trifft drei wesentliche Annahmen für die Arbeitsleistung unter Stressbedingungen:

- Arbeitsleistung bleibt unter Stressbedingungen bemerkenswert konstant
- Der Leistungserhalt unter Stressbedingungen geht mit physiologischer Aktivierung und Beanspruchung einher
- Die Größenordnung von Leistungseinbrüchen sind unter Stressbedingungen eher gering

Zur besseren Nachvollziehbarkeit soll nachkommend eine kurze Beschreibung des Modells in Abbildung 4.1 vorgenommen werden.

Das Modell unterscheidet zwei Regelkreise. Im Regelkreis A werden automatisierte Handlungsroutinen zur Ausführung der Arbeitsaufgabe gesteuert. Diese automatisierten Handlungsroutinen können verstanden werden als angelegte Handlungsabläufe zur Erledigung der Arbeitsaufgabe. Im Fall des Purdue-Steckbrett-Tests beinhaltet die Handlungsroutine das Einstecken der Stifte oder bei der „gauge figure task“ die Einstellung der Messfigur in ihrer Orientierung. Eine wichtige Eigenschaft der Tätigkeiten des Regelkreises A ist, dass die Regulation der Handlungsroutinen aus dem Regelkreis A keine Anstrengung erfordert.

Zur Erklärung des Regelkreises B sei angenommen, dass sich durch externe Einflüsse (z. B. Beleuchtungsbedingungen) neue, gestiegene Anforderungen im Regelkreis A ergeben, welche mit den standardisierten Handlungsmustern nicht mehr erfüllt werden können. Dabei wird beim Soll-Ist-Abgleich (action monitor) eine Abweichung vom Zielzustand festgestellt. Infolge dieser externen Einflüsse wird eine Anpassung der Handlungsmuster des Regelkreises A notwendig. Diese Regulation von Handlungen ist mit Beanspruchung verbunden und wird im Regelkreis B beschrieben. Zur Bewältigung des Soll-Ist-Defizits wird auf den Regelkreis B umgeschaltet (z. B. wenn komplexere, neue Handlungsmuster zur Störungsbewältigung erforderlich werden). An dieser Stelle kommt der Effort Monitor ins Spiel. Der Effort Monitor empfängt die gestiegenen Anforderungen aus dem Regelkreis A. Wichtig ist dabei die Festlegung, dass der Effort Monitor einen Auslösewert und einen Maximalwert beinhaltet. Alle Anforderungen, welche unter dem Auslösewert liegen, erzeugen keinen Anstieg der subjektiv erlebten Anstrengung, d.h. sie werden nicht als anstrengend empfunden. Der Maximalwert der inkaufnehmbaren Anstrengung ist durch die Motivation des Individuums festgelegt. Die Differenz

zwischen Auslösewert (min.) und Maximalwert (max.) beschreibt die einsetzbare Anstrengung zur Leistungsregulation. Zusätzlich existiert ein Kompensationscontroller (supervisory controller), der über unterschiedliche Strategien zur Anforderungsbewältigung entscheidet. Einerseits kann er die Aufgabenziele herabsetzen oder die Anstrengung bei der Aufgabenerfüllung anpassen.

Nach Hockey können folgende vier Kompensationsstrategien mit dem Modell erklärt werden [Hockey, 1997]:

- Leistungsreduktion in sekundären Aufgaben
- Strategische Anpassungen in der Qualität der Aufgabenausführung / Zielanpassung (Beanspruchungskompensation)
- Inkaufnahme höherer Beanspruchung (Leistungskompensation)
- Folgeerscheinungen von Ermüdung

Bei den vier Punkten handelt es sich um Performancemuster unter Stressbedingungen in denen Kompensationsprozesse zum Tragen kommen, welche die Stabilität des Systems sicherstellen sollen.

Hinsichtlich der Leistungsreduktion in sekundären Aufgaben wird darauf hingewiesen, dass ein Abfall der Leistung auch indirekt in sekundären Aufgaben, subjektiven Bewertungen oder physiologischen Indizes beobachtet werden kann.

Im Fall der Beanspruchungskompensation werden Aufgabenziele oder die Qualität der Aufgabenausführung herabgesetzt. Die Beanspruchung wird durch eine Leistungsreduktion konstant gehalten.

Andererseits kann das Individuum die Strategie der Leistungskompensation auswählen, wobei die Leistung unter Inkaufnahme einer größeren Anstrengung konstant gehalten wird.

Der letzte Punkt in der Aufzählung beschreibt Folgeerscheinungen von Ermüdung und meint einen Leistungseinbruch zum Ende der Tätigkeit. Hockey beschreibt, dass nach einer längeren Periode großer Anstrengung in einen Modus geringerer Anstrengung gewechselt wird, wenn die Anforderungen der Aufgabe es zulassen.

Aus Perspektive des Arbeitsschutzes ist dieses Modell besonders interessant, weil es Verbindungen zu gesundheitlichen Auswirkungen unter Stressbedingungen herstellt. Besonders bei der Strategie, welche die Inkaufnahme einer höheren Beanspruchung zulässt, können ungewollte negative Auswirkungen auf die Gesundheit auftreten, beispielhaft nennt Hockey Einflüsse auf Stimmung, Adrenalin, Herzrate, Blutdruck und das Auftreten neuroendokriner Stressmuster [Hockey, 1997]. Es wird darauf hingewiesen, dass ein stärkeres Commitment unter diesen Bedingungen nachteilige Wechselwirkungen mit dem Wohlbefinden induzieren kann. Auch dort, wo keine Abnahme der Leistung beobachtet werden kann, können sich Störungen in Nebentätigkeiten zeigen oder sich in Beanspruchung, Aktivierung und Ermüdung widerspiegeln [Hockey, 1997].

Interessant ist hierbei, dass die negativen Folgen wesentlich von der Copingstrategie bestimmt werden. Zur Verdeutlichung zitiert Hockey Studien von Frankenhaeuser, in denen Rechenaufgaben bei Lärm ausgeführt werden sollten [Frankenhaeuser, 1986]. Frankenhaeuser fand Ergebnisse, in denen einerseits ein Leistungsabfall ohne Veränderungen im Adrenalin und der subjektiv erlebten Anstrengung beobachtet werden konnten und andererseits eine konstante Leistung bei gleichzeitigem Anstieg von Adrenalinlevel und subjektiv erlebter Anstrengung auftraten. Hockey macht darauf aufmerksam, dass es sich hier um einen individuellen Faktor handelt, wobei eine Person sich eher an den zu erbringenden Leistungsvorgaben orientiert und höhere

Beanspruchung in Kauf nimmt und eine andere Person womöglich dazu tendiert, die Leistungsziele zu modifizieren, um geringere Anstrengung zu erleben.

Nach diesen ausführlichen Modellerklärungen sollen die Versuchsergebnisse dieser Arbeit mit dem Modell in Verbindung gebracht werden. Im Versuch zum Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf die Formwahrnehmung zeigte sich kein signifikanter Effekt der Beleuchtung auf die Anstrengung. Diesbezüglich kann gemutmaßt werden, dass die Handlungsausführung die Anforderungen des routinebasierten Regelkreises A nicht nachweisbar überschritten hat. Ein anderes Bild zeigt sich beim Versuch zum Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf die visuell-motorische Leistung. Die visuell-motorische Leistung wurde in diesem Versuch nur in geringem Umfang durch die Beleuchtung beeinflusst, ein deutlicherer Einfluss zeigte sich hingegen bei der subjektiv erlebten Anstrengung. Wie im Abschnitt 3.1.3 beschrieben, kann davon ausgegangen werden, dass die Testpersonen mit Beanspruchungskompensation auf die gestiegenen Anforderungen bestimmter Beleuchtungsbedingungen reagierten. In Bezug auf das Modell von Hockey könnten die gesteigerten Anforderungen durch bestimmte Beleuchtungsbedingungen zur Aktivierung des Regelkreises B geführt haben, wobei im effort Monitor eine Überschreitung des Auslösewertes registriert wurde und der supervisory controller durch eine Herabsetzung der Steckgeschwindigkeit bzw. Steckgenauigkeit die Leistung tendenziell reduzierte. Mit dieser Strategie konnten die Probanden einer höheren Anstrengungen bei bestimmten Beleuchtungsbedingungen entgegenwirken. Diese Erklärung erscheint durchaus plausibel, da den Testpersonen auch bei ungenauer Ausführung der Arbeitsaufgabe keine Konsequenzen drohten (z. B. Verweigerung der Teilnahmevergütung). Der Einsatz einer Leistungsprämie für besonders schnelle und akkurate Versuchsteil-

nehmer hätte möglicherweise zu einer anderen Kompensationsstrategie geführt.

Auch im Versuch zum Einfluss von Mehrfachschaten bei Leseaufgaben können die Versuchsergebnisse mithilfe der Beanspruchungskompensation erklärt werden, mit dem Unterschied, dass die Beleuchtungsbedingungen im Fall der Leseaufgabe zusätzlich visuelle Beschwerden hervorriefen. Beifügend zu den signifikanten Ergebnissen der Anstrengung traten in diesem Versuch Wahrnehmungsstörungen während der Versuchsausführung auf. Wie von Hockey beschrieben, könnte es sich hierbei um Folgeerscheinungen von Ermüdung handeln.

Stellt man alle drei Versuche mit ihren Ergebnissen gegenüber, so wird deutlich, dass die Ergebnisse des Versuchs zum Einfluss von Mehrfachschaten bei Leseaufgaben eindeutig dem visuellen Diskomfort zugeordnet werden können. Hingegen stellen die Ergebnisse der anderen beiden Versuche eher eine Vorstufe des visuellen Diskomforts dar. Sie könnten der Störwirkung zugeordnet werden. Vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Versuchsergebnisse erscheint eine Differenzierung zwischen visuellem Diskomfort und Störwirkung sinnvoll. Insbesondere der Teilversuch zur Leseaufgabe bei Mehrfachschaten lässt erkennen, dass die subjektiv erlebte Anstrengung mit visuellem Diskomfort in Verbindung stehen könnte bzw. die subjektiv erlebte Anstrengung Hinweise auf das Auftreten von visuellem Diskomfort gibt.

Im Großen und Ganzen bringen die Versuchsergebnisse das Gütemerkmal Lichtrichtung und Schattigkeit stärker mit Störwirkung und visuellem Diskomfort in Verbindung als es Regeln und Normen vermuten lassen würden. Die Ergebnisse verdeutlichen Wirkungen der Beleuchtung, die in der Lichtanwendung und im Arbeitsschutz zukünftig Beachtung finden sollten.

Kritische Reflexion der Versuchsergebnisse:

Nach der Einordnung der Ergebnisse in einen übergeordneten Rahmen soll nun eine kritische Reflexion der Untersuchungen folgen. Eine wesentliche Schwäche der gesamten Forschungsarbeit liegt in der mangelhaften Quantifizierung des Gütemerkmals Lichtrichtung und Schattigkeit in Form eines Messkriteriums. In den einzelnen Teilversuchen wurde das Gütemerkmal meist mithilfe qualitativer Ansätze beschrieben. Die Ursache der mangelnden Quantifizierung liegt jedoch nicht beim Autor, sondern ist der Tatsache geschuldet, dass aktuell kein geeignetes Messkriterium für dieses Gütemerkmal vorliegt (siehe Abschnitt 2.3). Ein zentrales Problem betrifft die Tatsache, dass auch neuere Beschreibungsansätze wie jene von Liedtke et al. [Liedtke et al., 2013] oder Pont et al. [Pont et al., 2009] nicht unterscheiden können, ob ein Lichtfeld von einem LED-Array mit 50 separat abstrahlenden Lichtpunkten oder von einer Flächenlichtquelle mit gerichteter Lichtauskopplung erzeugt wird. Idealerweise muss sich die Ausprägung von Schlagschatten und Schattierungen aus den Messdaten ableiten lassen. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist die Berücksichtigung der Entstehung des Lichtfeldes aus der Anzahl der Lichtpunkte/Lichtquellen. Beispielsweise kann die Entstehung von Mehrfachschatten nur unter Berücksichtigung der Anzahl der Lichtpunkte erklärt werden. Trotz dieser Limitierungen scheint die Anwendung eines dreidimensionalen Messkriteriums am ehesten als geeignet. Problematisch ist weiterhin der Umstand, dass keine kommerziellen Messgeräte für dreidimensionale Lichtrichtungsmessungen verfügbar sind. Die Problematik des fehlenden Messkriteriums stellt weiterhin eine Herausforderung für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse dar.

Alle Beleuchtungsszenarien wurden nach den anerkannten Regeln der Technik und normativen Empfehlungen vermessen und quantifiziert. Hierbei wurden auch Messungen zum Modelling und zur

Körperwiedergabe durchgeführt. Beispielsweise wurde das Verhältnis von zylindrischer zu horizontaler Beleuchtungsstärke nach Empfehlung der DIN EN 12464 ermittelt. Im Rahmen der Versuchsauswertungen zeigten sich keine Zusammenhänge zwischen dem Verhältnis von zylindrischer zu horizontaler Beleuchtungsstärke und den hier dargestellten Ergebnissen.

Neben der Anwendung beleuchtungsstärkebasierter Indizes wurde ebenfalls der Versuch unternommen, Schattigkeit mithilfe ortsaufgelöster Leuchtdichtemessungen zu quantifizieren. Hierzu wurden Leuchtdichteaufnahmen von Schlagschatten und Schattierungen aufgenommen (z.B. Schlagschatten der Hände beim Versuch zum Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf visuell-motorische Leistung). Die Schwäche dieses Ansatzes liegt darin, dass sich die Ausprägung eines Schlagschattens, beispielsweise mit der Höhe des Schattenwerfers über der Projektionsfläche, verändert (vgl. Abschnitt 4.2). Demzufolge ergibt die Quantifizierung eines Schlagschattens mithilfe ortsaufgelöster Messtechnik nur dann einen Sinn, wenn es sich um statische Bedingungen (z.B. konstante Schattenwerferhöhe) handelt. Dies ist auch der Grund, warum einzig im Teilversuch zum Einfluss von Mehrfachschatten bei Leseaufgaben eine Quantifizierung der Mehrfachschatten mit Leuchtdichtemessungen vorgenommen wurde. In diesem speziellen Fall war die Höhe des Schattenwerfers in allen Versuchsbedingungen konstant so, dass jedem Versuchsteilnehmer derselbe Schlagschatten dargeboten wurde.

Aus Perspektive des Autors sind diese Limitierungen eher sekundär zu bewerten, da die Forschungsarbeit nicht den Anspruch erhebt, konkrete und belastbare Gestaltungsempfehlungen für Lichtrichtung und Schattigkeit festzulegen. Dies spiegelt sich auch in der geringen Anzahl der überprüften Schattenbedingungen wider. Vielmehr sollte

die Arbeit im Sinne eines „Proof-of-Concept“ die Bedeutung von Licht-
richtung und Schattigkeit für bestimmte Arbeitsaufgaben darstellen
und die Verbindung zum visuellen Diskomfort verdeutlichen.

Eine weitere wissenschaftliche Ungenauigkeit, welche sich durch die
gesamte Forschungsarbeit durchzieht, ist die fehlende Differenzierung
zwischen Licht- und Schattigkeit. In der gesamten Arbeit wer-
den Licht- und Schattigkeit als ein gemeinsames Güte Merkmal
betrachtet, obwohl diese Kriterien auch separat betrachtet werden
könnten. Zur Reduktion der Komplexität, insbesondere bei der statisti-
schen Versuchsplanung, wurde auf eine Auftrennung des Güte Merk-
mals in zwei unabhängige, separat zu betrachtende Variablen verzichtet.
Auch aus beleuchtungstechnischer Sicht ist die separate Steuerung von
Licht- und Schattigkeit nur schwer möglich. Weitere Erläuterungen für
die gemeinsame Betrachtungsweise sind im Abschnitt 2.1 zu finden.

Nachdem auf die Unzulänglichkeiten der Messbarkeit und Differenzie-
rung zwischen Licht- und Schattigkeit eingegangen wurde, sollen nun ein
paar Bemerkungen zur Generalisierbarkeit der Ergebnisse angeschlossen
werden.

Konkrete Gestaltungsempfehlungen für ausgewählte Arbeitsaufgaben
lassen sich aus den Versuchsergebnissen nur schwer ableiten, Grund
dafür ist die fehlende Generalisierbarkeit der Ergebnisse. Betrachtet
man beispielsweise die Ergebnisse zur visuell-motorischen Leistung,
so wurde im Abschnitt 3.1.3 darauf hingedeutet, dass die Bereitstellung
von handlungsrelevanten Schattenreizen, wie Schlagschatten der eigenen
Hände oder Schattierungen auf Objekten, die visuell-motorische Arbeit
unterstützen könnten. Diesbezüglich kann vermutet werden, dass der
Effekt der Schattigkeit für verschiedene manuelle Arbeitstätigkeiten
unterschiedlich sein könnte. Beispielsweise könnte sich

die Stärke des Effekts unterscheiden, wenn anstatt matter Bauteile, glänzende Bauteile bei einer Montageaufgabe verwendet werden. Die matten Bauteile könnten einen anderen „shape from shading“-Reiz für die Formwahrnehmung hervorrufen als die glänzenden Bauteile. Weiterhin könnte es einen Unterschied machen, ob die manuelle Tätigkeit über einer hellen Arbeitsfläche durchgeführt wird, auf welcher der Schlag Schatten der eigenen Hände gut sichtbar ist oder ob die Tätigkeit über einer dunklen Fläche ausgeführt wird. Ähnliche Überlegungen können zum Einfluss von Mehrfachschatten bei Leseaufgaben angestellt werden. In diesem Teilversuch wurden große Flächen des Bereichs der Sehaufgabe mit Schatten überlagert und deren Einfluss auf den visuellen Diskomfort untersucht. Auch hier kann spekuliert werden, dass die Größe des beschatteten Bereiches einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hatte. Demzufolge können auch diese Ergebnisse nicht auf sämtliche Leseaufgaben generalisiert werden.

Es wird deutlich, dass zu jedem der Teilversuche weiterführende Analysen notwendig sind, um zu konkreten Gestaltungsempfehlungen zu kommen. Dennoch erlauben die Ergebnisse die Ableitung einiger übergeordneter Praxisempfehlungen, welche im nächsten Abschnitt 4.2 erläutert werden.

4.2 Praxisempfehlungen

Einige der Studienergebnisse aus dem Praxisteil legen nahe, dass auftretende Mehrfachschatten sich unter bestimmten Bedingungen nachteilig auf den Sehkomfort und die visuelle Wahrnehmung auswirken können. Daher werden im Folgenden einige Überlegungen zur Vermeidung von Mehrfachschatten angestellt. Die Praxisempfehlungen zur Vermeidung von Mehrfachschatten betreffen vier wesentliche Aspekte:

- a) Abstand der Leuchte zum Schattenwerfer
- b) Abstand des Schattenwerfers zur Projektionsfläche
- c) Abstand zwischen den einzelnen Lichtpunkten eines LED-Arrays
- d) Anordnung der einzelnen Lichtpunkte im LED-Array

Einfluss der Faktoren a-c:

Bei der Ausbildung von Mehrfachschatten durch LED-Arrays tragen die Entfernung der Lichtquelle sowie der Abstand eines Schattenwerfers wesentlich zur Ausdehnung des Mehrfachschattens bei.

Uchida und Ohtani untersuchten den Einfluss von Schattenwerferhöhe sowie Anbauhöhe der Leuchte über der beleuchteten Fläche auf den Schattenwurf [Uchida und Ohtani, 2000]. Dabei verwendeten Sie einen kugelförmigen Schattenwerfer und charakterisierten ihre Ergebnisse mit Hilfe von ISO-Schattenfaktorlinien (ISO-Schattenfaktorlinien verbinden Punkte des gleichen Schattenfaktors). Aus den Ergebnissen der Studie lässt sich ableiten, dass eine Veränderung der Schattenwerferhöhe nur dann einen Einfluss auf den Schlagschatten hat, wenn die Höhenänderung gegenüber der Montagehöhe der Leuchte nicht vernachlässigt werden kann. Die Höhenänderung eines Schattenwerfers von 30 cm, beleuchtet von einer Leuchte in 10 m Anbauhöhe, wird nur minimale Schattenänderungen hervorrufen. Weder maximaler Schattenfaktor noch Ausdehnung des Schattens werden sich signifikant verändern. Auch die Verschiebung des Schattenwerfers in der Ebene gleicher Höhe wird keine Veränderungen des Schlagschattens hervorrufen. Wohingegen eine Höhenänderung des Schattenwerfers von 30 cm einen großen Einfluss auf den Schlagschatten haben wird, wenn sich die Leuchte in einem Abstand von nur 1 m von der beleuchteten Fläche befindet. Bezüglich der Ausdehnung des Schattenbereiches kann man für den letztgenannten Fall davon ausgehen, dass die Fläche

des beschatteten Bereiches sich in allen Fällen mit zunehmender Höhe des Schattenwerfers (Höhe über Schattenprojektionsfläche) ausdehnen wird. Nimmt man eine ideale Punktlichtquelle an, kann die Ausdehnung der Schattenfläche mit dem quadratischen Abstandgesetz erklärt werden, welches nachfolgend beispielhaft aus dem Strahlensatz an der quadratischen Pyramide (Abbildung 4.2) abgeleitet wurde.

Nach dem Strahlensatz gilt folgender Zusammenhang für die Kantenlängen a_1, r_1, a_2, r_2 :

$$\frac{a_1}{r_1} = \frac{a_2}{r_2} \quad (4.1)$$

Für die Schattenfläche A_2 ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$A_2 = \frac{(A_1 \cdot r_2^2)}{r_1^2} \quad (4.2)$$

Die dargestellten Beziehungen belegen, dass die Ausdehnung bzw. Reduktion der Schattenfläche, verursacht durch eine Veränderung der Leuchtenhöhe, mit einer Anpassung der Schattenwerferhöhe kompensiert werden kann. Soll sich beispielsweise die Ausdehnung eines Schlag-schattens (A_2) nach einer Vergrößerung der Leuchtenhöhe (r_1) nicht verändern, kann mit der dargestellten Formel die dafür notwendige Vergrößerung des Schattenwerferhöhe berechnet werden. Beispiel: Eine Leuchte mit einer Anbringungshöhe von 3 m ($r_2 = 3\text{ m}$) erzeugt durch einen quadratischen Schattenwerfer $A_1 = 1\text{ m}^2$ bei einer Entfernung des Schattenwerfers von der Leuchte von 2 m ($r_1 = 2\text{ m}$) eine Schattenfläche von $2,25\text{ m}^2$ ($A_2 = 2,25\text{ m}^2$). Nun soll die Anbringungshöhe der Leuchte um 1,5 m vergrößert werden ($r_2 = 4,5\text{ m}$). Wie groß muss der Abstand von Leuchte zum Schattenwerfer sein, damit sich die Schat-

tenfläche von $2,25\text{ m}^2$ ($A_2 = 2,25\text{ m}^2$) nicht verändert? Mit Hilfe der dargestellten Formel ergibt sich eine Vergrößerung des Abstandes von Leuchte zum Schattenwerfer von 1 m ($r_1 = 3\text{ m}$).

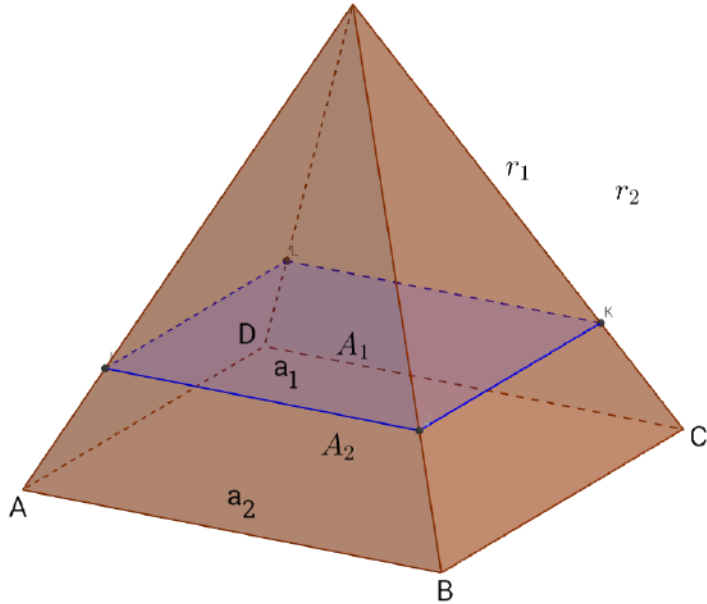


Abbildung 4.2: Strahlensatz und quadratisches Abstandsgesetz bei Schattenbildung

Daraus kann abgeleitet werden, dass mit einer Verkleinerung der Schattenwerferhöhe derselbe Effekt erreicht werden kann, wie mit einer Vergrößerung des Abstandes zwischen Schattenwerfer und Leuchte. Die Verkleinerung der Schattenwerferhöhe wird eine Verkleinerung des Schattenbereiches nach sich ziehen, wobei eine Vergrößerung der Leuchtenhöhe, bei gleichbleibender Schattenwerferhöhe, ebenfalls eine Verkleinerung des Schattenbereichs zur Folge haben wird. Einflüsse

auf den Schlagschatten, verursacht durch die Anbauhöhe der Leuchte, können durch eine Anpassung der Schattenwerferhöhe kompensiert werden.

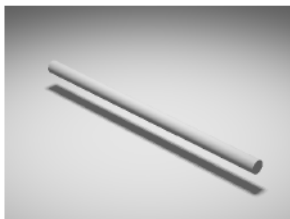
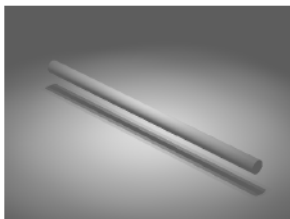
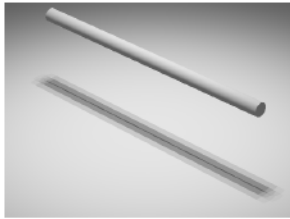
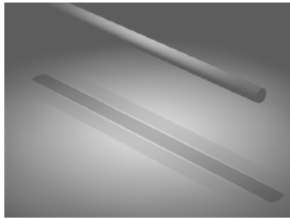
In Tabelle 4.1 wurden die eben erläuterten Gesetzmäßigkeiten auf die Entstehung von Mehrfachschatten übertragen. Die Tabelle zeigt vereinfachte Raytracingsimulationen die mithilfe von Pov-Ray v3.6 erstellt wurden. Bei der Berechnung der Simulationen aus Tabelle 4.1 wurde der Abstand der Lichtpunkte im LED-Array immer konstant gehalten. Lediglich Leuchtenhöhe und Schattenwerferhöhe wurden variiert.

Aus den Abbildungen wird deutlich, dass Mehrfachschatten bei großer Leuchtenentfernung (z. B. bei Montage einer Decken-Rasterleuchte mit LED-Array) in Kombination mit kleiner Schattenwerferhöhe kaum in Erscheinung treten (Bild links oben in Tabelle 4.1). Relativierend sei dazu erwähnt, dass diese Bedingung nur zutreffend ist, wenn der Abstand der Lichtpunkte im Array im Verhältnis zur Entfernung der Leuchte vernachlässigt werden kann.

Betrachtet man im Vergleich dazu eine Steh- oder Arbeitsplatzleuchte, welche sich nur in geringer Entfernung von der beleuchteten Fläche befindet (Abbildung rechts oben), dann tritt der Mehrfachschatten des LED-Arrays schon sehr viel deutlicher in Erscheinung.

Die Darstellung in Tabelle 4.1 ist gleichermaßen für eine Variation der Lichtpunktabstände in einem LED-Array zutreffend. Hält man die Leuchtenhöhe konstant und variiert lediglich den Abstand der Lichtpunkte im LED-Array, ergeben sich dieselben Effekte. Eine Abstandsvergrößerung zwischen den Lichtpunkten wird identische Ergebnisse hervorrufen, wie in der rechten Spalte von Tabelle 4.1

Tabelle 4.1: Einfluss von Leuchtenentfernung und Schattenwerferhöhe auf die Ausbildung von Mehrfachschatten

	entfernte Lichtquelle z. B. Deckenleuchte	naheliegende Licht- quelle z. B. Steh- leuchte
kurze Ent- fernung des Schatten- werfers zur Projektions- fläche		
große Ent- fernung des Schatten- werfers zur Projektions- fläche		

dargestellt. Analog wird eine Abstandsverkleinerung der Lichtpunkte in einem LED-Array bei konstanter Leuchtenhöhe dieselben Ergebnisse hervorrufen wie in den Abbildungen der linken Spalte dargestellt.

Für die Beleuchtungsgestaltung kann daher abgeleitet werden, dass die Art der Arbeitsaufgabe berücksichtigt werden sollte. Beispielsweise können bei manueller Montagearbeit die Hände als Schattenwerfer angesehen werden. Für diese Arbeitsaufgabe kann eine ungefähre Schattenwerferhöhe festgelegt werden. Häufig wird manuelle Montagearbeit dicht über der Arbeitsfläche ausgeführt (vgl. Teilversuch zum Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf visuell-motorische Leistung), dann kann eine Steh- oder Arbeitsplatzleuchte zur Bildung

starker Mehrfachschatten beitragen, wohingegen eine Deckenbeleuchtung dieser entgegenwirken würde (vgl. Tabelle 4.1). Analog kann eine Verkleinerung der Lichtpunktabstände im LED-Array einer Stehleuchte die Bildung von Mehrfachschatten reduzieren.

Einfluss des Faktors d:

Ein weiterer Faktor, welcher die Erscheinung von Mehrfachschatten wesentlich beeinflussen kann, ist die Anordnung der einzelnen Lichtpunkte in einem LED-Array. Um die Ausprägung des Mehrfachschattens in Abhängigkeit der Anordnung der Lichtpunkte betrachten zu können, muss zusätzlich die Form des Schattenwerfers Berücksichtigung finden. Bei der Ausbildung von Mehrfachschatten tritt die Anordnung der Lichtpunkte mit der Form des Schattenwerfers in Interaktion. Dieser Umstand soll am Beispiel von Abbildung 4.3 verdeutlicht werden. Abbildung 4.3 zeigt einen Rundstab (Schattenwerfer), welcher senkrecht von oben mit einem hexagonalen LED-Array beleuchtet wird. Abbildung 4.4 (rechts) illustriert schematisch die Leuchtenanordnung (blau) mit dem Stab (rot).

Der Effekt soll zunächst bei einem Rotationswinkel des Rundstabs von 180° erläutert werden. An diesem Beispiel lassen sich Vereinfachungen ableiten, welche zum Verständnis von komplexeren Schattenmustern beitragen (z. B. 135°). Im dargestellten Fall (Abbildung 4.4) befindet sich der Rundstab in einer Flucht mit den Leuchten L3, L4 und L5. In der Folge projizieren die Leuchten L3, L4 und L5 einen gemeinsamen mittigen Schatten. Neben dem mittigen Schatten entstehen links und rechts der Mitte zwei weitere Schatten, welche durch die Leuchten L1 und L2 (auf der linken Seite) bzw. durch die Leuchten L6, L7 (auf der rechten Seite) erzeugt werden. Dennoch sieht man im Bild mehrere „Helligkeitsstufen“. Die Ursache hierfür liegt darin, dass die äußeren Schatten (erzeugt durch Leuchten L6, L7 bzw. L1, L2) sich mit dem

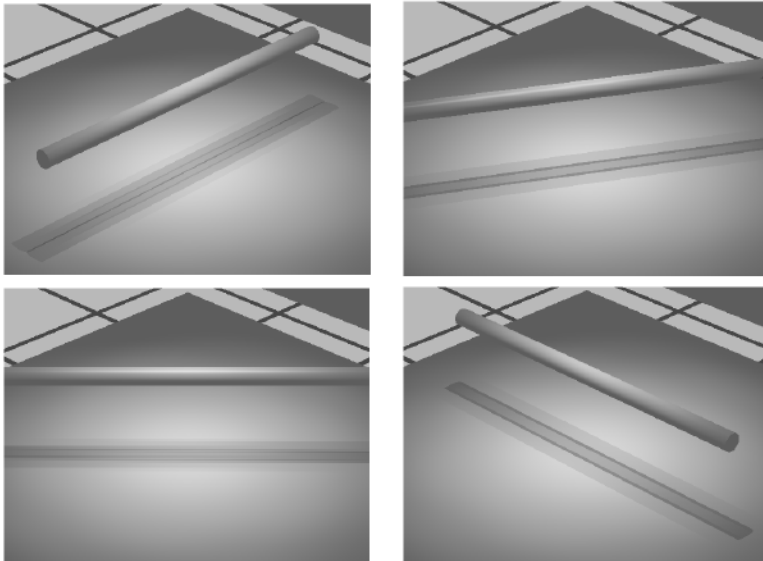


Abbildung 4.3: Rotation des Schattenwerfers: 90° , 120° , 135° , 180°
(von links nach rechts)

mittigen Schatten der Leuchten L3, L4, L5 überlagern. Dies führt dazu, dass an den äußeren Bereichen des mittleren Schattens eine dunkle Kante entsteht (Kernschattenbereich). Diese dunkle Kante kennzeichnet den Beginn der Überlagerung von mittlerem und äußerem Schatten. Die dunkle Kante endet anschließend dort, wo der mittlere Schatten endet. Übrig bleibt noch der Halbschatten, verursacht durch die äußeren Leuchten. Weiterhin erkennt man, dass die äußeren Schatten zu den Enden des Stabes hin abklingen. Ursache dafür ist, dass die Beleuchtungsstärkeverteilungen der äußeren Lichtpunkte in diesen Bereichen stark an Intensität verlieren. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in dieser Position des Schattenwerfers nur 3 separate Schatten sichtbar werden, obwohl der Stab von 7 Lichtpunkten beleuchtet wird. Die Schatten der Leuchten L3, L4, L5 lassen sich zu einem mittigen Schlagschatten zusammenfassen. L6 und L7 erzeugen einen Schatten auf der rechten Seite des Stabes und L1 und L2 einen auf der linken Seite. Dieser Umstand wird besser verständlich, wenn man seine eigene Beobachterposition in den Bereich des mittigen Schattens hineinversetzt und in Richtung der Leuchten schaut. Aus dieser Perspektive werden die Leuchten L3, L4, L5 durch den Schattenwerfer verdeckt erscheinen, lediglich die Leuchten L1, L2 bzw. L6, L7 sind sichtbar. Weiterhin wird deutlich, dass ein Stab mit Rotationswinkeln von 0° , 60° , 120° , 180° bei hexagonaler Lichtpunktanordnung dieselben Schatten erzeugen werden, wie im hier dargestellten Fall.

Aus diesen Überlegungen lassen sich folgende Kernpunkte ableiten, welche das Verständnis der Entstehung von Mehrfachschatten erleichtern:

- Lichtpunkte auf einer Seite (z. B. rechts) des Schattenwerfers erzeugen einen Schlagschatten auf der gegenüberliegenden (links) Seite des Schattenwerfers

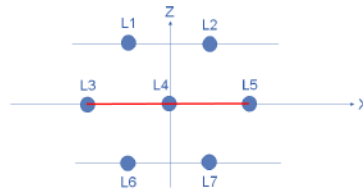
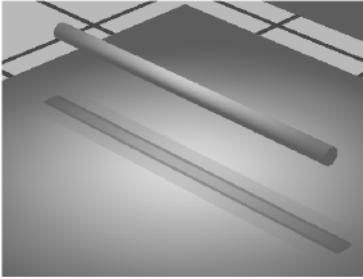


Abbildung 4.4: Schattenwerferwinkel 180°

- Je weiter sich ein Lichtpunkt von der „Längsachse“ des Schattenwerfers entfernt befindet, desto weiter entfernt erscheint die Projektion des Schlagschattens auf der gegenüberliegenden Seite
- Ein abfallender Schattenkontrast (z. B. an den Stabenden in Abbildung 4.4) deutet auf den Randbereich einer Beleuchtungsstärkeverteilung eines Lichtpunktes (dieser Bereich des Stabes liegt außerhalb bzw. im Randbereich des Lichtkegels eines Lichtpunktes) ¹
- Der Grad der Überlappung von Halbschatten ergibt sich aus der Anzahl unterschiedlicher Schattenbereiche minus 1 (im vorangegangenen Beispiel (Abbildung 4.4) können 3 Schattenbereiche unterschieden werden (Halbschatten außen (links und rechts), Kernschatten (dunkle dünne Streifen), Halbschatten mittig), demnach überlappen sich maximal 2 Halbschatten ($3-1=2$))
- Sonderfall: Bilden die Lichtpunkte eine Flucht parallel zur Stabachse (bzw. lassen sich die Lichtpunkte zu einer Geraden verbinden)

¹In den hier dargestellten Fällen handelt es sich um kreisrunde Beleuchtungsstärkeverteilungen mit cosinusförmiger Intensitätsverteilung.

den, welche parallel zur Stabachse liegt), ergibt sich ein Sonderfall der Mehrfachschattenbildung:

- in diesem Sonderfall kann nicht von der Anzahl der Einzelschatten auf die Anzahl der Lichtpunkte geschlossen werden
 - in diesem Sonderfall überlagern sich einzelne Schlagschatten zu einem visuell nicht trennbaren gemeinsamen Schlag Schatten (in Abbildung 4.4 lassen sich 3 „Geraden“ erzeugen, welche parallel zum Schattenwerfer liegen (Gerade L1-L2, Gerade L3-L4-L5, Gerade L6-L7), jede dieser „Geraden“ erzeugt einen separaten Schlagschatten (3 Schlagschatten bei 7 Lichtpunkten)
- Lassen sich die Lichtpunkte des Arrays nicht zu einer Gerade verbinden, welche parallel zum Schattenwerfer liegt, verdoppelt sich die Anzahl der Schattenstufen mit jedem zusätzlichen Lichtpunkt (Abbildung 4.6)

Anschließend an diese verbalen Erläuterungen sollen die Zusammenhänge mithilfe mathematischer Formeln beschrieben werden. Abbildung 4.5 zeigt ein hexagonales LED-Array, wobei die Punkte A-F einzelne Lichtquellen des Arrays darstellen sollen. Die Gerade f soll den Schattenwerfer repräsentieren. Ausschlaggebend für die Ausbildung von Mehrfachschatten ist der Abstand der einzelnen Lichtpunkte zum Schattenwerfer (z. B. Abstand der Punkte G und B). Weisen die Lichtpunkte unterschiedliche (senkrechte) Abstände zum Schattenwerfer auf, so wird jeder Lichtpunkt einen separaten Einzelschatten erzeugen. Es wird ein komplexes Mehrfachschattenmuster erzeugt. Haben die Lichtpunkte hingegen denselben Abstand vom Schattenwerfer (Abbildung 4.5), dann vereinfacht sich das Schattenmuster deutlich. Der

Abstand der Lichtpunkte kann mithilfe der nachfolgenden Herleitung berechnet werden:

Geradengleichung für den Schattenwerfer f:

$$f : y = m \cdot x + n \quad (4.3)$$

Stehen zwei Geraden f und g senkrecht aufeinander, so ergibt sich das Produkt ihrer Steigungen zu -1 (Orthogonalitätsbedingung). Damit kann die Geradengleichung der orthogonalen Gerade g bestimmt werden:

$$g : y = -\frac{x}{m} + b \quad (4.4)$$

Die orthogonale Gerade g soll durch den Punkt B verlaufen:

$$b = \frac{x_B + y_B \cdot m}{m} \quad (4.5)$$

Nun werden die Koordinaten des Schnittpunktes G durch die Geraden f und g bestimmt:

$$x_G = \frac{x_B + m \cdot (y_B - n)}{m^2 + 1} \quad (4.6)$$

$$y_G = \frac{x_B \cdot m + y_B \cdot m^2 + n}{m^2 + 1} \quad (4.7)$$

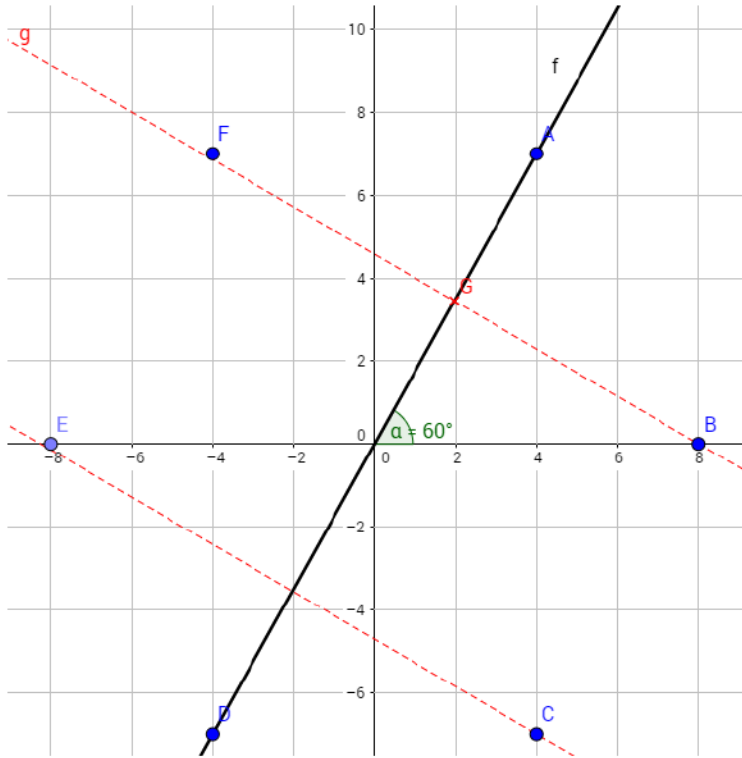


Abbildung 4.5: Senkrechter Abstand eines Lichtpunktes zum Schattenwerfer

Jetzt kann der Abstand d der Punkte B und G berechnet werden:

$$d = \sqrt{(y_B - y_G)^2 + (x_B - x_G)^2} \quad (4.8)$$

$$d = \sqrt{\left(y_B - \frac{x_B \cdot m + y_B \cdot m^2 + n}{m^2 + 1}\right)^2 + \left(x_B - \frac{x_B + m \cdot (y_B - n)}{m^2 + 1}\right)^2} \quad (4.9)$$

$$d = \sqrt{\frac{(m \cdot x_B + n - y_B)^2}{m^2 + 1}} \quad (4.10)$$

Wahlweise kann der Anstieg m der Geraden f durch eine Winkelbeziehung ersetzt werden:

$$d = \sqrt{\frac{(\tan(\alpha) \cdot x_B + n - y_B)^2}{\tan(\alpha)^2 + 1}} \quad (4.11)$$

Für das Beispiel in Abbildung 4.5 ergibt sich ein Abstand des Lichtpunktes B zum Schattenwerfer von $d = 6,9$ cm. Denselben Abstand besitzen die Punkte C, E und F.

Diese Erkenntnisse sollen nun genutzt werden, um einen komplexeren Mehrfachschatten zu interpretieren. Im nachfolgenden Beispiel soll der Rotationswinkel des Schattenwerfers 135° betragen (Abbildung 4.6). In diesem Beispiel können 14 Helligkeitsstufen gezählt werden, unter Zuhilfenahme der oben genannten Vereinfachungen stammt der Schatten damit von 7 Lichtquellen. Hinsichtlich der Leuchtenanordnung lassen sich keine Leuchten zu einer Gerade verbinden, welche parallel

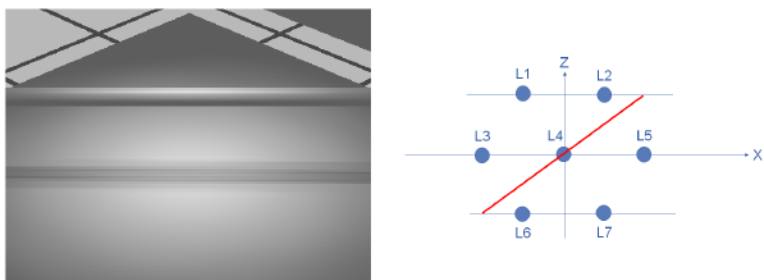


Abbildung 4.6: Schattenwerferwinkel 135°

zum Stabachse liegt. Demnach gibt es keine Leuchten, welche einen gemeinsamen Schatten bilden. Aus der Darstellung (Abbildung 4.6) wird deutlich, dass sich zu jeder Seite des Schattenwerfers 3 Leuchten befinden. Jede dieser 3 Leuchten befindet sich in einem anderen Abstand zur Schattenwerferachse und erzeugt demnach einen separaten Schatten. Die Leuchten L1 bzw. L7 erzeugen den am weitesten außen liegenden Schatten. Leuchte L2 bzw. L6 erzeugen den Schatten mit kleinstem Abstand zum mittleren Schatten, welcher senkrecht von der Leuchte L4 auf die Tischfläche projiziert wird.

Die bisherigen Überlegungen wurden alle am Beispiel eines hexagonalen LED-Arrays erläutert. Abbildung 4.7 zeigt die Mehrfachschattenentstehung bei einem Rechteckarray. Korrespondierend zu Abbildung 4.7 sind in Abbildung 4.8 die Rotationswinkel des Schattenwerfers angegeben. Es wird deutlich, dass die beschriebenen Gesetzmäßigkeiten auch auf Rechteck-Arrays und andere Array-Formen angewendet werden können.

Nachdem etwas intensiver auf die Entstehung von Mehrfachschatten eingegangen wurde, soll nun die Bedeutung dieses Effekts verdeutlicht

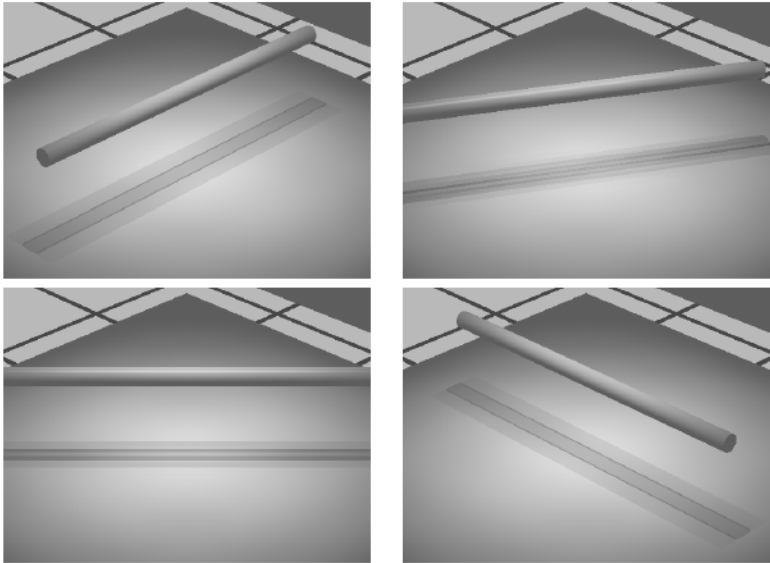


Abbildung 4.7: Rotation des Schattenwerfers unter Rechteckarray: 90° , 120° , 135° , 180° (von links nach rechts)

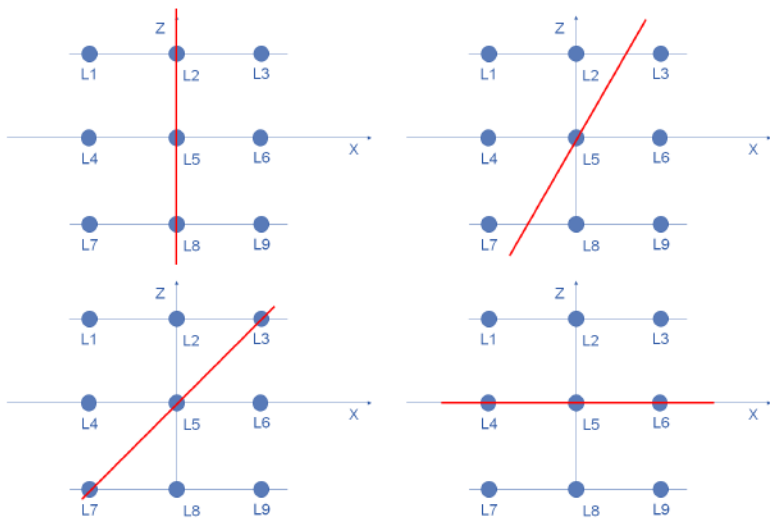


Abbildung 4.8: Position des Schattenwerfers: 90° , 120° , 135° , 180° (von links nach rechts)

werden. Eine Besonderheit von Mehrfachschaten liegt demnach darin, dass sich der Schlagschatten, genauer gesagt der Leuchtdichtegradient des Schlagschattens, mit einer Drehung des Schattenwerfers verändert (siehe Abbildung 4.3). Stellt man sich nun anstatt eines einfachen Schattenwerfers wie dem Rundstab einen komplexeren Schattenwerfer vor, wie z.B. den der eigenen Hand, dann wird die Schattenbildung wiederum komplexer. Der Schlagschatten des Daumens wird beispielsweise einen anderen Leuchtdichtegradienten aufweisen als der Schlagschatten des Zeigefingers. Befindet sich die Hand zusätzlich in Bewegung, so wird der Mehrfachschaten an manchen Stellen unscharf und an anderen Stellen wieder scharf oder es verändert sich die Anzahl der Schattenstufen.

Diesbezüglich kann spekuliert werden, dass Mehrfachschaten einen Eindruck von Unschärfe hervorrufen können, wenn scharfe und verschwommene Schattenkanten gleichzeitig auftreten. Möglicherweise können solche Effekte visuellen Diskomfort begünstigen [O'Hare und Hibbard, 2013].

In den Vorversuchen zu den Experimenten des Praxisteils berichteten Probanden von einem Gefühl der Unschärfe bei der Betrachtung sich verändernder Schlagschatten. Es wurde beschrieben, dass das Auge bei der Drehung eines gitterähnlichen Schattenwerfers im Lichtfeld eines LED-Arrays, einen Moment benötigt, „um wieder scharfzustellen“. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass dieser Effekt auch bei Leuchtstoffröhren auftritt, eine Rotation des Schattenwerfers wird bei Leuchtstoffröhren ebenfalls eine Veränderung des Schlagschattens hervorrufen, diese tritt jedoch nicht so deutlich in Erscheinung, da es sich um einen weichen Halbschatten handelt. Durch das gerichtete Licht der LEDs werden solche Unterschiede in der Schattenbildung sehr

viel deutlicher, als es bei Leuchtstoffröhren der Fall ist. Stellt man sich im Vergleich eine einzelne Punktlichtquelle vor (z. B. eine Glühlampe), so wird der Schlagschatten sich mit der Drehung des Schattenwerfers nicht verändern. Eine weitere Besonderheit von Punktlichtquellen ist, dass diese keine Halbschatten erzeugen, demgegenüber zeigen Mehrfachschatten von LED-Arrays vielfältige Halbschatten mit unterschiedlichen Leuchtdichten. Beispielsweise zeigt Abbildung 4.4 zwei unterschiedliche Halbschattenbereiche (einen Bereich in der Mitte, senkrecht unter dem Rundstab und einen weiteren Bereich rechts und links an den Außenseiten). Das Auftreten von Halbschatten bei Lichtquellen mit gerichtetem Licht ist ungewöhnlich, Halbschatten sind Charakteristika flächiger, diffuser Lichtquellen. „The presence of a penumbra gives an indication of the fact that the light source is extended, and to some extent – usually in a very crude way – of the shape of the light source.“ [Casati, 2004] (S. 5). Vergleicht man LED-Arrays mit natürlichen Lichtfeldern, wie dem gerichtetem Sonnenlicht oder der diffusen Himmelsstrahlung, wird auch hierbei deutlich, dass eine Rotation des Schattenwerfers bei natürlichen Lichtfeldern keine Auswirkungen auf den Schlagschatten haben wird. Vor diesem Hintergrund stellen die Mehrfachschatten von LED-Arrays eine Neuheit für das visuelle System dar, welche sich vom Beobachter nicht so intuitiv erklären lassen, wie es bei Einzelschatten einer separaten Lichtquelle der Fall wäre.

Die Erläuterungen dieser Schattengesetze ist gezielt etwas ausführlicher vorgenommen worden, weil sie bei der Gestaltung von Leuchten oder bei der Beschaffung von Leuchten berücksichtigt werden sollten. Bei der Leuchtengestaltung könnte bezüglich der Anordnung von LEDs in einem Array ein Muster gewählt werden, welche keine allzu großen Veränderungen des Schlagschattens hervorruft, wenn der Schattenwerfer gedreht wird. Bringt man beispielsweise rotationssymmetrische

Lichtpunktanordnungen zur Anwendung (z. B. hexagonale Muster oder Muster aus konzentrischen Kreisen) dann kann dieser Effekt reduziert werden.

Bei der Auswahl von Leuchten im Rahmen eines Beschaffungsvorgangs empfiehlt es sich, die Leuchte in ausgeschaltetem Zustand zu betrachten. Dabei können die Anordnung der LEDs sowie der Abstand der Lichtpunkte inspiziert werden, welche Hinweise auf eventuelle Probleme bei der Lichtqualität geben können. Lichtpunktabstand und Anbringungshöhe der Leuchte sollten vor dem Hintergrund der in Tabelle 4.1 beschriebenen Gesetzmäßigkeiten berücksichtigt werden. Handelt es sich beispielsweise um manuelle Montagetätigkeiten, bei denen sich die Hände und Werkzeuge dicht über einer Tischoberfläche bewegen, kann eine entfernte Lichtquelle mit größerem Lichtpunktabstand gewählt werden. Besteht hingegen keine Möglichkeit Leuchten in großer Höhe anzubringen, kann ein dichterer Lichtpunktabstand die Entstehung von Mehrfachschatten reduzieren.

Die Bildung von Mehrfachschatten kann außerdem qualitativ mithilfe der eigenen Hände als Schattenwerfer überprüft werden, wenn bei der Demonstration einer Leuchte vergleichbare Bedingungen wie beim geplanten Einsatz der Leuchte vorliegen. Entstehen dabei Mehrfachschatten mit großer Schattenanzahl, scharfen Schattenkanten oder hohem Schattenkontrast, kann visueller Diskomfort auftreten und die visuell-motorische Leistung beeinträchtigt werden.

Auch für die Beleuchtung von Industriehallen können die Gesetzmäßigkeiten aus Tabelle 4.1 berücksichtigt werden. Ist die Industriehalle mit großen Schatten werfenden Objekten (z. B. Maschinen) ausgestattet oder sind, über den am Boden gelegenen Arbeitsplätzen, Etagen mit begehbaren Gitterrosten angebracht, können kleine Lichtpunktabstände innerhalb der Leuchten selbst bei großer Anbringungshöhe starke und ausgedehnte Mehrfachschattenbereiche auf dem

Hallenboden erzeugen. Es wird deutlich, dass bei der Beschaffung bzw. Lichtplanung in Hinblick auf die Schattenbildung folgende Parameter in ihren Wechselwirkungen miteinander betrachtet werden sollten, eventuell ließen sich diese sogar zu einem Index vereinen:

- Anbringungshöhe der Leuchte
- Muster der Lichtpunktanordnung innerhalb der Leuchte (Rechteck, Hexagon etc.)
- Lichtpunktabstand innerhalb des LED-Arrays
- Größe der Lichtpunkte
- Schattenwerferhöhe (ergibt sich aus der Analyse der Arbeitsaufgaben)
- Schattenwerferbreite

Neben den Empfehlungen für die Auswahl von Leuchten lassen sich auch allgemeine, übergeordnete Gestaltungsempfehlungen aus dem Praxisteil ableiten.

Eine zentrale Erkenntnis aus den einzelnen Teilversuchen betrifft die Tatsache, dass Lichtrichtung und Schattigkeit im Kontext der Arbeitsaufgabe betrachtet werden sollten. Die Teilversuche zeigen, dass unterschiedliche Arbeitsaufgaben unterschiedliche Anforderungen an Lichtrichtung und Schattigkeit stellen. Die aktuelle Regelung und Normung gibt im wesentlichen allgemeingültige Empfehlungen für dieses Gütemerkmal, die unabhängig von der Arbeitsaufgabe zu sein scheinen (vgl. Abschnitt 2.2). Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit kann abgeleitet werden, dass es bedeutsam ist, eine Arbeitsaufgabenanalyse durchzuführen, welche die Sehaufgaben

betrachtet und die Schattigkeitsbedingungen für die Arbeitsaufgabe kontextabhängig festgelegt werden (ähnlich, wie es bei den Festlegungen zum Beleuchtungsniveau der Fall ist). Auch die Erläuterungen zur „two visual systems theory“ aus dem Abschnitt 3.1.3 deuten auf eine kontextabhängige Verarbeitung visueller Informationen hin.

Eine zweite zentrale Erkenntnis aus den Versuchen zur Formwahrnehmung und zur visuell-motorischen Leistung betrifft die Erleichterung der Sehaufgabe durch konkrete Gestaltungsmaßnahmen. Die Versuche ergaben, dass es hilfreich sein kann, dem visuellen System durch Lichtrichtung und Schattigkeit bestimmte Informationsquellen für die Ausführung der Arbeitsaufgabe zur Verfügung zu stellen oder irreführende Reize zu vermeiden. Beispielsweise könnte die visuell-motorische Arbeit durch Bereitstellung notwendiger Tiefeninformationen für das Hinlangen und Greifen unterstützt werden. Für die gute Wahrnehmbarkeit von Objekten kann die Vermeidung inhomogener, komplexer Lichtfelder von Vorteil sein. Hinsichtlich der Formwahrnehmung wäre es denkbar, ein Gütemerkmal zur dreidimensionalen Gleichmäßigkeit der Lichtrichtung, in Analogie zur Gleichmäßigkeit im Umgebungsbereich oder zur Gleichmäßigkeit im Bereich der Sehaufgabe, einzuführen.

Ein dritter Punkt, der in Kombination mit dem vorgenannten Aspekt Berücksichtigung finden sollte, betrifft die Wechselwirkung mit der subjektiv erlebten Anstrengung. Die Resultate des Versuchs zur visuell-motorischen Leistung zeigen, dass optimale Bedingungen für die Tiefenwahrnehmung (gerichtetes Licht von einer einzelnen Punktlichtquelle) mit einer größeren subjektiv erlebten Anstrengung verbunden sein können. Werden solche Zielkonflikte zwischen Wahrnehmung und Anstrengung festgestellt, sollte versucht werden, diese auszubalancieren

und etwas ungünstigere Wahrnehmungsbedingungen zugunsten einer reduzierten subjektiv erlebten Anstrengung in Kauf zu nehmen.

4.3 Weiterführender Forschungsbedarf

Zunächst soll der Forschungsbedarf separat für jeden der drei Teilversuche aufgezeigt werden, anschließend wird auf übergreifenden Forschungsbedarf zum Gütemerkmal Lichtrichtung und Schattigkeit eingegangen.

Forschungsbedarf zum Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf die Formwahrnehmung:

Im Abschnitt 3.1.2 wurde die Vermutung geäußert, dass unnatürliche, komplexe Lichtfelder einen größeren Fehler bei der Formwahrnehmung hervorrufen als einfache, homogene Lichtfelder. Eine mögliche Erklärung für diese Versuchsergebnisse könnte eine Angepasstheit des visuellen Systems an natürliche Lichtfelder sein. Die Angepasstheit des visuellen Systems an bestimmte natürliche Bedingungen wurde in dieser Arbeit bereits an verschiedenen Stellen adressiert (z.B. „Light from above“-Annahme bei der Formwahrnehmung („shape from shading“) [Kleffner und Ramachandran, 1992], Angepasstheit der Ortsfrequenzkanäle des visuellen Systems an die $1/f$ -Statistik natürlicher Bilder [O’Hare und Hibbard, 2011]). In Hinblick auf den Formbewertungsversuch könnte die These, zur Angepasstheit des visuellen Systems an natürliche Bedingungen, durch einen weiteren Teilversuch untermauert werden, in welchem die Formwahrnehmung bei einer Mischung von gerichtetem und diffusem Licht untersucht wird. Betrachtet man die natürlichen Beleuchtungsbedingungen im Freien, so findet man dort häufig eine Vermischung von diffusem Himmelslicht und gerichteter Sonnenstrahlung. Diesbezüglich kann

vermutet werden, dass die Mischung von gerichteten und diffusen Lichtanteilen nochmals eine Verbesserung der Formwahrnehmung hervorruft als es bei gerichtetem oder diffusem Licht allein der Fall war. Im Versuch zur Formwahrnehmung wurde lediglich die gerichtete mit der diffusen Beleuchtung verglichen, wobei keine Unterschiede in der Formwahrnehmung auftraten. Die Mischung dieser beiden Lichtanteile ermöglicht einerseits deutliche Schattierungen für Tiefe und Plastizität und andererseits eine Aufhellung von Eigenschattenbereichen, die unter ausschließlich gerichteter Beleuchtung schwer zu interpretieren sind. Die Effekte mangelnder Plastizität sowie schwer interpretierbarer Eigenschattenbereiche werden bei der Betrachtung von Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 besonders deutlich.

Eine weitere Forschungsempfehlung betrifft die Anwendung der hier dargestellten Methodik zur Erfassung der subjektiv wahrgenommenen Objektform, auf das Modelling von Gesichtern. In einem technischen Report äußert die CIE Forschungsbedarf zum Thema „modelling of faces“ [CIE 205:2013, 2013]. Mit der im Abschnitt 3.1.2 beschriebenen Methode könnten die subjektiv wahrgenommenen Gesichtsformen für unterschiedliche reale Beleuchtungsbedingungen untersucht werden. Anschließend könnte evaluiert werden, welcher Modelling Index die Veränderungen der subjektiv wahrgenommenen Gesichtsform am besten beschreibt.

Forschungsbedarf zum Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf die visuell-motorische Leistung:

Ein unerwartetes Ergebnis des Teilversuchs zur visuell-motorischen Leistung betrifft die besseren Leistungswerte bei Mehrfachschatten oder diffuser Beleuchtung. Bei der Hypothesenbildung wurde darauf aufmerksam gemacht, dass Schlagschatten und Schattierungen von Ob-

jekten Handlungsaufforderungen geben können (Affordanzen) sowie die Schlagschatten der Hände einen Aufmerksamkeitseffekt im motorischen System hervorrufen [Pavani und Galfano, 2015]. In dieser Beziehung wäre davon auszugehen gewesen, dass gerichtetes Licht einer separaten Punktlichtquelle und einer klaren Einzelschattenbildung bessere Leistungswerte hervorruft. Entgegen der Hypothese erzeugte gerichtetes Licht mit Einzelschatten signifikant schlechtere visuell-motorische Leistung als die Mehrfachschattenbeleuchtung. Über die Ursachen dieser Ergebnisse herrscht Unklarheit, daher wird diesbezüglich Forschungsbedarf gesehen.

Einen weiteren Ausgangspunkt für zukünftige Forschungsarbeiten bildet die „two visual systems theory“ [Goodale und Milner, 1992], welche postuliert, dass bei der visuellen Informationsverarbeitung eine Funktionstrennung nach „vision for action“ (dorsal stream) und „vision for perception“ (ventral stream) stattfindet. Diesbezüglich stellt sich die Frage, ob für das visuell-motorische System andere Beleuchtungsbedingungen von Vorteil sind als für das visuelle System. Möglicherweise sind die Ansätze, von Weston und Luckiesh aus den 1930ern, zur Quantifizierung der Sehleistung mithilfe der Erkennungsgeschwindigkeit und Erkennungsgenauigkeit für das visuell-motorische System (dorsal stream) nicht geeignet oder nur teilweise zutreffend. Es ist bekannt, dass diese Untersuchungen maßgeblich zur Festlegung von Beleuchtungsstärkewerten in Arbeitsstätten beigetragen haben [Rea, 2012]. Diesbezüglich könnte argumentiert werden, dass die Versuche von Weston und Luckiesh allein auf das visuelle System (ventral stream) fokussiert waren.

Forschungsbedarf zum Einfluss von Mehrfachschatten bei Leseaufgaben:

Die zentrale Hypothese des Teilversuchs zum Einfluss von Mehrfachschatten bei Leseaufgaben lautete, dass Mehrfachschatten bestimmter Ortsfrequenzen für das Auge unangenehm erscheinen können. Zur Überprüfung dieser Annahme wurden orts aufgelöste Leuchtdichtebilder von Mehrfachschatten mithilfe einer Fast-Fourier-Transformation in die vorherrschenden Ortsfrequenzen zerlegt (siehe Tabelle 3.18). Vernachlässigt man die Schattenkontraste des Mehrfachschattens, so sind Leuchtdichtedaten für die Analyse der Ortsfrequenzen nicht zwingend erforderlich. In diesem Fall könnte die Analyse mithilfe einer Fotografie auf dem Smartphone durchgeführt werden. Nach Eingabe einiger Zusatzinformationen, wie der Entfernung des Smartphones zum Schlagschatten, zur Berechnung des Schwinkels und einer Neigungskorrektur durch die Neigungssensoren, kann eine automatisierte Bewertung erfolgen, welche das Kamerabild nach unkomfortablen Ortsfrequenzen durchsucht. Unter Einsatz einer solchen App könnten eventuelle Risiken für das Auftreten akuter visueller Beschwerden am Arbeitsplatz vorhergesagt werden.

Übergreifender Forschungsbedarf:

Eine der zentralen Schlussfolgerungen, welche aus dieser Arbeit abgeleitet werden kann, ist die Forderung nach kontextabhängigen Beleuchtungsempfehlungen für Lichtrichtung und Schattigkeit. Es werden Anforderungen für bestimmte Gruppen von Arbeitsaufgaben benötigt, welche sich nach den in Abschnitt 2.1 dargestellten Wahrnehmungsmechanismen richten (z. B. manuelle Montagetätigkeit, zwischenmenschliche Kommunikation/Videokonferenz, Prüftätigkeiten). Um Anforderungen für bestimmte Gruppen von Arbeitsaufgaben festlegen zu können, sollte die Wirkung von Lichtrichtung und Schattigkeit bei un-

terschiedlichen Arbeitsaufgaben in weiterführenden Studien untersucht werden. Darüber hinaus wird ein Messkriterium benötigt, welches in der Lage ist, die hier dargestellten Effekte erklären bzw. vorhersagen zu können. Bislang fehlt ein sinnvolles Sehmodell, welches eine Verbindung zwischen Messkriterium und Wahrnehmung herstellt. Diesbezüglich könnten bestehende Beschreibungsansätze zur Lichtrichtung und Schattigkeit mit Fallbeispielen korreliert werden.

Mit dem Blick auf zukünftige Forschungsarbeiten, welche Leistungsparameter in Abhängigkeit der Beleuchtung untersuchen, könnte eine nähere Auseinandersetzung mit dem „Compensatory control model of performance regulation“ [Hockey, 1997] lohnenswert sein. Das Modell von Hockey zum Einfluss der Anstrengung auf die Leistung, welches in Abschnitt 4.1 dargestellt wurde, ist in seiner Anwendbarkeit auf dem Feld der Beleuchtung kaum untersucht worden. Zur Stützung des Modells könnte beispielsweise ermittelt werden, ob es bei ungünstigen Beleuchtungsbedingungen, (z. B. Flimmern oder Blendung) neben Veränderungen in der Beanspruchung, zu einem Leistungsabfall in sekundären Arbeitsaufgaben kommt (vgl. Abschnitt 4.1). Auf dem Gebiet der Psychologie, z. B. bei psychischen Belastungen, handelt es sich um eine anerkannte Tatsache, dass vom Individuum gesteuerte Kompensationseffekte auftreten. Hingegen sind Kompensationseffekte und Copingstrategien bei unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen kaum untersucht worden. Hierbei sollte jedoch berücksichtigt werden, dass eine gute Lichtqualität weder Copingstrategien noch Kompensationseffekte hervorrufen soll.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Stufen der Beeinträchtigung	14
2.1	Bewertungsmethoden für Lichtrichtung und Schattigkeit . .	40
2.2	Schatten und Schattierungen als Handlungsaufforderungen (Affordanzen)	70
3.1	Versuchsablauf	92
3.2	Raumlayout	95
3.3	Lichtstärkeverteilungskurve der LED-Leuchten	97
3.4	Spektrum der LED-Leuchten	98
3.5	Beleuchtungssystem	99
3.6	Versuchsstand mit 3D-Objekt	104
3.7	Versuchssetting Purdue-Steckbrett	121
3.8	Schlagschatten der Hände in der Lichtszene mit extremen Mehrfachschaten	125
3.9	Visuell-motorische Leistung in Abhängigkeit der Beleuchtung	130
3.10	Subjektiv erlebte Anstrengung in Abhängigkeit der Beleuch- tung	132
3.11	Abmaße des Versuchsstandes	136
3.12	Versuchsstand Schattenwerfer	137
3.13	Wahrnehmungsstörungen und subjektiv erlebte Anstrengung	148

3.14	Streudiagramm: erlebte Anstrengung vs. Anzahl der Wahrnehmungsstörungen	149
3.15	Schleistung in Abhängigkeit der Beleuchtungssituation . . .	151
3.16	Streudiagramme: Anstrengung bzw. Anzahl der Wahrnehmungsstörungen vs. Schleistung (Score)	153
4.1	Compensatory control model of performance regulation nach Hockey (1997)	155
4.2	Strahlensatz und quadratisches Abstandsgesetz bei Schattenbildung	168
4.3	Rotation des Schattenwerfers: 90°, 120°, 135°, 180° (von links nach rechts)	172
4.4	Schattenwerferwinkel 180°	174
4.5	Senkrechter Abstand eines Lichtpunktes zum Schattenwerfer	177
4.6	Schattenwerferwinkel 135°	179
4.7	Rotation des Schattenwerfers unter Rechteckarray: 90°, 120°, 135°, 180° (von links nach rechts)	180
4.8	Position des Schattenwerfers: 90°, 120°, 135°, 180° (von links nach rechts)	181
4.9	Zu Tabelle 3.1+3.2, Tabelle 3.9+3.10, Tabelle 3.18 zugehörige Leuchtdichteskalen	228

Tabellenverzeichnis

2.1	Bestimmung dominanter Ortsfrequenzen in Linienmustern .	87
2.2	Tabellenfortführung: Bestimmung dominanter Ortsfrequenzen in Linienmustern	88
2.3	Tabellenfortführung: Bestimmung dominanter Ortsfrequenzen in Linienmustern	89
3.1	Charakterisierung der Lichtszenen	105
3.2	Tabellenfortführung: Charakterisierung der Lichtszenen . .	106
3.3	Informationen zu kategorialen Variablen	110
3.4	Informationen zu stetigen Variablen	111
3.5	Parameterschätzer	112
3.6	Subjektiv wahrgenommene Objektformen in Abhängigkeit der Lichtszene	113
3.7	Tabellenfortführung: Subjektiv wahrgenommene Objektformen in Abhängigkeit der Lichtszene	114
3.8	Deskriptive Statistik zu den Oberflächenfits	115
3.9	Charakterisierung der Lichtszenen	123
3.10	Tabellenfortführung: Charakterisierung der Lichtszenen . .	124
3.11	Informationen zu kategorialen Variablen	127
3.12	Informationen zu stetigen Variablen	127
3.13	Parameterschätzer	129
3.14	Geschätzte Randmittel für visuell-motorische Leistung . . .	131

3.15	Ergänzende Modellrechnung mit subjektiver Anstrengung als abhängiger Variable	131
3.16	Geschätzte Randmittel für subjektiv erlebte Anstrengung .	133
3.17	Kompensationsphasen nach Haider	133
3.18	Charakterisierung der Lichtszenen	141
3.19	Analyse der Schattenmuster	142
3.20	Tabellenfortführung: Analyse der Schattenmuster	143
3.21	Informationen zu kategorialen Variablen	145
3.22	Informationen über stetige Variablen	145
3.23	Parameterschätzer	146
3.24	Geschätzte Randmittel für Sehleistung	152
4.1	Einfluss von Leuchtenentfernung und Schattenwerferhöhe auf die Ausbildung von Mehrfachschatten	170

Formelverzeichnis

4.1	Strahlensatz für den Lichtkegel	167
4.2	Ausdehnung der Schattenfläche	167
4.3	Geradengleichung für den Schattenwerfer	176
4.4	Geradengleichung der orthogonalen Geraden	176
4.5	Gerade durch den Punkt B	176
4.6	x-Koordinate des Schnittpunktes der Geraden g und f . . .	176
4.7	y-Koordinate des Schnittpunktes der Geraden g und f . . .	176
4.8	Abstand der Punkte B und G	178
4.9	Umformung der Abstandsgleichung	178
4.10	Gleichung für die Berechnung des senkrechten Abstandes eines Lichtpunktes vom Schattenwerfer (Formel mit Anstieg des Schattenwerfers)	178
4.11	Gleichung für die Berechnung des senkrechten Abstandes eines Lichtpunktes vom Schattenwerfer (Formel mit Rota- tionswinkel des Schattenwerfers)	178

Im Rahmen der Dissertation entstandene Publikationen

Krüger, J. (2013b). Untersuchungsansatz zur Feststellung der Auswirkungen von Mehrfachschatten auf die Formwahrnehmung. In *Lux Junior 11. Forum für den lichttechnischen Nachwuchs - 27. bis 29.09.2013 Dörfeld/Ilm.* Technische Universität Ilmenau - Fachgebiet Lichttechnik; LiTG

Krüger, J. (2014b). Entwurf und Realisierung eines lichtrichtungsdynamischen LED-Beleuchtungssystems. Abschlussarbeit im weiterbildenden Studium Lichtanwendung, TU Ilmenau Fachgebiet Lichttechnik, Ilmenau

Krüger, J. (2014c). Untersuchungsansatz zur Feststellung der Auswirkungen von LED-Mehrfachschatten auf die Formwahrnehmung. *60.Frühjahrskongress der GfA - Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft*, pages 714–716

Krüger, J., Windel, A., und Schierz, C. (2014). Einfluss von LED-Mehrfachschatten auf Sehleistung und Sehkombfort. In *LICHT 2014 - Licht leicht gemacht, Licht leicht gebracht!*, volume 21. Lichtkongress, pages 280–287, Den Haag. Nederlandse Stichting Voor Verlichtingskunde (NSVV)

Krüger, J. und Windel, A. (2015). Lichtrichtung und Schattigkeit beeinflussen visuomotorische Leistung. In *Lux Junior 2015, 12. Forum für den lichttechnischen Nachwuchs - 25. bis 27.09.2013, Dörfeld/Ilm.*

Technische Universität Ilmenau - Fachgebiet Lichttechnik; Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V (LiTG)

Krüger, J. (2015). LED-Beleuchtung - Auswirkungen von Mehrfachschatten auf Sehkomfort und visuell-motorische Leistung. *Sicher ist Sicher*, 12.15:616–619

Krüger, J. und Schierz, C. (2016b). Directional light of LED arrays and its influence on shape perception. In *4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance*, volume CIE x043:2016, pages 190–197, Prag, Czech Republic. CIE

Krüger, J. und Schierz, C. (2016a). Bedeutung von Lichtrichtung und Schattigkeit für die visuell motorische Leistung. In *LICHT 2016 - 22. Gemeinschaftstagung*, volume 22, pages 645–646, Karlsruhe. Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

Literaturverzeichnis

- Allen, B. P. (1999). Shadows as sources of cues for distance of shadow-casting objects. *Percept Mot Skills*, 89(2):571–584.
- Allen, B. P. (2000). Angles of shadows as cues for judging the distance of shadow casting objects. *Percept Mot Skills*, 90(3 Pt 1):864–866.
- Arndt, W. (1928). Raumhelligkeit als neuer Grundbegriff der Beleuchtungstechnik. *Licht und Lampe*, 7:247–250.
- Arndt, W. (1930a). Beleuchtungsbewertung mit Hilfe der Raumhelligkeit. *Licht und Lampe*, 22:1092–1095.
- Arndt, W. (1930b). Neue Grundzüge der Beleuchtungstechnik.
- ASR A3.4 (2011). Technische Regel für Arbeitsstätten - Beleuchtung. *Gemeinsames Ministerialblatt*, 16:303–318.
- Baas, J. M., Kenemans, J. L., und Mangun, G. R. (2002). Selective attention to spatial frequency: an ERP and source localization analysis. *Clin Neurophysiol*, 113(11):1840–1854.
- Bach, M. (1996). The Freiburg Visual Acuity test—automatic measurement of visual acuity. *Optom Vis Sci*, 73(1):49–53.
- Baxandall, M. (1995). *Shadows and Enlightenment*. Yale University Press, London.
- Bean, A. (1978). Modelling indicators for combined side and overhead lighting systems. *Lighting Research & Technology*, 10(4):199–202.

Bedwell, C. H. (1972). The eye, vision, and visual discomfort. *Lighting Research and Technology*, 4(3):151–158.

BGI 856 (2008). Hilfen für die Planung von Beleuchtungsanlagen von Räumen mit Bildschirm- und Büroarbeitsplätzen. Technical report.

Bills, A. G. (1937). Fatigue in mental work. *Physiological Reviews*, 17(3):436–453.

Bonfiglioli, C. und Pavani, F. (2004). Differential effects of cast shadows on perception and action. *Perception*, 33:1291–1304.

Boyce, P. R. (2003). *Human Factors in Lighting*. Taylor and Francis Group, New York, second edi edition.

Boyce, P. R., Miller, N., und Wilwol, K. (1999). Lighting for good facial modeling. In *IESNA annual conference technical papers*, pages 249–264. Illuminating Engineering Society of North America.

Bülthoff, H. H. und Mallot, H. A. (1988). Integration of depth modules: stereo and shading. *J Opt Soc Am A*, 5(10):1749–1758.

Cameron, P. A. und Gallup Jr, G. G. (1988). Shadow recognition in human infants. *Infant Behavior and Development*, 11(4):465–471.

Campbell, F. W. und Robson, J. G. (1968). Application of fourier analysis to the visibility of gratings. *Journal of Physiology*, 197:551–566.

Carey, D. P., Dijkerman, H. C., und Milner, A. D. (1998). Perception and action in depth. *Conscious Cogn*, 7(3):438–453.

Carmichael, L. und Dearborn, W. F. (1947). *Reading and Visual Fatigue*. Harrap.

- Carver, C. S. und Scheier, M. F. (1981). The self-attention-induced feedback loop and social facilitation. *Journal of Experimental Social Psychology*, 17(6):545 – 568.
- Casati, R. (2004). The shadow knows: a primer on the informational structure of cast shadows. *Perception*, 33(11):1385–1396.
- Castiello, U. (2001). Implicit processing of shadows. *Vision Research*, 41:2305–2309.
- Cavanagh, P. und Leclerc, Y. G. (1989). Shape from Shadows. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15(1):3–27.
- Christou, C. G. und Koenderink, J. J. (1997). Light source dependence in shape from shading. *Vision Res.*, 37(11):1441–1449.
- CIE (2013). Online Dictionary of the International Commission on Illumination.
- CIE 140-2000 (2000). Road Lighting Calculations. Technical report, Wien.
- CIE 205:2013 (2013). Review of Lighting Quality Measures for Interior Lighting with LED Lighting Systems. Technical report, International Commission on Illumination, Wien.
- Cohn, T. E. und Lasley, D. J. (1990). Wallpaper Illusion: Cause of Disorientation and Falls on Escalators. *Perception*, 19:573–580.
- Conlon, E. G., Lovegrove, W. J., Chekaluk, E., und Pattison, P. E. (1999). Measuring Visual Discomfort. *Visual Cognition*, 6(6):637–663.

Cuttle, C. (1997). Cubic illumination. *Lighting Research and Technology*, 29(1):1–14.

Cuttle, C., Valentine, W. B., Lynes, J. A., und Burt, W. (1963). Beyond the working plane. pages 471–483.

Delplanque, S., N'diaye, D., Scherer, K., und Grandjean, D. (2007). Spatial frequencies or emotional effects? A systematic measure of spatial frequencies for IAPS pictures by a discrete wavelet analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 165:144–150.

DIN 5035-3 (2006). Beleuchtung mit künstlichem Licht - Teil 3: Beleuchtung im Gesundheitswesen.

DIN 5035-7 (2004). Beleuchtung mit künstlichem Licht - Teil 7: Beleuchtung von Räumen mit Bildschirmarbeitsplätzen.

DIN EN 12464-1 (2011). Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen.

DIN EN 12464-2 (2014). Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 2: Arbeitsplätze im Freien.

DIN EN 1837 (2009). Sicherheit von Maschinen - Maschinenin-Maschinen Beleuchtung.

DIN EN ISO 12100 (2011). Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung.

DIN EN ISO 9241-6 (2001). Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 6: Leitsätze für die Arbeitsumgebung.

DIN SPEC 67600 (2013). DIN SPEC 67600:2013, Biologisch wirksame Beleuchtung - Planungsempfehlungen.

- Eilers, K., Nachreiner, F., und Hänecke, K. (1986). Entwicklung und Überprüfung einer Skala zur Erfassung subjektiv erlebter Anstrengung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, Jg. 40(H. 4):215–224.
- Farley, N. J., Todd, J. T., und Phillips, F. (1995). The perception of surface orientation from multiple sources of optical information. *Perception & Psychophysics*, 57(5):629–636.
- Ferguson, D. A., Major, G., und Keldoulis, T. (1974). Vision at work visual defect and the visual demand of tasks. *Appl Ergon*, 5(2):84–93.
- Fernandez, D. und Wilkins, A. J. (2008). Uncomfortable images in art and nature. *Perception*, 37(7):1098–1113.
- Field, D. J. (1994). What is the goal of sensory coding? *Neural Computation*, 6(4):559–601.
- Fleischer, S. (2001). *Die psychologische Wirkung veränderlicher Kunstlichtsituationen auf den Menschen*. PhD thesis, Zürich.
- Fleischer, S., Krueger, H., und Schierz, C. (2000a). Einfluss von Helligkeitsverteilungen und Lichtfarben auf den Menschen im Büro - Laborversuche des Projekts “Harmonisches Licht“. In *6. Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden*, pages 216–220, Staffelstein.
- Fleischer, S., Krueger, H., und Schierz, C. (2000b). Zeitliche und örtliche Veränderungen der Helligkeitsverteilung in Büroräumen. In *Licht 2000*, pages 587–592. ETH Zürich, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie.
- Flynn, J. E., Hendrick, C., Spencer, T., und Martyniuk, O. (1979). A guide to methodology procedures for measuring subjective impressions in lighting. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 9:95–110.

Frandsen, S. (1987). *The Scale of Light*. Artikel i: International Lighting Review, 1 987/3.

Frankenhaeuser, M. (1986). *A Psychobiological Framework for Research on Human Stress and Coping*, pages 101–116. Springer US, Boston, MA.

Galfano, G. und Pavani, F. (2005). Long-lasting capture of tactile attention by body shadows. *Experimental Brain Research*, 166:518–527.

Gerhard, H. E. und Maloney, L. T. (2010). Estimating changes in lighting direction in binocularly viewed three-dimensional scenes. *Journal of Vision*, 10(9)(14):1–22.

Gershun, A. (1936). The Light Field. *Journal of Mathematics and Physics*, 18:51–151.

Gibson, J. J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton Mifflin.

Goodale, M., Milner, A., Jakobson, L., und Carey, D. (1991). A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them. *Nature*, 349(6305):154–156.

Goodale, M. A. und Milner, A. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, 15(1):20 – 25.

Gordon, I. (2004). *Theories of Visual Perception*. Taylor & Francis.

Hacker, W. (1998). *Allgemeine Arbeitspsychologie.: Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten*. Schriften zur Arbeitspsychologie. Huber Hans.

- Haeger, F. (1975). *Schattigkeit - Eine Analyse lichttechnischer Definitionen und subjektiver Bewertungen von Schlagschatten-Situationen*. PhD thesis.
- Haider, E. und Rohmert, W. (1978). Performance- and strain-compensation with informatory work. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 39(4):263–276.
- Harvey, L. O., Roberts, J. O., und Gervais, M. J. (1983). The Spatial Frequency Basis of Internal Representations. *Advances in Psychology*, 11:217–228.
- Hayward, W. G. (1998). Effects of Outline Shape in Object Recognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(2):427–440.
- Helwig, H.-J. (1950). Die Feldtheorie in der Lichttechnik. *Licht-Technik*, 1:14–20.
- Hewitt, H., Bridgers, D. J., und Simons, R. H. (1965). Lighting and the environment. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, 30(4.IEStrans):91–116.
- Ho, Y.-X., Landy, M. S., und Maloney, L. T. (2006). How direction of illumination affects visually perceived surface roughness. *Journal of Vision*, 6:634–648.
- Hockey, G. R. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload; a cognitive-energetical framework. *Biol Psychol*, 45(1-3):73–93.
- Hopkinson, R. G. und Collins, J. B. (1970). *The ergonomics of lighting*. Macdonald & Co.

Horn, B. und Brooks, M. (1989). *Shape from Shading*. Artificial Intelligence Series. MIT Press.

Huang, Z. und Sanderson, A. (2014). Light field modelling and interpolation using Kriging techniques. *Lighting Research and Technology*, 46(2):219–237.

Inanici, M. (2007). Computational approach for determining the directionality of light - directional to diffuse ratio. In *Proceedings of Building Simulation*, China, Peking.

Jacobson, B. A. und Gengelbach, R. D. (2002). Lens for uniform LED illumination: an example of automated optimization using Monte Carlo ray-tracing of an LED source. volume 4446.

Juricevic, I., Land, L., Wilkins, A., und Webster, M. A. (2010). Visual discomfort and natural image statistics. *Perception*, 39(7):884–899.

Juslen, H. und Tenner, A. (2005). Mechanisms involved in enhancing human performance by changing the lighting in the industrial workplace. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35:843–855.

Kartashova, T., Sekulovski, D., de Ridder, H., Pas, S. F., und Pont, S. C. (2016). The global structure of the visual light field and its relation to the physical light field. *J Vis*, 16(10):9.

Katsuyama, N., Usui, N., Nose, I., und Taira, M. (2011). Perception of object motion in three-dimensional space induced by cast shadows. *NeuroImage*, 54:485–494.

Keefe, B. D., Hibbard, P. B., und Watt, S. J. (2011). Depth-cue integration in grasp programming: no evidence for a binocular specialism. *Neuropsychologia*, 49(5):1246–1257.

- Kenemans, J., Baas, J., Mangun, G., Lijffijt, M., und Verbaten, M. (2000). On the processing of spatial frequencies as revealed by evoked-potential source modeling. *Clinical Neurophysiology*, 111(6):1113–1123.
- Kersten, D., Mamassian, P., und Knill, D. C. (1997). Moving cast shadows induce apparent motion in depth. *Perception*, pages 171–192.
- Khang, B. G., Koenderink, J. J., und Kappers, A. M. (2007). Shape from shading from images rendered with various surface types and light fields. *Perception*, 36(8):1191–1213.
- Kleffner, D. A. und Ramachandran, V. S. (1992). On the perception of shape from shading. *Perception & Psychophysics*, 52(1):18–36.
- Knill, D. C. (2005). Reaching for visual cues to depth: the brain combines depth cues differently for motor control and perception. *J Vis*, 5(2):103–115.
- Knoop, M. (2011). Lighting Quality Measures for Interior Lighting with LED Lighting Systems. In CIE, editor, *27th Session of CIE*, pages 219–225, Sun City/South Africa. CIE Central Bureau.
- Koenderink, J. J., Pont, S. C., van Doorn, A. J., Kappers, A. M., und Todd, J. T. (2007). The visual light field. *Perception*, 36(11):1595–1610.
- Koenderink, J. J., van Doorn, A. J., Christou, C., und Lappin, I. S. (1996a). Perturbation study of shading in pictures. *Perception*, 25(9):1009–1026.

Koenderink, J. J., van Doorn, A. J., Christou, C., und Lappin, J. S. (1996b). Shape constancy in pictorial relief. *Perception*, 25(2):155–164.

Koenderink, J. J., van Doorn, A. J., und Kappers, A. M. L. (1992). Surface perception in pictures. *Perception & Psychophysics*, 52:487–496.

Koenderink J., J., van Doorn J., A., und Kappers, A. M. L. (2001). Ambiguity and the 'mental eye' in pictorial relief. *Perception*, 30:431–448.

Krüger, J. (2013a). AmI-basierte Beleuchtungssysteme - Biologische Wirkung von blauem Licht im Blick. *baua:aktuell - Amtliche Mitteilungen der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin*, 4/2013:2.

Krüger, J. (2013b). Untersuchungsansatz zur Feststellung der Auswirkungen von Mehrfachschatten auf die Formwahrnehmung. In *Lux Junior 11. Forum für den lichttechnischen Nachwuchs - 27. bis 29.09.2013 Dörfelfeld/Ilm*. Technische Universität Ilmenau - Fachgebiet Lichttechnik; LiTG.

Krüger, J. (2014a). Context Aware Lighting Systems for Workplaces: Eine Literatur-Review. *60.Frühjahrskongress der GfA - Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft*, pages 67–69.

Krüger, J. (2014b). Entwurf und Realisierung eines lichtrichtungsdynamischen LED-Beleuchtungssystems. Abschlussarbeit im weiterbildenden Studium Lichtanwendung, TU Ilmenau Fachgebiet Lichttechnik, Ilmenau.

Krüger, J. (2014c). Untersuchungsansatz zur Feststellung der Auswirkungen von LED-Mehrfachschatten auf die Formwahrnehmung.

60.Frühjahrskongress der GfA - Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft, pages 714–716.

Krüger, J. (2015). LED-Beleuchtung - Auswirkungen von Mehrfachschatten auf Sehkomfort und visuell-motorische Leistung. *Sicher ist Sicher*, 12.15:616–619.

Krüger, J. und Schierz, C. (2016a). Bedeutung von Lichtrichtung und Schattigkeit für die visuell motorische Leistung. In *LICHT 2016 - 22. Gemeinschaftstagung*, volume 22, pages 645–646, Karlsruhe. Karlsruhe Institute of Technology (KIT).

Krüger, J. und Schierz, C. (2016b). Directional light of LED arrays and its influence on shape perception. In *4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance*, volume CIE x043:2016, pages 190–197, Prag, Czech Republic. CIE.

Krüger, J. und Windel, A. (2015). Lichtrichtung und Schattigkeit beeinflussen visuomotorische Leistung. In *Lux Junior 2015, 12. Forum für den lichttechnischen Nachwuchs - 25. bis 27.09.2013*, Dörfeld/Ilm. Technische Universität Ilmenau - Fachgebiet Lichttechnik; Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V (LiTG).

Krüger, J., Windel, A., und Schierz, C. (2014). Einfluss von LED-Mehrfachschatten auf Sehleistung und Sehkomfort. In *LICHT 2014 - Licht leicht gemacht, Licht leicht gebracht!*, volume 21. Lichtkongress, pages 280–287, Den Haag. Nederlandse Stichting Voor Verlichtingskunde (NSVV).

Kuo, C.-H., Wu, W.-H., Hsiao, W.-T., und Huang, K.-C. (2011). The Multi-shadow Analysis of LED Secondary Optics. *Physics Procedia*, 19:233–238.

Kuylen, C., Balas, B., und Thomas, L. E. (2014). My shadow, myself: cast-body shadows are embodied. *Psychon Bull Rev*, 21(3):676–681.

Langer, M. S. und Bühlhoff, H. H. (2000). Depth discrimination from shading under diffuse lighting. *Perception*, 29:649–660.

Leitner, K., Volpert, W., Greiner, B., Weber, W., und Hennes, K. (1987). *Analyse psychischer Belastungen in der Arbeit*. Verlag TÜV Rheinland, Köln.

Lenz, G. und Roder, A. (1996). Sichere Beleuchtung von Treppenhäusern. Diplomarbeit, Märkische Fachhochschule Iserlohn.

Levoy, M. und Hanrahan, P. (1996). Light Field Rendering. In *SIGGRAPH 1996*, pages 31–42. ACM.

Liedtke, C. (2011). Gütekriterien zur Bewertung der Lichtqualität in Innenräumen. In *Lux Junior 10. Forum für den lichttechnischen Nachwuchs*, Dörnfeld.

Liedtke, C., Völker, S., und Knoop, M. (2013). the light direction and directional light - towards a new quantification of an essential lighting quality criterion.

Lindner, H. (1976). Einfluss des Beleuchtungsniveaus auf visuell-motorische Leistungen. *Lichttechnik*, 28. Jahrga(7):299–305.

Lingenfeller, H. (1928). Über den diffusen Anteil der Beleuchtung und ihre Schattigkeit. *Licht und Lampe*, 9:313–318.

Loe, D. L., Mansfield, K. P., und Rowlands, E. (1994). Appearance of lit environment and its relevance in lighting design: Experimental study. *Lighting Research and Technology*, 26(3):119–131.

- Lynes, J. A., Burt, W., Jackson, G. K., und Cuttle, C. (1966). The Flow of Light into Buildings. *Trans.Illum.Eng.Soc.*, 31(3):65–91.
- Madsen, M. (2007). Light-zone(s): as Concept and Tool. *Architectural Research Centers Consortium Journal of Architectural Research*, 4(1):50–59.
- Mamassian, P. (2004). Impossible shadows and the shadow correspondence problem. *Perception*, 33(11):1279–1290.
- Mamassian, P. und Kersten, D. (1996). Illumination, Shading and the Perception of Local Orientation. *Vision Research*, 36(15):2351–2367.
- Mamassian, P., Knill, D. C., und Kersten, D. (1998). the perception of cast shadows. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(8):288–295.
- Mangkuto, R., Wang, S., Aries, M., van Loenen, E., und Hensen, J. (2014). Comparison between lighting performance of a virtual natural lighting solutions prototype and a real window based on computer simulation. *Frontiers of Architectural Research*, 3(4):398 – 412.
- May, K. A. und Georgeson, M. A. (2007). Blurred edges look faint, and faint edges look sharp: The effect of a gradient threshold in a multi-scale edge coding model. *Vision Research*, 47:1705–1720.
- Mishkin, M. und Ungerleider, L. G. (1982). Contribution of striate inputs to the visuospatial functions of parieto-preoccipital cortex in monkeys. *Behavioural Brain Research*, 6(1):57 – 77.
- Moeller, K., Grote, V., Keller, K., Lorenz, D., Moser, M., und Khanh, T. Q. (2011). LED office lighting to promote performance and well-being. In *EHAWC'11*, pages 68–77.

Moon, P. und Spencer, D. E. (1951). Modeling with light. *Journal of the Franklin Institute*, 251(4):453–466.

Morgenstern, Y., Geisler, W. S., und Murray, R. F. (2014). Human vision is attuned to the diffuseness of natural light. *J Vis*, 14(9).

Mury, A. A., Pont, S. C., und Koenderink, J. J. (2009). Representing the light field in finite three-dimensional spaces from sparse discrete samples. *Appl Opt*, 48(3):450–457.

Nefs, H. T., Koenderink J., J., und Kappers, A. M. L. (2005). The influence of illumination direction on the pictorial reliefs of lambertian surfaces. *Perception*, 34:275–287.

Norden, K. (1933). *Die Grundlagen der Schattentechnik*. Union Deutsche Verlagsgesellschaft Zweigniederlassung Berlin, Berlin.

Norman, J. F., Lee, Y.-L., Phillips, F., Norman, H. F., Jennings, L. R., und McBride, T. R. (2009). The perception of 3-D shape from shadows cast onto curved surfaces. *Acta Psychologica*, 131:1–11.

Norman, J. F., Todd, J. T., Norman, H. F., Clayton, A. M., und McBride, T. R. (2006). Visual discrimination of local surface structure: Slant, tilt and curvedness. *Vision Research*, 46:1057–1069.

Norman, J. F., Todd, J. T., und Phillips, F. (1995). The perception of surface orientation from multiple sources of optical information. *Percept Psychophys*, 57(5):629–636.

Oesterreich, R. (1998). *Handbuch betriebliche Gesundheitsförderung: arbeits- und organisationspsychologische Methoden und Konzepte*, chapter Die Bedeutung arbeitspsychologischer Konzepte der Handlungsregulationstheorie für die betriebliche Gesundheitsförderung,

- pages 75–94. Psychol. u. innovat. Management. Verlag für Angewandte Psychologie.
- O’Hare, L. und Hibbard, P. B. (2011). Spatial frequency and visual discomfort. *Vision Research*, 51:1767–1777.
- O’Hare, L. und Hibbard, P. B. (2013). Visual discomfort and blur. *J Vis*, 13(5).
- Ostrovsky, Y., Cavanagh, P., und Sinha, P. (2005). Perceiving illumination inconsistencies in scenes. *Perception*, 34(11):1301–1314.
- Pavani, F. und Castiello, U. (2004). Binding personal and extrapersonal space through body shadows. *Nat. Neurosci.*, 7(1):14–16.
- Pavani, F. und Galfano, G. (2007). Self-attributed body-shadows modulate tactile attention. *Cognition*, 104:73–88.
- Pavani, F. und Galfano, G. (2015). The multisensory body revealed through its cast shadows. *Front Psychol*, 6:666.
- Pavani, F., Rigo, P., und Galfano, G. (2014). From body shadows to bodily attention: automatic orienting of tactile attention driven by cast shadows. *Conscious Cogn*, 29:56–67.
- Pentland, A. P. (1982). Finding the illuminant direction. *Journal of the Optical Society of America*, 72(4):448–455.
- Pont, S. C., Mury, A., und de Ridder, H. (2009). Descriptions, Measurements and Visualizations of Light Distributions in 3D Spaces.
- Pont, S. C., Wijntjes, M. W. A., Oomes, A. H. J., van Doorn J., A., van Nierop, O., de Ridder, H., und Koenderink J., J. (2011). Cast shadows in wide perspective. *Perception*, 40:938–948.

Porter, G., Tales, A., und Leonards, U. (2010). What makes cast shadows hard to see? *J Vis*, 10(3):1–18.

Rajabi-Vardanjani, H., Habibi, E., Pourabdian, S., Dehghan, H., und Maracy, M. R. (2014). Designing and validation a visual fatigue questionnaire for video display terminals operators. *Int J Prev Med*, 5(7):841–848.

Ramane, D. und Shaligram, A. (2011). Optimization of multi-element LED source for uniform illumination of plane surface. *Optics Express*, 19(S4):639–648.

Rea, M. S. (1981). Visual performance with realistic methods of changing contrast. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 10(3):164–177.

Rea, M. S. (2012). The Trotter Paterson Lecture 2012: Whatever happened to visual performance? *Lighting Research and Technology*, 44:95–108.

Rea, M. S. und Ouellette, M. J. (1991). Relative Visual Performance: A Basis for Application. *Lighting Research and Technology*, 23(3):135–144.

Rensink, R. A. und Cavanagh, P. (2004). The influence of cast shadows on visual search. *Perception*, 33(11):1339–1358.

Rowlands, E. und Loe, D. L. (1975). Preferred illumination distribution in interiors. In *Proceedings of the 18th Session of CIE*, pages 333–342, Paris. CIE Central Bureau.

Sartori, L. und Castiello, U. (2013). Shadows in the mirror. *Neuroreport*, 24(2):63–67.

- Sato, M., Inui, M., Nakamura, Y., und Takeuchi, Y. (1989). Visual environment of a control room. *Lighting Research and Technology*, 21(3):99–106.
- Saunders, J. (1969). The role of the level and diversity of horizontal illumination in an appraisal of a simple office task. *Lighting Research & Technology*, 1(1):37–46.
- Schierz, C. (2002). Leben wir in der biologischen Dunkelheit?
- Schierz, C. (2003). Der Einfluss der Arbeitsplatzbeleuchtung auf Asthenopische Beschwerden. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaften*, 57:14–20.
- Schierz, C. (2006). *Das Akzeptanzurteil als Ausdruck mentaler Konzepte für physikalische Belastungsgrößen – ein Beitrag zur Umweltergonomie*. Habilitationsschrift, Department für Management, Technologie und Ökonomie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.
- Schierz, C., Cakir, G., Cakir, A., Kramer, H., und Wunsch, A. (2011). Der Stand von Wissenschaft und Technik bei neuen Beleuchtungstechnologien am Arbeitsplatz und ihre Auswirkungen (interner Bericht zum BAuA-Forschungsprojekt F2263).
- Schneider, J. V. (2010). *Entwicklung und Evaluierung von spezifischen Beleuchtungsszenarien und ergonomische Untersuchungsansätze zur Optimierung visueller Prüftätigkeiten*. Mensch und Buch Verlag, Berlin.
- Schober, H. (1953). [Causes of asthenopic disorders in fluorescent illumination]. *Klin Monbl Augenheilkd Augenarztl Fortbild*, 123(4):462–474.

Schober, H. (1960). *Das Sehen - I. Band*. Das Sehen. Fachbuchverlag.

Schofield, A. J., Rock, P. B., und Georgeson, M. A. (2011). Sun and sky: Does human vision assume a mixture of point and diffuse illumination when interpreting shape-from-shading? *Vision Research*, 51:2317–2330.

Seyama, J. und Sato, T. (1998). Shape from shading: estimation of reflectance map. *Vision Research*, 38:3805–3815.

Sheedy, J. E. (2007). The physiology of eyestrain. *Journal of Modern Optics*, 54(9):1333–1341.

Singh, K. D., Smith, A. T., und Greenlee, M. W. (2000). Spatio-temporal frequency and direction sensitivities of human visual areas measured using fMRI. *Neuroimage*, 12(5):550–564.

Snellen, H. (1862). *Probuchstaben zur Bestimmung der Sehschärfe*. Van de Weijer.

Sonnentag, S. und Frese, M. (2002). *Psychological management of individual performance*, chapter Performance Concepts and Performance Theory, page 540. John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, UK.

Stefani, O., Mahale, M., Pross, A., und Bues, M. (2011). SmartHeliosity: Emotional Ergonomics through Coloured Light. In *EHAWC'11*, pages 226–235.

Taya, S. und Miura, K. (2010). Cast shadow can modulate the judged final position of a moving target. *Atten Percept Psychophys*, 72(7):1930–1937.

- Tiffin, J. und Asher, E. I. (1948). The Purdue Pegboard: Norms and studies of reliability and validity. *Journal of Applied Psychology*, 32:234–247.
- Todd, J. T. (2004). The visual perception of 3D shape. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(3):115–121.
- Todd, J. T. und Mingolla, E. (1983). Perception of surface curvature and direction of illumination from patterns of shading. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 9(4):583–595.
- Tregenza, P. R. (2000). Luminous energy field: a finite-element model. *Lighting Research and Technology*, 32(3):103–109.
- Uchida, A. und Ohtani, Y. (1999). Prediction of the shadow characteristics under the task ambient lighting - in the case of varied positions of light sources. pages 84–86. International Commission on Illumination.
- Uchida, A. und Ohtani, Y. (2000). Fundamental Study of Shadow Characteristics under Task Ambient Lighting. *Journal of Light & Visual Environment*, 24(1):50–58.
- van Doorn, A. J., Koenderink, J. J., Todd, J. T., und Wagemans, J. (2012). Awareness of the light field: the case of deformation. *Iperception*, 3(7):467–480.
- van Doorn, A. J., Koenderink, J. J., und Wagemans, J. (2011a). Light fields and shape from shading. *Journal of Vision*, 11(3)(21):1–21.
- van Doorn, A. J., Koenderink, J. J., und Wagemans, J. (2011b). Light fields and shape from shading. *J Vis*, 11(3).

Veitch, J. A., Miller, N., McKay, H., und Jones, C. (1996). Lighting System Effects on Judged Lighting Quality and Facial Appearance. In *Annual Conference of the Illuminating Engineering Society of North America*, pages 519–541, Cleveland.

Watt, S. J. und Bradshaw, M. F. (2000). Binocular cues are important in controlling the grasp but not the reach in natural prehension movements. *Neuropsychologia*, 38(11):1473–1481.

Weston, H. (1962). *Sight, Light and Work*. H. K. Lewis.

Wijntjes, M. W. A. (2012). Probing pictorial relief: from experimental design to surface reconstruction. *Behavior Research Methods*, 44:135–143.

Wijntjes, M. W. A., Doerscher, K., Kucukoglu, G., und Pont, S. C. (2012). Relative flattening between velvet and matte 3D shapes: Evidence for similar shape-from-shading computations. *Journal of Vision*, 1(2):1–11.

Wilkins, A. (2015). Physiological Basis for Visual Discomfort: Applications in Lighting Design. In on Illumination, I. C., editor, *Proceedings of 28th CIE Session*, 216:2015, pages 29–38.

Wilkins, A., Nimmo-Smith, I., Tait, A., McManus, C., Della Sala, S., Tilley, A., Arnold, K., Barrie, M., und Scott, S. (1984). A neurological basis for visual discomfort. *Brain*, 107 (Pt 4:989–1017.

Wilkins, A. J. und Nimmo-Smith, I. (1984). On the reduction of eye-strain when reading. *Ophthalmic Physiol Opt*, 4(1):53–59.

Winkler, A. D., Spillmann, L., Werner, J. S., und Webster, M. A. (2015). Asymmetries in blue-yellow color perception and in the color of ‘the dress’. *Curr Biol*, 25(13):R547–8.

- Wu, W.-H., Kuo, C.-H., Hung, M.-W., und Huang, K.-C. (2011). Evaluating method for the double image phenomenon of LED lighting. *Physics Procedia*, 19:96–103.
- Xia, L., Pont, S., und Heynderickx, I. (2017a). Light diffuseness metric Part 1 - Theory. *Lighting Research & Technology*, 49(4):411–427.
- Xia, L., Pont, S., und Heynderickx, I. (2017b). Light diffuseness metric, Part 2 - Describing, measuring and visualising the light flow and diffuseness in three-dimensional spaces. *Lighting Research & Technology*, 49(4):428–445.
- Xue, T., Su, C., Feng, Z., Zhang, C., und Wang, W. (2016). Optimized lens design for small angle uniform illumination from an extended source. *Lighting Research and Technology*, 48(3):376–383.
- Yagmur, S. A. und Öztürk, L. D. (2011). Investigation of Shadow Quality Occurred in Interiors under Artificial Lighting. In *27th Session of the CIE*, volume 27th Sessi, pages 1029–1038, Sun City/South Africa. CIE.
- Yao, H., Li, X., und Chen, J. (2013). Putting Multi-Shadow into Numbers. In *CIE Centenary Conference: Towards a New Century of Light*, volume CIE x38:20, pages 537–541, Paris, France. CIE.

Anhang

Probandeninformation zum Forschungsprojekt F2302 – visuelle Wahrnehmung bei unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen

Sehr geehrte Versuchsteilnehmerin, sehr geehrter Versuchsteilnehmer, wir danken Ihnen für Ihr Interesse, an der Untersuchung. Diese Probandeninformation enthält wichtige Informationen über die an der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin geplante Studie. Bitte nehmen Sie sich die Zeit und lesen Sie sich dieses Dokument sorgfältig durch. Sollten Sie Fragen zu der Studie haben, zögern Sie bitte nicht, diese zu stellen.

1. Ziele des geplanten Forschungsvorhabens

In dieser Untersuchung geht es darum, nach einer ausführlichen Instruktion und Probedurchläufen Ihre visuelle Wahrnehmung bei drei unterschiedlichen Arbeitsaufgaben zu untersuchen. Die Arbeitsaufgaben werden mehrfach bei unterschiedlicher Beleuchtung durchgeführt.

2. Erläuterung von Studiendesign und Durchführung des Forschungsvorhabens

Bei den Arbeitsaufgaben handelt es sich um eine Leseaufgabe, bei welcher Zahlenreihen miteinander verglichen werden, einer Objekterkennungsaufgabe, bei welcher die Form eines Objekts eingeschätzt werden soll und einer Geschicklichkeitsaufgabe zur Hand-Auge- Koordination. Die Versuchsdauer beträgt 3,5-4 Stunden. Während des Versuches werden Ihre Ergebnisse aufgezeichnet und nachher statistisch mit denen der anderen Probandinnen und Probanden gemeinsam ausgewertet.

3. Mögliche Risiken

Sie werden normalen Beleuchtungsbedingungen ausgesetzt. Für Sie als Proband besteht dasselbe Risiko, als wenn Sie sich an einem Büroarbeitsplatz befinden. In Ausnahmefällen können während des Versuchs Kopfschmerzen, Unschärfe oder Bewegungsillusionen auftreten. Für Sie als Proband besteht keine direkte körperliche Verletzungsgefahr. Für den Fall, dass doch Beschwerden auftreten sollten — eventuell auch unabhängig von den Versuchen — sind Sie aufgefordert, uns diese sofort und deutlich mitzuteilen.

4. Versicherung

Die Bundesrepublik Deutschland kommt im Rahmen der Amtshaftung (Art. 34 Satz 1 GG i.V.m. § 839 BGB) für Schäden der Teilnehmerinnen und Teilnehmer auf, die im Zusammenhang mit der Untersuchung durch das schuldhafte (d. h. vorsätzliche oder fahrlässige) Handeln ihrer Bediensteten entstehen. Dabei trägt der Geschädigte grundsätzlich die Beweislast. Für Schäden, die unabhängig von der Untersuchung auf dem Weg von der Wohnung zum Untersuchungsort und zurück entstehen (sogenannter Wegeunfall), kann grundsätzlich kein Schadensersatz von der Bundesrepublik Deutschland geleistet werden.

5. Datenschutz

Wir versichern Ihnen, dass alle im Rahmen der Studie erhobenen Daten strikt vertraulich gemäß den geltenden Datenschutzbestimmungen behandelt und nach Abschluss der Versuche vollständig anonymisiert werden. Die erhobenen Daten werden in anonymisierter Form in einer Datenbank gespeichert, welche nach Eingang aller Daten nicht mehr verändert werden kann. Auf die Daten und diese Datenbank haben nur die am Projekt beteiligten Personen Zugriff. An weitere Dritte dürfen

die Daten nicht weitergegeben werden. Personenbezogene Daten werden ausschließlich zur Terminverwaltung und der Auszahlung der Probandengelder gespeichert und nach dem Ende des Forschungsprojekts vernichtet. Die Einwilligung des Probanden zur Nutzung der im Projekt erfassten Daten wird mit der beiliegenden Einwilligungserklärung zum Datenschutz dokumentiert.

6. Freiwilligkeit der Teilnahme

Die Teilnahme an dieser Untersuchung ist freiwillig. Die Einwilligung zur Teilnahme kann jederzeit widerrufen werden, ohne dass der Teilnehmerin oder dem Teilnehmer daraus Nachteile entstehen. Auch eine laufende Untersuchung wird auf Wunsch jederzeit ohne Angabe von Gründen abgebrochen.

7. Anlage

In der Anlage finden Sie

- die Einverständniserklärung und
- die Erklärung zum Datenschutz.

Diesen Dokumenten müssen Sie als Proband uneingeschränkt zustimmen können und dies mit Ihrer Unterschrift dokumentieren. Bitte lesen Sie sich diese genau durch und stellen Sie im Zweifel Fragen dazu.

Einverständniserklärung

Ich erkläre:

1. Die Zielsetzung des Versuchs und die mir zugedachte Rolle als Proband wurden mir erläutert und von mir verstanden. Ich bestätige hiermit, die ausgehändigte Probandeninformation gelesen und verstanden zu haben.
2. Ich wurde über mögliche Risiken belehrt, die während der Teilnahme an den Untersuchungen auftreten können.
3. Ich fühle mich hinsichtlich der mir bei den experimentellen Untersuchungen zugedachten Aufgaben und Belastungen voll leistungsfähig.
4. Ich bin belehrt worden, dass die Teilnahme an den Untersuchungen freiwillig ist, und ich jederzeit ohne Angabe von Gründen aus der Studie ausscheiden kann.
5. Zum Datenschutz: Ich habe die beiliegende Einwilligungserklärung zum Datenschutz gelesen, verstanden und stimme dieser zu.
6. Informationen, die mir im Rahmen des Versuchs zugänglich geworden sind, halte ich geheim und gebe diese nicht an Dritte weiter, sofern dies nicht zur Wahrung meiner schutzwürdigen Interessen notwendig ist.
7. Im Rahmen des Versuchs vorgesehene Veröffentlichungen in Schrift, Bild und Ton, bei denen meine Identität erkennbar wird, sind nur mit meiner Zustimmung zulässig.

8. Ich erkläre abschließend dass ich freiwillig an der genannten Studie teilnehme und dass meine Einverständniserklärung (vorbehaltlich eines vorzeitigen Ausscheidens) für den gesamten Studienzeitraum (06.10.2015-30.11.2015) gültig ist.

Name Proband:

Ort, Datum:

Unterschrift:

Aufklärender:

Ort, Datum:

Unterschrift:

Einwilligungserklärung zum Datenschutz

1. Mir ist bekannt, dass bei dieser Studie personenbezogene Daten über mich erhoben, gespeichert und ausgewertet werden sollen. Die Verwendung dieser Daten erfolgt nach gesetzlichen Bestimmungen und setzt vor der Teilnahme die folgende freiwillig abgegebene Einwilligungserklärung voraus, d.h. ohne die nachfolgende Einwilligung kann ich nicht an der Studie teilnehmen.
2. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass im Rahmen dieser Studie erhobene Daten in Papierform und auf elektronischen Datenträgern an der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin aufgezeichnet werden.
3. Die Einwilligung zur Erhebung und Verarbeitung meiner personenbezogenen Daten ist unwiderruflich. Ich bin bereits darüber aufgeklärt worden, dass ich jederzeit die Teilnahme an der Studie beenden kann. Im Fall eines solchen Widerrufs meiner Einwilligung, an der Studie teilzunehmen, erkläre ich mich damit einverstanden, dass die bis zu diesem Zeitpunkt gespeicherten Daten ohne Namensnennung weiterhin verwendet werden dürfen.
4. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Daten in anonymisierter Form nach Beendigung oder Abbruch der Prüfung mindestens zehn Jahre aufbewahrt werden. Danach werden sie gelöscht, soweit nicht gesetzliche, satzungsmäßige Aufbewahrungsfristen entgegenstehen. Daten, die eine Identifikation meiner Person ermöglichen (z.B. Namen, Adresse) werden unmittelbar nach Fertigstellung des finalen Datensatzes gelöscht.
5. Ich bin über folgende gesetzliche Regelung informiert falls ich meine Einwilligung, an der Studie teilzunehmen, widerrufe, müssen

alle Stellen, die meine personenbezogenen Daten gespeichert haben, unverzüglich prüfen, inwieweit die gespeicherten Daten für die in Nr. 3 genannten Zwecke noch erforderlich sind. Nicht mehr benötigte Daten sind unverzüglich zu löschen.

6. Im Rahmen der Studie vorgesehene Veröffentlichungen in Schrift, Bild und Ton, bei denen meine Identität erkennbar wird, sind nur mit meiner Zustimmung zulässig.

Name Proband:

Ort, Datum:

Unterschrift:

Aufklärender:

Ort, Datum:

Unterschrift:

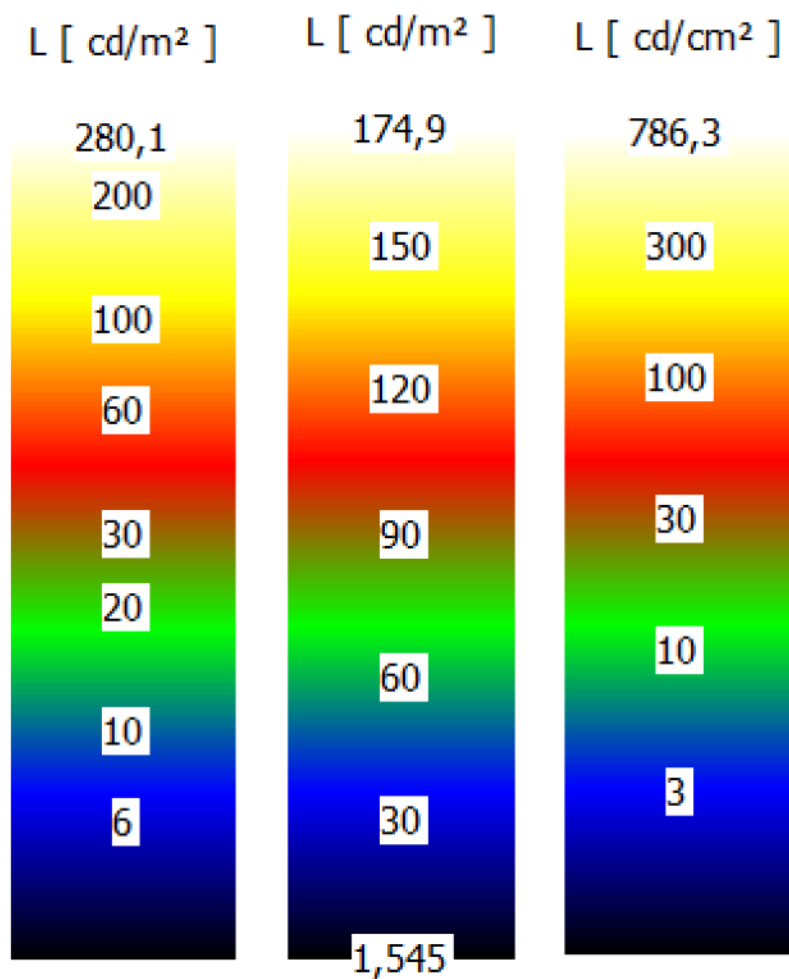


Abbildung 4.9: Zu Tabelle 3.1+3.2, Tabelle 3.9+3.10, Tabelle 3.18 zugehörige Leuchtdichteskalen (von links nach rechts)

Fragebogen zu visuellen Beschwerden

Versuchspersonen-Nr.:

Bitte kreuzen Sie an, wie häufig folgende Aussagen auf Sie zutreffen.

	Nie- mals	Gele- gent- lich	Oft- mals	Fast im- mer
1. Fühlen sich Ihre Augen wässrig, rot, entzündet, beansprucht, müde, trocken, kratzig an oder reiben Sie sich häufig Ihre Augen, wenn Sie ein Streifenmuster sehen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Fühlen sich Ihre Augen wässrig, rot, entzündet, beansprucht, müde, trocken oder kratzig an, nachdem Sie eine deutlich gedruckte Zeitung oder Zeitschrift gelesen haben?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Fühlen sich Ihre Augen wässrig, rot, entzündet, beansprucht, müde, trocken oder kratzig an, wenn Sie unter Leuchtstofflampen arbeiten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Wie oft haben Sie Kopfschmerzen, wenn Sie unter Leuchtstofflampen arbeiten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Bekommen Sie Kopfschmerzen, wenn Sie eine gut gedruckte Zeitung oder Zeitschrift lesen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Passiert es Ihnen beim Lesen, dass Sie unbeabsichtigt dieselben Wörter in einer Textzeile nochmal lesen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	Nie- mals	Gele- gent- lich	Oft- mals	Fast im- mer
7. Nutzen Sie einen Stift oder einen Finger, um beim Lesen eines Buchs oder einer Zeitschrift nicht die Zeile zu verlieren?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. Passiert es Ihnen beim Lesen, dass Sie unbeabsichtigt dieselbe Zeile nochmals lesen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. Müssen Sie beim Lesen eines gut gedruckten Texts blinzeln, damit die Wörter nicht verschwimmen oder unscharf werden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10. Passiert es Ihnen beim Lesen, dass Wörter einer Seite mit gut gedrucktem Text in den Hintergrund treten und dann wieder erscheinen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11. Verschwimmen Ihnen beim Lesen eines gut gedruckten Texts die Buchstaben auf einer Seite?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12. Erscheinen Ihnen beim Lesen Buchstaben jemals doppelt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13. Passiert es Ihnen, dass sich beim Lesen einer Seite Wörter bewegen oder gleiten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14. Haben Sie beim Lesen eines gut gedruckten Texts jemals Schwierigkeiten, Wörter scharf fokussiert zu halten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	Nie- mals	Gele- gent- lich	Oft- mals	Fast im- mer
15. Wenn Sie weiße Buchstaben auf schwarzem Hintergrund lesen, scheint dann der Hintergrund jemals die Buchstaben zu überlagern, sodass die Buchstaben schwerer lesbar werden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16. Wenn Sie weiße Buchstaben auf schwarzem Hintergrund lesen, müssen Sie dann jemals die Seite etwas bewegen oder kontinuierlich blinzeln, um Blendungen zu vermeiden, die scheinbar durch den Hintergrund verursacht werden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17. Haben Sie Schwierigkeiten damit, mehr als ein oder zwei Wörter in einer Zeile scharf zu sehen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18. Haben Sie jemals Schwierigkeiten, wenn Sie Wörter auf einer Seite lesen, weil die Wörter beginnen zu flimmern oder flirren?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19. Wenn Sie unter Leuchtstofflampen oder unter hellem Sonnenlicht weißes Hochglanzpapier lesen: werden Sie geblendet, sodass Sie die Seite kontinuierlich bewegen, damit sie die Wörter dennoch lesen können?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20. Bewegen Sie beim Lesen jemals Ihre Augen über das Blatt, blinzeln Sie immer wieder oder reiben Sie Ihre Augen, damit Sie den Text weiterhin leicht lesen können?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	Nie- mals	Gele- gent- lich	Oft- mals	Fast im- mer
21. Erscheint Ihnen der weiße Hinter- grund eines Texts jemals bewegt, flimmernd oder flirrend, sodass die Buchstaben schwerer lesbar sind? Wenn Sie lesen: scheinen sich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22. Wörter oder Buchstaben jemals auseinander zu ziehen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
23. Empfinden Sie das Lesen eines Texts als langsame (zeitaufwendige) Aufgabe infolge Folge einer der oben genannten Schwierigkeiten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Checkliste Wahrnehmungsstörungen

Versuchspersonen-Nr.:

Versuchsdurchlauf-Nr.:

Beleuchtungsszene:

Sind Ihnen während der Lese-Vergleichsaufgabe Illusionen oder Wahrnehmungsstörungen aufgefallen? Bitte kreuzen Sie zutreffendes in der Tabelle an.

	Ja	Nein
1. Farben oder Farbschatten: Rot – Blau – Grün – Gelb	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Bewegungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Strudelbewegung, Flattern, Wirbeln	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Flimmern	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Biegung von Linien oder Kanten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Auftreten heller/dunkler Punkte oder Flecken	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Plötzliches Verschwinden/Auftauchen von Regionen im Sehbereich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. Bitte beschreiben Sie das vorherrschende Muster, das Sie sehen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. Lässt mich schwindelig fühlen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10. Verursacht mir Übelkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11. Lässt meine Augen müde werden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12. Verursacht mir Kopfschmerzen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13. Verursacht keine Schwierigkeiten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14. Sonstige Wahrnehmungseffekte?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

15. Wie empfinden Sie das Schattenmuster?

unangenehm neutral

Subjektiv erlebte Anstrengung

Versuchspersonen-Nr.:

Versuchsdurchlauf-Nr.:

Beleuchtungsszene:

Bitte schätzen Sie ein, wie Sie den soeben ausgeführten Test empfunden haben. Für Ihre Antwort steht Ihnen die gesamte Skala zur Verfügung. Die Ankerpunkte dienen lediglich zur Orientierung. Setzen Sie bitte mit einem Strich eine Markierung auf der Skala.

