

## Bestimmung der spektralen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges - $V(\lambda)$ Kurve

### 1. Zielstellung des Praktikums

- Kennenlernen der Funktionen des Auges als Strahlungsempfänger
- Bestimmung der eigenen  $V(\lambda)$ -Kurve und Vergleich mit der CIE-Kurve

### 2. Grundlagen

Im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums (380nm ... 760nm) empfindet das menschliche Auge gleiche spektrale Strahldichten verschiedener Wellenlängen unterschiedlich hell. Diese spektrale Hellempfindlichkeit des Auges wurde von der CIE (Internationale Beleuchtungskommission) für den  $2^\circ$  und  $10^\circ$  Normalbeobachter gemessen und standardisiert. Die  $V(\lambda)$ -Kurve gilt für das Helligkeitssehen bei einer Adaptationsleuchtdichte  $L > 30\text{cd/m}^2$ , bei der die Zapfen auf der Netzhaut aktiv sind. Die  $V'(\lambda)$ -Kurve gilt für einen Leuchtdichtebereich  $L < 0,003\text{cd/m}^2$ , bei dem die Stäbchen als wirksame Empfänger angesprochen werden. Im Leuchtdichtebereich  $0,003\text{cd/m}^2 < L < 30\text{cd/m}^2$ , dem mesopischen Bereich (Dämmerungssehen), verschiebt sich die spektrale Empfindlichkeitskurve mit kleiner werdender Adaptationsleuchtdichte auch zu kleineren Wellenlängen.

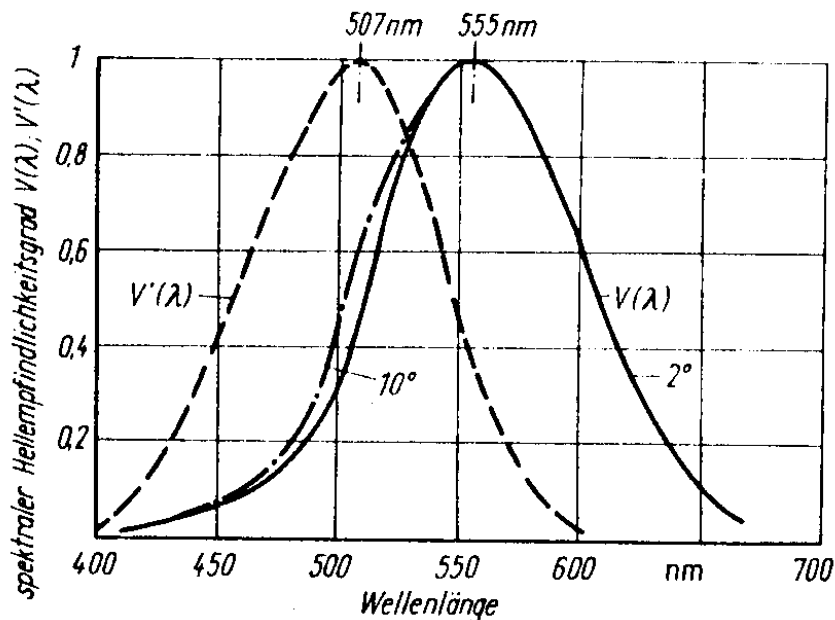


Abb.1:  
Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Das Maximum liegt (Abb.1) beim helladaptierten Auge (photopischer Bereich) bei 555nm, für das dunkeladaptierte Auge (skotopischer Bereich) bei 507nm. Diese Verschiebung ist auch als "Purkinje-Effekt" bekannt.

Den Zusammenhang zwischen der lichttechnischen Größe (spektrale Hellempfind-

lichkeit des Auges) und der strahlungsphysikalischen Größe kann man wie folgt darstellen:

$$X_V = k_m * \int_0^{\infty} X_{e,\lambda} * V(\lambda) * d\lambda \quad (1)$$

Dabei ist  $X_V$  die lichttechnische Größe,  $X_{e,\lambda}$  die spektrale strahlungsphysikalische Größe,  $k_m$  das photometrische Strahlungsäquivalent und  $V(\lambda)$  die spektrale Hellempfindlichkeit bei der entsprechenden Wellenlänge.

Grundsätzlich ist die  $V(\lambda)$ -Kurve bei jedem Menschen verschieden und zeitlichen Schwankungen unterworfen. Bisher wurden mehrere Arbeiten zur Verbesserung bzw. Diskussion der Hellempfindlichkeitskurve des CIE-Normalbeobachters veröffentlicht.

Die Untersuchungen wurden entweder nach dem Flimmerprinzip, dem Direktvergleich oder mittels Kleinstufenverfahren durchgeführt, wobei diese Verfahren unterschiedliche Ergebnisse lieferten.

Im vorliegenden Versuch soll die  $V(\lambda)$  Kurve mittels Flimmerprinzip ermittelt werden. Beim Flimmerprinzip werden dem Auge abwechselnd zwei gleichgroße und auf dem gleichen Ort abgebildete Lichter dargeboten, die sich sowohl in ihrer Lichtfarbe als auch in ihrer Helligkeit unterscheiden. Das Vergleichslicht wird in Lichtfarbe und Helligkeit konstant gehalten, vom Testlicht wird entweder mittels Monochromator oder mittels Metallinterferenzfilter jeweils nur ein schmaler Wellenlängenbereich ausgewählt.

Dabei wird beim Flimmerprinzip ein heterochromer Vergleich der Lichter auf einen quasi-isochromen Vergleich zurückgeführt. Es wird die Eigenschaft des Auges ausgenutzt, dass dessen Farbverschmelzungsfrequenz kleiner als die Helligkeitsverschmelzungsfrequenz ist. Oberhalb der Farbverschmelzungsfrequenz sieht der Beobachter nur noch ein Helligkeitsflimmern, das durch den noch vorhandenen Helligkeitsunterschied zwischen Test- und Vergleichslicht hervorgerufen wird. Wird nun die Strahldichte des Testlichtes verändert, verschwindet bei Gleichheit der Leuchtdichten das Helligkeitsflimmern bzw. es wird ein Minimum erreicht. Für jede Wellenlänge kann eine entsprechende Strahldichte des Testlichtes gemessen werden. Die spektrale Hellempfindlichkeit ist dieser Strahldichte umgekehrt proportional.

### 3. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

#### 3.1. Versuchsaufbau

Folgende wichtige Kriterien müssen mit der Anordnung realisiert werden:

1. Testlicht und Vergleichslicht müssen dem Auge am gleichen Ort dargeboten werden (Strahlenteiler).
2. Das Vergleichslicht muss über die gesamte Messzeit konstant gehalten werden.
3. Mittels Monochromator kann das Testlicht kontinuierlich in der Wellenlänge verändert werden.
4. Der Chopper sorgt dafür, dass jeweils nur eine Lichtquelle dem Auge dargeboten wird.
5. Mit der Umfeldleuchtdichte wird das Adaptationsniveau des Auges eingestellt.
6. Die Leuchtdichte des Testlichtes muss über einen großen Bereich stufenlos regelbar sein (Spannungsregelung).
7. Die Chopperfrequenz muss regelbar sein, da die Farbverschmelzungsfrequenz u.a. von der Wellenlänge und dem Adaptationszustand des Auges abhängig ist.

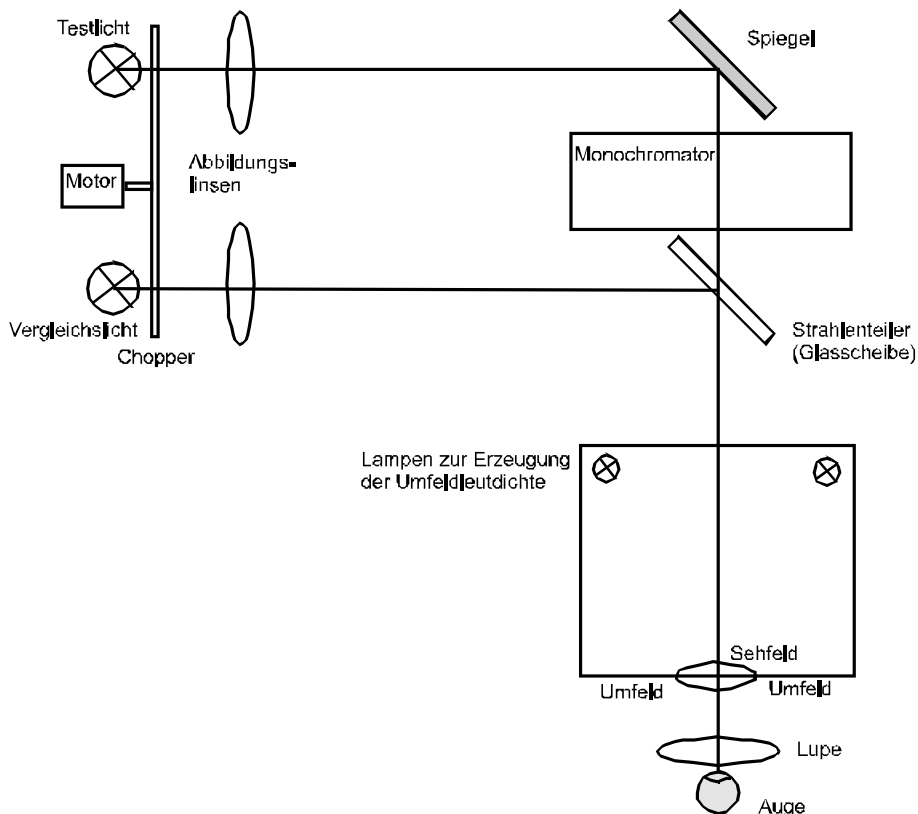


Abb. 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

### 3.2. Versuchsdurchführung

1. Vor dem Versuch ist es notwendig, die Halogenglühlampe ca. 10 min einbrennen zu lassen.
2. Mittels der Lampenspannung wird die zur Helladaptation nötige Leuchtdichte des Umfeldes auf  $30 \text{ cd/m}^2$  eingestellt, damit ein photopisches Sehen realisiert wird. Die Spannung des Vergleichslichtes wird auf 5V eingestellt.
3. Zur Übung wird zuerst mindestens 5 Mal bei einer Wellenlänge von etwa 550nm ein Abgleich auf Flimmerminimum durchgeführt. Dabei soll zunächst die Farbverschmelzungsfrequenz gefunden werden. Die Flimmerfrequenz wird über die Regelung der Motorfrequenz / Motorspannung eingestellt. Diese Zeit wird auch zur Adaptation des Auges auf die Umfeldleuchtdichte genutzt. Beim eigentlichen Abgleich wird oberhalb der Farbverschmelzungsfrequenz gearbeitet und dann für jede Wellenlänge die Helligkeit des Testlichtes so verändert, bis das Helligkeitsflimmern verschwindet bzw. minimal ist. Der eingestellte Stromwert der Testlichtquelle wird notiert. Der Abgleich wird bei jeder Wellenlänge mindestens 3 Mal durchgeführt. Anschließend erfolgt eine Mittelwertbildung des Abgleichstromes.
4. Die Hellempfindlichkeit des Auges soll im Wellenlängenbereich zwischen 450nm und 650nm ermittelt werden. Dabei wird in 12,5nm Schritten gemessen. Nach einem Wellenlängendurchgang wird der Strahlungsempfänger am Ausgang des Monochromators befestigt. Für jede gemessene Wellenlänge wird der Mittelwert des Ab-

gleichstromes eingestellt und die Strahldichte des Testlichtes in Form einer relativen Bestrahlungsstärke gemessen.

#### 4. Auswertung

Für jede Wellenlänge in 12,5 nm Schritten wurde die Strahldichte bzw. Bestrahlungsstärke gemessen. Diese ist ein Maß für die Energie, die nötig ist, um für alle Wellenlängen den gleichen Helligkeitseindruck zu erhalten. Das Maximum der Hellempfindlichkeit wird auf "1" normiert und alle anderen Werte mit dem gleichen Faktor multipliziert. Die entsprechende relative spektrale Hellempfindlichkeitskurve wird grafisch dargestellt.

Welche Fehler können die Messergebnisse beeinflusst haben?

#### 5. Vorbereitungsaufgaben

5.1. Was ist unter der spektralen Hellempfindlichkeit des Auges zu verstehen und welche Bedeutung hat diese für die Lichttechnik?

5.2. Welcher Unterschied besteht zwischen der  $V(\lambda)$ - und der  $V'(\lambda)$ -Kurve? Erläutern Sie den Purkinje-Effekt!

5.3. Mit welchen Methoden kann man die  $V(\lambda)$ -Kurve messen? Wie funktioniert das Flimmerprinzip?

#### 6. Literaturangaben

/1/ E. Helbig: "Grundlagen der Lichtmeßtechnik", Akademische Verlagsgesellschaft, GEEST & PORTIG K.-G., Leipzig 1977

/2/ DIN 5031: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik

/3/ Beleuchtungstechnik: Grundlagen, Roland Baer, Verlag Technik, 1990