ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung

BBSR-
Online-Publikation
13/2024

Barrierefreie visuelle Kontraste und Beleuchtung

von

Prof. Dr. Christoph Schierz
Dr. Cornelia Vandahl
Dr. Karin Bieske
Prof. Dr. Michael Gebhardt
Oliver Kolbe
Martin Schlanke
Prof. Dr. Kathleen Kunert

Barrierefreie visuelle Kontraste und Beleuchtung

Grundlagenuntersuchung zur Auswirkung von Beleuchtungsparametern auf die Wahrnehmbarkeit visueller Kontraste von Leitelementen und damit auf die Barrierefreiheit im öffentlichen Raum für Menschen mit Sehbehinderung

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.
Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.08
Projektlaufzeit: 02.2021 bis 06.2023

IMPRESSUM

Herausgeber
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Felix Lauffer
felix.lauffer@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren
Technische Universität Ilmenau
Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz (Projektleitung)

Dr. Cornelia Vandahl
cornelia.vandahl@tu-ilmenau.de

Dr. Karin Bieske
karin.bieske@tu-ilmenau.de

Ernst Abbe-Hochschule Jena
Prof. Dr. Michael Gebhardt
michael.gebhardt@eah-jena.de

Oliver Kolbe, M. Eng.
oliver.kolbe@eah-jena.de

REGIOMED Rehaklinik Masserberg
Prof. Dr. Kathleen Kunert
kathleen.kunert@regiomed-kliniken.de

Martin Schlanke, M. Eng.
martin.schlanke@regiomed-kliniken.de

Redaktion
Technische Universität Ilmenau
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Stand
April 2023

Gestaltung
Technische Universität Ilmenau
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Bildnachweis
Titelbild: Martin Schlanke
Martin Schlanke: Abbildung 1, Abbildung 2
Cornelia Vandahl: Abbildung 43, Abbildung 48, Abbildung 51

Vervielfältigung
Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise
Schierz, Christoph; Vandahl, Cornelia; Bieske, Karin; Gebhardt, Michael; Kolbe, Oliver; Schlanke, Martin; Kunert, Kathleen, 2024: Barrierefreie visuelle Kontraste und Beleuchtung: Grundlagenuntersuchung zur Auswirkung von Beleuchtungsparametern auf die Wahrnehmbarkeit visueller Kontraste von Leitelementen und damit auf die Barrierefreiheit im öffentlichen Raum für Menschen mit Sehbehinderung. BBSR-Online-Publikation 13/2024, Bonn.

ISSN 1868-0097 Bonn 2024

Inhalt

Kurzfassung 7

Abstract 8

Einführung 9

Themenfeld 9

Untersuchungsgegenstand 10

Problemstellung und Ziel 11

Probleme in der Praxis 11

Stand der Forschung 11

Forschungsbedarf und Projektziele 12

Forschungsansatz für die Hauptuntersuchung 12

Grundlagen 13

Kontrastanforderung nach [DIN 32975:2009] 13

Kennzahlen zur Beschreibung der Sehleistung 14

Sehschärfe (Visus) 14

Kontrastempfindlichkeit 14

Leuchtdichten zur Erkennung der Kontraste in der Grundlagenuntersuchung 14

TI-Wert als Maß der physiologischen Blendung 14

Kontrastsehen und Beleuchtung 15

Grundlagenuntersuchung 17

Studiendesign 17

Versuchsaufbau 17

Lichttechnische Kennzahlen 19

Testobjekt 20

Testpersonen und Untersuchungsgruppen 21

Einschlusskriterien 21

Ausschlusskriterien 21

Beschreibung der Untersuchungen und Methoden 22

Subjektive Refraktion 22

Bestimmung von Visus und Kontrastempfindlichkeit 22

Glare-Test 22

Testszenario 23

Studienablauf 25

Aufklärung und Einwilligung 25

Beschreibung der ersten Visite für die Untersuchungsgruppe 25
Beschreibung der zweiten Visite für die Untersuchungsgruppe 25
Beschreibung der Visite für die Kontrollgruppen 25
Statistische Auswertung 25
Probandenkollektiv 26
Demographische Verteilung 26
Sehschärfe und Kontrastsehen des Probandenkollektivs 26
Ergebnisse 28
Erforderliche Testfeld-Leuchtdichte zum Erkennen der dargebotenen Kontraste 28
Vergleich der Untersuchungsgruppe mit den Kontrollgruppen 31
Auswertung innerhalb der Untersuchungsgruppe 33
Auswirkung der Blendempfindlichkeit 34
Auswirkungen der Funktionseinschränkungen der sehbehindeten Testpersonen 36
Darstellung der Ergebnisse für die erforderlichen Leuchtdichten 38
Faktoren zwischen den Kontraststufen 40
Vergleich von Positiv - und Negativkontrast 42
Vergleich der Streifenbreiten 42
Einfluss der Blendung 42
Vergleich der Erkennungswahrscheinlichkeiten 42
Vergleich der Ergebnisse mit derzeitigen Normwerten 42

Kontrastmaximierung durch Auswahl der Beleuchtungsspektren 45
Ansatz und Verfahren 45
Überprüfung des Verfahrens anhand von 12 Farbproben 46
Anwendung des Verfahrens mit realen farbigen Materialien 49
Anwendung des Verfahrens mit den Materialien aus dem Projekt der TU Dresden 52
Ergebnisse 53

Konzeption eines einfachen Kontrast-Messverfahrens 55
Ansatz und Verfahren 55
Dimensionierung des Filters für nicht selbst leuchtende Proben 56
Dimensionierung des Filters für selbstleuchtende Proben 59
Prototyp eines Prüfgerätes 60
Aufbau 60
Beleuchtungssituation 1 61
Beleuchtungssituation 2 61
Messmethode MM1 62
Messmethode MM2 62
Messmethode MM3 62
Messmethode MM4 62
Ergebnisse 64

Ableitungen von Empfehlungen für die Umsetzung in Regelwerken **68**
Beleuchtungsniveau 68
Außenbeleuchtung 68
Innenbeleuchtung 70
Gesamtübersicht 71
Reflexionsgrade der Materialen 72
Blendungsbegrenzung 76
Lichtverteilung 78
Lichtfarbe 78

Handlungsempfehlungen für die Praxis **79**
Erweiterung vorhandener Empfehlungen 79
Gezielte Erhöhung des Beleuchtungsniveaus bei nicht ausreichenden Kontrasten 79
Gezielte Erhöhung des Beleuchtungsniveaus bei nicht ausreichenden Reflexionsgraden 80
Hinweise zur gezielten Erhöhung des Beleuchtungsniveaus 80
Blendungsbegrenzung 81
Lichtfarbe 81

Zusammenfassung **82**
Erforderliches Beleuchtungsniveau 82
Reflexionsgrad der helleren Fläche 83
Lichtfarbe 84
Messverfahren zur Überprüfung der Kontraste 84
Handlungsempfehlung 84

Mitwirkende **85**

Literaturverzeichnis **86**

Abbildungsverzeichnis **88**

Tabellenverzeichnis **94**

Anhang - Grundlagenuntersuchung **97**

Anhang - Kontrastmaximierung **124**

Kurzfassung

Die visuelle Barrierefreiheit ist eine Voraussetzung dafür, dass Personen mit Seheinschränkungen selbstständig am öffentlichen Leben teilnehmen können. In Anforderungen und Normen gibt es deshalb Mindestkontraste und Vorgaben für die Reflexionsgrade der kontrastgebenden Materialen, mit denen die Sehobjekte realisiert werden müssen. Die Arbeit widmet sich der Verbesserung der Sehbedingungen durch eine Optimierung der Beleuchtung in Bezug auf Kontrast- und Leuchtdichtewahrnehmung, Blendung und Lichtfarbe um die Normung zur Gestaltung visueller Informationen um Beleuchtungsparameter zu erweitern. Das Forschungsprojekt liefert die dafür notwendigen Erkenntnisse darüber, welche Auswirkungen verschiedene Kontraste und Beleuchtungsparameter auf die Erkennbarkeit haben, wie die Kontraste durch Beleuchtungsparameter maximiert und wie die realisierten Kontraste in der Praxis überprüft werden können.

Den Hauptteil der Untersuchungen bildete eine Probandenstudie mit 50 sehbehinderten Testpersonen und 2 Kontrollgruppen mit je 37 Personen zum Kontrastsehen unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen. Es wurde der Frage nachgegangen, welche Leuchtdichten (untersucht wurden Werte von 0,1 bis 22,3 cd/m^2) bei verschieden hohen Kontrasten (untersucht wurden die Michelson-Kontraste 0,40; 0,25; 0,16; 0,10 und -0,10) notwendig zum Erkennen sind und wie sich diese von den Werten bei einem Kontrast von K = 0,40 unterscheiden. Des Weiteren wurden Beleuchtungssituationen mit und ohne Blendung verglichen und die Parameter Objektgröße (2 cm und 1 cm, entspricht einem Sehwinkel von 36‘ und 18‘) und Kontrastrichtung variiert.

Die Studienergebnisse lassen Schlüsse darüber zu, welche Leuchtdichten erforderlich sind, damit ein bestimmter Anteil an Personen mit einer vorgegebenen Erkennungswahrscheinlichkeit, ein Sehzeichen erkennen wird. Auf der Basis dieser Untersuchungsergebnisse mit der Prämisse, dass 80 % der Probanden aus der Untersuchungsgruppe mit einer Erkennungswahrscheinlichkeit von 100 % die Sehzeichen erkennen können, ist bei einem Positiv-Kontrast von 0,40 und einer Objektgröße von 2 cm eine Leuchtdichte von 1,5 cd/m^2 erforderlich. Sinkt der Kontrast auf einen Wert von 0,25, steigt die erforderliche Leuchtdichte auf 3 cd/m^2. Diese Aussagen gelten für eine Beleuchtung mit Blendwerten von TI = 20 %. In Beleuchtungssituationen, die blendfrei waren, hatten die Testpersonen ein deutlich verbessertes Kontrastsehen, was zeigt, dass die Blendungsbegrenzung von großer Relevanz ist.

Ein weiteres Thema des Forschungsprojektes waren theoretische Betrachtungen, inwieweit die Wahl der Lichtfarbe zur Erhöhung der Kontraste beitragen kann. Anhand umfangreicher Beispielrechnungen konnte gezeigt, dass Kontrastunterschiede zwischen warmweißer und kaltweißer Beleuchtung von bis zu 0,15 auftreten können. Die richtige Auswahl des Spektrums kann somit dazu führen, dass die Normvorgabe von K = 0,40 eingehalten wird, während im ungünstigeren nur K = 0,25 erreicht würde. Das vorgeschlagene Berechnungsverfahren lässt sich ebenso für die Auswahl der Materialien einsetzen, wenn bekannt ist, welche Lichtquelle zur Beleuchtung verwendet wird.

Zur Überprüfung der Kontrastanforderungen in der praktischen Anwendung sind Messungen der Leuchtdichte erforderlich. Im Projekt wurde ein Messverfahren konzipiert, welches erste orientierende Prüfungen erlaubt, ohne aufwändige Messtechnik vorhalten zu müssen. Das Verfahren beruht auf der Verwendung von Grau-Filtern, die auf die kontrastbildenden Materialien aufgelegt werden und die visuelle Prüfung erleichtern. Das Verfahren ersetzt nicht die fachgerechte Messung durch qualifiziertes Personal.

Für die Umsetzung der Studienergebnisse in der Praxis wurde dem Bericht eine Handlungsempfehlung für die praktische Anwendung hinzugefügt, die die Empfehlungen des Deutschen Blinden- und Sehbehindertenverbandes und der entsprechenden Schweizer Fachstelle um beleuchtungsrelevante Kriterien ergänzt. Obwohl hohe Kontraste und hohe Reflexionsgrade der Materialien die besten und energetisch effizientesten Maßnahmen sind, um ein sicheres Erkennen der visuellen Informationen zu gewährleisten, sind diese nicht immer vorhanden oder realisierbar. Für die Praxis wird aufgezeigt, wie in diesen Fällen mit einer gezielten Erhöhung des Beleuchtungsniveaus in begrenztem Rahmen gegengesteuert werden kann. Weiterhin werden Hinweise zur Blendungsbegrenzung und zur Wahl der Lichtfarbe gegeben.

Abstract

Visual accessibility is a prerequisite for people with visual impairments to be able to participate independently in public life. Requirements and standards therefore stipulate minimum contrasts and specifications for the reflectance levels of the contrast-providing materials with which the visual objects must be realised. The study is dedicated to improving visual conditions by optimising lighting in terms of contrast and luminance perception, glare and light colour in order to add lighting parameters to the standards for designing visual information. The research project provides the necessary knowledge about the effects of different contrasts and lighting parameters on recognisability, how contrasts can be maximised through lighting parameters and how the realised contrasts can be tested in practice.

The main part of the investigations was a test subject study with 50 visually impaired persons and 2 control groups of 37 people each on contrast vision under different lighting conditions. The question was investigated as to which luminances (values of 0.1 to 22.3 cd/m^2 were analysed) are necessary to identify various contrasts (the Michelson contrasts 0.40; 0.25; 0.16; 0.10 and -0.10 were investigated) and how these differ from the values at a contrast of K = 0.40. In addition, lighting situations with and without contrast were investigated. Furthermore, lighting situations with and without glare were compared and the parameters object size (2 cm and 1 cm, corresponding to a viewing angle of 36' and 18') and contrast direction were varied.

The study results allow conclusions to be drawn about the luminance levels required for a certain proportion of people to recognise a visual objects with a given recognition probability. Based on these study results and the premise that 80 % of the test subjects in the study group can recognise the visual objects with a recognition probability of 100 %, a luminance of 1.5 cd/m^2 is required for a positive contrast of 0.40 and an object size of 2 cm. If the contrast drops to a value of 0.25, the required luminance increases to 3 cd/m^2. These statements apply to lighting with glare values of TI = 20 %. In lighting situations that were glare-free, the test subjects had significantly improved contrast vision, which shows that glare limitation is of great relevance.

A further topic of the research project was theoretical considerations of the extent to which the choice of colour of light can contribute to increasing contrasts. Extensive sample calculations showed that contrast differences of up to 0.15 can occur between warm white and cool white lighting. The correct selection of the spectrum can therefore result in the standard specification of K = 0.40 being met, while in the less favourable case only K = 0.25 would be achieved. The proposed calculation method can also be used for the selection of materials if it is known which light source will be used for illumination.

Luminance measurements are required to check the contrast requirements in practical applications. In the project, a measurement method was designed that allows initial orientating tests to be carried out without the need for expensive measurement technology. The method is based on the use of grey filters, which are applied to the contrast-forming materials and facilitate visual testing. The procedure does not replace professional measurement by qualified personnel.

For the implementation of the study results in practice, a recommendation for practical application was added to the report, which supplements the recommendations of the German Association for the Blind and Visually Impaired and the corresponding Swiss specialist centre with lighting-relevant criteria. Although high contrasts and high reflectance of materials are the best and most energy-efficient measures to ensure reliable recognition of visual information, these are not always available or realisable. In practice, it is shown how a targeted increase in the lighting level can counteract this to a limited extent. Furthermore, advice is given on glare limitation and the choice of light colour.

Einführung

Abbildung 1: Beispiele von Leitelementen im öffentlichen Raum, wie sie von sehbehinderten Menschen gesehen werden

Fotos: Martin Schlanke, EAHS Jena

Themenfeld

Ein Großteil der Informationen aus unserer Umwelt wird über das Auge aufgenommen. Daher werden viele Informationen im öffentlichen Raum visuell dargeboten. Nach Hochrechnung der Weltgesundheitsorganisation [WHO 2019] lebten im Jahr 2002 in Deutschland 1,2 Millionen sehbehinderte und blinde Menschen [Resnikoff 2004]. Die Gutenberg Gesundheitsstudie von 2015 erfasste einen Anteil von 11,6 % der Gesamtbevölkerung mit meist altersbedingten Augenerkrankungen, die zu Sehbehinderungen führen [GHS 2015]. Hinzu kommt, dass viele Menschen aufgrund von nachlassender Sehleistung im Alter ebenso Probleme mit der Wahrnehmung visueller Informationen haben [DBSV]. Die baulich adäquate Antwort auf eine alternde Gesellschaft ist aus mehreren Gründen die Sicherstellung und Realisierung einer barrierefreien Umwelt. Dies ist sowohl wegen der gleichberechtigten Teilhabe älterer Menschen als auch wegen des Fachkräftemangels aus volkswirtschaftlichen Überlegungen notwendig.

Seit der Veröffentlichung der Normen zum „Barrierefreien Bauen“ ist bei allen öffentlich zugänglichen Gebäuden und Freiräumen, sowie allen Bundes- und Landesbauten, Barrierefreiheit eine bauordnungsrechtliche Vorgabe [DIN 18040-1:2010]. Grundlage dieser Forderung sind sowohl die verfassungsrechtlich festgeschriebenen Teilhaberechte von Menschen mit Behinderung als auch der demografischen Wandel in Deutschland, der zu einer immer größere Bevölkerungsanteil älterer Menschen führt. Ebenso erfordern die Rechte von Menschen mit Behinderung durch die Landes- und Bundesgesetze eine umfassende Realisierung von Barrierefreiheit.

Untersuchungsgegenstand

Es ist bekannt, dass eine Optimierung der Beleuchtungssituation dazu führt, dass auch weniger hohe Kontraste sicher erkannt werden können. Dazu zählen unter anderem die Erhöhung der Leuchtdichte, und damit die Helligkeit der Sehobjekte, und die Vermeidung von Blendung.

Möglichkeiten, die Sehbedingungen durch gezielte Optimierung der Beleuchtung zu verbessern, werden bisher kaum genutzt. Normative Vorgaben beschränken sich auf allgemeine Aussagen. Konkrete Angaben fehlen. Das liegt zum einen daran, dass die technischen Möglichkeiten dafür erst seit Einführung der LED zur Verfügung stehen. Andererseits fehlt detailliertes Grundlagenwissen dazu, wie sehbehinderte Menschen (dazu gehören auch viele ältere Personen) von einer verbesserten Beleuchtung profitieren können und unter welchen Bedingungen vom derzeit geforderten Mindestkontrast abgewichen werden kann. Die Erweiterung der Normen setzt allerdings den Nachweis voraus, dass mit einer verbesserten Beleuchtung die Wahrnehmung bei verringerten Kontrasten gesichert ist. Dieser Nachweis sollte im Rahmen dieses Projektes erbracht werden.

Zwei weitere Forschungsfelder waren die Maximierung von Kontrasten durch die Verwendung optimaler Beleuchtungsspektren und eine praxistaugliche Messmethode zur orientierenden Überprüfung bereits realisierter Kontraste in der praktischen Anwendung.

Problemstellung und Ziel

Die visuelle Barrierefreiheit ist eine Voraussetzung dafür, dass Personen mit Seheinschränkungen selbstständig am öffentlichen Leben teilnehmen können. Diese Barrierefreiheit kann durch die Gestaltung der visuellen Kontraste der für die Orientierung und Erkennung notwendigen Elemente im öffentlichen Bereich erreicht werden. In Anforderungen und Normen finden sich daher Mindestkontraste und Vorgaben für die Reflexionseigenschaften der Materialen, mit denen die Sehobjekte realisiert werden müssen. Damit soll sichergestellt werden, dass Sehobjekte sicher erkannt werden können [DIN 32975:2009].

Probleme in der Praxis

Die Anforderungen an die visuellen Kontraste können bei Natursteinbelägen im Außenraum nicht immer erfüllt werden. Vor allen Dingen kann der normativ geforderte Reflexionsgrad der helleren der kontrastgebenden Flächen bei Naturstein nur mit wenigen Materialien erreicht werden. Auch bei der Sanierung im denkmalgeschützten Bereich sind die Anforderungen oft nicht einhaltbar. Das führt in der Folge dazu, dass die Normvorgaben nicht eingehalten werden.

Eine Überprüfung der Normvorgaben in bereits realisierten Anlagen nach deren Fertigstellung oder auch nach längerer Nutzung erfordert derzeit aufwändige Leuchtdichtemesstechnik, die vor Ort meist nicht vorhanden ist. So wird im allgemeinen nicht festgestellt, dass die Normvorgabe nicht (oder nach Alterung oder Verschmutzung nicht mehr) eingehalten wird.

Planer von Beleuchtungsanlagen richten sich nach normativen Vorgaben, die die Barrierefreiheit visueller Informationen nicht beinhalten. Die Normen zur Gestaltung visueller Informationen enthalten nur allgemeine Empfehlungen für die Gestaltung der Beleuchtung. Das liegt zum einen daran, dass die technischen Möglichkeiten dafür erst seit Einführung der LED zur Verfügung stehen. Andererseits fehlt detailliertes Grundlagenwissen.

Stand der Forschung

Es ist bekannt, dass eine Optimierung der Beleuchtungssituation dazu führt, dass auch weniger hohe Kontraste sicher erkannt werden können. Dazu zählen unter anderem die Erhöhung der Leuchtdichte und die Vermeidung von Blendung. Diese Möglichkeiten, die Sehbedingungen durch gezielte Optimierung der Beleuchtung zu verbessern, werden bisher kaum genutzt. Es fehlt detailliertes Grundlagenwissen dazu, wie sehbehinderte Menschen (dazu gehören auch viele ältere Personen) von einer verbesserten Beleuchtung profitieren können und unter welchen Bedingungen vom derzeit geforderten Mindestkontrast abgewichen werden kann.

Erste systematische Untersuchungen zur Abhängigkeit des kleinsten erkennbaren Kontrastes (= Schwellenkontrast) von der Leuchtdichte und der Blendung finden sich in einer Arbeit von HAUCK [Hauck 2018]. Die Erhöhung der Umfeld-Leuchtdichte von 1 auf 10 cd/m^2 führte zu einer Verringerung des Schwellenkontrastes um 40 %. Noch offen ist, ob dies in gleichem Maße auch für die Kontraste in der praktischen Anwendung gilt. Die Anforderung der Normen gilt derzeit unabhängig von der Leuchtdichte und damit von der Beleuchtung.

Ebenso deuten die Ergebnisse des Forschungsprojektes VISKON [Lohaus 2018] darauf hin, dass auch bei verringerten Kontrasten eine sichere Wahrnehmung möglich ist, wenn die Leuchtdichten bzw. die Beleuchtungsstärken erhöht werden.

Forschungsbedarf und Projektziele

Die Erweiterung der Normen setzt den Nachweis voraus, dass mit einer verbesserten Beleuchtung die Wahrnehmung bei verringerten Kontrasten gesichert ist. Dieser Nachweis sollte im Rahmen dieses Projektes erbracht werden.

Es besteht dringender Bedarf, die Normung zur Gestaltung visueller Informationen um Beleuchtungsparameter zu erweitern. Das Forschungsprojekt liefert die dafür notwendigen Erkenntnisse darüber, welche Auswirkungen verschiedene Kontraste und Beleuchtungsparameter auf die Erkennbarkeit haben, wie die Kontraste durch Beleuchtungsparameter maximiert und wie die realisierten Kontraste in der Praxis überprüft werden können.

Forschungsansatz für die Hauptuntersuchung

Ziel ist die Optimierung von Beleuchtungsparametern zur Verbesserung der Wahrnehmbarkeit von visuellen Kontrasten von Leitelementen, um die Barrierefreiheit im öffentlichen Raum für Menschen mit Sehbehinderung zu gewährleisten. Dazu sollen die Anforderungen in den Normen und Planungsempfehlungen um konkrete Vorgaben für die Beleuchtung erweitert werden. Von den Ergebnissen der Forschung können auch ältere Personen profitieren.

Durch Untersuchungen mit sehbehinderten Testpersonen sollen unter anderen die folgenden Fragen beantwortet werden:

1. Wie hängt der erforderliche Kontrast von Sehobjekten von der Leuchtdichte ab?
2. Welche relevanten Gruppen von Sehbehinderungen profitieren von einer verbesserten Beleuchtung?
3. Welchen Einfluss hat die Blendung durch Beleuchtungssysteme auf den erforderlichen Kontrast?

Die Studie wurde an einem ausreichend großen Probandenkollektiv von sehbehinderten Menschen in der Rehaklinik Masserberg durchgeführt. An einem Teststand, der es erlaubte, die zu untersuchende Leuchtdichte und die Blendung, zu variieren, wurde ermittelt, bei welchen Leuchtdichten bei verschieden großen Kontrasten eine sichere Erkennung der Sehobjekte möglich ist.

Grundlagen

Kontrastanforderung nach [DIN 32975:2009]

In der Norm „Gestaltung visueller Informationen im öffentlichen Raum zur barrierefreien Nutzung“ [DIN 32975:2009] liegt das Hauptaugenmerk darauf, die sichere Wahrnehmung durch hohe Kontraste zu gewährleisten.

Der Kontrast benachbarter Felder ist dabei wie folgt definiert:

Formel (1) $$K = \frac{L_O - L_u}{L_O + L_U}$$

mit: K Kontrast (üblicherweise als Michelson-Kontrast bezeichnet)
L_O Leuchtdichte des Sehobjektes in cd/m²
L_U Leuchtdichte des Umfeldes in cd/m²

Die Definition des Kontrastes nach Formel (1) gilt für alle in diesem Bericht verwendeten und genannten Kontraste K.

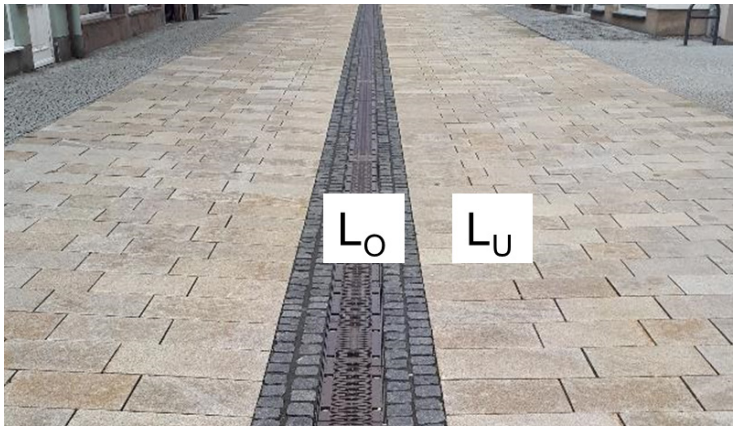


Abbildung 2: Definition von Objekt- und Umfeld-Leuchtdichte nach Formel (1). Für dieses Beispiel hat der Kontrast einen negativen Wert.
Foto: Martin Schlanke, EAHS Jena

Die Anforderung an den Mindestkontrast für Bedien- und Leitelementen lautet wie folgt: „Zur Kennzeichnung von Bedienelementen ..., für Orientierungs- und Leitsysteme ohne Schrift- und Bildzeichen wie z. B. Bodenmarkierungen sowie für Kennzeichnungen im Bodenbereich ... ist ein Kontrast von mindestens 0,4 einzuhalten.“ [DIN 32975:2009]. Zusätzlich gibt es eine Anforderung an die hellere der kontrastgebenden Flächen, diese muss einen Reflexionsgrad von mindestens 0,5 aufweisen.

Zu beachten ist, dass bei einer Anforderung an den Kontrast von 0,4 und den Reflexionsgrad von 0,5 die realen Werte auf eine Kommastelle gerundet werden dürfen. D. h. ein vorhandener Kontrast von 0,351 kann auf 0,4 aufgerundet werden und erfüllt damit die Norm.

Weiterhin wird gefordert, dass die Kennzeichnungen ihre Funktion dauerhaft erfüllen müssen: „Durch regelmäßige Inspektionen festgestellte Beeinträchtigungen, z. B. Verwitterung, Verschmutzung, Abnutzung, sind durch Instandsetzungsmaßnahmen und/oder Reinigung durch zuständige Stellen zu beheben.“ Damit ist klar geregelt, dass es sich bei den geforderten Werten um so genannte Wartungswerte handelt. Die Neuwerte von Kontrast und Reflexionsgrad sollten daher die Anforderung überschreiten. Weiterhin ist klar darauf hingewiesen, dass die Einhaltung der Vorgaben im Laufe der Nutzung regelmäßig überprüft werden muss um Veränderungen durch Verschmutzung oder Verwitterung festzustellen und beheben zu können. Zum Nachweis des

Kontrastes wird auf eine Norm zur Lichtmesstechnik verwiesen: „Zur Ermittlung des Kontrasts dient die Messung der Leuchtdichtefaktoren nach [DIN 5036-3:1979]. Die Messung der Leuchtdichten erfolgt dabei bei diffuser Beleuchtung mit der Lichtart, die in der Anwendung vorgesehen ist, mindestens unter dem Messwinkel 0° (senkrecht zur Oberfläche) und gegebenenfalls zusätzlich unter praxisrelevanten Beobachtungswinkeln."

Unter dem Kapitel Beleuchtung werden eher allgemeine Angaben gemacht: „Um Kontraste gut wahrnehmen zu können, ist u. a. eine der Sehaufgabe angemessene Beleuchtung erforderlich. Ebenso wie eine zu geringe Beleuchtung kann eine zu intensive Beleuchtung (Blendung oder gar spiegelnde Reflexion) dazu führen, dass physikalisch gegebene Kontraste vom Auge nicht entsprechend aufgenommen werden können. Blendungen oder Schattenbildungen sind zu vermeiden. Eine gleichmäßige und blendfreie Grundbeleuchtung mit akzentuierter Beleuchtung wichtiger Bereiche (z. B. Treppen) und möglicher Ziele (z. B. Informationstafeln) ist zu gewährleisten. Es ist eine Beleuchtung anzustreben, die Farben nicht verfälscht und die geforderten Kontraste ermöglicht (z. B. ist Licht mit engem Spektrum zu vermeiden)." [DIN 32975:2009]

Kennzahlen zur Beschreibung der Sehleistung

Sehschärfe (Visus)

Zur Kennzeichnung der Sehschärfe dient der Visus in logMAR (Logarithm of the Minimum Angle of Resolution). Dieser ist der Logarithmus des Kehrwertes der angularen Sehschärfe, also des kleinsten Winkels (Sehwinkel β), unter dem zwei Punkte von einem Betrachter als getrennt wahrgenommen werden können:

Formel (2) $$V = \log(\frac{1}{\beta})$$

mit: V Visus in logMAR
β Kleinster auflösbarer Sehwinkel in Winkelminuten

Kontrastempfindlichkeit

Als Kontrastempfindlichkeit ist der logarithmierte Kehrwert des Schwellenkontrastes, also des kleinsten wahrnehmbaren Leuchtdichtekontrastet K_{th}, nach Formel (1), definiert:

Formel (3) $$\log CS = \log(\frac{1}{K_{th}})$$

mit: K_{th} kleinster erkennbarer Kontrast (Schwellenkontrast)

Leuchtdichten zur Erkennung der Kontraste in der Grundlagenuntersuchung

Die Erhebung der Testfeld-Leuchtdichte erfolgte in logarithmischer Abstufung. Um die Werte vergleichbar und geeignet für die gewählten statistischen Methoden zu machen, wurden die Testfeld-Leuchtdichten nach Formel (4) logarithmiert. Für die graphische Darstellung der Daten wurden die Werte zur besseren Verständlichkeit teilweise delogarithmiert Formel (5).

Formel (4) $$\log L = \log(\frac{1}{L}) = - \log (L)$$

Formel (5) $$L = 10^{-\log L}$$

mit: L Leuchtdichte in cd/m²
$\log L$ logarithmierte Leuchtdichte in log(cd/m²)

TI-Wert als Maß der physiologischen Blendung

Physiologische Blendung führt im Allgemeinen zur Verschlechterung des Sehvermögens, da das Streu-licht, dass eine Blendquelle im Beobachterauge verursacht den Schwellenkontrast bzw. die Unterschiedsschwelle ΔL erhöht. Diese Schwellenerhöhung (Threshold increment TI) dient in der Außenbeleuchtung als Kennzahl

für die Stärke der Blendung einer Beleuchtungsanlage und wird nach Norm [DIN EN 13201-2:2016] auf 10 bis 20 % begrenzt.

Der TI-Wert [Eichhoff 1970], [Vos 1997] geht von einer näherungsweise fovealen Betrachtung des Sehobjektes aus. Die auf der Netzhaut entstehende Schleierleuchtdichte (L_v) führt zu einer Änderung der Unterschiedsschwelle. Die Schleierleuchtdichte ist dabei anhängig vom Alter der Person, von der Blendbeleuchtungsstärke am Auge E_{Auge} sowie vom Blendwinkel Θ zwischen Blendrichtung und Blickrichtung (Abbildung 3).

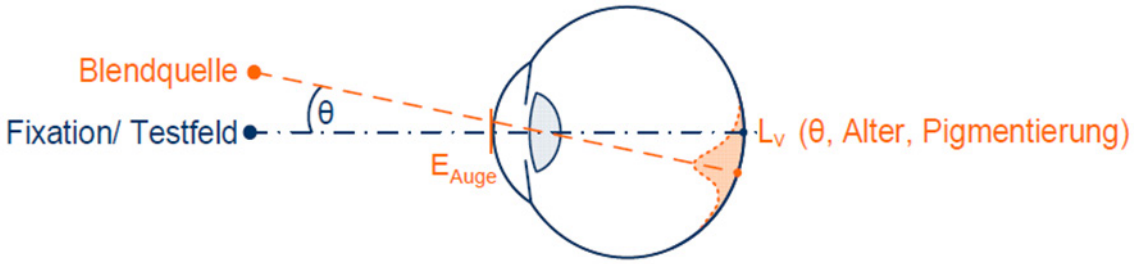


Abbildung 3: Definition der Schleierleuchtdichte Lv nach Formel (6).

Formel (6) $$L_V = k \frac{E_{Auge}}{\Theta^2}$$

mit:
- L_V Schleierleuchtdichte in cd/m²
- k altersabhängige Konstante
- E_{Auge} Beleuchtungsstärke am Auge in lx
- Θ Blendwinkel in ° (Grad)

Die Konstante k wird für eine altersunabhängige Betrachtung der Blendsituation mit einem Wert von k = 10 festgelegt. Allerdings ist bekannt, dass im menschlichen Auge mit zunehmendem Alter bei Blendung mehr Streulicht auftritt. Nach [CIE 146 2002] kann der Faktor k in Formel (7) altersabhängig angegeben werden:

Formel (7) $$k = 10\left(1 + \left(\frac{Alter}{70}\right)^4\right)$$

Der TI-Wert als prozentuale Schwellenerhöhung ist nach Formel (8) definiert und kann näherungswiese nach Formel (9) berechnet werden.

Formel (8) $$TI = \left(\frac{\Delta L_{Bl}}{\Delta L_{oBl}} - 1\right)$$

mit:
- TI Threshold Increment (Schwellenerhöhung) in %
- ΔL_{Bl} Unterschiedsschwelle mit Blendung
- ΔL_{oBl} Unterschiedsschwelle ohne Blendung

Formel (9) $$TI = 65 \frac{L_V}{L_U^{0,8}}$$

mit:
- TI Threshold Increment (Schwellenerhöhung) in %
- L_V Schleierleuchtdichte in cd/m²
- L_U Umfeldleuchtdichte in cd/m²

Gültigkeit der Näherungs-Formel (9): L_U = 0,05 cd/m² … 5 cd/m²

Kontrastsehen und Beleuchtung

Sehbehinderungen gehen in der Regel nicht nur mit einer Reduktion der zentralen Sehschärfe, sondern auch mit einer Reduktion der Kontrastempfindlichkeit einher. Daher können eine höhere Umgebungs-Leuchtdichte (Adaptations-Leuchtdichte) und ein blendfreies Umfeld dazu führen, dass die für ein sicheres Erkennen notwendigen Kontraste geringer sind, als sie ohne optimierte Beleuchtung sind.

Erste systematische Untersuchungen zur Abhängigkeit des kleinsten erkennbaren Kontrastes (= Schwellenkontrast) von der Leuchtdichte und der Blendung finden sich in [Hauck 2018]. Die Erhöhung der Adaptationsleuchtdichte von 1 auf 10 cd/m² führte bei sehbehinderten Menschen mit hohem Lichtbedarf zu einer Verringerung des Schwellenkontrastes um 40 % (Abbildung 4). Bei der Gruppe mit geringem Lichtbedarf ist diese Abhängigkeit nicht erkennbar. Vermutet wird, dass diese Gruppe besonders blendempfindlich ist und höhere Leuchtdichten bereits zu Blendung führen.

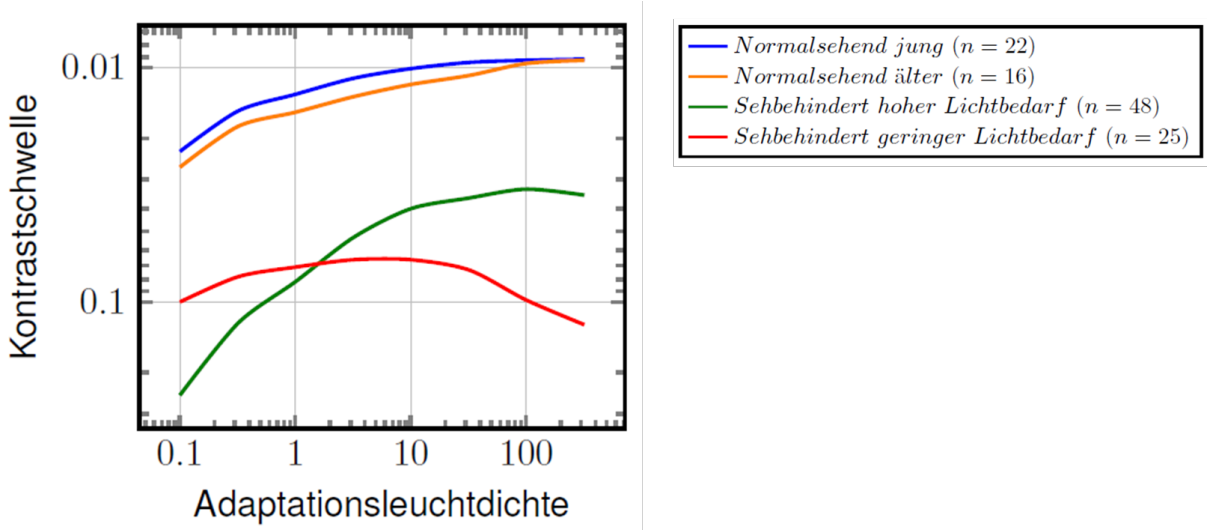


Abbildung 4: Erhöhung der Adaptationsleuchtdichte von 1 auf 10 cd/m² führt nach [Hauck 2018] bei sehbehinderten Menschen mit hohem Lichtbedarf zu einer Verringerung des Schwellenkontrast um 40 % (Bildquelle [Hauck 2018])

Ebenso deuten die Ergebnisse des Forschungsprojektes VISKON [Lohaus 2018] darauf hin, dass auch bei verringerten Kontrasten eine sichere Wahrnehmung möglich ist, wenn die Leuchtdichten bzw. die Beleuchtungsstärken erhöht werden.

Grundlagenuntersuchung

Studiendesign

Die Grundlagenuntersuchung zur Auswirkung von Leuchtdichte und Blendung auf den wahrnehmbaren Kontrast wurde als Probandenstudie durchgeführt. Neben der sehbehinderten Untersuchungsgruppe gab es zwei Kontrollgruppen. Kontrollgruppe I bestand aus jungen (18 bis 45 Jahre) sehgesunden, Kontrollgruppe II aus älteren (60 bis 83 Jahre) sehgesunden Probanden.

Die Studie entspricht einer Pilotstudie mit explorativem und deskriptivem Charakter und dient der Generierung neuer Hypothesen. Für die notwendige Fallzahlplanung eines induktiven Ansatzes fehlte jegliche Datengrundlage, Abschätzungen der Effektgrößen der primären und sekundären Endpunkte scheinen zu unsicher. Um eine höhere statistische Sicherheit zu erzielen und parametrisch auswerten zu können, wurde die Fallzahl auf Grundlage des zentralen Grenzwertsatzes auf 31 Probanden pro Gruppe festgelegt [Corder 2009]. Um mögliche Dropouts zu kompensieren, wird die Fallzahl um eine Dropout-Rate von 20 % erhöht [Furlan 2009]. In einem Expertengespräch mit dem Begleitausschuss für die geplante Studie wurde angemerkt, dass die Probandenzahl der Untersuchungsgruppe 50 betragen sollte. Als Grund wurde angegeben, möglichst mehrere Augenerkrankungen, die zu einer Sehbehinderung führen, durch eine größere Anzahl an Probanden abzubilden. Dieser Empfehlung wurde nachgekommen. Die Anzahl der Probanden in den Kontrollgruppen wurde entsprechend des Grenzwertsatzes auf jeweils 37 Probanden festgelegt. Insgesamt wurde für die Studie eine Fallzahl von 124 Probanden geplant.

Die Probanden mit Sehbehinderung (Untersuchunsgruppe) dieser Studie wurden über die REGIOMED Rehaklinik Masserberg akquiriert. Die Kontrollgruppe I und Kontrollgruppe II wurden aus dem (nicht an dieser Studie beteiligten) Personal der REGIOMED Rehaklinik Masserberg, weiteren sehgesunden Patienten und Anwohnern im Umfeld der Klinik (Masserberg und Ilm-Kreis) akquiriert.

Primärer Endpunkt der Studie ist die Erhebung der mittleren Testfeld-Leuchtdichte (cd/m^2) auf einer Fläche zum Erkennen eines Kontrastes nach Michelson (K) von 0,40, 0,25, 0,16, 0,10 und 0,10 bei Menschen mit Sehbehinderung. Sekundäre Endpunkte sind die Differenz der Testfeld-Leuchtdichten (cd/m^2) auf einer Fläche zum Erkennen eines vorgegebenen Kontrastes zwischen der Untersuchungsgruppe und den Kontrollgruppen, der Einfluss von Blendung sowie der Einfluss von Blendempfindlichkeit auf die Erkennbarkeit von Kontrasten.

Die Studie wurde gemäß den ethischen Grundsätzen durchgeführt, die ihren Ursprung in der Deklaration von Helsinki haben. Die jeweils aktuelle Version der Deklaration wurde beachtet. Die Empfehlungen der Guten Klinischen Praxis („Good Clinical Practice“, GCP), gültig seit dem 17.1.1997, werden, sofern zutreffend, berücksichtigt. Alle Prüfer der Studie hatten ein gültiges GCP-Zertifikat.

In der Sitzung vom 10.05.2022 hat die Ethik-Kommission der Friedrich-Schiller-Universität in Jena die Studie positiv votiert (Abbildung 57 im Anhang). Nach Änderungen am Studienprotokoll erfolgte ein positives Votum der Ethik-Kommission für das Amendment am 13.09.2022 (Abbildung 58 im Anhang). Die Untersuchungen der Studie fanden im Zeitraum vom 28.09.2022 bis zum 06.05.2023 in den Räumlichkeiten der REGIOMED Rehaklinik Masserberg statt.

Versuchsaufbau

Für die Untersuchungen mit den Testpersonen wurde eine Einblickvorrichtung in Kugel-Form verwendet (Abbildung 5). Der Versuchsaufbau ermöglichte es, die Kenngrößen der visuellen Ein- und Ausschlussparameter (z. B. Visus), Klassifizierungsparameter (Blendempfindlichkeit) sowie die primären und sekundären Endpunkte unter definierten Umgebungsbedingungen zu erheben. Der Versuchsaufbau enthielt eine Lichtquelle für die Beleuchtung des Raumes, eine Lichtquelle zur gezielten Beleuchtung des Testfeldes und eine Lichtquelle zur Blendung des Probanden. Die Lichtquellen konnten elektronisch über ein Steuergerät/Schaltpult definiert an-

gesteuert werden. Eine diffuse Beleuchtung sorgte für eine gleichmäßige Beleuchtungsstärke auf der Rauminnenwand. Die Wände und der Boden der Einblickvorrichtung bestanden aus dunkelgrauer, matter Pappe und wiesen einen einheitlichen Reflexionsgrad von ρ = 0,15 auf. Die Decke (entspricht im Außenraum dem Himmel) wurde mit einer Pappe mit einem Reflexionsgrad von ρ = 0,07 ausgekleidet, um eine nächtliche Lichtsituation zu simulieren. Auf diese Weise wurde durch die Raumbeleuchtung eine homogene Ausleuchtung innerhalb der Vorrichtung gewährleistet und verhindert, dass die anderen Lichtquellen eine signifikante Veränderung der Raumbeleuchtung verursachen.

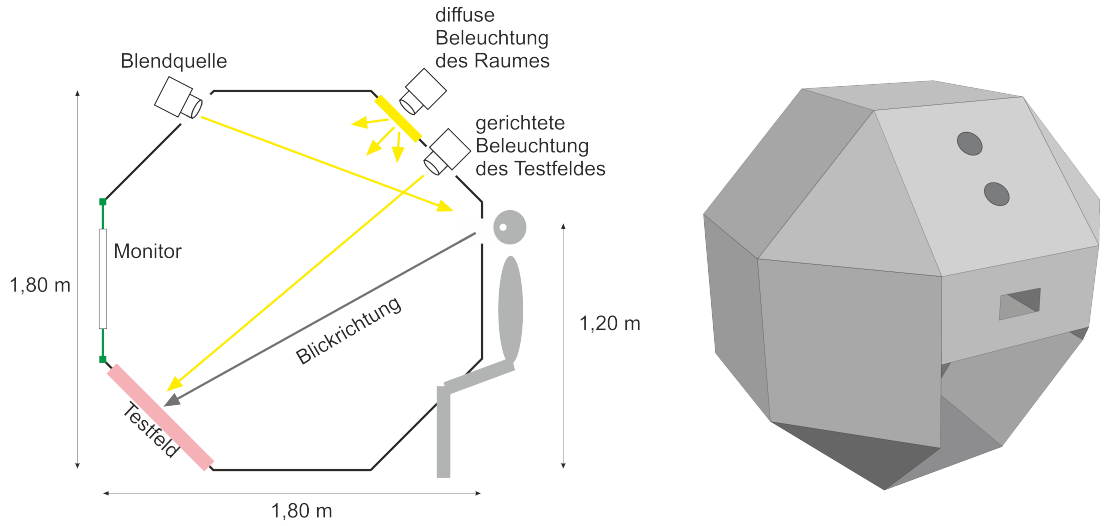


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Einblickvorrichtung mit definierten Beleuchtungsbedingungen, rechts als 3D-Modell.

Die Lichtquellen waren weiße Leuchtdioden mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 4500 K. Durch Variation der Beleuchtungsstärken ergaben sich von 0,1 cd/m² bis 22,3 cd/m² in annähernd 0,15 log-Stufen einstellbare Leuchtdichten auf dem Testfeld.

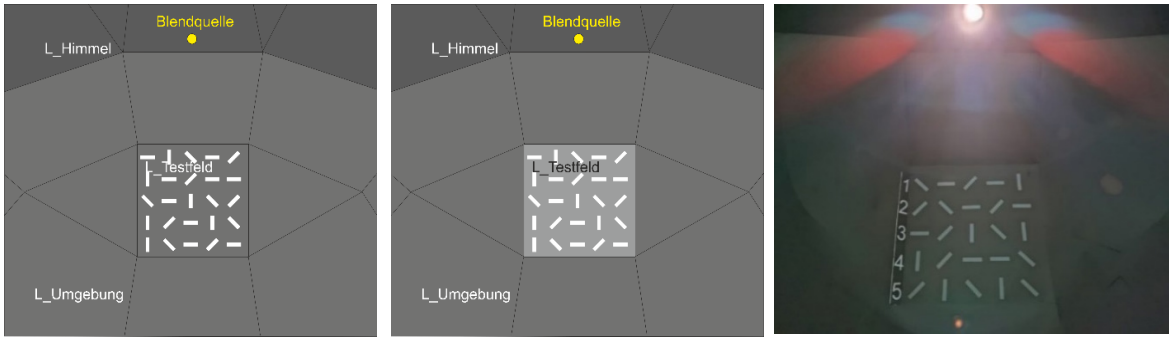


Abbildung 6: Sehfeld des Probanden, links: die Leuchtdichte des Testfeldes ist identisch mit der der Umgebung, mittig: das Testfeld ist heller als die Umgebung, rechts: Foto der Situation mit eingeschalteter Blendquelle

Die Fläche gegenüber der Sitzposition des Probanden konnte geöffnet werden, um das Prüfgerät für die Erhebung des Visus und der Kontrastempfindlichkeit (mit und ohne Blendung) sowie die Testtafeln präsentieren zu können. Bei letzterem war die Öffnung verschlossen und wurde nur zum Wechseln der Testfelder kurzzeitig geöffnet. Da in realen Orientierungssituationen Kontrastmarkierungen in der Regel bodennah positioniert sind, wurde für eine realitätsnahe Prüfung der Parameter das Testfeld in einem 45°-Winkel zum Boden unterhalb der horizontalen Sehachse mit einem Sehabstand von 1,9 m positioniert. Gegenüber der Testperson befand sich eine Blendquelle. Der Blendwinkel zur Blickrichtung betrug 40°.

Lichttechnische Kennzahlen

Entsprechend der nächtlichen Ausgangssituation wurden als Testfeld-Leuchtdichte Werte nach [DIN EN 13201-2:2016] verwendet. Diese liegen in logarithmischen Stufen im Bereich zwischen 0,3 und 2 cd/m². Für die Untersuchungen wurden in gleichbleibender Stufung höhere Leuchtdichtewerte hinzugefügt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Leuchtdichtewerte der verschiedenen Bereiche nach Abbildung 6, sowie Beleuchtungsstärke am Auge (Abbildung 3) und TI-Wert nach Formel (9)

Einstellung	L_Umgebung in cd/m²	L_Testfeld in cd/m²	L_Himmel in cd/m²	E_{Auge} (Blendquelle) in lx	TI (Blendquelle) in %
1	0,1	0,1	0,05	18,8	50
2	0,18	0,18	0,09	18,8	30
3	0,3	0,3	0,15	18,8	20
4	0,3	0,5	0,15	28,3	20
5	0,3	0,75	0,15	39,1	20
6	0,3	1	0,15	49,2	20
7	0,3	1,5	0,15	68,1	20
8	0,3	2	0,15	85,7	20
9	0,3	2,7	0,15	109	20
10	0,3	4	0,15	150	20
11	0,3	5,6	0,15	206	20
12	0,3	8	0,15	299	20
13	0,3	11,2	0,15	426	20
14	0,3	15,9	0,15	615	20
15	0,3	22,3	0,15	780	20

Als Ausgangssituation diente eine Umgebungs-Leuchtdichte von 0,3 cd/m², die im gesamten unteren Bereich („Umgebung“) der Kugel dargeboten wurde. Von diesem Wert ausgehend erfolgen Leuchtdichteerhöhungen nur im Bereich des Testfeldes (Abbildung 6). Das entspricht in der Praxis der Beleuchtung eines Weges mit einer Straßenleuchte, während sich die Leuchtdichte der Umgebung nicht erhöht. Für die Situation mit Blendung wurde die Blendquelle so dimensioniert, dass ein TI-Wert von 20 % erreicht wird (Blendwinkel 40°, als Umfeldleuchtdichte für die Dimensionierung des TI-Wertes nach Formel (5) wird die Testfeld-Leuchtdichte verwendet (Tabelle 1).

In Vorversuchen wurde festgestellt, dass eine nicht unerhebliche Anzahl von Testpersonen bereits bei Umgebungs-Leuchtdichten von 0,3 cd/m² auch niedrige Kontraste sicher erkennen kann. Daher wurde die Leuchtdichteskala in zwei Schritten bis zu einem Wert von 0,1 cd/m² nach unten erweitert. Der TI-Wert für diese beiden zusätzlichen Situationen wurde auf der Basis einer Umgebungs-Leuchtdichte von 0,3 cd/m² belassen und

beträgt für die niedrigeren Werte dann 30 % bzw. 50 % (Einstellungen 1 und 2 in Tabelle 1). Diese Situationen entsprechen in der Praxis dem Identifizieren von Sehobjekten außerhalb beleuchteter Bereiche.

Testobjekt

Die Untersuchung der Kontrastempfindlichkeit des menschlichen Auges ist nicht trivial, da keine nationalen oder internationalen Normungen hierzu vorliegen. Die Kontrastempfindlichkeit ist eine Funktion der Ortsfrequenz, also der „Detailhaltigkeit" des Sehobjektes. Das bedeutet, dass die Unterscheidung eines Objektes von dessen Umfeld, nicht nur von dem Kontrast des Objektes, sondern auch von der Größe des Objektes abhängig ist. Als möglichst realitätsnahes Sehobjekt einer Orientierungssituation wurde ein 10 cm langer Streifen in zwei Breiten (B = 1 cm und B = 2 cm) gewählt. Der 2 cm breite Streifen entspricht einer Ortsfrequenz von 0,83 cpd und der 1 cm breite Streifen entspricht einer Ortsfrequenz von 1,67 cpd. Die Breite der Streifen wurde nach [DIN 18040-1:2010] festgelegt, in der für die Setzstufen von Treppen eine mindesten 1 cm, vorzugsweise 2 cm breite, kontrastreiche Markierung vorgegeben wird. Für die objektive Prüfung der korrekten Detektion des Streifens durch den Probanden, konnte das Sehobjekt in vier fixen Winkeln (0°, 45°, 90° und 135°) dargeboten werde. Auf einem 75 cm x 75 cm großen Testfeld wurden 25 Streifen mit gleichem Kontrast dargeboten (Abbildung 7). Die Streifen wurden randomisiert angeordnet. Insgesamt wurden in der Studie fünf Kontraste (K = 0,40; 0,25; 0,16; 0,10 sowie -0,10) auf je einer Testtafel geprüft.

Die Ermittlung des Schwellenwertes erfolgte anhand der psychometrischen Funktion, d. h. eine Kontraststufe gilt erkannt, wenn der Proband die Richtung/Orientierung von mindestens 50 % der Teststeifen richtig identifiziert (Erkennungswahrscheinlichkeit 50 %). Aufgrund der Ratewahrscheinlichkeit von 25 % ergab sich daraus, dass 4 von 6 Sehobjekten zum Bestehen der Kontraststufe richtig erkannt werden mussten [Hartmann 1987], [Effert 1989]. Anschließend wurde die Testfeld-Leuchtdichte auf der Fläche weiter erhöht bis 6 von 6 Streifen richtig benannt wurden (Erkennungswahrscheinlichkeit 100 %. Die Antwortzeit durch die Probanden wurde auf 3 s pro Sehobjekt begrenzt. Spätere Antworten wurden als „nicht erkannt" interpretiert. Über der Angabe der Streifenrichtung durch den Probanden konnte objektiv überprüft werden, ob das Testzeichen richtig erkannt wurde.

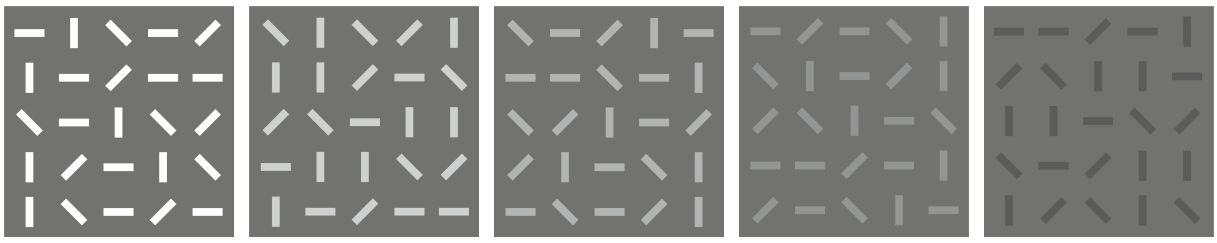


Abbildung 7: Testfelder mit verschiedenen Kontrasten K, die Sehzeichen sind entweder 1 oder 2 cm breit und 10 cm lang. Die Größe des Testfeldes betrug 75 cm x 75 cm.

Testpersonen und Untersuchungsgruppen

Einschlusskriterien

[DIN 32975:2009] bezieht sich auf einen Visus von 0,1, da sehbehinderte Menschen mit dieser Sehschärfe „sich noch ohne Hilfsmittel orientieren können". Um dem Kontext der visuellen Barrierefreiheit gerecht zu werden, wurden die Grenzen der Sehschärfe erweitert. Für die Untersuchungsgruppe sollte bei den Probanden eine mittelschwere bis schwere Sehbeeinträchtigung nach WHO vorliegen. Menschen mit einem Sehvermögen unter 5 % (entspricht der Definition der Blindheit nach der WHO) wurden nicht einbezogen, da sie sich zunehmend nicht visuell orientieren, beispielsweise durch den Einsatz eines Blindenlangstocks, der Klicksonartechnik oder eines Blindenhundes.

Die Einschlusskriterien sind im Folgenden aufgelistet:

Untersuchungsgruppe:

- männliche und weibliche Personen, mindestens 18 Jahre alt
- binokularer Visus mit Korrektion zwischen 0,32 und 0,05 (0,5 logMAR und 1,3 logMAR)
- Einwilligungsfähigkeit der Person

Kontrollgruppe I:

- männliche und weibliche Personen, zwischen 18 und 45 Jahren
- binokularer Visus mit Korrektion größer 0,8 (0,1 logMAR)
- Einwilligungsfähigkeit der Person

Kontrollgruppe II:

- Männliche und weibliche Personen, mindestens 60 Jahre alt
- binokularer Visus mit Korrektion größer 0,5 (0,3 logMAR)
- Einwilligungsfähigkeit der Person

Ausschlusskriterien

Folgende Ausschlusskriterien wurden für alle Studiengruppen definiert:

- männliche und weibliche Personen unter 18 Jahre
- Personen, bei denen mit Refraktionsänderung ein Visus größer 0,32 (< 0,5 logMAR) erreicht werden kann (nur Untersuchungsgruppe)
- Probandin ist eine schwangere oder stillende Frau
- Die Probandin ist eine Frau im gebärfähigen Alter ohne regelmäßige und korrekte Anwendung einer Verhütungsmethode mit Fehlerquote < 1 % (z. B. sexuelle Abstinenz, östrogen- und gestagenhaltige Kontrazeptiva, Vasektomie des Lebenspartners, Intrauterinpessar (IUP) mit Hormonen)
- Gleichzeitige Teilnahme an einer klinischen Prüfung oder in einer anderen klinischen Prüfung innerhalb der letzten 4 Wochen
- Frühere Teilnahme an dieser klinischen Prüfung oder die Person ist selbst der Prüfer oder ein Mitglied des Personals, das an der klinischen Prüfung beteiligt ist
- Unfähigkeit, die schriftliche Probandeninformation sprachlich und/oder inhaltlich zu verstehen

Beschreibung der Untersuchungen und Methoden

Subjektive Refraktion

Die Refraktion erfolgte zunächst monokular mit Messbrille und Refraktionsglaskasten (Fa. OCULUS Optikgeräte GmbH, Wetzlar, Deutschland) an Landoltringen. Diese Untersuchung wurde nur für die Untersuchungsgruppe durchgeführt und diente dazu, den bestmöglichen Visus mit Korrektion zu ermitteln. Fiel der Visus durch die Refraktion auf einem Auge höher als 0,32 (< 0,5 logMAR) aus, führte dies zum Ausschluss von der Studie.

Betont sei hier, dass diese Messung lediglich zur Selektion der Testpersonen diente, damit keine Probanden in die Studie mit aufgenommen wurden, die aufgrund einer inadäquaten Korrektion einen Visus von 0,32 (< 0,5 logMAR) oder schlechter erreichten. Der für die Auswertung verwendete Visus wurde im Anschluss ermittelt.

Bestimmung von Visus und Kontrastempfindlichkeit

Der Visus und die Kontrastempfindlichkeit wurden mit dem computergestützten Freiburger Visual Acuity and Contrast Test (FrACT) erhoben [Bach 2007]. Die Präsentation des FrACT erfolgte über einen selbstkalibrierenden 24'' Monitor (Monitor EIZO CG247, Fa. EIZO Europe GmbH) mit den Maßen 325 mm x 518 mm und einer Bildschirmdiagonale von 610 mm. Das Verfahren entspricht der Norm für Sehschärfentests [DIN EN ISO 8596:2018] und kann auch bei Menschen mit schwerer Sehbehinderung (Visus ≤ 0,02 bzw. ≥ 1,7 logMAR) verlässlich eingesetzt werden [Lange. 2009].

Die Messung des Visus erfolgte bei einer Umfeldleuchtdichte von L = 80 cd/m². Die Kontrastschwelle wurde anhand von Landoltringen bei einem Visus von 0,02 bzw. 1,7 logMAR unter mesopischen Lichtbedingungen ermittelt. Dies entspricht einer Ortsfrequenz von 0,6 cpd. Die Umgebungsleuchtdichte des Versuchsaufbaus wurde auf L = 0,3 cd/m² eingestellt. Über Neutralfilterfolien der Firma Lee wurde die Umfeld-Leuchtdichte des Monitors auf L = 0,3 cd/m² reduziert.

Glare-Test

Zur Klassifizierung der Blendempfindlichkeit der Probanden wurde ein Glare-Test in Anlehnung an [Jungnickel 2015]. Für den Test wurde der Monitor um eine Blende, in die 8 radiär angeordneten LEDs eingearbeitet sind, ergänzt (Abbildung 8). Die Intensität der Leuchtdioden konnte über eine Steuereinheit reproduzierbar eingestellt werden. Für die Studie wurde die Blendung anhand des TI-Werts (Threshold Increment) nach Formel (8) und Formel (9) auf 20 % festgelegt, um der maximal zulässigen Blendung von Straßenbeleuchtung zu entsprechen.

Die Beleuchtungsstärke am Auge wurde für jede Testperson (altersabhängig) so dimensioniert, dass nach Formel (9) in Verbindung mit Formel (6) und Formel (7) eine Schwellenerhöhung von TI = 20 % zu erwarten ist (das entspricht etwa 0,1 log-Stufe Kontrasterhöhung). Liegt der damit gemessene Schwellenkontrast 0,2 log-Stufen höher als ohne Blendung, wird die Testperson der Gruppe „Blendempfindlich" zugeordnet. Das entspricht einer prozentualen Schwellenerhöhung (TI) von mehr als 58 %. Zur Prüfung der Änderung der Kontrastschwelle durch Blendung wurde ebenfalls der FrACT eingesetzt und auf dem Monitor dargeboten.

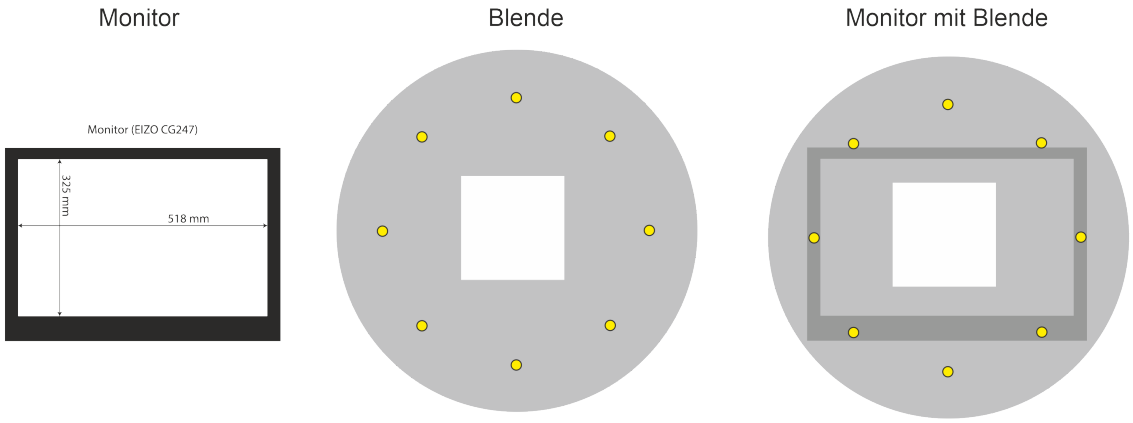


Abbildung 8: Glaretest nach [Jungnickel 2015] bestehend aus Monitor und Blende mit 8 radiär angeordneten LEDs.

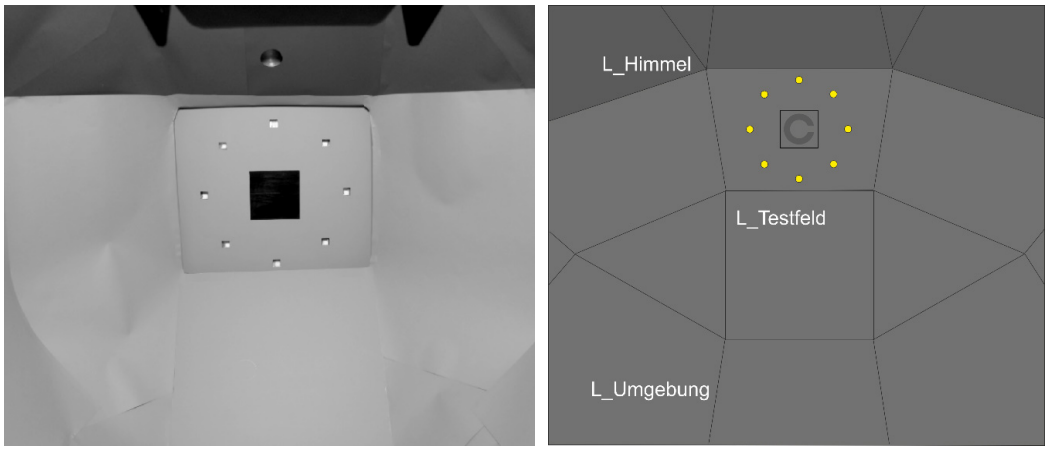


Abbildung 9: Blick auf den Ausschnitt eines Monitors zum Bestimmen der Kontrastschwelle. Um den Monitor herum sind 8 Blendquellen kreisförmig angeordnet. Links: der Monitor mit dem Testzeichen ist ausgeschaltet. Rechts: Skizze der Beobachtungsgeometrie: Die Leuchtdichte des Monitors beträgt 0,3 cd/m² und entspricht damit der der Umgebung.

Testszenario

Das Testszenario bestand aus mehreren Modulen und ist in Abbildung 10 als Ablaufdiagramm gezeigt.

Prüfung der Erkennbarkeit von Sehobjekten mit einem Kontrastwert K = 0,40 unter mesopischen Lichtbedingungen.

Eine Testtafel mit fünf Testobjekten (Streifen) unterschiedlicher Orientierung und einem konstanten Kontrastwert von K = 0,40 wird unter einer Testfeld-Leuchtdichten L = 0,1 cd/m² präsentiert. Es wird geprüft, ob der Proband mindestens 4 von 6 Sehobjekten korrekt erkennen kann.

Abhängigkeit der Identifizierung diskreter Kontraste von der Testfeld-Leuchtdichte unter mesopischen Lichtbedingungen.

Eine Testtafel mit fünf Testobjekten (Streifen) unterschiedlicher Orientierung und einem konstanten Kontrastwert von K = 0,40 wird unter einer Testfeld-Leuchtdichte L = 0,1 cd/m² präsentiert. Wird die Kontraststufe nicht erkannt, wird die Testfeld-Leuchtdichte in 0,15-log-Schritten (nach Tabelle 1) erhöht. Die Erhöhung erfolgt, bis die Orientierung von 4 von 6 präsentierten Streifen richtig erkannt werden. Danach wird die Testfeld-Leuchtdichte weiter erhöht, bis zur Identifizierung von 6 von 6 Sehzeichen. Anschließend wird derselbe Kontrast bei geringerer Streifenbreite (B = 1 cm) dargeboten und die erforderliche Testfeld-Leuchtdichte bis zum Erkennen

ermittelt. Nach einer kurzen Adaptationsphase auf ein geringeres Testfeld-Leuchtdichteniveau wird der Kontrast auf die nächstniedrigere Kontraststufe reduziert und die Messung wiederholt bis die Testfeld-Leuchtdichte für die Erkennung des Kontrastwertes von K = -0,10 ermittelt wurden.

Einfluss der Blendung auf die Erkennbarkeit von diskreten Kontrastwerten unter mesopischen Lichtbedingungen.

Die benötige Testfeld-Leuchtdichte für die Erkennung (4 von 6 und 6 von 6) der Kontrasttafel wird zusätzlich unter Blendung bei einem B = 2 cm breitem Streifen ermittelt. Begonnen wurden die Messungen jeweils aus einer dunklen Beleuchtungssituation nach 6 Minuten Dunkeladaptationszeit.

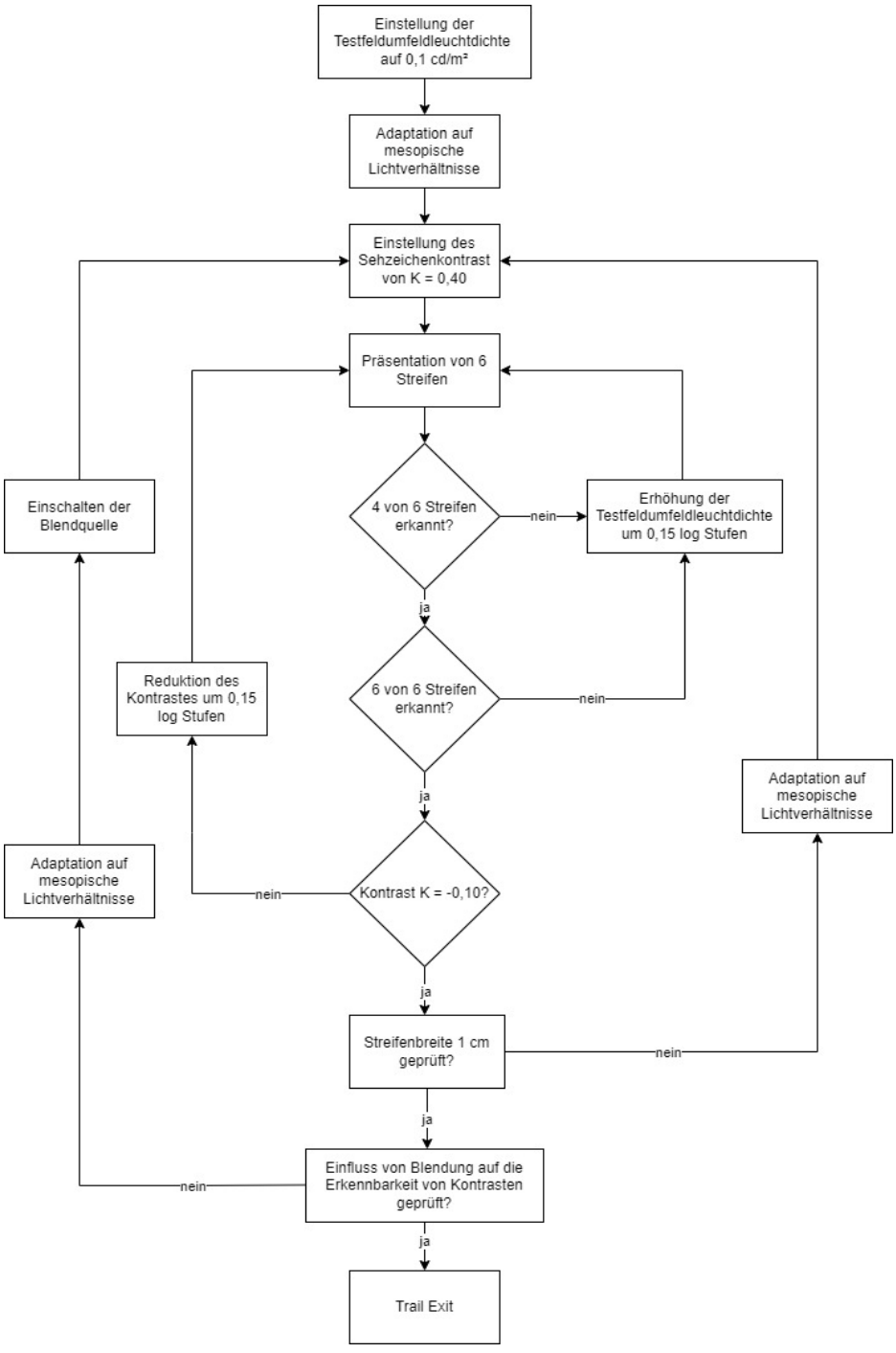


Abbildung 10: Schematischer Ablauf des Testszenarios

Studienablauf

Aufklärung und Einwilligung

Die Aufklärung jedes Probanden über Wesen, Bedeutung, Ziele, mögliche Risiken, erwartete Vorteile, Tragweite und anderweitige Aspekte der klinischen Prüfung erfolgte durch ein Gespräch zwischen Prüfarzt und Proband. Der Teilnehmer erhielt die schriftliche Probandeninformation. Probanden, die aufgrund ihrer Sehbehinderung einen Vergrößerungsbedarf zum Lesen und Schreiben von Texten und Ziffern aufwiesen, wurde ein optisches oder elektronisches Hilfsmittel zur Vergrößerung zur Verfügung gestellt. In Verbindung mit den Einschlusskriterien (Visus ≥ 0,05) wurde so sichergestellt, dass der Proband die Probandeninformation und Datenschutzerklärung eigenständig lesen konnte. Der Prüfarzt überzeugte sich davon, dass die Aufklärung vom Probanden verstanden wurde. Nach der Aufklärung erhielt jeder Proband ausreichend Zeit und Gelegenheit, offene Fragen zu klären und über seine Teilnahme zu entscheiden.

Jeder Proband unterzeichnete und datierte seine Einwilligung in die Teilnahme an der Studie eigenhändig schriftlich auf der Einwilligungserklärung. Die Einwilligung des Probanden musste sich ausdrücklich auch auf die Erhebung und Verarbeitung von personenbezogenen Daten beziehen. Deshalb wurden die Probanden explizit über Zweck und Umfang der Erhebung und die Verwendung dieser Daten, insbesondere von Gesundheitsdaten, informiert. Ein Exemplar der unterschriebenen Einwilligungserklärung (2. Original) wurde dem Probanden ausgehändigt, das andere verblieb im Prüfzentrum.

Der Proband konnte jederzeit und ohne Angabe von Gründen die Einwilligung zurückziehen und die Studie abbrechen, ohne dass daraus ein Nachteil entstand. Der Proband wurde in solchen Fällen gebeten, den Abbruchgrund zu nennen, jedoch darauf hingewiesen, dass er dies nicht tun muss. Der Zeitpunkt der Rücknahme der Einwilligung zur Studie war zu dokumentieren.

Beschreibung der ersten Visite für die Untersuchungsgruppe

Die Dauer der ersten Visite betrug 35 Minuten. Nach der Aufklärung und Einwilligung des Probanden erfolgte eine Refraktion beider Augen. Im Anschluss wurden Visus (logMAR) und Kontrastsehen (logCS) unter mesopischen Bedingungen bestimmt sowie eine weitere Untersuchung des Kontrastsehens unter Blendung durchgeführt. Die Messungen erfolgten jeweils binokular.

Beschreibung der zweiten Visite für die Untersuchungsgruppe

Im zweiten Visitationstermin erfolgte die Messungen an definierten Kontrasten (K = 0,40; 0,25; 0,16; 0,10 und -0,10) bei veränderbaren Testfeld-Leuchtdichten. Für diesen Termin war eine Dauer von 60 Minuten kalkuliert. Die Probanden schauten in die Einblickvorrichtung (Abbildung 5).

Beschreibung der Visite für die Kontrollgruppen

Für die Kontrollgruppen fand nur eine Visite von 60 Minuten statt. Die Inhalte der Visite waren mit Ausnahme der subjektiven Refraktion identisch mit denen der Untersuchungsgruppe. Für die Kontrollgruppen wurden weniger Veränderungen der Testfeld-Leuchtdichte als für die Untersuchungsgruppe erwartet, weshalb die Visiten auf eine reduziert wurden.

Statistische Auswertung

Für die statistische Auswertung wurde die Software IBM SPSS in der Version 21 verwendet. In Hinblick auf den zentralen Grenzwertsatz wurden für den Fall $n > 30$ parametrische Test verwendet. Für Auswertungen mit $11 < n < 31$ wurden zusätzlich Bootstrapping-Verfahren mit 10.000 Stichproben und „Bias corrected and accelerated"-Methode verwendet [Dwivedi 2017]. Ein Signifikanzniveau von 5 % wurde für alle Auswertungen definiert. Angegeben werden die Ergebnisse durch Mittelwerte, Standardabweichung und 95 %-Konfidenzintervall.

Der Vergleich der Untersuchungsgruppe mit Kontrollgruppe I und Kontrollgruppe II sowie der Subgruppen „Blendempfindlich“ und „Nicht blendempfindlich“ innerhalb der Untersuchungsgruppe erfolgte jeweils durch den t-Test für unverbundene Stichproben. Weitere Auswertungen innerhalb der Untersuchungsgruppe bezogen sich auf den Vergleich der Testfeld-Leuchtdichten bei unterschiedlicher Streifenbreite, unterschiedlicher Anzahl der erkannten Streifen sowie für Testsituationen ohne und mit Blendung für die geprüften Kontraststufen. Die statistische Prüfung erfolgte hier mittels t-Test für verbundene Stichproben.

Die Erhebung der Testfeld-Leuchtdichte erfolgte in logarithmischer Abstufung (0,15-log Stufen). Um die Werte vergleichbar und geeignet für die gewählten statistischen Methoden zu machen, wurden die Testfeld-Leuchtdichten nach Formel (4) logarithmiert. Für die graphische Darstellung der Daten wurden Mittelwerte und Grenzen des 95 %-Konfidenzintervalls zur besseren Verständlichkeit teilweise nach Formel (5) delogarithmiert.

Die Diagramme wurden mit Microsoft Excel erstellt. Die Ergebnisse der t-Teste beziehen sich auf die logarithmierte Testfeld-Leuchtdichte (log(cd/m^2)). Hierbei bezieht sich die mittlere Differenz auf die log-Stufen zwischen den Gruppen. So entspricht eine mittlere Differenz von bspw. 0,3 log(cd/m^2) einer Verdopplung der Testfeld-Leuchtdichte.

Weiterhin werden die Daten als relative kumulierte Häufigkeiten der erforderlichen Testfeld-Leuchtdichten für die jeweiligen Kontraststufen dargestellt, ab wann 4 von 6 bzw. 6 von 6 der Teststreifen erkannt wurden. Dadurch soll veranschaulicht werden, wieviel Prozent der Probanden den Kontrast für die geprüften Testfeld-Leuchtdichten erkannten.

Probandenkollektiv

Demographische Verteilung

Für die Studie konnten die geplanten 124 Probanden rekrutiert werden.

Die Untersuchungsgruppe umfasste 50 Probanden mit einem mittleren Alter von 54,1 Jahren. In dieser Gruppe finden sich insgesamt 32 verschiedene okuläre Diagnosen. Mit jeweils fünf Fällen sind die Diagnosen „Retinopathia pigmentosa“ und „primäres Weitwinkelglaukom“ am häufigsten vertreten, gefolgt von der Diagnose „Optikusatrophie“ mit vier Fällen und der „altersbedingten Makuladegeneration“ mit drei Fällen (Tabelle 34 im Anhang). Details zur Altersverteilung und den Refraktionen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Die Kontrollgruppen umfassten jeweils 37 Probanden, in der Kontrollgruppe I beträgt das mittlere Alter 29,9 Jahre und in Kontrollgruppe II 70,7 Jahr. Altersverteilung und Refraktionen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Sehschärfe und Kontrastsehen des Probandenkollektivs

Die Kontrollgruppe I erreichte die höchste Sehschärfe (-0,27 logMAR), gefolgt von Kontrollgruppe II (-0,07 logMAR). Im Vergleich dazu zeigten die Probanden der Untersuchungsgruppe eine um mehrere log-Stufen reduzierte Sehschärfe (0,71 logMAR). Details sind in Tabelle 2 angegeben.

Die Untersuchungsgruppe weist eine reduzierte mesopische Kontrastempfindlichkeit auf (0,60 logCS). Im Vergleich dazu erzielten die Kontrollgruppen I und II höhere Kontrastempfindlichkeiten bei einer Umfeldleuchtdichte von 0,3 cd/m^2 (1,54 logCS und 1,25 logCS).

Im Glare-Test fällt die Kontrastempfindlichkeit durch eine altersangepasste Blendung in allen drei Studiengruppen ab (Abbildung 11).

Statistisch unterscheiden sich Untersuchungsgruppe und Kontrollgruppe I in Sehschärfe (0,98 ± 0,04 logMAR [95% CI; 0,91 zu 1,05; $p < 0,001$]), mesopischer Kontrastempfindlichkeit (-0,94 ± 0,07 logCS [95% CI; -1,07 zu -0,80; $p < 0,001$]) und Kontrastempfindlichkeit unter Blendung (-0,93 ± 0,06 logCS [95% CI; -1,06 zu -0,81; $p < 0,001$]) signifikant voneinander.

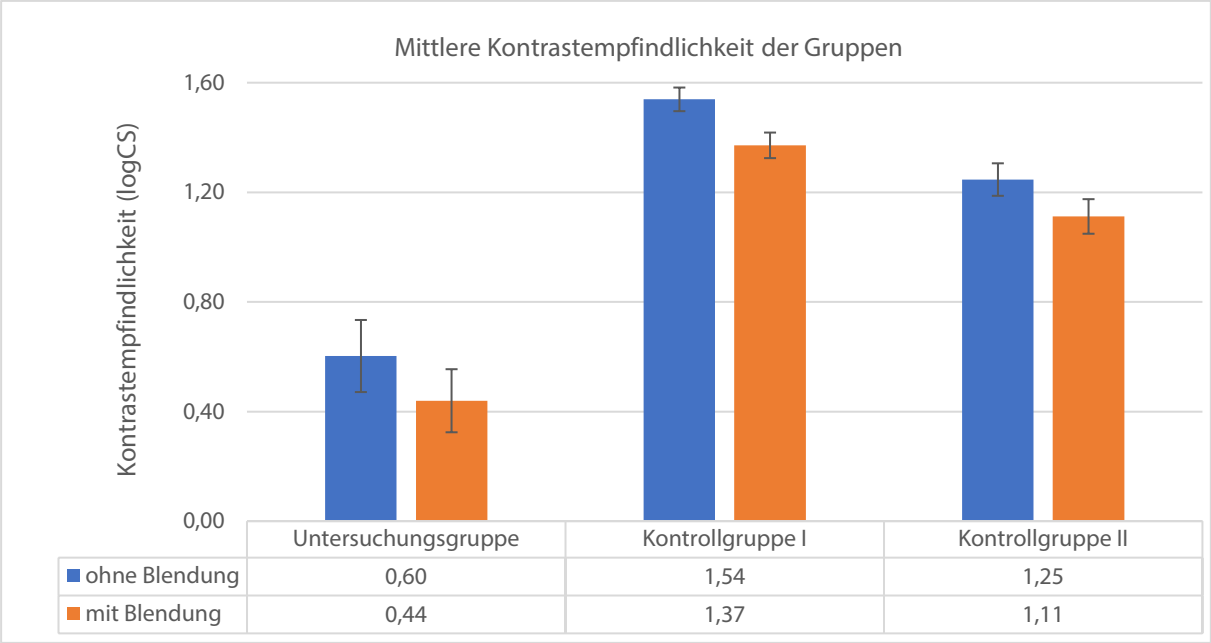
Ebenso zeigen sich zwischen Untersuchungsgruppe und Kontrollgruppe II statistisch signifikante Unterschiede in den drei Messwerten (0,78 ± 0,04 logMAR [95% CI; 0,69 zu 0,87; p < 0,001]; -0,77 ± 0,07 logCS [95% CI; -0,77 zu -0,50; p < 0,001] und -0,67 ± 0,07 logCS [95% CI; 0,80 zu 0,54; p < 0,001]).

Tabelle 2: Demographische Daten der Testpersonen

	Untersuchungs-gruppe	Kontrollgruppe I	Kontrollgruppe II
Anzahl (m/w)	50 (22/28)	37 (13/24)	37 (19/18)
Alter in Jahren MW ± SD Range	 54,1 ± 10,9 25 bis 70	 29,9 ± 6,3 18 bis 44	 70,7 ± 6,2 61 bis 83
Kontrastempfindlichkeit logCS Range MW ± SD	 0,00 bis 1,56 0,60 ± 0,46	 1,22 bis 1,71 1,54 ± 0,13	 0,70 bis 1,65 1,25 ± 0,18
Kontrastempfindlichkeit logCS mit Blendung Range MW ± SD	 0,00 bis 1,42 0,44 ± 0,41	 1,04 bis 1,61 1,37 ± 0,14	 0,70 bis 1,55 1,11 ± 0, 19
Sehschärfe V Range in logMAR MW ± SD in logMAR Range in 1/'	 0,50 bis 1,30 0,71 ± 0,25 0,32 bis 0,05	 -0,30 bis -0,12 -0,27 ± 0,05 2,00 bis 1,32	 -0,30 bis 0,29 -0,07 ± 0,15 2,00 bis 0,51
Refraktion rechts Sphäre in dpt Range	 -16,50 bis +7,25	 -8,25 bis +3,25	 -7,25 bis +4,00
Refraktion rechts Zylinder in dpt Range	 0,00 bis -3,50	 0,00 bis -3,50	 0,00 bis -2,00
Refraktion links Sphäre in dpt Range	 -12,00 bis +7,25	 -9,00 bis +3,00	 -6,25 bis +4,25
Refraktion links Zylinder in dpt Range	 0,00 bis -3,00	 0,00 bis -2,75	 0,00 bis -2,75

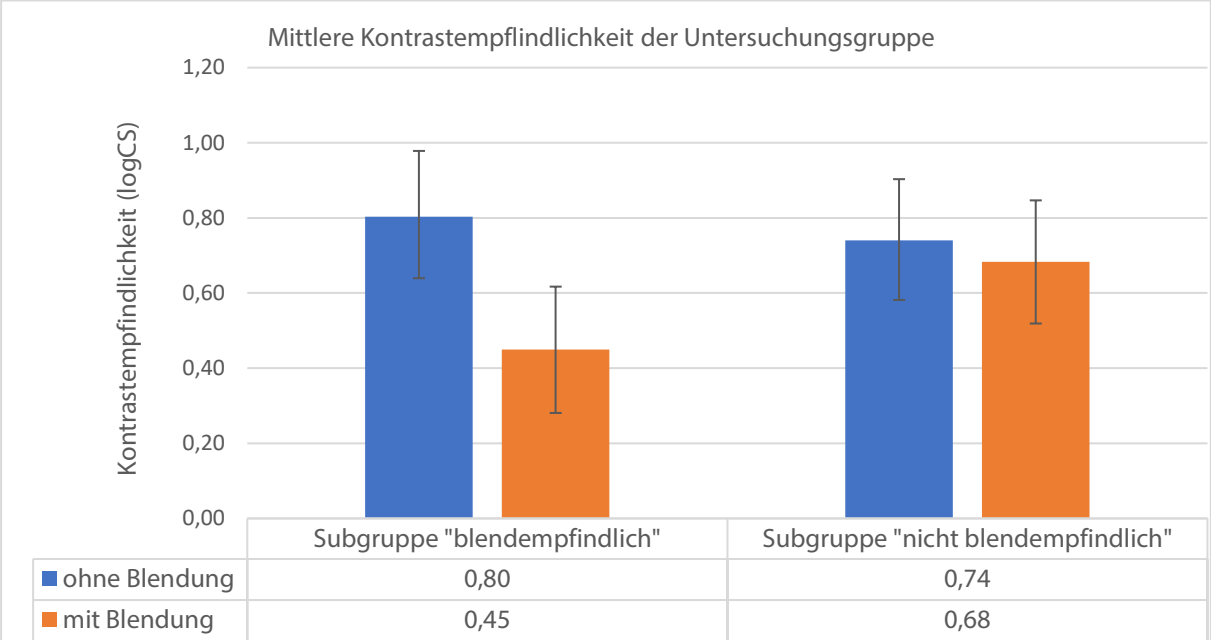
Zur Untersuchung, inwieweit Blendempfindlichkeit die benötigte Testfeld-Leuchtdichte zum Erkennen von Kontrasten beeinflusst, wurde die Untersuchungsgruppe in Subgruppen unterteilt. Die Unterteilung erfolgte anhand der im Glare-Test ermittelten Kontrastempfindlichkeit. Die Blendung sollte einen Schwellenanstieg um 20 % bewirken, demnach um ca. 0,1 logCS höher ausfallen, als ohne Blendung. Die Probanden wurden als „Blendempfindlich" eingestuft, wenn der Anstieg 0,2 logCS oder mehr betrug. Die anderen Probanden wurden der Subgruppe „Nicht blendempfindlich" zugeteilt. Entfallen sind Probanden, bei denen bereits im FrACT eine Kontrastempfindlichkeit von 0,0 logCS ermittelt wurde. Hier konnte durch die Blendung die Kontrastempfindlichkeit nicht weiter gesenkt werden.

Es wurden 20 Probanden der Subgruppe „Blendempfindlich" und 19 Probanden der Subgruppe „Nicht blendempfindlich" zugeteilt. Die Kontrastempfindlichkeit ohne Blendung unterscheidet sich nur geringfügig zu Gunsten der Subgruppe „Blendempfindlich" (-0,06 ± 0,12 logCS [95% CI; -0,29 zu 0,16; p = 0,610]). Unter Blendung kommt es wie beabsichtigt zu einem Unterschied von 0,23 ± 0,11 logCS [95% CI; 0,01 zu 0,45; p = 0,050] (Abbildung 12).



	Untersuchungsgruppe	Kontrollgruppe I	Kontrollgruppe II
ohne Blendung	0,60	1,54	1,25
mit Blendung	0,44	1,37	1,11

Abbildung 11: Mittlere Kontrastempfindlichkeit der Studiengruppen jeweils ohne und mit Blendung. (Mittelwert und 95%-Konfidenzintervalle)



	Subgruppe "blendempfindlich"	Subgruppe "nicht blendempfindlich"
ohne Blendung	0,80	0,74
mit Blendung	0,45	0,68

Abbildung 12: Mittlere Kontrastempfindlichkeit der Subgruppen jeweils ohne und mit Blendung. (Mittelwert und 95%-Konfidenzintervalle)

Ergebnisse

Erforderliche Testfeld-Leuchtdichte zum Erkennen der dargebotenen Kontraste

Die augengesunden, jungen Probanden konnten alle dargebotenen Kontrasttafeln ohne und mit Blendung bei einer Testfeld-Leuchtdichte von 0,1 cd/m² erkennen (Abbildung 13 bis Abbildung 17)

In der Kontrollgruppe II der augengesunden, älteren Probanden wurden von K = 0,40 bis K = 0,10 die Streifen bei 0,1 cd/m² richtig benannt (Abbildung 13). Bei K = -0,10 war für 1 cm Streifenbreite eine Erhöhung auf

0,18 cd/m² erforderlich (Abbildung 66 im Anhang), um 6 von 6 Testzeichen zu erkennen. Unter Blendung war für die niedrigen Kontraststufen (K = 0,10 und K = -0,10) eine Erhöhung auf 0,5 cd/m² notwendig, damit alle Probanden die Orientierung bei 6 von 6 Streifen angeben konnten (Abbildung 67 im Anhang).

Die Gruppe der sehbehinderten Probanden benötigte generell eine höhere Testfeld-Leuchtdichte zum Erkennen der Kontraste im Vergleich zu den beiden Kontrollgruppen. Des Weiteren führte eine Erhöhung der Testfeld-Leuchtdichte auf den Testtafeln zu einer Erkennbarkeit der dargebotenen Kontraststufen K < 0,40. Der aktuell in der [DIN 32975:2009] geforderte Mindestkontrast von K = 0,40 konnte bei einer Testfeld-Leuchtdichte von 8 cd/m² von allen sehbehinderten Probanden bei einer Streifenbreite von B = 2 cm mit 4 von 6 und 6 von 6 Angaben richtig benannt werden (Abbildung 13 links). Bei geringeren Kontrasten und kleineren Streifenbreiten war es nicht möglich, dass alle sehbehinderten Probanden auch bei maximal einstellbarer Testfeld-Leuchtdichte (22,3 cd/m²) ausreichend viele Streifenorientierungen richtig angaben (Abbildung 13 rechts).

Für die Aufgabe 6 von 6, Streifenorientierungen richtig zu benennen, war eine höhere Testfeld-Leuchtdichte bei der sehbehinderten Gruppe erforderlich, als für 4 von 6 richtige Angaben (Abbildung 14). Ebenso war eine höhere Testfeld-Leuchtdichte für B = 1 cm Streifenbreite erforderlich, damit prozentual mehr sehbehinderte Probanden ausreichend viele Orientierungen richtig benannten, als bei den 2 cm breiten Streifen mit gleichem Kontrast (Abbildung 15). Der Negativkontrast (K = -0,10) benötigte zum Erkennen eine höhere Testfeld-Leuchtdichte als der Positivkontrast (K = 0,10) in der Untersuchungsgruppe (Abbildung 16). Unter Blendung erkannten weniger Probanden in der Untersuchungsgruppe die dargebotenen Kontraststufen. Der Kontrast K = 0,40 konnte maximal von 90 % der Testpersonen benannt werden (Abbildung 17). Bis zur letzten Testtafel (K = -0,10 mit Blendung und einer Erkennung von 6 von 6) fiel der Anteil auf 74 % ab.

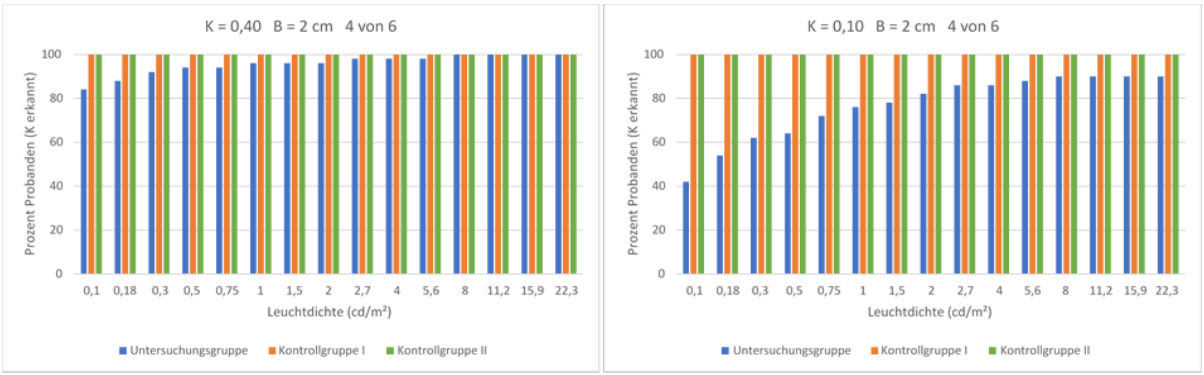


Abbildung 13: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für K = 0,40 bei B = 2 cm Streifenbreite mit 4 von 6 Orientierungen erkannt (links). Darstellung für K = 0,10 bei B = 2 cm mit 4 von 6 Orientierungen erkannt (rechts).

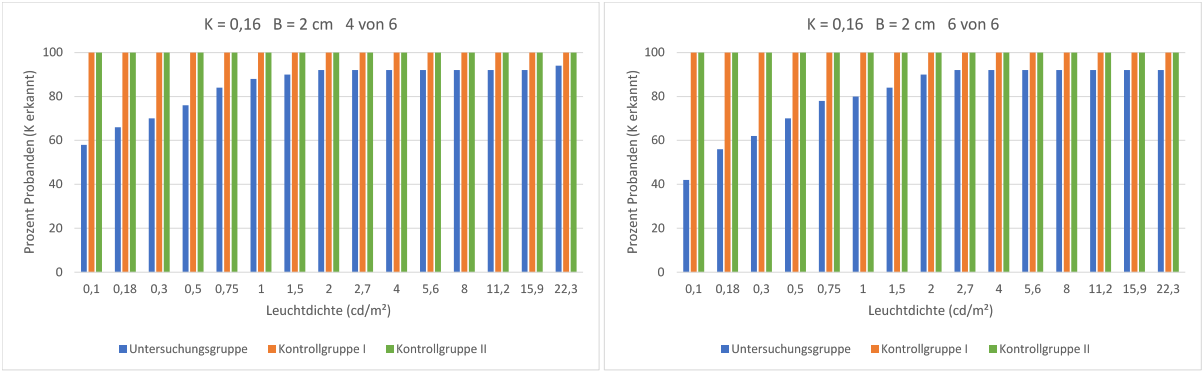


Abbildung 14: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für K = 0,16 bei B = 2 cm Streifenbreite mit 4 von 6 Orientierungen erkannt (links). Darstellung für K = 0,16 bei B = 2 cm mit 6 von 6 Orientierungen erkannt (rechts).

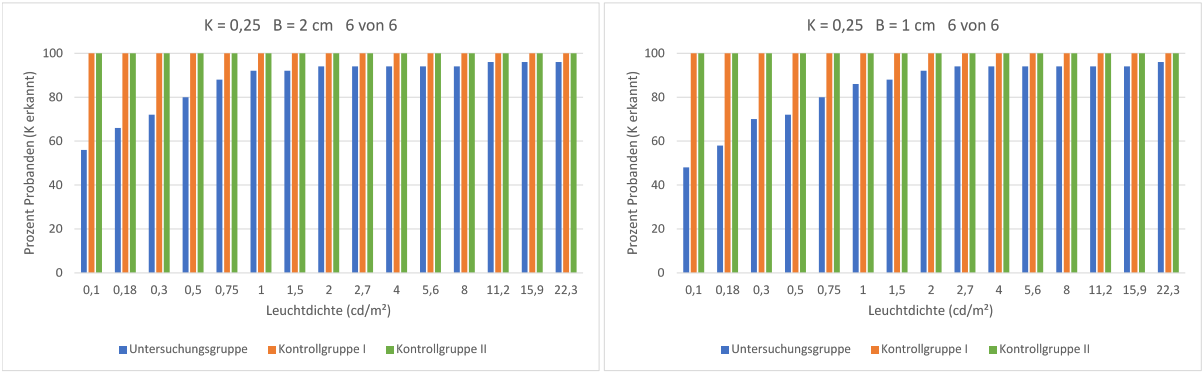


Abbildung 15: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für K = 0,25 bei B = 2 cm Streifenbreite mit 6 von 6 Orientierungen erkannt (links). Darstellung für K = 0,25 bei B = 1 cm mit 6 von 6 Orientierungen erkannt (rechts).

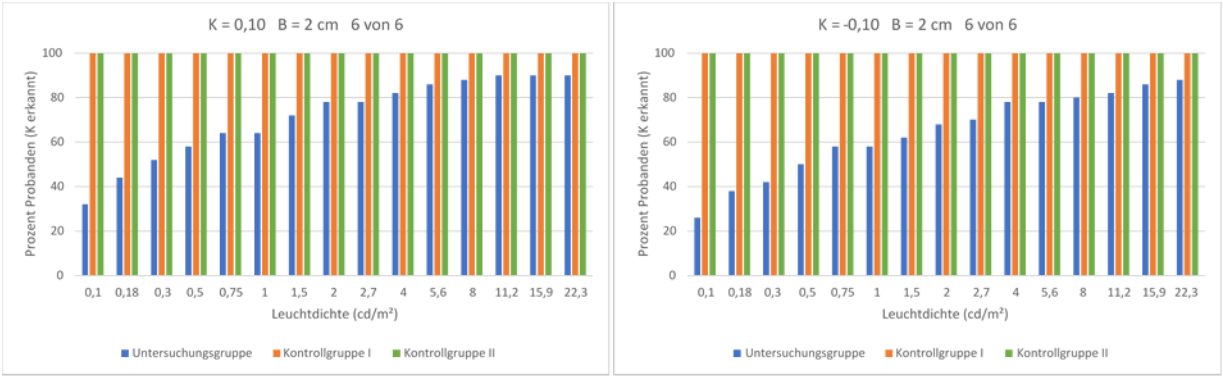


Abbildung 16: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für K = 0,10 bei B = 2 cm Streifenbreite mit 6 von 6 Orientierungen erkannt (links). Darstellung für K = -0,10 bei B = 2 cm mit 6 von 6 Orientierungen erkannt (rechts).

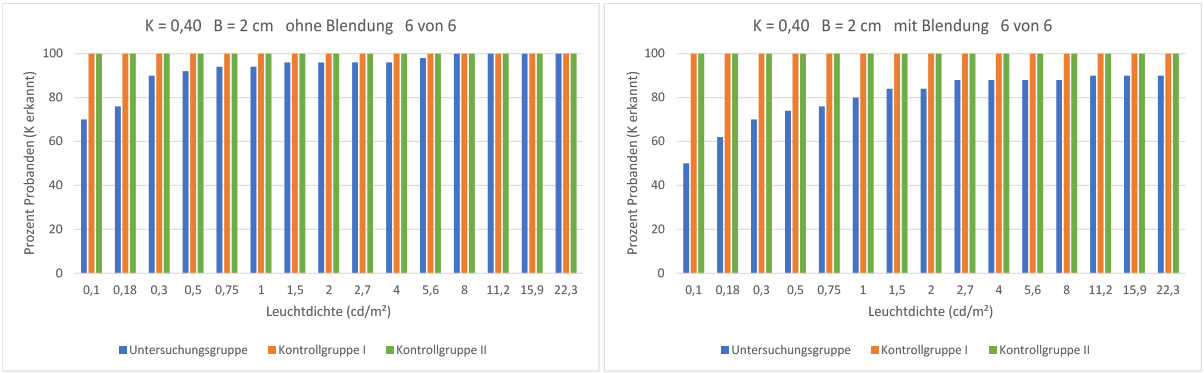


Abbildung 17: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für K = 0,40 bei B = 2 cm Streifenbreite mit 6 von 6 Orientierungen erkannt (links). Darstellung für K = 0,40 mit Blendung mit 6 von 6 Orientierungen erkannt (rechts).

Bei einer Streifenbreite von B = 2 cm konnten bei K = 0,25 maximal 98 % der sehbehinderten Gruppe 4 von 6 Orientierungen angeben. Bei K = 0,16 waren es 94 %, bei K = 0,10 90 % und bei K = -0,10 88 % der sehbehinderten Testpersonen. Bei einer Streifenbreite B = 1 cm und der 6 von 6 Anforderung fiel die Anzahl bis K = -0,10 auf 78 % ab.

Absolut konnten 37 der 50 sehbehinderten Probanden bis zur letzten Messung von einer Erhöhung der Testfeld-Leuchtdichte profitieren. Bei 13 Probanden führte im Verlauf der Messung eine Erhöhung der Testfeld-Leuchtdichte jedoch nicht zu einer Steigerung der Erkennbarkeit der dargebotenen Kontraste von K < 0,40.

Die Häufigkeitsverteilungen zu allen Versuchsbedingungen sind im Anhang (Abbildung 65 bis Abbildung 67) zu finden.

Vergleich der Untersuchungsgruppe mit den Kontrollgruppen

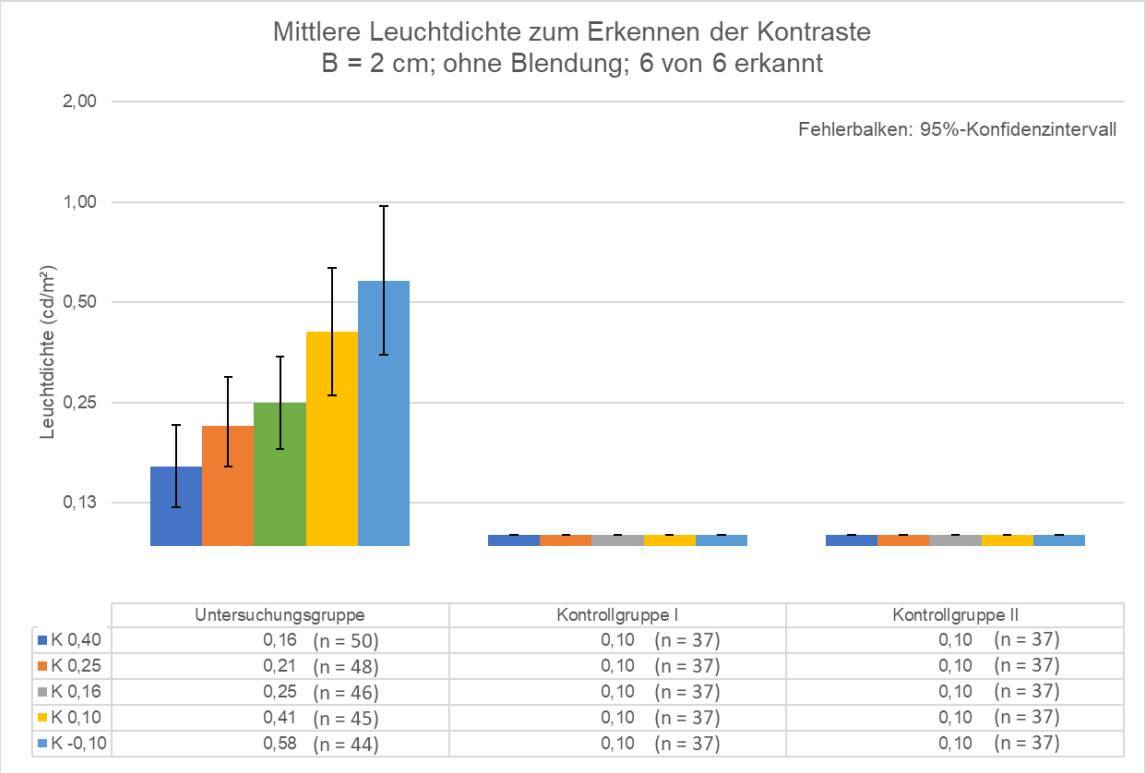
Die sehbehinderten Probanden benötigten für jede dargebotene Kontraststufe, Streifenbreite und Anzahl der erkannten Orientierungen eine höhere mittlere Leuchtdichte als die Kontrollgruppen (Abbildung 18; Abbildung 19; sowie Abbildung 68 bis Abbildung 71 im Anhang). Zu beachten ist, dass im Mittelwert der Leuchtdichten die Werte derjenigen Probanden der Untersuchungsgruppe nicht enthalten sind, die den Kontrast auch bei der höchsten Leuchtdichte nicht erkennen konnten. Das sind in der Untersuchungsgruppe bis zu 13 der 50 Testpersonen. In den Diagrammen ist die Anzahl der eingeschlossenen Testpersonen n jeweils angegeben. Insofern sind die Angaben, die sich im Folgenden auf Mittelwerte und Mittelwertdifferenzen beziehen nur für Personen gültig, die im untersuchten Bereich der Leuchtdichten bis zu 22,3 cd/m^2 ein ausreichendes Kontrastsehen hatten.

Bei einem Kontrast von K = 0,40 mit B = 2 cm Streifenbreite liegt zwischen der Untersuchungsgruppe und der Kontrollgruppe I eine signifikante mittlere Differenz der log-Leuchtdichte von -0,13 ± 0,05 log(cd/m^2) (95% CI; -0,24 zu -0,02; p = 0,018) zum Erkennen der Kontraststufe vor. Mit abnehmendem Kontrast steigt die mittlere Differenz an bis auf -0,87 ± 0,12 log(cd/m^2) (95% CI; -1,11 zu -0,63; p < 0,001) für einen Kontrast von -0,10 bei B = 1 cm Streifenbreite mit 6 von 6 richtig erkannten Orientierungen. Bis auf den Kontrast -0,10 bei B = 1 cm Streifenbreite mit 6 von 6 richtig erkannten Orientierungen sind die mittleren Differenzen zwischen Untersuchungsgruppe und Kontrollgruppe I identisch zu denen zwischen Untersuchungsgruppe und Kontrollgruppe II. Bei dem genannten Kontrast liegt ein signifikanter Unterschied von -0,86 ± 0,12 log(cd/m^2) (95% CI; -1,11 zu -0,62; p < 0,001) vor.

Unter Blendung benötigte die Untersuchungsgruppe eine signifikant höhere Testfeld-Leuchtdichte als die Kontrollgruppe I und Kontrollgruppe II (Abbildung 19). Bei dem aktuellen normativen Mindestkontrast liegt die mittlere Differenz bei -0,26 ± 0,07 log(cd/m^2) (95% CI; -0,40 zu -0,13; p < 0,001) zum Erkennen von 4 von 6 Darbietungen. Die größte signifikante Differenz liegt zwischen der Untersuchungsgruppe und Kontrollgruppe I (-0,91 ± 0,12 log(cd/m^2) [95% CI; -1,14 zu -0,68; p < 0,001]).

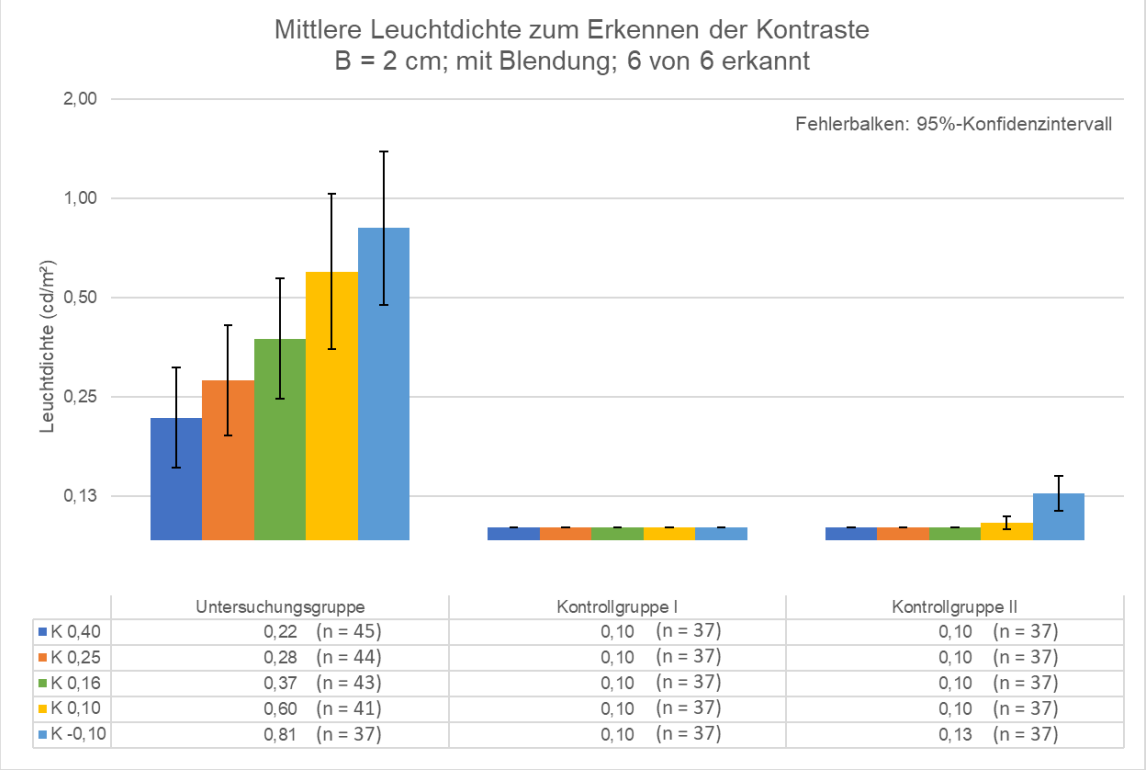
Die Kontrollgruppen I und II zeigten Unterschiede bei einem K = -0,10 mit einer Streifenbreite von B = 1 cm für 6 von 6 richtigen Angaben sowie unter Blendung bei K = 0,10 und K = -0,10 (Tabelle 3). Bei Letzterem zeigte sich zum Erkennen von 6 von 6 Orientierungen ein signifikanter Unterschied (0,10 ± 0,03 log(cd/m^2) [95% CI; 0,05 zu 0,16; p < 0,001]).

Alle Daten finden sich im Anhang in Tabelle 39 bis Tabelle 52.



	Untersuchungsgruppe	Kontrollgruppe I	Kontrollgruppe II
K 0,40	0,16 (n = 50)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,25	0,21 (n = 48)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,16	0,25 (n = 46)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,10	0,41 (n = 45)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K -0,10	0,58 (n = 44)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)

Abbildung 18: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste bei einer Streifenbreite von 2 cm mit 6 von 6 richtigen Orientierungsangaben. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch. (weitere Darstellungen im Anhang ab Abbildung 68)



	Untersuchungsgruppe	Kontrollgruppe I	Kontrollgruppe II
K 0,40	0,22 (n = 45)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,25	0,28 (n = 44)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,16	0,37 (n = 43)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,10	0,60 (n = 41)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K -0,10	0,81 (n = 37)	0,10 (n = 37)	0,13 (n = 37)

Abbildung 19: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste mit Blendung mit 6 von 6 richtigen Orientierungsangaben. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch. (weitere Darstellungen im Anhang ab Abbildung 68)

Tabelle 3: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen Kontrollgruppe I und Kontrollgruppe II. Nur bei den 4 aufgeführten Untersuchungsbedingungen gibt es einen Unterschied zwischen den Gruppen. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet.

Kontrast	Streifenbreite	Blendung	Erkennung	Kontrollgruppe I vs. Kontrollgruppe II Mittlere Differenz logL in log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p)
-0,10	1 cm	ohne	6 von 6	0,01 ± 0,01 (-0,01 zu 0,02; p = 0,324)
-0,10	2 cm	mit	4 von 6	0,01 ± 0,02 (-0,01 zu 0,04; p = 0,324)
0,10	2 cm	mit	6 von 6	0,01 ± 0,01 (-0,01 zu 0,03; p = 0,160)
-0,10	2 cm	mit	6 von 6	0,10 ± 0,03 (0,05 zu 0,16; p < 0,001*)

Auswertung innerhalb der Untersuchungsgruppe

Es ist anzumerken, dass im Verlauf der Messungen in der Untersuchungsgruppe Probanden auch bei maximal einstellbarer Testfeld-Leuchtdichte Kontraststufen nicht erkannt haben und sich damit für die Statistik der Stichprobenumfang von 50 bis auf 37 reduziert. Für die folgenden Auswertungen wird jeweils der Stichprobenumfang in den Tabellen angegeben. Auch hier sind die Ausgaben, die sich im Folgenden auf Mittelwerte und Mittelwertdifferenzen beziehen nur für Personen gültig, die im untersuchten Bereich der Leuchtdichten bis zu 22,3 cd/m² ein ausreichendes Kontrastsehen hatten.

Vergleich der Kontraststufen

Für aufeinander folgende Kontraststufen wurde jeweils eine höhere Testfeld-Leuchtdichte zum Erkennen benötigt. Die Differenz der Testfeld-Leuchtdichte zur vorhergehenden Kontraststufe stieg mit abnehmendem Kontrast an. So wurde die Testfeld-Leuchtdichte von K = 0,40 auf K = 0,25 im Mittel um 0,09 ± 0,18 log(cd/m²) (95% CI; 0,04 zu 0,15; p = 0,004) und von K = 0,16 auf K = 0,10 um 0,19 ± 0,23 log(cd/m²) (95% CI; 0,13 zu 0,26; p < 0,001) um 4 von 6 Orientierungen bei 2 cm Streifenbreite zur Erkennung erhöht. Die Mittwertunterschiede bei den weiteren Kontraststufen sind stets signifikant (Tabelle 46 im Anhang).

Vergleich der Anzahl erkannter Streifen je Kontraststufe

Zum Erkennen von 6 von 6 Streifenorientierungen wurde eine höhere Testfeld-Leuchtdichte benötigt als zum Erkennen von 4 von 6 Orientierungen. Für den derzeitigen Mindestkontrast K = 0,40 liegt die mittlere Differenz für eine 2 cm Streifenbreite bei -0,08 ± 0,15 log(cd/m²) (95% CI; -0,12 zu -0,04; p < 0,001). Die Mittwertunterschiede steigen mit abnehmendem Kontrast an und sind stets signifikant. Für einen 1 cm breiten Streifen sowie unter Blendung ergeben sich für alle Kontraststufen ebenfalls signifikante Unterschiede (Tabelle 47 im Anhang).

Vergleich der Streifenbreite 2 cm mit 1 cm

Die mittlere erforderliche Testfeld-Leuchtdichte zum Erkennen der Orientierung eines 2 cm und 1 cm breiten Streifens unterscheidet sich bei jeder Kontraststufe signifikant voneinander. Ebenso unterscheidet sich die Testfeld-Leuchtdichte zwischen den Streifenbreiten, wenn 6 von 6 Orientierungen benannt werden sollten. Mit abnehmendem Kontrast steigt die mittlere Differenz der Testfeld-Leuchtdichten zwischen einer Streifenbreite von 2 cm und 1 cm. Für einen 1 cm breiten Streifen wird eine höhere Testfeld-Leuchtdichte benötigt (Tabelle 48 im Anhang).

Vergleich der Kontraststufen ohne und mit Blendung

Unter Blendung war jeweils eine höhere Testfeld-Leuchtdichte zum Erkennen der Streifenorientierungen der Kontraststufe erforderlich als ohne Blendung. Die mittleren Differenzen sind für jeden Kontrast statistisch signifikant (Tabelle 49 im Anhang)

Vergleich Positiv- und Negativkontrast

Der Negativkontrast K = -0,10 benötigte zum Erkennen eine signifikant höhere Testfeld-Leuchtdichte als der Positivkontrast K = 0,10. Gleiches gilt für die Kontraste unter Blendung (Tabelle 4).

Tabelle 4: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen Positiv- und Negativkontrast in der Untersuchungsgruppe. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet.

Kontrast	Streifen-breite	Blendung	Erkennung	Mittlere Differenz logL in log(cd/m^2) MW ± SD (95% CI; p); n
0,10 vs -0,10	2 cm	ohne	4 von 6	0,16 ± 0,21 (0,10 zu 0,23; p < 0,001*); 44
0,10 vs -0,10	2 cm	ohne	6 von 6	0,18 ± 0,22 (0,12 zu 0,25; p < 0,001*); 44
0,10 vs -0,10	1 cm	ohne	4 von 6	0,23 ± 0,28 (0,14 zu 0,32; p < 0,001*); 43
0,10 vs -0,10	1 cm	ohne	6 von 6	0,27 ± 0,29 (0,18 zu 0,36; p < 0,001*); 39
0,10 vs -0,10	2 cm	mit	4 von 6	0,23 ± 0,26 (0,14 zu 0,31; p < 0,001*); 39
0,10 vs -0,10	2 cm	mit	6 von 6	0,26 ± 0,24 (0,18 zu 0,34; p < 0,001*); 37

Auswirkung der Blendempfindlichkeit

Zur Untersuchung, inwieweit Blendempfindlichkeit die benötigte Testfeld-Leuchtdichte zum Erkennen von Kontrasten beeinflusst, wurde die Untersuchungsgruppe in Subgruppen unterteilt. In den Messungen der Kontraststufen benötigte die nicht blendempfindliche Gruppe eine höhere Testfeld-Leuchtdichte als die blendempfindlichen Probanden, um die jeweilige Kontraststufe zu erkennen. Umgekehrt zeigten blendempfindliche Probanden einen höheren Lichtbedarf unter Blendung, um die dargebotenen Kontraste zu erkennen (Abbildung 20).

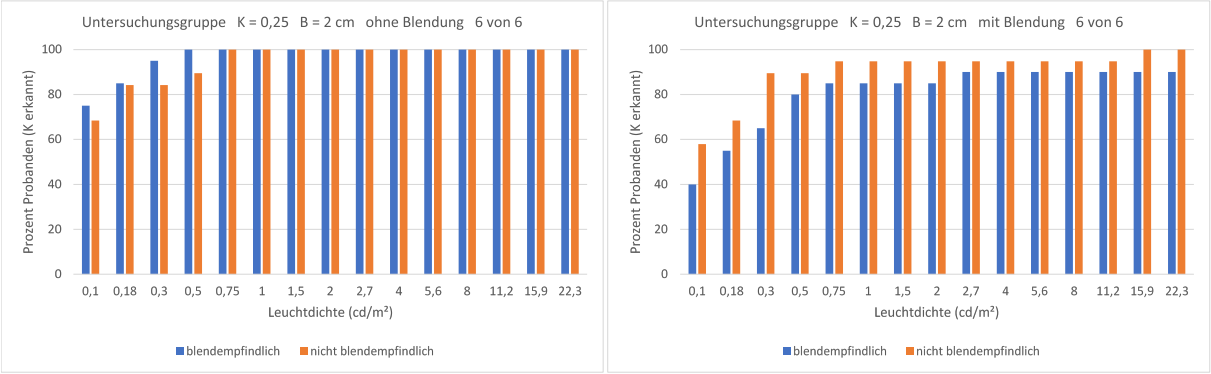


Abbildung 20: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden in der Untersuchungsgruppe, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für K = 0,25 bei B = 2 cm und einer Erkennung 6 von 6 ohne Blendung (links) und mit Blendung (rechts) für die beiden Subgruppen.

Ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Subgruppen für die erforderliche Testfeld-Leuchtdichte zum Erkennen der dargebotenen Kontraste konnte sowohl ohne als auch mit Blendung nicht nachgewiesen werden (Tabelle 5). Anzumerken ist, dass nicht alle Probanden alle Kontraststufen bei der maximal einstellbaren Testfeld-Leuchtdichte erkennen konnten. Mit abnehmendem Kontrast nimmt auch der Stichprobenumfang ab.

Es zeigte sich dennoch ein Unterschied innerhalb der Gruppen für die benötigte Testfeld-Leuchtdichte bei den Kontraststufen ohne und mit Blendung (Tabelle 6 und Tabelle 7). So benötigten blendempfindliche Probanden bereits ab K = 0,25 eine signifikant höhere Testfeld-Leuchtdichte unter Blendung, wohingegen die mittlere Differenz in der Subgruppe „Nicht blendempfindlich“ erst bei K = -0,10 statistisch signifikant ist. Betragsmäßig liegen mehr log-Stufen zwischen den Testfeld-Leuchtdichten ohne und mit Blendung in der Gruppe „Blendempfindlich“ als in der Gruppe „Nicht blendempfindlich“.

Tabelle 5: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Subgruppen für die dargebotenen Kontraststufen mit Blendung mit 6 von 6 erkannten Streifenorientierungen.

Kontrast	Streifen-breite	Blendung	Erkennung	„Nicht blendempfindlich“ vs. „Blendempfindlich“ Mittlere Differenz lpgL in log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p)
0,40	2 cm	mit	6 von 6	0,08 ± 0,11 (-0,18 zu 0,30; p = 0,535)
0,25	2 cm	mit	6 von 6	0,05 ± 0,16 (-0,31 zu 0,36; p = 0,756)
0,16	2 cm	mit	6 von 6	0,07 ± 0,14 (-0,21 zu 0,36; p = 0,625)
0,10	2 cm	mit	6 von 6	0,14 ± 0,21 (-0,26 zu 0,57; p = 0,475)
-0,10	2 cm	mit	6 von 6	0,24 ± 0,22 (-0,20 zu 0,69; p = 0,283)

Tabelle 6: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Kontraststufen ohne und mit Blendung mit 4 von 6 erkannten Streifenorientierungen für die Subgruppe „Blendempfindlich“. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet.

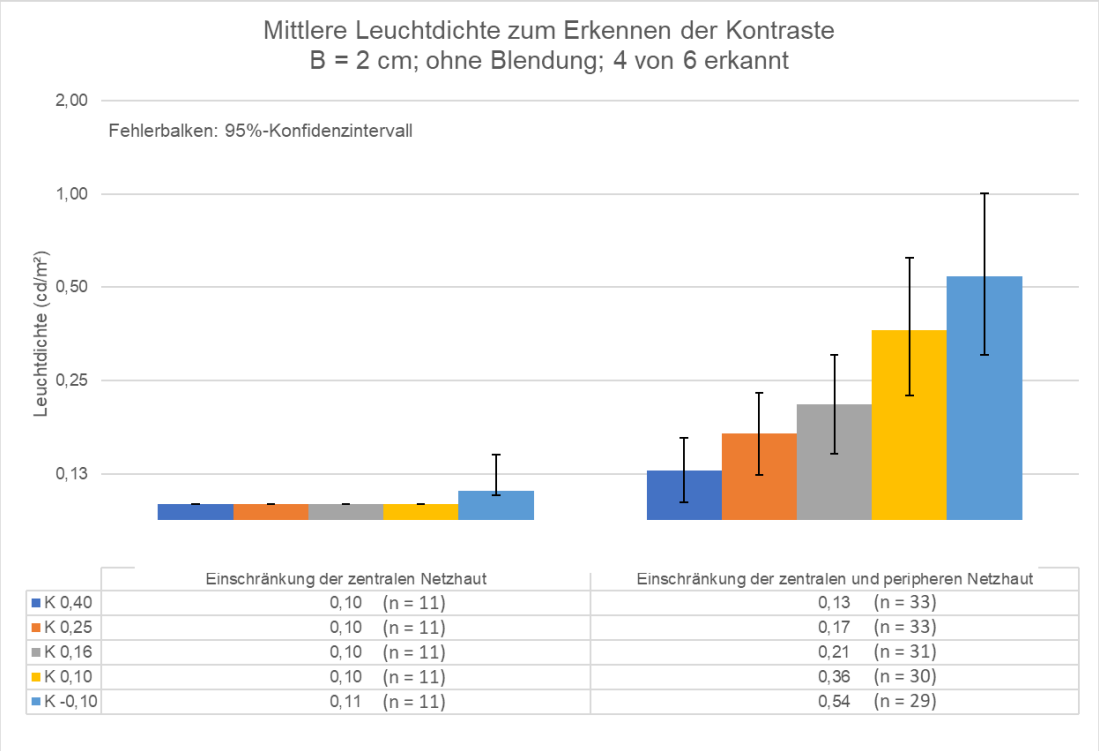
Kontrast	Streifen-breite	Blendung	Erkennung	Gruppe „Blendempfindlich“ Mittlere Differenz logL in log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p); n
0,40	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,14 ± 0,29 (-0,31 zu -0,02; p = 0,111); 18
0,25	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,18 ± 0,27 (-0,34 zu -0,06; p = 0,046*); 18
0,16	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,22 ± 0,28 (-0,33 zu -0,11; p = 0,008*); 18
0,10	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,22 ± 0,25 (-0,32 zu -0,13; p = 0,008*); 17
-0,10	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,32 ± 0,39 (-0,46 zu -0,18; p < 0,001*); 17

Tabelle 7: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Kontraststufen ohne und mit Blendung mit 4 von 6 erkannten Streifenorientierungen für die Subgruppe „Nicht blendempfindlich“. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet.

Kontrast	Streifen-breite	Blendung	Erkennung	Gruppe „Nicht blendempfindlich“ mittlere Differenz logL in log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p); n
0,40	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,09 ± 0,25 (-0,20 zu -0,02; p = 0,116); 19
0,25	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	0,11 ± 0,32 (-0,27 zu 0,00; p = 0,148); 19
0,16	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,09 ± 0,17 (-0,19 zu -0,02; p = 0,068); 18
0,10	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,11 ± 0,22 (-0,21 zu -0,03; p = 0,065); 18
-0,10	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,18 ± 0,20 (-0,25 zu -0,11; p = 0,003*); 18

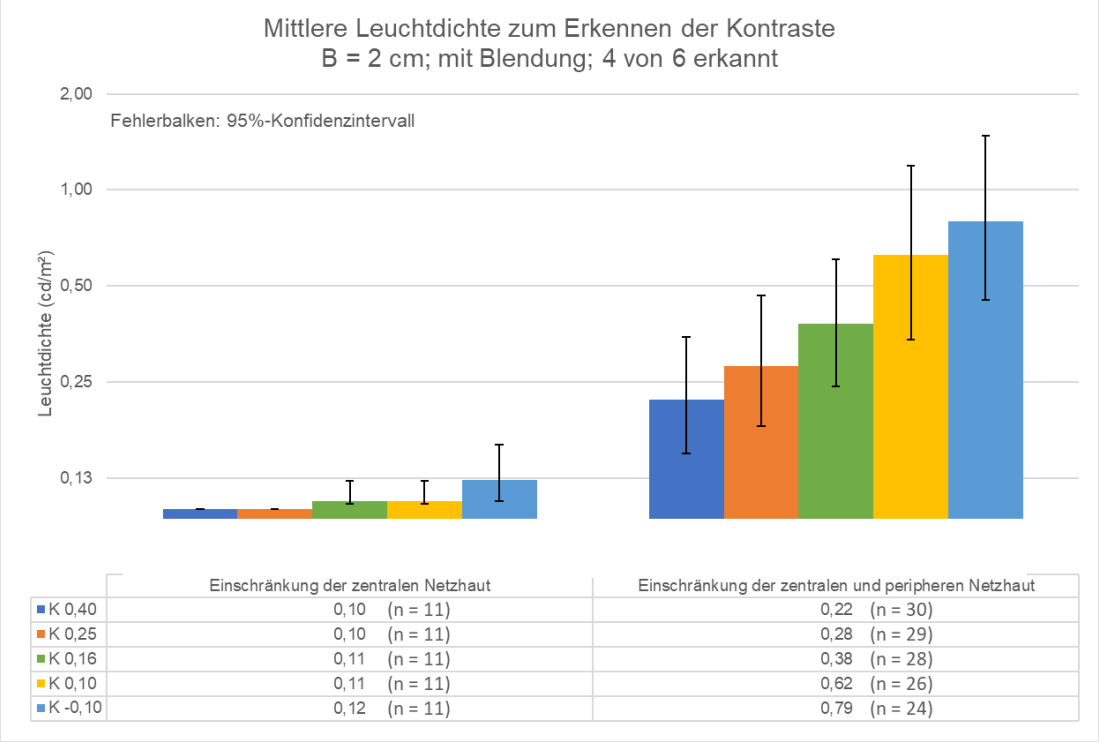
Auswirkungen der Funktionseinschränkungen der sehbehindeten Testpersonen

Aufgrund der divers verteilten Krankheitsbilder ist eine Darstellung und Auswertung der Ergebnisse in Zusammenhang mit den Hauptdiagnosen der Untersuchungsgruppe nicht zielführend. Sinnvoller erschien es, die Gruppe anhand ihrer Funktionseinschränkung einzuteilen. Hierfür wurde sich neben den Diagnosen und der Sehschärfe ebenso die Gesichtsfelder der Probanden, welche im Rahmen der Reha-Maßnahme standardmäßig durchgeführt werden, retrospektiv betrachtet. Unterteilt wurde in eine rein „zentralen Einschränkung“, wenn ausschließlich das zentrale 10°-Gesichtsfeld Defekte aufweist, sowie in eine kombinierte „zentrale und periphere Einschränkung“, wenn die Gesichtsfelddefekte über das 10°-Gesichtsfeld hinausgehen. Konnte die Funktionseinschränkung nicht der Netzhaut, sondern z. B. einer Medientrübung zugeordnet werden, wurden die Probanden in die Subgruppe „sonstige Einschränkung“ eingeteilt. Die Gruppe "nur periphere Defekte", die beispielsweise bei sehbehinderten oder blinden Menschen mit retinopathia pigmentosa entstehen kann, wurde nicht gebildet, da der zentrale Visusverlust einschlussrelevant war.



	Einschränkung der zentralen Netzhaut	Einschränkung der zentralen und peripheren Netzhaut
K 0,40	0,10 (n = 11)	0,13 (n = 33)
K 0,25	0,10 (n = 11)	0,17 (n = 33)
K 0,16	0,10 (n = 11)	0,21 (n = 31)
K 0,10	0,10 (n = 11)	0,36 (n = 30)
K -0,10	0,11 (n = 11)	0,54 (n = 29)

Abbildung 21: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste bei einer Streifenbreite von 2 cm mit 4 von 6 richtigen Orientierungsangaben für die Subgruppen nach Art der Funktionseinschränkung. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch.



	Einschränkung der zentralen Netzhaut	Einschränkung der zentralen und peripheren Netzhaut
K 0,40	0,10 (n = 11)	0,22 (n = 30)
K 0,25	0,10 (n = 11)	0,28 (n = 29)
K 0,16	0,11 (n = 11)	0,38 (n = 28)
K 0,10	0,11 (n = 11)	0,62 (n = 26)
K -0,10	0,12 (n = 11)	0,79 (n = 24)

Abbildung 22: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste mit Blendung mit 4 von 6 richtigen Orientierungsangaben für die Subgruppen nach Art der Funktionseinschränkung. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch.

Nach dieser Einteilung konnten 12 Probanden der Subgruppe „zentrale Einschränkung“ und 33 Probanden der Subgruppe „zentrale und periphere Einschränkung“ zugeordnet werden. Fünf Probanden wurden der Subgruppe „sonstige Einschränkung“ zugeordnet.

Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs wurde die Subgruppe „sonstige Einschränkung“ von weiteren Betrachtungen ausgenommen. Es zeigte sich eine höhere erforderliche Testfeld-Leuchtdichte zum Erkennen der dargebotenen Kontraststufen bei einer vorliegenden kombinierten Funktionseinschränkung (Abbildung 21). Mit abnehmendem Kontrast stieg in dieser Subgruppe die mittlere Leuchtdichte an. Unter Blendung zeigte sich ein vergleichbarer Verlauf (Abbildung 22).

Darstellung der Ergebnisse für die erforderlichen Leuchtdichten

Die Darstellung von Mittelwerten für die erforderlichen Leuchtdichten in Abhängigkeit von Kontrast, Streifenbreite und Blendung ist wenig aussagekräftig, da die Werte der einzelnen Testpersonen in der Untersuchungsgruppe stark streuen. Für das Beispiel in Abbildung 23 (K = 0,10; B = 2 cm; ohne Blendung; 6 von 6) beträgt die mittlere Leuchtdichte zur Erkennung 0,41 cd/m^2, unterhalb von 0,5 cd/m^2 konnten aber nur 50 % der Personen den Kontrast erkennen. Eine Erhöhung auf 4 cd/m^2 führt dazu, dass 82 % der Personen den Kontrast erkennen können. Eine weitere Erhöhung auf 22,3 cd/m^2 führt dazu, dass 90 % der Personen den Kontrast erkennen konnten. Ob eine weitere Erhöhung dazu führt, dass die verbleibenden 10 % der Testpersonen die Kontraste erkennen, lässt sich aus den Daten nicht ablesen.

Die Häufigkeitsverteilungen lassen Schlüsse darüber zu, welche Leuchtdichten erforderlich sind, damit ein bestimmter Anteil an Personen mit einer vorgegebenen Erkennungswahrscheinlichkeit, ein Sehzeichen erkennen wird. Um für beliebige Häufigkeiten Leuchtdichten angeben zu können, erfolgte für die Untersuchungsgruppe eine Kurvenanpassung. Die relativen Häufigkeiten wurden z-transformiert, wodurch lineare Werte zu log-Leuchtdichten entstanden (Abbildung 59 und Abbildung 60 im Anhang). Mittels linearer Regression wurden Steigung und Achsenabschnitt von "log L gegen z" bestimmt. Anschließend wurde mit Hilfe von Steigung und Achsenabschnitt mittels linearer Gleichung für die untersuchten Leuchtdichten der jeweilige z-Wert berechnet und dieser wieder in Häufigkeiten transformiert (Abbildung 23). Für variable Häufigkeiten (z. B. 50 %, 75 %, 90 %, 95 %) können so erforderliche Leuchtdichten für die geprüften Kontraststufen ermittelt werden. In Abbildung 24 ist das für die Häufigkeit 80 % dargestellt. Weitere Darstellungen für 50 %, 75 %, 90 % und 95 % sind im Anhang zu finden (Abbildung 61 bis Abbildung 64). Die Zahlenwerte der Leuchtdichten für die Häufigkeit 80 % sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Die Werte für 50 %, 75 %, 90 % und 95 % sind im Anhang zu finden (Tabelle 35 bis Tabelle 38).

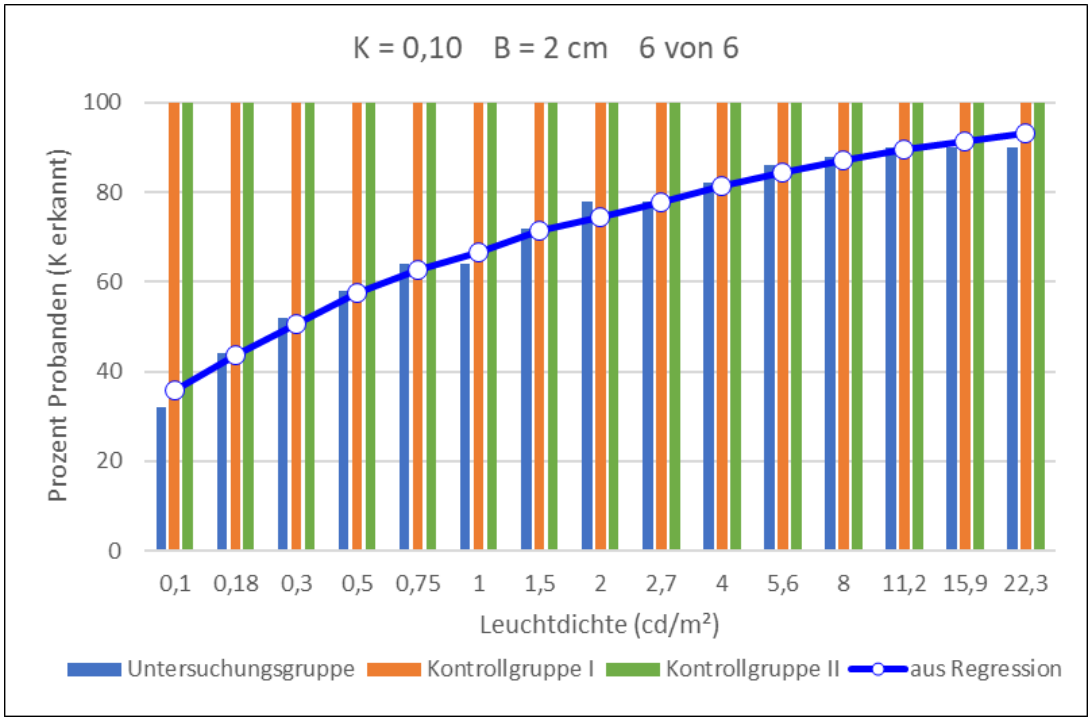


Abbildung 23: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den Kontrast 0,10 erkannt haben mit zusätzlichen Datenpunkten zur Kurvenanpassung aus der Regression für die Untersuchungsgruppe.

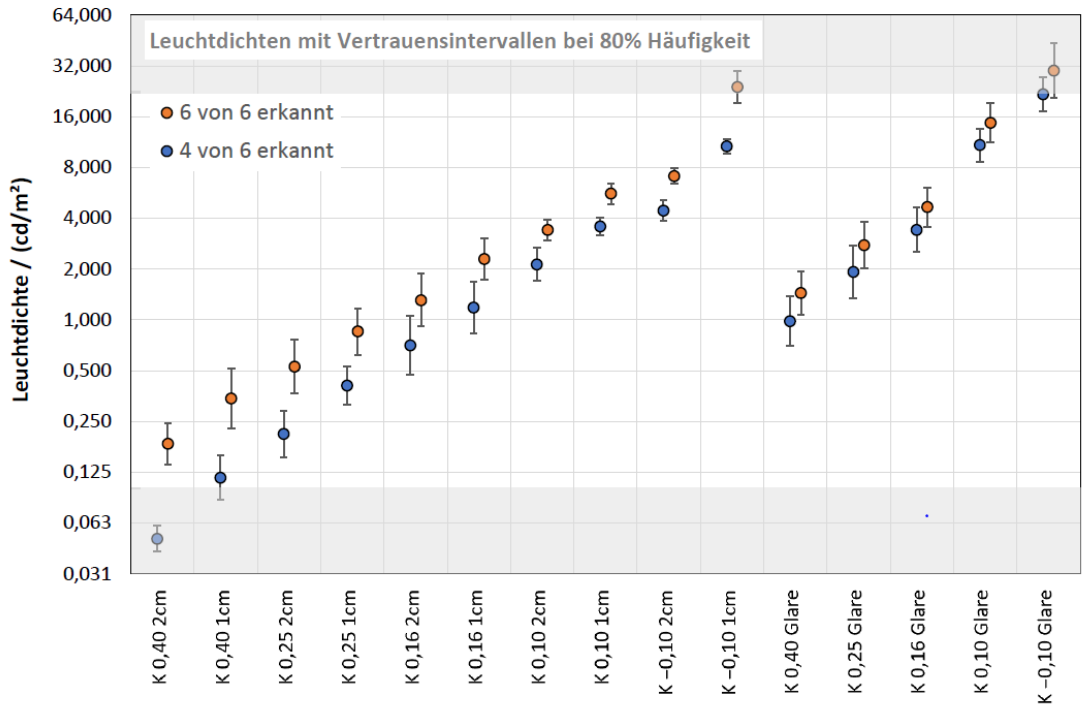


Abbildung 24: Leuchtdichten mit 95%-Konfidenzintervallen die erforderlich sind, damit 80 % der sehbehinderten Testpersonen die angegebenen Kontraststufen erkennen. Der grau hinterlegte Leuchtdichte-Bereich liegt außerhalb des untersuchten Werte-Bereiches. Darstellungen für andere Häufigkeiten sind im Anhang (Abbildung 61 und folgende) zu finden.

Tabelle 8: Leuchtdichten, die erforderlich sind, damit 80 % der Untersuchungsgruppe die angegebenen Kontraststufen unter verschiedenen Bedingungen erkennt. Die Erkennungswahrscheinlichkeit beträgt 4 von 6. Grau hinterlegte Werte liegen außerhalb des untersuchten Bereiches. Die Werte für 50 %, 75 %, 90 % und 95 % sind im Anhang zu finden (Tabelle 35 bis Tabelle 38)

	Leuchtdichte bei **K=0,40** in cd/m²	Leuchtdichte bei **K=0,25** in cd/m²	Leuchtdichte bei **K=0,16** in cd/m²	Leuchtdichte bei **K=0,10** in cd/m²	Leuchtdichte bei **K=-0,10** in cd/m²
B = 1 cm keine Blendung	0,116	0,407	1,18	3,58	10,7
B = 2 cm keine Blendung	0,050	0,210	0,705	2,13	4,43
B = 2 cm Blendung	0,980	1,92	3,41	10,86	21,7

Tabelle 9: Leuchtdichten, die erforderlich sind, damit 80 % der Untersuchungsgruppe die angegebenen Kontraststufen unter verschiedenen Bedingungen erkennt. Die Erkennungswahrscheinlichkeit beträgt 6 von 6. Grau hinterlegte Werte liegen außerhalb des untersuchten Bereiches. Die Werte für 50 %, 75 %, 90 % und 95 % sind im Anhang zu finden (Tabelle 35 bis Tabelle 38)

	Leuchtdichte bei **K=0,40** in cd/m²	Leuchtdichte bei **K=0,25** in cd/m²	Leuchtdichte bei **K=0,16** in cd/m²	Leuchtdichte bei **K=0,10** in cd/m²	Leuchtdichte bei **K=-0,10** in cd/m²
B = 1 cm keine Blendung	0,341	0,853	2,29	5,60	24,0
B = 2 cm keine Blendung	0,184	0,527	1,31	3,41	7,11
B = 2 cm Blendung	1,44	2,77	4,66	14,7	30,0

Nahezu unabhängig von der Wahl der Häufigkeit und der Erkennungswahrscheinlichkeit ist die Angabe von Faktoren, um die sich die erforderliche Leuchtdichte ändert, wenn der Kontrast reduziert wird oder sich ein anderer Parameter ändert. Die in Tabelle 10 angegebenen Faktoren lassen sich auch aus Abbildung 24, Abbildung 25 oder Tabelle 8 ablesen.

Faktoren zwischen den Kontraststufen

Zwischen dem Logarithmus der Kontrastwerte von 0,40 bis 0,10 und dem Logarithmus der erforderlichen Leuchtdichte besteht ein linearer Zusammenhang in Abbildung 25 ist das für die Häufigkeit von 80 % dargestellt. Aufgrund des linearen Zusammenhangs ist der Erhöhungsfaktor zwischen den Kontraststufen immer der gleiche. Eine Absenkung des Kontrastes von 0,40 auf 0,25 erfordert eine 2- bis 4-fach erhöhte Leuchtdichte, die weitere Absenkung des Kontrastes auf 0,16 ebenso, so dass dann gegenüber dem Kontrast von 0,40 mit der 4- bis 16-fachen Leuchtdichte gearbeitet werden müsste (Tabelle 10). Eine weitere Absenkung erfordert Erhöhungsfaktoren bis zu 42.

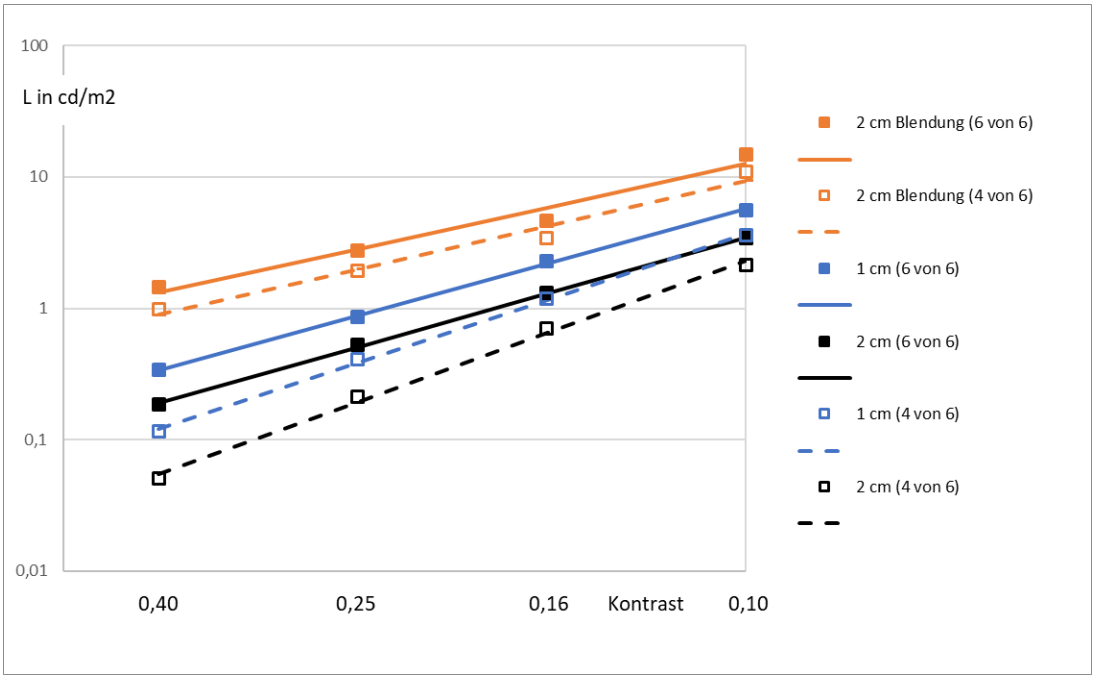


Abbildung 25: Linearer Zusammenhang zwischen dem Logarithmus des Kontrastes und dem Logarithmus der erforderlichen Leuchtdichte. Die Darstellung gilt für den Einschluss von 80 % der Untersuchungsgruppe

Tabelle 10: Faktoren der erforderlichen Leuchtdichte einer Situation zur Leuchtdichte einer Referenzsituation bei Änderung des Kontrastes, der Sehzeichengröße und der Blendwirkung für die Erkennungswahrscheinlichkeiten 4 von 6 und 6 von 6 (ermittelt für die Häufigkeit 80 %)

Wechsel von	Faktor 4 von 6	Faktor 6 von 6	Anmerkung
K = 0,40 zu K = 0,25	2 bis 4,2	2 bis 2,8	Erhöhungsfaktor gegenüber K = 0,40
K = 0,40 zu K = 0,16	3,5 bis 14	3,2 bis 7,1	Erhöhungsfaktor gegenüber K = 0,40
K = 0,40 zu K = 0,10	11 bis 42	10,2 bis 18,5	Erhöhungsfaktor gegenüber K = 0,40
K = 0,10 zu K = -0,10	1,2 bis 3	1,3 bis 4,3	Erhöhungsfaktor Negativkontrast K = -0,10 gegenüber Positivkontrast K = 0,10
B = 2 cm zu B = 1 cm	1,7 bis 2,3	1,6 bis 1,9	Erhöhungsfaktor gegenüber B =2 cm für Positivkontraste
B = 2 cm zu B = 1 cm	2,4	3,4	Erhöhungsfaktor gegenüber B = 2 cm für den Negativkontrast von K = -0,10
Blendfreiheit zu Blendung	4,8 bis 19,5	3,6 bis 7,8	Erhöhungsfaktor gegenüber „absoluter“ Blendfreiheit zu normgerecht begrenzte Blendung
„4 von 6 auf „6 von 6“ erkannt		1,4 bis 3,7	Die Erhöhung der Erkennungswahrscheinlichkeit geht mit einem erhöhten Leuchtdichtebedarf einher.

Vergleich von Positiv - und Negativkontrast

Neben 4 Positivkontrasten wurde auch ein Negativkontrast von K = -0,10 untersucht. Die Erhöhungsfaktoren (Tabelle 9) gegenüber dem Positivkontrast von K = 0,10 liegen zwischen 1,2 und 4,3. Die größten Unterschiede traten beim 1 cm breiten Streifen auf (Faktor 3 bis 4,3). Der 2 cm breite Streifen im Negativkontrast erforderte Erhöhungsfaktoren von maximal 2.

Vergleich der Streifenbreiten

Kleinere Sehobjekte erfordern höhere Leuchtdichten. Der Streifen mit einer Breite von B = 1 cm erfordert die 1,7 bis 3,4-fache Leuchtdichte im Vergleich zum Streifen mit B = 2 cm. Untersucht wurden allerdings nur Situationen ohne Blendung. Für Positiv-Kontrastwerte liegt der Erhöhungsfaktor im Bereich von 1,7 bis 2,3.

Einfluss der Blendung

Blendung hat einen deutlichen Einfluss auf die erforderlichen Leuchtdichten. Für den Einschluss von 80 % der Untersuchungsgruppe liegt der Faktor zwischen den Leuchtdichten zwischen 4,8 und 20. Beim Einschluss höherer Anteile der Untersuchungsgruppe können noch höhere Werte auftreten.

Zu beachten ist, dass das Szenario „blendfrei" einer Laborsituation entsprach. Die untersuchte Situation „mit Blendung" entsprach der einer nächtlichen Straßenbeleuchtung mit TI = 20 % Schwellenerhöhung. Normgerecht beleuchtete Innenräume weisen deutlich weniger Blendwirkung auf, entsprechen aber ebenfalls nicht der untersuchten „blendfreien" Situation. Im Innenraum wird der UGR-Wert zur Begrenzung der Blendung verwendet. Nach Norm können UGR-Werte bis 28 auftreten, die zugehörigen TI-Werte liegen dann bei ca. 7 %.

Vergleich der Erkennungswahrscheinlichkeiten

Die Erhöhung der Erkennungswahrscheinlichkeit von 4 von 6 (50 %, Schwellenwert) auf 6 von 6 (100 % Erkennungswahrscheinlichkeit) führt zu um den Faktor von 1,4 bis 3,7 erhöhten Leuchtdichten, wobei sich die grundlegende Abhängigkeit nicht ändert, wie in Abbildung 25 ersichtlich ist.

Eine Erkennungswahrscheinlichkeit von 100 % gilt für die unter den Laborbedingungen ermittelten Werte für die erforderlichen Leuchtdichten. In der realen Situation, in der beispielweise unbekannt ist, welches Sehobjekt an welcher Stelle im Gesichtsfeld vorhanden ist, sind möglicherweise höhere Leuchtdichten notwendig.

Vergleich der Ergebnisse mit derzeitigen Normwerten

[DIN EN 13201-2:2016] enthält für verschiedene Anwendungsbereiche Festlegungen für Leuchtdichten oder Beleuchtungsstärken.

Straßen für Kraftfahrzeuge (Beleuchtungsklassen M1 bis M6) müssen eine mittlere Wartungsleuchtdichte von 2,00 bis 0,30 cd/m^2 aufweisen. Beim Wartungswert der Leuchtdichte handelt es sich um einen Minimalwert, der zu keinem Zeitpunkt unterschritten werden darf. Zur Begrenzung der Blendung darf der TI-Wert nach Formel (9) nicht größer als 10 bis 20 % sein. Für die im Kapitel „Grundlagenuntersuchungen" beschriebenen Untersuchungen unter Blendeinwirkung wurde der TI-Wert ebenfalls auf 20 % begrenzt.

Für Fuß- und Radwege, Anwohnerstraßen, Fußgängerzonen, Parkplätze und Schulhöfe gibt es die Beleuchtungsklassen P1 bis P6. Für Konfliktbereiche auf Straßen und in Bereichen für Fußgänger und Radfahrer gibt es die Klassen C0 bis C5. Für die P- und C-Klassen gibt es Anforderungen an die mittleren Wartungswerte der Beleuchtungsstärke. Die geforderten Beleuchtungsstärken sind in Tabelle 11 angegeben und für einen Reflexionsgrad der beleuchteten Oberfläche von ρ = 0,2 nach Formel (30) in die Leuchtdichte umgerechnet worden. Danach kann diese bis ca. 3 cd/m^2 betragen. Die Begrenzung der Blendung anhand des TI-Wertes ist nicht gefordert, wird jedoch empfohlen.

In die Auswahl der Beleuchtungsklassen gehen mehrere Parameter ein (z. B. Hauptnutzer der Straßen und Wege, Kreuzungsdichte, Anzahl der Konfliktzonen). Auf diese Weise wird die Schwierigkeit der Sehaufgabe in den Klassen abgebildet, je schwieriger, desto höher die notwendige Beleuchtungsstärke bzw. Leuchtdichte.

Eine ansteigende Nummerierung der Klasse geht mit einer geringer werdenden Schwierigkeit der Sehaufgabe einher.

Tabelle 11: Mindest-Beleuchtungsstärken der P- und C-Klassen aus [DIN EN 13201-2:2016] und daraus abgeleitete Leuchtdichten

P-Klasse	Beleuchtungsstärkeanforderung	Leuchtdichte bei $\rho = 0{,}20$
C0	50 lx	3,18 cd/m²
C1	30 lx	1,91 cd/m²
C2	20,0 lx	1,27 cd/m²
C3, P1	15,0 lx	0,95 cd/m²
C5, P2	10,0 lx	0,64 cd/m²
C5, P3	7,50 lx	0,47 cd/m²
P4	5,00 lx	0,32 cd/m²
P5	3,00 lx	0,19 cd/m²
P6	2,00 lx	0,13 cd/m²

Da sich das Forschungsprojekt mit dem Kontrastsehen von sehbehinderten Fußgängern beschäftigt, sollen Ergebnisse mit den Normwerten der P- und C-Klassen verglichen werden. In Abbildung 26 sind die Leuchtdichten, die erforderlich sind, damit 80 % der Untersuchungsgruppe die angegebenen Kontraststufen erkennen können, dargestellt. Dabei handelt es sich um den Schwellenkontrast, d. h. die Erkennungswahrscheinlichkeit beträgt 50 % (4 von 6 erkannt bei den Untersuchungen im Kapitel „Grundalgenuntersuchungen“). Orange markiert ist der Leuchtdichtebereich der P- und C-Klassen nach Tabelle 11.

Nach Norm sind TI-Werte bis zu 20 % zulässig. Unter dieser Annahme können 80 % der sehbehinderten Menschen in der Untersuchungsgruppe den in [DIN 32975:2009] geforderten Kontrast von 0,40 für den 2 cm breiten Streifen nur bei Einhaltung der Beleuchtungsklasse P1 oder C0 bis C3 wahrnehmen. Ist die Beleuchtungssituation blendfrei (bzw. kommen entsprechende persönliche Maßnahmen der Abschattung des direkten Blicks in die Leuchte zum Einsatz) kann für alle P- und C-Klassen der Kontrast von 0,40 mit einer Erkennungswahrscheinlichkeit von 50 % von 80 % der sehbehinderten Personen wahrgenommen werden. Sinkt der Kontrast auf K = 0,25, können die Objekte bei Blendung nur bei Einhaltung der Klasse C0 bis C2 erkannt werden. Ist die Beleuchtungssituation blendfrei, ist mindestens die Klasse P4 erforderlich.

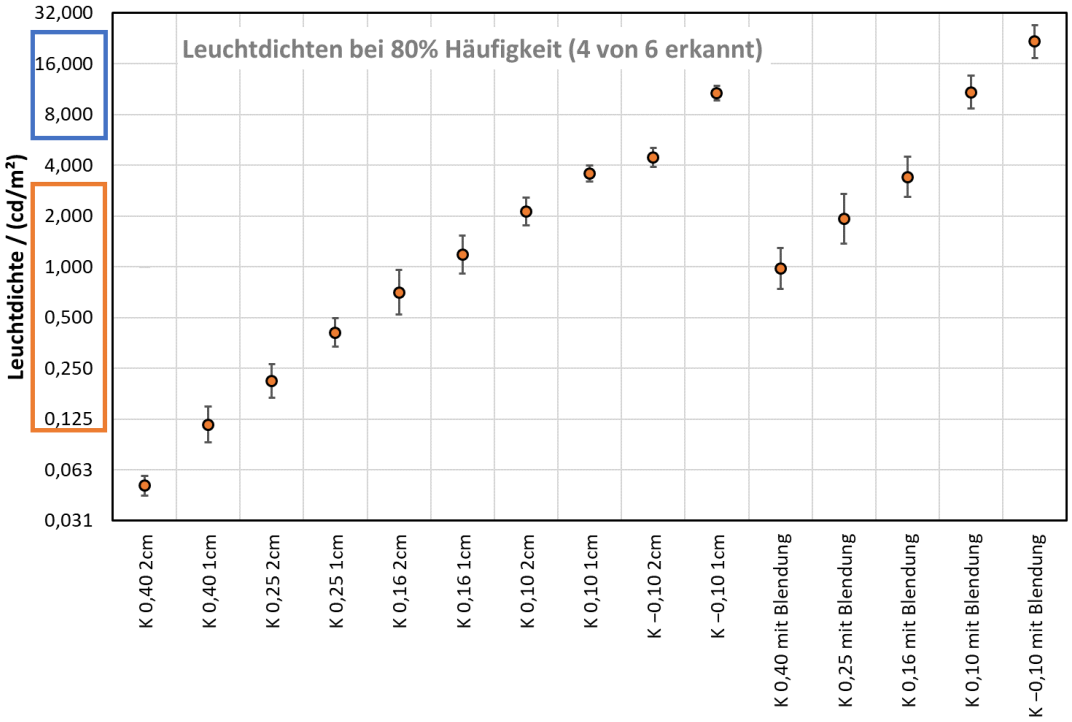


Abbildung 26:
Leuchtdichten mit 95%-Konfidenzintervallen die erforderlich sind, damit 80 % der sehbehinderten Gruppe die angegebenen Kontraststufen ohne und mit Blendung erkennen. Orange: Leuchtdichtebereich der P- und C-Klassen nach [DIN EN 13201-2:2016], Blau: Leuchtdichtebereich für Verkehrsflächen in Gebäuden nach [DIN EN 12464-1:2021]

Die für den Innenraum-Bereich gültige [DIN EN 12464-1:2021] enthält für verschiedene öffentliche Bereiche in Gebäuden Festlegungen für Mindest-Beleuchtungsstärken, die in Tabelle 12 dargestellt sind. Die Norm gibt zusätzlich zu den erforderlichen (d. h. minimalen) Beleuchtungsstärken modifizierte Werte an. Eine Erhöhung der Beleuchtungsstärke um bis zu 2 Stufen wird u. a. dann empfohlen, wenn die Sehfähigkeit des Menschen unter dem üblichen Sehvermögen liegt oder die Sehdetails kontrastarm sind.

Der Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den Normwerten für Innenbeleuchtungsanlagen ist nicht ohne weiteres möglich. Die Blendung fällt geringer aus, als hier untersucht. Es sind TI-Werte bis zu 7 % zu erwarten. In Abbildung 26 ist der Leuchtdichtebereich für Verkehrsflächen in Gebäuden nach Tabelle 12 blau gekennzeichnet. In blendfreien Situationen können alle untersuchten Kontraste mit einer Erkennungswahrscheinlichkeit von 50 % von 80 % der sehbehinderten Gruppe wahrgenommen werden.

Tabelle 12: Mindest-Beleuchtungsstärken in verschiedenen Verkehrsflächen im öffentlichen Bereich von Gebäuden aus [DIN EN 12464-1:2021] und daraus abgeleitete Leuchtdichten

Bereich der Sehaufgabe	Mindest-Beleuchtungsstärke	Mindest-Leuchtdichte bei $\rho = 0{,}20$
Eingangshallen, Korridore, Verkehrsflächen, Treppen, Fahrstühle	100 lx	6 cd/m²
Bereiche vor Fahrstühlen und Rolltreppen, Wartebereiche in Bahnhöfen und Flughäfen	200 lx	13 cd/m²
Hotelrezeptionen, Bibliotheken Schalterbereich in Bahnhöfen und Flughäfen	300 lx	20 cd/m²

Kontrastmaximierung durch Auswahl der Beleuchtungs-spektren

Ansatz und Verfahren

Die Leuchtdichte eines Objektes und damit auch der Kontrast von zwei benachbarten Materialproben hängen vom spektralen Reflexionsgrad (bzw. Strahldichtefaktor) der Proben und dem Spektrum der beleuchtenden Lichtquelle ab. (Abbildung 27)

Die Maximierung des Kontrastes durch Auswahl der Beleuchtungsspektren wird erreicht, wenn alle der drei folgenden Bedingungen erfüllt sind:

1. Die spektralen Reflexionsgrade der beiden Proben unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Wellenlängenabhängigkeit deutlich. Das ist erfüllt, wenn sie unterschiedliche Farben aufweisen.

2. Die Lichtquelle besitzt einen hohen Anteil an Strahlungsleistung in dem Wellenlängenbereich, in dem die hellere Probe stark reflektiert.

3. Die Lichtquelle besitzt einen geringen Anteil an Strahlungsleistung in dem Wellenlängenbereich, in dem die dunklere Probe stark reflektiert.

Abbildung 27 verdeutlicht die Zusammenhänge. Probe 1 hat einen höheren Gesamtreflexionsgrad als Probe 2 und hat dadurch eine höhere Leuchtdichte. Probe 1 reflektiert stark im langwelligem (roten) Bereich, während Probe 2 eher im kurzwelligen (blauen) Spektralbereich reflektiert. Werden beide Proben von einer kaltweißen Leuchtdiode beleuchtet, die einen hohen Anteil an Strahlungsleistung im kurzwelligen Bereich des Spektrums aufweist, ist der resultierende Kontrast niedriger als bei Beleuchtung mit einer warmweißen Leuchtdiode. Die Kontraste werden umso größer, je deutlicher sich die spektralen Reflexionsgrade der Proben unterscheiden.

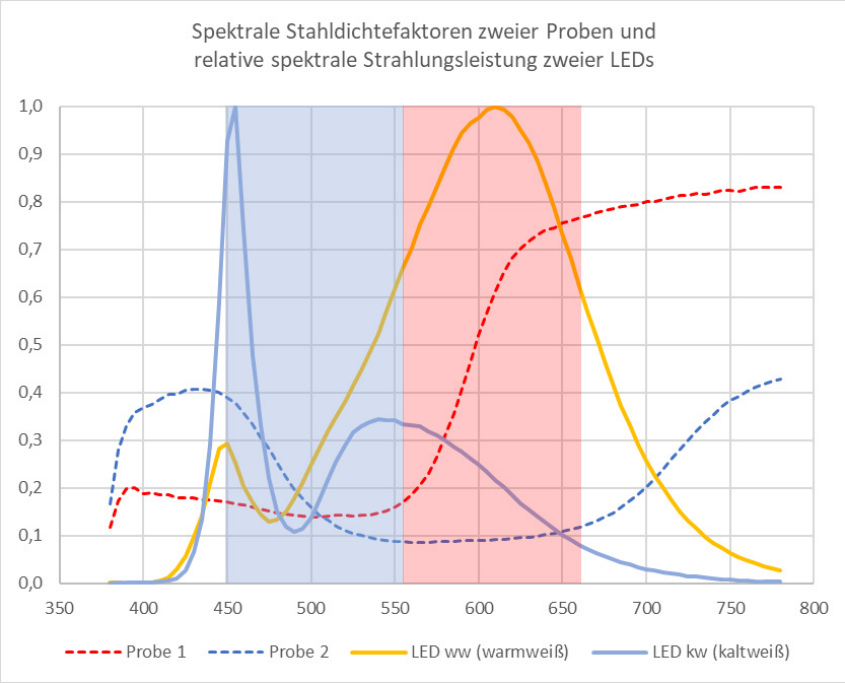


Abbildung 27: Spektrale Stahldichtefaktoren zweier Proben, relative spektrale Strahlungsleistung zweier LEDs und Spektralbereiche für Blauanteil und Rotanteil.

Im Folgenden werden Kennzahlen vorgeschlagen, die die spektralen Eigenschaften einzelner Proben als auch der Kombination zweier kontrastbildender Proben beschreiben. Ziel ist, anhand der Materialeigenschaften vorhersagen zu können, welche Lichtfarbe einen höheren Kontrast erwarten lässt.

Bei der richtigen Auswahl des Beleuchtungsspektrums kann der Kontrast umso größer werden, je deutlicher sich die Reflexionsgrade (bzw. Strahldichtefaktoren) der Proben in ihrer spektralen Verteilung unterscheiden. Die typischerweise verwendeten warmweißen und kaltweißen Leuchtdioden unterscheiden sich in ihrem Verhältnis zwischen dem kurzwelligen (blauen) und langwelligen (roten) Strahlungsanteil.

Für die Beschreibung der spektralen Reflexion der Proben kann das BR-Verhältnis herangezogen werden. Es wird wie folgt definiert:

Formel (10) $$\mathrm{BR} = \frac{\int_{\lambda=450\ \mathrm{nm}}^{\lambda=555\ \mathrm{nm}} \beta(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda=555\ \mathrm{nm}}^{\lambda=660\ \mathrm{nm}} \beta(\lambda)\mathrm{d}\lambda}$$

mit $\beta(\lambda)$ spektraler Strahldichtefaktor der Probe
λ Wellenlänge

Die Trennung des blauen vom roten Spektralbereich erfolgt bei 555 nm, der Blaubereich beginnt bei 450 nm, der Rotbereich endet bei 660 nm. Die Bereiche sind in Abbildung 27 farbig gekennzeichnet. Der nach Formel (10) ermittelte BR-Wert ist umso größer, je mehr Blauanteil die Probe relativ zum Rotanteil reflektiert. Bilden nun zwei Proben einen Kontrast, kann das Verhältnis des BR-Wertes der Probe mit der höheren Leuchtdichte (BR_1) zum BR-Wert der Probe mit der niedrigeren Leuchtdichte (BR_2) ermittelt werden. Es ist möglich, dass es beim Wechsel der Lichtfarbe zu einer Kontrastumkehr kommt. Das ist bei der Festlegung, welche Probe die mit der höheren Leuchtdichte ist, zu beachten.

Formel (11) $$\mathrm{BRV} = \frac{\mathrm{BR_1}}{\mathrm{BR_2}}$$

mit $\mathrm{BR_1}$ BR-Wert der Probe 1
$\mathrm{BR_2}$ BR-Wert der Probe 2

Ist dieses BR-Verhältnis (BRV) größer als 1, bedeutet das, die Probe mit der höheren Leuchtdichte hat einen größeren BR-Wert als die Probe mit der niedrigeren Leuchtdichte. Danach wäre zu erwarten, dass der Kontrast bei kaltweißer Beleuchtung größer ist als bei warmweißer Beleuchtung. Das soll im Folgenden überprüft werden.

Überprüfung des Verfahrens anhand von 12 Farbproben

Das Verfahren wurde zunächst unter Verwendung von 12 Farbproben überprüft. Dabei handelt es sich um 10 reale Materialien aus dem Baumann-Farbensatz (Abbildung 28) und zwei idealisierte aselketiv reflektierende Materialien (Grau und Weiß) mit konstantem spektralen Strahldichtefaktoren von 0,20 und 0,60. Abbildung 29 zeigt die spektralen Leuchtdichtefaktoren der verwendeten Proben. Daraus wurden paarweise 66 Kontraste gebildet und die Kontrastwerte unter Verwendung der Spektren einer warmweißen (ww, 2700 K) und einer kaltweißen Leuchtdiode (kw, 9000 K) (aus Abbildung 27) berechnet. Der Kontrast ergibt sich nach Formel (12) bis Formel (14):

Formel (12) $$\mathrm{L_1} = \int_{\lambda=380\ \mathrm{nm}}^{\lambda=780\ \mathrm{nm}} \mathrm{E_{e\lambda}}\ \beta_1(\lambda)\ \mathrm{V}(\lambda)\ \mathrm{d}\lambda\ \frac{1}{\pi\ \Omega_0}$$

Formel (13) $$\mathrm{L_2} = \int_{\lambda=380\ \mathrm{nm}}^{\lambda=780\ \mathrm{nm}} \mathrm{E_{e\lambda}}\ \beta_2(\lambda)\ \mathrm{V}(\lambda)\ \mathrm{d}\lambda\ \frac{1}{\pi\ \Omega_0}$$

Formel (14) $$\mathrm{K} = \frac{\mathrm{L_1} - \mathrm{L_2}}{\mathrm{L_1} + \mathrm{L_2}}$$

mit: $\mathrm{L_1}$ Leuchtdichte der Probe 1
$\mathrm{L_2}$ Leuchtdichte der Probe 2 mit $\mathrm{L_1} > \mathrm{L_2}$
$\mathrm{E_{e\lambda}}$ spektrale Bestrahlungsstärke der Lichtquelle

$\beta_1(\lambda)$ spektraler Strahldichtefaktor der Probe 1
$\beta_2(\lambda)$ spektraler Strahldichtefaktor der Probe 2
$V(\lambda)$ spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges
λ Wellenlänge
K Kontrast nach Michelson

Abbildung 28: Foto der verwendeten Baumann-Farben

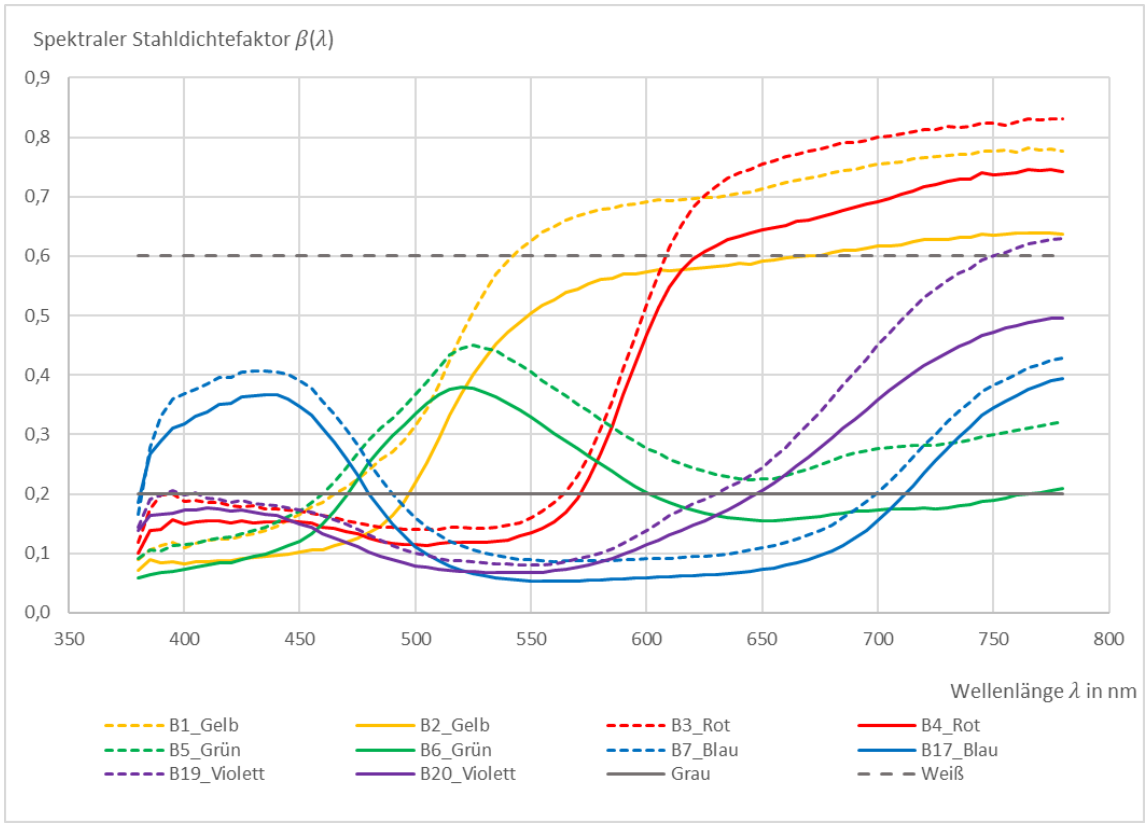


Abbildung 29: Spektrale Strahldichtefaktoren der 10 Baumann-Farben sowie Weiß und Grau

Tabelle 13: BR-Werte der Baumann-Farben

Baumann-Farbe	BR-Wert
B7_Blau	2,02
B17_Blau	2,40
B4_Rot	0,28
B3_Rot	0,29
B5_Grün	1,23
B6_Grün	1,40
B2_Gelb	0,48
B1_Gelb	0,54
B19_Violett	0,70
B20_Violett	0,68
Grau	1,00
Weiß	1,00

Die Erwartung, dass ein Blau-Rot-Verhältnis (BRV) kleiner als 1 bei warmweißer Beleuchtung höhere Kontraste liefert und BRV-Werte größer als 1 bei kaltweißer Beleuchtung, ist für 62 der 66 Probenpaare erfüllt. 4 Probenpaare erfüllen die Erwartungen nicht. Allerdings sind die Werte der Kontraständerung nahezu Null und die Fälle daher nicht von Bedeutung.

Die Änderung des Kontrastes K (Differenz K(kw) – K(ww)) beim Wechsel von einer warmweißen (ww) zu einer kaltweißen Beleuchtung (kw) ist in Abbildung 30 in Abhängigkeit vom Blau-Rot-Verhältnis BRV der kontrastierenden Proben dargestellt. Im Diagramm zeigt sich ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Differenz des Kontrasts und dem Blau-Rot-Verhältnis. BRV-Werte größer als 1 führen bei kaltweißer Beleuchtung zu höheren Kontrasten, dementsprechend ist die Differenz positiv. BRV-Werte kleiner als 1 führen bei kaltweißer Beleuchtung zu geringeren Kontrasten, dementsprechend ist die Differenz negativ. Man erkennt, dass Kontraständerungen bis zu einer Größe von etwa 0,15 möglich sind.

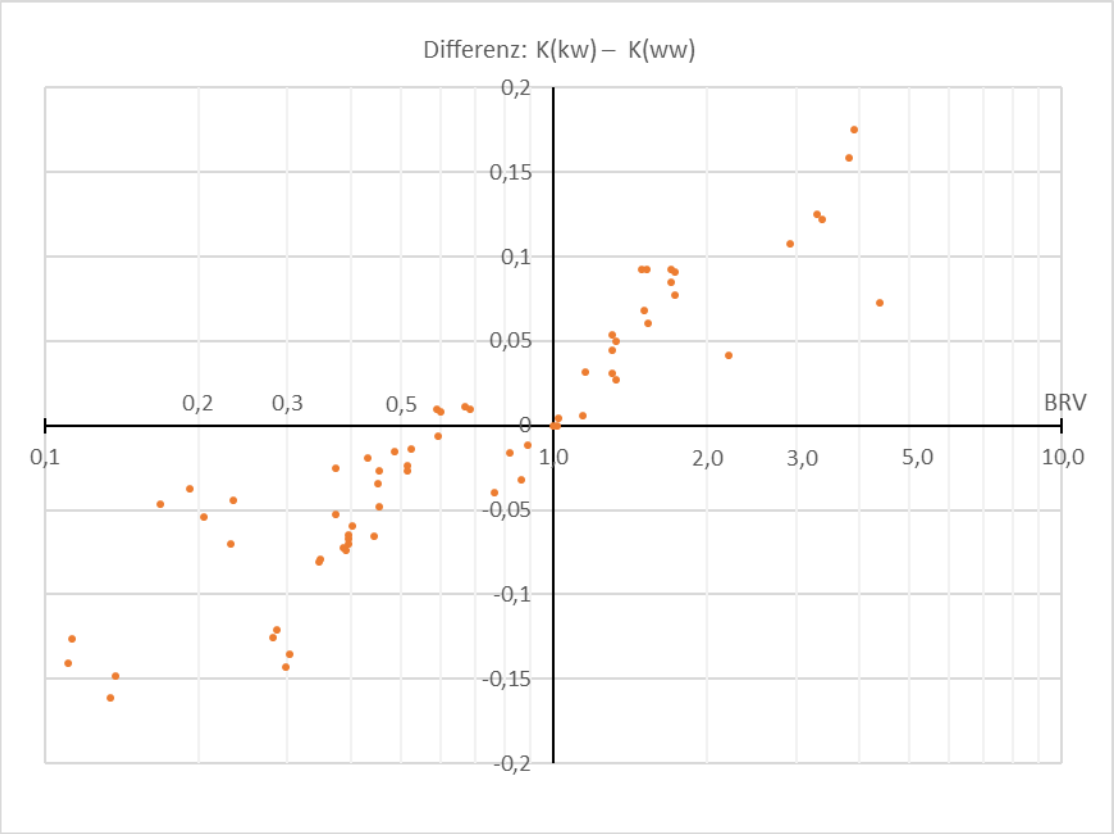


Abbildung 30: Änderung des Kontrastes K der Baumann-Farben-Paare als Differenz von K(kw) – K(ww) beim Wechsel von einer warmweißen (ww) zu einer kaltweißen (kw) Beleuchtung als Funktion des Blau-Rot-Verhältnisses BRV

Von den 66 berechneten Kontrasten hatten 50 bei der besser geeigneten Beleuchtung (d. h. Lichtfarbe ww oder kw) einen Kontrast von mindesten 0,25. Beim Wechsel von der weniger geeigneten Beleuchtung zur besser geeigneten erhöhte sich bei 27 Probenpaaren der Kontrast um mindestens 0,05. Einige Beispiel sind in Tabelle 14 angegeben, wobei bei Probenpaar Nr. 4 bei beiden Beleuchtungen der Kontrast kleiner als 0,25 ist, allerdings ist in diesem Fall die maximale Kontrastdifferenz aufgetreten.

Tabelle 14: Beispiel-Probenpaare (Baumann-Farben) mit BRV-Werten und Kontrasten bei unterschiedlichen Lichtfarben

Nr.	Probenpaar	BRV-Wert	Kontrast K(kw)	Kontrast K(ww)	K(kw) – K(ww)
1	B4_Rot zu B7_Blau	0,139	0,349	0,511	-0,161
2	B2_Gelb zu B3_Rot	1,680	0,298	0,206	0,093
3	Weiß zu B3_Rot	3,488	0,398	0,273	0,125
4	B5_Grün zu B4_Rot	4,385	0,237	0,062	0,175

Anwendung des Verfahrens mit realen farbigen Materialien

Da besonders bei Materialien mit gesättigten Farben Effekte zu erwarten sind, wurde das Verfahren an 37 Proben von Teppichen (Abbildung 31) und einem neutralgrauen Steinmaterial angewendet. Die spektralen Strahldichtefaktoren der Proben sind im Anhang dargestellt. Neben gesättigten Farben gibt bei den Proben auch einige ungesättigte Farben.

Abbildung 31: links: Probe 1 bis 14, rechts: Probe 15 bis 37

Auch für diese Teppichmuster wurden paarweise Kombinationen aus allen 38 Materialen gebildet und der BRV-Wert sowie die Kontraste bei warmweißer und kaltweißer Beleuchtung berechnet. Von den 703 Paaren hatten 510 (71 %) bei der besser geeigneten Beleuchtung (Lichtfarbe ww oder kw) einen Kontrast von mindestens 0,25. Bei 262 Paaren (37 %) änderte sich der Kontrast beim Wechsel zur besser geeigneten Beleuchtung um mindestens 0,05. Für diese 262 Fälle ist die Abhängigkeit der erzielten Kontrastdifferenz vom BRV-Wert in Abbildung 32 dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass größer werdende BRV-Werte beim Wechsel zu einer kaltweißen Lichtfarbe zu einer Kontrasterhöhung führen können, umgekehrt also der Wechsel zu einer warmweißen Lichtfarbe eine Kontrastreduktion bedeuten kann. Für kleiner werdende BRV-Werte gelten die Aussagen umgekehrt.

Im Vergleich zu den Baumann-Farben (in Abbildung 32 orange gekennzeichnet) zeigt sich bei den gesättigten Teppichmustern ein größerer Bereich der BRV-Werte (von 0,03 bis 30). Hier sind Kontraständerungen bis zu ± 0,30 aufgetreten.

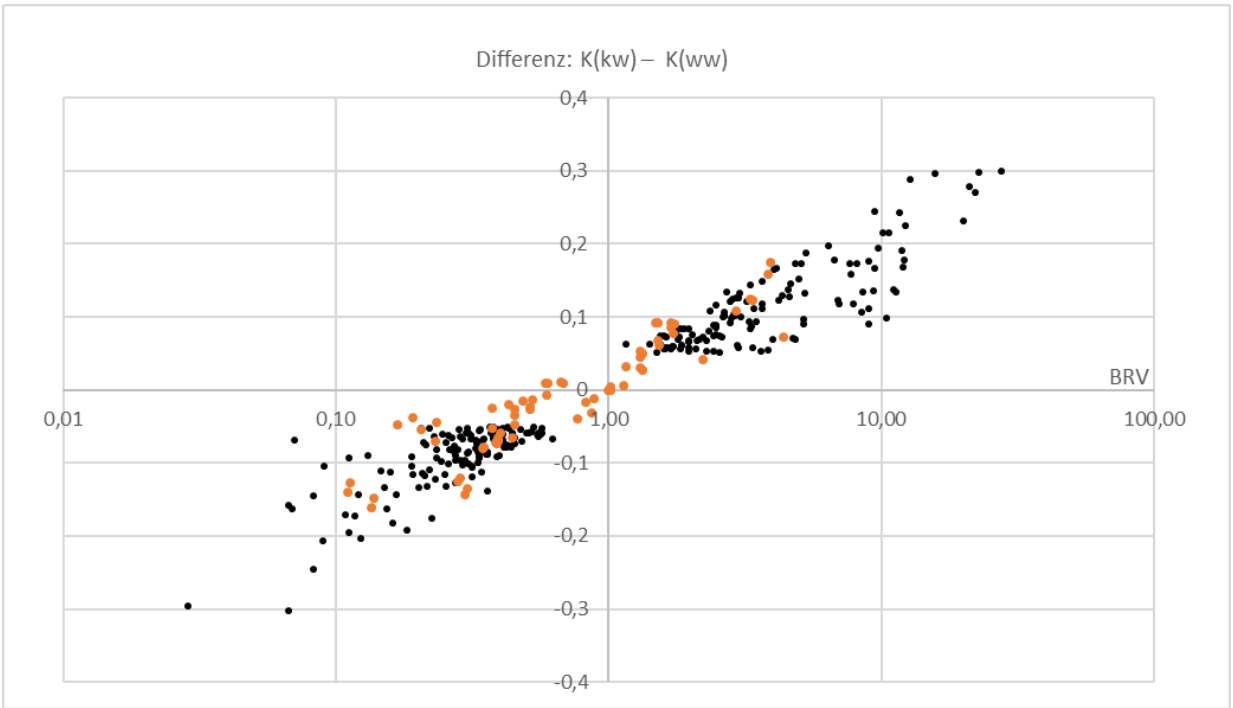


Abbildung 32: Änderung des Kontrastes K als Differenz von K(kw) – K(ww) beim Wechsel von einer warmweißen (ww) zu einer kaltweißen (kw) Beleuchtung als Funktion des Blau-Rot-Verhältnisses BRV für ausgewählte Probenpaare (orange: Datenpunkte aller Baumann-Farben aus Abbildung 30)

Abbildung 33: Beispielprobenpaare, die beim Wechsel zu warmweißer Beleuchtung eine Kontrastverbesserung zeigen (Werte in Tabelle 15, Nr. 1 bis 5)

Abbildung 34: Beispielprobenpaare, die beim Wechsel zu kaltweißer Beleuchtung eine Kontrastverbesserung zeigen (Werte in Tabelle 15, Nr. 6 bis 10)

Tabelle 15: Beispiel-Probenpaare mit BRV-Werten und Kontrasten bei unterschiedlichen Lichtfarben

Nr.	Probenpaar	BRV-Wert	Kontrast K(kw)	Kontrast K(ww)	K(kw) – K(ww)
1	25/33	0,067	0,032	0,335	-0,302
2	16/30	0,089	0,214	0,420	-0,206
3	7/32	0,199	0,322	0,500	-0,178
4	16/23	0,124	0,028	0,230	-0,202
5	18/20	0,225	0,115	0,291	-0,176
6	32/25	15,8	0,455	0,158	0,297
7	10/26	10,7	0,527	0,312	0,216
8	30/22	6,4	0,516	0,319	0,197
9	12/22	5,1	0,549	0,377	0,172
10	30/25	11,8	0,701	0,511	0,190

Anwendung des Verfahrens mit den Materialien aus dem Projekt der TU Dresden

Von der TU Dresden wurden die spektralen Strahldichtefaktoren von 52 Materialproben aus dem Projekt „Visuelle Barrierefreiheit durch die Gestaltung von Kontrasten“ [Lohaus 2018] zur Verfügung gestellt. Es handelt sich um verschiedenartige Bodenbeläge, deren Fotos in Abbildung 35 dargestellt sind. Diese besitzen weniger gesättigte Farben als die Proben im vorherigen Kapitel. Die spektralen Strahldichtefaktoren aller 52 Proben sind im Anhang zu finden.

Abbildung 35: Fotos der 52 Materialproben (Nr. 101 bis 152) Quelle: [Lohaus 2018]

Alle 52 Proben wurden paarweise zu Kontrasten kombiniert, wobei es sich nicht in jedem Fall um sinnvolle Kombinationen handelt. Von den 1326 Paaren hatten 717 (54 %) bei der besser geeigneten Beleuchtung (warmweiße oder kaltweiße Lichtfarbe) einen Kontrast von mindestens 0,25. Bei 48 Paaren änderte sich der Kontrast beim Wechsel zur besser geeigneten Beleuchtung um mindestens 0,05. Bei den weniger farbigen Materialien sind die erzielbaren Effekte, wie zu erwarten, geringer. Immerhin trat bei 152 Paaren eine Kontrastverbesserung um 0,03 auf. Für diese Fälle ist die Abhängigkeit der erzielten Kontrastdifferenz vom BRV-Wert in Abbildung 36 dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass größer werdende BRV-Werte beim Wechsel zu einer kaltweißen Lichtfarbe zu einer Kontrasterhöhung führen können, umgekehrt also der Wechsel zu warmweißen Lichtfarbe eine Kontrastreduktion bedeuten kann. Für kleiner werdende BRV-Werte gelten die Aussagen umgekehrt. Beispiel sind in Tabelle 16 dargestellt.

Im Vergleich zu den Baumann-Farben (in Abbildung 36 orange gekennzeichnet) zeigt sich hier der gleiche Bereich der BRV-Werte (von 0,1 bis 4). Auch treten ähnliche Kontraständerungen (bis zu 0,15) auf.

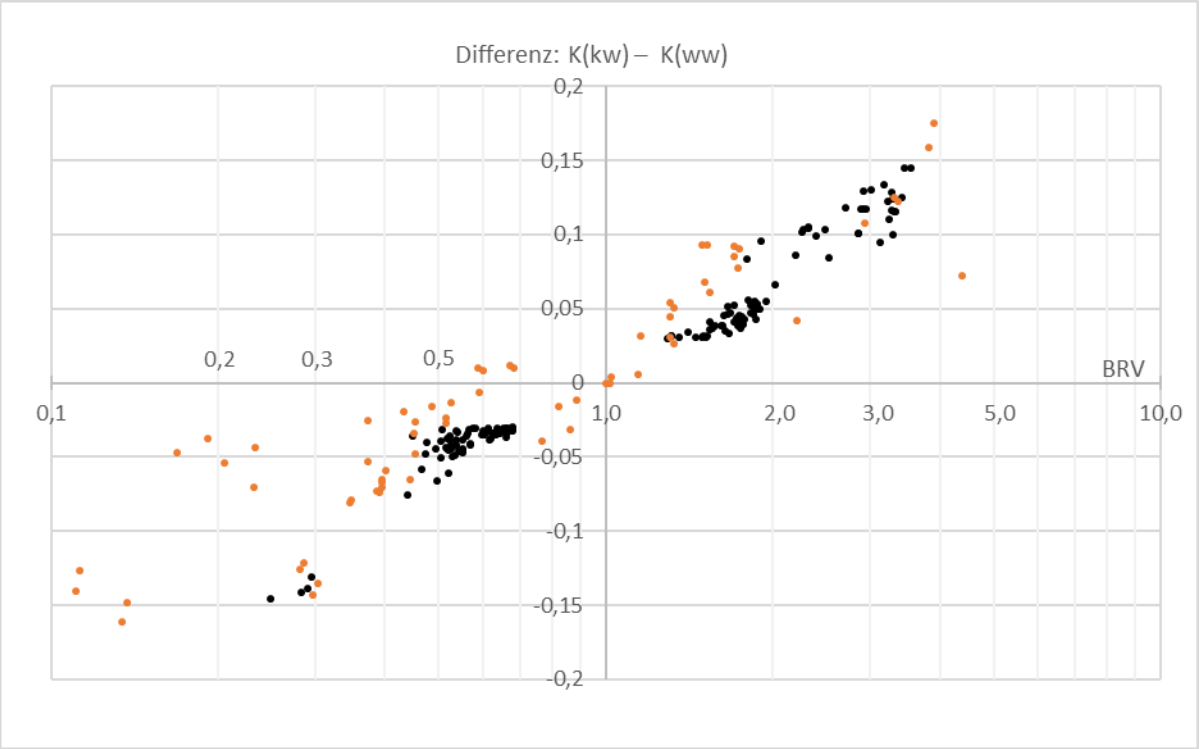


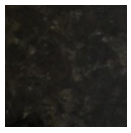
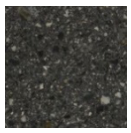
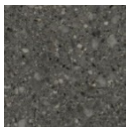
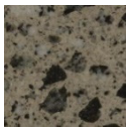
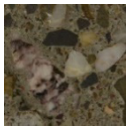
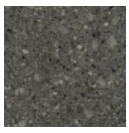
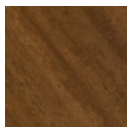
Abbildung 36: Änderung des Kontrastes K als Differenz von K(kw) – K(ww) beim Wechsel von einer warmweißen (ww) zu einer kaltweißen (kw) Beleuchtung als Funktion des Blau-Rot-Verhältnisses BRV für ausgewählte Materialkombinationen (orange: Datenpunkte der Baumann-Farben aus Abbildung 30)

Ergebnisse

Mit dem vorgeschlagenen Verfahren lassen sich Vorhersagen treffen, mit welcher Lichtfarbe bei einer gegebenen Material-Kombination ein maximal möglicher Kontrast erzielt werden kann. Das Verfahren lässt sich ebenso bei der Auswahl der Materialien einsetzen, wenn bekannt ist, welche Lichtquelle zur Beleuchtung verwendet wird. Zur Berechnung müssen die spektralen Reflexionseigenschaften der Materialien bekannt sein. Die Ermittlung der BR-Werte und des BRV-Wertes ist damit sehr einfach mit einem Tabellenkalkulationsprogramm möglich.

Es hat sich gezeigt, dass die Kontrastunterschiede zwischen warmweißer und kaltweißer Beleuchtung bis zu 0,15 auftreten können. Die richtige Auswahl des Spektrums kann somit dazu führen, dass die Normvorgabe von 0,4 eingehalten wird, während das im anderen Fall mit 0,25 nicht so wäre.

Tabelle 16: Beispiel-Probenpaare mit BRV-Werten und Kontrasten bei unterschiedlichen Lichtfarben

Nr.	Probenpaar	BRV-Wert	Kontrast K(kw)	Kontrast K(ww)	K(kw) – K(ww)		
1	143/121	0,282	0,187	0,328	-0,141		
2	143/141	0,249	0,277	0,422	-0,145		
3	130/121	0,497	0,192	0,258	-0,066		
4	130/140	0,520	0,282	0,343	-0,061		
5	131/115	0,523	0,159	0,211	-0,053		
6	113/143	3,556	0,294	0,149	0,145		
7	118/143	3,459	0,252	0,108	0,145		
8	123/143	3,173	0,319	0,185	0,133		
9	105/130	1,707	0,306	0,254	0,053		
10	113/145	1,896	0,187	0,132	0,055		

Konzeption eines einfachen Kontrast-Messverfahrens

Ansatz und Verfahren

Zur Überprüfung der Kontrast-Anforderung sieht [DIN 32975:2009] die Messung der Leuchtdichten der beiden kontrastierenden Materialien bei diffuser Beleuchtung unter senkrechter und zusätzlich praxisrelevanter Beobachtungsrichtung vor. Da die Aufsichtspersonen meist kein Leuchtdichtemessgerät zur Verfügung haben, findet die Überprüfung i. a. visuell oder gar nicht statt.

Im Folgenden wird ein Messverfahren vorgeschlagen, welches erste orientierende Prüfungen erlaubt, ohne aufwändige Messtechnik vorhalten zu müssen. Das Verfahren ersetzt nicht die fachgerechte Messung durch qualifiziertes Personal sondern kann nur den Hinweis erbringen, dass Handlungsbedarf besteht.

Ob ein vorgegebener Kontrast zwischen zwei Proben eingehalten oder überschritten wird, kann wie folgt überprüft werden:

1. Zunächst wird der vorliegende Kontrast visuell begutachtet und festgestellt, welche der beiden Proben die höhere Leuchtdichte aufweist, also heller erscheint.
2. Auf die hellere Probe wird nun ein Neutralfilter aufgelegt, der die Leuchtdichte reduziert. Auf die dunklere Probe wird kein Filter aufgelegt.
3. Der so entstehende Kontrast wird ebenfalls visuell begutachtet. Der Neutralfilter ist so dimensioniert, dass aus der visuellen Beobachtung folgende Schlüsse gezogen werden können (Abbildung 37):
   A Erscheint die vormals hellere Probe jetzt als die dunklere: die Kontrastvorgabe wird nicht eingehalten,
   B Erscheinen nun beide Proben gleich hell: die Kontrastvorgabe wird eingehalten
   C Erscheint die vormals hellere Probe jetzt auch noch als die hellere: die Kontrastvorgabe wird überschritten.

Neben der rein visuellen Begutachtung und Einschätzung ist es auch möglich, ein Foto (beispielsweise mit einer Handy-Kamera) vom Kontrastpaar mit aufgelegtem Filter zu machen und die Grauwerte der Bereiche zu vergleichen. Die Auswertung kann dann automatisiert in einer App erfolgen.

Der Kontrast nach Michelson ist wie folgt definiert

Formel (15) $$K = \frac{L_H - L_D}{L_H + L_D}$$

mit: L_H Leuchtdichte der helleren Probe
L_D Leuchtdichte der dunkleren Probe

Durch Auflegen eines Filters wird der Kontrast des Probenpaares auf K_F reduziert

Formel (16) $$L_{HF} = f \cdot L_H$$

Formel (17) $$K_F = \frac{f \cdot L_H - L_D}{f \cdot L_H + L_D} = \frac{L_{HF} - L_D}{L_{HF} + L_D}$$

mit: L_{HF} Leuchtdichte der helleren Probe mit aufgelegtem Filter
L_D Leuchtdichte der dunkleren Probe
f Dimensionierungsfaktor

Der Faktor f ist so dimensioniert, dass im Fall, dass der Normkontrast gerade erreicht ist (Fall B in Abbildung 37) der Kontrast mit Filter 0 wird. Im Fall A ist der Ausgangskontrast kleiner als die Normvorgabe, nach Auflegen des Filters kommt es zu einer Kontrastumkehr, im Fall C ist die hellere Probe auch mit aufgelegtem Filter noch die hellere.

Aus K_F und f lässt sich der Kontrast K ohne Filter wie folgt ermitteln:

Formel (18) $$K = \frac{1 + K_F(1+f) - f}{1 + K_F(1-f) + f}$$

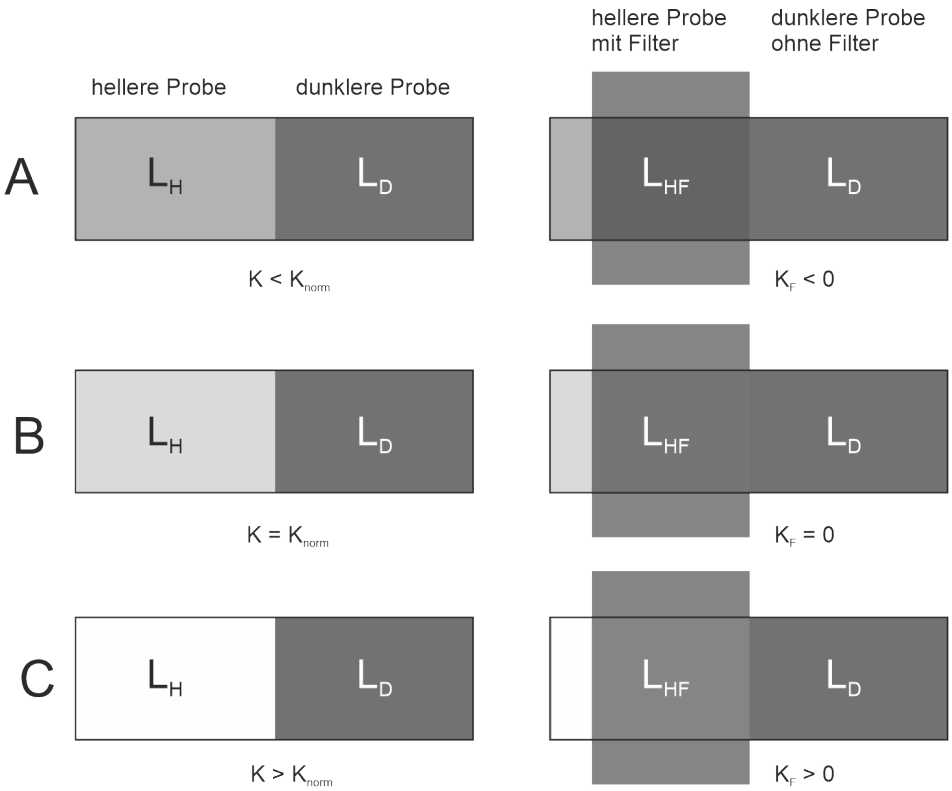


Abbildung 37: Probenpaare aus jeweils 2 Proben mit verschiedenen Kontrasten, links: Probenpaar ohne Filter, rechts: auf die hellere Probe ist jeweils ein Filter aufgelegt, der den Kontrast reduziert.

Dimensionierung des Filters für nicht selbst leuchtende Proben

Für die Dimensionierung wurden die folgenden Festlegungen in Anlehnung an die [DIN 32975:2009] festgelegt: Die Beleuchtung erfolgt diffus aus allen Richtungen. Der Beobachtungswinkel beträgt 45°.

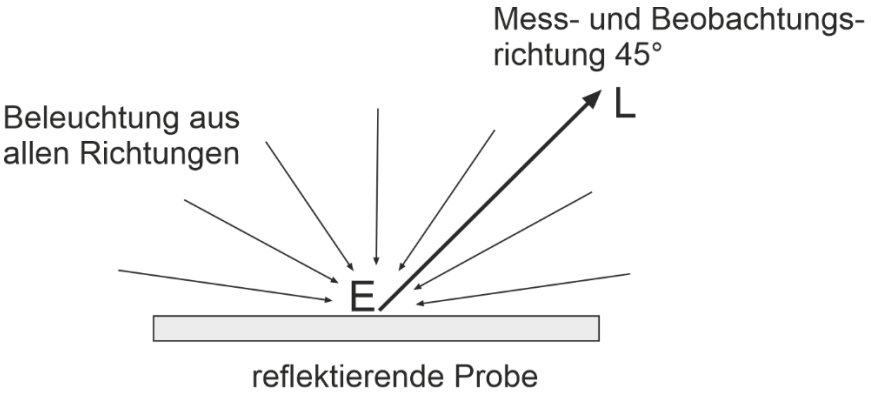


Abbildung 38: Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie an der Probe ohne Filter

Die Proben werden als diffus reflektierend angenommen, sie sind also in keiner Weise glänzend. Die Leuchtdichte der Probe ist dann zunächst winkelunabhängig und hängt von der Beleuchtungsstärke E und dem diffusen Reflexionsgrad der Probe ab:

Formel (19) $L = \frac{E \cdot \rho}{\pi \cdot \Omega_0}$

mit: L Leuchtdichte der Probe
E Beleuchtungsstärke auf der Probe
ρ diffuser Reflexionsgrad der Probe
Ω_0 Einheitsraumwinkel

Bei Verwendung eines Filters passieren die Lichtstrahlen den Filter zweimal (Abbildung 39). Auf diese Weise reduziert sich die Lichtdichte entsprechend des Transmissionsgrades des Filters. Die unterschiedlichen Weglängen des Lichtes auf dem Weg zur Probe können durch Anwendung des Berechnungsgesetzes bei der Ermittlung von τ_{Hin} berücksichtigt werden und sind ebenso wie die Reflexionsverluste an der Filteroberfläche im Gesamttransmissionsgrad bei diffuser Beleuchtung enthalten.

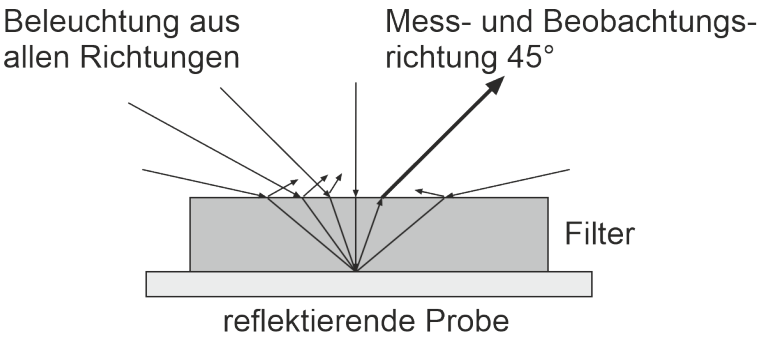


Abbildung 39: Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie an der nicht selbst leuchtenden Probe mit Filter

Formel (20) $L_{HF} = L_H \cdot \tau_{Hin} \cdot \tau_{Rück} = L_H \cdot f$

mit τ_{Hin} Transmissionsgrad bei diffuser Beleuchtung
$\tau_{Rück}$ Transmissionsgrad für Messrichtung 45°

Näherungsweise kann für beide Größen der Transmissionsgrad τ für den senkrechten Lichtdurchgang verwendet werden.

Der Faktor f lässt sich wie folgt aus dem zu überprüfenden Normkontrast K_{Norm} ableiten:

Formel (21): $f = \frac{1 - K_{Norm}}{1 + K_{Norm}}$

Tabelle 17: Erforderliche Transmissionsgrade für die Prüfung nicht selbst leuchtender Proben

K_{Norm}	f	τ^2	τ
0,40	0,428	0,428	0,655
0,70	0,176	0,176	0,420

Üblicherweise haben Filter glänzende Oberflächen (Abbildung 39). Diese haben bei der Beobachtung oder Messung stark störende Einflüsse. Zur Vermeidung wird die Verwendung eines Schatters empfohlen (Abbildung 40). Damit wird die direkte Reflexion des Lichtes in die Beobachterrichtung abgeschirmt.

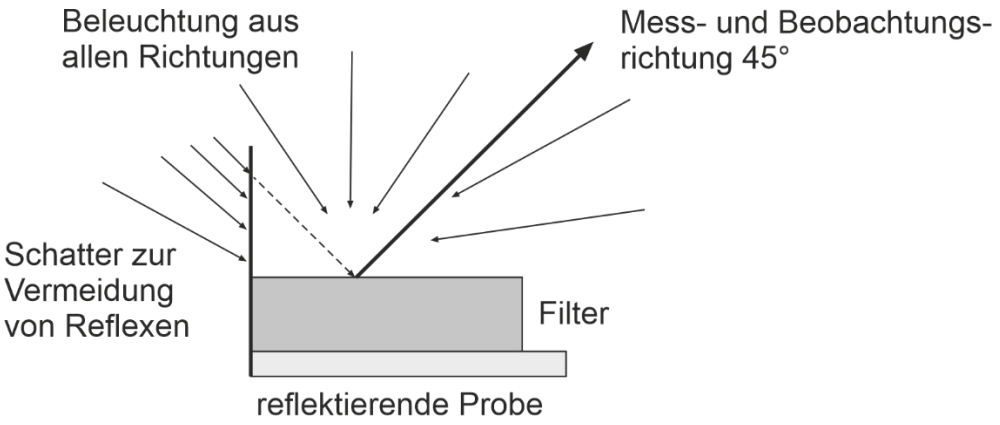


Abbildung 40: Verwendung eines Schatters zur Vermeidung von Reflexen auf der Filteroberfläche

Ebenfalls mögliche diffuse (in alle Richtungen gestreute) Reflexionen lassen sich mit dem Schatter nicht vermeiden. Durch Verwendung eines zweiten Filters (Abbildung 41), der auf die dunklere der beiden Proben aufgelegt wird, kann zumindest dafür gesorgt werden, dass die Effekte der Streuung auf der hellen und der dunklen Probe gleichermaßen vorhanden sind und die zu beurteilende Leuchtdichte-Differenz nicht beeinflusst wird. Der Transmissionsgrad dieses Filters sollte möglichst groß sein.

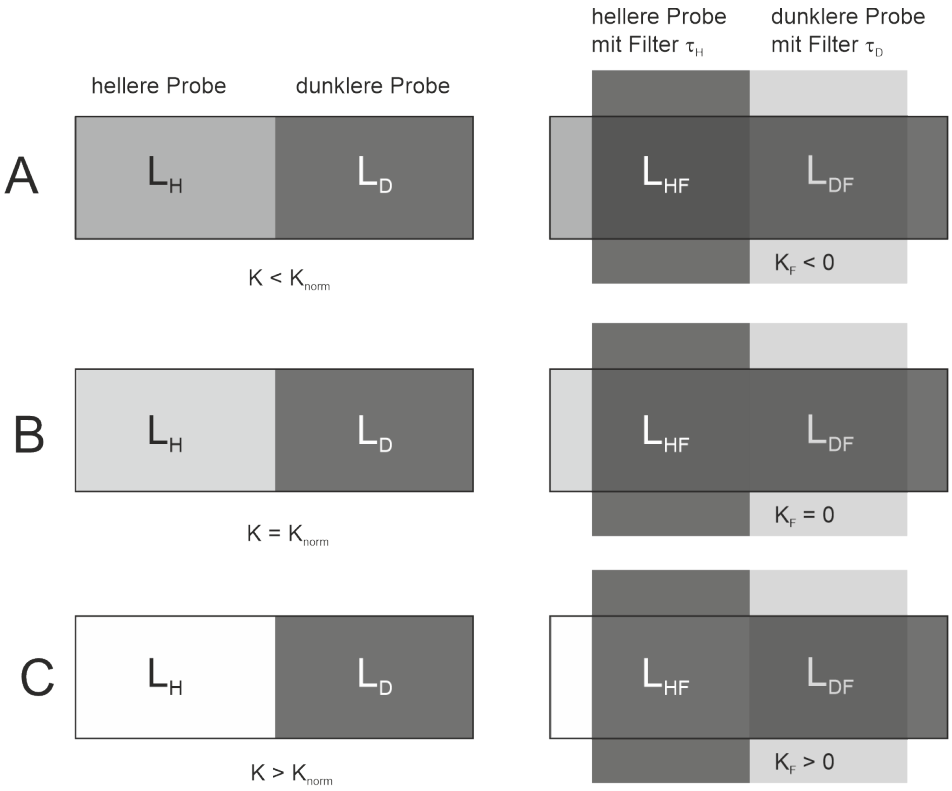


Abbildung 41: Probenpaare aus jeweils 2 Proben mit verschiedenen Kontrasten, links: Probenpaar ohne Filter, rechts: im Unterschied zu Abbildung 37 sind jeweils zwei Filter aufgelegt, die den Kontrast reduzieren.

Formel (22) $L_{DF} = L_D \cdot \tau_{D\,Hin} \cdot \tau_{D\,Rück} \approx L_D \cdot \tau_D^2$

Formel (23) $L_{HF} = L_H \cdot f \cdot \tau_{D\,Hin} \cdot \tau_{D\,Rück} = L_H \cdot \tau_{H\,Hin} \cdot \tau_{H\,Rück} \approx L_H \cdot \tau_H^2$

Formel (24) $\tau_H^2 = f \cdot \tau_D^2$

mit:
- $\tau_{D\,Hin}$ Transmissionsgrad des Filters auf der dunkleren Probe bei diffuser Beleuchtung
- $\tau_{D\,Rück}$ Transmissionsgrad des Filters auf der dunkleren Probe für Messrichtung 45°
- $\tau_{H\,Hin}$ Transmissionsgrad des Filters auf der helleren Probe bei diffuser Beleuchtung
- $\tau_{H\,Rück}$ Transmissionsgrad des Filters auf der helleren Probe für Messrichtung 45°
- τ_D Näherungswert für den Transmissionsgrad des Filters auf der dunkleren Probe
- τ_H Näherungswert für den Transmissionsgrad des Filters auf der hellen Probe

Tabelle 18: Erforderliche Transmissionsgrade für die Prüfung nicht selbst leuchtender Proben bei Verwendung von 2 Filtern, wobei der Transmissionsgrad für den Filter auf der dunkleren Probe beispielhaft gewählt wurde.

K_{Norm}	f	τ_D	τ_D^2	$\tau_{D\,Hin} \cdot \tau_{D\,Rück}$	$\tau_{H\,Hin} \cdot \tau_{H\,Rück}$	τ_H^2	τ_H
0,40	0,428	0,90	0,81	0,81	0,347	0,347	0,589
0,70	0,176	0,90	0,81	0,81	0,143	0,143	0,378

Dimensionierung des Filters für selbstleuchtende Proben

Ist die Probe selbstleuchtend, passieren die Lichtstrahlen den Filter nur einmal. Eine Beleuchtung von außen ist nicht notwendig und sollte komplett vermieden werden.

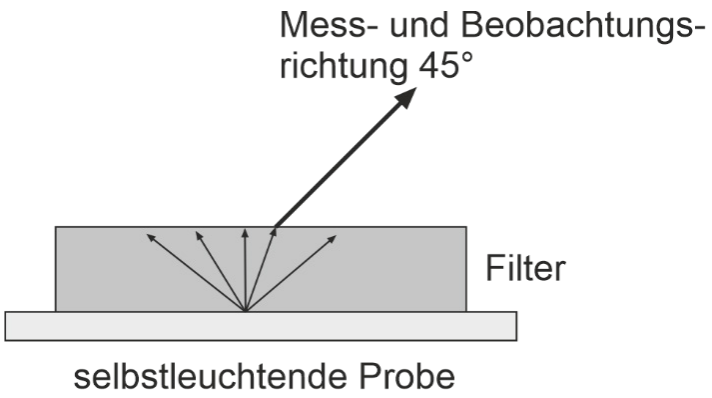


Abbildung 42: Beobachtungsgeometrie an der selbst leuchtenden Probe mit Filter

Formel (25) $L_{HF} = L_H \cdot \tau_{Rück} = f \cdot L_H$

mit: $\tau_{Rück}$ Transmissionsgrad für Messrichtung 45°

Näherungsweise kann auch hier der Transmissionsgrad τ für den senkrechten Lichtdurchgang verwendet werden.

Tabelle 19: Erforderliche Transmissionsgrade für die Prüfung selbst leuchtender Proben

K_{Norm}	f	τ
0,40	0,428	0,428
0,70	0,176	0,176

Formel (26) $L_{DF} = L_D \cdot \tau_{D\,Rück} \approx L_D \cdot \tau_D$

Formel (27) $L_{HF} = L_H \cdot f \cdot \tau_{D\,Rück} = L_H \cdot \tau_{H\,Rück} \approx L_H \cdot \tau_H$

Formel (28) $\tau_H = f \cdot \tau_D$

mit
$\tau_{D\,Rück}$ Transmissionsgrad des Filters auf der dunkleren Probe für Messrichtung 45°
$\tau_{H\,Rück}$ Transmissionsgrad des Filters auf der helleren Probe für Messrichtung 45°
τ_D Näherungswert für den Transmissionsgrad des Filters auf der dunkleren Probe
τ_H Näherungswert für den Transmissionsgrad des Filters auf der hellen Probe

Tabelle 20: Erforderliche Transmissionsgrade für die Prüfung selbst leuchtender Proben bei Verwendung von 2 Filtern, wobei der Transmissionsgrad τ_D für den Filter auf der dunkleren Probe beispielhaft gewählt wurde.

K_{Norm}	f	τ_D	τ_H
0,40	0,428	0,90	0,385
0,70	0,176	0,90	0,158

Prototyp eines Prüfgerätes

Aufbau

Zu Überprüfung des Konzeptes wurde ein Prototyp aufgebaut. Als Filtermaterial wurden Lee-Folien mit verschiedenen Transmissionsgraden kombiniert. Mit den verfügbaren Folien war es nicht möglich, eine Kombination zur Prüfung des Normkontrastes von exakt 0,40 zu bilden (Details in Tabelle 21).

Formel (29) $K_{Prüf} = \frac{1 - f}{1 + f}$

Tabelle 21: Transmissionsgrade des Prototyps für die Prüfung nicht selbst leuchtender Proben bei Verwendung von 2 Filtern.

τ_D	τ_D^2	τ_H	τ_H^2	f	$K_{Prüf}$
0,930	0,865	0,644	0,415	0,479	0,35

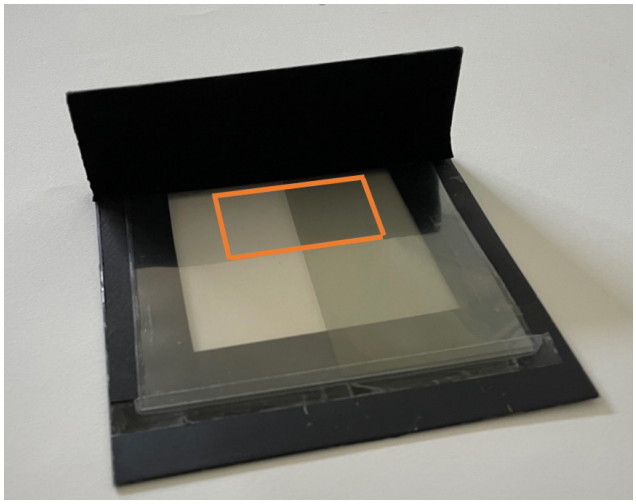


Abbildung 43: Prototyp eines Prüfgerätes mit zwei verschiedenen Filtern und Schatter: Der Bereich für die Messungen und visuellen Beobachtungen ist Orange gekennzeichnet.

Foto: Cornelia Vandahl, TU Ilmenau

Mit diesem Prototyp wurden bei verschiedenen Beleuchtungssituationen und mit verschiedenen Messmethoden die Kontraste und die Konstraständerungen durch die Filter bei 13 Probenpaaren bestimmt.

Beleuchtungssituation 1

Diese Beleuchtungssituation ähnelt einer Tageslichtsituationen im Freien. Eine Messbox (60 cm x 60 cm x 100 cm) enthält eine flächige diffus strahlende Leuchte mit Leuchtdioden als Lichtquellen. Die Wände sind weiß diffus reflektierend (ρ = 0,90), so dass die Proben in der Mitte der Bodenfläche aus allen Richtungen beleuchtet werden (E = 1130 lx, CCT = 4000 K). Durch eine Öffnung in der Box werden die Proben unter einem Winkel von 45° beobachtet und vermessen. Bei der Vermessung mit Filtern verhindert der Schatter gerichtete Reflexionen in Beobachterrichtung (Abbildung 44).

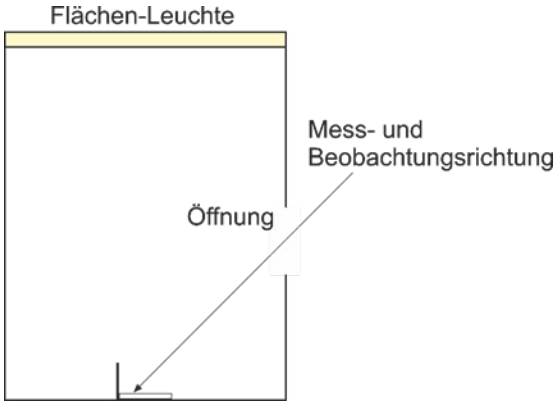


Abbildung 44: Seitenansicht der Messbox für Beleuchtungssituation 1

Beleuchtungssituation 2

Eine zweite Messreihe fand in einem tageslichtbeleuchteten Raum gegenüber einem Fenster statt (Abbildung 45). In der Messposition auf einem Tisch betrug die Beleuchtungsstärke E = 650 lx bei CCT = 4700 K. Gegenüber der Beleuchtungssituation 1 wurde in Beleuchtungssituation 2 verstärkt von vorn beleuchtet. Auch hier

wurde die Messposition auf der Probe so gewählt, dass der Schatter gerichtete Reflexionen in Beobachterrichtung verhinderte. Der Beobachtungswinkel betrug 45°.

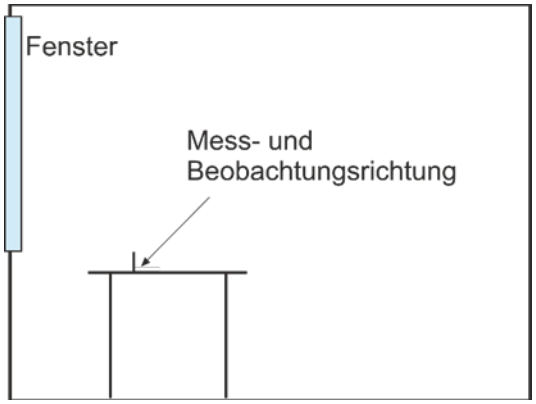


Abbildung 45: Seitenansicht der Beleuchtungssituation 2

Messmethode MM1

Zunächst wurden mit einem Leuchtdichtemessgerät CS-100A die Kontraste aller Probenpaare ohne Filter in beiden Beleuchtungssituationen vermessen. Die Messmethode mit dem Messwinkel von 45° entspricht [DIN 32975:2009] und soll als Referenz dienen. Die Werte sind jeweils in der 2. Spalte der Tabelle 22 und Tabelle 23 dargestellt.

Ebenfalls mit dieser Methode wurden die Kontraste mit aufgelegten Filtern vermessen (3. Spalte Tabelle 22 und Tabelle 23)

Messmethode MM2

Bei dieser Methode werden die Kontraste mit Filtern rein visuell bewertet. Die Messgeometrie entspricht der von MM1. Die Ergebnisse sind in der 5. Spalte in Tabelle 22 und Tabelle 23 dargestellt, wobei angegeben ist, ob die Proben gleich hell (=) sind oder die ursprünglich hellere Probe auch mit Filter heller (+) oder dunkler (-) ist.

Messmethode MM3

Um zu demonstrieren, wie ein automatisierte Kameramessung erfolgen kann, wurden für die Beleuchtungssituation 1 Messungen mit der Leuchtdichte-Messkamera LMK4 der Firma Technoteam durchgeführt. Die Auswertung kann hier in Messregionen (1 und 2 in Abbildung 46) oder entlang von Schnittlinien (3 in Abbildung 47) erfolgen. Die Kontraste, berechnet aus den Mittelwerten der Regionen 1 und 2 (Abbildung 46 rechts) sind in Tabelle 22, Spalte 6 dargestellt. Der Leuchtdichte-Verlauf entlang der Linie 3 ist in Abbildung 47 beispielhaft für die Probe 4 dargestellt. Man erkennt, dass bei der Messung ohne Filter die rechte Probe heller ist (grüne Kurve), bei der Messung mit Filter jedoch dunkler (rote Kurve).

Solcherlei Auswertungen von Bildern können beispielsweise in einer Handy-App automatisiert werden, nachdem der Nutzer Auswertebereiche oder -linien vorgegeben hat.

Messmethode MM4

Bei der Messmethode 3 kam eine Leuchtdichtekamera zum Einsatz, die in der Praxis nur selten zur Verfügung steht. Deshalb sollte überprüft werden, ob auch in Bildern von beliebigen Kameras Kontraste ausgewertet werden können. In beiden Beleuchtungssituationen wurden aus der Beobachterrichtung Fotos mit einer Handykamera (iPhone12) aufgenommen und mit dem Bildverarbeitungsprogram Corel-Photopaint-2021 die mittleren Graustufen zweier Regionen zu einem Kontrast verrechnet (Abbildung 48). Die Ergebnisse sind in der letzten Spalte in Tabelle 22 und Tabelle 23 zusammengestellt.

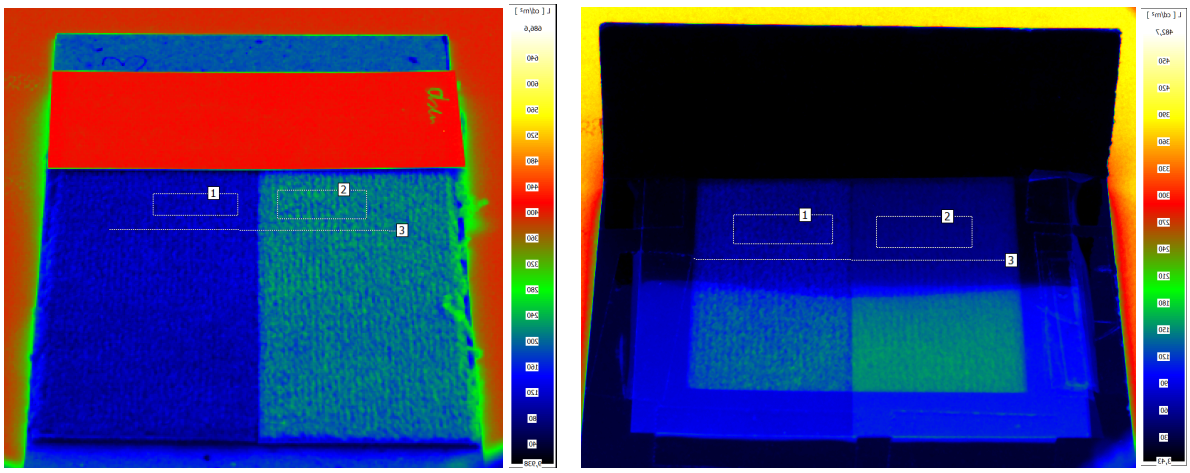


Abbildung 46: Leuchtdichtebilder der Probe 4, links: ohne Filter, rechts: mit Filter, mit 2 und 2 sind die flächigen Auswerteregionen gekennzeichnet, mit 3 ist eine Linie gekennzeichnet, an deren Verlauf die Leuchtdichte in Bild 11 dargestellt ist.

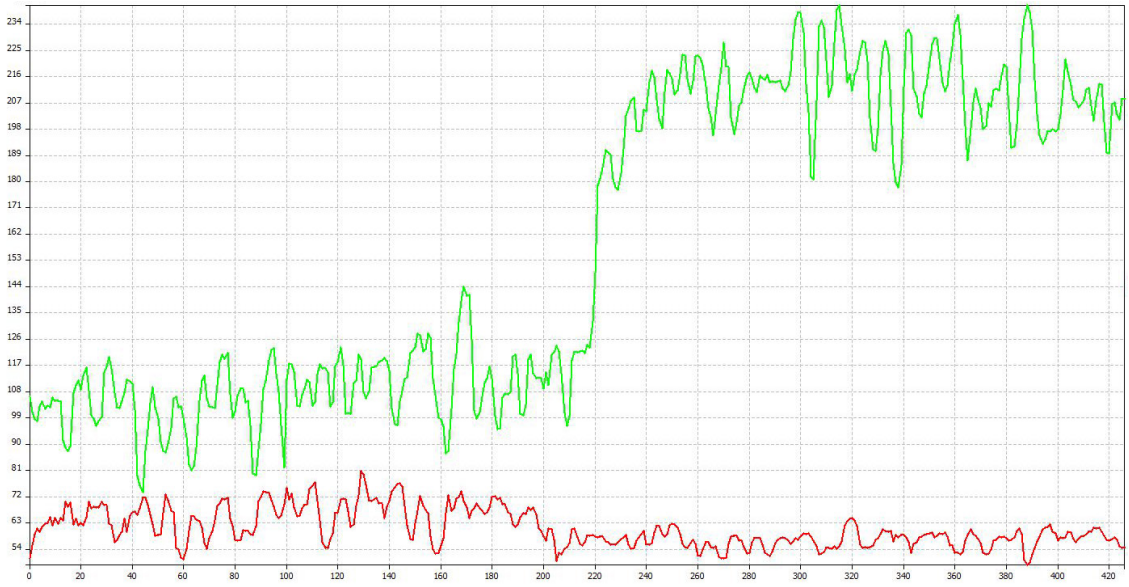


Abbildung 47: Leuchtdichteverlauf auf Probe 4 entlang der Linie 3 in Abbildung 46. Bei der Messung ohne Filter ist die rechte Probe heller ist (grüne Kurve), bei der Messung mit Filter jedoch dunkler (rote Kurve).

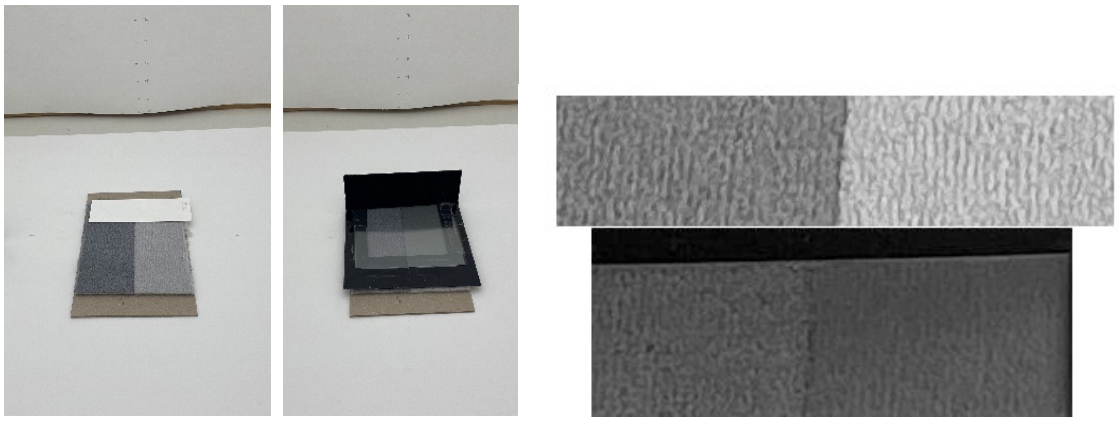


Abbildung 48: links: Foto der Probe 4 ohne Filter, Mitte: Foto der Probe 4 mit Filter, rechts: ausgewählte Bereiche für die Graustufenauswertung

Fotos: Cornelia Vandahl, TU Ilmenau

Ergebnisse

In Tabelle 19 und Tabelle 20 sind die Ergebnisse der einzelnen Messmethoden zusammengefasst. In der zweiten Spalte sind die Kontraste aufgeführt, die die Probenpaare ohne Filter in der jeweiligen Beleuchtungssituation haben. Die Messungen erfolgten mit dem Leuchtdichtemessgerät. Aufgrund der unterschiedlichen Beleuchtungsspektren und Lichtrichtungen unterscheiden sich die Kontraste der Probenpaare in den beiden Situationen. Die größte Differenz im Kontrast (0,07) wurde bei Probe 5 festgestellt.

Die Probenpaare mit Filter wurden mit den verschiedenen Messmethoden vermessen und die Ergebnisse gegenübergestellt, wobei die Messung mit dem Leuchtdichtmessgerät die Referenz bildet. Aus diesen Messwerten wurden zunächst nach Formel (18 der Kontrast der Probenpaare K aus KF berechnet. Es zeigt sich eine ausreichend gute Übereinstimmung, was die Richtigkeit des Verfahrens und der Dimensionierung der Filterfolien bestätigt.

Der Vergleich der Messmethoden MM1 (Leuchtdichtemessgerät) und MM3 (Leuchtdichtekamera) zeigt, dass Abweichungen im absoluten Kontrast bis zu 0,05 (Probe 2, Tabelle 22) auftreten können. Die Kontrastrichtung (kleiner oder größer als Null) ist für beide Messmethoden immer gleich. Liegen die zu messenden Kontraste im Bereich von -0,05 und 0,05 beträgt die größte Abweichung im absoluten Kontrast 0,014

Bei stark strukturieren Proben kann das Ergebnis der Leuchtdichtekamera-Messung von der Auswahl der Messregion abhängen. Messwiederholungen haben gezeigt, dass hier mit Abweichungen von K = 0,02 zu rechnen ist.

Die Auswertung von Handy-Fotos zur Kontrastbestimmung zeigte auch sehr gute Übereinstimmungen zur Messung mit dem Leuchtdichtemessgerät. Die absoluten Abweichungen betrugen bis 0,06 (Probe 2, Tabelle 23). Liegen die zu messenden Kontraste im Bereich von -0,05 und 0,05 beträgt die größte Abweichung im absoluten Kontrast 0,03. Bei zwei Probenpaaren wurde eine Kontrastumkehr gegenüber der Referenzmessung festgestellt.

Der visuelle Vergleich zweier Proben lässt nur eine Aussage darüber zu, ob der vorliegende Kontrast positiv oder negativ ist. Bei drei „Messungen“ zeigten sich hier Abweichungen von der Referenz (Proben 5 und 6 in der Messbox und Probe 6 bei Tageslicht). Kontraste von -0,039 bis 0,059 wurden als „gleich“ bewertet, sodass hier ein etwas größerer Fehler als bei den Messmethoden MM1, MM3 und MM4 zu verzeichnen ist.

Insgesamt zeigte sich, dass bei den verschiedenen Beleuchtungssituationen und Messmethoden mit absoluten Abweichungen im Kontrast von ±0,03 zu rechnen ist.

Mit Filtern sollten alle Probenpaare, die einen Kontrast kleiner als 0,35 haben, einen Kontrast von kleiner als 0 haben. Aufgrund der Messfehler ergibt sich, dass Kontraste größer als 0,32 (0,35-0,03) den Test bestehen können und Kontraste kleiner als 0,38 (0,35+0,03) den Test nicht bestehen können. Insofern ist das Messgerät geeignet, Probenpaare, die einen Kontrast kleiner als 0,32 haben, sicher zu erkennen. Das betrifft in der Messbox die Probenpaare 1 bis 4 und bei den Tageslichtmessungen die Probenpaare 1 bis 3 und 8.

Probenpaare, die einen Kontrast von 0,38 oder mehr haben, werden ebenfalls sicher erkannt. Das betrifft in der Messbox die Probenpaare 8 bis 13 und bei den Tageslichtmessungen die Probenpaare 5 und 9 bis 13.

Kontraste im Zwischenbereich sind nicht sicher zuordenbar. Die Probenpaare 5 bis 7 würden je nach Beleuchtungssituation und Messmethode die Prüfung bestehen oder nicht.

Tabelle 22: Messungen und Beobachtungen in der Messbox. Bei den Messungen mit Filter sind die Ergebnisse wie folgt farblich gekennzeichnet: Grün: der Ausgangskontrast ist größer oder gleich dem Prüfkontrast, Rot: der Ausgangskontrast ist kleiner als der Prüfkontrast. Die Zeilen sind in der Reihenfolge des Ausgangskontrastes sortiert.

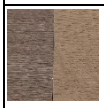
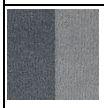
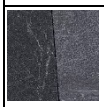
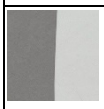
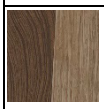
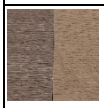
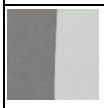
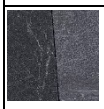
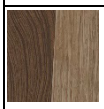
Probe	Kontrast ohne Filter K MM1	L-Messgerät mit Filter K_F MM1	Kontrast ohne Filter K aus K_F nach MM1 und Formel (18)	Visuell mit Filter K_F MM2	L-Kamera mit Filter K_F MM3	Handy-Foto mit Filter K_F MM4
1	**0,054**	-0,340	0,014	-	-0,327	-0,295
 2	**0,157**	-0,213	0,151	-	-0,162	-0,155
3	**0,235**	-0,159	0,205	-	-0,131	-0,143
 4	**0,307**	-0,085	0,275	-	-0,063	-0,046
 5	**0,329**	-0,004	0,348	=	-0,006	0,000
6	**0,335**	-0,051	0,307	-	-0,045	-0,020
.7	**0,341**	-0,016	0,338	=	-0,002	0,013
 8	**0,355**	0,007	0,358	=	0,005	0,000
 9	**0,357**	0,052	0,397	=	0,054	0,026
10	**0,440**	0,125	0,457	+	0,142	0,176
11	**0,712**	0,587	0,778	+	0,564	0,583
12	**0,713**	0,522	0,738	+	0,515	0,459
13	**0,899**	0,805	0,901	+	0,784	0,788

Tabelle 23: Messungen und Beobachtungen im mit Tageslicht beleuchtetem Raum. Bei den Messungen mit Filter sind die Ergebnisse wie folgt farblich gekennzeichnet: Grün: der Ausgangskontrast ist größer oder gleich dem Prüfkontrast, Rot: der Ausgangskontrast ist kleiner als der Prüfkontrast. Die Zeilen sind in der Reihenfolge des Ausgangskontrastes sortiert

Probe	Kontrast ohne Filter MM1	L-Messgerät mit Filter MM1	Kontrast ohne Filter K aus K_F nach MM1 und Formel (18)	Visuell mit Filter MM2	Handy-Foto mit Filter MM4
1	**0,034**	-0,313	0,045	-	-0,322
 2	**0,185**	-0,211	0,153	-	-0,179
3	**0,200**	-0,176	0,188	-	-0,190
 8	**0,325**	-0,014	0,340	-	-0,042
6	0,339	-0,046	0,311	-	-0,059
4	0,348	-0,058	0,300	-	-0,065
7	0,349	-0,039	0,317	=	-0,008
 5	0,399	0,057	0,402	=	0,059
 9	0,413	0,049	0,394	+	0,030
10	0,473	0,160	0,485	+	0,143
11	0,773	0,524	0,740	+	0,577
12	0,689	0,440	0,688	+	0,459
13	0,871	0,667	0,825	+	0,627

Für die sichere Anwendung dieser Messmethode in der Praxis sollten die Filter so gewählt werden, dass der Messfehler nicht zu falschen Aussagen führen kann. In Tabelle 24 ist eine Filterkombination vorgeschlagen, die sicherstellt, dass Kontraste kleiner als 0,40 durch die Messung oder visuelle Beobachtung sicher erkannt werden.

Tabelle 24: Transmissionsgrade für die Prüfung nicht selbst leuchtender Proben bei Verwendung von 2 Filtern.

τ_D	τ_D^2	τ_H	τ_H^2	f	$K_{Prüf}$
0,930	0,865	0,587	0,345	0,398	0,43 ± 0,03

Die praktische Umsetzung des Prototyps kann mit Glasfiltern oder einfachen Filterfolien erfolgen. Letztere haben den Vorteil, preisgünstig zu Verfügung zu stehen. Eine Langzeitstabilität ist jedoch nicht gewährleistet. Soll die Kontrastinterpretation anhand von Fotos erfolgen, ist in Betracht zu ziehen, wie die Software aus dem Foto den Grauwert generiert. Letztendlich sollen jedoch keine absoluten Kontraste gemessen werden, sondern lediglich festgestellt werden, ob die ohne Filter hellere Probe auch mit Filter noch als die hellere Probe wahrgenommen wird.

Mit dem vorgeschlagenen Verfahren ist eine erste orientierende Prüfung möglich, ohne aufwändige Messtechnik vorhalten zu müssen. Das Verfahren ersetzt nicht die fachgerechte Messung durch qualifiziertes Personal sondern kann nur den Hinweis erbringen, dass Handlungsbedarf besteht.

Ableitungen von Empfehlungen für die Umsetzung in Regelwerken

Beleuchtungsniveau

Die Studienergebnisse lassen Schlüsse darüber zu, welche Leuchtdichten erforderlich sind, damit ein bestimmter Anteil an Personen mit einer vorgegebenen Erkennungswahrscheinlichkeit, ein Sehzeichen erkennen kann. Auf dieser Basis kann im nächsten Schritt die Umsetzung in eine Norm oder in ein Regelwerk erfolgen, wobei sich das umsetzende Gremium darüber abstimmen muss, wie hoch der Anteil einzuschließender (bzw. auszuschließender) Personen sein soll. Der im Kapitel „Grundlagenuntersuchungen" verwendete Anteil (Häufigkeit) von 80 % darf daher nur als Vorschlag betrachtet werden, von dem abgewichen werden kann. Sollen beispielsweise 90 % der Personen eingeschlossen werden, ergeben sich Zusammenhänge nach Abbildung 63 im Anhang. Die im folgenden vorgeschlagenen Leuchtdichten wurden aus den Untersuchungsergebnissen abgeleitet, die für die Erkennungswahrscheinlichkeit von 100 % ermittelt wurden. Diese liegen etwa 2- bis 3-fach über den Schwellenwerten.

Außenbeleuchtung

Für den Einschlusses von 80 % der Untersuchungsgruppe mit einer Erkennungswahrscheinlichkeit von 100 % lassen sich aus den Studienergebnissen Anforderungen an die Leuchtdichte ableiten, wenn man von einer normgerechten Beleuchtung mit Blendwerten bis TI = 20 % ausgeht (vgl. auch Abbildung 24).

Im Falle einer Kontrastreduktion von den derzeit geforderten 0,40 auf 0,25 muss die Leuchtdichte um den Faktor 2 erhöht werden. Damit ergeben sich die in Tabelle 25 dargestellten Vorgaben für Leuchtdichten, Beleuchtungsstärken und Beleuchtungsklassen nach [DIN EN 13201-2:2016]. Die Anforderungen an die Leuchtdichten für Kontraste kleiner als 0,25 liegen im Bereich zwischen 5 und 30 cd/m^2. Diese hohen Werte lassen sich nicht sinnvoll umsetzen. Eine lokale Aufhellung um mehr als den Faktor 3 führt zu starken Umgleichmäßigkeiten im Gesichtsfeld und damit zu Adaptationsproblemen.

Tabelle 25: Beleuchtungsstärkeanforderungen im Außenraum für verschiedene Beleuchtungsklassen nach [DIN EN 13201-2:2016]

Kontrast	Leuchtdichteanforderung	Beleuchtungsstärke bei ρ = 0,20	Beleuchtungsklassen nach [DIN EN 13201-2:2016]
0,40	1,50 cd/m^2	25 lx	C1
0,25	3,00 cd/m^2	50 lx	C0

In der Außenbeleuchtung erfolgt die Festlegung der notwendigen Beleuchtungsstärke oder Leuchtdichte anhand der Schwierigkeit der Sehaufgabe, die über die Beleuchtungsklassenwahl berücksichtigt wird. Je größer die Anzahl und Vielfalt der Straßennutzer und die Dichte der Konfliktbereiche, desto höher muss das Beleuchtungsniveau sein (Tabelle 11).

Den Anforderungen der sehbehinderten Personen, die aus dieser Studie abgeleitet wurden, werden die Normwerte kaum gerecht. Die Beleuchtungsstärkeanforderungen nach Tabelle 25 werden für K = 0,40 nur in den Klassen C0 und C1, für K = 0,25 sogar nur in der Beleuchtungs-Klasse C0 erfüllt. Eine Abkehr vom derzeit geforderten Mindest-Kontrast von K = 0,40 lässt sich mit den Studienergebnissen nicht begründen. Selbst die Umsetzung der Forderung von 1,50 cd/m^2 in allen Bereichen erscheint unrealistisch.

Leichter umsetzbar ist die Forderung, in Bereichen mit nicht normgerechten Kontrasten, die Verwendung einer höheren Beleuchtungsklasse zu fordern. So führt die Erhöhung um zwei Beleuchtungsklasse-Stufen zu einem Faktor von ca. 2 (Tabelle 26) und die Erhöhung um drei Beleuchtungsklasse-Stufen zu einem Faktor von ca. 3 (Tabelle 27) bei den Beleuchtungsstärkewerten. Die Implementierung dieses Vorschlags gewährleistet jedoch nicht die Einbeziehung von 80 % der Personen mit einer Erkennungswahrscheinlichkeit von 100 %, würde aber der heutigen Praxis mit K = 0,40 entsprechen.

Tabelle 26: Empfohlene Erhöhung um zwei Beleuchtungsklassen, auf diese Weise wird der Erhöhungsfaktor 2 erreicht

Änderung der Klasse	Beleuchtungsstärkeanforderung	Leuchtdichte bei ρ = 0,20	Faktor
P6 zu P4	von 2,00 lx auf 5,00 lx	0,13 cd/m² auf 0,32 cd/m²	2,5
P5 zu P3	von 3,00 lx auf 7,50 lx	0,19 cd/m² auf 0,47 cd/m²	2,5
P4 zu P2	von 5,00 lx auf 10,0 lx	0,32 cd/m² auf 0,64 cd/m²	2
P3 zu P1	von 7,50 lx auf 15,0 lx	0,47 cd/m² auf 0,95 cd/m²	2
P2 zu C2	von 10,0 lx auf 20,0 lx	0,64 cd/m² auf 1,27 cd/m²	2
P1 zu C1	von 15,0 lx auf 30,0 lx	0,95 cd/m² auf 1,91 cd/m²	2

Tabelle 27: Empfohlene Erhöhung um drei Beleuchtungsklassen, auf diese Weise wird der Erhöhungsfaktor 3 erreicht

Änderung der Klasse	Beleuchtungsstärkeanforderung	Leuchtdichte bei ρ = 0,20	Faktor
P6 zu P3	von 2,00 lx auf 7,50 lx	0,13 cd/m² auf 0,47 cd/m²	3,75
P5 zu P2	von 3,00 lx auf 10,0 lx	0,19 cd/m² auf 0,64 cd/m²	3,33
P4 zu P1	von 5,00 lx auf 15,0 lx	0,32 cd/m² auf 0,95 cd/m²	3
P3 zu C2	von 7,50 lx auf 20,0 lx	0,47 cd/m² auf 1,27 cd/m²	2,66
P2 zu C1	von 10,0 lx auf 30,0 lx	0,64 cd/m² auf 1,91 cd/m²	3
P1 zu C0	von 15,0 lx auf 50,0 lx	0,95 cd/m² auf 3,18 cd/m²	3,33

Innenbeleuchtung

In der Studie wurde keine innenraumtypische Beleuchtungssituation mit dort typischen Blendwerten untersucht. Die Abschätzung von notwendigen Leuchtdichten soll daher auf der Grundlage der in Tabelle 10 dargestellten Erhöhungsfaktoren erfolgen.

Zunächst wird betrachtet, dass im Innenbereich kleinere Sehobjekte im Vergleich zum Außenbereich erkannt werden müssen. Daher dienen die Ergebnisse für den 1 cm breiten Streifen als Grundlage als Ausgangswert. Bei diesem zeigt sich ein signifikanter Einfluss der Kontrastrichtung. Für den Negativkontrast ist im Vergleich zum Positivkontrast etwa die doppelte Leuchtdichte erforderlich.

Zu beachten ist außerdem, dass das Szenario „blendfrei" einer Laborsituation entsprach. Die untersuchte Situation „mit Blendung" entsprach der einer nächtlichen Straßenbeleuchtung mit TI = 20 %. Normgerecht beleuchtete Innenräume weisen deutlich weniger Blendung auf, entsprechen aber ebenfalls nicht der untersuchten „blendfreien" Situation. Nach Norm können UGR-Werte bis 28 auftreten, die zugehörigen TI-Werte liegen dann bei ca. 7 %. Aufgrund der geringeren Blendung wird ein Erhöhungsfaktor von 5 ausgehend von den Untersuchungsergebnissen der blendfreien Situation vorgeschlagen. Insgesamt ergibt sich damit ein Faktor von 10, mit dem die ermittelten Leuchtdichten für den 1 cm breiten Streifen beaufschlagt werden. Die so ermittelten Werte wurden anschließend gerundet (Tabelle 28 und Abbildung 49).

Tabelle 28: Vorschlag für Leuchtdichten, die erforderlich sind, damit 80 % der Untersuchungsgruppe die angegebenen Kontraststufen für B = 1 cm im Negativkontrast erkennen (Erkennungswahrscheinlichkeiten 6 von 6). Die Werte wurden mit dem Faktor 10 aus den Werten der Positivkontraste ohne Blendung ermittelt.

Kontrast	Leuchtdichteanforderung	Beleuchtungsstärke bei ρ = 0,20
0,40	3,00 cd/m²	50 lx
0,25	9,00 cd/m²	150 lx
0,16	27,0 cd/m²	450 lx

In [DIN EN 12464-1:2021] sind in verschiedenen öffentlichen Bereichen innerhalb von Gebäuden Werte für die Beleuchtungsstärke festgelegt. Dabei gibt es Mindestwerte und modifizierte (erhöhte) Werte. Eine Erhöhung wird empfohlen, wenn die Sehbedingungen von den üblichen Annahmen abweichen, u. a. dann, wenn die Sehfähigkeit der Personen unter dem üblichen Sehvermögen liegt. Beim Vorliegen weiterer Gründe wird eine Erhöhung um 2 Stufen empfohlen.

In Tabelle 29 sind die Anforderungen an die Beleuchtungsstärke in den 3 Stufen dargestellt. Die geringsten Anforderungen gibt es im Bereich von Korridoren und Treppen. Bei Einhaltung des Wartungswertes ohne Erhöhung aufgrund besonderer Bedingungen sind dort nur E = 100 lx Beleuchtungsstärke zu erwarten, das entspricht einer Leuchtdichte von 6 cd/m² und würde der in Tabelle 28 vorgeschlagenen Leuchtdichteanforderung für den Kontrast K = 0,25 nicht entsprechen. Die Erhöhung der Beleuchtungsstärke um eine Stufe führt zu den vorgeschlagenen E = 150 lx.

Aus den Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass im Innenbereich von der derzeitigen Anforderung an den Mindest-Kontrast von K = 0,40 nur abgewichen werden kann, wenn bei der Beleuchtungsplanung die modifizierten Beleuchtungsstärkewerte der [DIN EN 12464-1:2021] verwendet werden.

Tabelle 29: Wartungswerte der Beleuchtungsstärke in verschiedenen öffentlichen Bereichen innerhalb von Gebäuden aus [DIN EN 12464-1 2021] und daraus abgeleitete Leuchtdichten

Bereich der Sehaufgabe	Mindest Beleuchtungsstärke Modifizierte Beleuchtungsstärke um 2 Stufen erhöhte Beleuchtungsstärke	Mindest-Leuchtdichte bei $\rho = 0{,}20$ Modifizierte Leuchtdichte um 2 Stufen erhöhte Leuchtdichte
Eingangshallen Korridore und Verkehrsflächen Treppen und Rolltreppen Fahrstühle	100 lx 150 lx 200 lx	6 cd/m² 10 cd/m² 13 cd/m²
Wartebereiche in Bahnhöfen und Flughäfen Bereiche vor Fahrstühlen und Rolltreppen	200 lx 300 lx 500 lx	13 cd/m² 20 cd/m² 32 cd/m²
Hotelrezeptionen Bibliotheken Schalterbereiche in Bahnhöfen	300 lx 500 lx 750 lx	20 cd/m² 32 cd/m² 50 cd/m²

Gesamtübersicht

In Abbildung 49 sind die aus den Untersuchungsergebnissen angeleiteten Vorschläge nochmal dargestellt. Sie gelten für die Erkennungswahrscheinlichkeit von 100 % und den Einschluss von 80 % der Untersuchungsgruppe aus dieser Studie.

Die Werte für die Außenbeleuchtung entsprechen denen der Untersuchung mit einem 2 cm breiten Streifen in Positivkontrast und mit einer Blendung mit TI = 20 %. Sowohl für den Kontrast von K = 0,40 als auch K = 0,25 liegen die Anforderungen (1,5 cd/m² bzw. 3 cd/m²) über den Leuchtdichten, der meist für Fußgängerbereichen vorwendeten P-Klassen.

Für den Innenbereich wurde die vorgeschlagenen Leuchtdichten aus den Untersuchungsergebnissen des 1 cm breiten Steifens im Positivkontrast ohne Blendung auf den Negativkontrast mit innenraumtypischer Blendung hochgerechnet. Für den Kontrast von K = 0,40 sind demnach 3 cd/m² erforderlich, was im Innenraum nahezu überall erwartet werden kann. Die für den Kontrast von K = 0,25 erforderlichen 9 cd/m² liegen über den in der Norm festgelegten Werten für Korridore und Treppenbereiche.

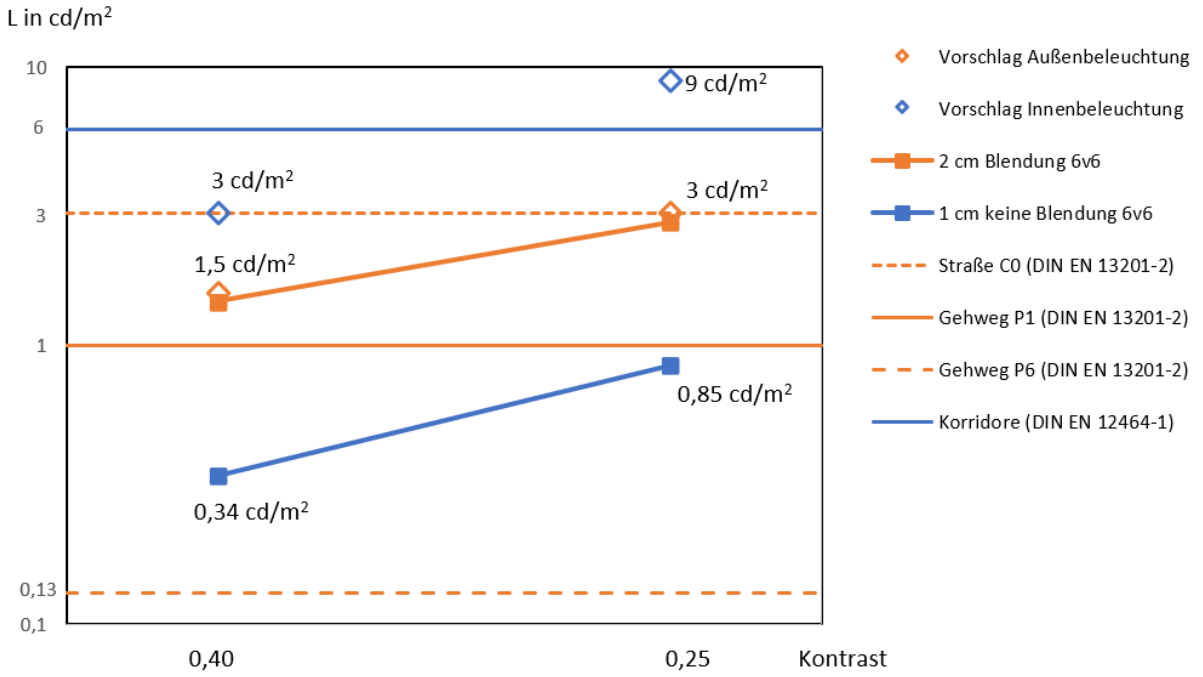


Abbildung 49: Zusammenfassung der vorgeschlagenen Leuchtdichten im Vergleich zu den Untersuchungsergebnissen (Abbildung 25) und derzeitigen Normen

Reflexionsgrade der Materialen

Nach [DIN 32975:2009] muss bei einem kontrastbildenden Objekt die hellere der beiden Flächen einen Reflexionsgrad von mindesten $\rho = 0{,}5$ haben. Diese Vorgabe gerät immer wieder in die Diskussion, da mit Naturstein und ähnlichen Materialen dieser Wert mitunter nur schwer erreichbar ist.

Für das Erkennen eines Kontrastes müssen zwei Leuchtdichten unterschieden werden können, s. Formel (14). Wie groß die wahrnehmbare Leuchtdichtedifferenz ist, hängt vom Adaptationszustand (mittlere Umgebungsleuchtdichte bzw. Adaptationsleuchtdichte L_A) und vom Verhältnis der kontrastbildenden Leuchtdichten zur Umgebungsleuchtdichte ab. Abbildung 50 soll das verdeutlichen. In den Fällen A bis D sind jeweils zwei kontrastbildende Halbkreise dargestellt. Die kontrastbildenen Leuchtdichten der Halbkreise L_1 und L_2 nehmen von links nach rechts ab, während der Kontrast gleichbleibend 0,40 beträgt. Die Objekte erscheinen immer dunkler und der Kontrast wird immer schlechter wahrnehmbar.

Die Leuchtdichten der kontrastbildenden Proben dürfen sich nur wenig von der mittleren Leuchtdichte der Umgebung unterscheiden. Sind sie sehr viel dunkler, erscheinen beide Proben eher schwarz und können nur schlecht unterschieden werden (Fall D in Abbildung 50). Sind sie sehr viel heller, können sie blenden. Dieser Fall kann bei gerichtet reflektierenden (d. h. glänzenden) Materialien auftreten.

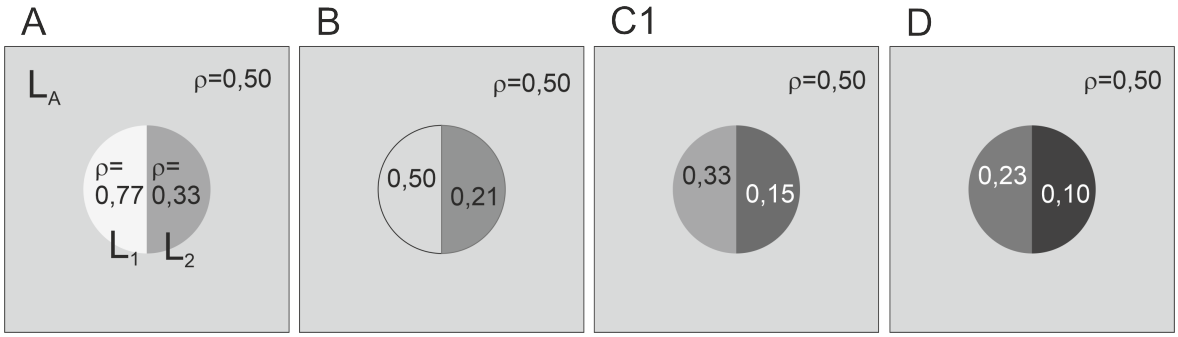


Abbildung 50: Beispielkontraste mit verschiedenen Reflexionsgraden der kontrastbildenen halbkreisförmigen Flächen. Die Umgebung wird hier beispielhaft mit einem mittleren Reflexionsgrad von 0,50 angenommen. Für die Fälle A bis D entsprechen bei Annahme einer konstanten Beleuchtungsstärke im gesamten Bereich die Reflexionsgradverhältnisse denen der Leuchtdichteverhältnisse (Zahlenwerte für die Leuchtdichten finden sich in Tabelle 30)

Die Leuchtdichte einer diffus reflektierenden Fläche hängt vom Reflexionsgrad ρ der Oberfläche und von der Beleuchtungsstärke E auf der Oberfläche ab.

Formel (30) $$L = \frac{E \cdot \rho}{\pi \cdot \Omega_0}$$

mit: L Leuchtdichte der Probe
E Beleuchtungsstärke auf der Probe
ρ diffuser Reflexionsgrad der Probe
Ω_0 Einheitsraumwinkel $\Omega_0 = 1$ sr

Da die Beleuchtungsstärke auf beider Proben als gleich angenommen werden kann, lässt sich der Kontrast auch aus den Reflexionsgraden der kontrastbildenen Flächen ermitteln:

Formel (31) $$K = \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$$

mit: ρ_1 diffuser Reflexionsgrad der Probe 1
ρ_2 diffuser Reflexionsgrad der Probe 2

In Abbildung 50 entsprechen bei Annahme einer konstanten Beleuchtungsstärke im gesamten Bereich die Reflexionsgradverhältnisse denen der Leuchtdichteverhältnisse. In Tabelle 30 sind beispielhaft die Leuchtdichten der Felder in Abbildung 50 dargestellt, wenn die Beleuchtungsstärke E = 500 lx beträgt. Die Umgebungsleuchtdichte ist dann 80 cd/m². Die Leuchtdichten der Sehobjekte in den Fällen A und B liegen zwischen 34 und 122 cd/m². In den Fällen C und D liegt sowohl die höhere als auch die niedrigere Leuchtdichte unterhalb der Umgebungsleuchtdichte. Je kleiner die Leuchtdichten der Objekte im Vergleich zur Umgebungsleuchtdichte sind, desto schlechter ist der Kontrast wahrnehmbar.

Tabelle 30: Leuchtdichten der Felder aus Abbildung 50, wenn die Beleuchtungsstärke E=500 lx beträgt.

Fall	ρ_1	ρ_2	E	$L_{Umgebung}$	L_1	L_2	K
Umgebung	0,50		500	80			
A	0,77	0,33	500	80	122	52	0,40
B	0,50	0,21	500	80	80	34	0,40
C	0,33	0,14	500	80	52	22	0,40
D	0,23	0,10	500	80	37	16	0,40

In der praktischen Anwendung ist damit zu rechnen, dass die Umgebungsleuchtdichte nicht durch die Kontrastobjekte und deren direktes Umfeld, sondern durch große helle Flächen, wie Fenster oder Leuchten bestimmt wird. Abbildung 51 verdeutlich das an zwei Beispielen. Das linke Bild entspricht dem Beispiel in Tabelle 30 und Abbildung 50. Im rechten Foto adapiert der Beobachter auf die Leuchtdichte des Himmels, die in der Größenordnung von 7000 bis 15000 cd/m^2 liegen kann. In Innenraum-Situationen erhöht sich die Leuchtdichte der Testfelder jedoch nicht im gleichen Maße, sondern liegt jetzt mehrere Größenordnungen unter der Umgebungsleuchtdichte. Damit erscheinen die Testfelder sehr dunkel und sind daher schlechter wahrnehmbar. Um diesen Effekt möglichst gering zu halten, besteht die in der Norm festgelegte Anforderung, dass der Reflexionsgrad der helleren Fläche mindesten 0,5 betragen soll. Diese Anforderung ist sinnvoll, eine Abweichung davon ist nicht zu empfehlen.

Abbildung 51: Testfelder mit 4 verschiedenen Reflexionsgraden (v. l. n. r.: 0,06; 0,17; 0,42, 0,89) in 2 verschiedenen Beleuchtungssituationen, links: die Umgebungsleuchtdichte $L_{Umgebung}$ entspricht in etwa der Leuchtdichte der Testfelder, rechts: die Umgebungsleuchtdichte $L_{Umgebung}$ wird durch die Leuchtdichte des Himmels bestimmt und ist um Größenordnungen größer.

Foto: Cornelia Vandahl, TU Ilmenau

Bei der Verwendung von Natursteinen oder ähnlichen Baumaterialien liegt der Reflexionsgrad mehrheitlich zwischen 0,10 und 0,50. 47 der 52 in Kapitel „Anwendung des Verfahrens mit den Materialien aus dem Projekt der TU Dresden“ betrachteten Materialen (Abbildung 35) haben einen Reflexionsgrad von weniger als 0,50. Die Auswahl an Materialien mit einem Reflexionsgrad von mindesten 0,5 ist also sehr begrenzt.

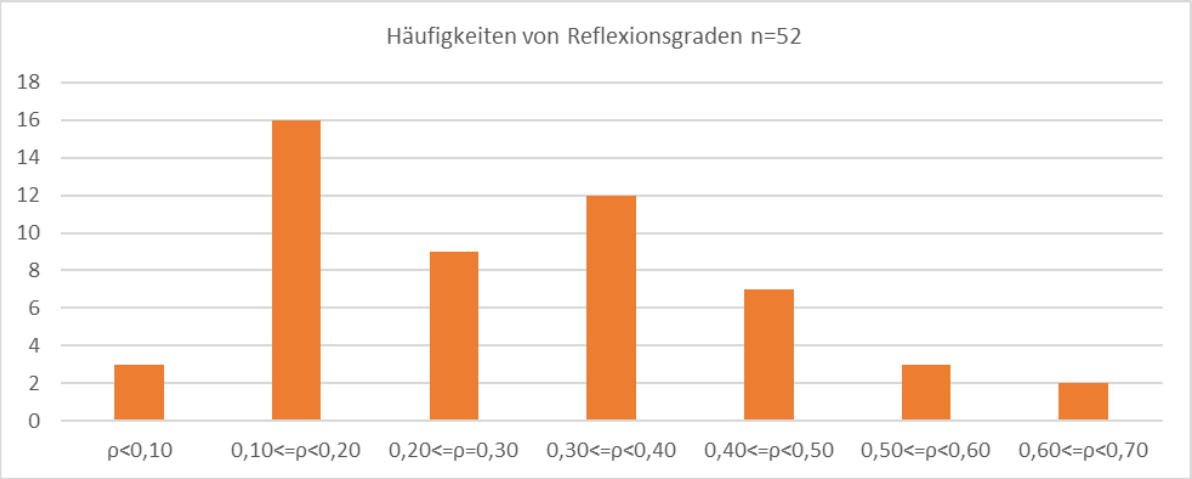


Abbildung 52: Häufigkeitsverteilung der Reflexionsgrade der 52 Materialen aus Abbildung 35 (unter Beleuchtung mit Normlichtart A)

In Bereichen, in denen die Anforderung nicht umsetzbar ist, kann durch gezielte Aufhellung durch zusätzliche Beleuchtung die Leuchtdichte erhöht werden, was gleichzeitig die Aufmerksamkeit in diesen Bereich lenkt. Aufgrund des Zusammenhangs nach Formel (30) hat die Erhöhung der Beleuchtungsstärke E auf einer Flächen den gleichen Effekt, wie die Erhöhung des Reflexionsgrades ρ. In Abbildung 53 soll das mit dem Fall C1 verdeutlicht werden. Eine Erhöhung der Beleuchtungsstärke auf dem Testfeld in Fall C2 führt dazu, dass Leuchtdichten wie in Fall B erreicht werden, obwohl die Normvorgabe $\rho = 0{,}50$ nicht erfüllt ist. Dabei muss die Beleuchtungsstärke E um den gleiche Faktor steigen, um den der Reflexionsgrad ρ geringer als der Zielwert ist, im Beispiel ist das der Faktor 1,5.

Formel (32) $$E_2 = E_1 \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

mit:
- E_1 Beleuchtungsstärke auf dem Testfeld B in Abbildung 53
- E_2 Beleuchtungsstärke auf dem Testfeld C2 in Abbildung 53
- ρ_1 Reflexionsgrad (= 0,50) von Testfeld B in Abbildung 53
- ρ_2 Reflexionsgrad (= 0,33) von Testfeld C2 in Abbildung 53

Wichtig ist, dass die zusätzliche Beleuchtung nun im Bereich des Sehobjektes stattfindet und nicht in der gesamten Umgebung. In der Praxis ist die Umsetzung dieses Ansatzes nur für die künstliche Beleuchtung sinnvoll möglich. Im Außenbereich mit Tageslicht sind die Beleuchtungsstärken zu hoch.

Die Erhöhung der Beleuchtungsstärke aufgrund zu geringer Reflexionsgrade ist nur dann umsetzbar, wenn nicht gleichzeitig erhöhte Beleuchtungsstärken aufgrund zu geringer Kontraste notwendig sind.

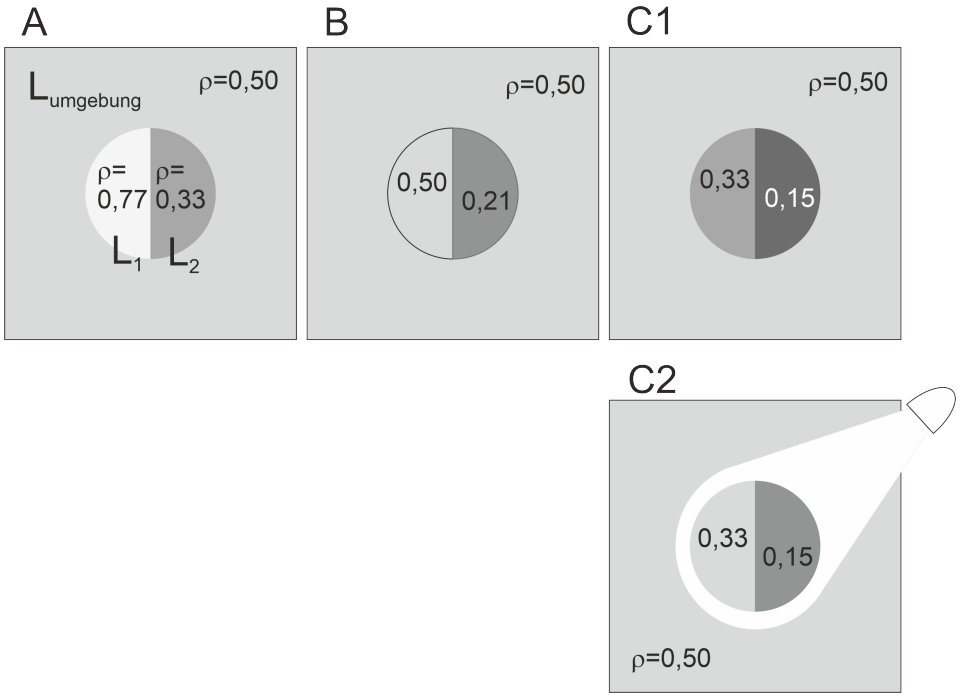


Abbildung 53: Beispielkontraste mit verschiedenen Reflexionsgraden der kontrastbildenen halbkreisförmigen Flächen. In Fall C2 (mit Reflexionsgraden von Fall C1) wird das Testfeld mit der 1,5-fachen Beleuchtungsstärke beleuchtet, daher entsprechen die Leuchtdichten denen von Fall B (Werte in Tabelle 31).

Tabelle 31: Leuchtdichten der Felder aus Abbildung 53, wenn die Beleuchtungsstärke E = 500 lx bzw. 750 lx beträgt.

Fall	ρ_1	ρ_2	E	$L_{Umgebung}$	L_1	L_2	K
Umgebung	0,50		500	80			
A	0,77	0,33	500	80	80	34	0,40
B	0,50	0,21	500	80	80	34	0,40
C1	0,33	0,15	500	80	52	22	0,40
C2	0,33	0,15	750	80	80	34	0,40

Blendungsbegrenzung

In der Blendungsbewertung wird zwischen physiologischer uns psychologischer Blendung unterschieden. Physiologische Blendung führt im Allgemeinen zur Verschlechterung des Sehvermögens. Die psychologische Blendung beeinträchtigt das subjektive Wohlbefinden bzw. verursacht eine Störung ohne das Sehvermögen von Sehgesunden nennenswert zu beeinflussen. Sehbehinderte Menschen können aber durchaus in ihrem Sehvermögen beeinflusst werden, da sie viel empfindlicher auf Blendung reagieren können.

Die Studienergebnisse zeigen eine deutliche Abhängigkeit davon, ob eine Blendquelle vorhanden ist oder nicht. Die Begrenzung der physiologischen Blendung durch Leuchten oder Fenster mit Tageslicht ergibt sich auch aus den Ausführungen des vorherigen Kapitels „Reflexionsgrade der Materialien“.

Für Anwendungen im Außenraum sollte das Blendungsbewertungsverfahren des TI-Wertes zur Bewertung der physiologischen Blendung zur Anwendung kommen. In [DIN 13201-2:2016] gibt es dafür Festlegungen, jedoch nur für die Beleuchtungsklassen M1 bis M6 für Verkehrswege mit motorisiertem Verkehr (Tabelle 32). Bei den Beleuchtungsklassen, die Fußgängerbereiche beinhalten, wird lediglich empfohlen, das Verfahren auch hier heranzuziehen.

Eine Begrenzung des TI-Wertes auf 10 % sollte immer dann gefordert werden, wenn die Kontraste nicht ausreichend hoch sind.

Tabelle 32: Höchstwerte für TI-Werte der M-Klassen aus [DIN EN 13201-2:2016]

M-Klasse	Begrenzung der Blendung (TI-Wert)
M1 und M2	10 %
M3 bis M5	15 %
M6	20 %

Im Innenraum wird die psychologische Blendung nach [DIN EN 12464-1:2021] durch Festlegung von maximal zulässigen UGR-Werten begrenzt. Typischerweise liegt der Wert für gut entblendete Beleuchtungssituationen bei 19, für hohe Anforderungen bei 16. Für viele Bereich, die auch öffentlich zugänglich sein können, wird im Allgemeinen mehr Blendung zugelassen. Die UGR-Werte können dort bis zu 28 reichen (Tabelle 33), die entsprechenden TI-Werte liegen dann bei ca. 7 %.

Tabelle 33: Höchstwerte für UGR-Werte im Innenraum aus [DIN EN 12464-1:2021] (Beispiele)

Arbeitsplätze bzw. öffentliche Bereiche im Innenraum	Begrenzung der Blendung (UGR-Wert)
Korridore und Verkehrsflächen	28
Treppen und Rolltreppen, Fahrstühle	25
Eingangshallen, Hotelrezeption, Bibliotheken, Wartebereiche in Bahnhöfen und Flughäfen	22
Schalterbereiche in Bahnhöfen	19

In der Dissertation [Hauck2018] wird für Sehbehinderte Menschen ein Wert kleiner 13 gefordert, was Blendung nahezu komplett ausschließt (ein UGR-Wert von 10 bedeutet keinerlei wahrnehmbare Blendung). Die Ergebnisse unserer Studie bestätigen diese Forderung. War Blendung vorhanden, müssen die Leuchtdichten der Sehobjekte um den Faktor 5 bis 20 höher sein, als im blendfreien Fall.

Zur Vermeidung von Blendung ist in [DIN EN 12464-1:2021] neben dem maximalen UGR-Wert ein Mindestabschirmwinkel festgelegt. Die Abschirmung soll verhindern, dass unter kritischen Blickwinkeln direkt in die Lichtquelle gesehen werden kann. Die Anforderung an den Mindestabschirmwinkel in der Norm ist abhängig von der Leuchtdichte der Lichtquelle und liegt im Bereich zwischen 15 und 30°. Im Sinne einer Barrierefreiheit sollte ein Mindestabschirmwinkel von 30° für jede Lichtquelle unabhängig von der Leuchtdichte gelten.

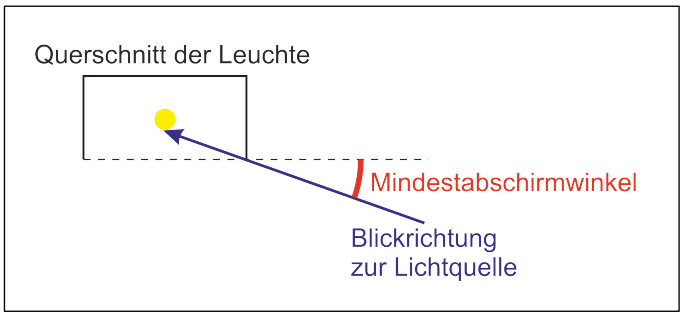


Abbildung 54: Darstellung des Mindestabschirmwinkel nach [DIN EN 12464-1:2021]

Lichtverteilung

Die für die Information und Leitung relevanten Bereiche (Bereich der Sehaufgabe) sollten die höchsten Leuchtdichten im Blickfeld aufweisen. Diese Forderung lässt sich aus verschiedenen Teilbereichen dieser Studie ableiten.

Mit geringer werdenden Kontrasten steigt die Anforderung an die Leuchtdichte. So wurde ermittelt, dass eine Kontrast-Absenkung von 0,40 auf 0,25 die 2- bis 3-fache Leuchtdichte erfordert, wenn sich die Erkennung nicht verschlechtern soll. Der Ansatz, in diesem Fall nur den relevanten Bereich aufzuhellen, führt gleichzeitig zu einer Aufmerksamkeitslenkung und damit erhöhten Auffälligkeit der Leitelemente. Der Leuchtdichteunterschied zwischen dem Bereich der Sehaufgabe und der daran angrenzenden Umgebung sollte nicht größer als 3:1 sein, die Forderung entspricht auch den Vorgaben aus [DIN EN 12464-1:2021]. Anforderungen an Gleichmäßigkeit innerhalb des Bereiches der Sehaufgabe und dem Umgebungsbereich nach [DIN EN 12464-1:2021] und [DIN EN 12464-2:2014] sowie [DIN EN 13201-2:2016] sind einzuhalten.

Eine um den Faktor 3 reduzierte Umgebungs-Leuchtdichte hat den weiteren Vorteil, dass von ihr weniger Blendung ausgeht. Die Studienergebnisse zeigen deutlich, dass Blendung das Kontrastsehen stark beeinflusst. Der Einfluss ist bei Personen mit Sehbehinderungen deutlicher als bei sehgesunden Personen.

Für den Fall, dass die Anforderung aus [DIN 32975:2009], dass bei einem kontrastbildenden Objekt die hellere der beiden Flächen einen Reflexionsgrad von mindesten $\rho = 0{,}5$ haben muss, nicht eingehalten wird, kann das begrenzte Aufhellen dieser Objekte zu einer verbesserten Erkennung führen, s. Kapitel „Reflexionsgrade der Materialien“.

Lichtfarbe

Durch die Wahl des Beleuchtungsspektrums kann der Kontrast von Sehobjekten erhöht werden. Ein Ansatz für die richtige Auswahl des Spektrums wird in Kapitel „Kontrastmaximierung durch Auswahl der Beleuchtungsspektren“ vorgestellt.

Liegen Messwerte des spektralen Leuchtdichtefaktors vor, kann das Verfahren nach Formel (10) und Formel (11) angewendet werden. Ist der damit ermittelte BRV-Wert größer als 1, sollte eine möglichst hohe Farbtemperatur (kaltweiße Beleuchtung) gewählt werden. Ist der BRV-Wert kleiner als 1, sollte eine möglichst niedrige Farbtemperatur (warmweiße Beleuchtung) gewählt werden.

Handlungsempfehlungen für die Praxis

Erweiterung vorhandener Empfehlungen

Für die Gestaltung und Überprüfung der in den Normen geforderten Kontraste und Reflexionsgrade der verwendeten Materialien gibt es bereits umfangreiche Handlungsempfehlungen.

Eine frei verfügbare Schrift der Schweizer Fachstelle „Hindernisfreie Architektur" [Schmidt 2017] informiert ausführlich darüber, worauf bei der Gestaltung von Kontrasten zu achten ist. Dazu gehören nicht nur die Materialauswahl, sondern auch die Nachprüfung der Vorgaben (Messung von Kontrasten und Reflexionsgraden) und die Planung der räumlichen Gestaltung. Auf dieser Veröffentlichung beruht eine ähnliche Informationsschrift des Deutschen Blinden- und Sehbehindertenverbandes [DBSV 2016], diese bezieht sich allerdings nur auf Bereiche in Gebäuden, während die Schweizer Fachstelle auch Wege im Außenbereich mit betrachtet.

In beiden Schriften wird darauf hingewiesen, dass die Beleuchtung entscheidend für die Wahrnehmung von Kontrasten ist. Insbesondere wird darauf verwiesen, dass die Beleuchtung möglichst blendfrei sein soll. Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen diese Aussagen vollumfänglich.

„Bei sehr geringen Leuchtdichten kann das Auge Unterschiede zwischen zwei kontrastierenden Flächen nur schwer erkennen. Bei einer hohen (natürlichen oder künstlichen) Beleuchtungsstärke erhöht sich auch die Leuchtdichte des Objektes, wodurch der Kontrast besser wahrnehmbar ist. [Schmidt 2017]. „Bei guter Beleuchtung sind Kontraste erkennbar, auch wenn die Kontrastwerte im unteren Grenzbereich liegen" [DBSV 2016]. Auch diese Aussagen werden durch die Untersuchungsergebnisse untermauert.

Die folgenden Punkte können in die Handlungsempfehlungen aufgenommen werden.

Gezielte Erhöhung des Beleuchtungsniveaus bei nicht ausreichenden Kontrasten

Hohe Kontraste und hohe Reflexionsgrade der Materialien sind die besten und energetisch effizientesten Maßnahmen, um ein sicheres Erkennen der visuellen Informationen zu gewährleisten. In Bereichen und Situationen, wo die Vorgaben nicht einhaltbar sind (beispielsweise in denkmalgeschützten Bereichen) kann die gezielte Erhöhung der Beleuchtungsstärke, dazu führen, dass auch Kontraste im Bereich von 0,25 bis 0,40 sicher erkannt werden können. Es empfiehlt sich, die relevanten Bereich mit der 2- bis 3-fachen Beleuchtungsstärke (relativ zum sonstigen Bereich) zu beleuchten. Eine weitere Erhöhung führt zu einer stark ungleichmäßigen Beleuchtung und muss daher vermieden werden.

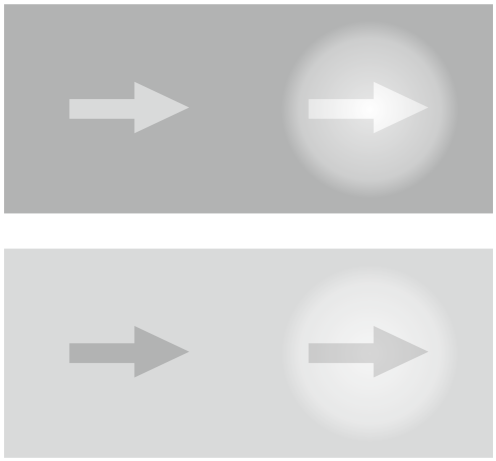


Abbildung 55: Gezielte Erhöhung des Beleuchtungsniveaus im Bereich des Sehobjektes. Oben: Positivkontrast, unten: Negativkontrast. Links: keine Erhöhung, rechts Erhöhung des Beleuchtungsniveaus. Der Kontrast beträgt für alle 4 Fälle 0,25. Die gezielte Erhöhung des Beleuchtungsniveaus führt nicht zu einer Erhöhung des Kontrastes, allerdings kann dieser besser wahrgenommen werden. (Anmerkung: Die Darstellung ist symbolisch und kann je nach Drucktechnik oder Bildschirmdarstellung von der Realität abweichen.)

Für Innenraumbeleuchtungen gibt die Norm [DIN EN 12464-1:2021] Empfehlungen für die Wahl höherer Beleuchtungsstärken, so genannter modifizierter Beleuchtungsstärken. Bei der Gestaltung barrierefreier Räum sollten diese Werte für die Planung verwendet werden.

Im Außenbereich führt die Wahl höher Beleuchtungsklassen nach [DIN 13201-1:2005] und [DIN EN 13201-2:2016] zu höheren Beleuchtungsstärken. Bei Kontrasten von Bereich von 0,25 bis 0,40 führt nur die Klasse C0 zu ausreichend hohen Beleuchtungsstärken.

Gezielte Erhöhung des Beleuchtungsniveaus bei nicht ausreichenden Reflexionsgraden

Ein nicht ausreichend hoher Reflexionsgrad der helleren kontrastbildenden Fläche kann ebenfalls mit einer gezielten Erhöhung der Beleuchtungsstärke kompensiert werden. Liegt der Reflexionsgrad der helleren Fläche im Bereich von 0,25 bis 0,50 kann mit einer Verdopplung der Beleuchtungsstärke (relativ zum sonstigen Bereich) die Helligkeit der Sehobjekte erhöht werden. Auf diese Weise werden sie besser wahrgenommen und die Aufmerksamkeit in diesen Bereich gelenkt.

Wichtig ist, dass die zusätzliche Beleuchtung nun im Bereich des Sehobjektes stattfindet und nicht in der gesamten Umgebung. In der Praxis ist die Umsetzung dieses Ansatzes nur für die künstliche Beleuchtung sinnvoll möglich. Im Außenbereich mit Tageslicht sind die Beleuchtungsstärken sehr hoch und können nicht mit zusätzlicher künstlicher Beleuchtung sinnvoll erhöht werden.

Bei der Planung von Beleuchtungsanlagen im Außenraum [DIN EN 13201-2:2016] führt die Wahl einer höheren Beleuchtungsklassen zu den gewünschen höheren Beleuchtungsstärken (Tabelle 26 und Tabelle 27). Für Innenanlagen nach [DIN EN 12464-1:2021] gibt die Nomen Empfehlungen für die Wahl höherer Beleuchtungsstärken (s. a. Tabelle 29).

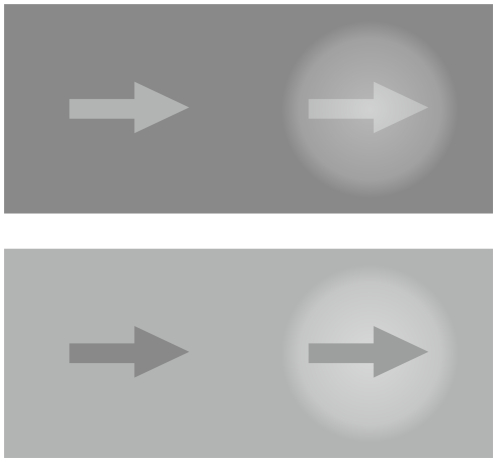


Abbildung 56: Gezielte Erhöhung des Beleuchtungsniveaus im Bereich des Sehobjektes. Oben: Positivkontrast, unten: Negativkontrast. Links: keine Erhöhung, rechts Erhöhung des Beleuchtungsniveaus. Der Kontrast beträgt für alle 4 Fälle 0,40 Der Reflexionsgrad der helleren Fläche beträgt jeweils 0,25. Die gezielte Erhöhung des Beleuchtungsniveaus führt dazu, dass die Kontraste trotz niedriger Reflexionsgrade gut wahrgenommen werden können. (Anmerkung: Die Darstellung ist symbolisch und kann je nach Drucktechnik oder Bildschirmdarstellung von der Realität abweichen.)

Hinweise zur gezielten Erhöhung des Beleuchtungsniveaus

Die gezielte Erhöhung der Beleuchtungsstärke kann **nicht gleichzeitig** zum Ausgleich zu geringer Kontraste **und** zu geringer Reflexionsgrande angewendet werden. Es kann immer nur ein Defizit ausgeglichen werden.

Werden glänzenden Materialen beleuchtet, muss die Richtung der Beleuchtung sorgfältig ausgewählt werden, um Reflexe zu vermeiden. Allgemein empfiehlt sich die Verwendung von matten, nicht glänzendem Material.

Blendungsbegrenzung

Blendung kann das Kontrastsehen in großem Maße beeinträchtigen und sollte daher vermieden werden. Wichtig ist vor allem, dass der direkte Blick auf das Leuchtmittel in der Leuchte durch entsprechende Abschirm-Maßnahmen verhindert wird. Das kann bereits bei der Auswahl der Leuchten erfolgen oder gegebenenfalls durch bauliche Maßnahmen oder entsprechender Positionierung der Leuchten erreicht werden.

Die Abstrahlung der Leuchten soll nach unten und weniger in die Breite erfolgen. Um trotzdem eine gleichmäßige Beleuchtung aller relevanten Bereiche zu erzielen, ist eine fachkompetente Planung erforderlich.

Für Anwendungen im Außenraum sollte in Fußgängerbereichen ein TI-Wert zur Begrenzung der Blendung von 20 % nicht überschritten werden. Eine Begrenzung des TI-Wertes auf 10 % sollte immer dann erfolgen, wenn die Kontraste nicht ausreichend hoch sind.

Lichtfarbe

Bei farbigen kontrastierenden Elementen, kann die Wahl einer geeigneten Lichtfarbe zu einer Erhöhung des Kontrastes führen. Ein Einfluss des Beleuchtungsspektrums ist zu erwarten, wenn die kontrastierenden Materialien unterschiedliche Farben aufweisen. Ist die hellere Probe eher bläulich, sollte eine hohe Farbtemperatur (kaltweiße Beleuchtung) gewählt werden. Ist sie eher rötlich, ist mit niedrigen Farbtemperaturn (warmweiße Beleuchtung) zu arbeiten. Im Zweifelsfall kann eine Bemusterung der Materialien unter verschiedenen Beleuchtungsspektren durchgeführt werden.

Zusammenfassung

Die visuelle Barrierefreiheit ist eine Voraussetzung dafür, dass Personen mit Seheinschränkungen selbstständig am öffentlichen Leben teilnehmen können. In Anforderungen und Normen gibt es deshalb Mindestkontraste und Vorgaben für die Reflexionsgrade der kontrastgebenden Materialen, mit denen die Sehobjekte realisiert werden müssen. Die Anforderungen an die visuellen Kontraste können bei Natursteinbelägen im Außenraum nicht immer erfüllt werden. Vor allen Dingen kann der normativ geforderte Reflexionsgrad der helleren der kontrastgebenden Flächen bei Naturstein nur mit wenigen Materialien erreicht werden.

Die Arbeit widmet sich der Verbesserung der Sehbedingungen durch eine Optimierung der Beleuchtung in Bezug auf Kontrast- und Leuchtdichtewahrnehmung, Blendung und Lichtfarbe. Dieser Ansatz wird bisher in den Normen nicht verfolgt, es wird lediglich eine „angemessene" Beleuchtung gefordert.

Es besteht dringender Bedarf, die Normung zur Gestaltung visueller Informationen um Beleuchtungsparameter zu erweitern. Das Forschungsprojekt liefert die dafür notwendigen Erkenntnisse darüber, welche Auswirkungen verschiedene Kontraste und Beleuchtungsparameter auf die Erkennbarkeit haben, wie die Kontraste durch Beleuchtungsparameter maximiert und wie die realisierten Kontraste in der Praxis überprüft werden können.

Erforderliches Beleuchtungsniveau

Den Hauptteil der Untersuchungen bildete eine Probandenstudie mit 50 sehbehinderten Testpersonen und 2 Kontrollgruppen mit je 37 Personen zum Kontrastsehen unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen. Für sehgesunde Personen ist bekannt, dass eine Optimierung der Beleuchtung dazu führt, dass auch weniger hohe Kontraste sicher erkannt werden. Daher wurde der Frage nachgegangen, welche Leuchtdichten (untersucht wurden Werte von 0,1 bis 22,3 cd/m^2) bei verschieden hohen Kontrasten (untersucht wurden die Michelson-Kontraste 0,40; 0,25; 0,16; 0,10 und -0,10) notwendig sind und wie sich diese von den Werten bei einem Kontrast von K = 0,40 unterscheiden. Des Weiteren wurden Beleuchtungssituationen mit und ohne Blendung verglichen und die Parameter Objektgröße (2 cm und 1 cm, entspricht einem Sehwinkel von 36' und 18') und Kontrastrichtung variiert.

Die Studienergebnisse lassen Schlüsse darüber zu, welche Leuchtdichten erforderlich sind, damit ein bestimmter Anteil an Personen mit einer vorgegebenen Erkennungswahrscheinlichkeit, ein Sehzeichen erkennen wird. Auf der Basis dieser Untersuchungsergebnisse mit der Prämisse, dass 80 % der Probanden aus der Untersuchungsgruppe mit einer Erkennungswahrscheinlichkeit von 100 % die Sehzeichen erkennen können, ist bei einem Positiv-Kontrast von 0,40 und einer Objektgröße von 2 cm eine Leuchtdichte von 1,5 cd/m^2 erforderlich. Sinkt der Kontrast auf einen Wert von 0,25, steigt die erforderliche Leuchtdichte auf 3 cd/m^2. Diese Aussagen gelten für eine Beleuchtung mit Blendwerten von TI = 20 %. In Beleuchtungssituationen, die blendfrei waren, hatten die Testpersonen ein deutlich verbessertes Kontrastsehen, was zeigt, dass die Blendungsbegrenzung von großer Relevanz ist.

Die untersuchten Leuchtdichten und Blendwerte enstprechen denen von Fußgängerbereichen im Außenraum mit einer normgerechten nächtlichen Beleuchtung. Die aus den Ergebnissen abgeleiteten Leuchtdichten 1,5 cd/m^2 und 3 cd/m^2 stellen eine hohe Anforderung dar, die in den wenigsten Fußgängerbereichen umgesetzt ist. Typische Leuchtdichten in Fußgängerbereichen liegen zwischen 0,13 cd/m^2 und 1 cd/m^2.

Den Anforderungen der sehbehinderten Personen, die aus dieser Studie abgeleitet wurden, werden die Normwerte im Außenraum kaum gerecht. Die Anforderung wird für K = 0,40 nur in den Beleuchtungs-Klassen C0 und C1, für K = 0,25 sogar nur in der Beleuchtungs-Klasse C0 erfüllt [DIN EN 13201-2:2016].

Eine Abkehr vom derzeit geforderten Mindest-Kontrast von K = 0,40 lässt sich mit den Studienergebnissen nicht begründen. Selbst die Umsetzung der Forderung von 1,50 cd/m² in allen Bereichen erscheint unrealistisch.

In der Studie wurde keine Innenraum-Beleuchtungssituation mit dort typischen Blendwerten untersucht. Die Abschätzung von notwendigen Leuchtdichten erfolgte daher auf der Grundlage der für kleinere Sehobjekte (1 cm) und Negativ-Kontraste ermittelten Erhöhungsfaktoren. Auf der Basis dieser Untersuchungsergebnisse mit der Prämisse, dass 80 % der Probanden aus der Untersuchungsgruppe mit einer Erkennungswahrscheinlichkeit von 100 % die Sehzeichen erkennen können, ist bei einem Negativ-Kontrast von K = 0,40 und einer Objektgröße von 1 cm eine Leuchtdichte von 3 cd/m² erforderlich. Sinkt der Kontrast auf einen Wert von K = 0,25, steigt die erforderliche Leuchtdichte auf 9 cd/m². Diese Aussagen gelten für eine Beleuchtung mit Blendwerten von UGR = 28 bzw. TI = 7 %

In öffentlichen Bereichen von Gebäuden ist die Einhaltung der Leuchtdichte von 3 cd/m² sehr wahrscheinlich gegeben. So entspricht der Normwert für Korridore und Verkehrsflächen 6 cd/m². Die Leuchtdichte 9 cd/m² wird erzielt, wenn der modifiziert Normwert geplant wird. Dieser ist nach Norm dann zu verwenden, wenn die Sehfähigkeit der Personen unter den üblichen Werte liegt.

Aus den Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass im Innenbereich von der derzeitigen Anforderung an den Mindest-Kontrast von K = 0,40 nur abgewichen werden kann, wenn bei der Beleuchtungsplanung die modifizierten Beleuchtungsstärkewerte der [DIN EN 12464-1:2021] verwendet werden.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, das die genannten Leuchtdichten auf der Basis, dass 80 % der Probanden aus der Untersuchungsgruppe mit einer Erkennungswahrscheinlichkeit von 100 % die Sehzeichen erkennen können, ermittelt wurden. Diese Basis darf nur als Vorschlag betrachtet werden, von dem abgewichen werden kann. Für die Umsetzung der Forschungsergebnisse in eine Fortschreibung eines Regelwerks, muss das umsetzende Gremium entscheiden, wie hoch der prozentuale Anteil innerhalb der Untersuchungsgruppe sein muss, der das Sehobjekt noch wahrnehmen kann. Alle notwendigen Daten hierzu sind im Bericht aufgeführt.

Die genannten Ergebnisse gelten nur für die untersuchten Parameter und können nicht ohne Weiteres verallgemeinert werden. Nahezu unabhängig von der Wahl der Parameter sind dagegen die Faktoren, um die sich die erforderliche Leuchtdichte ändert, wenn der Kontrast reduziert wird. Eine Absenkung des Kontrastes von 0,40 auf 0,25 erfordert eine 2- bis 3-fach erhöhte Leuchtdichte, die weitere Absenkung des Kontrastes auf 0,16 ebenso, so dass dann gegenüber dem Kontrast von 0,40 mit der 4- bis 9-fachen Leuchtdichte gearbeitet werden müsste. Für die Umsetzung in Regelwerken hat die relative Betrachtung den Vorteil, dass von bereits genormten Werten für Leuchtdichten oder auch Beleuchtungsstärken ausgegangen werden kann und bei einer Kontrastreduktion von 0,40 auf 0,25 diese nur um den Faktor 2 bis 3 erhöht werden müssen.

Die Studienergebnisse zeigen, dass eine Absenkung des Kontrastes eines Sehobjektes dazu führt, dass das Sehobjekt bei gleichbleibenden Beleuchtungsverhältnissen weniger gut erkannt wird. Durch die Erhöhung des Beleuchtungsniveaus um den Faktor 2 bis 3 kann die Erkennbarkeit eines Sehobjektes mit dem Kontrast K = 0,25 wieder die gleichen Werte erreichen, die bei K = 0,40 vorliegen .

Die Absenkung des in der Norm geforderten Kontrastes K = 0,40 auf K = 0,25 führt zu einer Verschlechterung der Situation für sehbehinderte Menschen und kann nur dann empfohlen werden, wenn eine Optimierung der Beleuchtung vorgenommen wird. Eine ausreichend sichere Erkennung von Kontrasten unter K = 0,25 ist auch mit optimierter Beleuchtung nicht erreichbar.

Reflexionsgrad der helleren Fläche

Nach [DIN 32975:2009] muss bei einem kontrastbildenden Objekt die hellere der beiden Flächen einen Reflexionsgrad von mindesten $\rho = 0{,}5$ haben. Diese Vorgabe gerät immer wieder in die Diskussion, da mit Naturstein und ähnlichen Materialen dieser Wert mitunter nur schwer erreichbar ist. Auch die in dieser Studie betrachteten Materialien aus Naturstein hatten mehrheitlich einen Reflexionsgrad von weniger als 0,50.

Für ein optimales Kontrastsehen dürfen sich die Leuchtdichten der kontrastbildenden Proben nur wenig von der mittleren Leuchtdichte der Umgebung unterscheiden. Sind sie sehr viel dunkler, erscheinen beide Proben eher schwarz und können nur schlecht unterschieden werden. Das ist immer dann der Fall, wenn sich große helle Flächen (Fenster, Leuchten, Himmelsbereiche) im Sehfeld befinden, die Sehobjekte selbst jedoch wenig beleuchtet sind. Um diesen Effekt möglichst gering zu halten, besteht die in der Norm festgelegte Anforderung, dass der Reflexionsgrad der helleren Fläche mindesten 0,5 betragen soll. Diese Anforderung ist sinnvoll, eine Abweichung davon ist nicht zu empfehlen.

In gewissem Rahmen kann ein nicht ausreichend hoher Reflexionsgrad mit einer gezielten Erhöhung der Beleuchtungsstärke kompensiert werden. Liegt der Reflexionsgrad der helleren Fläche im Bereich von 0,25 bis 0,50 kann mit einer Verdopplung der Beleuchtungsstärke (relativ zum sonstigen Bereich) die Helligkeit der Sehobjekte erhöht werden. Auf diese Weise werden sie besser wahrgenommen und die Aufmerksamkeit in diesen Bereich gelenkt.

Lichtfarbe

Ein weiteres Thema des Forschungsprojektes waren theoretische Betrachtungen, inwieweit die Wahl der Lichtfarbe zur Erhöhung der Kontraste beitragen kann. Anhand umfangreicher Beispielrechnungen konnte gezeigt, dass Kontrastunterschiede zwischen warmweißer und kaltweißer Beleuchtung von bis zu 0,15 auftreten können. Die richtige Auswahl des Spektrums kann somit dazu führen, dass die Normvorgabe von $K = 0{,}40$ eingehalten wird, während im ungünstigeren nur $K = 0{,}25$ erreicht würde. Das vorgeschlagene Berechnungsverfahren lässt sich ebenso für die Auswahl der Materialien einsetzen, wenn bekannt ist, welche Lichtquelle zur Beleuchtung verwendet wird.

Messverfahren zur Überprüfung der Kontraste

Zur Überprüfung der Kontrastanforderungen in der praktischen Anwendung sind Messungen der Leuchtdichte erforderlich. Da die Aufsichtspersonen im Allgemeinen kein Leuchtdichtemessgerät zur Verfügung haben, erfolgt die Überprüfung meist visuell. Im Projekt wurde ein Messverfahren konzipiert, welches erste orientierende Prüfungen erlaubt, ohne aufwändige Messtechnik vorhalten zu müssen. Das Verfahren beruht auf der Verwendung von Grau-Filtern, die auf die kontrastbildenden Materialien aufgelegt werden und die visuelle Prüfung erleichtern. Auch eine Auswertung mittels Handy-Kamera und Handy-App ist möglich. Im Projekt wurde lediglich das Messkonzept entwickelt und evaluiert. Die Umsetzung in die Anwendung kann im nächsten Schritt durch ein kommerzielles Unternehmen erfolgen.

Mit dem vorgeschlagenen Verfahren ist eine erste orientierende Prüfung möglich, ohne aufwändige Messtechnik vorhalten zu müssen. Das Verfahren ersetzt nicht die fachgerechte Messung durch qua-lifiziertes Personal sondern kann nur den Hinweis erbringen, dass Handlungsbedarf besteht.

Handlungsempfehlung

Für die Umsetzung der Studienergebnisse in der Praxis wurde dem Bericht eine Handlungsempfehlung für die praktische Anwendung hinzugefügt, die die Empfehlungen des Deutschen Blinden- und Sehbehindertenverbandes und der entsprechenden Schweizer Fachstelle um beleuchtungsrelevante Kriterien ergänzt. Obwohl hohe Kontraste und hohe Reflexionsgrade der Materialien die besten und energetisch effizientesten Maßnahmen sind, um ein sicheres Erkennen der visuellen Informationen zu gewährleisten, sind diese nicht immer vorhanden oder realisierbar. Für die Praxis wird aufgezeigt, wie in diesen Fällen mit einer gezielten Erhöhung des Beleuchtungsniveaus in begrenztem Rahmen gegengesteuert werden kann. Weiterhin werden Hinweise zur Blendungsbegrenzung und zur Wahl der Lichtfarbe gegeben.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Prof. Dr. Schierz, Christoph (TU Ilmenau)

Dr. Vandahl, Cornelia (TU Ilmenau)

Dr. Bieske, Karin (TU Ilmenau)

Prof. Dr. Gebhardt, Michael (Ernst-Abbe-Hochschule Jena)

M. Eng. Kolbe, Oliver (Ernst-Abbe-Hochschule Jena)

M. Sc. Schlanke, Martin (Ernst-Abbe-Hochschule Jena)

Prof. Dr. Kunert, Kathleen (REGIOMED Rehaklinik Masserberg)

Projektbeirat

Groenewold, Hilke (Unfallkasse Anhalt)

Dr. Schulze, Christoph (TU Dresden)

Dipl. Augenoptiker Fritz Buser (Olten, CH)

Eva Schmidt (Hindernisfreie Architektur - Die Schweizer Fachstelle, Zürich)

Dr. Nico Hauck (VIDEBIS GmbH, Wien)

Angelika Ostrowski (Deutscher Blinden- und Sehbehindertenverband Berlin)

Rachel Barthel (BBR Referat WB 2, Barrierefreies Bauen)

Literaturverzeichnis

Bach, M. (2007): The Freiburg Visual Acuity Test-variability unchanged by post-hoc re-analysis. In: Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol 245 (7), S. 965–971. DOI: 10.1007/s00417-006-0474-4.

CIE 31 (1976): Glare and uniformity in road lighting installations. CIE Technical Report.

CIE 146 (2002): Equations for Disability Glare. CIE Technical Report.

Corder, G. W.; Foreman, D. I. (Hg.) (2009): Nonparametric statistics for non-statisticians. A step-by-step approach. Hoboken, N.J: Wiley.

DBSV: Zahlen & Fakten zu Blindheit und Sehbehinderung (2021): Übersicht: Zahlen & Fakten - DBSV e.V. https://www.dbsv.org/zahlen-fakten.html#schwerbehindertenstatistik (zuletzt geprüft am 06.10.2023).

DBSV: Kontrastreiche Gestaltung öffentlich zugänglicher Gebäude. Broschüre des DBSV 2016. https://www.dbsv.org/broschueren.html?file=files/ueber-dbsv/publikationen/broschueren/DBSV-Broschuere-Kontrastreiche-Gestaltung.pdf&cid=2820 (zuletzt geprüft am 06.10.2023).

DIN EN 12464-1:2021 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 13201-1:2005 Straßenbeleuchtung, Teil 1: Auswahl der Beleuchtungssklassen

DIN EN 13201-2:2016 Straßenbeleuchtung, Teil 2: Gütemerkmale

DIN 18040-1:2010 Barrierefreies Bauen – Planungsgrundlagen, Teil 1: Öffentlich zugängliche Gebäude

DIN 18040-2:2011 Barrierefreies Bauen – Planungsgrundlagen, Teil 2: Wohnungen

DIN 18040-3:2014 Barrierefreies Bauen – Planungsgrundlagen; Teil 3: Öffentlicher Verkehrs- und Freiraum

DIN 32975: 2009 Gestaltung visueller Informationen im öffentlichen Raum zur barrierefreien Nutzung.

DIN 5036-3:1979) Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien; Teil 3: Messverfahren für lichttechnische und spektrale strahlungsphysikalische Kennzahlen.

DIN EN ISO 8596: 2018 Augenoptik - Sehschärfeprüfung - Normsehzeichen und klinische Sehzeichen und ihre Darbietung (ISO 8596:2017); Deutsche Fassung EN ISO 8596:2018

Dwivedi, A. K.; Mallawaarachchib, I.; Alvaradob, L. A. (2017): Analysis of small sample size studies using nonparametric bootstrap test with pooled resampling method. Statistics in Medicine 36 p. 2187–2205

Effert, R.; Steinmetz, H.; Jansen, W.; Rau, G.; Reim, M.: Automatisierte Messung des Fernvisus in Anlehnung an die DIN Strategie. Klin. Mbl. Augenheilk. 195 (1989) 39-43

Eichhoff, L. (1970): Möglichkeiten zur quantitativen Erfassung der physiologischen Blendung. In: Lichttechnik 22, S. 185.

Furlan, A. D.; Pennick, V.; Bombardier, C.; van Tulder, M. (2009): 2009 updated method guidelines for systematic reviews in the Cochrane Back Review Group. In: Spine 34 (18), S. 1929–1941. DOI: 10.1097/brs.0b013e3181b1c99f.

GHS Gutenberg-Gesundheitsstudie. http://www.gutenberg-gesundheitsstudie.de (zuletzt geprüft am 06.10.2023).

Hartmann, E.: Sehschärfebestimmung. Klin. Mbl, Augenheilk. 191 (1987) 62-68

Hauck, N. (2018): Barrierefreie Beleuchtungslösungen für sehbehinderte Menschen in Innenräumen sowie Entwicklung einer Kontrastbestimmungsmethode. Barrierefreie Beleuchtungslösungen für sehbehinderte Menschen in Innenräumen sowie Entwicklung einer Kontrastbestimmungsmethode. Wien. https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/10448 (zuletzt geprüft am 06.10.2023).

Holladay, L. L. (1926): The Fundamentals of Glare and Visibility. In: J. Opt. Soc. Am. 12 (4), S. 271. DOI: 10.1364/JOSA.12.000271.

Jungnickel, H. (2015): Objektive und subjektive Bewertungsverfahren zur Wirkung von Aberrationen am Auge. Dissertation TU Ilmenau, https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2015000070 (zuletzt geprüft am 06.10.2023).

Lange, C.; Feltgen, N.; Junker, B.; Schulze-Bonsel, K.; Bach, M. (2009): Resolving the clinical acuity categories "hand motion" and "counting fingers" using the Freiburg Visual Acuity Test (FrACT). In: Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol 247 (1), S. 137–142. DOI: 10.1007/s00417-008-0926-0.

Lohaus, I.; Meyer, S.; Kreiser, S.; Schulze, C.; Rehberg, K.; Glasow, N.; Vorisková, S. (2018): Visuelle Barrierefreiheit durch die Gestaltung von Kontrasten. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. https://www.irbnet.de/daten/rswb/18019014673.pdf (zuletzt geprüft am 06.10.2023).

Resnikoff, S.; Pascolini, D.; Etya'ale, D.; Kocur, I.; Pararajasegaram, R.; Pokharel, G. P.; Mariotti, S. P. (2004): Global data on visual impairment in the year 2002. In: Bull World Health Organ 82, S. 844–851. DOI: 10.1590/S0042-96862004001100009.

Schmidt, E.; Buser, F.: Visuelle Kontraste. Richtlinien «Planung und Bestimmung visueller Kontraste» Hindernisfreie Architektur – Die Schweizer Fachstelle 2017. https://hindernisfreie-architektur.ch/normen_publikationen/planung-und-bestimmung-visueller-kontraste-richtlinien/ (zuletzt geprüft am 06.10.2023).

Vos, J. J.; van den Berg, T. J. T. P. (1997): The large angle course of the disability glare function and its attribution to components of ocular scatter. In: CIE Collect. Color Vision 124 (2), S. 11–29.

WHO: World report on vision (2019). https://www.who.int/publications/i/item/9789241516570 ((zuletzt geprüft am 06.10.2023).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiele von Leitelementen im öffentlichen Raum, wie sie von sehbehinderten Menschen gesehen werden 9

Abbildung 2: Definition von Objekt- und Umfeld-Leuchtdichte nach Formel (1). Für dieses Beispiel hat der Kontrast einen negativen Wert. 13

Abbildung 3: Definition der Schleierleuchtdichte Lv nach Formel (6). 15

Abbildung 4: Erhöhung der Adaptationsleuchtdichte von 1 auf 10 cd/m² führt nach [Hauck 2018] bei sehbehinderten Menschen mit hohem Lichtbedarf zu einer Verringerung des Schwellenkontrast um 40 % (Bildquelle [Hauck 2018]) 16

Abbildung 5: Schematische Darstellung der Einblickvorrichtung mit definierten Beleuchtungsbedingungen, rechts als 3D-Modell. 18

Abbildung 6: Sehfeld des Probanden, links: die Leuchtdichte des Testfeldes ist identisch mit der der Umgebung, mittig: das Testfeld ist heller als die Umgebung, rechts: Foto der Situation mit eingeschalteter Blendquelle 18

Abbildung 7: Testfelder mit verschiedenen Kontrasten K, die Sehzeichen sind entweder 1 oder 2 cm breit und 10 cm lang. Die Größe des Testfeldes betrug 75 cm x 75 cm. 20

Abbildung 8: Glaretest nach [Jungnickel 2015] bestehend aus Monitor und Blende mit 8 radiär angeordneten LEDs. 23

Abbildung 9: Blick auf den Ausschnitt eines Monitors zum Bestimmen der Kontrastschwelle. Um den Monitor herum sind 8 Blendquellen kreisförmig angeordnet. Links: der Monitor mit dem Testzeichen ist ausgeschaltet. Rechts: Skizze der Beobachtungsgeometrie: Die Leuchtdichte des Monitors beträgt 0,3 cd/m² und entspricht damit der der Umgebung. 23

Abbildung 10: Schematischer Ablauf des Testszenarios 24

Abbildung 11: Mittlere Kontrastempfindlichkeit der Studiengruppen jeweils ohne und mit Blendung. (Mittelwert und 95%-Konfidenzintervalle) 28

Abbildung 12: Mittlere Kontrastempfindlichkeit der Subgruppen jeweils ohne und mit Blendung. (Mittelwert und 95%-Konfidenzintervalle) 28

Abbildung 13: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für K = 0,40 bei B = 2 cm Streifenbreite mit 4 von 6 Orientierungen erkannt (links). Darstellung für K = 0,10 bei B = 2 cm mit 4 von 6 Orientierungen erkannt (rechts). 29

Abbildung 14: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für K = 0,16 bei B = 2 cm Streifenbreite mit 4 von 6 Orientierungen erkannt (links). Darstellung für K = 0,16 bei B = 2 cm mit 6 von 6 Orientierungen erkannt (rechts). 29

Abbildung 15: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für K = 0,25 bei B = 2 cm Streifenbreite mit 6 von 6 Orientierungen erkannt (links). Darstellung für K = 0,25 bei B = 1 cm mit 6 von 6 Orientierungen erkannt (rechts). 30

Abbildung 16: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für K = 0,10 bei B = 2 cm Streifenbreite mit

6 von 6 Orientierungen erkannt (links). Darstellung für K = -0,10 bei B = 2 cm mit 6 von 6 Orientierungen erkannt (rechts). 30

Abbildung 17: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für K = 0,40 bei B = 2 cm Streifenbreite mit 6 von 6 Orientierungen erkannt (links). Darstellung für K = 0,40 mit Blendung mit 6 von 6 Orientierungen erkannt (rechts). 30

Abbildung 18: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste bei einer Streifenbreite von 2 cm mit 6 von 6 richtigen Orientierungsangaben. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch. (weitere Darstellungen im Anhang ab Abbildung 68) 32

Abbildung 19: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste mit Blendung mit 6 von 6 richtigen Orientierungsangaben. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch. (weitere Darstellungen im Anhang ab Abbildung 68) 32

Abbildung 20: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden in der Untersuchungsgruppe, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für K = 0,25 bei B = 2 cm und einer Erkennung 6 von 6 ohne Blendung (links) und mit Blendung (rechts) für die beiden Subgruppen. 35

Abbildung 21: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste bei einer Streifenbreite von 2 cm mit 4 von 6 richtigen Orientierungsangaben für die Subgruppen nach Art der Funktionseinschränkung. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch. 37

Abbildung 22: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste mit Blendung mit 4 von 6 richtigen Orientierungsangaben für die Subgruppen nach Art der Funktionseinschränkung. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch. 37

Abbildung 23: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den Kontrast 0,10 erkannt haben mit zusätzlichen Datenpunkten zur Kurvenanpassung aus der Regression für die Untersuchungsgruppe. 39

Abbildung 24: Leuchtdichten mit 95%-Konfidenzintervallen die erforderlich sind, damit 80 % der sehbehinderten Testpersonen die angegebenen Kontraststufen erkennen. Der grau hinterlegte Leuchtdichte-Bereich liegt außerhalb des untersuchten Werte-Bereiches. Darstellungen für andere Häufigkeiten sind im Anhang (Abbildung 61 und folgende) zu finden. 39

Abbildung 25: Linearer Zusammenhang zwischen dem Logarithmus des Kontrastes und dem Logarithmus der erforderlichen Leuchtdichte. Die Darstellung gilt für den Einschluss von 80 % der Untersuchungsgruppe 41

Abbildung 26: Leuchtdichten mit 95%-Konfidenzintervallen die erforderlich sind, damit 80 % der sehbehinderten Gruppe die angegebenen Kontraststufen ohne und mit Blendung erkennen. Orange: Leuchtdichtebereich der P- und C-Klassen nach [DIN EN 13201-2:2016], Blau: Leuchtdichtebereich für Verkehrsflächen in Gebäuden nach [DIN EN 12464-1:2021] 44

Abbildung 27: Spektrale Stahldichtefaktoren zweier Proben, relative spektrale Strahlungsleistung zweier LEDs und Spektralbereiche für Blauanteil und Rotanteil. 45

Abbildung 28: Foto der verwendeten Baumann-Farben 47

Abbildung 29: Spektrale Strahldichtefaktoren der 10 Baumann-Farben sowie Weiß und Grau 47

Abbildung 30: Änderung des Kontrastes K der Baumann-Farben-Paare als Differenz von K(kw) – K(ww) beim Wechsel von einer warmweißen (ww) zu einer kaltweißen (kw) Beleuchtung als Funktion des Blau-Rot-Verhältnisses BRV 49

Abbildung 31: links: Probe 1 bis 14, rechts: Probe 15 bis 37 50

Abbildung 32: Änderung des Kontrastes K als Differenz von K(kw) – K(ww) beim Wechsel von einer warmweißen (ww) zu einer kaltweißen (kw) Beleuchtung als Funktion des Blau-Rot-Verhältnisses BRV für ausgewählte Probenpaare (orange: Datenpunkte aller Baumann-Farben aus Abbildung 30) 50

Abbildung 33: Beispielprobenpaare, die beim Wechsel zu warmweißer Beleuchtung eine Kontrastverbesserung zeigen (Werte in Tabelle 15, Nr. 1 bis 5) 51

Abbildung 34: Beispielprobenpaare, die beim Wechsel zu kaltweißer Beleuchtung eine Kontrastverbesserung zeigen (Werte in Tabelle 15, Nr. 6 bis 10) 51

Abbildung 35: Fotos der 52 Materialproben (Nr. 101 bis 152) Quelle: [Lohaus 2018] 52

Abbildung 36: Änderung des Kontrastes K als Differenz von K(kw) – K(ww) beim Wechsel von einer warmweißen (ww) zu einer kaltweißen (kw) Beleuchtung als Funktion des Blau-Rot-Verhältnisses BRV für ausgewählte Materialkombinationen (orange: Datenpunkte der Baumann-Farben aus Abbildung 30) 53

Abbildung 37: Probenpaare aus jeweils 2 Proben mit verschiedenen Kontrasten, links: Probenpaar ohne Filter, rechts: auf die hellere Probe ist jeweils ein Filter aufgelegt, der den Kontrast reduziert. 56

Abbildung 38: Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie an der Probe ohne Filter 56

Abbildung 39: Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie an der nicht selbst leuchtenden Probe mit Filter 57

Abbildung 40: Verwendung eines Schatters zur Vermeidung von Reflexen auf der Filteroberfläche 58

Abbildung 41: Probenpaare aus jeweils 2 Proben mit verschiedenen Kontrasten, links: Probenpaar ohne Filter, rechts: im Unterschied zu Abbildung 37 sind jeweils zwei Filter aufgelegt, die den Kontrast reduzieren. 58

Abbildung 42: Beobachtungsgeometrie an der selbst leuchtenden Probe mit Filter 59

Abbildung 43: Prototyp eines Prüfgerätes mit zwei verschiedenen Filtern und Schatter: Der Bereich für die Messungen und visuellen Beobachtungen ist Orange gekennzeichnet. 61

Abbildung 44: Seitenansicht der Messbox für Beleuchtungssituation 1 61

Abbildung 45: Seitenansicht der Beleuchtungssituation 2 62

Abbildung 46: Leuchtdichtebilder der Probe 4, links: ohne Filter, rechts: mit Filter, mit 2 und 2 sind die flächigen Auswerteregionen gekennzeichnet, mit 3 ist eine Linie gekennzeichnet, an deren Verlauf die Leuchtdichte in Bild 11 dargestellt ist. 63

Abbildung 47: Leuchtdichteverlauf auf Probe 4 entlang der Linie 3 in Abbildung 46. Bei der Messung ohne Filter ist die rechte Probe heller ist (grüne Kurve), bei der Messung mit Filter jedoch dunkler (rote Kurve). 63

Abbildung 48: links: Foto der Probe 4 ohne Filter, Mitte: Foto der Probe 4 mit Filter, rechts: ausgewählte Bereiche für die Graustufenauswertung 63

Abbildung 49: Zusammenfassung der vorgeschlagenen Leuchtdichten im Vergleich zu den Untersuchungsergebnissen (Abbildung 25) und derzeitigen Normen 72

Abbildung 50: Beispielkontraste mit verschiedenen Reflexionsgraden der kontrastbildenen halbkreisförmigen Flächen. Die Umgebung wird hier beispielhaft mit einem mittleren Reflexionsgrad

von 0,50 angenommen. Für die Fälle A bis D entsprechen bei Annahme einer konstanten Beleuchtungsstärke im gesamten Bereich die Reflexionsgradverhältnisse denen der Leuchtdichteverhältnisse (Zahlenwerte für die Leuchtdichten finden sich in Tabelle 30) 73

Abbildung 51: Testfelder mit 4 verschiedenen Reflexionsgraden (v. l. n. r.: 0,06; 0,17; 0,42, 0,89) in 2 verschiedenen Beleuchtungssituationen, links: die Umgebungsleuchtdichte $L_{Umgebung}$ entspricht in etwa der Leuchtdichte der Testfelder, rechts: die Umgebungsleuchtdichte $L_{Umgebung}$ wird durch die Leuchtdichte des Himmels bestimmt und ist um Größenordnungen größer. 74

Abbildung 52: Häufigkeitsverteilung der Reflexionsgrade der 52 Materialen aus Abbildung 35 (unter Beleuchtung mit Normlichtart A) 75

Abbildung 53: Beispielkontraste mit verschiedenen Reflexionsgraden der kontrastbildenen halbkreisförmigen Flächen. In Fall C2 (mit Reflexionsgraden von Fall C1) wird das Testfeld mit der 1,5-fachen Beleuchtungsstärke beleuchtet, daher entsprechen die Leuchtdichten denen von Fall B (Werte in Tabelle 31). 76

Abbildung 54: Darstellung des Mindestabschirmwinkel nach [DIN EN 12464-1:2021] 78

Abbildung 55: Gezielte Erhöhung des Beleuchtungsniveaus im Bereich des Sehobjektes. Oben: Positivkontrast, unten: Negativkontrast. Links: keine Erhöhung, rechts Erhöhung des Beleuchtungsniveaus. Der Kontrast beträgt für alle 4 Fälle 0,25. Die gezielte Erhöhung des Beleuchtungsniveaus führt nicht zu einer Erhöhung des Kontrastes, allerdings kann dieser besser wahrgenommen werden. (Anmerkung: Die Darstellung ist symbolisch und kann je nach Drucktechnik oder Bildschirmdarstellung von der Realität abweichen.) 79

Abbildung 56: Gezielte Erhöhung des Beleuchtungsniveaus im Bereich des Sehobjektes. Oben: Positivkontrast, unten: Negativkontrast. Links: keine Erhöhung, rechts Erhöhung des Beleuchtungsniveaus. Der Kontrast beträgt für alle 4 Fälle 0,40 Der Reflexionsgrad der helleren Fläche beträgt jeweils 0,25. Die gezielte Erhöhung des Beleuchtungsniveaus führt dazu, dass die Kontraste trotz niedriger Reflexionsgrade gut wahrgenommen werden können. (Anmerkung: Die Darstellung ist symbolisch und kann je nach Drucktechnik oder Bildschirmdarstellung von der Realität abweichen.) 80

Abbildung 57: Zustimmung der Ethik-Kommission der Friedrich-Schiller-Universität in Jena zum Studienprotokoll vom 10.05.2022 98

Abbildung 58: Zustimmung der Ethik-Kommission der Friedrich-Schiller-Universität in Jena zur Änderung des Studienprotokolls vom 13.09.2022. 99

Abbildung 59: z-Werte der Häufigkeiten in Abhängigkeit von der Leuchtdichte für verschiedene Kontraste bei einer Erkennung 4 von 6. Für zwei Kurven ist beispielhaft das 95%-Konfidenzintervall mit Strich-Linien angegeben. 100

Abbildung 60: z-Werte der Häufigkeiten in Abhängigkeit von der Leuchtdichte für verschiedene Kontraste bei einer Erkennung 6 von 6. Für zwei Kurven ist beispielhaft das 95%-Konfidenzintervall mit Strich-Linien angegeben. 100

Abbildung 61: Leuchtdichten mit 95%-Konfidenzintervallen die erforderlich sind, damit 50 % der Sehbehinderten die angegebenen Kontraststufen ohne und mit Blendung erkennen. Der grau hinterlegte Leuchtdichte-Bereich liegt außerhalb des untersuchten Werte-Bereiches. 101

Abbildung 62: Leuchtdichten mit 95%-Konfidenzintervallen die erforderlich sind, damit 75 % der Sehbehinderten die angegebenen Kontraststufen ohne und mit Blendung erkennen. Der grau hinterlegte Leuchtdichte-Bereich liegt außerhalb des untersuchten Werte-Bereiches. 101

Abbildung 63: Leuchtdichten mit 95%-Konfidenzintervallen die erforderlich sind, damit 90 % der Sehbehinderten die angegebenen Kontraststufen ohne und mit Blendung erkennen. Der grau hinterlegte Leuchtdichte-Bereich liegt außerhalb des untersuchten Werte-Bereiches. 102

Abbildung 64: Leuchtdichten mit 95%-Konfidenzintervallen die erforderlich sind, damit 95 % der Sehbehinderten die angegebenen Kontraststufen ohne und mit Blendung erkennen. Der grau hinterlegte Leuchtdichte-Bereich liegt außerhalb des untersuchten Werte-Bereiches. 102

Abbildung 65: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für eine Streifenbreite von B = 2 cm ohne Blendung 104

Abbildung 66: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für eine Streifenbreite von B = 1 cm ohne Blendung 105

Abbildung 67: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für eine Streifenbreite von B = 2 cm mit Blendung 106

Abbildung 68: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste bei einer Streifenbreite von 2 cm mit Blendung mit 4 von 6 richtigen Orientierungsangaben. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch. 117

Abbildung 69: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste bei einer Streifenbreite von 2 cm mit 4 von 6 richtigen Orientierungsangaben. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch. 117

Abbildung 70: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste bei einer Streifenbreite von 1 cm mit 4 von 6 richtigen Orientierungsangaben. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch. 118

Abbildung 71: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste bei einer Streifenbreite von 1 cm mit 6 von 6 richtigen Orientierungsangaben. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch. 118

Abbildung 72: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden in der Untersuchungsgruppe, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für B = 2 cm Streifenbreite ohne Blendung. 121

Abbildung 73: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden in der Untersuchungsgruppe, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für B = 1 cm Streifenbreite ohne Blendung. 122

Abbildung 74: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden in der Untersuchungsgruppe, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für B = 2 cm Streifenbreite mit Blendung. 123

Abbildung 75: Foto der Proben 1 bis 14 124

Abbildung 76: Spektrale Strahldichtefaktoren der Proben 1 bis 14 124

Abbildung 77: Foto der Proben 15 bis 38 125

Abbildung 78: Spektrale Strahldichtefaktoren der Proben 15 bis 26 125

Abbildung 79: Spektrale Strahldichtefaktoren der Proben 27 bis 38 125

Abbildung 80: Foto der Proben 101 bis 110 126

Abbildung 81: Spektrale Strahldichtefaktoren der Proben 101 bis 110 126

Abbildung 82: Foto der Proben 111 bis 120 126

Abbildung 83: Spektrale Strahldichtefaktoren der Proben 111 bis 120 126

Abbildung 84: der Proben 121 bis 130 127
Abbildung 85: Spektrale Strahldichtefaktoren der Proben 121 bis 130 127
Abbildung 86: Foto der Proben 131 bis 140 127
Abbildung 87: Spektrale Strahldichtefaktoren der Proben 131 bis 140 127
Abbildung 88: Foto der Proben 141 bis 152 128
Abbildung 89: Spektrale Strahldichtefaktoren der Proben 141 bis 152 128

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Leuchtdichtewerte der verschiedenen Bereiche nach Abbildung 6, sowie Beleuchtungsstärke am Auge (Abbildung 3) und TI-Wert nach Formel (9) 19

Tabelle 2: Demographische Daten der Testpersonen 27

Tabelle 3: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen Kontrollgruppe I und Kontrollgruppe II. Nur bei den 4 aufgeführten Untersuchungsbedingungen gibt es einen Unterschied zwischen den Gruppen. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet. 33

Tabelle 4: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen Positiv- und Negativkontrast in der Untersuchungsgruppe. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet. 34

Tabelle 5: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Subgruppen für die dargebotenen Kontraststufen mit Blendung mit 6 von 6 erkannten Streifenorientierungen. 35

Tabelle 6: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Kontraststufen ohne und mit Blendung mit 4 von 6 erkannten Streifenorientierungen für die Subgruppe „Blendempfindlich". Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet. 36

Tabelle 7: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Kontraststufen ohne und mit Blendung mit 4 von 6 erkannten Streifenorientierungen für die Subgruppe „Nicht blendempfindlich". Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet. 36

Tabelle 8: Leuchtdichten, die erforderlich sind, damit 80 % der Untersuchungsgruppe die angegebenen Kontraststufen unter verschiedenen Bedingungen erkennt. Die Erkennungswahrscheinlichkeit beträgt 4 von 6. Grau hinterlegte Werte liegen außerhalb des untersuchten Bereiches. Die Werte für 50 %, 75 %, 90 % und 95 % sind im Anhang zu finden (Tabelle 35 bis Tabelle 38) 40

Tabelle 9: Leuchtdichten, die erforderlich sind, damit 80 % der Untersuchungsgruppe die angegebenen Kontraststufen unter verschiedenen Bedingungen erkennt. Die Erkennungswahrscheinlichkeit beträgt 6 von 6. Grau hinterlegte Werte liegen außerhalb des untersuchten Bereiches. Die Werte für 50 %, 75 %, 90 % und 95 % sind im Anhang zu finden (Tabelle 35 bis Tabelle 38) 40

Tabelle 10: Faktoren der erforderlichen Leuchtdichte einer Situation zur Leuchtdichte einer Referenzsituation bei Änderung des Kontrastes, der Sehzeichengröße und der Blendwirkung für die Erkennungswahrscheinlichkeiten 4 von 6 und 6 von 6 (ermittelt für die Häufigkeit 80 %) 41

Tabelle 11: Mindest-Beleuchtungsstärken der P- und C-Klassen aus [DIN EN 13201-2:2016] und daraus abgeleitete Leuchtdichten 43

Tabelle 12: Mindest-Beleuchtungsstärken in verschiedenen Verkehrsflächen im öffentlichen Bereich von Gebäuden aus [DIN EN 12464-1:2021] und daraus abgeleitete Leuchtdichten 44

Tabelle 13: BR-Werte der Baumann-Farben 48

Tabelle 14: Beispiel-Probenpaare (Baumann-Farben) mit BRV-Werten und Kontrasten bei unterschiedlichen Lichtfarben 49

Tabelle 15: Beispiel-Probenpaare mit BRV-Werten und Kontrasten bei unterschiedlichen Lichtfarben 52

Tabelle 16: Beispiel-Probenpaare mit BRV-Werten und Kontrasten bei unterschiedlichen Lichtfarben 54

Tabelle 17: Erforderliche Transmissionsgrade für die Prüfung nicht selbst leuchtender Proben 57

Tabelle 18: Erforderliche Transmissionsgrade für die Prüfung nicht selbst leuchtender Proben bei Verwendung von 2 Filtern, wobei der Transmissionsgrad für den Filter auf der dunkleren Probe beispielhaft gewählt wurde. 59

Tabelle 19: Erforderliche Transmissionsgrade für die Prüfung selbst leuchtender Proben 60

Tabelle 20: Erforderliche Transmissionsgrade für die Prüfung selbst leuchtender Proben bei Verwendung von 2 Filtern, wobei der Transmissionsgrad τ_D für den Filter auf der dunkleren Probe beispielhaft gewählt wurde. 60

Tabelle 21: Transmissionsgrade des Prototyps für die Prüfung nicht selbst leuchtender Proben bei Verwendung von 2 Filtern. 60

Tabelle 22: Messungen und Beobachtungen in der Messbox. Bei den Messungen mit Filter sind die Ergebnisse wie folgt farblich gekennzeichnet: Grün: der Ausgangskontrast ist größer oder gleich dem Prüfkontrast, Rot: der Ausgangskontrast ist kleiner als der Prüfkontrast. Die Zeilen sind in der Reihenfolge des Ausgangskontrastes sortiert. 65

Tabelle 23: Messungen und Beobachtungen im mit Tageslicht beleuchtetem Raum. Bei den Messungen mit Filter sind die Ergebnisse wie folgt farblich gekennzeichnet: Grün: der Ausgangskontrast ist größer oder gleich dem Prüfkontrast, Rot: der Ausgangskontrast ist kleiner als der Prüfkontrast. Die Zeilen sind in der Reihenfolge des Ausgangskontrastes sortiert 66

Tabelle 24: Transmissionsgrade für die Prüfung nicht selbst leuchtender Proben bei Verwendung von 2 Filtern. 67

Tabelle 25: Beleuchtungsstärkeanforderungen im Außenraum für verschiedene Beleuchtungsklassen nach [DIN EN 13201-2:2016] 68

Tabelle 26: Empfohlene Erhöhung um zwei Beleuchtungsklassen, auf diese Weise wird der Erhöhungsfaktor 2 erreicht 69

Tabelle 27: Empfohlene Erhöhung um drei Beleuchtungsklassen, auf diese Weise wird der Erhöhungsfaktor 3 erreicht 69

Tabelle 28: Vorschlag für Leuchtdichten, die erforderlich sind, damit 80 % der Untersuchungsgruppe die angegebenen Kontraststufen für B = 1 cm im Negativkontrast erkennen (Erkennungswahrscheinlichkeiten 6 von 6). Die Werte wurden mit dem Faktor 10 aus den Werten der Positivkontraste ohne Blendung ermittelt. 70

Tabelle 29: Wartungswerte der Beleuchtungsstärke in verschiedenen öffentlichen Bereichen innerhalb von Gebäuden aus [DIN EN 12464-1 2021] und daraus abgeleitete Leuchtdichten 71

Tabelle 30: Leuchtdichten der Felder aus Abbildung 50, wenn die Beleuchtungsstärke E=500 lx beträgt. 73

Tabelle 31: Leuchtdichten der Felder aus Abbildung 53, wenn die Beleuchtungsstärke E = 500 lx bzw. 750 lx beträgt. 76

Tabelle 32: Höchstwerte für TI-Werte der M-Klassen aus [DIN EN 13201-2:2016] 77

Tabelle 33: Höchstwerte für UGR-Werte im Innenraum aus [DIN EN 12464-1:2021] (Beispiele) 77

Tabelle 34: Häufigkeiten der Diagnosen bei der Untersuchungsgruppe der Grundlagenuntersuchung 97

Tabelle 35: Leuchtdichten, die erforderlich sind, damit ein gegebener Prozentsatz der Untersuchungsgruppe (Häufigkeit in der ersten Spalte) die angegebenen Kontraststufen ohne Blendung erkennt. Die Erkennungswahrscheinlichkeit beträgt 4 von 6. Grau hinterlegte Werte liegt außerhalb des untersuchten Bereiches. 103

Tabelle 36: Leuchtdichten, die erforderlich sind, damit ein gegebener Prozentsatz der Untersuchungsgruppe (Häufigkeit in der ersten Spalte) die angegebenen Kontraststufen mit Blendung erkennt. Die Erkennungswahrscheinlichkeit beträgt 4 von 6. Grau hinterlegte Werte liegt außerhalb des untersuchten Bereiches. 103

Tabelle 37: Leuchtdichten, die erforderlich sind, damit ein gegebener Prozentsatz der Untersuchungsgruppe (Häufigkeit in der ersten Spalte) die angegebenen Kontraststufen ohne Blendung erkennt. Die Erkennungswahrscheinlichkeit beträgt 6 von 6. Grau hinterlegte Werte liegt außerhalb des untersuchten Bereiches. 103

Tabelle 38: Leuchtdichten, die erforderlich sind, damit ein gegebener Prozentsatz der Untersuchungsgruppe (Häufigkeit in der ersten Spalte) die angegebenen Kontraststufen mit Blendung erkennt. Die Erkennungswahrscheinlichkeit beträgt 4 von 6. Grau hinterlegte Werte liegt außerhalb des untersuchten Bereiches. 103

Tabelle 39: Mittelwert, Standardabweichung, Konfidenzintervall und Anzahl der einbezogenen Fälle der log-Leuchtdichten bei der Untersuchungsgruppe. 107

Tabelle 40: Mittelwert, Standardabweichung, Konfidenzintervall und Anzahl der einbezogenen Fälle der log-Leuchtdichten bei den Subgruppen „Blendempfindlich“ und „Nicht blendempfindlich“ 108

Tabelle 41: Mittelwert, Standardabweichung, Konfidenzintervall und Anzahl der einbezogenen Fälle der log-Leuchtdichten bei den Subgruppen „Zentrale Einschränkungen“ und „Zentral und periphere Einschränkungen“ 109

Tabelle 42: Mittelwert, Standardabweichung, Konfidenzintervall und Anzahl der einbezogenen Fälle der log-Leuchtdichten bei den Kontrollgruppen 110

Tabelle 43: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Kontrollgruppen bei einer Streifenbreite von 2 cm ohne Blendung. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet. 111

Tabelle 44: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Kontrollgruppen bei einer Streifenbreite von 1 cm ohne Blendung. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet. 112

Tabelle 45: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Kontrollgruppen bei einer Streifenbreite von 2 cm mit Blendung. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet. 113

Tabelle 46: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Kontrasten in der Untersuchungsgruppe. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet. 114

Tabelle 47: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Erkennungen 4 von 6 und 6 von 6 in der Untersuchungsgruppe. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet. 115

Tabelle 48: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Streifenbreiten B = 1 cm und B = 2 cm in der Untersuchungsgruppe. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet. 116

Tabelle 49: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Situationen ohne und mit Blendung in der Untersuchungsgruppe. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet. 116

Tabelle 50: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Subgruppen für die dargebotenen Kontraststufen. Signifikante p-Werte sind mit * markiert. 119

Tabelle 51: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Situationen ohne und mit Blendung mit 6 von 6 erkannten Streifenorientierungen (Streifenbreite B = 2 cm) für die Subgruppe „Blendempfindlich“. Signifikante p-Werte sind mit * markiert. 120

Tabelle 52: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Situationen ohne und mit Blendung mit 6 von 6 erkannten Streifenorientierungen (Streifenbreite 2 cm) jeweils für die Subgruppe „Nicht blendempfindlich“. Signifikante p-Werte sind mit * markiert. 120

Anhang - Grundlagenuntersuchung

Tabelle 34: Häufigkeiten der Diagnosen bei der Untersuchungsgruppe der Grundlagenuntersuchung

Diagnose	Häufgkeit n	relativer Anteil in %
Retinopathia pigmentosa	5	10
Abstoßung Hornhauttransplantat	1	2
Zapfen-Dystrophie	2	4
Makulaforamen	1	2
degenerative Myopie	2	4
Retinopathia diabetica	1	2
diffuse stromale Hornhauttrübungen	1	2
primäres Weitwinkelglaukom	5	10
Optikusatrophie	4	8
exsudative altersbedingte Makuladegeneration	1	2
angeborenes Glaukom	1	2
Morbus Coats	1	2
areoläre Atrophie der Makula	1	2
juvenile vitelliforme Makuladystrophie (Morbus Best)	1	2
X-linked juvenile Retinoschisis	1	2
altersbedingte Makuladegeneration	3	6
Netzhautablösung	2	4
chronische posteriore Blepharitis	1	2
Keratokonus	1	2
Sekundärglaukom nach Entzündung	2	4
Gesichtsfelddefekte	1	2
Zapfen-Stäbchen-Dystrophie	1	2
disseminierte Chorioretinitis	1	2
ischämische Optikusatrophie	2	4
Retinopathia praematurorum	1	2
adulte vitelliforme Makuladystrophie	1	2
tapetoretinale Netzhautdegeneration	1	2
Uveitis anterior	1	2
Ulcus corneae	1	2
fokale Chorioretinitis	1	2
Verschluss der A. Centralis retinae	1	2

UNIVERSITÄTS KLINIKUM Jena | Ethik-Kommission

Universitätsklinikum Jena · Ethik-Kommission · 07740 Jena

Ernst Abbe Hochschule Jena
Fachbereich SciTec; Augenoptik/Optometrie
Prof. Dr.-Ing. Michael Gebhardt
Carl-Zeiss-Promenade 2
07745 Jena

Vorsitzender: Prof. Dr. med. Ekkehard Schleußner
Geschäftsstelle: Dr. phil. Ulrike Skorsetz

Bachstraße 18
07743 Jena

Telefon 03641 9 39 11 91
Telefax 03641 9 39 11 92

E-Mail: ethikkommission@med.uni-jena.de

10.05.2022

Reg.-Nr.: **2022-2617-BO**

Sehr geehrter Herr Professor Gebhardt,

in Ihrer Sitzung am 10.05.2022 hat die Ethik-Kommission der Friedrich-Schiller-Universität Ihren Antrag:

Barrierefreie visuelle Kontraste und Beleuchtung - Grundlagenuntersuchung zur Auswirkung von Beleuchtungsparametern auf die Wahrnehmbarkeit visueller Kontraste von Leitelementen und damit auf die Barrierefreiheit im öffentlichen Raum für Menschen mit Sehbehinderung

beraten.

Es bestehen keine ethischen oder berufsrechtlichen Bedenken.

Hinweise:
- Die Probandeninformation sollte etwas laienverständlicher gestaltet werden.
- Da es keinen Auftraggeber und keine zuständige Behörde gibt, sollte das gestrichen werden.

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg!

Mit freundlichen Grüßen

Prof. Dr. med. Marie von Lilienfeld-Toal
Stellv. Vorsitzende

Kastanienstraße 1 · 07747 Jena · Telefon 03641 93 00
Internet: www.uniklinikum-jena.de
Gerichtsstand Jena
USt-IdNr. DE 156545777
Bankverbindung: Sparkasse Jena · BLZ 830 550 50
Konto 221 | IBAN: DE07 8305 5050 0000 0002 21
BIC: HELADEF1JEN

Universitätsklinikum Jena · Körperschaft des Öffentlichen Rechts
als Teilkörperschaft der Friedrich-Schiller-Universität Jena
Verwaltungsratsvorsitzender: Staatssekretär Carsten Feike
Kaufmännischer Vorstand und Sprecherin des
Klinikumsvorstandes: Dr. Brunhilde Seidel-Kwem
Medizinischer Vorstand: Prof. Dr. Otto W. Witte
Wissenschaftlicher Vorstand: Prof. Dr. Thomas Klimkait

Abbildung 57: Zustimmung der Ethik-Kommission der Friedrich-Schiller-Universität in Jena zum Studienprotokoll vom 10.05.2022

UNIVERSITÄTS KLINIKUM Jena

Ethik-Kommission

Universitätsklinikum Jena · Ethik-Kommission · 07743 Jena

Ernst Abbe Hochschule Jena
Fachbereich SciTec; Augenoptik/Optometrie
Prof Dr. M. Gebhardt
Carl-Zeiss-Promenade 2
07745 Jena

Vorsitzender: Prof. Dr. med. Ekkehard Schleußner
Geschäftsstelle: Dr. phil. Ulrike Skorsetz

Bachstraße 16
07743 Jena

Telefon 03641 9 39 11 91
Telefax 03641 9 39 11 92

E-Mail: ethikkommission@med.uni-jena.de

13.09.2022

Reg.-Nr.: **2022-2617_1-BO**

Barrierefreie visuelle Kontraste und Beleuchtung - Grundlagenuntersuchung zur Auswirkung von Beleuchtungsparametern auf die Wahrnehmbarkeit visueller Kontraste von Leitelementen und damit auf die Barrierefreiheit im öffentlichen Raum für Menschen mit Sehbehinderung

Sehr geehrter Herr Professor Gebhardt,

hiermit bestätigen wir den Eingang und die Kenntnisnahme des Studienprotokolls BaViKo2.0 sowie der Probandeninformation.

Das Amendment wird zustimmend bewertet.

Die zustimmende Stellungnahme vom 10.05.2022 ist weiterhin gültig.

Mit freundlichen Grüßen
(i. A. Dr. Ulrike Skorsetz)

Prof. Dr. med. Ekkehard Schleußner
Vorsitzender der Ethik-Kommission

Karl-Liebknecht-Straße 1 · 07747 Jena · Telefon 03641 93 00
Internet: www.uniklinikum-jena.de
Gerichtsstand Jena
USt-IdNr. DE 155342777
Bankverbindung: Sparkasse Jena · BLZ 830 530 30
Konto: 221 IBAN: DE87 8305 3030 0000 0002 21
BIC: HELADEF1JEN

Universitätsklinikum Jena · Körperschaft des Öffentlichen Rechts
als Teilkörperschaft der Friedrich-Schiller-Universität Jena
Verwaltungsratsvorsitzender: Staatssekretär Carsten Feller
Kaufmännischer Vorstand und Sprecherin des
Klinikumsvorstandes: Dr. Brunhilde Seidel-Kwem
Medizinischer Vorstand: Prof. Dr. Otto W. Witte
Wissenschaftlicher Vorstand: Prof. Dr. Thomas Kamradt

Abbildung 58: Zustimmung der Ethik-Kommission der Friedrich-Schiller-Universität in Jena zur Änderung des Studienprotokolls vom 13.09.2022.

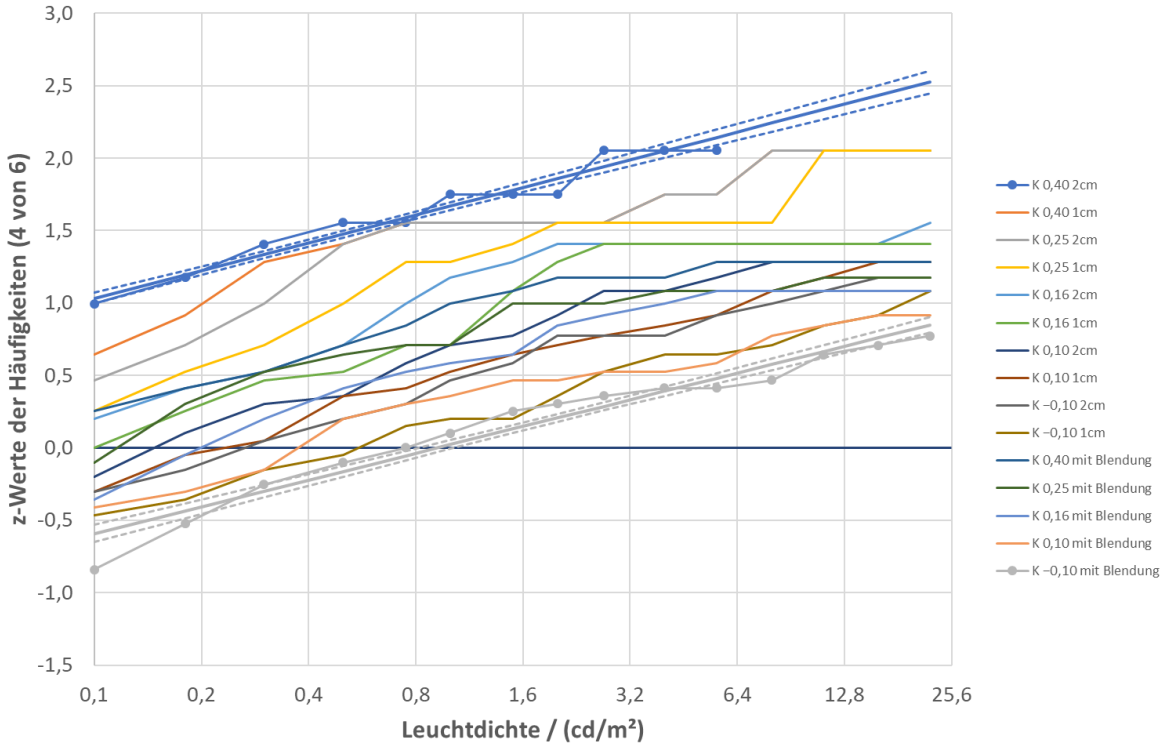


Abbildung 59: z-Werte der Häufigkeiten in Abhängigkeit von der Leuchtdichte für verschiedene Kontraste bei einer Erkennung 4 von 6. Für zwei Kurven ist beispielhaft das 95%-Konfidenzintervall mit Strich-Linien angegeben.

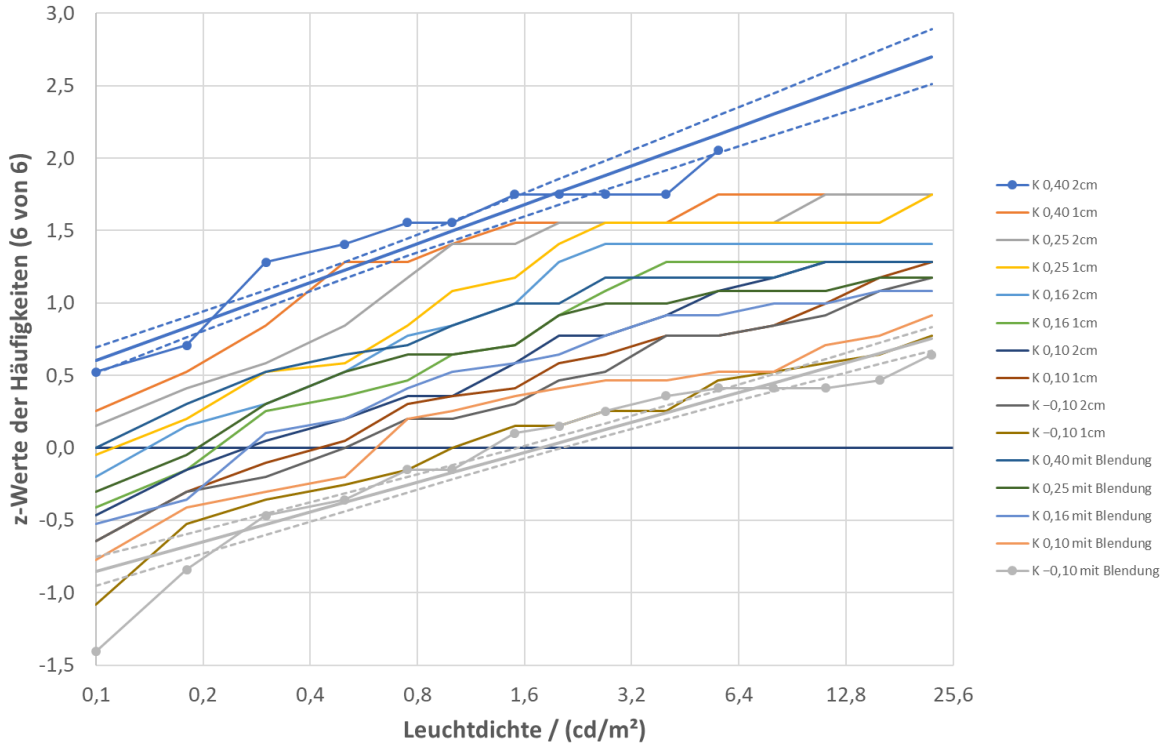


Abbildung 60: z-Werte der Häufigkeiten in Abhängigkeit von der Leuchtdichte für verschiedene Kontraste bei einer Erkennung 6 von 6. Für zwei Kurven ist beispielhaft das 95%-Konfidenzintervall mit Strich-Linien angegeben.

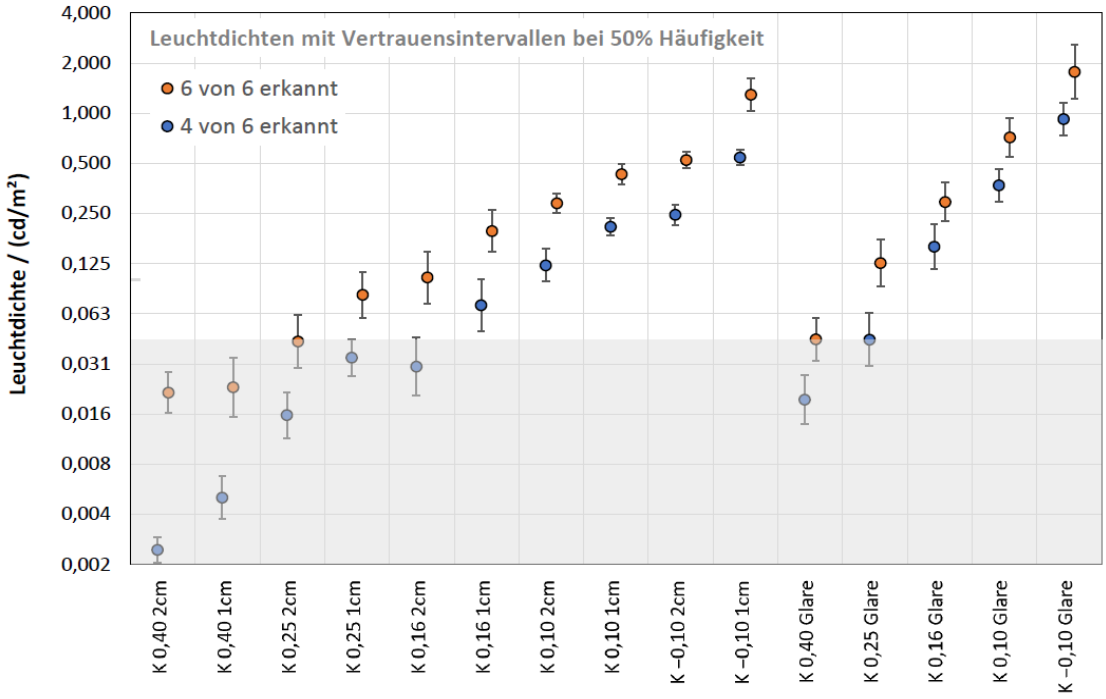


Abbildung 61: Leuchtdichten mit 95%-Konfidenzintervallen die erforderlich sind, damit 50 % der Sehbehinderten die angegebenen Kontraststufen ohne und mit Blendung erkennen. Der grau hinterlegte Leuchtdichte-Bereich liegt außerhalb des untersuchten Werte-Bereiches.

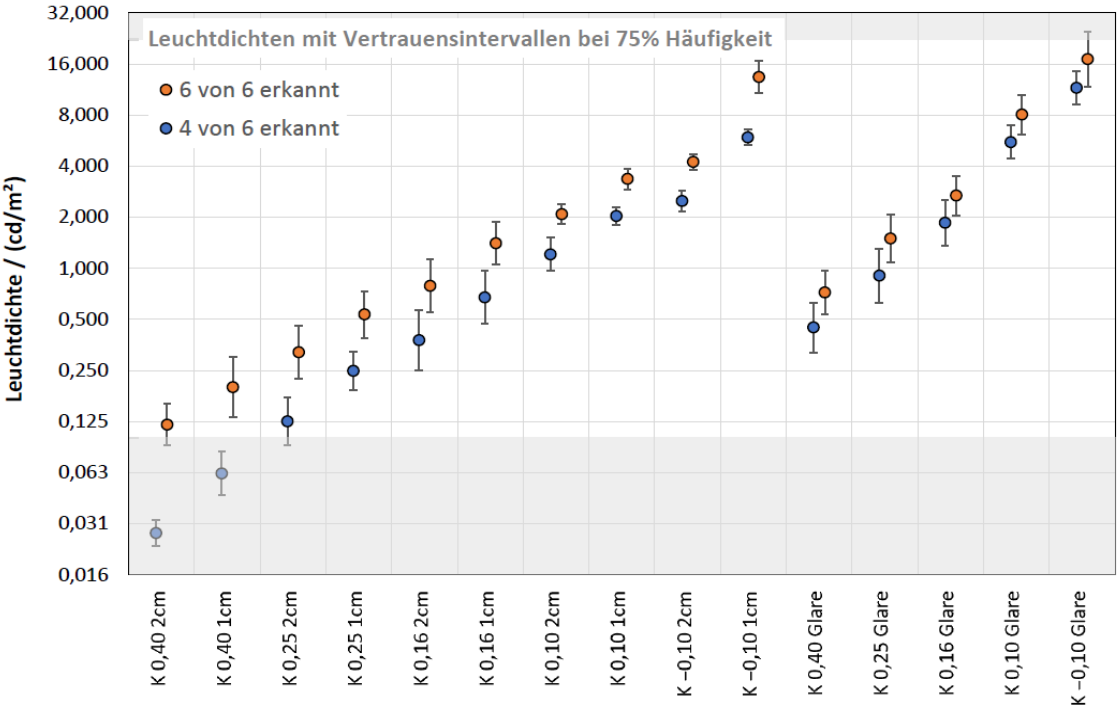


Abbildung 62: Leuchtdichten mit 95%-Konfidenzintervallen die erforderlich sind, damit 75 % der Sehbehinderten die angegebenen Kontraststufen ohne und mit Blendung erkennen. Der grau hinterlegte Leuchtdichte-Bereich liegt außerhalb des untersuchten Werte-Bereiches.

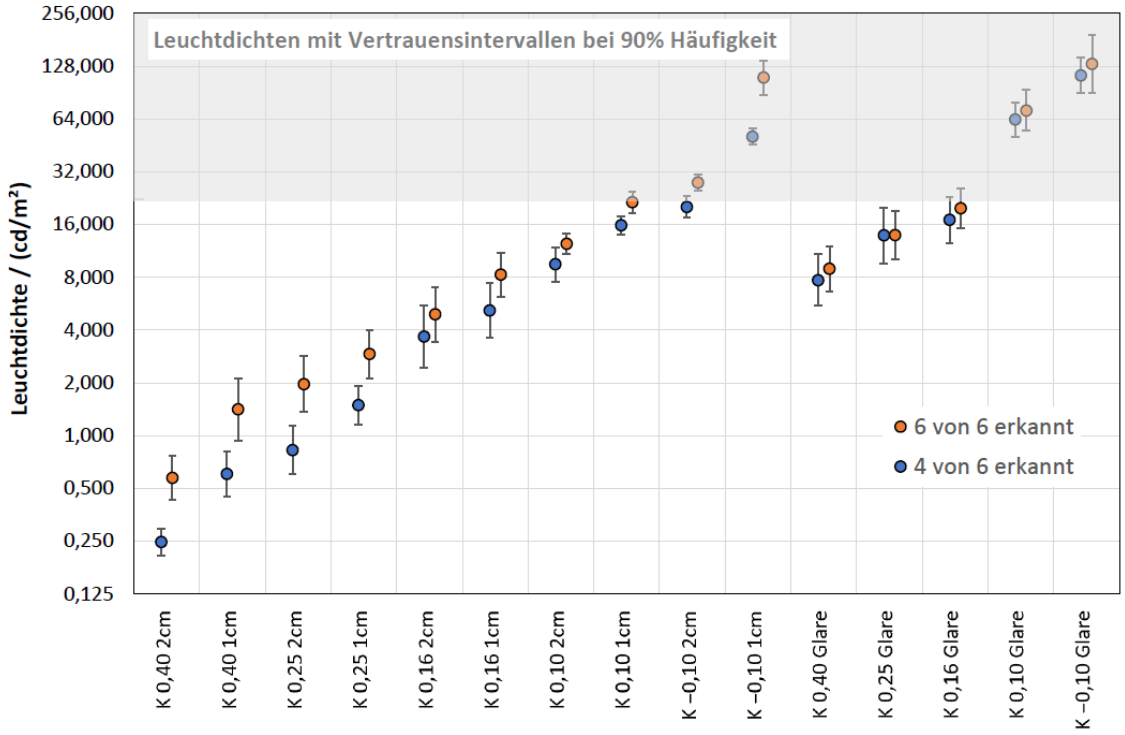


Abbildung 63: Leuchtdichten mit 95%-Konfidenzintervallen die erforderlich sind, damit 90 % der Sehbehinderten die angegebenen Kontraststufen ohne und mit Blendung erkennen. Der grau hinterlegte Leuchtdichte-Bereich liegt außerhalb des untersuchten Werte-Bereiches.

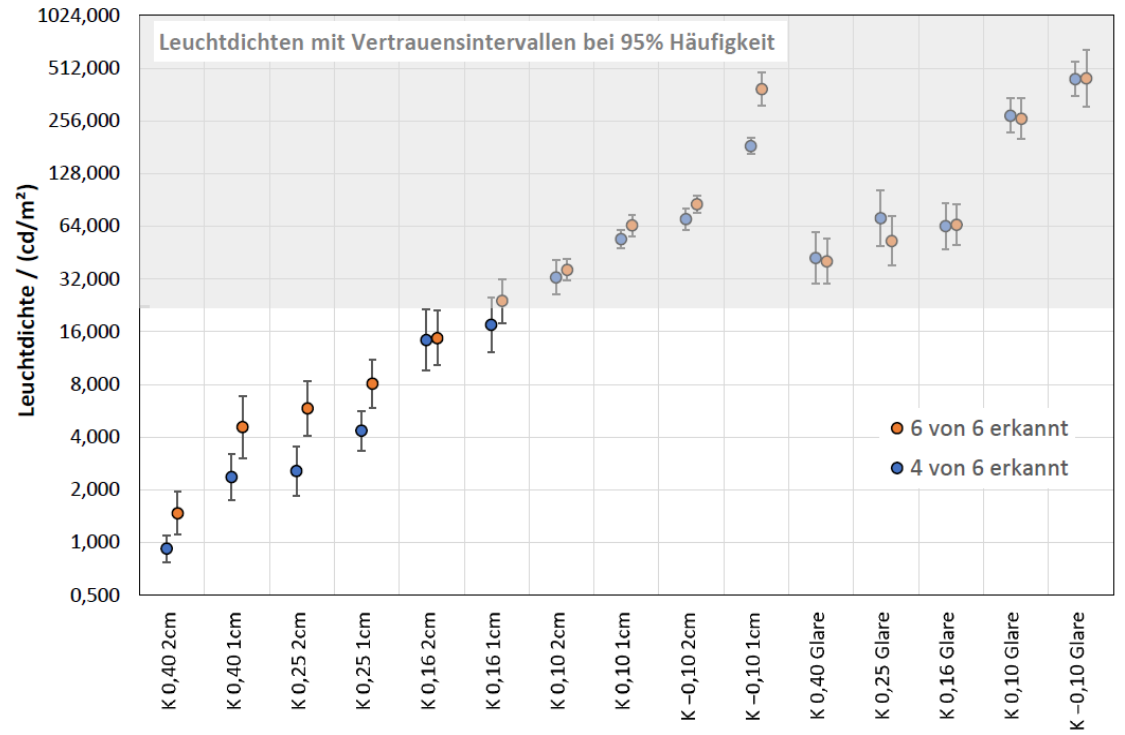


Abbildung 64: Leuchtdichten mit 95%-Konfidenzintervallen die erforderlich sind, damit 95 % der Sehbehinderten die angegebenen Kontraststufen ohne und mit Blendung erkennen. Der grau hinterlegte Leuchtdichte-Bereich liegt außerhalb des untersuchten Werte-Bereiches.

Tabelle 35: Leuchtdichten, die erforderlich sind, damit ein gegebener Prozentsatz der Untersuchungsgruppe (Häufigkeit in der ersten Spalte) die angegebenen Kontraststufen ohne Blendung erkennt. Die Erkennungswahrscheinlichkeit beträgt 4 von 6. Grau hinterlegte Werte liegt außerhalb des untersuchten Bereiches.

Häufig-keit	K=0,40 B=2cm	K=0,25 B=2cm	K=0,16 B=2cm	K=0,10 B=2cm	K=-0,10 B=2cm	K=0,40 B=1cm	K=0,25 B=1cm	K=0,16 B=1cm	K=0,10 B=1cm	K=-0,10 B=1cm
95 %	0,922	2,56	14,3	32,6	70,2	2,36	4,35	17,5	54,0	184
90 %	0,247	0,826	3,67	9,49	20,1	0,604	1,49	5,17	15,8	50,7
80 %	0,050	0,210	0,705	2,13	4,43	0,116	0,407	1,18	3,58	10,7
75 %	0,027	0,125	0,377	1,21	2,50	0,062	0,249	0,675	2,03	5,91
50 %	0,002	0,015	0,0301	0,122	0,245	0,005	0,034	0,070	0,208	0,542

Tabelle 36: Leuchtdichten, die erforderlich sind, damit ein gegebener Prozentsatz der Untersuchungsgruppe (Häufigkeit in der ersten Spalte) die angegebenen Kontraststufen mit Blendung erkennt. Die Erkennungswahrscheinlichkeit beträgt 4 von 6. Grau hinterlegte Werte liegt außerhalb des untersuchten Bereiches.

Häufig-keit	K=0,40 B=2cm	K=0,25 B=2cm	K=0,16 B=2cm	K=0,10 B=2cm	K=-0,10 B=2cm
95 %	42,2	71,1	64,1	274	444
90 %	7,69	13,9	17,0	63,6	113
80 %	0,980	1,92	3,41	10,86	21,7
75 %	0,448	0,906	1,85	5,55	11,6
50 %	0,019	0,044	0,158	0,369	0,921

Tabelle 37: Leuchtdichten, die erforderlich sind, damit ein gegebener Prozentsatz der Untersuchungsgruppe (Häufigkeit in der ersten Spalte) die angegebenen Kontraststufen ohne Blendung erkennt. Die Erkennungswahrscheinlichkeit beträgt 6 von 6. Grau hinterlegte Werte liegt außerhalb des untersuchten Bereiches.

Häufig-keit	K=0,40 B=2cm	K=0,25 B=2cm	K=0,16 B=2cm	K=0,10 B=2cm	K=-0,10 B=2cm	K=0,40 B=1cm	K=0,25 B=1cm	K=0,16 B=1cm	K=0,10 B=1cm	K=-0,10 B=1cm
95 %	1,47	5,83	14,7	36,1	85,6	4,56	8,06	24,0	64,8	389
90 %	0,574	1,97	4,92	12,4	27,8	1,41	2,92	8,29	21,4	110
80 %	0,184	0,527	1,31	3,41	7,11	0,341	0,853	2,29	5,60	24,0
75 %	0,120	0,320	0,789	2,09	4,23	0,199	0,535	1,41	3,37	13,4
50 %	0,021	0,043	0,103	0,288	0,524	0,023	0,081	0,196	0,431	1,29

Tabelle 38: Leuchtdichten, die erforderlich sind, damit ein gegebener Prozentsatz der Untersuchungsgruppe (Häufigkeit in der ersten Spalte) die angegebenen Kontraststufen mit Blendung erkennt. Die Erkennungswahrscheinlichkeit beträgt 4 von 6. Grau hinterlegte Werte liegt außerhalb des untersuchten Bereiches.

Häufig-keit	K=0,40 B=2cm	K=0,25 B=2cm	K=0,16 B=2cm	K=0,10 B=2cm	K=-0,10 B=2cm
95 %	40,4	52,7	65,3	263	447
90 %	8,94	13,9	19,8	71,4	132
80 %	1,44	2,77	4,66	14,7	30,0
75 %	0,720	1,50	2,69	8,07	17,1
50 %	0,044	0,126	0,293	0,715	1,77

Abbildung 65: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für eine Streifenbreite von B = 2 cm ohne Blendung

Abbildung 66: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für eine Streifenbreite von B = 1 cm ohne Blendung

Abbildung 67: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für eine Streifenbreite von B = 2 cm mit Blendung

Tabelle 39: Mittelwert, Standardabweichung, Konfidenzintervall und Anzahl der einbezogenen Fälle der log-Leuchtdichten bei der Untersuchungsgruppe.

Kontrast	Streifenbreite	Blendung	Erkennung	Untersuchungsgruppe logL in log(cd/m²)) MW ± SD (95% CI); n
0,40	2 cm	ohne	4 von 6	0,87 ± 0,38 (0,76 zu 0,98); 50
0,25	2 cm	ohne	4 von 6	0,79 ± 0,41 (0,66 zu 0,9); 49
0,16	2 cm	ohne	4 von 6	0,69 ± 0,50 (0,55 zu 0,84); 47
0,10	2 cm	ohne	4 von 6	0,56 ± 0,56 (0,39 zu 0,72); 45
-0,10	2 cm	ohne	4 von 6	0,42 ± 0,67 (0,22 zu 0,62); 44
0,40	2 cm	ohne	6 von 6	0,79 ± 0,43 (0,67 zu 0,91); 50
0,25	2 cm	ohne	6 von 6	0,67 ± 0,47 (0,52 zu 0,79); 49
0,16	2 cm	ohne	6 von 6	0,60 ± 0,47 (0,46 zu 0,74); 46
0,10	2 cm	ohne	6 von 6	0,39 ± 0,64 (0,20 zu 0,58); 45
-0,10	2 cm	ohne	6 von 6	0,24 ± 0,74 (0,01 zu 0,46); 44
0,40	1 cm	ohne	4 von 6	0,84 ± 0,39 (0,72 zu 0,95); 49
0,25	1 cm	ohne	4 von 6	0,70 ± 0,51 (0,54 zu 0,83); 49
0,16	1 cm	ohne	4 von 6	0,64 ± 0,48 (0,50 zu 0,79); 46
0,10	1 cm	ohne	4 von 6	0,43 ± 0,68 (0,22 zu 0,63); 45
-0,10	1 cm	ohne	4 von 6	0,24 ± 0,78 (0,00 zu 0,48); 43
0,40	1 cm	ohne	6 von 6	0,77 ± 0,38 (0,66 zu 0,88); 48
0,25	1 cm	ohne	6 von 6	0,61 ± 0,53 (0,45 zu 0,76); 48
0,16	1 cm	ohne	6 von 6	0,50 ± 0,53 (0,34 zu 0,66); 45
0,10	1 cm	ohne	6 von 6	0,26 ± 0,73 (0,04 zu 0,48); 45
-0,10	1 cm	ohne	6 von 6	0,13 ± 0,75 (-0,11 zu 0,37); 39
0,40	2 cm	mit	4 von 6	0,74 ± 0,45 (0,60 zu 0,87); 45
0,25	2 cm	mit	4 von 6	0,67 ± 0,50 (0,52 zu 0,82); 44
0,16	2 cm	mit	4 von 6	0,55 ± 0,52 (0,39 zu 0,71); 43
0,10	2 cm	mit	4 von 6	0,39 ± 0,69 (0,17 zu 0,61); 41
-0,10	2 cm	mit	4 von 6	0,23 ± 0,73 (-0,01 zu 0,47); 39
0,40	2 cm	mit	6 von 6	0,67 ± 0,50 (0,51 zu 0,82); 45
0,25	2 cm	mit	6 von 6	0,55 ± 0,55 (0,39 zu 0,72); 44
0,16	2 cm	mit	6 von 6	0,43 ± 0,60 (0,24 zu 0,61); 43
0,10	2 cm	mit	6 von 6	0,22 ± 0,75 (-0,01 zu 0,46); 41
-0,10	2 cm	mit	6 von 6	0,09 ± 0,70 (-0,14 zu 0,32); 37

Tabelle 40: Mittelwert, Standardabweichung, Konfidenzintervall und Anzahl der einbezogenen Fälle der log-Leuchtdichten bei den Subgruppen „Blendempfindlich“ und „Nicht blendempfindlich“

Kontrast	Streifenbreite	Blendung	Erkennung	„Nicht blendempfindlich“ logL in log(cd/m²)) MW ± SD (95% CI); n	„Blendempfindlich“ logL in log(cd/m²)) MW ± SD (95% CI); n
0,40	2 cm	ohne	4 von 6	0,97 ± 0,11 (0,91 zu 0,12); 19	1 ± 0 (1 zu 1); 20
0,25	2 cm	ohne	4 von 6	0,91 ± 0,21 (0,80 zu 0,16); 19	0,96 ± 0,10 (0,91 zu 1,00); 20
0,16	2 cm	ohne	4 von 6	0,86 ± 0,29 (0,70 zu 0,20); 18	0,89 ± 0,25 (0,74 zu 0,99); 20
0,10	2 cm	ohne	4 von 6	0,76 ± 0,38 (0,54 zu 0,29); 18	0,73 ± 0,41 (0,51 zu 0,89); 20
-0,10	2 cm	ohne	4 von 6	0,65 ± 0,50 (0,37 zu 0,43); 18	0,59 ± 0,51 (0,36 zu 0,79); 20
0,40	2 cm	ohne	6 von 6	0,92 ± 0,19 (0,82 zu 0,15); 19	0,95 ± 0,13 (0,88 zu 1,00); 20
0,25	2 cm	ohne	6 von 6	0,83 ± 0,31 (0,68 zu 0,21); 19	0,86 ± 0,27 (0,73 zu 0,97); 20
0,16	2 cm	ohne	6 von 6	0,75 ± 0,36 (0,56 zu 0,27); 18	0,78 ± 0,33 (0,63 zu 0,92); 20
0,10	2 cm	ohne	6 von 6	0,61 ± 0,47 (0,37 zu 0,43); 18	0,58 ± 0,54 (0,30 zu 0,80); 20
-0,10	2 cm	ohne	6 von 6	0,50 ± 0,54 (0,22 zu 0,60); 18	0,39 ± 0,64 (0,08 zu 0,64); 20
0,40	1 cm	ohne	4 von 6	0,94 ± 0,17 (0,83 zu 0,15); 19	0,99 ± 0,06 (0,95 zu 1,00); 20
0,25	1 cm	ohne	4 von 6	0,84 ± 0,36 (0,65 zu 0,22); 19	0,91 ± 0,16 (0,83 zu 0,98); 20
0,16	1 cm	ohne	4 von 6	0,80 ± 0,34 (0,61 zu 0,24); 18	0,84 ± 0,30 (0,68 zu 0,97); 20
0,10	1 cm	ohne	4 von 6	0,67 ± 0,54 (0,35 zu 0,44); 18	0,64 ± 0,46 (0,41 zu 0,83); 20
-0,10	1 cm	ohne	4 von 6	0,52 ± 0,62 (0,17 zu 0,68); 18	0,36 ± 0,66 (0,06 zu 0,63); 19
0,40	1 cm	ohne	6 von 6	0,86 ± 0,29 (0,71 zu 0,20); 19	0,93 ± 0,16 (0,85 zu 0,99); 20
0,25	1 cm	ohne	6 von 6	0,76 ± 0,42 (0,67 zu 0,21); 19	0,80 ± 0,28 (0,55 zu 0,93); 20
0,16	1 cm	ohne	6 von 6	0,67 ± 0,40 (0,47 zu 0,34); 18	0,68 ± 0,38 (0,51 zu 0,84); 20
0,10	1 cm	ohne	6 von 6	0,51 ± 0,58 (0,19 zu 0,65); 18	0,49 ± 0,54 (0,25 zu 0,71); 20
-0,10	1 cm	ohne	6 von 6	0,40 ± 0,43 (0,20 zu 0,64); 17	0,14 ± 0,8 (-0,24 zu 0,52); 18
0,40	2 cm	mit	4 von 6	0,88 ± 0,33 (0,70 zu 0,20); 19	0,86 ± 0,29 (0,70 zu 0,99); 18
0,25	2 cm	mit	4 von 6	0,80 ± 0,48 (0,52 zu 0,30); 19	0,77 ± 0,33 (0,58 zu 0,91); 18
0,16	2 cm	mit	4 von 6	0,77 ± 0,33 (0,59 zu 0,26); 18	0,69 ± 0,42 (0,47 zu 0,87); 18
0,10	2 cm	mit	4 von 6	0,65 ± 0,50 (0,19 zu 0,65); 18	0,51 ± 0,58 (0,36 zu 0,88); 17
-0,10	2 cm	mit	4 von 6	0,56 ± 0,59 (0,36 zu 0,44); 18	0,32 ± 0,75 (-0,02 zu 0,65); 17
0,40	2 cm	mit	6 von 6	0,86 ± 0,36 (0,65 zu 0,23); 19	0,78 ± 0,32 (0,59 zu 0,92); 18
0,25	2 cm	mit	6 von 6	0,71 ± 0,53 (0,42 zu 0,38); 19	0,66 ± 0,41 (0,43 zu 0,84); 18
0,16	2 cm	mit	6 von 6	0,66 ± 0,37 (0,46 zu 0,35); 18	0,60 ± 0,49 (0,34 zu 0,83); 18
0,10	2 cm	mit	6 von 6	0,49 ± 0,57 (0,18 zu 0,67); 18	0,35 ± 0,63 (0,00 zu 0,65); 17
-0,10	2 cm	mit	6 von 6	0,33 ± 0,45 (0,10 zu 0,80); 17	0,10 ± 0,74 (-0,27 zu 0,45); 16

Tabelle 41: Mittelwert, Standardabweichung, Konfidenzintervall und Anzahl der einbezogenen Fälle der log-Leuchtdichten bei den Subgruppen „Zentrale Einschränkungen“ und „Zentral und periphere Einschränkungen“

Kontrast	Streifenbreite	Blendung	Erkennung	„Zentrale Einschränkungen“ logL in log(cd/m²)) MW ± SD (95% CI); n	„Zentral und periphere Eins.“ logL in log(cd/m²)) MW ± SD (95% CI); n
0,40	2 cm	ohne	4 von 6	1 (1 zu 1); 11	0,89 ± 0,29 (0,79 zu 0,99); 33
0,25	2 cm	ohne	4 von 6	1 (1 zu 1); 11	0,77 ± 0,37 (0,64 zu 0,91); 33
0,16	2 cm	ohne	4 von 6	1 (1 zu 1); 11	0,68 ± 0,44 (0,52 zu 0,84); 31
0,10	2 cm	ohne	4 von 6	1 (1 zu 1); 11	0,44 ± 0,57 (0,21 zu 0,65); 30
-0,10	2 cm	ohne	4 von 6	0,96 (0,84 zu 0,97); 11	0,26 ± 0,69 (0,00 zu 0,52); 29
0,40	2 cm	ohne	6 von 6	1 (1 zu 1); 11	0,79 ± 0,38 (0,66 zu 0,92); 33
0,25	2 cm	ohne	6 von 6	1 (1 zu 1); 11	0,61 ± 0,50 (0,43 zu 0,79); 33
0,16	2 cm	ohne	6 von 6	0,98 (0,91 zu 0,98); 11	0,50 ± 0,49 (0,33 zu 0,68); 31
0,10	2 cm	ohne	6 von 6	0,95 (0,88 zu 0,98); 11	0,23 ± 0,63 (0,00 zu 0,45); 30
-0,10	2 cm	ohne	6 von 6	0,91 (0,76 zu 0,98); 11	0,02 ± 0,72 (-0,25 zu 0,28); 29
0,40	1 cm	ohne	4 von 6	1 (1 zu 1); 11	0,82 ± 0,35 (0,82 zu 0,95); 33
0,25	1 cm	ohne	4 von 6	1 (1 zu 1); 11	0,67 ± 0,50 (0,49 zu 0,84); 33
0,16	1 cm	ohne	4 von 6	1 (1 zu 1); 11	0,56 ± 0,50 (0,38 zu 0,75); 31
0,10	1 cm	ohne	4 von 6	0,98 (0,91 zu 0,98); 11	0,29 ± 0,67 (0,02 zu 0,54); 30
-0,10	1 cm	ohne	4 von 6	0,96 (0,84 zu 0,97); 11	0,02 ± 0,76 (-0,27 zu 0,31); 28
0,40	1 cm	ohne	6 von 6	0,98 (0,91 zu 0,98); 11	0,71 ± 0,43 (0,56 zu 0,87); 33
0,25	1 cm	ohne	6 von 6	0,98 (0,91 zu 1); 11	0,51 ± 0,57 (0,30 zu 0,71); 33
0,16	1 cm	ohne	6 von 6	0,96 (0,84 zu 0,97); 11	0,38 ± 0,51 (0,19 zu 0,57); 30
0,10	1 cm	ohne	6 von 6	0,93 (0,83 zu 0,98); 11	0,08 ± 0,69 (-0,18 zu 0,32); 30
-0,10	1 cm	ohne	6 von 6	0,78 (0,61 zu 0,93); 11	-0,08 ± 0,69 (-0,36 zu 0,19); 24
0,40	2 cm	mit	4 von 6	1 (1 zu 1); 11	0,66 ± 0,50 (0,46 zu 0,83); 30
0,25	2 cm	mit	4 von 6	1 (1 zu 1); 11	0,55 ± 0,54 (0,33 zu 0,74); 29
0,16	2 cm	mit	4 von 6	0,98 (0,91 zu 0,98); 11	0,42 ± 0,53 (0,22 zu 0,62); 28
0,10	2 cm	mit	4 von 6	0,98 (0,91 zu 0,98); 11	0,21 ± 0,67 (-0,08 zu 0,47); 26
-0,10	2 cm	mit	4 von 6	0,91 (0,80 zu 0,98); 11	0,10 ± 0,68 (-0,17 zu 0,34); 24
0,40	2 cm	mit	6 von 6	1 (1 zu 1); 11	0,56 ± 0,55 (0,35 zu 0,75); 30
0,25	2 cm	mit	6 von 6	0,98 (0,91 zu 0,98); 11	0,41 ± 0,58 (0,18 zu 0,62); 29
0,16	2 cm	mit	6 von 6	0,93 (0,82 zu 0,98); 11	0,27 ± 0,59 (0,04 zu 0,50); 28
0,10	2 cm	mit	6 von 6	0,91 (0,8 zu 0,98); 11	0,02 ± 0,68 (-0,27 zu 0,28); 26
-0,10	2 cm	mit	6 von 6	0,74 (0,55 zu 0,9); 11	-0,13 ± 0,61 (-0,41 zu 0,12); 22

Tabelle 42: Mittelwert, Standardabweichung, Konfidenzintervall und Anzahl der einbezogenen Fälle der log-Leuchtdichten bei den Kontrollgruppen

Kontrast	Streifenbreite	Blendung	Erkennung	Kontrollgruppe I logL in log(cd/m²)) MW ± SD (95% CI); n	Kontrollgruppe II logL in log(cd/m²)) MW ± SD (95% CI); n
0,40	2 cm	ohne	4 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,25	2 cm	ohne	4 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,16	2 cm	ohne	4 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,10	2 cm	ohne	4 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
-0,10	2 cm	ohne	4 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,40	2 cm	ohne	6 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,25	2 cm	ohne	6 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,16	2 cm	ohne	6 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,10	2 cm	ohne	6 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
-0,10	2 cm	ohne	6 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,40	1 cm	ohne	4 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,25	1 cm	ohne	4 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,16	1 cm	ohne	4 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,10	1 cm	ohne	4 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
-0,10	1 cm	ohne	4 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,40	1 cm	ohne	6 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,25	1 cm	ohne	6 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,16	1 cm	ohne	6 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,10	1 cm	ohne	6 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
-0,10	1 cm	ohne	6 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	0,99 ± 0,04 (0,98 zu 1); 37
0,40	2 cm	mit	4 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,25	2 cm	mit	4 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,16	2 cm	mit	4 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,10	2 cm	mit	4 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
-0,10	2 cm	mit	4 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	0,99 ± 0,08 (0,96 zu 1); 37
0,40	2 cm	mit	6 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,25	2 cm	mit	6 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,16	2 cm	mit	6 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	1 ± 0 (1 zu 1); 37
0,10	2 cm	mit	6 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	0,99 ± 0,06 (0,97 zu 1); 37
-0,10	2 cm	mit	6 von 6	1 ± 0 (1 zu 1); 37	0,90 ± 0,16 (0,84 zu 0,95); 37

Tabelle 43: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Kontrollgruppen bei einer Streifenbreite von 2 cm ohne Blendung. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet.

Kontrast	Streifenbreite	Blendung	Erkennung	Untersuchungs- vs Kontrollgruppe I Mittlere Differenz logL in log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p)	Untersuchungs- vs Kontrollgruppe II Mittlere Differenz logL in log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p)
0,40	2 cm	ohne	4 von 6	-0,13 ± 0,05 (-0,24 zu -0,02; p = 0,018*)	-0,13 ± 0,05 (-0,24 zu -0,02; p = 0,018*)
0,25	2 cm	ohne	4 von 6	-0,21 ± 0,06 (-0,34 zu -0,09; p = 0,001*)	-0,21 ± 0,06 (-0,34 zu -0,09; p = 0,001*)
0,16	2 cm	ohne	4 von 6	-0,31 ± 0,07 (-0,45 zu -0,16; p < 0,001*)	-0,31 ± 0,07 (-0,45 zu -0,16; p < 0,001*)
0,10	2 cm	ohne	4 von 6	-0,44 ± 0,08 (-0,61 zu -0,28; p < 0,001*)	-0,44 ± 0,08 (-0,61 zu -0,28; p < 0,001*)
-0,10	2 cm	ohne	4 von 6	-0,58 ± 0,10 (-0,78 zu -0,38; p < 0,001*)	-0,58 ± 0,10 (-0,78 zu -0,38; p < 0,001*)
0,40	2 cm	ohne	6 von 6	-0,21 ± 0,06 (-0,33 zu -0,08; p = 0,001*)	-0,21 ± 0,06 (-0,33 zu -0,08; p = 0,001*)
0,25	2 cm	ohne	6 von 6	-0,33 ± 0,07 (-0,46 zu -0,19; p < 0,001*)	-0,33 ± 0,07 (-0,46 zu -0,19; p < 0,001*)
0,16	2 cm	ohne	6 von 6	-0,40 ± 0,07 (-0,54 zu -0,26; p < 0,001*)	-0,40 ± 0,07 (-0,54 zu -0,26; p < 0,001*)
0,10	2 cm	ohne	6 von 6	-0,61 ± 0,10 (-0,80 zu -0,42; p < 0,001*)	-0,61 ± 0,10 (-0,80 zu -0,42; p < 0,001*)
-0,10	2 cm	ohne	6 von 6	-0,76 ± 0,11 (-0,99 zu -0,54; p < 0,001*)	-0,76 ± 0,11 (-0,99 zu -0,54; p < 0,001*)

Tabelle 44: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Kontrollgruppen bei einer Streifenbreite von 1 cm ohne Blendung. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet.

Kontrast	Streifenbreite	Blendung	Erkennung	Untersuchungs- vs Kontrollgruppe I Mittlere Differenz logL in log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p)	Untersuchungs- vs Kontrollgruppe II Mittlere Differenz logL in log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p)
0,40	1 cm	ohne	4 von 6	-0,16 ± 0,06 (-0,28 zu -0,05; p = 0,005*)	-0,16 ± 0,06 (-0,28 zu -0,05; p = 0,005*)
0,25	1 cm	ohne	4 von 6	-0,30 ± 0,07 (-0,45 zu -0,16; p < 0,001*)	-0,30 ± 0,07 (-0,45 zu -0,16; p < 0,001*)
0,16	1 cm	ohne	4 von 6	-0,36 ± 0,07 (-0,50 zu -0,21; p < 0,001*)	-0,36 ± 0,07 (-0,50 zu -0,21; p < 0,001*)
0,10	1 cm	ohne	4 von 6	-0,57 ± 0,10 (-0,78 zu -0,37; p < 0,001*)	-0,57 ± 0,10 (-0,78 zu -0,37; p < 0,001*)
-0,10	1 cm	ohne	4 von 6	-0,58 ± 0,10 (-0,78 zu -0,38; p < 0,001*)	-0,57 ± 0,10 (-0,78 zu -0,37; p < 0,001*)
0,40	1 cm	ohne	6 von 6	-0,23 ± 0,05 (-0,34 zu -0,12; p < 0,001*)	-0,23 ± 0,05 (-0,34 zu -0,12; p < 0,001*)
0,25	1 cm	ohne	6 von 6	-0,40 ± 0,08 (-0,55 zu -0,24; p < 0,001*)	-0,40 ± 0,08 (-0,55 zu -0,24; p < 0,001*)
0,16	1 cm	ohne	6 von 6	-0,50 ± 0,08 (-0,66 zu -0,34; p < 0,001*)	-0,50 ± 0,08 (-0,66 zu -0,34; p < 0,001*)
0,10	1 cm	ohne	6 von 6	-0,74 ± 0,11 (-0,80 zu -0,42; p < 0,001*)	-0,74 ± 0,11 (-0,80 zu -0,42; p < 0,001*)
-0,10	1 cm	ohne	6 von 6	-0,87 ± 0,12 (-1,11 zu -0,63; p < 0,001*)	-0,86 ± 0,12 (-1,11 zu -0,62; p < 0,001*)

Tabelle 45: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Kontrollgruppen bei einer Streifenbreite von 2 cm mit Blendung. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet.

Kontrast	Streifenbreite	Blendung	Erkennung	Untersuchungs- vs Kontrollgruppe I Mittlere Differenz logL in log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p)	Untersuchungs- vs Kontrollgruppe II Mittlere Differenz logL in log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p)
0,40	2 cm	mit	4 von 6	-0,26 ± 0,07 (-0,40 zu -0,13; p < 0,001*)	-0,26 ± 0,07 (-0,40 zu -0,13; p < 0,001*)
0,25	2 cm	mit	4 von 6	-0,33 ± 0,08 (-0,48 zu -0,18; p < 0,001*)	-0,33 ± 0,08 (-0,48 zu -0,18; p < 0,001*)
0,16	2 cm	mit	4 von 6	-0,45 ± 0,08 (-0,61 zu -0,29; p < 0,001*)	-0,45 ± 0,08 (-0,61 zu -0,29; p < 0,001*)
0,10	2 cm	mit	4 von 6	-0,61 ± 0,11 (-0,83 zu -0,39; p < 0,001*)	-0,61 ± 0,11 (-0,83 zu -0,39; p < 0,001*)
-0,10	2 cm	mit	4 von 6	-0,77 ± 0,12 (-1,01 zu -0,53; p < 0,001*)	-0,76 ± 0,12 (-1,00 zu -0,53; p < 0,001*)
0,40	2 cm	mit	6 von 6	-0,33 ± 0,08 (-0,49 zu -0,18; p = 0,001*)	-0,33 ± 0,08 (-0,49 zu -0,18; p = 0,001*)
0,25	2 cm	mit	6 von 6	-0,45 ± 0,08 (-0,61 zu -0,28; p < 0,001*)	-0,45 ± 0,08 (-0,61 zu -0,28; p < 0,001*)
0,16	2 cm	mit	6 von 6	-0,57 ± 0,09 (-0,75 zu -0,39; p < 0,001*)	-0,57 ± 0,09 (-0,75 zu -0,39; p < 0,001*)
0,10	2 cm	mit	6 von 6	-0,78 ± 0,12 (-1,01 zu -0,54; p < 0,001*)	-0,76 ± 0,12 (-1,00 zu -0,53; p < 0,001*)
-0,10	2 cm	mit	6 von 6	-0,91 ± 0,12 (-1,14 zu -0,68; p < 0,001*)	-0,81 ± 0,12 (-1,04 zu -0,57; p < 0,001*)

Tabelle 46: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Kontrasten in der Untersuchungsgruppe. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet.

Kontrast	Streifen-breite	Blendung	Erkennung	Untersuchungsgruppe Mittlere Differenz logL in (log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p); n
0,40 vs. 0,25	2 cm	ohne	4 von 6	0,09 ± 0,18 (0,04 zu 0,15; p = 0,004*); 49
0,25 vs. 0,16	2 cm	ohne	4 von 6	0,13 ± 0,15 (0,08 zu 0,20; p < 0,001*); 48
0,16 vs. 0,10	2 cm	ohne	4 von 6	0,19 ± 0,23 (0,13 zu 0,26; p < 0,001*); 45
0,10 vs. -0,10	2 cm	ohne	4 von 6	0,16 ± 0,21 (0,10 zu 0,23; p < 0,001*); 44
0,40 vs. 0,25	2 cm	ohne	6 von 6	0,14 ± 0,28 (0,06 zu 0,22; p = 0,004*); 45
0,25 vs. 0,16	2 cm	ohne	6 von 6	0,13 ± 0,17 (0,08 zu 0,18; p = 0,001*); 46
0,16 vs. 0,10	2 cm	ohne	6 von 6	0,23 ± 0,24 (0,16 zu 0,30; p < 0,001*); 45
0,10 vs. -0,10	2 cm	ohne	6 von 6	0,16 ± 0,21 (0,10 zu 0,23; p < 0,001*); 44
0,40 vs. 0,25	1 cm	ohne	4 von 6	0,14 ± 0,19 (0,08 zu 0,19; p < 0,001*); 49
0,25 vs. 0,16	1 cm	ohne	4 von 6	0,16 ± 0,20 (0,10 zu 0,21; p = 0,001*); 46
0,16 vs. 0,10	1 cm	ohne	4 von 6	0,23 ± 0,28 (0,15 zu 0,32; p < 0,001*); 45
0,10 vs. -0,10	1 cm	ohne	4 von 6	0,23 ± 0,28 (0,14 zu 0,32; p < 0,001*); 43
0,40 vs. 0,25	1 cm	ohne	6 von 6	0,16 ± 0,21 (0,10 zu 0,22; p < 0,001*); 48
0,25 vs. 0,16	1 cm	ohne	6 von 6	0,13 ± 0,17 (0,08 zu 0,18; p < 0,001*); 46
0,16 vs. 0,10	1 cm	ohne	6 von 6	0,24 ± 0,25 (0,17 zu 0,32; p < 0,001*); 45
0,10 vs. -0,10	1 cm	ohne	6 von 6	0,27 ± 0,29 (0,17 zu 0,36; p < 0,001*); 39
0,40 vs. 0,25	2 cm	mit	4 von 6	0,10 ± 0,25 (0,04 zu 0,17; p = 0,003*); 44
0,25 vs. 0,16	2 cm	mit	4 von 6	0,16 ± 0,17 (0,10 zu 0,21; p < 0,001*); 43
0,16 vs. 0,10	2 cm	mit	4 von 6	0,20 ± 0,23 (0,13 zu 0,28; p < 0,001*); 41
0,10 vs. -0,10	2 cm	mit	4 von 6	0,23 ± 0,26 (0,14 zu 0,31; p < 0,001*); 39
0,40 vs. 0,25	2 cm	mit	6 von 6	0,15 ± 0,18 (0,10 zu 0,21; p < 0,001*); 44
0,25 vs. 0,16	2 cm	mit	6 von 6	0,17 ± 0,19 (0,11 zu 0,23; p < 0,001*); 43
0,16 vs. 0,10	2 cm	mit	6 von 6	0,26 ± 0,25 (0,18 zu 0,34; p < 0,001*); 41
0,10 vs. -0,10	2 cm	mit	6 von 6	0,26 ± 0,24 (0,18 zu 0,34; p < 0,001*); 37

Tabelle 47: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Erkennungen 4 von 6 und 6 von 6 in der Untersuchungsgruppe. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet.

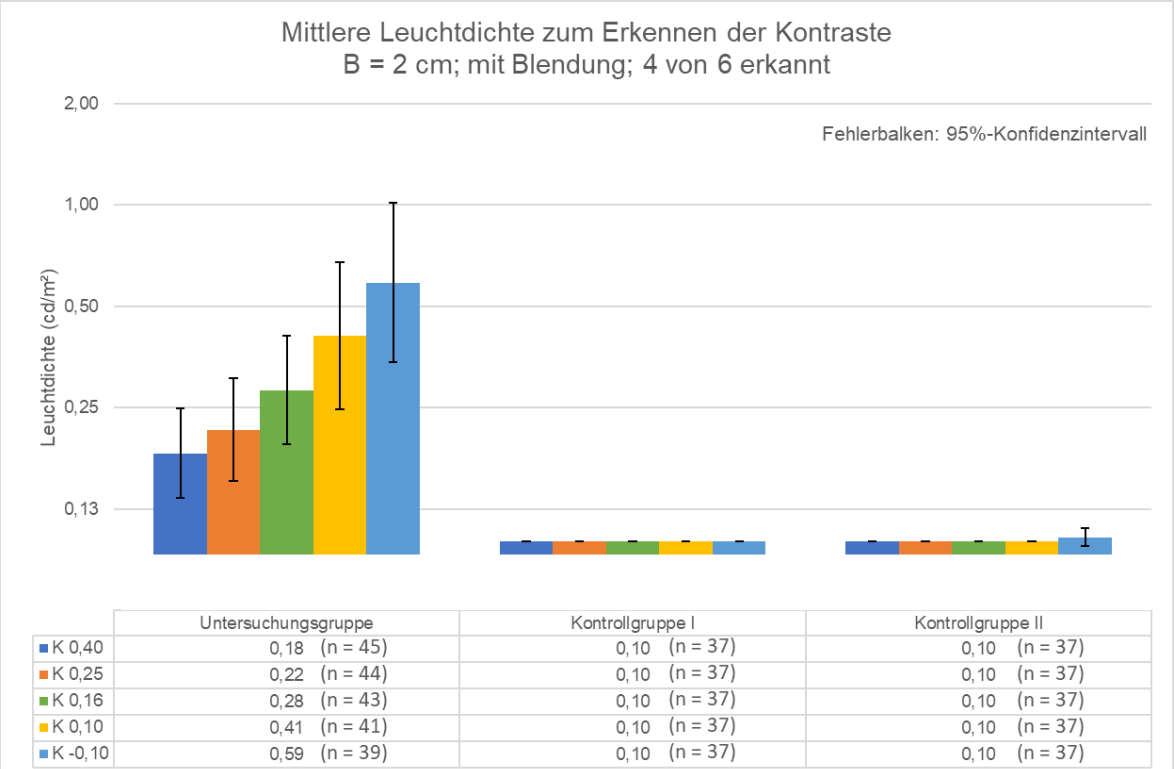
Kontrast	Streifenbreite	Blendung	Erkennung	Untersuchungsgruppe Mittlere Differenz logL in log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p); n
0,40	2 cm	ohne	4/6 vs. 6/6	-0,08 ± 0,15 (-0,12 zu -0,04; p < 0,001*); 50
0,25	2 cm	ohne	4/6 vs. 6/6	-0,14 ± 0,21 (-0,20 zu -0,08; p < 0,001*); 48
0,16	2 cm	ohne	4/6 vs. 6/6	-0,13 ± 0,15 (-0,18 zu -0,09; p < 0,001*); 46
0,10	2 cm	ohne	4/6 vs. 6/6	-0,17 ± 0,15 (-0,21 zu -0,12; p < 0,001*); 45
-0,10	2 cm	ohne	4/6 vs. 6/6	-0,19 ± 0,14 (-0,23 zu -0,14; p < 0,001*); 44
0,40	1 cm	ohne	4/6 vs. 6/6	-0,10 ± 0,15 (-0,15 zu -0,06; p < 0,001*); 48
0,25	1 cm	ohne	4/6 vs. 6/6	-0,13 ± 0,16 (-0,18 zu -0,09; p < 0,001*); 48
0,16	1 cm	ohne	4/6 vs. 6/6	-0,16 ± 0,15 (-0,20 zu -0,11; p < 0,001*); 45
0,10	1 cm	ohne	4/6 vs. 6/6	-0,17 ± 0,13 (-0,21 zu -0,13; p < 0,001*); 45
-0,10	1 cm	ohne	4/6 vs. 6/6	-0,19 ± 0,27 (-0,28 zu -0,12; p < 0,001*); 40
0,40	2 cm	mit	4/6 vs. 6/6	-0,06 ± 0,17 (-0,12 zu -0,01; p = 0,019*); 43
0,25	2 cm	mit	4/6 vs. 6/6	-0,11 ± 0,12 (-0,15 zu -0,08; p < 0,001*); 43
0,16	2 cm	mit	4/6 vs. 6/6	-0,12 ± 0,13 (-0,16 zu -0,08; p < 0,001*); 43
0,10	2 cm	mit	4/6 vs. 6/6	-0,16 ± 0,13 (-0,20 zu -0,12; p < 0,001*); 41
-0,10	2 cm	mit	4/6 vs. 6/6	-0,22 ± 0,12 (-0,26 zu -0,18; p < 0,001*); 37

Tabelle 48: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Streifenbreiten B = 1 cm und B = 2 cm in der Untersuchungsgruppe. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet.

Kontrast	Streifenbreite in cm	Blendung	Erkennung	Untersuchungsgruppe Mittlere Differenz log L in log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p); n
0,40	2 vs. 1	ohne	4 von 6	-0,05 ± 0,12 (-0,09 zu -0,02; p = 0,004*); 49
0,25	2 vs. 1	ohne	4 von 6	-0,09 ± 0,15 (-0,14 zu -0,05; p < 0,001*); 49
0,16	2 vs. 1	ohne	4 von 6	-0,10 ± 0,13 (-0,14 zu -0,06; p < 0,001*); 46
0,10	2 vs. 1	ohne	4 von 6	-0,13 ± 0,20 (-0,19 zu -0,07; p < 0,001*); 45
-0,10	2 vs. 1	ohne	4 von 6	-0,20 ± 0,25 (-0,27 zu -0,12; p < 0,001*); 43
0,40	2 vs. 1	ohne	6 von 6	-0,08 ± 0,13 (-0,11 zu -0,04; p = 0,004*); 48
0,25	2 vs. 1	ohne	6 von 6	-0,08 ± 0,17 (-0,13 zu -0,03; p < 0,001*); 48
0,16	2 vs. 1	ohne	6 von 6	-0,12 ± 0,14 (-0,16 zu -0,08; p < 0,001*); 45
0,10	2 vs. 1	ohne	6 von 6	-0,13 ± 0,20 (-0,19 zu -0,07; p < 0,001*); 45
-0,10	2 vs. 1	ohne	6 von 6	-0,19 ± 0,32 (-0,29 zu -0,08; p < 0,001*); 40

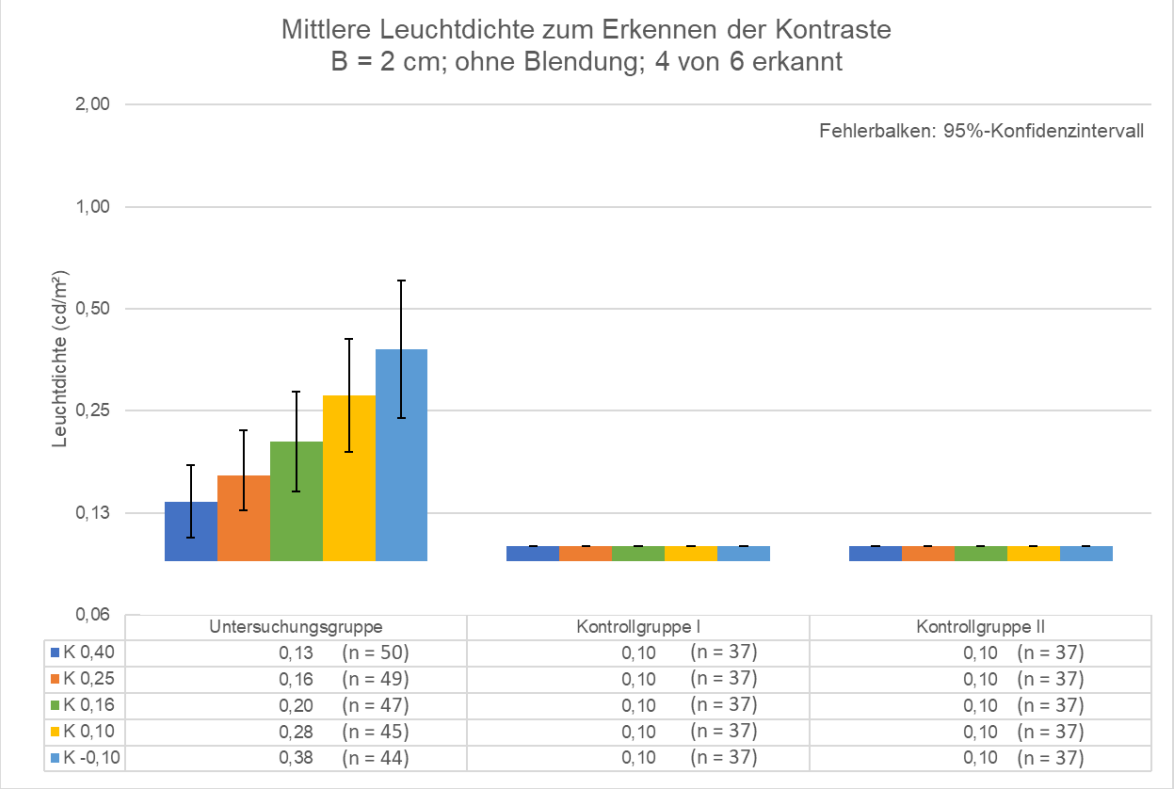
Tabelle 49: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Situationen ohne und mit Blendung in der Untersuchungsgruppe. Signifikante p-Werte sind mit * gekennzeichnet.

Kontrast	Streifenbreite	Blendung	Erkennung	Untersuchungsgruppe Mittlere Differenz logL in log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p); n
0,40	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,19 ± 0,31 (-0,28 zu -0,09; p = 0,004*); 45
0,25	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,19 ± 0,31 (-0,29 zu -0,10; p < 0,001*); 44
0,16	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,19 ± 0,25 (-0,27 zu -0,11; p < 0,001*); 43
0,10	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,19 ± 0,23 (-0,26 zu -0,11; p < 0,001*); 41
-0,10	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,28 ± 0,30 (-0,37 zu -0,18; p < 0,001*); 39
0,40	2 cm	ohne vs mit	6 von 6	-0,18 ± 0,27 (-0,26 zu -0,10; p = 0,004*); 45
0,25	2 cm	ohne vs mit	6 von 6	-0,17 ± 0,32 (-0,27 zu -0,07; p < 0,001*); 44
0,16	2 cm	ohne vs mit	6 von 6	-0,18 ± 0,27 (-0,27 zu -0,10; p < 0,00*1); 43
0,10	2 cm	ohne vs mit	6 von 6	-0,19 ± 0,21 (-0,26 zu -0,12; p < 0,001*); 41
-0,10	2 cm	ohne vs mit	6 von 6	-0,30 ± 0,24 (-0,38 zu -0,22; p < 0,001*); 37



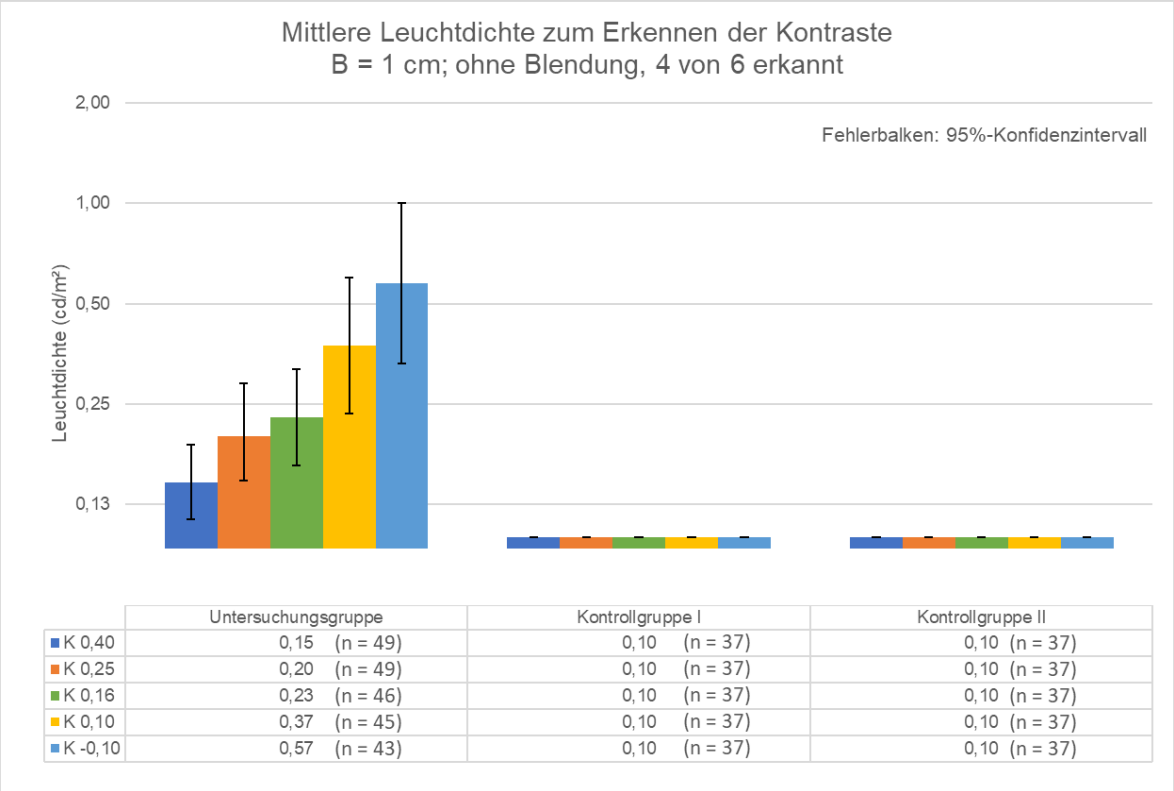
	Untersuchungsgruppe	Kontrollgruppe I	Kontrollgruppe II
K 0,40	0,18 (n = 45)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,25	0,22 (n = 44)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,16	0,28 (n = 43)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,10	0,41 (n = 41)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K -0,10	0,59 (n = 39)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)

Abbildung 68: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste bei einer Streifenbreite von 2 cm mit Blendung mit 4 von 6 richtigen Orientierungsangaben. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch.



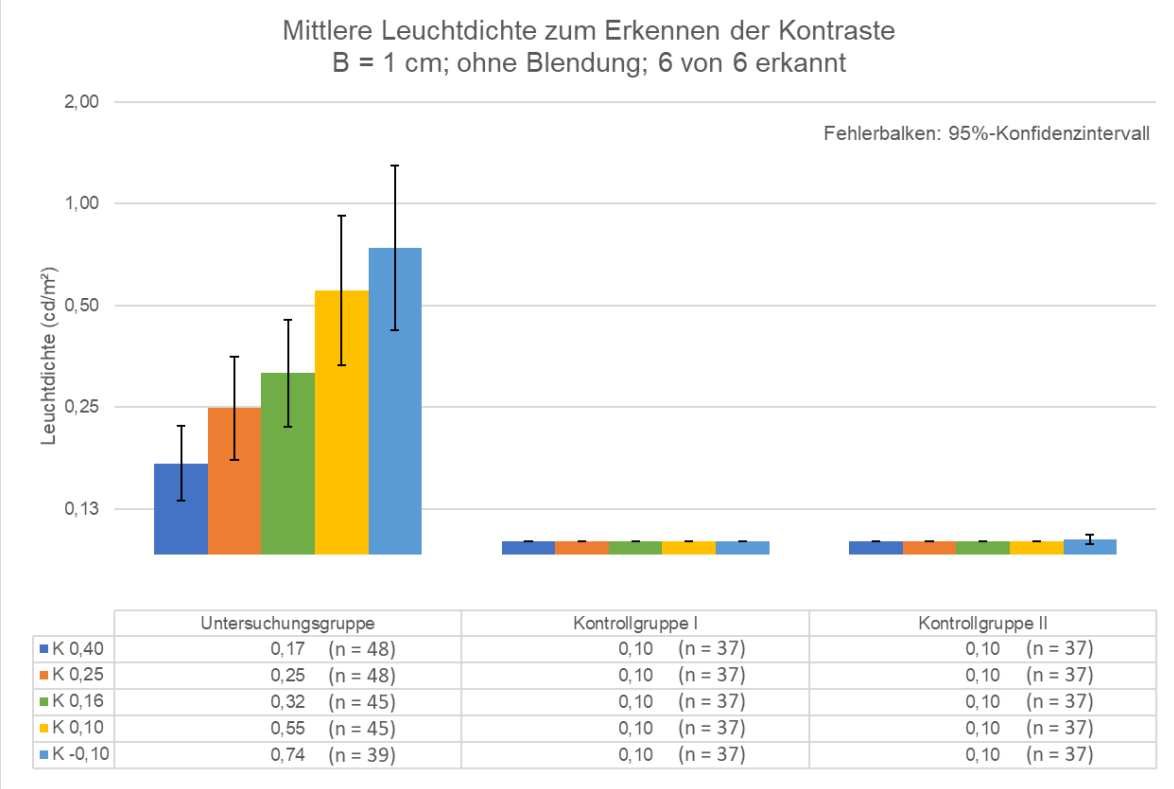
	Untersuchungsgruppe	Kontrollgruppe I	Kontrollgruppe II
K 0,40	0,13 (n = 50)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,25	0,16 (n = 49)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,16	0,20 (n = 47)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,10	0,28 (n = 45)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K -0,10	0,38 (n = 44)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)

Abbildung 69: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste bei einer Streifenbreite von 2 cm mit 4 von 6 richtigen Orientierungsangaben. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch.



	Untersuchungsgruppe	Kontrollgruppe I	Kontrollgruppe II
K 0,40	0,15 (n = 49)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,25	0,20 (n = 49)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,16	0,23 (n = 46)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,10	0,37 (n = 45)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K -0,10	0,57 (n = 43)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)

Abbildung 70: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste bei einer Streifenbreite von 1 cm mit 4 von 6 richtigen Orientierungsangaben. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch.



	Untersuchungsgruppe	Kontrollgruppe I	Kontrollgruppe II
K 0,40	0,17 (n = 48)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,25	0,25 (n = 48)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,16	0,32 (n = 45)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K 0,10	0,55 (n = 45)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)
K -0,10	0,74 (n = 39)	0,10 (n = 37)	0,10 (n = 37)

Abbildung 71: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste bei einer Streifenbreite von 1 cm mit 6 von 6 richtigen Orientierungsangaben. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch.

Tabelle 50: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Subgruppen für die dargebotenen Kontraststufen. Signifikante p-Werte sind mit * markiert.

Kontrast	Streifen-breite	Blendung	Erkennung	„Nicht blendempfindlich“ vs. „Blendempfindlich“ Mittlere Differenz log L in log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p)
0,40	2 cm	ohne	4 von 6	-0,03 ± 0,02 (-0,09 zu -0,02; p = 0,123)
0,25	2 cm	ohne	4 von 6	-0,05 ± 0,05 (-0,16 zu 0,05; p = 0,375)
0,16	2 cm	ohne	4 von 6	-0,03 ± 0,09 (-0,20 zu 0,13; p = 0,785)
0,10	2 cm	ohne	4 von 6	0,03 ± 0,13 (-0,21 zu 0,25; p =0,813)
-0,10	2 cm	ohne	4 von 6	0,07 ± 0,16 (-0,24 zu 0,34; p = 0,695)
0,40	2 cm	ohne	6 von 6	-0,03 ± 0,05 (-0,23 zu 0,07; p = 0,626)
0,25	2 cm	ohne	6 von 6	-0,03 ± 0,09 (-0,21 zu 0,14; p = 0,753)
0,16	2 cm	ohne	6 von 6	-0,03 ± 0,10 (-0,25 zu 0,16; p = 0,797)
0,10	2 cm	ohne	6 von 6	0,03 ± 0,16 (-0,28 zu 0,30; p = 0,839)
-0,10	2 cm	ohne	6 von 6	0,11 ± 0,19 (-0,25 zu 0,44; p = 0,549)
0,40	1 cm	ohne	4 von 6	-0,05 ± 0,04 (-0,15 zu 0,02; p = 0,236)
0,25	1 cm	ohne	4 von 6	-0,07 ± 0,09 (-0,27 zu 0,09; p = 0,439)
0,16	1 cm	ohne	4 von 6	-0,04 ± 0,11 (-0,25 zu -0,15; p = 0,696)
0,10	1 cm	ohne	4 von 6	0,03 ± 0,16 (-0,30 zu 0,31; p = 0,841)
-0,10	1 cm	ohne	4 von 6	0,15 ± 0,21 (-0,26 zu -0,53; p = 0,449)
0,40	1 cm	ohne	6 von 6	-0,07 ± 0,07 (-0,28 zu -0,09; p = 0,361)
0,25	1 cm	ohne	6 von 6	-0,04 ± 0,11 (-0,28 zu 0,17; p = 0,730)
0,16	1 cm	ohne	6 von 6	-0,01 ± 0,13 (-0,24 zu 0,21; p = 0,940)
0,10	1 cm	ohne	6 von 6	0,02 ± 0,18 (-0,35 zu 0,33; p = 0,915)
-0,10	1 cm	ohne	6 von 6	0,26 ± 0,22 (-0,17 zu 0,67; p = 0,227)
0,40	2 cm	mit	4 von 6	0,02 ± 0,11 (-0,20 zu 0,22; p = 0,873)
0,25	2 cm	mit	4 von 6	0,03 ± 0,14 (-0,30 zu 0,30; p = 0,873)
0,16	2 cm	mit	4 von 6	0,08 ± 0,12 (-0,14 zu 0,33; p = 0,500)
0,10	2 cm	mit	4 von 6	0,14 ± 0,19 (-0,23 zu 0,53; p = 0,457)
-0,10	2 cm	mit	4 von 6	0,24 ± 0,20 (-0,13 zu 0,64; p = 0,251)
0,40	2 cm	mit	6 von 6	0,08 ± 0,11 (-0,18 zu 0,30; p = 0,535)
0,25	2 cm	mit	6 von 6	0,05 ± 0,16 (-0,31 zu 0,36; p = 0,756)
0,16	2 cm	mit	6 von 6	0,07 ± 0,14 (-0,21 zu 0,36; p = 0,625)
0,10	2 cm	mit	6 von 6	0,14 ± 0,21 (-0,26 zu 0,57; p = 0,475)
-0,10	2 cm	mit	6 von 6	0,24 ± 0,22 (-0,20 zu 0,69; p = 0,283)

Tabelle 51: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Situationen ohne und mit Blendung mit 6 von 6 erkannten Streifenorientierungen (Streifenbreite B = 2 cm) für die Subgruppe „Blendempfindlich". Signifikante p-Werte sind mit * markiert.

Kontrast	Streifen-breite	Blendung	Erkennung	Subgruppe „Blendempfindlich" Mittlere Differenz logL in log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p); n
0,40	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,14 ± 0,29 (-0,31 zu -0,02; p = 0,111); 18
0,25	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,18 ± 0,27 (-0,34 zu -0,06; p = 0,046*); 18
0,16	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,22 ± 0,28 (-0,33 zu -0,11; p = 0,008*); 18
0,10	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,22 ± 0,25 (-0,31 zu -0,13; p = 0,008*); 17
-0,10	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,32 ± 0,36 (-0,46 zu -0,18; p = 0,012*); 16
0,40	2 cm	ohne vs mit	6 von 6	-0,16 ± 0,28 (-0,29 zu -0,05; p = 0,065); 18
0,25	2 cm	ohne vs mit	6 von 6	-0,18 ± 0,28 (-0,33 zu -0,06; p = 0,049*); 18
0,16	2 cm	ohne vs mit	6 von 6	-0,20 ± 0,25 (-0,29 zu -0,10; p = 0,008*); 18
0,10	2 cm	ohne vs mit	6 von 6	-0,23 ± 0,21 (-0,32 zu -0,15; p = 0,001*); 17
-0,10	2 cm	ohne vs mit	6 von 6	-0,38 ± 0,32 (-0,50 zu -0,26; p = 0,001*); 16

Tabelle 52: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Situationen ohne und mit Blendung mit 6 von 6 erkannten Streifenorientierungen (Streifenbreite 2 cm) jeweils für die Subgruppe „Nicht blendempfindlich". Signifikante p-Werte sind mit * markiert.

Kontrast	Streifen-breite	Blendung	Erkennung	Subgruppe „Nicht blendempfindlich" Mittlere Differenz logL in log(cd/m²) MW ± SD (95% CI; p); n
0,40	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,09 ± 0,24 (-0,20 zu -0,02; p = 0,116); 19
0,25	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,11 ± 0,32 (-0,27 zu 0,00; p = 0,233); 19
0,16	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,09 ± 0,17 (-0,19 zu -0,02; p = 0,068); 18
0,10	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,11 ± 0,22 (-0,21 zu -0,03; p = 0,065); 18
-0,10	2 cm	ohne vs mit	4 von 6	-0,18 ± 0,20 (-0,25 zu -0,11 p = 0,003*); 17
0,40	2 cm	ohne vs mit	6 von 6	-0,06 ± 0,18 (-0,19 zu -0,01; p = 0,221); 19
0,25	2 cm	ohne vs mit	6 von 6	-0,12 ± 0,34 (-0,28 zu 0,00; p = 0,233); 19
0,16	2 cm	ohne vs mit	6 von 6	-0,09 ± 0,14 (-0,18 zu -0,02; p = 0,045*); 18
0,10	2 cm	ohne vs mit	6 von 6	-0,12 ± 0,21 (-0,23 zu -0,03; p = 0,029*); 18
-0,10	2 cm	ohne vs mit	6 von 6	-0,25 ± 0,13 (-0,30 zu -0,20; p < 0,001*); 17

Abbildung 72: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden in der Untersuchungsgruppe, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für B = 2 cm Streifenbreite ohne Blendung.

Abbildung 73: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden in der Untersuchungsgruppe, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für B = 1 cm Streifenbreite ohne Blendung.

Abbildung 74: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden in der Untersuchungsgruppe, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für B = 2 cm Streifenbreite mit Blendung.

Anhang - Kontrastmaximierung

Abbildung 75: Foto der Proben 1 bis 14

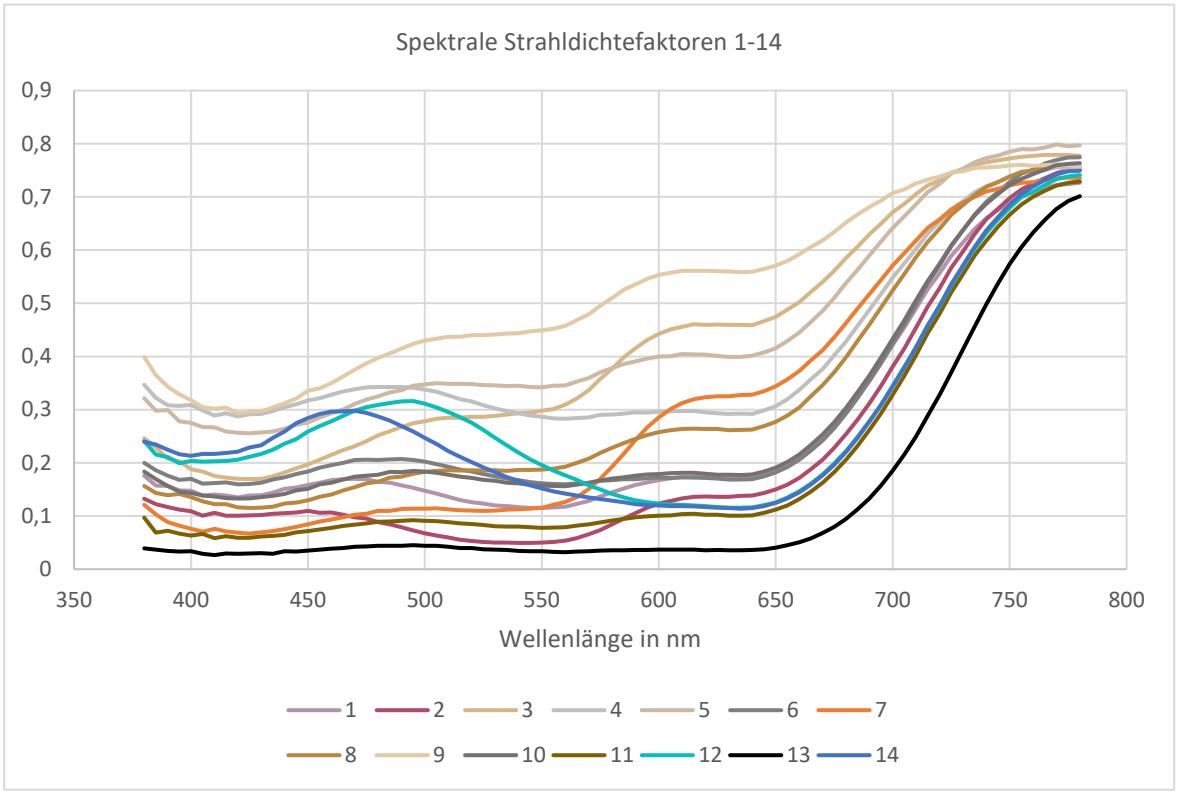


Abbildung 76: Spektrale Strahldichtefaktoren der Proben 1 bis 14

Abbildung 77: Foto der Proben 15 bis 38

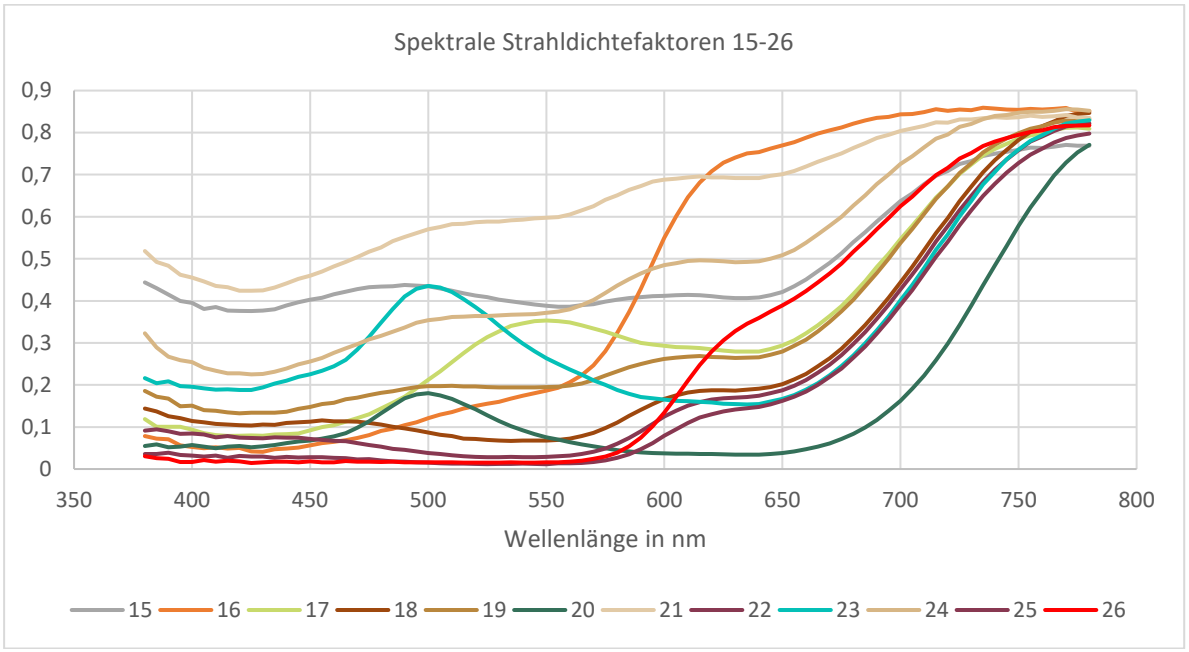


Abbildung 78: Spektrale Strahldichtefaktoren der Proben 15 bis 26

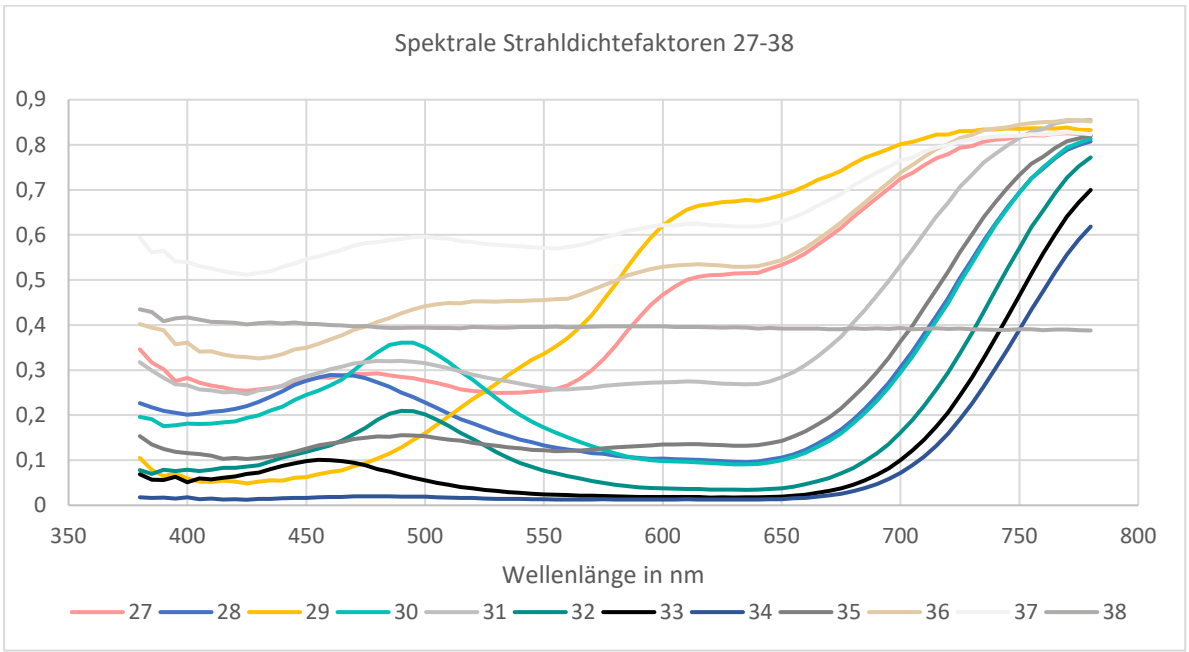


Abbildung 79: Spektrale Strahldichtefaktoren der Proben 27 bis 38

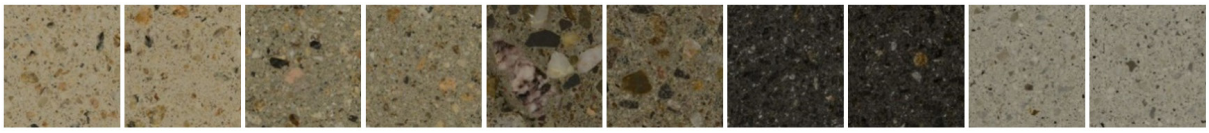


Abbildung 80: Foto der Proben 101 bis 110

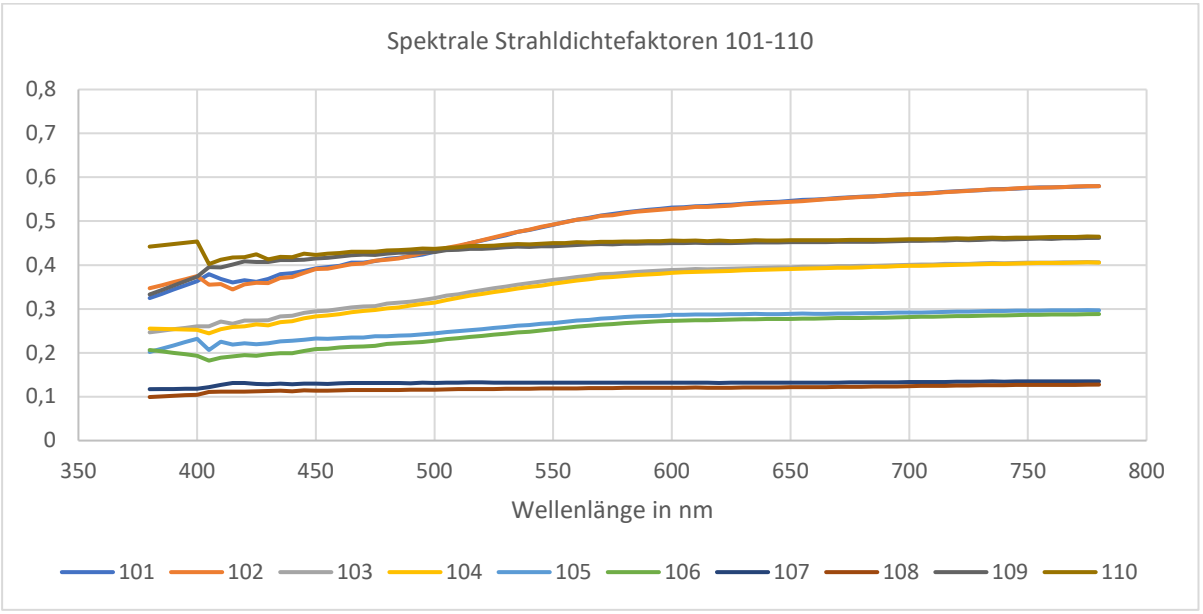


Abbildung 81: Spektrale Strahldichtefaktoren der Proben 101 bis 110

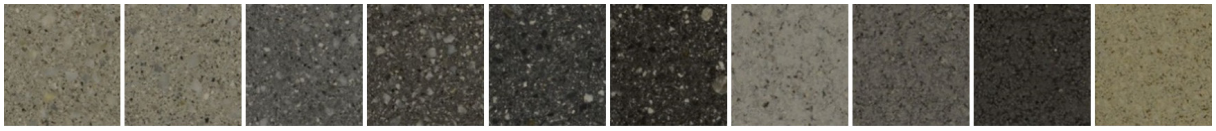


Abbildung 82: Foto der Proben 111 bis 120

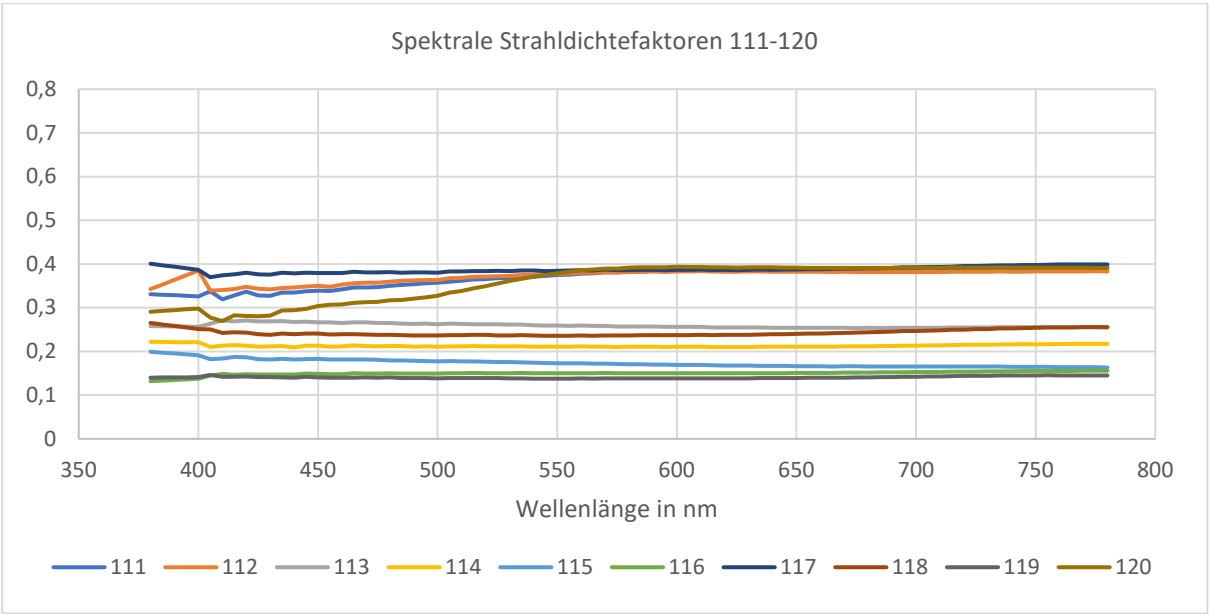


Abbildung 83: Spektrale Strahldichtefaktoren der Proben 111 bis 120

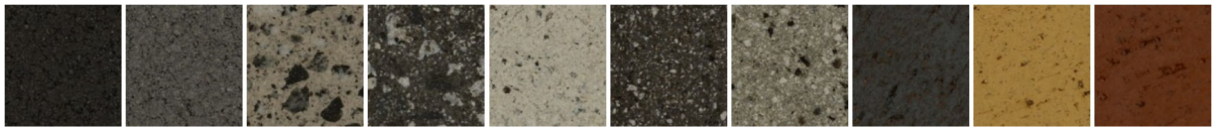


Abbildung 84: der Proben 121 bis 130

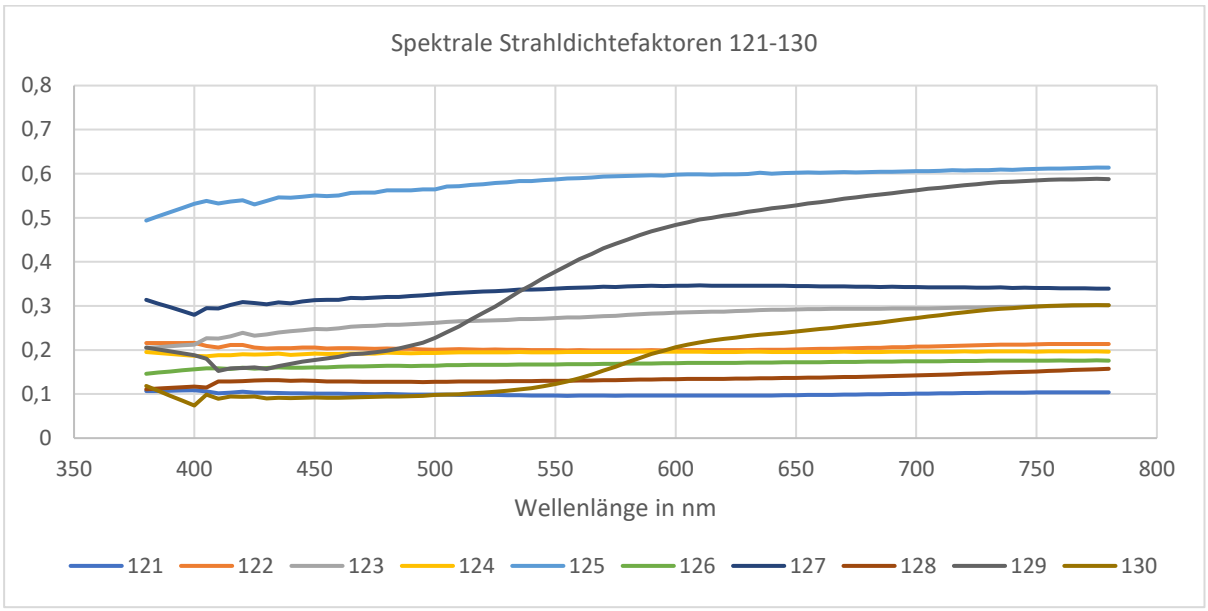


Abbildung 85: Spektrale Strahldichtefaktoren der Proben 121 bis 130

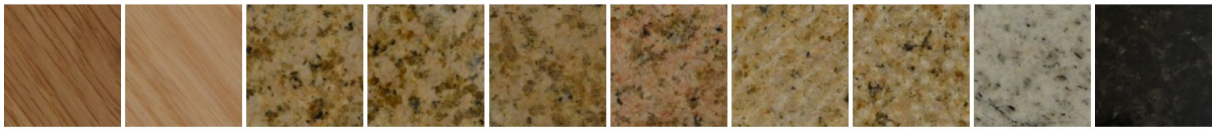


Abbildung 86: Foto der Proben 131 bis 140

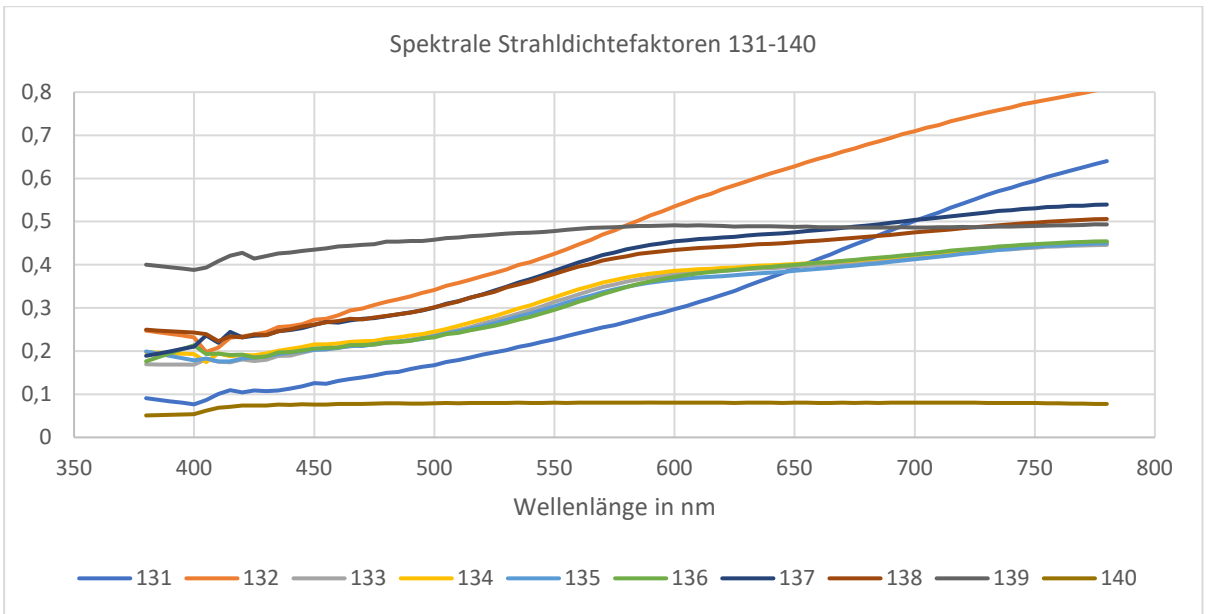


Abbildung 87: Spektrale Strahldichtefaktoren der Proben 131 bis 140

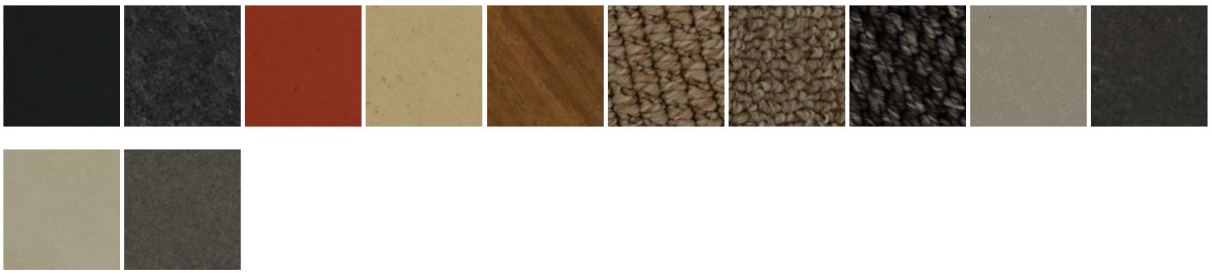


Abbildung 88: Foto der Proben 141 bis 152

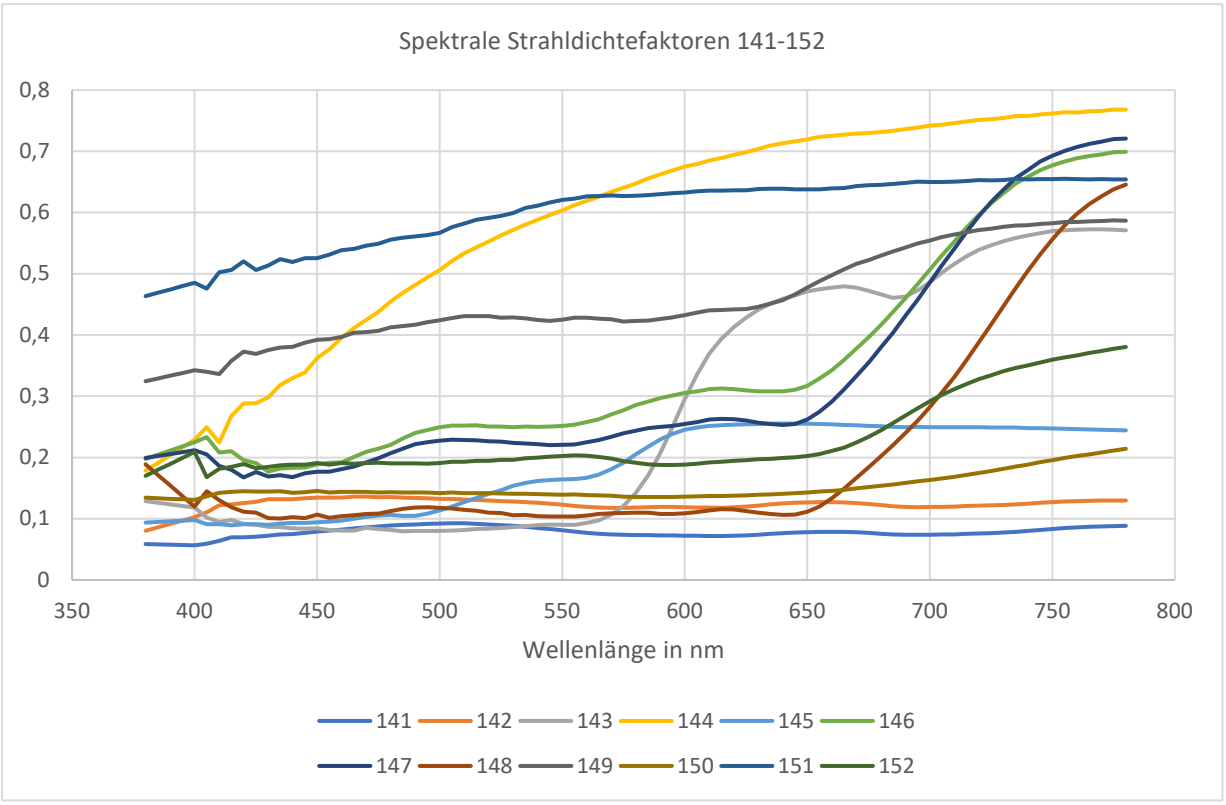


Abbildung 89: Spektrale Strahldichtefaktoren der Proben 141 bis 152