

# **Das Prinzip der Halbkugelprojektion als neuartiger Ansatz in der Lichtforschung?**

*Dipl.-Ing. Felix Börner*

*Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Prof.-Schmidt-Str. 26*

*98693 Ilmenau*

*felix.boerner@tu-ilmenau.de*

## **1 Einleitung**

Im Laufe der vergangenen Jahrzehnte sind viele Versuche unternommen worden um die Technik vieler Lampen und Leuchtentypen den aktuellen Wünschen und Bedürfnissen der Gesellschaft entsprechend anzupassen. Zeitgleich zum ständig verbesserten Verhältnis von elektrischer Leistung zum resultierenden Lichtstrom wie sie derzeit z.B. bei der LED zu beobachten ist, wurde auch die Frage nach aktuellen Gütemerkmalen immer wieder gestellt.

Die Wirkung immer höherer Leuchtdichten, kleinerer Raumwinkel, unterschiedlicher Farbtemperaturen uvm. auf den Menschen wurde und wird auch aktuell immer wieder unter neuen Gesichtspunkten untersucht. Ziel ist es die Wirkungsweise des gesamten visuellen Apparates im Zusammenhang zu, sich ständig ändernden Lichtverteilungen, Situationen und Lampentypen möglichst genau beschreiben zu können.

Ein immer wiederkehrendes Problem ist die Beschreibung der Adaptationsleuchtdichte in inhomogenen Situationen. Die Adaptationsleuchtdichte ist die Leuchtdichte, auf die sich das Auge einstellt, um optimal zu arbeiten. Unter Laborbedingungen ist es relativ einfach, diese Größe zu ermitteln, da die meisten Experimente vor einem homogen ausgeleuchteten Hintergrund durchgeführt werden.

In der Realität existieren solche Bedingungen leider nicht. In einer Alltagssituation ist das normale Sichtfeld aus einer Unzahl von verschiedenen Leuchtdichten zusammengesetzt, was dazu führt, dass es noch kein allgemein gültiges Verfahren zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte

Obwohl viele Studien über Helligkeitswahrnehmung potentiell mit dem Thema Adaptationsniveau in Beziehung stehen, konnte keine Fachliteratur gefunden werden, die diese Sache explizit behandelt. Alles was jetzt getan werden kann, ist Wissenschaft-

ler zu ermutigen, die Forschung über das Adaptationsniveau nicht nur unter Experimentierbedingungen sondern auch in natürlicher und komplexer Umgebung durchzuführen.[1]

Zieht man einen historischen Vergleich über die Grundlagenforschung zur Bestimmung visueller Gütemerkmale verschiedener Epochen, so wird man unweigerlich auf ähnliche Versuchsaufbauten stoßen. Doch welche sind das und wie könnte man diese mit den heute vorhandenen technischen Neuerungen verbessern?

Die Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte bei inhomogenen Umfeldern über die Schwarzschwelle, unter anderem mit dieser Frage beschäftigt sich das Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität in Ilmenau.

## 2 Historische Aufbauten

Viele Forscher haben für ihre Untersuchungen ähnliche Versuchsbedingungen benötigt.

Lowry, Haubner oder auch Rehder, um nur einige von ihnen zu nennen, benötigten ein homogenes Umfeld für ihre Untersuchungen auf das sie einen Probanden vollständig adaptiert wussten. Erreicht haben sie diese Bedingung, indem sie eine Halbkugel über einen Glühlampenkranz an den Kugelrändern beleuchten (Abbildung 1: Messaufbau Lowry). Somit wurden zum Teil Umfeldleuchtdichten von bis zu  $1000\text{cd/m}^2$  erzielt.[2][3][4]

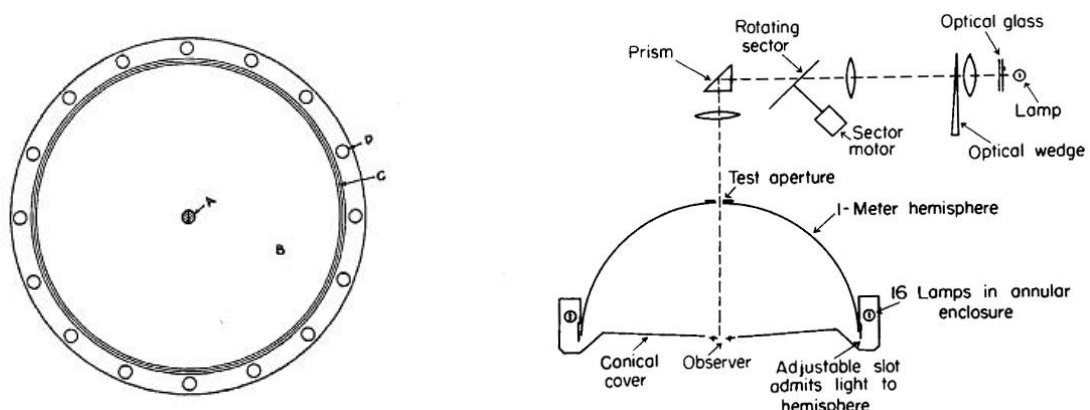
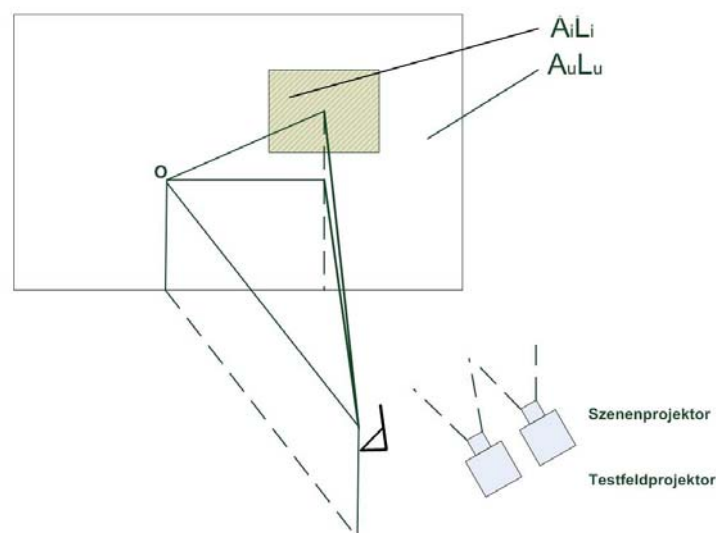


Abbildung 1: Messaufbau Lowry

Im Zentrum der Halbkugel wurde eine Lichtquelle( $0,5^\circ$  Sehwinkel) präsentiert deren Helligkeit über diverse Blenden variiert werden konnte. Für gegebene Umfelder wurde die Blendenstellung notiert an der eine Versuchsperson die Lichtquelle gerade nicht mehr erkennen konnte.

Thiele und Gall verwendeten einen anderen Ansatz indem einer Versuchsperson nach erfolgter Adaptation an ein relativ hohes Leuchtdichteniveau ein niedrigeres Leuchtdichteniveau dargeboten wird und die Zeit ( $t_E$ ) misst, die zur Lösung einer gestellten Sehaufgabe vergeht. [5] Im Punkt 0 wurde über einen Testfeldprojektor ein Sehzeichen (Landoltring) projiziert und die Zeit gemessen die ein Proband benötigte dieses, nach abschalten des Szenenprojektors, zu erkennen.(Abbildung 2: Messaufbau Thiele,Gall)



**Abbildung 2: Messaufbau Thiele,Gall**

Sie kommen zu dem Schluss das, für die Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte bei Lokaladaptation wird der Adaptationszustand in der Fovea centralis sowohl von der Infeldleuchtdichte (als auch von der Größe der dargebotenen Fläche) sowie den Umfeldleuchtdichten maßgeblich beeinflusst wird.

Man muss nun aus all diesen Ergebnissen schlussfolgern, dass eine allgemeine Aussage über den Adaptationszustand bei Lokaladaptation, wie etwa bei Bildfeldern, die uns täglich umgeben, wegen der komplizierten Verflechtung aller Parameter kaum möglich ist.[5]

Die Grenzen dieser Versuchsaufbauten zeigen sich allerdings auf, wenn z.B. die Wirkung beliebig strukturierter Szenen auf den Adaptationszustand einer Versuchsperson sowohl im Labor als auch im Feld untersucht werden soll.

An diesem Punkt wird derzeit versucht in Ilmenau anzusetzen. Ziel ist es zum einen, einen Laboraufbau zu entwickeln der sowohl die Messungen von Lowry und Haubner als auch die von Thiele und Gall aufgreifen kann. Darüber hinaus werden definierte beliebige Strukturen und deren Wirkung auf die Adaptationsleuchtdichte als Weiterführung benötigt.

Als letzte Stufe dieser „Annäherung an reale Szenen“ bzw. Leuchtdichteverteilungen soll die Bestimmung der tatsächlichen Adaptationsleuchtdichte einer gegebenen Szene stehen.

### **3 Ansatz**

Ein bereits aus der Spiele Industrie oder auch bei Flugsimulatoren bekanntes Prinzip kann diese Lücke schließen. Die Rede ist von der, durch den Australier Paul Bourke maßgeblich vorangetriebenen, „spherical mirror projection“ der Halbkugelprojektion [6]. Grundidee hierbei ist es einen Aufbau zu realisieren, welcher es ermöglicht mit geringem finanziellen Aufwand den Eindruck einer immersiven, virtuellen Umgebung zu schaffen. Die Umsetzung (siehe Abbildung 3) erfolgt über vier Komponenten, die sich aus einer Halbkugel, einem sphärischen Spiegel(Viertelkugelspiegel), einem Digital-Projektor und einer entsprechenden Entzerrungssoftware zusammensetzen.



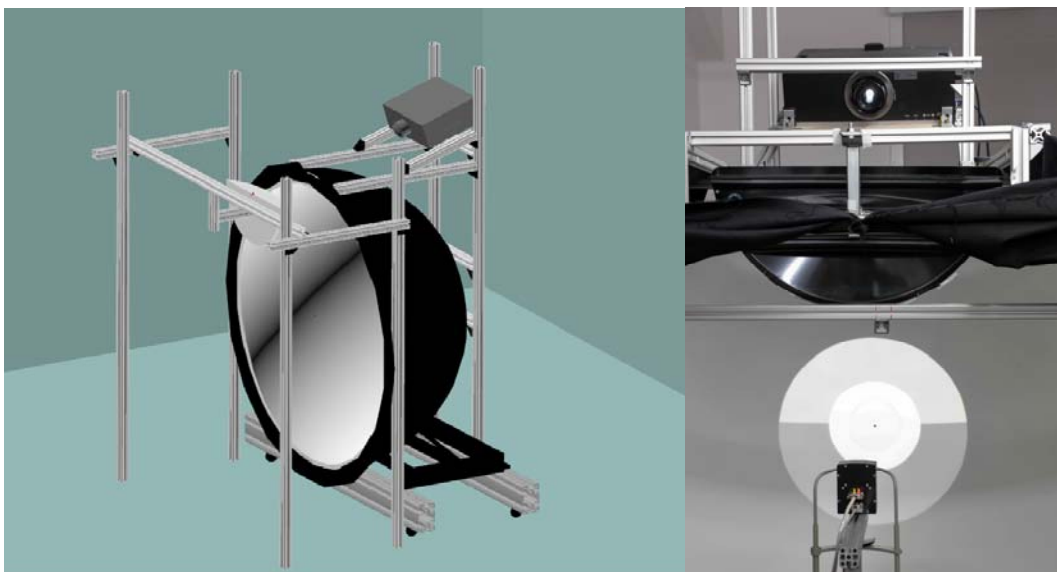
**Abbildung 3: Halbkugelprojektion nach P.Bourke**

Bourke entwickelte ein eigenes Entzerrungstool und gestaltete seine virtuelle Umgebung mit Blender, einer 3D Open Source Software. Hauptaugenmerk seines Bestrebens war es nicht seine Halbkugel mit Durchmesser von  $d=2\text{m}$  möglichst homogen auszuleuchten bei maximal erreichbarer Leuchtdichte, ihm ging es vielmehr darum dem Problem der projektiven Entzerrung in der Halbkugel Herr zu werden.

### ***3.1 Umsetzung in Ilmenau***

An diesem Punkt setzt der Versuchsaufbau des Fachgebietes Lichttechnik der TU Ilmenau an. Ziel ist es an die Vorversuchsaufbauten aus dem Bereich Lichttechnik anzuknüpfen und diese durch die Halbkugelprojektion zu erweitern.

Damit in der Halbkugel eine möglichst hohe Leuchtdichte erzielt werden kann, musste ein entsprechender Kompromiss aus Kugelradius und Projektorlichtstrom gefunden werden. Umgesetzt wurde der Ilmenauer Versuchsaufbau (siehe Abbildung 4) mit einer Halbkugel (Durchmesser  $d=1,5\text{m}$ ), einem Kugelspiegel und einem DLP Projektor von Panasonic.



**Abbildung 4: Umsetzung Halbkugelprojektion Ilmenau**

Derzeit sind, je nach Projektoreinstellung, Leuchtdichten bis  $300\text{cd/m}^2$  (unkorrigiert) bei einer Farbtemperatur von  $6500\text{K}$  möglich. Da bei voller Leistung des Projektors ( $6000\text{ANSI-Lumen}$ ) die erwähnte maximale Leuchtdichte in der Kugel zu großen Inhomogenitäten führte, musste eine Anpassung der projizierten Grafik vorgenommen werden. Nach pixelgenauer Bildkorrektur ist eine Leuchtdichteabweichung von

Minimum zu Maximum von 5% noch vorhanden, Messfehler durch Leuchtdichteaufnahmen inbegriffen.

Im Zentrum der Kugel wurde eine Aufnahme eingefügt mit der es möglich ist verschiedene kreisförmige Adapterplatten mit zentralen Öffnungswinkeln von  $0,5^\circ$  bis  $10^\circ$  Sehfeldgröße anzubringen. Die Anbindung an Folgeuntersuchungen im Bereich der Farbwahrnehmung oder Blendung ist so ohne weiteres gegeben.

Die zur geometrisch korrekten Darstellung, von Szenen und Objekten in der Kugel, notwendige Vorverzerrung wird über eine entsprechende Software rechnerseitig realisiert. Bild und Szenenwechsel dauern nur Sekunden und halten die Dauer eines Testdurchlaufes gering und infolgedessen auch die Belastung der Versuchsperson. Des Weiteren können einfache Blendquellen, minimal invasiv, in der Kugel befestigt werden um Blendungsuntersuchungen durchführen zu können.

### ***3.2. Aktueller Forschungsstand in Ilmenau***

Unter diesem Gesichtspunkt ist es somit möglich die Wirkung beliebiger homogener und inhomogener Szenen auf den Adaptationszustand eines Probanden zu untersuchen. Einfache und auch komplexe Strukturen sowie auch vollständige Aufnahmen diverser Büro oder Außenszenen können einer Versuchsperson dargeboten werden. Der zeitliche Aufwand von Umbaumaßnahmen wie sie bei Rehder nötig waren, reduziert sich erheblich.

- Offene Fragen aus der Wahrnehmungsforschung und auch der Lichtmesstechnik können mit dem beschriebenen Versuchsaufbau gelöst werden. Dies sind unter anderem:
- Wodurch wird die Adaptationsleuchtdichte bestimmt wenn  $L_u$ , die Umfeldleuchtdichte inhomogen ist?
- Entspricht die mittlere Leuchtdichte eines  $40^\circ$  Sehfeldbereiches tatsächlich der aktuellen Adaptationsleuchtdichte oder liegt der reale Wert ggf. höher als bisher angenommen?
- Ist eine Winkelabhängige Gewichtung sämtlicher im Gesichtsfeld vorherrschenden Leuchtdichten zur Berechnung der Adaptationsleuchtdichte möglich?

Nach Baer kann ein Sehfeldbereich von  $\pm 20^\circ$  als adaptationsbestimmendes Feld angegeben werden. [7]

Adrian unternahm ein Experiment in dem er zwei Kreisfelder gleicher Größe, gleicher mittlerer Leuchtdichte aber unterschiedlicher Verteilung in einem  $20^\circ$  Sehfeld ( $L_{20}$ ) verglich. Er kommt zu dem Schluss dass ein Feld gleicher mittlerer Leuchtdichte unterschiedliche Adaptationsstadien hervorrufen kann. Ferner postuliert er dass es keine einfache Relation zwischen  $L_{20}$  und  $L_A$  gibt.[8]

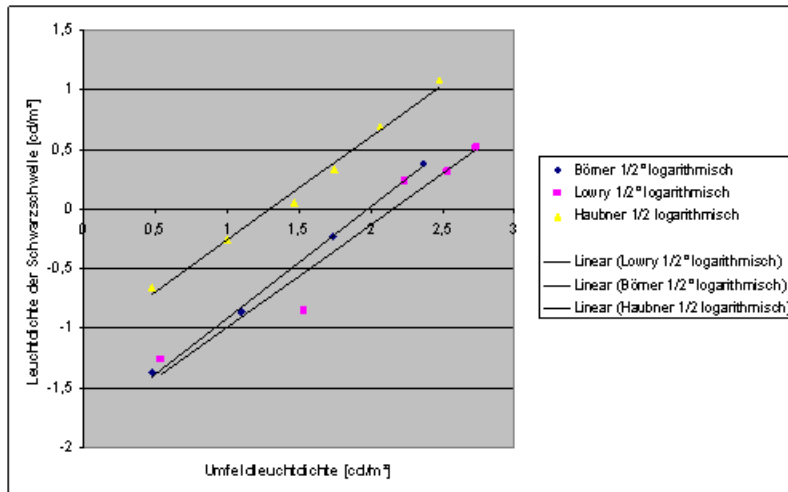
Die Änderung des Adaptationszustandes einer Person lässt sich über die Bestimmung der Schwarzschwelle beobachten. Diese beschreibt den Punkt an dem eine Lichtquelle oder ein Objekt vom Probanden „gerade nicht mehr“ bzw. als Schwarz erkannt wird und variiert mit der Änderung des Adaptationsniveaus.

Eine Idee ist es die Schwarzschwelle für verschiedene homogene Umfelder unterschiedlicher Leuchtdichten zu bestimmen. Anschließend denselben Versuch bei inhomogenen Umfeldern zu wiederholen, auch hier die Schwarzschwelle zu bestimmen, um somit im Anschluss auf die Wirkung eines äquivalenten homogenen Umfeldes zu schließen.

## **4 Erste Ergebnisse**

### ***4.1.Homogene Umfelder***

Bezogen auf Forschungsfrage zwei wird die Leuchtdichte der Schwarzschwelle bei homogenen Umfeldern von  $3\text{cd/m}^3$  bis  $230\text{cd/m}^2$  bestimmt und deren Verlauf festgehalten. Hierzu wird im Kugelzentrum (ähnlich wie bei Lowry) eine periodisch (jede Sekunde) für die Dauer von 0,2 Sekunden dargebotene Lichtquelle (Öffnungswinkel  $0,5^\circ$ ) soweit gedimmt bis diese gerade nicht mehr zu erkennen ist. Der hierzu entsprechende Leuchtdichtewert der Lichtquelle ist durch Voruntersuchungen bekannt und ermöglicht dementsprechend die Bestimmung der Schwarzswellenleuchtdichte bei gegebenem Umfeld. In diesem Fall kann  $L_u = L_{Ad}$  gesetzt werden.



**Abbildung 5: Verlauf der Schwarzschwelle Börner, Lowry, Haubner**

Die Ergebnisse der ersten Messreihen wurde zu denen von Lowry und Haubner in Beziehung gesetzt (Abbildung 5: Verlauf der Schwarzschwelle Börner, Lowry, Haubner) und liefern ähnliche Verläufe. Haubners Werte liegen im Durchschnitt höher als die von Börner und Lowry. Eine Ursache hierfür ist u.a. das er keine blinkende Lichtquelle verwendete sondern eine permanent leuchtende. Lowry hingegen führte seine Untersuchungen mit nur zwei Probanden durch.

#### **4.1. Inhomogene Umfelder**

Ob die Mittelwertbildung sämtlicher Leuchtdichten im 40° Sehfeldbereich auch der tatsächlichen Adaptationsleuchtdichte entspricht, soll im Folgenden ähnlich wie bei Adrian untersucht werden. Hierzu wird die Schwarzschwellenleuchtdichte eines im Kugelzentrum projizierten 40° Vollkreises von  $L_{40^\circ \text{VK}} = 80 \text{ cd/m}^2$  Positivkontrast bestimmt. Im Anschluss wird das zuvor präsentierte Sehfeld in verschiedene einfache Strukturen unterteilt, während aber der Mittelwert der Leuchtdichte auf das gesamte 40° Vollkreis Sehfeld bezogen ebenfalls  $80 \text{ cd/m}^2$  ergibt.

Die in Abbildung 6 dargestellten Strukturen unterteilen sich in Vollkreise (VK) von 10° bis 40° Sehfeldgröße, Halbkreise (HK) innerhalb des 40° Sehfeldbereiches an unterschiedlichen Positionen, in Kreisringe (KR) deren innere und äußere Radien in Abhängigkeit ihrer Winkellage im Gesichtsfeld angegeben werden und in einfacher Abstrakte Büroszenen.



Einzelne Strukturen können, separat betrachtet, höhere Leuchtdichten als die angegebenen  $80\text{cd/m}^2$  erreichen. So lässt sich z.B. die Leuchtdichte des  $20^\circ\text{VK}$  ohne weiteres auf Werte  $> 100\text{cd/m}^2$  einstellen. Diese Option lässt Untersuchungen zur Richtungsabhängigkeit einzelner Sehfeldbereiche offen. Indem z.B. die Struktur KR (Kreisring) je auf denselben Leuchtdichtewert eingestellt wird und die Auswirkung unterschiedlicher Winkelbereiche untersucht wird.

Eine weitere herangehensweise zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte inhomogener Szene ist es, die äquivalente Schleierleuchtdichte am Beobachterauge konstant zu halten und die GröÖen der Kreisflächen beispielsweise zu variieren. Vermutlich wird sich die Leuchtdichte der Schwarzschwelle mit steigender Sehfeldgröße zu höheren Werten hin ändern.

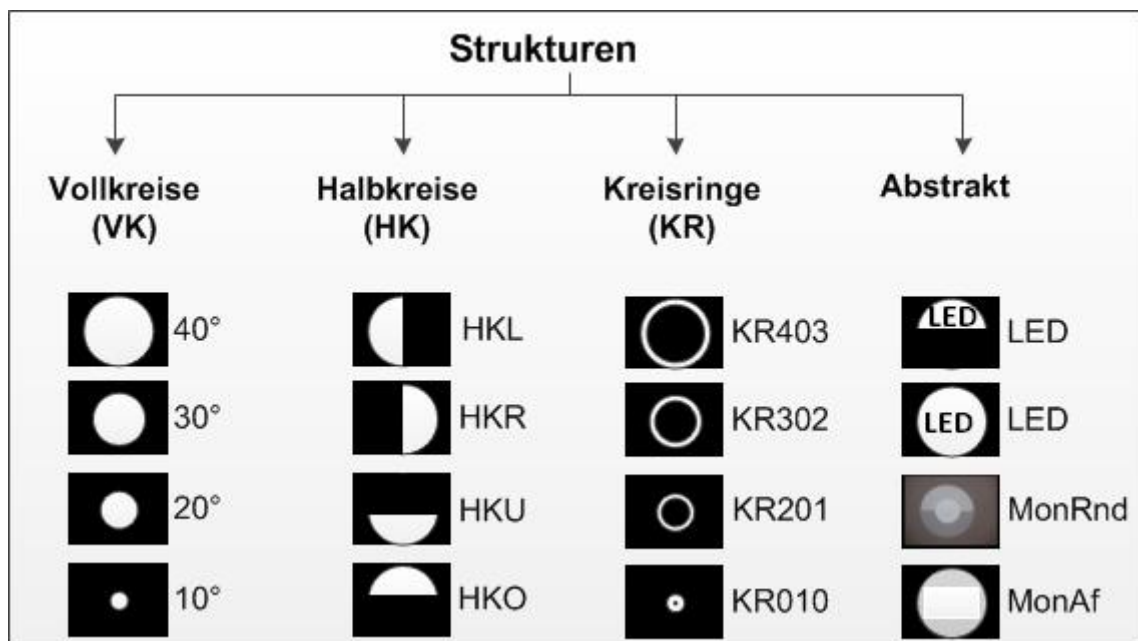


Abbildung 6: Übersicht inhomogene Umfelder/Strukturen

## 5.Ausblick

Erste Vorversuche bei homogenen Umfeldern zeigen das mit dem beschriebenen Versuchsaufbau, vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können wie bei Lowry und Haubner. Auch wenn beide Forscher weitaus höhere Leuchtdichten in ihren Aufbauten erzielten so ist der Verlauf der in Ilmenau ermittelten Funktion, bezogen auf den Leuchtdichtebereich von  $3\text{cd/m}^2$  bis  $230\text{cd/m}^2$ , ähnlich. Unterschiede sind in der Anzahl der Probanden sowie in der Darbietungsdauer der Lichtquelle zu begründen.

Derzeit laufen die Untersuchungen mit strukturierten Umfeldern. Erste Ergebnisse werden zur LUX junior 2013 erwartet. Ferner sind erste Folgeuntersuchungen mit abstrahierten Szenen in der Halbkugel vorgesehen sowie Blendungsuntersuchungen mit einfachen Strukturen.

## 6 Literatur

- [1] Visual Adaptation to Complex Luminance Distribution / Commission Internationale de l'Eclairage. Wien, 1999 (135/5). – Forschungsbericht
- [2] Lowry E.M., Jarvis J.G.: The Luminance of Subjective Black In: Journal of SMPTE Vol.65 (1956) S.411-414
- [3] Haubner P. : Zur Relation zwischen Schwarzschwelle Umfeldleuchtdichte und Detailgröße In: „Licht- Forschung: Entwicklung, Technologie“. (1979) Band 1, S. 51
- [4] Rehder, W. M.: Der Adaptationszustand des menschlichen Auges in Abhängigkeit von der Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld. Dissertation, Math.-nat. Fakultät der Universität Hamburg 1965
- [5] Thiele E. ;Gall D.; Adaptationsleuchtdichte und mittlere Leuchtdichte bei direktem und indirektem Sehen In: Wiss.Z.TH Ilmenau 14; 1968
- [6] <http://paulbourke.net/dome/iDome/> Stand: 18.04.2013
- [7] Baer, R.: Grundlagen Beleuchtungstechnik In: Huss-Medien GmbH, 2006
- [8] Adrian, W.K.; Adaptation luminance when approaching a tunnel in daytime In: Lighting Res. Technol. 19; S.73-79; 1987

Diese Forschungsarbeit wird mit der finanzieller Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Forschungsprojekts UNILED (Förderkennzeichen: 13N10751) durchgeführt.

