

# Untersuchungen zur Optimierung von barrierefreien visuellen Kontrasten

*Martin Schlanke\*\*; Dr. Cornelia Vandahl\*, Dr. Karin Bieske\*, Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz\*, Martin Schlanke\*; Oliver Kolbe\*\*, Prof. Dr. Michael Gebhardt\*\*; Prof. Dr. Kathleen Kunert\*\*\**

\* TU Ilmenau (D-98693 Ilmenau, Prof. Schmidt-Str. 26)

\*\* Ernst-Abbe-Hochschule Jena (D-07745 Jena, Carl-Zeiß-Promenade 2)

\*\*\* REGIOMED REHA Klinik Masserberg (D-98666 Masserberg, Hauptstraße 18)

## 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 Materialien, mit denen die Sehobjekte realisiert werden müssen. Die Anforderungen an die Kontraste sind so groß, dass sie mit vielen Materialien nur schwer erfüllt werden können. Es ist bekannt, dass eine Optimierung der Beleuchtung dazu führt, dass auch weniger hohe Kontraste sicher erkannt werden. Dazu zählen die Erhöhung der Leuchtdichte und die Vermeidung von Blendung. Im Rahmen einer Forschung wurde ein Teststand entwickelt, mit dem die Parameter gezielt variiert werden konnten und an Testpersonen Untersuchungen zum Kontrastsehen durchgeführt wurden.

Die Erhöhung der Umfeldleuchtdichte führte dabei zu einer Verbesserung der Wahrnehmung von Kontrasten. Trotz Erhöhung der Umfeldleuchtdichte konnte nicht jeder Kontrast von allen Probanden erkannt werden. Direktblendung führt dazu, dass Kontraste schlechter wahrgenommen wurden.

## Einleitung

Ein Großteil der Informationen aus unserer Umwelt wird über das Auge aufgenommen, daher wird ein Großteil relevanter Informationen im öffentlichen Raum visuell dargeboten. Nach Hochrechnung der Weltgesundheitsorganisation (WHO) lebten im Jahr 2002 in Deutschland 1,2 Millionen sehbehinderte und blinde Menschen [1]. Die Gutenberg Gesundheitsstudie von 2015 erfasste einen Anteil von 11,6 % der Gesamtbevölkerung mit meist altersbedingten Augenerkrankungen, die zu Sehbehinderungen führen [2]. Visuelle Barrierefreiheit ist daher eine Voraussetzung, dass Personen mit Seheinschränkungen selbstständig am öffentlichen Leben teilnehmen können. Diese Barrierefreiheit kann durch die Gestaltung der Kontraste der für die Orientierung und Erkennung notwendigen Elemente erreicht werden. In Normen finden sich daher Mindestkontraste und Vorgaben für die Reflexionseigenschaften der Materialien, mit denen die Sehobjekte realisiert werden müssen. Damit soll sichergestellt werden, dass Sehobjekte sicher erkannt werden können [3]. Die Anforderungen an die Kontraste sind so



groß, dass diese mit vielen derzeit verwendeten Baumaterialien kaum erfüllt werden können, bspw. bei der Verwendung von Naturstein oder im denkmalgeschützten Bereich.

Es ist bekannt, dass eine Optimierung der Beleuchtungssituation dazu führt, dass auch weniger hohe Kontraste sicher erkannt werden können. Dazu zählen u. a. die Erhöhung der Leuchtdichte und die Vermeidung von Blendung. Diese Möglichkeiten, die Sehbedingungen durch gezielte Optimierung der Beleuchtung zu verbessern, werden bisher kaum genutzt. Die Erweiterung der Normen setzt allerdings den Nachweis voraus, dass mit einer verbesserten Beleuchtung die Wahrnehmung bei verringerten Kontrasten gesichert ist. Dieser Nachweis soll im Rahmen dieses Projektes erbracht werden, das in Kooperation von der Technischen Universität Ilmenau und der Ernst-Abbe-Hochschule Jena in Zusammenarbeit mit der REGIOMED REHA Klinik Masserberg durchgeführt wurde.

## 1 Grundlagen

Die DIN 32975:2009-12 „Gestaltung visueller Informationen im öffentlichen Raum zur barrierefreien Nutzung“ legt das Hauptaugenmerk darauf, die sichere Wahrnehmung durch hohe Kontraste zu gewährleisten: „Zur Kennzeichnung von Bedienelementen, für Orientierungs- und Leitsysteme ... ist ein Kontrast von mindestens 0,4 einzuhalten.“ [3]. Der Kontrast benachbarter Felder ist dabei nach Formel (1) definiert:

$$(1) \quad K_M = \frac{L_O - L_U}{L_O + L_U}$$

mit:  $K_M$                     Michelson-Kontrast  
 $L_O$                     Leuchtdichte des Sehobjektes in  $\text{cd}/\text{m}^2$   
 $L_U$                     Leuchtdichte des Umfeldes in  $\text{cd}/\text{m}^2$

Dabei wird in der DIN 32975 Norm eine Sehschärfe (Visus) von 0,1 zugrunde gelegt. Der Visus wird durch den kleinsten Sehwinkel definiert, unter dem ein Objekt erscheinen muss, damit dessen Form oder Eigenschaften erkannt werden kann (siehe Abbildung 1) [4].

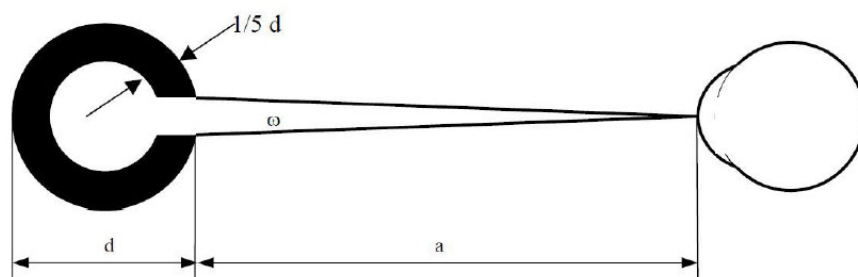


Abbildung 1: Beziehung zwischen Sehwinkel  $\omega$  und Objektweite  $a$  und Gesamtdurchmesser  $d$ . Darstellung nach HAUCK [5].

Sehbehinderungen gehen in der Regel nicht nur mit einer Reduktion der zentralen Sehschärfe, sondern auch mit einer Reduktion der Kontrastempfindlichkeit einher. Daher benötigen Betroffene höherer Kontraste als Normsehende. Allerdings können eine höhere 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 einer Arbeit von HAUCK [6]. Die Erhöhung der Leuchtdichte von  $1 \text{ cd}/\text{m}^2$  auf  $10 \text{ cd}/\text{m}^2$  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 [7] darauf hin, dass auch bei verringerten Kontrasten eine Wahrnehmung möglich ist, wenn die Leuchtdichten bzw. die Beleuchtungsstärken erhöht werden.

## 2 Forschungsansatz

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 könnten auch ältere Personen profitieren.

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

- Wie hängt die Erkennbarkeit der Kontraste von Sehobjekten von der Umfeldleuchtdichte ab?
- Welchen Einfluss hat eine vorliegende Sehbeeinträchtigung im Vergleich zu jüngeren und älteren Menschen ohne Sehbeeinträchtigung bei der Erkennung von Kontrasten?
- Verändert die Blendempfindlichkeit, die häufig im Zusammenspiel mit Sehbeeinträchtigungen einhergehen können, die benötigt Umfeldleuchtdichte zum Erkennen eines Kontrastes?
- Welchen Einfluss hat die Blendung durch Beleuchtungssysteme auf den erforderlichen Kontrast?

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Testaufbau

Die Untersuchungen fanden an einem speziell konzipierten Teststand in den Räumlichkeiten der REGIOMED REHA Klinik Masserberg statt. Als Ausgangssituation wurde ein nächtliches Straßenszenario gewählt (Leuchtdichte  $0,1 \text{ cd/m}^2$ ). Die Testperson blickte in einen kugelähnlichen Raum (Rhombenkuboktaeder) mit einem Durchmesser von  $1,80 \text{ m}$  hinein (siehe Abbildung 2) und betrachtete dort auf ein Testfeld mit Sehzeichen.

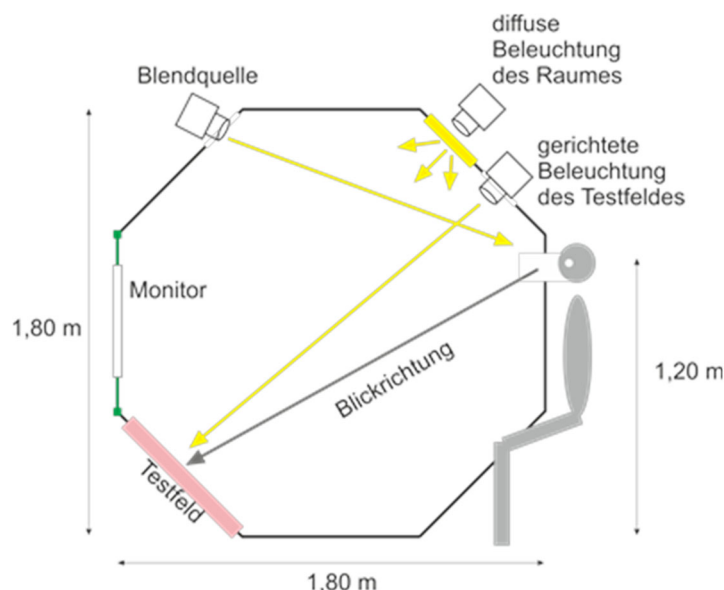


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Einblickvorrichtung mit definierten Beleuchtungsbedingungen.

Da in realen Orientierungssituationen Kontrastmarkierungen in der Regel bodennah positioniert sind, wurde für eine realitätsnahe Prüfung ein Testfeld mit Sehobjekten in einem 45°-Winkel zum Boden unterhalb der horizontalen Sehachse mit einem Sehabstand von 1,9 m positioniert. Eine diffuse Beleuchtung sorgte für eine gleichmäßige Beleuchtungsstärke auf der Rauminnenwand. Die Beleuchtung des Raumes konnte mit verschiedenen Farbtemperaturen erfolgen. Die Wände und der Boden der Einblickvorrichtung bestanden aus dunkelgrauer, matter Pappe und wiesen einen einheitlichen Reflexionsgrad von  $\rho = 0,15$  auf. Die Decke wurde mit einer Pappe mit einem Reflexionsgrad von  $\rho = 0,07$  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. Durch Variation der Beleuchtungsstärken ergeben sich die in Tabelle 1 angegebenen einstellbaren Leuchtdichten.

Gegenüber der Testperson befindet sich eine Blendquelle. Der Blendwinkel zur Blickrichtung beträgt 40° (siehe Abbildung 3 links). Die Beleuchtungsstärke am Auge der Testperson ist so dimensioniert, dass ein Schwellenanstieg („Threshold Increase“ =TI) von 20 % erreicht wird. Die Kugelfrückseite lässt sich von außen öffnen (siehe Abbildung 3 rechts). Für die Sehschärfeprüfungen wird in der Öffnung der Monitor des Prüfgerätes positioniert. Bei allen anderen Untersuchungen ist die Öffnung verschlossen und wird nur zum Wechseln der Testfelder kurzzeitig geöffnet.



Abbildung 3: Blick auf das Testfeld bei eingeschalteter Blendquelle (rechts). Rückseite der Einblickvorrichtung mit offener Klappe zum Wechseln der Testfelder (links).

### 3.2 Testobjekt

Als Testobjekt kommen Streifen von 1 cm und 2 cm Breite zum Einsatz. Diese sind jeweils 10 cm lang und werden in verschiedenen Kontrasten dargeboten. Die logarithmische Reihe der untersuchten Kontrastwerte ist in Abb. 3 dargestellt. Neben 4 Positivkontrasten wird ein Negativkontrast untersucht. Die Breite der Streifen bezog sich auf DIN 18040-01, in der für die Markierung von Setzstufen eine 2 cm breite, kontrastreiche Markierung vorgegeben wird [8].

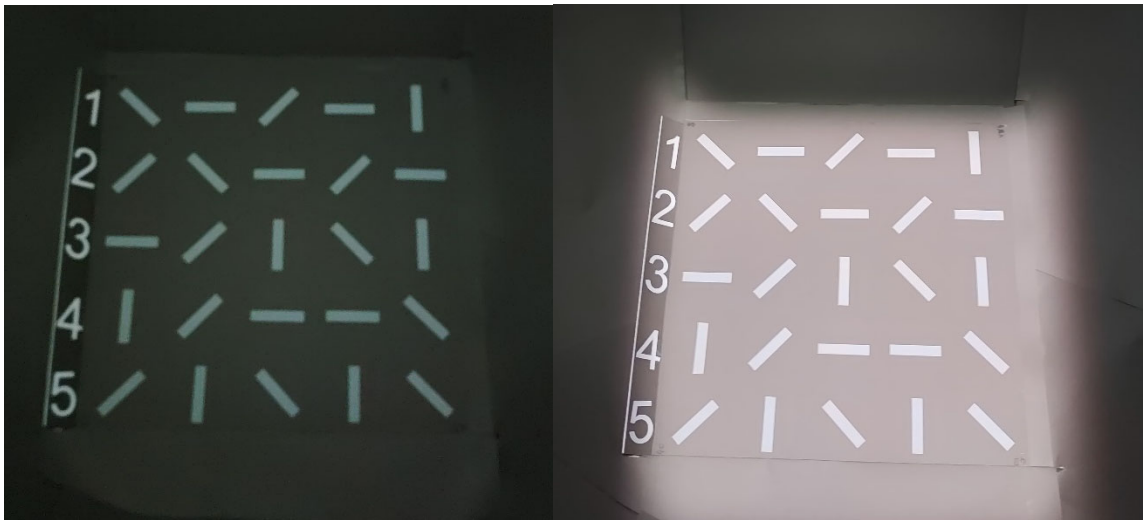


Abbildung 4: Sehfeld des Probanden, links: die Leuchtdichte des Testfeldes ist identisch mit der der Umgebung, rechts: das Testfeld ist heller als die Umgebung.

Für die objektive Prüfung der korrekten Detektion des Streifens durch den Probanden, wurde das Sehobjekt randomisiert in vier Orientierungen ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $135^\circ$ ) dargeboten. Auf einem  $75\text{ cm} \times 75\text{ cm}$  großen Testfeld befinden sich 25 Streifen gleichen Kontrastes. Durch Öffnen einer Klappe an der Rückseite der Kugel können die Testfelder ausgetauscht werden. Die Ermittlung des Schwellenwertes (50-prozentige Wahrnehmungswahrscheinlichkeit) der Leuchtdichte erfolgt anhand der psychometrischen Funktion. Aufgrund der hohen Ratewahrscheinlichkeit von 25 %, galt eine Kontraststufe als erkannt, wenn die Testperson die Orientierung von mindestens 4 von 6 Sehobjekten richtig identifizierte. Anschließend wurde die Leuchtdichte auf der Fläche weiter erhöht bis 6 von 6 Streifen richtig benannt wurden. Die Antwortzeit durch die Testpersonen war auf 3 s pro Sehobjekt begrenzt. Spätere Antworten wurden als „nicht erkannt“ interpretiert.

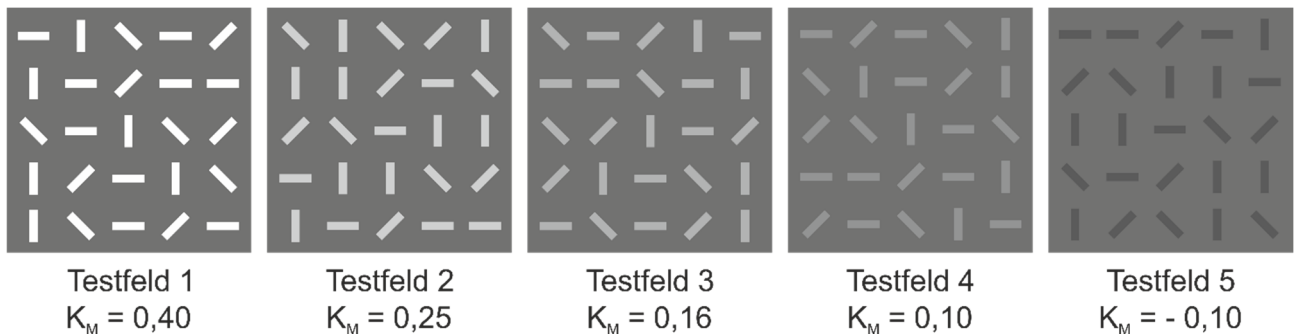


Abbildung 5: Testfelder mit verschiedenen Kontrasten  $K_M$ , die Sehzeichen sind entweder 1 cm oder 2 cm breit und 10 cm lang. Die Streifen sind randomisiert angeordnet.

### 3.3 Lichttechnische Kennzahlen

Entsprechend der nächtlichen Ausgangssituation werden als Untersuchungsleuchtdichten Werte der DIN EN 13201-2 verwendet [9]. Diese liegen in Stufen im Bereich zwischen  $0,3$  und  $2\text{ cd/m}^2$ . Für die Untersuchungen wurden in gleichbleibender Stufung höhere Leuchtdichtewerte und niedrigere hinzugefügt (siehe Tabelle 1).

Als Ausgangssituation diente die Umgebungs-Leuchtdichte von  $0,1\text{ cd/m}^2$ , die im gesamten unteren Bereich („Umgebung“) der Kugel dargeboten wurde. Von einem Wert der Umgebungs-Leuchtdichte ab  $0,3\text{ cd/m}^2$  erfolgten Leuchtdichteerhöhungen nur im Bereich des Testfeldes. Das entspricht in der Praxis der Beleuchtung eines Weges mit der Straßenleuchte, während sich die Leuchtdichte der Umgebung nicht erhöht. Für die Situation mit Blendquelle wurde

diese an eine Situation nach DIN EN 13201-2 angepasst, dass bei  $0,3 \text{ cd/m}^2$  diese einen TI-Wert von 20 % erreicht wurde (Blendwinkel  $40^\circ$ , als Umfeld-Leuchtdichte für die Dimensionierung des TI-Wertes nach Formel (5) wurde die Testfeld-Leuchtdichte verwendet). In Vorversuchen wurde festgestellt, dass eine nicht unerhebliche Anzahl von Testpersonen bereits bei Umgebungs-Leuchtdichten von  $0,3 \text{ cd/m}^2$  auch niedrige Kontraste sicher erkennen kann. Daher wurde die Leuchtdichteskala in zwei Schritten bis zu einem Wert von  $0,1 \text{ cd/m}^2$  nach unten erweitert. Der TI-Wert für diese beiden zusätzlichen Situationen wurde auf der Basis einer Umgebungs-Leuchtdichte von  $0,3 \text{ cd/m}^2$  belassen und beträgt für die niedrigeren Werte dann 30 % bzw. 50 % (Einstellung 1 und 2 in Tabelle 1). Diese Situationen entsprechen in der Praxis dem Identifizieren von Sehobjekten außerhalb beleuchteter Bereiche.

Tabelle 1: Leuchtdichtewerte der verschiedenen Bereiche innerhalb des Rhombenkuboktaeders.

Einstellung	L_Umgebung in $\text{cd/m}^2$	L_Testfeld in $\text{cd/m}^2$	L_Himmel in $\text{cd/m}^2$	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

### 3.4 Physiologische Blendung

Physiologische Blendung führt im Allgemeinen zur Verschlechterung des Sehvermögens, da das Streulicht, das eine Blendquelle im Beobachteraue verursacht, zu einer Erhöhung des Schwellenkontrastes bzw. der Unterschiedsschwelle  $\Delta L$  führt [10]. Diese Schwellenerhöhung dient in der Außenbeleuchtung als Kennzahl für die Stärke der Blendung einer Beleuchtungsanlage und ist auf 10 bis 20% begrenzt [11].

Der TI-Wert geht von einer fovealen Betrachtung des Sehobjektes aus. Die auf der Netzhaut durch die Blendung entstehende Schleierleuchtdichte  $L_V$  führt zu einer Änderung der Unterschiedsschwelle. Die Schleierleuchtdichte ist dabei anhängig vom Alter der Person, von

der Blendbeleuchtungsstärke am Auge  $E_{\text{Auge}}$  sowie vom Blendwinkel  $\Theta$  zwischen Blendrichtung und Blickrichtung (siehe Abbildung 6).

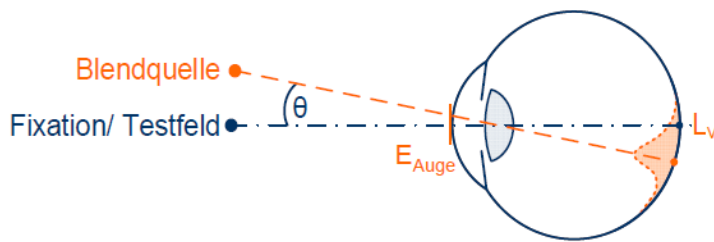


Abbildung 6: Definition der Schleierleuchtdichte  $L_V$  nach Formel (2)

$$(2) \quad L_V = k \frac{E_{\text{Auge}}}{\Theta^2}$$

mit:  $L_V$  Schleierleuchtdichte in  $\text{cd}/\text{m}^2$   
 $k$  altersabhängige Konstante  
 $E_{\text{Auge}}$  Beleuchtungsstärke am Auge in lx  
 $\Theta$  Blendwinkel in  $^\circ$  (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. Der Faktor  $k$  kann in Formel (2) altersabhängig angegeben werden [12]:

$$(3) \quad k = 10 \left( 1 + \left( \frac{\text{Alter}}{70} \right)^4 \right)$$

Der TI-Wert als prozentuale Schwellenerhöhung ist nach Formel (4) definiert und kann näherungsweise nach Formel (5) berechnet werden.

$$(4) \quad \text{TI} = \left( \frac{\Delta L_{\text{BI}}}{\Delta L_{\text{oBI}}} - 1 \right) \cdot 100 \%$$

mit:  $\text{TI}$  Threshold Increase (Schwellenerhöhung) in %  
 $\Delta L_{\text{BI}}$  Unterschiedsschwelle mit Blendung  
 $\Delta L_{\text{oBI}}$  Unterschiedsschwelle ohne Blendung

$$(5) \quad \text{TI} = 65 \frac{L_V}{L_U}$$

mit:  $\text{TI}$  Threshold Increase (Schwellenerhöhung) in %  
 $L_V$  Schleierleuchtdichte in  $\text{cd}/\text{m}^2$   
 $L_U$  Umfeldleuchtdichte in  $\text{cd}/\text{m}^2$   
 Gültigkeit der Näherungsformel (5) für  $L_U = 0,05 \text{ cd}/\text{m}^2 \dots 5 \text{ cd}/\text{m}^2$

### 3.5 Messung vom Sehschärfe, Kontrastempfindlichkeit und Blendempfindlichkeit

Der Visus und die Kontrastempfindlichkeit wurden mit dem computer-gestützten Freiburger Visual Acuity and Contrast Test (FrACT) erhoben. [13] 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 (EN ISO 8596) und kann auch bei Menschen mit schwerer Sehbehinderung (Visus  $\leq 0,02$  bzw.  $\geq 1,7 \text{ logMAR}$ ) verlässlich eingesetzt werden. [14] FrACT präsentiert auf dem Monitor Optotypen (Visus: Landolt-Ringe, Kontrast:

Streifenmuster) dessen Orientierung durch die Probanden über einen modifizierten, separaten, numerische Tastaturblock non verbal eingegeben werden. Die Schwellenwerte werden anhand der modifizierten "Best PEST"-Strategie (parameter estimation by sequential testing) und das „Forced-Choice“ Verfahren ermittelt [15]. Dadurch weist der Test mit einer Varianz von  $\pm 0,52$  Visusstufen eine etwa 4x höhere Reproduzierbarkeit für die Ermittlung des Visus im Vergleich zu herkömmlichen Methoden (auf Grundlage der psychometrischen Funktion) auf [16]. FrACT wird daher weltweit von Optometristen und Ophthalmologen in klinischen Studien eingesetzt und wurde von unabhängigen Laboren verifiziert [14, 17, 18]. Zur Klassifizierung der Blendempfindlichkeit der Probanden wurde ein Glare-Test in Anlehnung nach JUNGnickel angefertigt [19]. Für den Test wurde der Monitor um eine Blende, in die 8 radiär angeordneten LEDs eingearbeitet sind, ergänzt (siehe Abbildung 7). Die Intensität der Leuchtdioden konnte über eine Steuereinheit reproduzierbar eingestellt werden. Zur Klassifizierung der Blendempfindlichkeit der Probanden wurde ein Glare-Test durchgeführt. Dafür wird die mesopische Kontrastschwelle mit Blendung bestimmt und die Schwellenerhöhung gegenüber dem blendfreien Fall ermittelt. Die Beleuchtungsstärke am Auge wird für jede Testperson (altersabhängig) so dimensioniert ist, dass nach Formel (5) in Verbindung mit den Formeln (2) und (3) eine Schwellenerhöhung von  $T_I = 20\%$  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 ( $T_I$ ) von mehr als 58%.

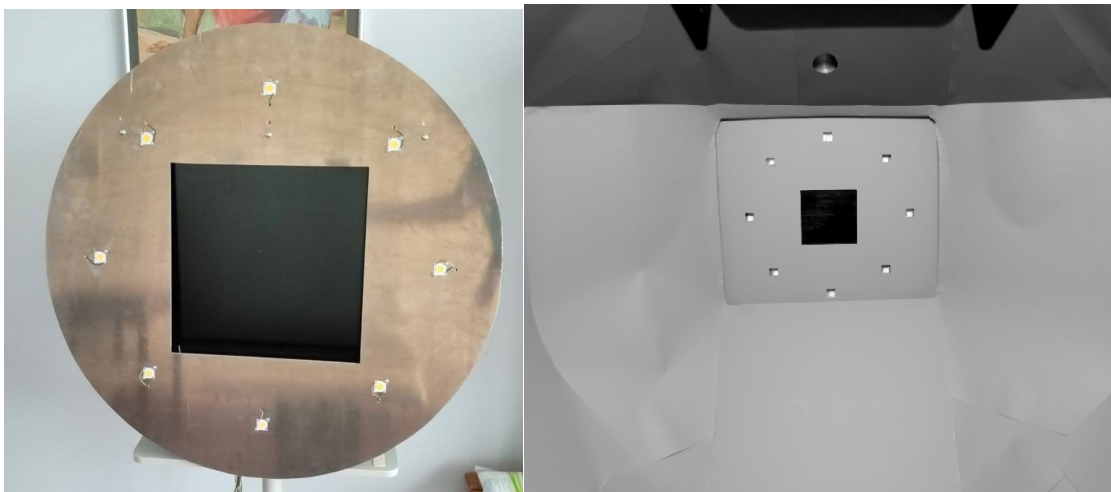


Abbildung 7: Links: Blende mit radiär angeordneten Leuchtdioden um einen Monitor angeordnet. Rechts: Blick auf den Ausschnitt eines Monitors zum Bestimmen der Kontrastschwelle.

### 3.6 Testszenario

Das Testszenario ist bestand aus mehreren Modulen.

- a. Prüfung der Erkennbarkeit von Sehobjekten mit einem Kontrastwert  $K_M = 0,40$  unter mesopischen Lichtbedingungen  
Eine Testtafel mit fünf Testobjekten (Streifen) unterschiedlicher Orientierung und einem konstanten Kontrastwert von  $K_M = 0,40$  wird unter einer Umgebungsleuchtdichte  $L = 0,1 \text{ cd/m}^2$  (Farbtemperatur: 4500 K) präsentiert. Es wird geprüft, bei welcher Umfeldleuchtdichte der Proband mindestens 4 von 6 Sehobjekt korrekt erkennen kann.
- b. Abhängigkeit der Identifizierung diskreter Kontraste von der Umfeldleuchtdichte unter mesopischen Lichtbedingungen  
Eine Testtafel mit fünf Testobjekten (Streifen) unterschiedlicher Orientierung und einem konstanten Kontrastwert von  $K_M = 0,40$  wird unter einer Umgebungsleuchtdichte  $L =$



0,1 cd/m<sup>2</sup> (Farbtemperatur: 4500 K) präsentiert. Wird die Kontraststufe nicht erkannt, wird die Umgebungsleuchtdichte in Anlehnung an Werten aus DIN EN 13201 „Straßenbeleuchtung“ in 0,15-log-Schritten (Mittelwert der Erhöhung aus der DIN EN 13201) erhöht. Die Erhöhung erfolgt, bis die Orientierung von 4 von 6 präsentierten Streifen richtig erkannt werden. Danach wird die Umfeldleuchtdichte weiter erhöht, bis zur Identifizierung von 6 von 6 Sehzeichen. Anschließend wird derselbe Kontrast bei geringerer Streifenbreite (1 cm) dargeboten und die erforderliche Umfeldleuchtdichte bis zum Erkennen ermittelt. Nach einer kurzen Adaptationsphase auf ein geringeres Umfeldleuchtdichteniveau wird der Kontrast auf die nächst-niedrigere Kontraststufen reduziert und die Messung wiederholt bis die Umgebungsleuchtdichte für die Erkennung des Kontrastwertes von  $K_M = -0,10$  ermittelt wurden.

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

Die benötigte Umfeldleuchtdichte (Farbtemperatur: 4500 K) für die Erkennung (4 von 6 und 6 von 6) der Kontrasttafel wird zusätzlich unter Blendung mit einem TI-Wert von 20 % bei einem 2 cm breitem Streifen ermittelt. Für die Umfeldleuchtdichten von 0,1 cd/m<sup>2</sup> und 0,18 cd/m<sup>2</sup> im Versuchsablauf beträgt der TI-Wert 50 % bzw. 30 %. Der TI-Wert ist ausgelegt für die Umfeldleuchtdichten der DIN EN 13201 „Straßenbeleuchtung“ beginnend bei 0,3 cd/m<sup>2</sup>. In Situationen, in denen von diesen Vorgaben abgewichen wird, ergeben sich geringere Umfeldleuchtdichten und der TI-Wert steigt.

### 3.7 Statistische Auswertung

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

Der Vergleich der Interventionsgruppe mit Kontrollgruppe 1 und Kontrollgruppe 2 sowie der Subgruppen „blendempfindlich“ und „nicht blendempfindlich“ innerhalb der Interventionsgruppe erfolgte jeweils durch den t-Test für unverbundene Stichproben. Weitere Auswertungen innerhalb der Interventionsgruppe bezogen sich auf den Vergleich der Umfeldleuchtdichten bei unterschiedlicher Streifenbreite, unterschiedlicher Anzahl der erkannten Streifen sowie ohne und mit Blendung für die geprüften Kontraststufen. Die statistische Prüfung erfolgte hier mittels t-Test für verbundene Stichproben.

Die Erhebung der Umfeldleuchtdichte erfolgte in logarithmischer Abstufung (0,15-log Stufen). Um die Werte vergleichbar und geeignet für die gewählten statistischen Methoden zu machen, wurden die Umfeldleuchtdichten logarithmiert. Für die graphische Darstellung der Daten wurden Mittelwerte und Grenzen des 95%-Konfidenzintervalls zur besseren Verständlichkeit delogarithmiert. Die Diagramme wurden mit Microsoft Excel erstellt. Die Ergebnisse der t-Teste beziehen sich auf die logarithmierte Umfeldleuchtdichte ( $\log[\text{cd/m}^2]$ ). Hierbei bezieht sich die mittlere Differenz auf die log-Stufen zwischen den Gruppen. So entspricht eine mittlere Differenz von bspw. 0,3  $\log(\text{cd/m}^2)$  einer Verdopplung der Umfeldleuchtdichte.

Weiterhin werden die Daten als relative kumulierte Häufigkeiten der erforderlichen Umfeldleuchtdichten 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 Umfeldleuchtdichten erkannten.

## 4 Beschreibung der Studiengruppen

Die DIN 32975 bezieht sich auf einen Visus von 0,1, da Sehbehinderte 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 Interventionsgruppe sollte bei den Probanden eine mittelschwere bis schwere Sehbeeinträchtigung nach WHO vorliegen. Weitere Einschlusskriterien sind im Folgenden aufgelistet:

Interventionsgruppe (sehbehindert):

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

Kontrollgruppe 1 (augengesund, jung):

- männliche und weibliche Personen, zwischen 18 und 45 Jahren
- binokularer Visus mit Korrektur größer 0,8 (0,1 logMAR)
- Einwilligungsfähigkeit des Patienten

Kontrollgruppe 2 (augengesund, alt):

- männliche und weibliche Personen, mindestens 60 Jahre alt
- binokularer Visus mit Korrektur größer 0,5 (0,3 logMAR)
- Einwilligungsfähigkeit des Patienten

Für die Studie konnten die 124 Probanden akquiriert werden.

Die Interventionsgruppe umfasste 50 Probanden, davon 22 männlich und 28 weiblich. Das mittlere Alter beträgt bei  $54,1 \pm 10,9$  Jahre (Range von 25 Jahre bis 70 Jahre). 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. In der Kontrollgruppe 1 beträgt das mittlere Alter der 37 Probanden  $29,9 \pm 6,3$  Jahre (Range von 18 Jahre bis 44 Jahre). Es wurden 24 weibliche und 13 männliche Personen eingeschlossen. Die Kontrollgruppe 2 umfasst 37 Probanden mit einem mittleren Alter von  $70,7 \pm 6,2$  Jahre (Range von 61 Jahre bis 83 Jahre).

Die augengesunden jungen Probanden erreichte die höchste Sehschärfe, gefolgt von den augengesunden älteren Probanden. Im Vergleich dazu zeigten die Probanden mit einer Sehbehinderung (Interventionsgruppe) eine um mehrere log-Stufen reduzierte Sehschärfe (siehe Abbildung 8).

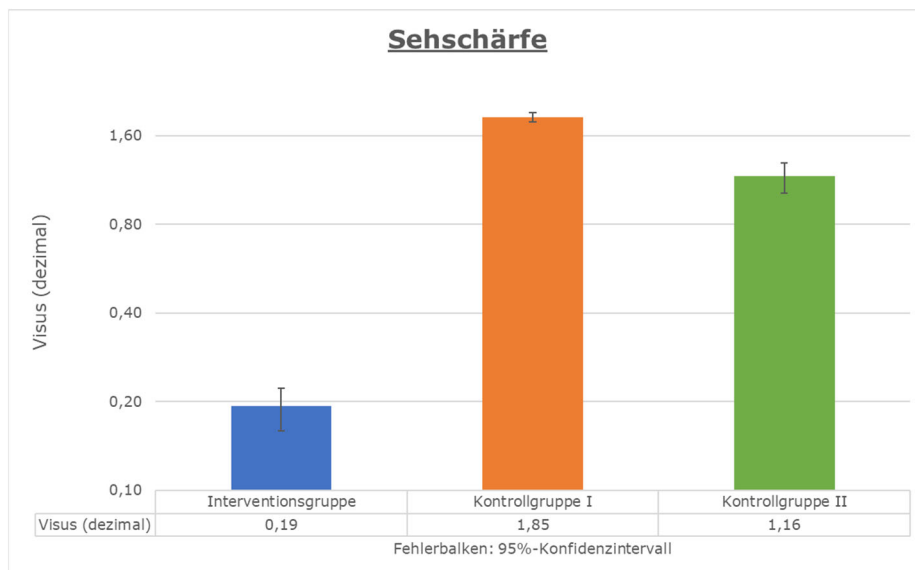


Abbildung 8: Mittlere Sehschärfe der Studiengruppen (Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle).

Die Interventionsgruppe weist eine reduzierte mesopische Kontrastschwelle auf. Im Vergleich dazu erzielten die Kontrollgruppen I und II höhere Kontrastschwelle bei einer Umfeldleuchtdichte von 0,3 cd/m<sup>2</sup>.

Im Glare-Test fällt die Kontrastempfindlichkeit durch eine altersangepasste Blending in allen drei Studiengruppen ab (siehe Abbildung 9).

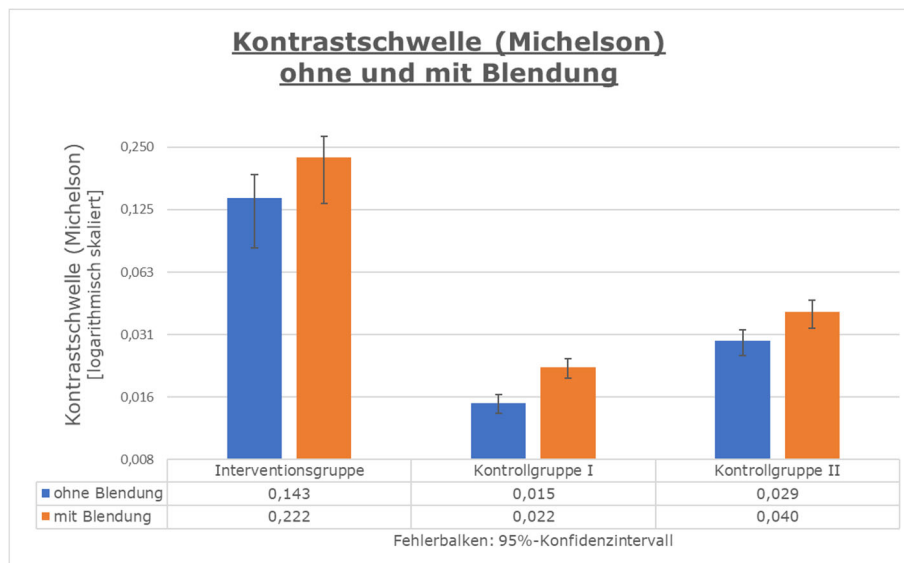


Abbildung 9: Mittlere Kontrastempfindlichkeit der Studiengruppen ohne und mit Blending. (Mittelwert und 95%-Konfidenzintervalle)

## 5 Ergebnisse

Die augengesunden, jungen Probanden konnten alle dargebotenen Kontrasttafeln ohne und mit Blending bei einer Umfeldleuchtdichte von 0,1 cd/m<sup>2</sup> erkennen.

In der Kontrollgruppe II der augengesunden, älteren Probanden wurden von  $K_M = 0,40$  bis  $K_M = 0,10$  die Streifen bei 0,1 cd/m<sup>2</sup> richtig benannt. Bei  $K_M = -0,10$  war für 1 cm Streifenbreite eine Erhöhung auf 0,18 cd/m<sup>2</sup> erforderlich. Unter Blending war für die niedrigen Kontraststufen ( $K_M = 0,10$  und  $K_M = -0,10$ ) eine Erhöhung auf 0,5 cd/m<sup>2</sup>, damit alle Probanden die Orientierung bei 6 von 6 Streifen angeben konnten.

Die Gruppe der sehbehinderten Probanden benötigte generell eine höhere Umfeldleuchtdichte zum Erkennen der Kontraste als die beiden Kontrollgruppen. Des Weiteren führte eine Erhöhung der Umfeldleuchtdichte auf den Testtafeln zu einer Erkennbarkeit der dargebotenen Kontraststufen  $K_M < 0,40$ . Der aktuell in der DIN 32975 geforderte Mindestkontrast von  $K_M = 0,40$  konnte bei einer Umfeldleuchtdichte von  $8 \text{ cd/m}^2$  von allen Sehbehinderten bei einer Streifenbreite von 2 cm mit 4 von 6 Angaben richtig benannt werden (siehe Abbildung 10). Bei geringeren Kontrasten und kleineren Streifenbreite war es nicht möglich, dass alle Sehbehinderten auch bei maximal einstellbarer Umfeldleuchtdichte ausreichend Streifenorientierungen richtig angeben konnten (siehe Abbildung 11).

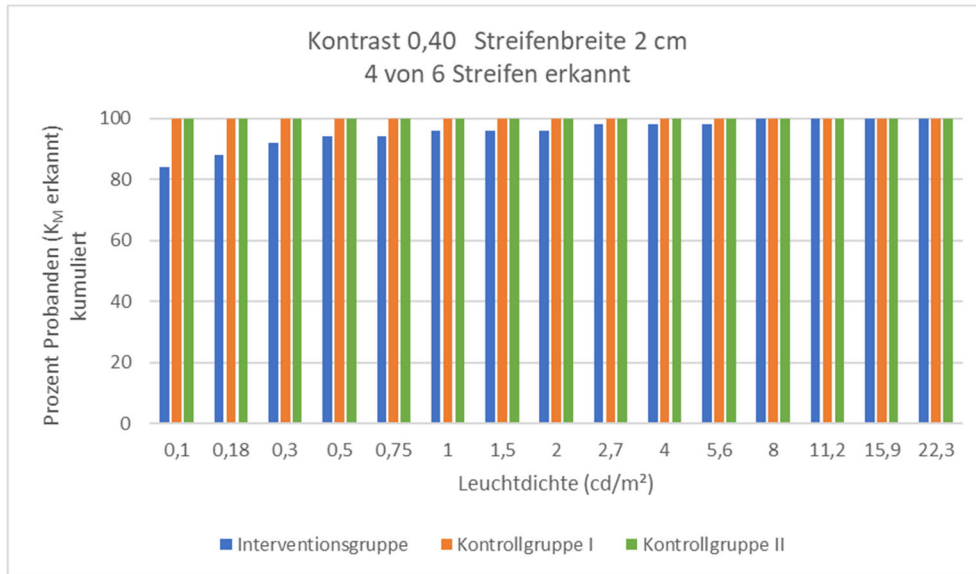


Abbildung 10: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für  $K_M = 0,40$  bei 2 cm Streifenbreite mit 4 von 6 Orientierungen erkannt.

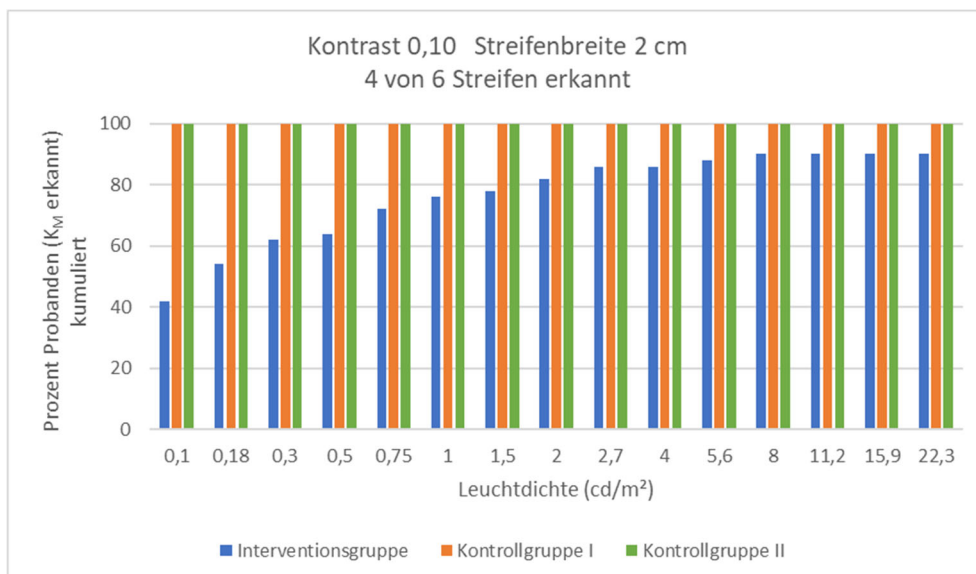


Abbildung 11: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für  $K_M = 0,10$  bei 2 cm Streifenbreite mit 4 von 6 Orientierungen erkannt.

Der Negativkontrast ( $K_M = -0,10$ ) benötigte zum Erkennen eine höhere Umfeldleuchtdichte als der Positivkontrast ( $K_M = 0,10$ ) in der Interventionsgruppe (siehe Abbildung 12).

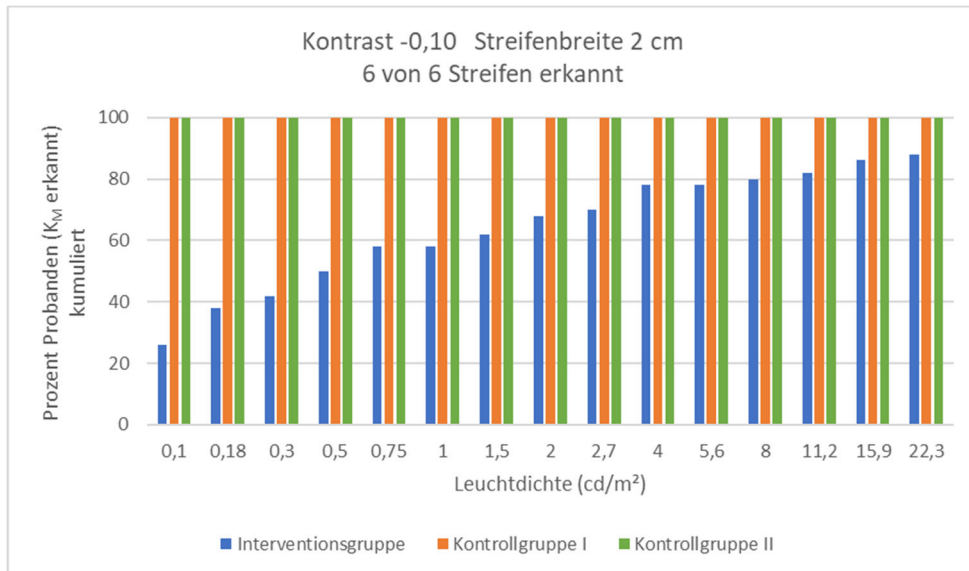


Abbildung 12: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für  $K_M = -0,10$  bei 2 cm Streifenbreite mit 6 von 6 Orientierungen erkannt.

Unter Blendung erkannten weniger der Probanden in der Interventionsgruppe die dargebotenen Kontraststufen. Den Kontrast  $K_M = 0,40$  konnte maximal von 90 % der Testpersonen benannt werden (siehe Abbildung 13). Bis zur letzten Testtafel ( $K_M = -0,10$  Glare mit 6 von 6) viel der Anteil auf 74 % ab.

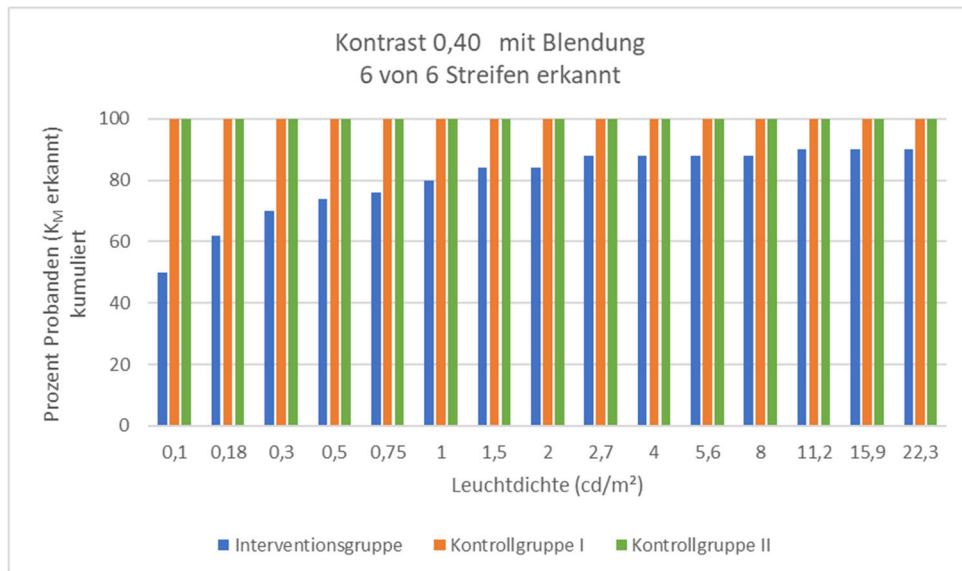


Abbildung 13: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für  $K_M = 0,40$  bei Blendung mit 6 von 6 Orientierungen erkannt.

Absolut konnten 37 der 50 sehbehinderten Probanden bis zur letzten Messung von einer Erhöhung der Umfeldleuchtdichte profitieren. Bei 13 Sehbehinderten führte im Verlauf der

Messung eine Erhöhung der Umfeldleuchtdichte nicht zu einer Steigerung der Erkennbarkeit der dargebotenen Kontraste von  $K_M < 0,40$ .

Die sehbehinderten Probanden benötigten für jede dargebotene Kontraststufe, Streifenbreite und Anzahl der Erkannten Orientierungen eine höhere mittlere Leuchtdichte als die Kontrollgruppen (siehe Abbildung 14). Bei  $K_M = 0,40$  mit 2 cm Streifenbreite liegt zwischen der Interventionsgruppe und der Kontrollgruppe I eine signifikante mittlere Differenz der log-Leuchtdichte von  $-0,13 \pm 0,05 \log(\text{cd}/\text{m}^2)$  (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  $-0,87 \pm 0,12 \log(\text{cd}/\text{m}^2)$  (95% CI;  $-1,11$  zu  $-0,63$ ;  $p < 0,001$ ) für einen Kontrast von  $-0,10$  bei 1 cm Streifenbreite mit 6 von 6 richtig erkannten Orientierungen. Bis auf den Kontrast  $-0,10$  bei 1 cm Streifenbreite mit 6 von 6 richtig erkannten Orientierungen sind die mittleren Differenzen zwischen Interventionsgruppe und Kontrollgruppe I identisch zu denen zwischen Interventionsgruppe und Kontrollgruppe II. Bei dem genannten Kontrast liegt ein signifikanter Unterschied von  $-0,86 \pm 0,12 \log(\text{cd}/\text{m}^2)$  (95% CI;  $-1,11$  zu  $-0,62$ ;  $p < 0,001$ ) vor.

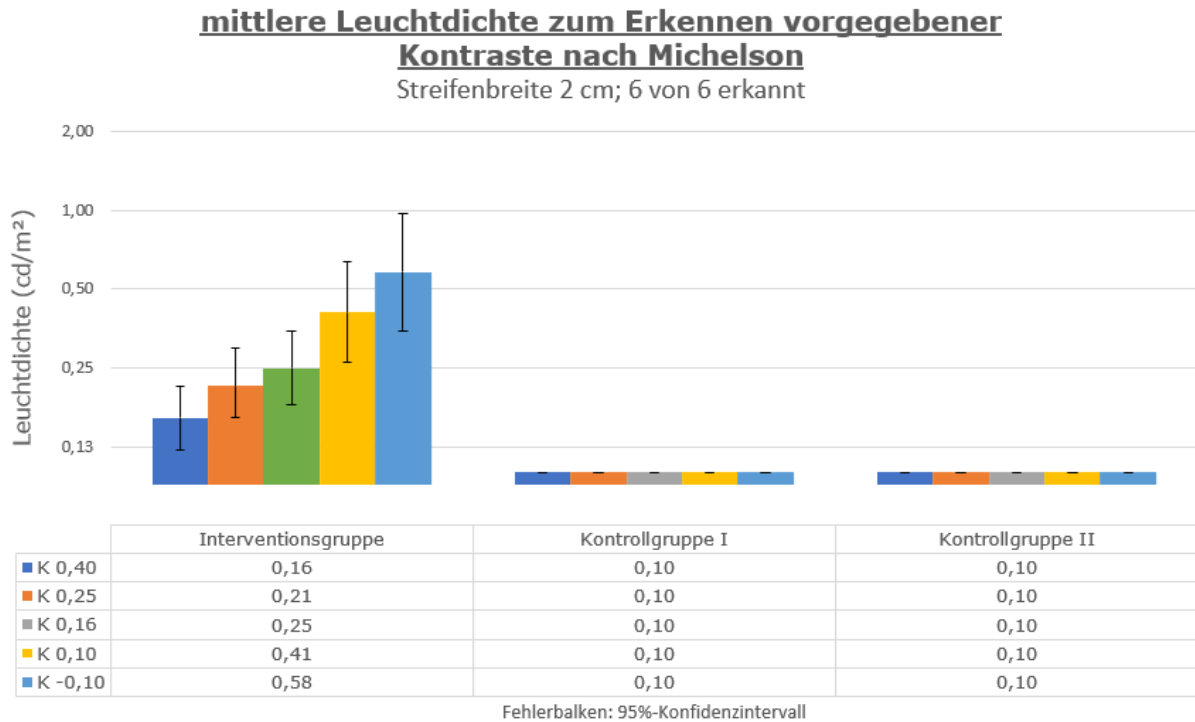


Abbildung 14: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste nach Michelson bei einer Streifenbreite von 2 cm mit 6 von 6 richtigen Orientierungsangaben. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch.

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

Unter Blendung war innerhalb der Interventionsgruppe jeweils eine höhere Umfeldleuchtdichte zum Erkennen der Streifenorientierungen der Kontraststufe erforderlich als ohne Blendung. Die mittleren Differenzen sind für jeden Kontrast statistisch signifikant (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den dargebotenen Kontraststufen ohne und mit Blendung mit 6 von 6 erkannten Streifenorientierungen innerhalb der Interventionsgruppe. Signifikante Werte sind gelb hervorgehoben.

<b>Ohne Blendung vs. mit Blendung</b>	
<b>6/6 erkannt</b>	
<b>Interventionsgruppe</b>	
<b>Kontrast nach Michelson</b>	<b>mittlere Differenz (log[cd/m<sup>2</sup>]) MW ± SD (95% CI)</b>
<b>0,40</b>	-0,18 ± 0,27 (95% CI; -0,26 zu -0,10; <b>p = 0,004</b> ); n = 45
<b>0,25</b>	-0,17 ± 0,32 (95% CI; -0,27 zu -0,07; <b>p &lt; 0,001</b> ); n = 44
<b>0,16</b>	-0,18 ± 0,27 (95% CI; -0,27 zu -0,10; <b>p &lt; 0,001</b> ); n = 43
<b>0,10</b>	-0,19 ± 0,21 (95% CI; -0,26 zu -0,12; <b>p &lt; 0,001</b> ); n = 41
<b>-0,10</b>	-0,30 ± 0,24 (95% CI; -0,38 zu -0,22; <b>p &lt; 0,001</b> ); n = 37

### 5.1 Untersuchung der Blendempfindlichkeit

Es konnten 20 Probanden der Subgruppe „blendempfindlich“ und 19 Probanden der Subgruppe „nicht blendempfindlich“ zugeteilt werden. In den Messungen der Kontraststufen benötigte die „nicht blendempfindliche“ Personengruppe eine höhere Umfeldleuchtdichte 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 (siehe Abbildung 15).

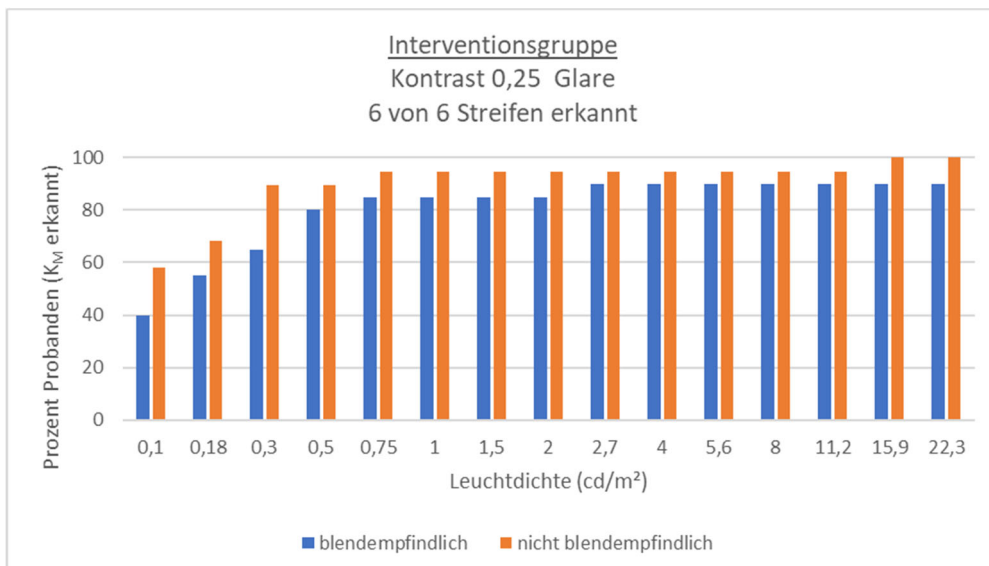


Abbildung 15: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden in der Interventionsgruppe, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für  $K_M = 0,25$  unter Blendung mit 6 von 6 Orientierungen erkannt.

Ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Subgruppen für die erforderliche Umfeldleuchtdichte zum Erkennen der dargebotenen Kontraste konnte sowohl ohne als auch mit Blendung nicht nachgewiesen werden (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Subgruppen für die dargebotenen Kontraststufen unter Blendung mit 6 von 6 erkannten Streifenorientierungen.

<b>„nicht blendempfindlich“ vs. „blendempfindlich“</b>	
<b>Glare; 6/6 erkannt</b>	
	<b><u>Vergleich Subgruppen</u></b>
<b>Kontrast nach Michelson</b>	<b>mittlere Differenz (log[cd/m<sup>2</sup>]) MW ± SD (95% CI)</b>
<b>0,40</b>	0,08 ± 0,11 (95% CI; -0,18 zu 0,30; p = 0,535)
<b>0,25</b>	0,05 ± 0,16 (95% CI; -0,31 zu 0,36; p = 0,756)
<b>0,16</b>	0,07 ± 0,14 (95% CI; -0,21 zu 0,36; p = 0,625)
<b>0,10</b>	0,14 ± 0,21 (95% CI; -0,26 zu 0,57; p = 0,475)
<b>-0,10</b>	0,24 ± 0,22 (95% CI; -0,20 zu 0,69; p = 0,283)

Es zeigte sich dennoch ein Unterschied innerhalb der Gruppen für die benötigte Umfeldleuchtdichte bei den Kontraststufen ohne und mit Blendung (siehe Tabelle 4). So benötigten „blendempfindliche“ Probanden bereits ab  $K_M = 0,25$  eine signifikant höhere Umfeldleuchtdichte unter Blendung, wohingegen die mittlere Differenz in der Subgruppe „nicht blendempfindlich“ erst bei  $K_M = -0,10$  erst statistisch signifikant ist. Betragsmäßig liegen mehr log-Stufen zwischen den Umfeldleuchtdichte ohne und mit Blendung in der Gruppe „blendempfindlich“ als in der Gruppe „nicht blendempfindlich“.



Tabelle 4: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Kontraststufen ohne und mit Blendung mit 4 von 6 erkannten Streifenorientierungen jeweils für die Subgruppen. Signifikante p-Werte sind gelb hervorgehoben.

<b>Ohne Blendung vs. mit Blendung, 4/6 erkannt</b>		
	<b>„blendempfindlich“</b>	<b>„nicht blendempfindlich“</b>
<b>Kontrast nach Michelson</b>	<b>mittlere Differenz (log[cd/m<sup>2</sup>]) MW ± SD (95% CI)</b>	<b>mittlere Differenz (log[cd/m<sup>2</sup>]) MW ± SD (95% CI)</b>
<b>0,40</b>	-0,14 ± 0,29 (95% CI; -0,31 zu -0,02; p = 0,111); n = 18	-0,09 ± 0,25 (95% CI; -0,20 zu -0,02; p = 0,116); n = 19
<b>0,25</b>	-0,18 ± 0,27 (95% CI; -0,34 zu -0,06; <b>p = 0,046</b> ); n = 18	0,11 ± 0,32 (95% CI; -0,27 zu 0,00; p = 0,148); n = 19
<b>0,16</b>	-0,22 ± 0,28 (95% CI; -0,33 zu -0,11; <b>p = 0,008</b> ); n = 18	-0,09 ± 0,17 (95% CI; -0,19 zu -0,02; p = 0,068); n = 18
<b>0,10</b>	-0,22 ± 0,25 (95% CI; -0,32 zu -0,13; <b>p = 0,008</b> ); n = 17	-0,11 ± 0,22 (95% CI; -0,21 zu -0,03; p = 0,065); n = 18
<b>-0,10</b>	-0,32 ± 0,39 (95% CI; -0,46 zu -0,18; <b>p &lt; 0,001</b> ); n = 17	-0,18 ± 0,20 (95% CI; -0,25 zu -0,11; <b>p = 0,003</b> ); n = 18

## 6 Kurvenanpassung für relative Häufigkeiten

Für die Interventionsgruppe erfolgte eine Kurvenanpassung, um Leuchtdichten an den Schwellen für vorgegebene Häufigkeiten zu berechnen. Die relativen Häufigkeiten wurden z-transformieren, wodurch linear Werte zu log-Leuchtdichte entstanden (siehe Anlage). Mittels linearer Regression konnten Steigung und Achsenabschnitt von "log(cd/m<sup>2</sup>) gegen z" bestimmt werden. Anschließend ließ sich mit Hilfe von Steigung und Achsenabschnitt mittels linearer Gleichung für die untersuchten Leuchtdichten der jeweilige z-Wert berechnen und abschließend wieder in Häufigkeiten transformieren. Für variable Häufigkeiten (z. B. 50%, 75%, 90%, 95%, 99%) können jetzt erforderlichen Leuchtdichten für die geprüften Kontraststufen ermittelt werden (siehe 16).

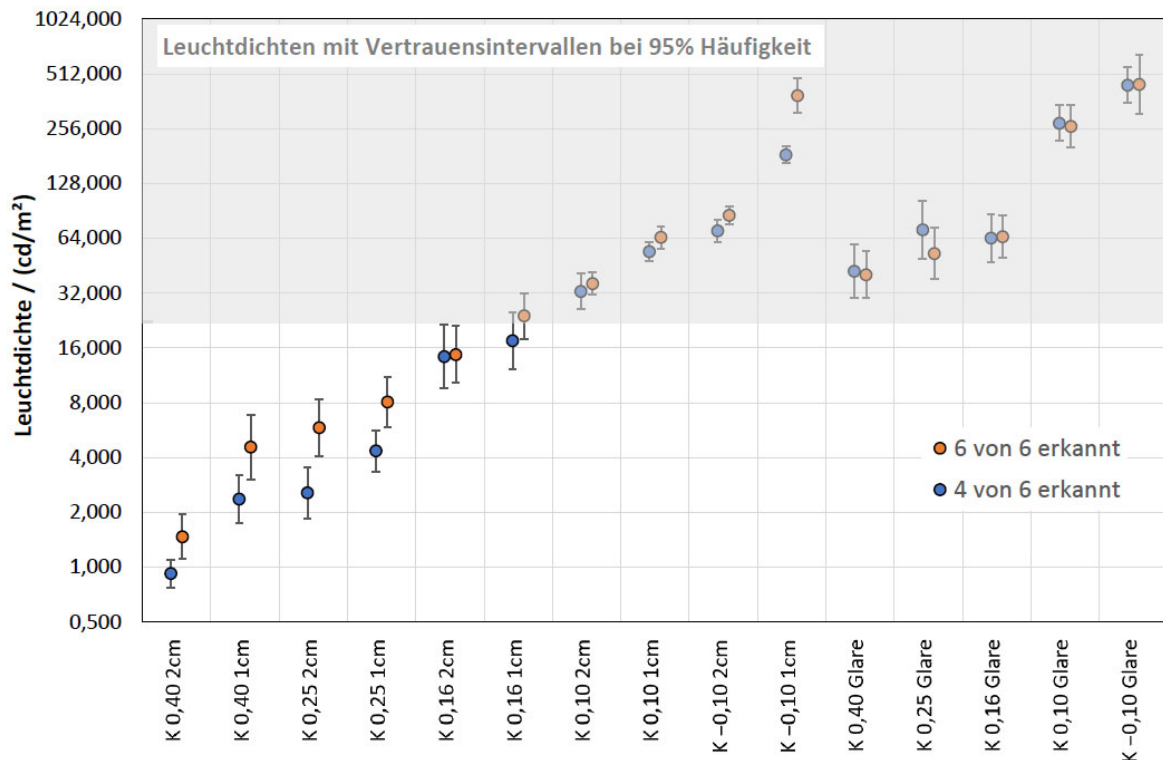


Abbildung 16: Leuchtdichten mit 95%-Konfidenzintervallen die erforderlich sind, damit z. B. 95 % der Sehbehinderten die angegebenen Kontraststufen erkennen. Der grau hinterlegte Bereich wurde nicht innerhalb der Studie geprüft.

## 7 Schlussfolgerung und Ausblick

Liegt eine Sehbehinderung vor, so steigt die erforderliche Umfeldleuchtdichte zur Erkennung von Kontrasten, abhängig von Kontrast und Detailhaltigkeit des Objektes. Personen mit einer Sehbehinderung benötigen eine höhere Umfeldleuchtdichte als augengesunde Personen. Insgesamt führte eine Erhöhung der Umfeldleuchtdichte zu einer verbesserten Wahrnehmung von Kontrasten. Dabei war es in diesem Projekt allerdings nicht möglich, dass von jedem Probanden der Interventionsgruppe besonders die geringen Kontraste ( $K_M < 0,16$ ) erkannt werden konnten. Dazu sei gesagt, dass die maximal einstellbare Umfeldleuchtdichte nach oben hin begrenzt war. Möglicherweise hätte eine höhere Umfeldleuchtdichte zu einer Erkennung geführt. Über eine Kurvenanpassung aus den generierten relativen Häufigkeiten ist es möglich gewesen, Leuchtdichten für beliebige Häufigkeiten zu generieren, damit der gewünschte relative Anteil den verwendeten Kontrast erkennt. Eine fortführende Prüfung der so erhaltenen Leuchtdichte-Werte kann diese bestätigen oder optimieren. Blendung führte bei den sehbehinderten Testpersonen zu einer Erhöhung der benötigten Umfeldleuchtdichte von mindestens 0,2 log-Stufen (~ 60%). Dunklere Streifen als der Untergrund benötigten eine höhere Umfeldleuchtdichte als hellere Streifen. Visuelle Informationen zur z. B. Orientierung und Wegfindung im öffentlichen Raum sollten daher heller als der Untergrund gestaltet werden. Auch wenn kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Blendempfindlichkeit festgestellt werden konnte, brauchten „blendempfindliche“ Probanden unter Blendung eine höhere Umfeldleuchtdichte als ohne Blendung zur Erkennung der Kontraste. Anzumerken sei der geringe Stichprobenumfang in den Subgruppen. Weitere Untersuchungen mit größeren Stichproben sind erforderlich.

Die Veröffentlichung der detaillierten Ergebnisse erfolgt nach Abschluss des Projektes auf der Webseite des Forschungsförderers:

<https://www.zukunftbau.de/mediathek/forschungsberichte>

## ZUKUNFTBAU

FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Die Forschung wurde mit Mitteln der Zukunft Bau Forschungsförderung des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung gefördert. (Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-20.08)

## 8 Literatur

### Literatur

- [1] Resnikoff S, Pascolini D, Etya'ale D et al. Global data on visual impairment in the year 2002. Bull World Health Organ 2004; 82: 844–851; DOI: 10.1590/S0042-96862004001100009
- [2] [Anonym] Gutenberg-Gesundheitsstudie | ghs » Informationen zur Studie (19.09.2021). Im Internet: <http://www.gutenberg-gesundheitsstudie.de/ghs/informationen-zur-studie.html>; Stand: 19.09.2021
- [3] Deutsches Institut für Normung. Gestaltung visueller Informationen im öffentlichen Raum zur barrierefreien Nutzung: Deutsches Institut für Normung (2009-12); 2009
- [4] Methling D. Bestimmen von Sehhilfen. 3. Aufl. Stuttgart, New York, NY: Thieme; 2013
- [5] Hauck N. Entwicklung eines Kartentests zur Bewertung der Kontrastempfindlichkeit auf Basis der Punktsehschärfe [Diplomarbeit]. Jena: Ernst-Abbe-Hochschule; 2004
- [6] Hauck N. Barrierefreie Beleuchtungslösungen für sehbehinderte Menschen in Innenräumen sowie Entwicklung einer Kontrastbestimmungsmethode: Barrierefreie Beleuchtungslösungen für sehbehinderte Menschen in Innenräumen sowie Entwicklung einer Kontrastbestimmungsmethode: Wien
- [7] Lohaus I, Meyer S, Kreiser S, Schulze C, Rehberg K, Glasow N, Vorisková S. Visuelle Barrierefreiheit durch die Gestaltung von Kontrasten. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag; 2018
- [8] Deutsches Institut für Normung. Barrierefreies Bauen – Planungsgrundlagen: Teil 1: Öffentlich zugängliche Gebäude: Deutsches Institut für Normung (2010-10); 2010
- [9] Deutsches Institut für Normung. Straßenbeleuchtung- Teil 1: Auswahl der Beleuchtungsklassen. Berlin: Beuth Verlag GmbH (2021-09); 2021
- [10] Eichhoff L. Möglichkeiten zur quantitativen Erfassung der physiologischen Blendung. Lichttechnik 1970; 22: 185
- [11] DIN EN 13201. Strassenbeleuchtung (26.01.2022); Stand: 26.01.2022
- [12] CIE. Glare and uniformity in road lighting installations. Technical Report 31 1976
- [13] Bach M. The Freiburg Visual Acuity Test-variability unchanged by post-hoc re-analysis. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol 2007; 245: 965–971; DOI: 10.1007/s00417-006-0474-4
- [14] Lange C, Feltgen N, Junker B et al. Resolving the clinical acuity categories "hand motion" and "counting fingers" using the Freiburg Visual Acuity Test (FrACT). Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol 2009; 247: 137–142; DOI: 10.1007/s00417-008-0926-0
- [15] Lieberman HR, Pentland AP. Microcomputer-based estimation of psychophysical thresholds: The Best PEST. Behavior Research Methods & Instrumentation 1982; 14: 21–25; DOI: 10.3758/BF03202110
- [16] Wesemann W. Sehschärfebestimmung mit Freiburger Visustest, Bailey-Lovie-Tafel und Landoltring-Tafel. Klin Monbl Augenheilkd 2002; 219: 660–667; DOI: 10.1055/s-2002-35168

- [17] Bach M, Schäfer K. Visual Acuity Testing: Feedback Affects Neither Outcome nor Reproducibility, but Leaves Participants Happier. PLoS ONE 2016; 11: e0147803; DOI: 10.1371/journal.pone.0147803
- [18] Kollbaum PS, Jansen ME, Kollbaum EJ et al. Validation of an iPad test of letter contrast sensitivity. Optom Vis Sci 2014; 91: 291–296; DOI: 10.1097/OPX.000000000000158
- [19] Jungnickel H. Objektive und subjektive Bewertungsverfahren zur Wirkung von Aberrationen am Auge [Dissertation]. Ilmenau: Technischen Universität Ilmenau; 2015