Die monokulare und binokulare Reizschwelle der dunkeladaptierten Augen.

Von
Erwin Müller.

(Aus dem Physiologischen Institut zu Königsberg i. Pr.).

Mit 2 Textabbildungen.

(Eingegangen am 22. August 1921.)

I. Literatur.

Von Piper¹⁾ ist zuerst angegeben worden, daß die Reizschwelle des dunkeladaptierten Auges bei binokularem Sehen bis auf die Hälfte der monokulären Schwelle sinken könne. Wölfflin²⁾ hat diese Angabe nicht bestätigen können. Beide Autoren haben mit verschiedenen Methoden gearbeitet.

Piper beobachtete in einer Versuchsreihe eine Mattscheibe von 10 qcm Fläche, deren Helligkeit abgestuft werden konnte, in einem Abstände von 30 cm vom Auge; der beleuchtete Netzhautbezirk hatte daher eine Ausdehnung von 26° in der Diagonale und von 18° in der Seite. Die Adaptationszeit betrug 2 Stunden. Das Verhältnis von monokularer zu binokularer Schwelle ergab sich gleich 2 : 1. Eine zweite Versuchsanordnung präsentierte gleichzeitig zwei gleich große beleuchtete Mattscheiben, welche kurz nacheinander, die eine mit beiden, die andere mit nur einem Auge beobachtet werden konnten. Die Mattscheiben hatten eine Fläche von 8 qcm, sie wurden aus 35 cm Entfernung beobachtet; die beleuchtete Netzhautfläche hatte somit eine Ausdehnung von 18° in der Seite. Die Helligkeit der Mattscheiben konnte abgestuft werden, bis die binokular betrachtete der monokular beobachteten gleich hell erschien. Zwischen den beiden Beobachtungen lag daher nur die kurze Zeit der Blickwendung von einer Scheibe zu der anderen, was Piper für einen großen Vorteil hielt. Die Adaptationszeit betrug 20 Minuten. Das fragliche Verhältnis ergab sich gleich 1,6 : 1 bis 1,7 : 1.

Wölfflin hat das Licht einer elektrischen Glühlampe durch Reflexion in das Auge geführt und sukzessive abwechselnd die binokulare und die monokulare Reizschwelle bestimmt. Zur Orientierung der Blickrichtung dienten ihm schwache Signale aus rotem Licht.

Die Resultate beider Autoren sind, wie bereits erwähnt, grundverschieden. Piper hat gefunden, daß sich beim dunkeladaptierten Auge die Eindrücke beider Augen summieren können. Die Frage ist von großer Wichtigkeit; denn wenn Pipers Beobachtungen sich bestätigen, so hätte man nach Einrichtungen zu suchen, welche zentral

¹⁾ Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **32**, 161—176.

²⁾ Graefes Arch. f. Ophthalmol. **61**, 524—560.

von den Netzhäuten gelegen für eine derartige Summation geeignet wären.

Aus diesem Grunde hat mich Herr Professor Weiß aufgefordert, die Frage erneut zu bearbeiten. Der wesentliche Teil meiner Apparatur lag bereits seit Jahren fertig vor. Im folgenden werde ich die Resultate der zunächst vorgenommenen Versuche mitteilen. Das ganze Gebiet wird einer neuen Bearbeitung bedürfen, um zu einer vollkommen klaren Erkenntnis zu kommen. Der vorliegende erste Teil der Bearbeitung bringt eine Reihe von Resultaten, welche gewiß sehr bemerkenswert sind, aber die Frage nicht abschließend lösen. Dazu würde es einer breiteren Grundlage von Versuchsmaterial bedürfen, das am besten durch die Zusammenarbeit mehrerer Forscher zusammengetragen werden kann. Es wäre daher zu begrüßen, wenn auch von anderer Seite der Frage erneut Interesse entgegengebracht und einschlägige Versuche angestellt würden.

II. Methodik.

Bei meinen Versuchen, die in völlig dunklem Raume ausgeführt werden, ist ebenfalls eine Mattscheibe beobachtet worden. Diese war in den ersten Versuchsreihen quadratisch von 7,8 cm Seitenlänge. Sie wurde aus einer Entfernung von 30 cm beobachtet, so daß also der beleuchtete Netzhautbezirk in der Diagonale

20°, in der Seite 14,5° betrug. In den beiden letzten Versuchen ist das homogene Quadrat durch ein schachbrettartiges Muster (Abb. 1) ersetzt worden. Die einzelnen Quadrate desselben hatten eine Seitenlänge von 2,6 cm, die Zahl der Quadrate betrug 12. Die Gesamtausdehnung in der Seite betrug daher 13 cm. Das Muster wurde aus einer Entfernung von 30 cm betrachtet. Der beleuchtete Netzhautbezirk umfaßte einen Winkel von 27,5° in der Richtung der größten Ausdehnung.

Abb. 1.

Zur Beleuchtung der Mattscheibe diente ein Glühlämpchen, welches von einer Akkumulatorenbatterie gespeist wurde.

Die Abstufung der Intensität geschah durch eine Vorrichtung, welche eigens zu dem vorliegenden Zwecke konstruiert worden ist. Sie ist in Abb. 2 skizziert. Ihre Hauptteile sind ein feststehendes Nikolsches Prisma NA und ein drehbares NP. Mit dem drehbaren ist eine Gradteilung fest verbunden, an welcher mittels eines Nonius der Betrag der Drehung bis auf Zehntelgrade genau abgelesen werden konnte. Die Vorrichtung ist von der Firma Zeiß in Jena im Jahre 1909 angefertigt worden. Die von den Nikolschen Prismen durchgelassene Lichtintensität ist proportional dem Cosinus des Winkels, den die Polarisations Ebenen der beiden miteinander bilden.

Um das Licht abzustufen und gleichmäßig über die beobachtete Mattscheibe verteilen zu können, sind folgende Einrichtungen getroffen worden (Abb. 2). *La* ist die erwähnte Glühlampe, *B₁* und *B₂* sind kreisrunde Öffnungen, welche den Lichtkegel der Lampe begrenzen. *SL* ist eine Plankonvexlinse von 3,5 cm Brennweite, in deren Brennpunkte sich die Glühlampe befindet. Das parallele Lichtbündel ist durch eine Blende *B₃* von 5,5 mm Weite auf diesen Durchmesser beschränkt. Es passiert die beiden Nikols und wird durch die Zerstreuungslinse *ZL* von 35 Dioptrien auf das kreisrunde Feld *F* (3,5 cm Durchmesser) von transparentem Papier entworfen. Von diesem Felde *F* wird der Kasten *K* im Inneren erleuchtet. Seine Wände sind weiß lackiert, so daß auf der Fläche *M*, der wiederholt erwähnten Mattscheibe, diffuse gleichmäßige Helligkeit herrscht.

Diese Instrumente sind auf einer optischen Bank zu zwei lichtdicht eingebauten Komplexen vereinigt, deren erster *A* die Lampe beherbergt, deren zweiter

Abb. 2.

B die übrigen Teile mit Ausnahme des Kastens *K*. Dieser Kasten bildet eine Abteilung eines großen Kastens, in welchen die Apparate *A* und *B* wiederum lichtdicht eingebaut sind. Zur Bedienung des Nikols diente eine Schiebetür am Kasten, zur Ablesung eine besondere Lampe. Während der Ablesung wurde die Versuchsperson im vollkommenen Dunkel gehalten.

III. Versuche.

Der Versuch begann nach einer Adaptationszeit von im allgemeinen 45 Minuten. Die Polarisations Ebenen der beiden Nikols bildeten zunächst einen Winkel von 90° miteinander; nach Erregung der Glühlampe war daher das Gesichtsfeld vollkommen dunkel. Nun wurde der Kreuzungswinkel der Nikolschen Prismen langsam verringert. Die Versuchsperson war ganz allgemein angewiesen, anzugeben, wenn sie Licht auftreten oder verschwinden sähe. Rief die Versuchsperson: „Hell“, so wurde die Drehung der Nikols eingestellt und die Lampe geräuschlos aus- und eingeschaltet. Gab die Versuchsperson den Zeitpunkt des Erscheinens und Verschwindens nicht richtig an, so wurde das Beobachtungsfeld weiter erhellt, bis die Angaben sicher wurden. Dieses Resultat wurde abgelesen und notiert. Dann wurde durch

Rückwärtsdrehen aus der notierten Stellung der Zeitpunkt festgestellt, in dem die Mattscheibe nicht mehr erblickt wurde. Diese Stellung wurde auch notiert. Schließlich wurde der Winkel wieder auf 90° gestellt und der Versuch wiederholt. Fünf solcher Wertpaare wurden für jedes einzelne Auge und binokular ermittelt.

Die Bestimmung des Schwellenwertes wird erschwert durch die Erscheinung, daß man häufig das Beobachtungsfeld ziemlich plötzlich aufleuchten sieht und dann weiter bei Verminderung der Helligkeit das Licht noch wahrnimmt.

Die Versuchspersonen waren aber trotzdem meist in der Lage, das erscheinende Licht in seiner Stärke gegenüber den anderen Messungen einzuschätzen, und zwar überwiegend richtig, so daß sie das Bild als hell bezeichneten, wenn der Wert verhältnismäßig hoch war. Das Verschwinden des Lichtes ließ sich nicht so sicher bestimmen, da Lichtnebel und Nachbilder Unsicherheit hervorrufen. Die Grenzen rückten für das Erscheinen und Verschwinden jedoch merklich näher, wenn der Beobachter sich durch Tasten mit der Hand über die Lage des Feldes informierte und dadurch die Blickrichtung mittels des Tastreindrucks dirigierte. Eine und dieselbe Person lieferte bei gleichen Bedingungen keineswegs konstante Werte, bald schien das rechte Auge, bald das linke empfindlicher, ferner klagten die meisten bei monokularer Messung über Unsicherheit der Blickrichtung.

Bei den Vorversuchen und den Versuchen der zweiten und dritten Reihe zeigte sich gelegentlich folgende Erscheinung: Die Versuchsperson gab den Zeitpunkt des Auftauchens an, aber sofort hörte der Lichteindruck auf, um jedoch rasch wieder zu erscheinen. Es wechselte so schnell hintereinander periodisch Licht und Dunkelheit, und zwar in Form von Schatten, die über die Lichtfläche liefen. Eine geringe Verstärkung des Lichtes brachte diese Erscheinung zum Verschwinden. Das Phänomen war subjektiv; denn der Apparat wurde inzwischen nicht verstellt, auch ist eine Erklärung der Schatten aus der Versuchsanordnung ziemlich ausgeschlossen.

Die erste Reihe beschränkt sich auf einen vollständigen und einen unvollständigen Versuch. Dieser letztere mußte unterbrochen werden, da die Drehvorrichtung des Nikol nicht transportierte und sofortige Behebung dieser Störung unmöglich war, doch war die Untersuchung des rechten Auges und beider Augen zusammen bereits vollendet. Bei diesen Versuchen fielen die Schwellwerte meist in ein Gebiet von hohem Kreuzungswinkel; deshalb wurde durch Herabsetzen der Betriebsspannung an der Lampe der Messungsbereich verschoben, so daß der mittlere Kreuzungswinkel geringer wurde und $0,1^\circ$ keine erhebliche Änderung des Cosinus hervorruft.

Tabelle der Intensitätsschwellen.

I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	
Beob- achter	Auge				Beob- achter	Auge	Erstes Erschei- nen d. Lichtempfindung	Ver- schwin- den		
cand. med. Regenbrecht	Rechts	70	9	1. Reihe Vers. I	cand. med. Wessolowski	Rechts	17	19	1. Reihe Vers. II	
		44	12				113	63		
		30	9				96	58		
		30	16				75	73		
		35	5				112	87		
	Beide	19	1,8			Beide	72	49		
		18	15,7				94	68		
		33	27,9				65	26		
		30	1,8				106	35		
		33	17,5				82	98		
				d. Lichtempfindung		Links	122	70		
							127	106		
							82	37		
							112	72		
							112	58		
cand. med. Müller	Rechts	208	87	2. Reihe Vers. III	cand. med. Müller	Beide	174	105	2. Reihe Vers. IV	
		242	139				174	35		
		174	52				156	52		
		259	122				208	35		
		233	87				156	35		
	Links	174	70			Rechts	191	35		
		191	87				191	87		
		191	70				208	105		
		199	87				225	105		
		216	87				208	105		
	Beide	242	105			Links	242	44		
		225	139				174	52		
		225	131				191	52		
		208	122				191	70		
		208	113				208	87		
	Rechts	259	87	2. Reihe Vers. V		cand. med. v. Oppenkowski	Links	196	148	2. Reihe Vers. VI
		191	35					156	110	
		191	70					120	77	
		208	70					98	96	
		242	105					155	124	
	Beide	191	44				Rechts	113	96	
		259	105					139	118	
		216	96					141	136	
		191	122					146	122	
		242	131					122	115	

15 Minuten Pause

15 Minuten Pause

Tabelle der Intensitätsschwellen. (1. Fortsetzung).

I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V			
Beob- achter	Auge	Erstes Erschei- nen	Ver- schwin- den		Beob- achter	Auge	Erstes Erschei- nen	Ver- schwin- den				
		d. Lichtempfindung					d. Lichtempfindung					
cand. med. Müller	Links	199	105	2. Reihe Vers. V	cand. med. Oppenkowski	Beide	96	59	2. Reihe Vers. VI			
		216	139				112	98				
		208	70				141	117				
		216	122				112	85				
		225	87				112	92				
cand. med. Preuschoff	Beide	146	98	2. Reihe Vers. VII	cand. med. Litten	Rechts	163	70	2. Reihe Vers. VIII			
		144	113				230	153				
		165	163				182	82				
		148	105				151	66				
		169	113				155	72				
	15 Minuten Pause					15 Minuten Pause						
	Rechts	151	136	Linker Bulbus mit der Hand ge- drückt (b. Zuhalten).		Links	182	99				
		174	77				150	80				
		151	101				110	80				
		148	87				156	70				
129		11	98		70							
15 Minuten Pause					15 Minuten Pause							
Links	216	82			Beide	148	51					
	267	167				143	117					
	167	96				182	58					
	170	120				148	84					
	170	108		172		80						
Prof. Weiß	Rechts	225		3. Reihe Vers. IX	Dr. med. Deicke	Rechts	137	3. Reihe Vers. X				
		131					136					
		174					131					
		169					143					
		139					111					
	Links	165					136	(Fortsetzung von Reihe 3, Vers. X)				
		131					111					
		182					96					
		113					151					
		143					148					
	Beide	111					170	III Erstes Erscheinen des Licht- eindrucks				
		131					139					
		87					96					
		91					87					
		108					87					
	Rechts	151					146			Links	94	
		144					84				72	
		101					84	59				
		98					78	44				
		108					61	77				
									66			

Tabelle der Intensitätsschwellen. (2. Fortsetzung).

I	II	III	IV	I	II	III	IV				
Beob- achter	Auge	Erstes Er- scheinen der Licht- empfindung		Beob- achter	Auge	Erstes Er- scheinen der Licht- empfindung					
Frau Dr. med. Hennig	Rechts	194	3. Reihe Vers. XI	Dr. med. Deicke	Rechts	122	3. Reihe Vers. XII				
		160			10 ^h 15'	118					
		209			10 ^h 20'	139					
		191			Links	127					
		193				148					
	Links	177			26,5'	136					
		233			Beide	122					
		201				146					
		282			31'	118					
		158			Rechts	120					
	Beide	167				34'	108				
		198			39,5'	108					
		186			Links	134					
		148				111					
		99			46'	148					
	Rechts	118			Beide	78					
		91				110					
		225			57'	87					
	Links	174			Rechts	151					
		146				98					
		99			11 ^h 14'	82					
Dr. med. Deicke	Beide	103	3. Reihe Vers. XIII		11 ^h 14'	87					
					11 ^h 14'	91					
					Beide	78					
	10 ^h 53'	106			11 ^h 18.5'	92					
	56'	101			31,5'	92					
	Links	96			Beide	54	3. Reihe Vers. XIII (Fort- setzung)				
					17'	85					
	58'	91			26'	58					
	11 ^h 2'	108			Rechts	87					
						68					
	Rechts	98			34'	84					
					Links	82					
	11 ^h 10'	80			37,5'			Er- müdung			
	13'	80			Beide	87					
					85						
					45'	101					

In den Tabellen der Versuchsreihe bedeutet Kolumne I den Namen des Beobachters, II das beobachtende Auge, III die Intensität, welche den ersten Lichteindruck erzeugt, IV die Intensität, bei welcher dieser verschwindet, V die Versuchsnummer. Von Versuch IX ab sind die Verschwindungswinkel nicht mehr aufgesucht. Bei Versuch XIV und XV wurde eine andere Mattscheibe (siehe unten) verwendet, außerdem die Zeiten notiert. Die Adaptationszeit betrug hier 2 Stunden, während deren die Versuchsperson schlief. Die Adaptation begann bei Versuch XIV um 8 Uhr morgens, bei Versuch XV um 8^h 37'.

Von einer Bestimmung der absoluten Lichtintensität ist abgesehen worden, da für die vorliegende Frage nur die relativen Werte Interesse haben. Diese werden durch die Cosinuswerte ausgedrückt. In der Tabelle ist das Tausendfache jedes Cosinuswertes aufgeführt, um ganze Zahlen zur Vergleichung zu haben.

Eine überaus wichtige Frage ist nunmehr, in welcher Art man die Resultate zu verwenden hat. Man kann zuerst daran, denken aus den beobachteten Werten der Versuchsabschnitte Mittelwerte zu ermitteln und diese miteinander zu vergleichen. Unter dieser Bedingung kommt man für eine Reihe von Versuchen zu dem Resultat, daß die binokulare Schwelle tiefer liegt als die monokulare, bei einigen Versuchen ist es aber umgekehrt. Die folgende Tabelle gibt darüber Aufschluß.

Es ist aber nach meiner Meinung diese Art der Betrachtung nicht entscheidend für die Frage. Wenn man bedenkt, daß jeder der notierten Werte einen sicher wirksamen Lichtreiz repräsentiert, so muß man zu dem Resultate kommen, daß die niedrigsten Schwellenwerte miteinander verglichen werden müssen. Dies ist in der folgenden Tabelle geschehen.

Tabelle der geringsten Werte.

Beobachter	Auge	Erstes Erscheinen	Verschwinden	Versuchsreihe
	Rechtes	30	5,0	1. R. I.
	Beide	18	1,8	
	Rechtes	75	19	1. R. II.
	Beide	65	26	
	Linkes	82	37	
	Rechtes	174	52	2. R. III.
	Linkes	174	70	
	Beide	208	105	
	Beide	156	35	IV.
	Rechtes	191	35	
	Linkes	174	44	
	Rechtes	191	35	V.
	Beide	191	44	
	Linkes	199	70	

Beobachter	Auge	Erstes Erscheinen	Verschwenden	Versuchsreihe
	Linkes	98	77	2. R. VI.
	Rechtes	113	96	
15 Min. Pause	Beide	96	59	VII.
	Beide	144	98	
15 Min. Pause	Rechtes	129	11	
	Linkes	167	82	
	Rechtes	151	66	VIII.
15 Min. Pause	Linkes	98	70	
15 Min. Pause	Beide	143	51	3. R. IX.
	Linkes	113		
	Beide	87		
	Rechtes	98		X.
	Rechtes	61		
	Linkes	44		
	Beide	44		XI.
	Beide	99		
	Rechtes	91		
	Linkes	99		XII.
	Rechtes	82		
	Linkes	111		
	Beide	78		XIII.
	Beide	54		
	Rechtes	68		
	Linkes	82		

Quotient aus den geringsten Werten monokularer und binokularer Schwelle $\frac{M}{B}$, d. i. die Zahl, welche angibt, wievielmals beide Augen bei gemeinsamen Sehen empfindlicher sind als das empfindlichste der allein sehenden Augen.:

1. Reihe Versuch	I	$\frac{M}{B} = \frac{30}{18} = 1,647$
1. " "	II	$\frac{M}{B} = \frac{75}{65} = 1,154$
2. " "	III	$\frac{M}{B} = \frac{174}{208} = 0,838$
2. " "	IV	$\frac{M}{B} = \frac{174}{156} = 1,115$
2. " "	V	$\frac{M}{B} = \frac{191}{191} = 1,000$
2. " "	VI	$\frac{M}{B} = \frac{98}{96} = 1,021$
2. " "	VII	$\frac{M}{B} = \frac{129}{144} = 0,895$

2. Reihe Versuch VIII	$\frac{M}{B} = \frac{98}{143} = 0,685$
3. „ „ IX	$\frac{M}{B} = \frac{98}{87} = 1,127$
3. „ „ X	$\frac{M}{B} = \frac{44}{44} = 1,000$
3. „ „ XI	$\frac{M}{B} = \frac{91}{99} = 0,919$
3. „ „ XII	$\frac{M}{B} = \frac{82}{78} = 1,051$
3. „ „ XIII	$\frac{M}{B} = \frac{68}{54} = 1,259$

Wenn man die Zahlen nach Werten ordnet, die über 1 liegen, und nach solchen, die 1 sind oder unter 1 liegen, und ferner die Differenzen zu 1 dazu schreibt, so ergibt sich folgendes:

Werte über 1	Diff. zu 1	Werte unter 1	Diff. zu 1
1,667	0,697	1,000	0,000
1,154	0,154	0,838	0,162
1,115	0,115	1,000	0,000
1,021	0,021	0,895	0,105
1,126	0,126	0,685	0,315
1,051	0,052	0,919	0,081
1,259	0,259		

Man sieht, daß nur eine Beobachtung mehr ist, welche Werte über 1 ergeben hat, als Beobachtungen, die Werte von 1 oder darunter ergeben haben. Das spricht ganz und gar nicht für ein Überwiegen der binokularen Empfindlichkeit.

Nun ist noch die Frage zu erörtern, aus welchem Grunde die binokularen Schwellen bei manchen Versuchen tiefer liegen als die monokularen. Ein wesentlicher Faktor scheint mir dabei die Tatsache zu sein, daß das Urteil bei Beobachtungen mit beiden Augen sehr viel leichter ist als bei monokularer Beobachtung. Vielleicht spielt dieses Moment eine wichtige Rolle. Bei den Versuchen mischen sich auch subjektive Momente ein wie besonders die Ermüdung (s. Reihe 4. Versuch XV). Den Einfluß einer etwaigen Änderung des Adaptationszustandes habe ich durch die Versuchsanordnung auszuschließen versucht, indem abwechselnd die monokularen und binokularen Schwellen zuerst beobachtet worden sind. Hierdurch sind auch etwaige Fehlerquellen, die aus einer Änderung des Adaptationszustandes entstehen könnten, beseitigt. Es ließe sich noch manches über die Versuche sagen. Freilich könnte das Studium des Versuchsprotokolles dadurch nicht ersetzt werden. Dieses scheint mir vor allem nötig zu sein, wenn man wirklich ein Urteil über die Versuche gewinnen will.

Zusammenfassung:

Es haben sich keine Anhaltspunkte für die Annahme ergeben, daß im dunkel adaptierten Auge die binokulare Schwelle tiefer liege als die monokulare.