

# Messanordnung zur experimentellen Bestimmung der Schwarzschwelle des Auges zur Ermittlung der Helligkeitsadaptation

Anja Morgenstern  
[morgenstern.anja@gmx.net](mailto:morgenstern.anja@gmx.net)

Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz  
[christoph.schierz@tu-ilmenau.de](mailto:christoph.schierz@tu-ilmenau.de)

*TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik  
Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau*

## 1 Einleitung

Für das menschliche Auge existieren vielerlei verschiedene Grenzen des Wahrnehmbaren, z. B. die Grenzen der Helligkeitswahrnehmung: der Aussteuerbereich des visuellen Systems. Dazu gehört eine obere (die Blendschwelle), eine mittlere (die Luminanzschwelle) und eine untere Begrenzung (die Schwarzschwelle). Das ist genau die Grenze, bei der das Licht einer Lichtquelle oder eines Objektes gerade nicht mehr wahrgenommen werden kann. Diese Grenze hängt von der Adaptationsleuchtdichte zum Zeitpunkt der Betrachtung ab.

Die Schwarzschwelle kann sowohl in homogenen als auch in inhomogenen Szenen bestimmt werden. Daraus kann auf die Adaptationsleuchtdichte geschlossen werden.

Angewendet werden könnte dieses Wissen beispielsweise bei Verkehrszeichenanlagen, die sich je nach Umgebungshelligkeit in ihrer Lichtstärke selbstregulierend einstellen. Gleiches gilt für Infotafeln auf Bahnhöfen und Flugplätzen. Ebenso könnten KfZ-Rück- und Frontleuchtensysteme ihre Umgebungshelligkeit messen, Gefahrenstellen durch Objekte in der Szene erkennen und sich in ihrer Lichtstärke dementsprechend anpassen.

## 2 Untersuchung

Das Ziel der Untersuchung im Allgemeinen ist es, zunächst Schwarzschwellenmessungen für verschiedene Umgebungsleuchtdichten in einem homogenen Raum durchzuführen. In diesem Raum ist die zur jeweiligen Schwarzschwelle gehörende Adaptationsleuchtdichte bekannt. Aus diesen Messwerten lässt sich ein funktionaler Zusammenhang bestimmen.

Nun wird die Schwarzschwelle in inhomogenen Szenen, d.h., in solchen, in denen keine gleichmäßige Beleuchtung existiert, gemessen. Aus der im Homogenen ermittelten Funktion lässt sich die äquivalente Adaptationsleuchtdichte berechnen. Aus einem winkelabhängigen Leuchtdichtebild der entsprechenden Szene lassen sich nach weiteren Untersuchungen Bereiche finden, die unterschiedlich gewichtet in die Ermittlung einer mittleren Adaptationsleuchtdichte eingehen.

### 2.1 Die Untersuchungsanordnung

Nach dem Vorbild von E. M. Lowry und J. G. Jarvis wurde eine Messanordnung zur Ermittlung der Schwarzschwelle nach dem aktuellen Stand der Technik entwickelt und konstruiert. Insgesamt besteht die Apparatur aus drei Hauptbaugruppen: aus einem Abschattungsrohr, einem manuellen Bedienteil und aus einer Steuereinheit.



Das Abschattungsrohr (Abb. 2.1) besitzt eine Länge von 450 mm, einen Durchmesser von 42 mm. Es besteht aus Hartgewebe in Verbindung mit Epoxidharz. An einem Ende des Rohrs befindet sich eine mittels Pulsweitenmodulation (PWM) dimmbare Vierfarb-LED, die durch das zusätzliche Einbringen von Graufilterfolien in das Abschattungsrohr weiter gedimmt werden kann.

Abb. 2.1: Abschattungsrohr auf Dreibeinstativ

Mit Hilfe zweier Mattglasscheiben wird das Licht der LED diffus über den gesamten Durchmesser des Rohrs verteilt. Die Lichtquelle wird unter einem Sehwinkel von  $\frac{1}{2}^\circ$  aus 4 m Entfernung betrachtet.

Die LED leuchtet innerhalb eines Einsekundenrhythmus für 0,2 Sekunden auf. Das Ziel dabei ist es, dass die Helligkeit der LED auch in dunklen Umgebungen nicht durch Adaptation nachleuchtet. Das Leuchten der LED nahe der Schwarzschwelle wird durch diese Blinkschaltung gerade noch erkennbar. Zur Messung findet das psychophysikalische Grenzverfahren Anwendung.



Das manuelle Bedienteil (Abb. 2.2), ein Aluminiumzylinder mit eingebautem  $3600^\circ$  Wendepotentiometer, dient der stufenlosen Helligkeitsregelung der LED durch die Versuchsperson. Die Aufgabe der Probanden ist es, die Schwarzschwelle ausgehend von 0% und von 100% LED-Helligkeit abwechselnd einzustellen.

Abb. 2.2: Manuelles Bedienteil



Die Steuereinheit (Abb. 2.3, 2.4) verbindet die beiden o. g. Baugruppen miteinander. In dieser Einheit befindet sich ein Mikrocontroller MSP430F449 mit integriertem LC-Display. Die Werte, die das Potentiometer liefert, werden im Controller durch einen 12-Bit A/D-Wandler in digitale Werte umgesetzt und entsprechend an die LED weitergeleitet. Außerdem ist eine Farbauswahl der LED (RGBW) sowie eine bessere Feineinstellungen in den dunklen Bereichen der Diode möglich, indem die unteren 25 % des darstellbaren Bereichs auf den vollen Drehumfang des Potentiometers gelegt werden.

Abb.2.3: Steuereinheit von vorn



Ein in der Steuereinheit befindlicher Gleichspannungswandler regelt die Eingangsspannung von 12 V über Netzteil bzw. von 9 V über Batteriekammer auf eine konstante interne Spannung von 3,3 V. Ein ebenfalls in der Steuereinheit integrierter LED-Treiber sorgt für die Ansteuerung der Diode mit einer konstanten Stromstärke, sodass diese farbstabil ist.

Abb. 2.4: Steuereinheit von hinten

## 2.2 Untersuchungsbedingungen

Zur Korrektur von Sehfehlern ist eine Sehhilfe nötig. Eine weitere Anforderung, die an die Versuchspersonen gestellt wird, ist, dass keine Farbfehlsichtigkeit vorliegt.

## 2.3 Untersuchungsergebnisse

Zunächst wurde die Schwarzschwelle von 13 Messpersonen im homogenen Raum bei vier verschiedenen Umfeldleuchtdichten des Raums (ca. 235; 125; 45; 4  $\text{cd/m}^2$ ) gemessen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abb. 2.5 dargestellt.

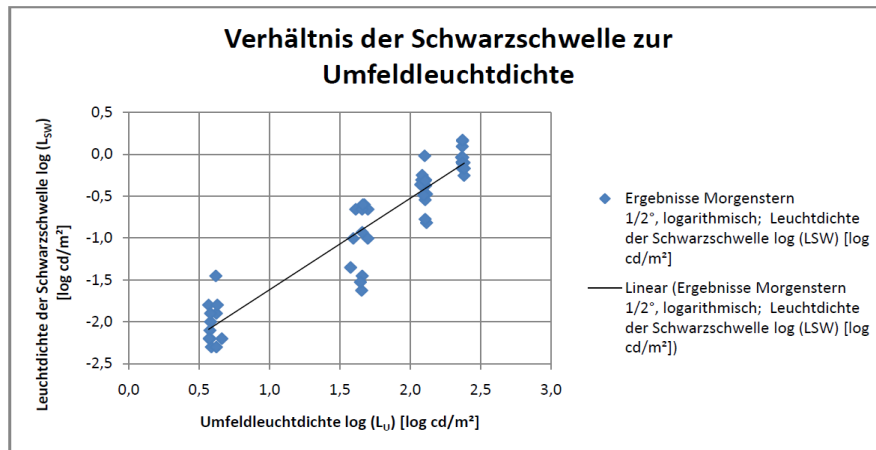


Abb. 2.5: Verhältnis der Schwarzschwelle zur Umfeldleuchtdichte – Messungen im homogenen Raum

Die aus diesen Ergebnissen entstandene lineare Regressionsgleichung (im Diagramm eingezeichnet) folgt der Gleichung:  $\log(L_{SW}) = 1,091 \cdot \log(L_U) - 2,709$ . Da im Homogenen die Umfeldleuchtdichte der Adaptationsleuchtdichte gleichgesetzt werden kann, folgt also für die äquivalente Adaptationsleuchtdichte:

$$L_{adapt} = \left( \frac{1}{c} \cdot L_{SW} \right)^{\frac{1}{a}} \text{ mit } a=1,091; c=10^b; b=-2,709$$

### 2.4 Rechenbeispiel

Aus der im homogenen Raum ermittelten Gleichung für die Adaptationsleuchtdichte lässt sich nun für jeden gemessenen Wert der Schwarzschwelle die äquivalente Adaptationsleuchtdichte in der jeweiligen Szene ermitteln.

Beispielsweise ergaben die Messungen der Schwarzschwelle in der in Abb. 2.6 dargestellten Szene eine geometrisch gemittelte Schwarzschwelle von  $L_{SW, inhom} = 40,5 \text{ cd/m}^2$ . Nach der o. g. Gleichung ergibt sich somit eine äquivalente Adaptationsleuchtdichte  $L_{adapt, inhom}$  von rund  $9000 \text{ cd/m}^2$ .

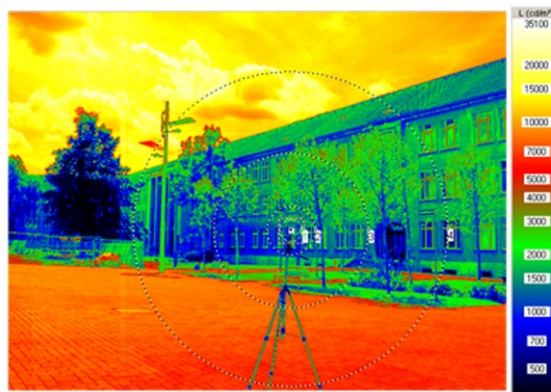


Abb. 2.6: winkelabhängiges Leuchtdichtebild einer inhomogenen Szene mit Messanordnung im Zentrum der Kreise

### 3. Ausblick

Bei hinreichend vielen Untersuchungen kann aus den inhomogenen Leuchtdichtebildern in Verbindung mit den zugehörigen Schwarzschwellenwerten ein Zusammenhang zwischen der Leuchtdichteverteilung in der Szene und der ermittelten äquivalenten Adaptationsleuchtdichte gefunden werden. Das Ziel dieser Untersuchungen ist es, die mittlere Adaptationsleuchtdichte in Zukunft lediglich aus dem winkelabhängigen Leuchtdichtebild der entsprechenden Szene zu ermitteln, ohne die Schwarzschwelle messen zu müssen.