

Aktueller Stand des Farbensehens der Pavianarten

Fourierinterferometrische Untersuchungen am Mantelpavian (*Papio hamadryas*)



Fips, der noch nie so schöne große Früchte sah,
wählt für seinen Morgenschmaus,
sich gleich den Allergrößten aus

Wilhelm Busch

Dissertation
der Fakultät für Biologie
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Vorgelegt von
Edith Obermüller
Neuötting am Inn

München, den 14. März 2007

1. Gutachter: Prof. Dr. Roland Gemperlein

2. Gutachter: Prof. Dr. Henning Wiesner

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Juli 2007

Ehrenwörtliche Versicherung

Ich versichere hiermit ehrenwörtlich, dass die vorgelegte Dissertation von mir selbständig und ohne unerlaubte Beihilfe angefertigt ist.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich mich anderweitig einer Doktorprüfung ohne Erfolg nicht unterzogen habe

München, den 14. März 2007

.....

Edith Obermüller

**Aktueller Stand des Farbensehens der
Pavianarten**

**Fourierinterferometrische
Untersuchungen am Mantelpavian
(*Papio hamadryas*)**

Dissertation
der Fakultät für Biologie
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Vorgelegt von
Edith Obermüller
Neuötting am Inn

München, den 14. März 2007

Willst du dich am Ganzen erquicken,
so musst du das Ganze im Kleinsten erblicken

Johann Wolfgang von Goethe

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	EVOLUTION DES FARBENSEHENS DER PRIMATEN	3
2.1	M/L-Zapfenopsin	3
2.2	Trichromatisches Farbsehen	5
2.3	Kodierung der Zapfenopsine	5
2.4	Spektrale Empfindlichkeit	6
2.4.1	Genetischer Einfluss	7
3	KOMPLEXE INFORMATIONSVERARBEITUNG IN DER PRIMATEN-RETINA	9
3.1	Lichtabsorption	9
3.2	Retinale Zelltypen	11
3.3	Rezeptive Felder	13
3.4	Glutamatrezeptoren	14
3.4.1	Ionotrop und metabotrop	16
3.4.2	Spektrales Differenzsignal	17
3.5	Gegenfarbkodierung	17
3.5.1	Rot-grün-Kanal	17
3.5.2	Blau-gelb-Kanal	19
3.6	Diversität der retinalen Ganglienzellen	20
3.7	Häufigkeitsverteilung der Photorezeptoren	22
3.8	Variation der M- und L-Zapfenzahl	24
3.8.1	Tendenz zur höheren L-Zapfenzahl	24
3.8.2	Protanop und deuteranop	26
3.9	Elektrophysiologische Reaktion	27
3.9.1	Klassisches ERG	28
3.9.2	Wirkung von Ketamin auf das ERG	29
4	FARBENSEHEN DER PAVIANARTEN	30
4.1	Genetische Distanz	32
4.2	Photopigmente bei Primaten	34
4.3	Grüner Pavian (<i>Papio anubis</i>)	36
4.3.1	Spektrale Empfindlichkeit	36
4.3.2	Häufigkeitsverteilung der retinalen Zelltypen	38
4.3.3	Variation der M- und L-Zapfenzahl	40
4.4	Roter Pavian (<i>Papio papio</i>)	42
4.4.1	Spektrale Empfindlichkeit	42
4.4.2	Häufigkeitsverteilung der S-Zapfen	43
4.4.3	Variation der M- und L-Zapfenzahl	44
4.5	Gelber Pavian (<i>Papio cynocephalus</i>)	45
4.5.1	Häufigkeitsverteilung der retinalen Zelltypen	45

4.5.2	Neurotransmitter	45
4.6	Bärenpavian (<i>Papio ursinus</i>)	46
4.7	Mantelpavian (<i>Papio hamadryas</i>)	47
4.7.1	Mantelpavian-Retina	48
5	METHODE DER FOURIERINTERFEROMETRISCHEN STIMULATION (FIS)	50
5.1	Modulationsfrequenz	52
5.2	Spektrale Auflösung	52
5.3	ERG und spektrale Empfindlichkeit	53
5.4	Optoelektronischer Aufbau mit rechnergestützter Erfassung und Auswertung	56
5.4.1	Interferometer	57
5.4.2	Zubehör	60
5.4.3	Ganzfeldbeleuchtung	62
5.5	Messung von FIS-Reiz und ERG im Labor	63
5.6	Signalablauf	65
6	FOURIERINTERFEROMETRISCHE UNTERSUCHUNGEN AM MANTELPAVIAN (<i>PAPIO HAMADRYAS</i>)	66
6.1	Transport und Aufbau der Messapparatur FIS im Münchener Tierpark Hellabrunn	66
6.2	Hellabrunner Mischung (HM)	67
6.3	Immobilisation und tierärztliche Indikation	67
6.4	Untersuchungsreihen mit der Methode FIS	68
6.5	Messung von FIS-Reiz und ERG am Mantelpavian	69
7	ERGEBNIS DER FIS-UNTERSUCHUNGEN AM MANTELPAVIAN (<i>PAPIO HAMADRYAS</i>)	73
7.1	Klassisches ERG	73
7.2	Auswertung von FIS-Reiz und ERG	74
7.2.1	Signalverarbeitung	74
7.2.2	Mittelung von Amplituden- und Phasenspektren	80
7.2.3	Berechnung der spektralen Empfindlichkeit	81
7.3	Spektrale Empfindlichkeit	83
7.4	Verteilung der S-, M- und L-Zapfen	89
7.5	Variation der M- und L-Zapfenzahl	90
8	DISKUSSION	91
8.1	Einfluss experimenteller Bedingungen auf die Ergebnisse	91
8.1.1	ERG und Reproduzierbarkeit	91
8.2	Pavian-Retina	92
8.2.1	Spektrale Empfindlichkeit	92

8.2.2	Häufigkeitsverteilung der retinalen Zelltypen	92
8.2.3	Variation der M- und L-Zapfenzahl	94
8.2.4	Gegenfarbkodierung	94
9	ZUSAMMENFASSUNG / SUMMARY	95
10	LITERATURVERZEICHNIS	99
11	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	108
12	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	110
13	ANHANG PROGRAMME IN VISUAL BASIC	116
14	DANKSAGUNG	147
	BERUFLICHER WERDEGANG (KURZFASSUNG)	

1 Einleitung

Das Sehsystem ist von enormer Komplexität und trotz der großen, während des letzten Jahrhunderts gemachten Fortschritte ist man weit davon entfernt, seine Funktionsweise in allen Bereichen zu verstehen. Die Forschung auf dem Gebiet der Farbwahrnehmung tat sich in den letzten 40 Jahren durch wesentliche Erkenntnisse in den physiologischen Grundlagen hervor. Die Mikrospektralphotometrie ermöglicht erstmals eine physiologisch-physikalische Messung der spektralen Absorption von Sehpigmenten. Die Ergebnisse sind eine Bestätigung der spektralen Empfindlichkeitskurven des menschlichen Farbsystems durch visuelle Farbabgleiche. In den 80er Jahren führte die Entdeckung des genetischen Codes der Farbsehpigmente zur Erklärung von Farbsehstörungen. Zentrales Thema in der Forschung der Wahrnehmungspsychologie war in den 90er Jahren das der Farbkonstanz.

Aufgrund dieser Untersuchungen kann heute auf evolutionsbiologische Anpassungsprozesse geschlossen werden, die die Entwicklung des Farbsehens bei den Primaten bestimmen. Die Primaten unterscheiden zahlreiche Farben beim Betrachten ihrer Umwelt. So nehmen sie nicht nur durch ihre Intelligenz, sondern auch durch ihr reiches Farbunterscheidungsvermögen eine Sonderstellung unter den Säugetieren ein. Die Altweltaffen haben mit dem Menschen die Morphologie des Auges mit der runden Pupille und einer Fovea in der Mitte der Retina gemein. Die Primaten besitzen drei Farbrezeptortypen.

Das Verständnis der Sinne und die Funktionen wie Gedächtnis und Gefühle erfordern Versuche am lebenden Tier. Diese Forschungen sind größtenteils mit Eingriffen verbunden, seien es Aufzeichnungen der Neuronenaktivität im Wachzustand oder Operationen. Will man Erkenntnisse gewinnen, die sich in der Wissenschaft und in der Medizin umsetzen lassen, soll das Versuchstier messbare Merkmale und Verhaltensweisen aufweisen, die denjenigen des Menschen ähnlich sind. Bei Versuchen an Primaten sind aus tierschutzrechtlichen und ethischen Gründen besondere Maßnahmen und Regeln zu beachten. Forschungen finden nur in Ausnahmefällen und nach einem genauen Kodex statt (1)(Hepp-Raymond, 2000).

Bei einem Referenzmodell wird ein reales Phänomen als Modell für ein anderes reales Phänomen eingesetzt, das sich der direkten Erforschung entzieht (2)(Grupe et al., 2005). Paviane können als Referenzmodell für das menschliche Sehsystem dienen.

Viele Tierfamilien, deren Vertreter eine baumbewohnende Lebensweise pflegten, passten sich dem Leben in der offenen Savanne an. Meerkatzen, eine Gattungsgruppe altweltlicher Primaten, sind ein Lehrbeispiel. Sie spalteten sich in über 16 Arten auf und besetzten unterschiedliche Landschaften im zentralen Afrika. Paviane aus der Gruppe der Meerkatzen beanspruchen den gleichen Lebensraum wie der Mensch.

Über das Farbsehen der Paviane existieren wenig Ergebnisse, zum einen aus tierschutzrechtlichen Gründen und zum anderen sind Messungen am Auge von sedierten Pavianen schwer durchzuführen.

Bei den bisher bekannten Verfahren wird die spektrale Empfindlichkeit des Sehsystems mit monochromatischen Lichtreizen bestimmt. Die Reizdarbietung erfolgt für jede Wellenlänge ein oder mehrmals nacheinander. Diese Verfahren benötigen lange Messzeiten aufgrund einer hohen Anzahl nacheinander durchzuführenden Messungen. Die elektro-physiologische Methode der Fourierinterferometrischen Stimulation (FIS) (3)(Gemperlein und Adamczyk, 1982), (4)(Gemperlein et al., 1983), (5)(Adamczyk et al., 1983) ist ein dynamisches aktionsspektrometrisches Verfahren zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeiten. Steiner untersuchte mit der Methode FIS die spektrale Empfindlichkeit am Schmetterling (*Pieris brassicae*) (6)(Steiner, 1984) und Gemperlein am Menschen (5)(Adamczyk et al., 1983). Die Weiterentwicklung eines von Steiner gebauten Interferometers zu einer tragbaren Einheit ermöglicht jetzt auch Messungen außerhalb des Labors von Gemperlein.

An Mantelpavianen, die sich frei im Gelände bewegen, wie es in einem Zoo gegeben ist, können Messungen am Auge nur unter Narkose durchgeführt werden. Im Münchener Tierpark Hellabrunn bot sich bei tierklinischen Studien eine Möglichkeit, zusätzlich das Farbsehen an Mantelpavianen (*Papio hamadryas*) zu untersuchen. Tierparkdirektor Hr. Prof. Dr. Wiesner betreute die tierärztliche Dissertation von Fr. Hingerle. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Tiere mit der „Hellabrunner Mischung“ (HM) immobilisiert.

Die Untersuchung des Farbsehens ist nur an wenigen Mantelpavianen möglich, da die Anzahl der Messungen durch die kurzen Immobilisationsdauern begrenzt ist.

2 Evolution des Farbensehens der Primaten

Bei den Altweltaffen und Mensch nimmt das trichromatische Farbsehen eine Sonderstellung ein. Das Sehsystem reagiert nicht auf die Strahlung aller Wellenlängen, sondern nur zwischen 380 nm und 780 nm, dem sichtbaren Bereich. Das Zapfensystem ermöglicht durch seine Sehpigmente ein Ansprechen auf Licht verschiedener Wellenlängen. Dies ist auf den Proteinanteil des Sehpigments (Opsin) und auf den Chromophor (Retinal) zurückzuführen. Jeder Zapfentyp hat eine andere Wellenlängen-Empfindlichkeit. Mit nur einem Rezeptor können Lichtreize spektral nicht getrennt werden, so ist mit den Stäbchen allein kein Farbsehen möglich. Nur ein zweiter Zapfentyp erlaubt eine Unterscheidung zwischen Wellenlänge und Intensität. Das S-, M-, L- Zapfensystem bildet die Grundlage für das Farbsehen.

Höher entwickelte Säugetiere verloren im Verlauf der Evolution die Fähigkeit zum Sehen ultravioletter (UV)-Strahlung, ganz im Gegensatz zu Vögeln und niederen Wirbeltieren. Von den ursprünglich vier Zapfenpigmenten der Wirbeltiere besitzen Säugetiere nur noch zwei. Folglich sind die meisten Säugetiere Dichromaten und verfügen nur über eine geringe Farbauflösung. In der Retina der Säugetiere befinden sich entweder S- und M-Zapfen oder S- und L-Zapfen. Bei den Walen und Robben kommt nur der M-Zapfen vor, sie sehen das Meer deshalb nicht blau (7)(Peichl et al., 2001). Blütenbesuchende Fledermäuse erkennen UV-Licht (8)(Winter et al., 2003). Da den Fledermäusen generell die Zapfenpigmente fehlen, fangen sie das UV-Licht über das Rhodopsin ihrer Stäbchenpigmente ein. Ein solcher Mechanismus war für Säugetiere bislang unbekannt.

2.1 M/L-Zapfenopsin

Wie sich der Grundplan des dichromatischen Farbsehens der Säugetiere in eine neue Grundstruktur des Farbsehens bei den früheren Primaten wandelte, ist bis heute nicht geklärt. Der Frage nach der Evolution der Photopigmente versucht man auf verschiedene Weise zu begegnen, z.B. durch Vergleich des Sehens der Primaten untereinander oder durch Anwendung neuester molekularbiologischer Analysen (9)(Jacobs und Rowe, 2004).

Das Gen für das S-Zapfenopsin trennte sich vor mehr als 500 Millionen Jahren von den Genen der M/L-Zapfenopsine. Den Vorfahren der Alt- und Neuweltaffen fehlte das Gen für das M-Zapfenopsin. Aus dem L-Zapfen entstand durch Genverdoppelung auf dem X-Chromosom ein zusätzlicher M-Zapfen (10)(Nei et al., 1997). Dieser Zapfentyp trägt zu einer

neuen spektralen Empfindlichkeit im mittleren Wellenlängenbereich bei. Nach der gängigen Hypothese trat die Duplikation des Gens für das M-Zapfenopsin bei den Altweltaffen nach der Trennung der Alt- von den Neuweltaffen auf (11)(Dulai et al., 1994), (12)(Jacobs, 2002).

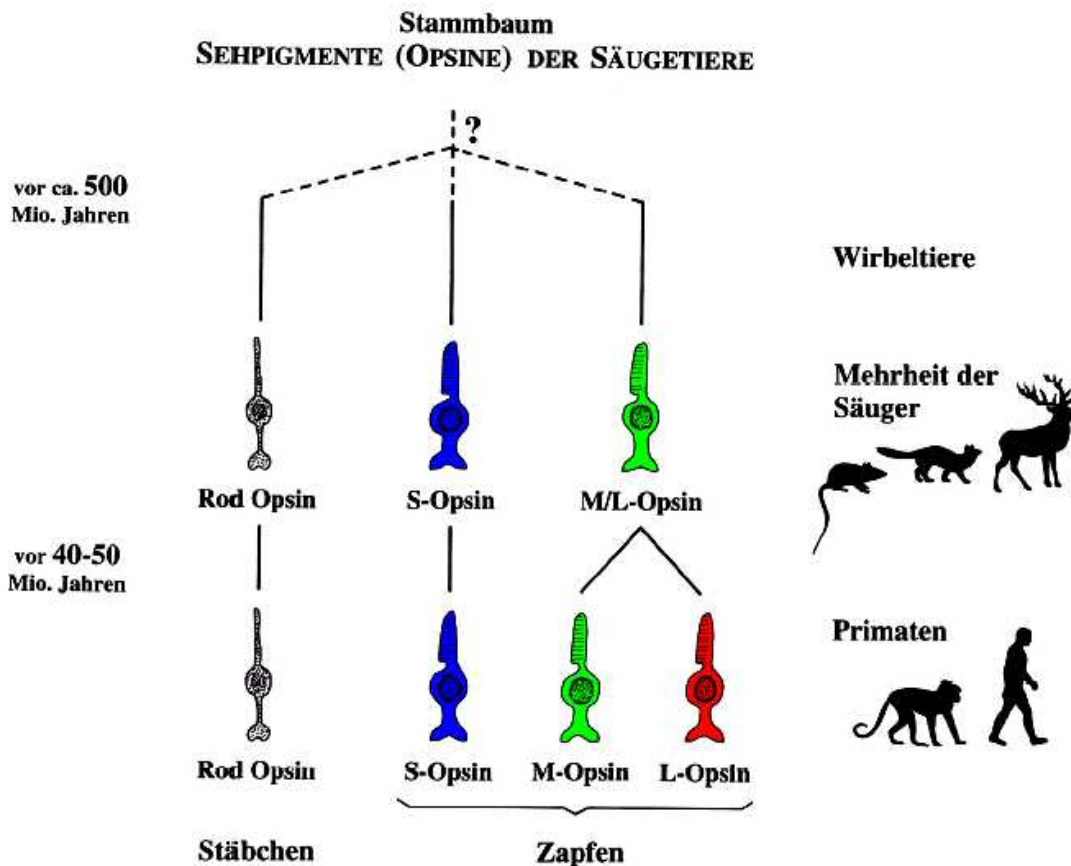


Abb. 2-1: Stammbaum der Sehpigmente (Opsine) der Säugetiere (13)(Dick, 2005)

Ein Experiment an transgenen Mäusen legt nahe, dass die unterschiedliche Expressierung der Gene für die M- und L-Zapfenopsine bei den Altweltaffen einem einfachen stochastischen Prozess folgt. Ein Wettbewerb der LCR könnte automatisch zu einer Duplikation führen (14)Smallwood et al., 2002).

Die Gene des M- und L-Zapfenopsins liegen separat in einer Reihe auf dem X-Chromosom und sind durch die LCR flankiert. Die 5'-Regionen der zwei Gene zeigen sich in den 236 bp (base pair) homolog. Dort treten auch die Unterschiede zwischen Mensch, Schimpansen und zwei Arten von Geschwänzten Altweltaffen auf (15)(Dulai et al., 1999).

2.2 Trichromatisches Farbsehen

Der Vorteil des trichromatischen gegenüber dem dichromatischen Sehsystem wird im allgemeinen als Anpassung an die Lebensverhältnisse verstanden. Dominy und Lukas beobachteten vier verschiedene Affenarten, den Schimpansen, den Mantelaffen (*Colobus guereza*), den Rotstummelaffen (*Ptilocolobus badius*) und die Rotschwanz-Meerkatze (*Cercopithecus ascanius*) bei ihrer Nahrungssuche. Die Affen wählten die Nahrung nach farblichen Kriterien aus. Dabei versuchten die Forscher auf die Farbwahrnehmung der Tiere zu schließen.

Die Primaten holten sich nicht nur Früchte, sondern griffen auch gerne auf Blätter zurück, um den Eiweißbedarf zu decken. Im Gegensatz zu den gemäßigten Zonen weisen die Blätter einen leicht rötlichen Farbton auf. Dieser wäre aber nur mit einer sicheren rot-grün-Unterscheidung zu erkennen. Für fruchte- und blätterfressende Primaten entwickelte sich das trichromatische Sehsystem (16)(Dominy und Lucas, 2001).

Die Farbigkeit der Früchte und Blätter unterscheidet sich im Farbraum der Schimpansen und Altweltaffen.

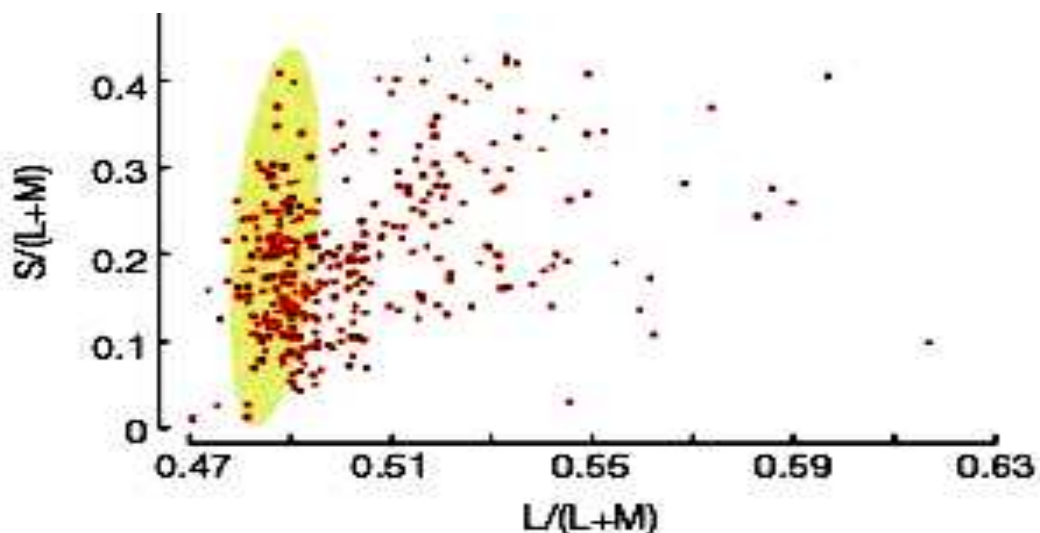


Abb. 2-2: Die Farbigkeit im S-Kanal ($S/(L+M)$, Ordinate) und im L-Kanal ($L/(L+M)$, Abszisse) für Früchte und Blätter aus dem Nahrungsspektrum der Schimpansen und Altweltaffen. Die Werte sind helligkeitsnormiert (16)(Dominy und Lukas, 2001)

2.3 Kodierung der Zapfenopsine

Die Evolution des Farbensehens lässt sich seit einigen Jahren auch mit molekulargenetischen Methoden untersuchen. So konnten 1986 die Gene des Menschen aufgeklärt werden, die für die Ausbildung der drei

Sehpigmente entscheidend sind. Die S-, M-, L-Zapfenopsine und das Stäbchenrhodopsin werden durch vier verschiedene Gene kodiert. Die Gene der M- und L-Zapfenopsine wurden von Nathans mittels DNA-Hybridisierung gegen eine Reihe von Hybridzell-Linien dem humanen X-Chromosom zugeordnet. Die M- und L-Zapfenopsine werden auf dem q-Arm des X-Chromosoms (Xq28) kodiert, wo sie in mehrfacher Ausführung vorliegen können (17)(Nathans et al., 1986).

Das Rhodopsin wird auf dem langen Arm des Chromosoms 3 und das S-Zapfenopsin auf dem langen Arm des Chromosoms 7 kodiert. Beide Gene kommen nur einfach vor. Das S-Zapfenopsin bei Säugetieren liegt auf unterschiedlichen Chromosomen. In der Genetik werden die Zapfentypen molekular durch Sequenzierung der Opsine bzw. ihrer Gene bestimmt.

Die Sequenzhomologie der Opsine der M- bzw. L-Zapfen zeigt zu 96 Prozent eine Übereinstimmung in ihrer Aminosäuresequenz, einschließlich der nichtkodierenden Genabschnitte. Die Aminosäuren des S-Zapfenopsins stimmen nur zu etwa 43 Prozent mit den Aminosäuren des M- bzw. L-Zapfenopsins und mit denen des Stäbchenrhodopsins zu etwa 41 Prozent überein (18)Sharpe et al., 1999b).

2.4 Spektrale Empfindlichkeit

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal der drei morphologisch sehr ähnlichen Zapfentypen ist die spektrale Empfindlichkeit. Die Empfindlichkeitsmaxima liegen beim Menschen für die S-Zapfen im kurzwelligen (blauen) Bereich bei 419 nm, für die M-Zapfen im mittelwelligen (grünen) Bereich bei 531 nm und für die L-Zapfen im langwelligen (roten) Bereich bei 558 nm. Das Empfindlichkeitsmaximum für die Stäbchen ist bei 496 nm, siehe Abb. 2-3 (19)(Dartnall et al., 1983).

An isolierten Rezeptoren wurde die Transmission mittels sehr kleiner Strahlenbündel unter dem Mikroskop bestimmt. Bei der relativen Absorption ergeben sich identische Kurvenverläufe, wenn die Abszisse der 4. Wurzel der Wellenlänge entspricht. Aufgrund des identischen Verlaufs der Absorptionsspektren aller Opsine, kann man über die Absorptionsmaxima λ_{\max} nach der Pigmentkombination suchen. Solche Berechnungen führen zu einem Abstand von 24-30 nm zwischen den M- und L-Zapfen. Die Nahrung (Signal) soll gegen das dichte Grün des Blattwerks der Bäume (Rauschen) erkannt werden. Mit den M- und L-Zapfen erreichen die Primaten mehr als 90 Prozent des theoretisch maximal möglichen Signal/Rauschverhältnisses (20)(Heldmaier und Neuweiler, 2003).

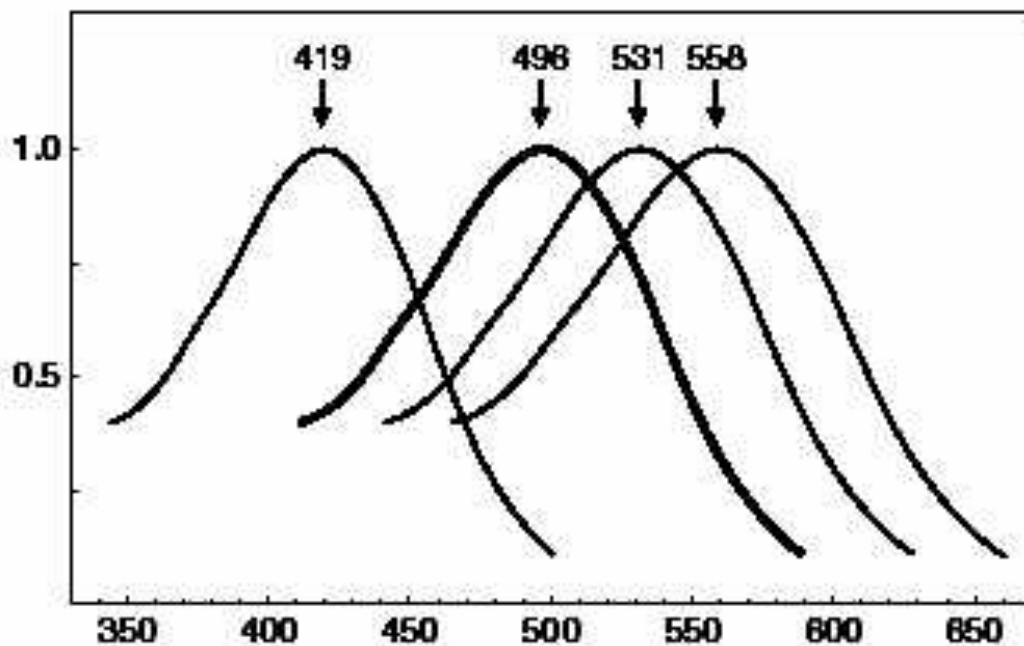


Abb. 2-3: Absorptionsspektren der 3 Zapfentypen und der Stäbchen für die menschliche Retina. (Relative Absorption, Ordinate) und (Wellenlänge λ in nm, Abszisse) (19)(Darnall et al., 1983)

Die spektralen Empfindlichkeiten der Zapfentypen variieren im rot-grün-Bereich beim Menschen (21)(Bowmaker, 1990).

2.4.1 Genetischer Einfluss

Die phylogenetisch bedingte Ähnlichkeit der M- und L-Zapfen schafft die Voraussetzung für die Entstehung von M/L-Hybrid-Genen, wodurch die spektrale Empfindlichkeit und die Farbwahrnehmung verändert werden. Während die Gene der S-Zapfenopsine bei fast allen Menschen gleich bleiben, werden bei den Genen der M- bzw. L-Zapfenopsine Polymorphismen und Hybridformen nachgewiesen. Die Gene der Opsine werden durch crossing over zweier homologer Chromosomen ausgetauscht und neu kombiniert.

Die M- und L-Zapfenopsine bestehen jeweils aus 364 Aminosäuren, welche durch 6 Exons kodiert sind. Die Aminosäuresequenz der M- und L-Zapfenopsine unterscheidet sich in nur 15 Positionen. 3 Aminosäuren an den Positionen 180, 277 und 285 sind für die Verschiebung des Absorptionsmaximums verantwortlich, siehe Abb. 2-4. In den L-Zapfenopsinen kann ein Austausch dieser Aminosäuren eine Verschiebung des Absorptionsmaximums bis zu 30 nm erzeugen (22)(Neitz et al., 1991).

Aminosäuresubstitutionen bewirken nicht nur eine Veränderung des Absorptionsmaximums, sondern beeinflussen auch die optische Dichte des Photopigments.

	Aminosäure-Position	L-Gen	M-Gen	Spectral shift
Exon 2	65	Threonin	Isoleucin	1 nm
	111	Isoleucin	Valin	-
	116	Serin	Tyrosin	-
Exon 3	153	Leucin	Methionin	-
	180	Serin	Alanin	4 nm
Exon 4	230	Isoleucin	Threonin	1 nm
	233	Alanin	Serin	1 nm
	236	Methionin	Valin	-
Exon 5	274	Isoleucin	Valin	-
	275	Phenylalanin	Leucin	-
	277	Tyrosin	Phenylalanin	7 nm
	279	Valin	Phenylalanin	-
	285	Threonin	Alanin	14 nm
	298	Alanin	Prolin	-
	309	Tyrosin	Phenylalanin	1 nm

Abb. 2-4: Spektraler Shift im Absorptionsmaximum zwischen dem L- und M-Zapfengen durch Aminosäuresubstitutionen (23)(Merbs und Nathans, 1993)

Jedes Gen der M- und L-Zapfenopsine besitzt 6 Exons und 5 Introns. Nach Untersuchungen schwankt die Anzahl der Gene für das M-Zapfenopsin zwischen 1 und 6 Kopien (24)(Wissinger und Kohl, 2005).

Eine strenge natürliche Selektion bei Exon 4 und Exon 5 lässt keine Sequenz-Homogenisierung zu. Diese würde die spektrale Empfindlichkeit zwischen den Genen des M- und L-Zapfenopsins reduzieren (25)(Zhou und Li, 1996).

3 Komplexe Informationsverarbeitung in der Primaten-Retina

Das Licht durchstrahlt das 0,2 mm dicke Nervengewebe der Retina bis es auf die lichtempfindlichen Photorezeptoren trifft. Das Auge enthält etwa 125 Millionen Stäbchen und 6 Millionen Zapfen. Die Signale der Photorezeptoren werden von über 10 Millionen Bipolarzellen, Horizontalzellen, Amakrinzellen verarbeitet und gelangen über die Axone der Ganglienzellen in den Kortex. Stäbchen und Zapfen transferieren den Lichtreiz in die OPL (outer plexiform) zu Bipolarzellen und Horizontalzellen. 1 Typ von Stäbchenbipolarzellen und etwa 9 Typen von Zapfenbipolarzellen leiten den Lichtreiz in die IPL (inner plexiform) zu etwa 50 Amakrinzelltypen und 10 bis 15 Ganglienzelltypen (26)(Wässle, 2004).

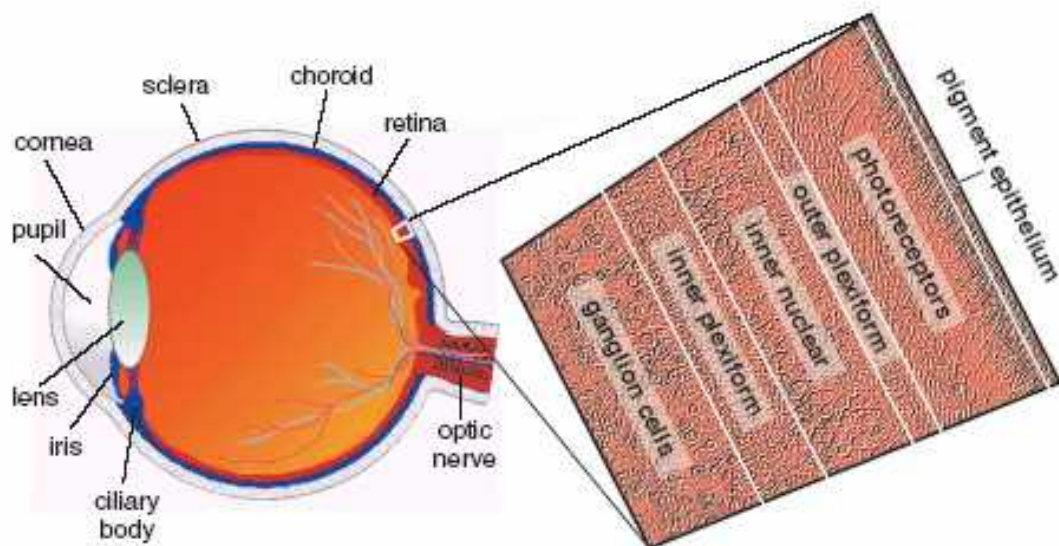


Abb. 3-1: Längsschnitt des Auges und Aufbau der Retina in Schichten (27)(Kolb, 2003)

Die Exzentrizität (Winkel zur Sehachse) wird in Grad oder als Abstand von der Fovea angegeben. Der foveale Bereich von 100 μm in der menschlichen Retina entspricht einer Exzentrizität von 0,5 Grad.

3.1 Lichtabsorption

Die Plasmamembran der Außensegmente ist bei den Zapfen in zahlreiche Einstülpungen gefaltet. Bei den Stäbchen formen die Disks die Außensegmente, wo in der Membran die Photopigmente eingelagert sind. Das Rhodopsin besteht aus Opsin und dem 11-*cis*-Retinal. Das Retinal

hängt an Position 312 des aus 7 α -Helices bestehenden Zapfenopsins und ist über die Schiff'sche Base an Lys-296 gebunden. Die Protonierung der Schiff'schen Base verschiebt die Absorption in den sichtbaren Bereich des Spektrums. Oberhalb 750 nm (nahes Infrarot) reicht die Lichtenergie nicht aus, um die Isomerisierung vom 11-*cis*-Retinal in das all-*trans*-Retinal durchzuführen. Unterhalb 400 nm (nahes Ultraviolett) könnte das Licht von den Sehpigmenten absorbiert werden, die Photonen werden allerdings schon von der Cornea, der Linse und dem Glaskörper abgefangen.

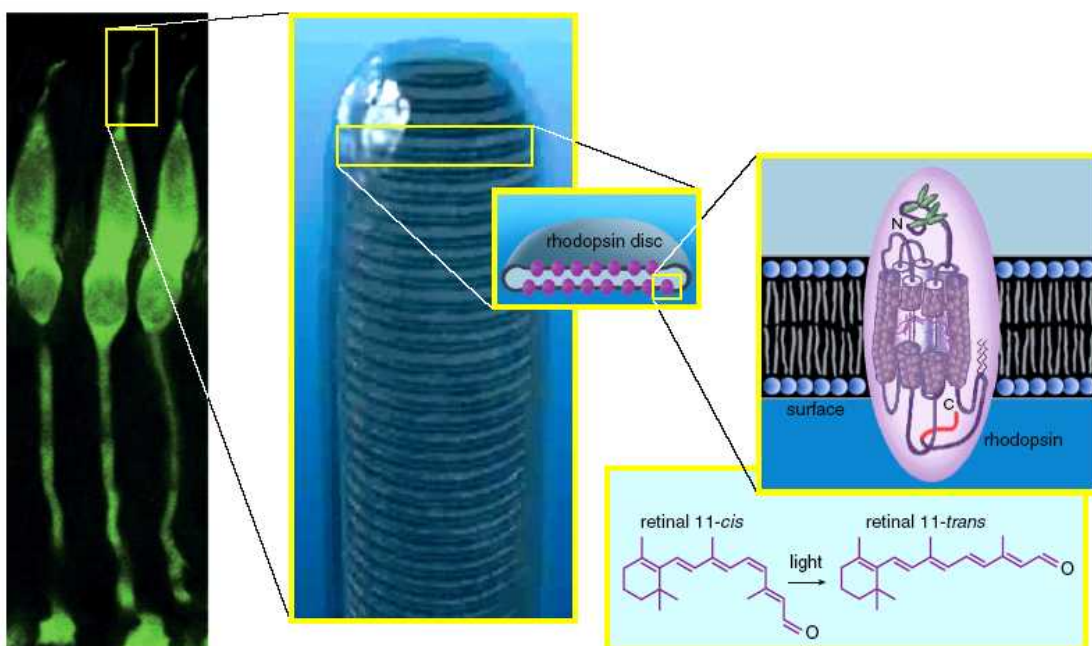


Abb. 3-2: Bild links: Eingefärbte Zapfen in einer Affen-Retina

Bild Mitte: Innenansicht auf die Disks mit Rhodopsin-Moleküle

Bild rechts: Jedes Rhodopsin besteht aus dem Proteinanteil Opsin und dem 11-*cis*- Retinal

Bild rechts unten: Bei Lichtreiz ändert das Retinal-Molekül seine Form (27)(Kolb, 2003)

Die Phototransduktion beruht bei Lichtreiz auf einer Konzentrationsänderung des cGMP, welche das Membranpotential des Photorezeptors beeinflusst und so die Neurotransmitterfreisetzung an den Synapsen der Photorezeptoren reguliert.

Bei Lichtreiz absorbiert das 11-*cis*-Retinal ein Photon und isomerisiert zum all-*trans*-Retinal (28)(Wald, 1945). Die untere Empfindlichkeitsschwelle liegt bei den Stäbchen bei einem einzigem Lichtquant von 10^{-18} Joule. Es entsteht Metarhodopsin II, welches das G-Protein Transducin aktiviert. Dieses spaltet bei der Bindung an das Rhodopsin die α -Untereinheit ab. Sie tauscht GDP gegen GTP aus. GTP ist eine Verbindung aus der Gruppe der Nukleosidtriphosphate. Die α -Untereinheit übernimmt den Inhibitor der PDE.

Die dissoziierte GTP bindet an die inhibitorische γ -Untereinheit der PDE. Diese ist nun aktiviert und hydrolysiert das cGMP zu GMP. Die Konzentration von cGMP sinkt im Außensegment der Zelle, die Na^+ -CNG-Kanäle schließen und der Dunkelstrom wird unterbunden. Die Zelle hyperpolarisiert und es stellt sich ein Membranpotential von -70 mVolt ein. Sinkt durch die Schließung der Na^+ -CNG-Kanäle die Ca^{2+} -Konzentration auf weniger als 100 nM, dann wird die GCE aktiviert. Aus der Synthetisierung von GCE und GTP entsteht wieder das cGMP. Die Konzentration von cGMP erhöht sich und die Na^+ -CNG-Kanäle öffnen sich wieder. Die Zelle depolarisiert und es stellt sich ein Membranpotential von -40 mVolt ein. Der Photorezeptor ist für erneuten Lichtreiz bereit.

Jedes isomerisierte Rhodopsin aktiviert Transducin-Moleküle und die Untereinheiten der PDE mit einer Rate von 120 bis 150 pro Sekunde. Die Verstärkung der cGMP-Hydrolyse ist 10 fach höher als der in der Literatur angegebene Wert (29)(Leskov et al., 2000).

3.2 Retinale Zelltypen

Zapfen depolarisieren die ON-Zapfenbipolarzellen und hyperpolarisieren die OFF-Zapfenbipolarzellen. Die OFF-Zapfenbipolarzellen erregen die Synapsen der OFF-Ganglienzellen, während die ON-Zapfenbipolarzellen die Synapsen der ON-Ganglienzellen beeinflussen. Die L- und M-Zapfen bilden zu den Synapsen der Stäbchen gap junctions, die aus dem Transmembranprotein Connexin bestehen. Die Stäbchen geben ihre Signale an die ON-Stäbchenbipolarzellen weiter. Diese verschalten aber nicht direkt auf die Ganglienzellen, sondern erregen die All-Amakrinzellen, welche das Stäbchensignal über eine hemmende Synapse in den OFF-Kanal und über eine erregende Synapse in den ON-Kanal einspeisen. 2 Typen von Horizontalzellen und 8 Typen von Zapfenbipolarzellen gehen mit jedem Zapfen eine Verbindung ein. Die diffusen Bipolarzellen (DB1 bis DB6) kontaktieren 5 bis 10 L-, M- und S-Zapfen. Die S-Zapfenbipolarzellen (BB) verschalten sich mit 1 bis 5 S-Zapfen und tragen ein ON-Signal. Die Stäbchenbipolarzellen (RB) kontaktieren etwa 6 Stäbchen in der Nähe der Fovea und etwa 40 Stäbchen in der peripheren Retina. In der Fovea verbindet sich ein M- oder L-Zapfen mit einer IMB und einer FMB. Die IMB tragen ein chromatisches ON-Signal und die FMB tragen ein chromatisches OFF-Signal. Ob die S-Zapfen zu einem chromatischen Signalweg beitragen, ist noch nicht geklärt (26)(Wässle, 2004).

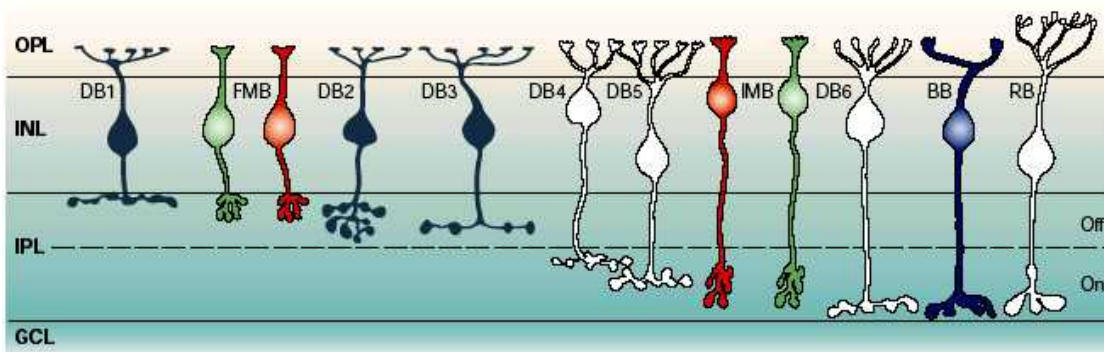


Abb. 3-3: Bipolarzelltypen in der Primaten-Retina (26)(Wässle, 2004)

Gewöhnlich verbinden sich eine Amakrinzelle und eine Ganglienzelle mit Zapfenbipolarzellen, oder zwei Amakrinzellen mit einer Stäbchenbipolarzelle. Die All-Amakrinzellen besitzen sehr kleine, runde Dendritenfelder und sind ohne Überlappung über die ganze Retina verteilt. Sie bilden mit OFF-Ganglienzellen glycinerge Synapsen und lösen postsynaptisch eine Hyperpolarisation aus. Die GABAergen Amakrinzellen sind wahrscheinlich am Zustandekommen der Richtungspezifität der Ganglienzellen beteiligt. Die dopaminergen Amakrinzellen bilden Synapsen mit den All-Amakrinzellen des Stäbchensystems. Cholinerge oder starburst-Amakrinzellen bekommen glutamaterge Signaleingänge von zwei Bipolarzelltypen. Die cholinergen Amakrinzellen sind zahlreich und bilden über die gesamte Retina ein dichtes Dendritengeflecht, dessen Überlappungsgrad von der Mitte zum Rand der Retina zunimmt. Die Dendritengeflechte bilden die Ausgangssignale zu midget- und parasol-Ganglienzellen (20)(Heldmaier und Neuweiler, 2003).

Die Zapfen hyperpolarisieren die Horizontalzellen, was einen grundlegenden Unterschied zu Nicht-Säugetieren bedeutet. Die Horizontalzellen sind über gap junctions verbunden und bilden getrennte Netzwerke. Die H2-Horizontalzellen kontaktieren alle Zapfentypen, wobei die S-Zapfen bevorzugt werden. Die H1-Horizontalzellen bekommen Signale überwiegend von den M- und L-Zapfen (30) (Wässle et al., 2000).

In der Makaken-Retina sind mehr H1- als H2-Horizontalzellen vorhanden. In der Fovea beträgt das Verhältnis der H1- zu H2-Horizontalzellen ca. 4:1 und fällt in der peripheren Retina auf ca. 2:1 ab. Bei einer Exzentrizität von 5,6 mm treffen auf eine H1-Horizontalzelle zwei Zapfen, siehe Abb. 3-4 (30) (Wässle et al., 2000).

Patch (animal)	Eccentricity (mm)	H1-cell density (1/mm ²)	H2-cell density (1/mm ²)	Cone density (1/mm ²)	H1/H2 ratio
1 (9.8.99)	2-3	6360	1586	—	4/1
2 (99.5/18.1)	3.5	4700	1600	12000	2.9/1
3 (29.7.99)	4-5	2665	947	5035	2.8/1
4 (97.3/17.3)	5.6	2278	933	5417	2.4/1
5 (96.5/18.2)	6.3	1950	1150	5400	1.8/1
6 (101.9/26.7)	7.1	1914	1133	5195	1.7/1

Abb. 3-4: Dichte der Horizontalzellen und Zapfen bei unterschiedlichen Exzentrizitäten in der Makaken-Retina (30)(Wässle et al., 2000)

3.3 Rezeptive Felder

M-parasol-Ganglienzellen (Y-Zellen) mit großen Rezeptiven Feldern von ca. 60 μm erhalten zu 70 Prozent Signaleingänge von Amakrinzellen und einen hohen Anteil von Stäbchensignaleingängen. Die parasol-Ganglienzellen sind farbungempfindlich und antworten nichtlinear auf bewegte, größere kontrastsensitive Objekte. Ihre Axone leiten schneller als die der midget-Ganglienzellen.

P-midget-Ganglienzellen (X-Zellen) bekommen ihre Signaleingänge zu 70 Prozent von den Zapfenbipolarzellen und kodieren vor allem lokale Farb- und Helligkeitskontraste. Sie antworten im Zentrum ihrer kleinen Rezeptiven Felder von ca. 20 μm auf rot bzw. grün und in der Peripherie auf die Gegenfarbe. Das Zentrum und die Peripherie der midget-Ganglienzellen sind chromatische Antagonisten. Bei einer ON-midget-Ganglienzelle wird durch Lichtreiz der periphere Bereich des Rezeptiven Feldes aktiviert, bei einer OFF-midget-Ganglienzelle verhält es sich umgekehrt.

Die Antworten der Rezeptiven Felder sind bei niedrigem Kontrast fast linear. Signifikante Nichtlinearitäten treten dann erst hervor, wenn die midget-Ganglienzellen auf stärkeren Kontrast reagieren. Die Phasenbeziehung zwischen den Antworten des Zentrums und der Peripherie hängt von der Zeitfrequenz ab. Eine hohe Zeitfrequenz reduziert oder läßt den Antagonismus sogar verschwinden (31)(Kaplan und Benardete, 2001).

Das Zentrum und die Peripherie der Rezeptiven Felder haben bei den Affen kleinere Ausdehnungen als beim Menschen. Man geht aber davon aus, dass es sich um denselben retinalen Mechanismus der Rezeptiven Felder handelt (32)(Spillmann et al., 1987).

Die Modellierung von Rezeptiven Feldern der midget-Ganglienzellen nimmt die Form eines "Mexikanischen Hutes" an. Die Signalwege im Bereich der Fovea oder in der peripheren Retina führen zu einer schmälern oder breiteren Darstellung des "Mexikanischen Hutes". In der Fovea trägt 1 Zapfen die Information zu 2 midget-Ganglienzellen und sendet entweder 1 OFF- oder 1 ON-Signal. Diese Farbinformation kommt entweder von einem M- oder einem L-Zapfen. In der peripheren Retina ist die Verschaltung nicht mehr 1:1.

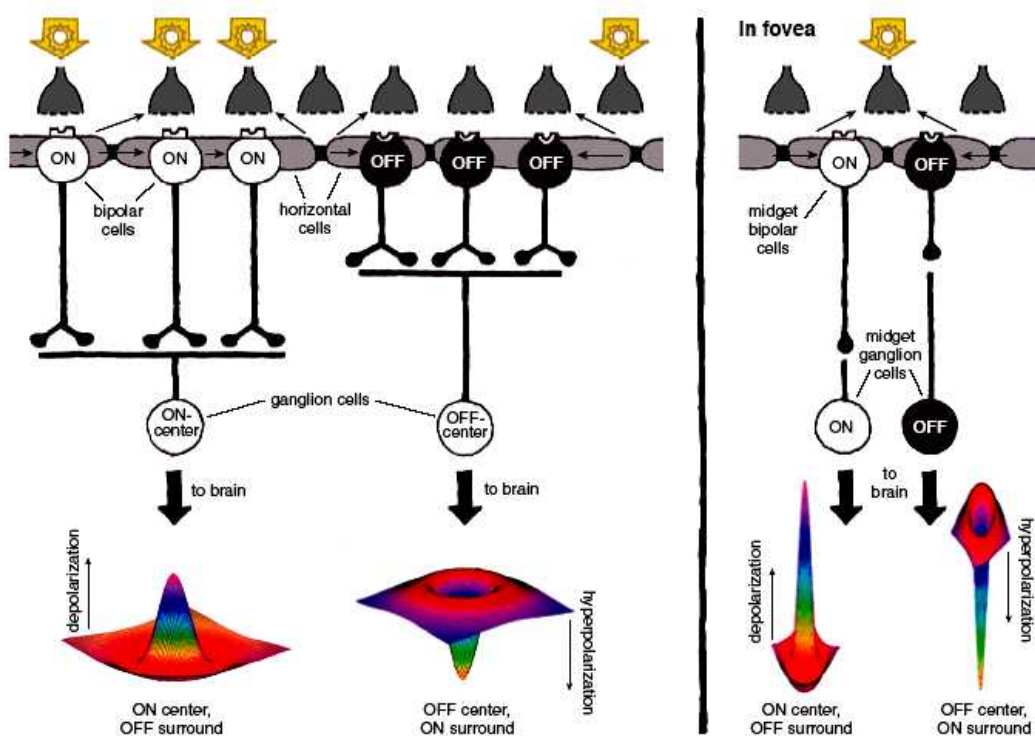


Abb. 3-5: Bild links: Aktivierung der ON- und OFF-Ganglienzellen in der peripheren Retina
Bild rechts: Aktivierung der ON- und OFF-Ganglienzellen in der Fovea (27)(Kolb, 2003)

3.4 Glutamatrezeptoren

Die Horizontalzellen und Amakrinzellen schütten erregende und hemmende Aminosäuren, Katecholamine, Peptide und Stickoxide auf die Neuronen-Synapsen in der Retina aus. Für die Reizweiterleitung der Photorezeptoren über die Bipolarzellen zu den Ganglienzellen spielt Glutamat eine entscheidende Rolle. Es werden ionotrope und metabotrope Glutamatrezeptoren stimuliert. Glutamat ist der erregende Transmitter des Zentralnervensystems und in der Retina, die GABA wirkt als hemmender Transmitter. Bei der Stimulation des GABA_A-Rezeptors öffnet sich ein Kanal für die Chlor-Ionen. Der langsamere GABA_B-Rezeptor verringert nicht nur die Konzentration der Kalzium-Ionen, sondern verursacht durch Öffnung der Kaliumkanäle eine direkte Hyperpolarisation der Zelle. Die ionotropen Glutamatrezeptoren wirken über Ionenkanäle, die metabotropen

Glutamatrezeptoren über intrazelluläre second messengers, wie membrangebundene G-Proteine. Aufgrund pharmakologischer und elektrophysiologischer Charakteristiken werden die ionotropen Glutamatrezeptoren in AMPA-, Kainat (KA)-, und NMDA-Rezeptoren mit Untereinheiten eingeteilt. Sie tragen zur schnellen Übertragung zwischen den Synapsen bei. Die Kanäle der NMDA-Rezeptoren öffnen und schließen langsamer als die der AMPA- und KA-Rezeptoren. Die metabotropen Glutamatrezeptoren werden den Gruppen I bis III zugeordnet. Die Transmitter-Rezeptoren kommen in sehr hoher Dichte vor und sind im Lichtmikroskop durch Immunfluoreszenzfärbungen als hell leuchtende Punkte zu erkennen (33)(Brandstätter, 2002).

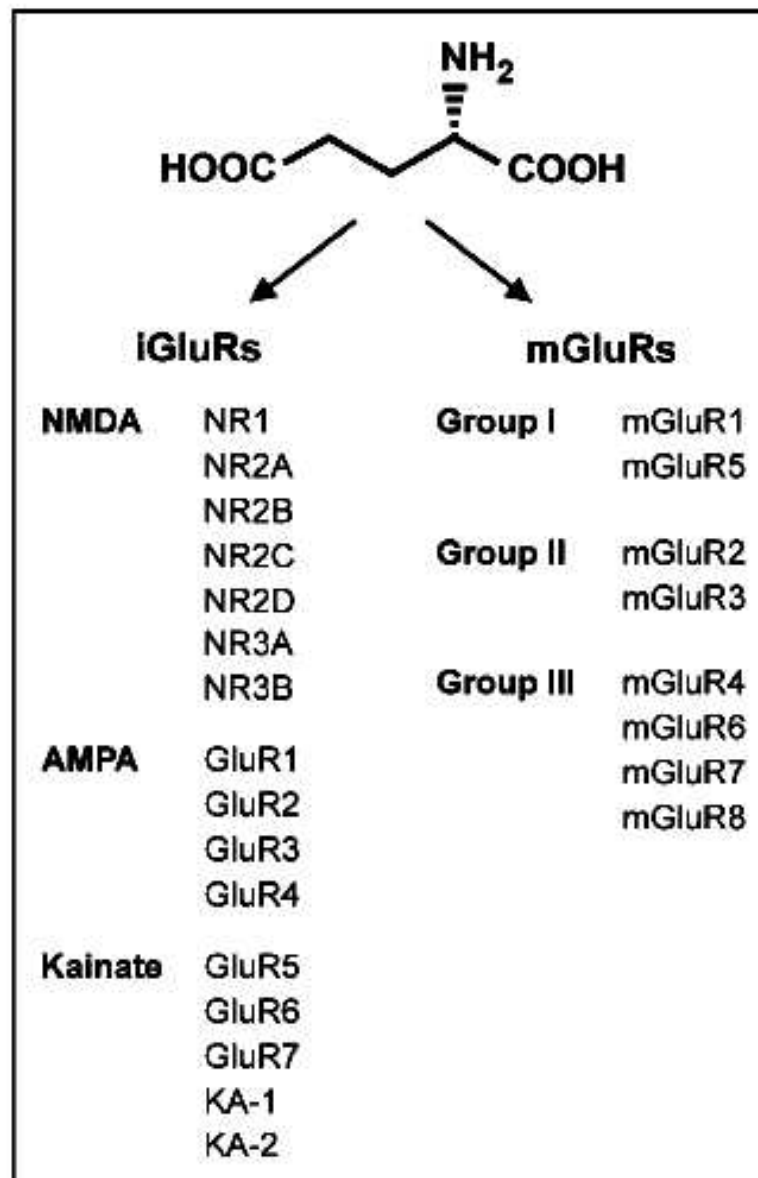


Abb. 3-6: Ionotrope und metabotrope Glutamatrezeptoren in der Retina (33)(Brandstätter, 2002)

3.4.1 Ionotrop und metabotrop

OFF-Bipolarzellen besitzen ionotrope Glutamatrezeptoren und werden bei Lichtreiz hyperpolarisiert, während die ON-Bipolarzellen mit ihren metabotropen Glutamatrezeptoren depolarisiert werden. Bei Senkung der Glutamatausschüttung bleiben die Kanäle der ON-Bipolarzellen offen und cGMP-abhängig. Bei Glutamatfreisetzung aktivieren sie ein G-Protein, das die Kanäle schließt.

Die zeitliche Filterung beginnt schon an der ersten Synapse des Sehsystems. Die Verschaltung der Horizontalzellen auf die Zapfen und auf die Bipolarzellen ist weitgehend verstanden. Die Horizontalzellen exprimieren bevorzugt den AMPA-Typ. Die OFF-Bipolarzellen den AMPA- oder KA-Typ. Die Stäbchenbipolarzellen besitzen postsynaptische Partner mit unterschiedlichen Glutamatrezeptoren (33)(Brandstätter, 2002). Bei Affen wurde der metabotrope Glutamatrezeptor Nr. 6 (mGluR6) an den Stäbchenbipolarzellen und an den ON-Bipolarzellen lokalisiert (34)(Vardi et al., 2002).

Dem ionotropen NMDA-Rezeptor wird eine Funktion im Signalweg der Zapfen zugeschrieben (35)(Kalloniatis et al., 2004). Im Alter ergibt sich eine Abnahme des spezifischen NMDA-Rezeptorgehaltes in der Retina. Die Transkripte aller bisher identifizierten Untereinheiten des NMDA-Rezeptors werden in der Retina nachgewiesen. Bei einer Degeneration der Retina infolge Retinitis pigmentosa kommt es zu einer sekundären Umverteilung der NMDA-Rezeptoren, wobei insbesondere die Müller-Zellen eine starke Immunreaktion mit der Rezeptorvariante NR1 entwickeln (36)(Grunder et al., 2001).

Anästhetika wirken auf NMDA-, GABA-, nikotinerge Azetylcholin- und GLY-Rezeptoren (37)(Frenkel und Urban, 1992).

Substanz	innerhalb klinisch relevanter Dosisbereiche	außerhalb klinisch relevanter Dosisbereiche
Barbiturate	Glutamat-Rezeptor (41) Azetylcholin-Rezeptor (30) GABA-Rezeptor (32, 33) Natrium-Kanal (21) Kalzium-Kanal (34, 35)	Natrium-Kanal (19) Kalium-Kanal (19)
Etomidat	GABA-Rezeptor (16, 48)	Natrium-Kanal (6) Kalium-Kanal (6)
Propofol	Natrium-Kanal (22) Azetylcholin-Rezeptor (45) GABA-Rezeptor (12)	
Opiate	Opiat-Rezeptor- Natrium-Kanal-Komplex (18)	
Ketamin	Opiat-Rezeptoren (17, 39) NMDA-Rezeptor (2, 50) Azetylcholin-Rezeptor (44)	Natrium-Kanal (20)
Benzodiazepine	GABA-Rezeptor (28, 32) Glyzin-Rezeptor (28)	Natrium-Kanal (43)
Neuroleptika	Aderenerge Rezeptoren (25) (Dopamin, Serotonin-, Histamin) Azetylcholin-Rezeptor (25)	

Abb. 3-7: Molekulare anästhetische Wirkprofile bei bisher untersuchten Strukturen. Die Zahlen in Klammern beziehen sich auf Literaturangaben im Original (37)(Frenkel und Urban, 1992)

Ketamin ist ein Cyclohexanonderivat und gehört zu den dissoziativen Anästhetika. Es wird in wässriger Lösung in Form von Hydrochlorid verabreicht. Die molekularen Wirkmechanismen von Ketamin bestehen in der Blockierung des Ionenkanals des NMDA-Rezeptors. Das Anästhetikum interagiert mit der Phenzyklidin-Bindungsstelle, was die Aktivität des NMDA-Rezeptors beeinträchtigt (38)(Hirota und Lamber, 1996) und es verhindert die NMDA-Rezeptor abhängige Azetylcholin-Freisetzung (39)(Kohrs und Durieux, 1998). Vermutlich ist die von Ketamin induzierte NO-Synthetaseinhibition für die analgetische Wirkung verantwortlich.

3.4.2 Spektrales Differenzsignal

Die erste Stufe der Farbverarbeitung in der Retina bilden die S-, M- und L- Zapfen. Die S-, M- und L-Zapfenbipolarzellen schütten Glutamat auf die Synapsen der bistratified-Ganglienzelle aus. Eine Neuronenstufe früher besitzt der S-Zapfen vermutlich einen mGluR6-Rezeptor, die M- und L-Zapfenbipolarzellen sind mit iGluR-Rezeptoren ausgestattet. Folglich sind die Signale des S-Zapfens und die der M- und L-Zapfen entgegengerichtet. Die Signalwirkung führt zu einer Subtraktion S-(M+L), der blau-gelb-Kanal ist entstanden. Bei der L-M+(S)-Ganglienzelle beruht die Subtraktion auf demselben molekularen Prozess und korrespondiert mit dem psychophysisch bestimmten rot-grün-Kanal (40)(Calkins und Sterling, 1999).

3.5 Gegenfarbkodierung

Die Trichromatische Theorie wird durch Messungen der spektralen Absorption der Photopigmente und Rezeptorpotentiale in der Retina bestätigt. Sie erklärt nicht alle Phänomene des Farbensehens, z.B. den Farbantagonismus und den Farbkontrast. Die Gegenfarbkodierung widerspricht nicht der trichromatischen Theorie, sondern stellt einen höheren Verarbeitungsschritt dar. Physiologische Grundlage der Gegenfarben ist die Verschaltung der Zapfen auf die Ganglienzellen in der Retina. Das blau-gelb-System ist bei Säugetieren entwicklungsgeschichtlich alt, das rot-grün-System kommt nur bei Primaten vor. Intrazelluläre retinale Ableitungen und neuroanatomische Untersuchungen bestätigen, dass sich der rot-grün- und blau-gelb-Kanal in der Morphologie, der Physiologie und in den Signalwegen unterscheiden, siehe Abb. 3-11. In den Schichten des koniozellulären LGN wird eine Opponentz der S-Zapfen bei Alt- und Neuweltaffen gefunden (41)(Mullen und Kingdom, 2002).

3.5.1 Rot-grün-Kanal

Man fasst die rot-grün-empfindlichen Ganglienzellen als L-M-Kanal bzw. M-L-Kanal zusammen. Die räumlich hochauflösenden Kanäle

projizieren in die parvozellulären Schichten des LGN. Mit zunehmend konvergenter Verschaltung der Zapfen nimmt bei den midget-Ganglienzellen die Gegenfarbkodierung in der peripheren Retina ab. Bisher dachte man nur an eine zufällige Konvergenz der Zapfen auf die midget-Ganglienzellen. Die Anisotropie von Dendritenbäumen der midget-Ganglienzellen könnte die Basis für die grosse Kontakt-Variabilität der M- und L-Zapfen sein. Modellrechnungen zeigten, wie sich die Form des Dendritenbaums einer midget-Ganglienzelle bei einer spezifischen Auswahl von M- oder L-Zapfen änderte. Die Generierung der Zapfen bezog sich auf eine zufällige Verteilung und die Wichtung erfolgte durch die Zweiteilung im Minimum des Zapfen-Verhältnisses. Die Anisotropie des Dendritenbaums wurde bei jeder Simulation neu optimiert. In Abb. 3-8 selektiert eine midget-Ganglienzelle mehr L- als M-Zapfen (42)(Martin et al., 2001).

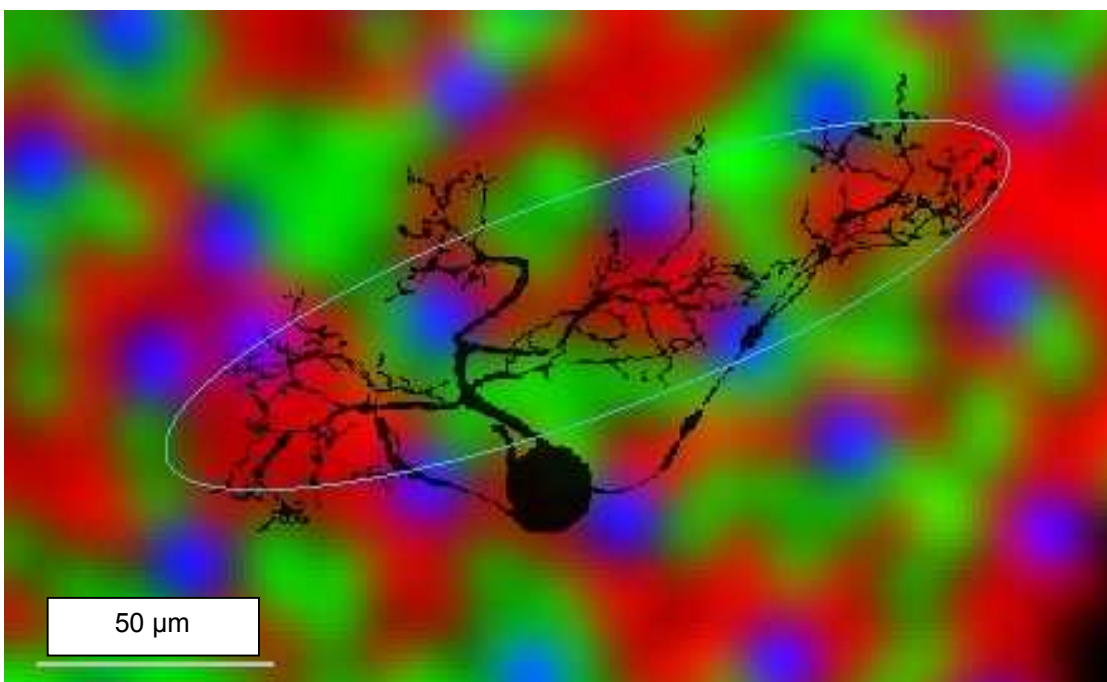


Abb. 3-8: Anisotrope Form des Dendritenbaums einer midget-Ganglienzelle. Symbolisch ist der Modellrechnung eine Zapfenverteilung in einer Makaken-Retina hinterlegt. Weißer Kreis kennzeichnet die Optimierung. Skala = 50 μm (42)(Martin et al., 2001)

Mehrere Faktoren könnten die Qualität der Opponentz bei den M- und L-Zapfen in der peripheren Retina beeinträchtigen. Beim Übergang von der Fovea zur peripheren Retina verschiebt sich die Antwort der Ganglienzellen zu einer hohen Zeitfrequenzmodulation. Die chromatische Selektivität der Ganglienzellen ist reduziert und der Anteil der opponierten Zellen ist geringer. Auch tritt eine Phasendispersion auf (43)(Solomon et. al., 2005).

Die zelluläre Grundlage für eine rot-grün-Unterscheidung geht bereits auf der retinalen Ebene verloren.

3.5.2 Blau-gelb-Kanal

Blau-gelb-empfindliche Ganglienzellen erhalten im Zentrum ihrer kleinen Rezeptiven Felder entweder nur Signaleingänge von S-Zapfen und in der Peripherie Signaleingänge von M- und L-Zapfen oder umgekehrt. Der S-(L+M)-Kanal wird als small bistratified-Ganglienzelle und der -S+(M+L)-Kanal als small bodied-inner-cell bezeichnet. Elektrophysiologisch untersuchte man bis jetzt nur den S-(L+M)-Kanal (44)(Lee, 2004).

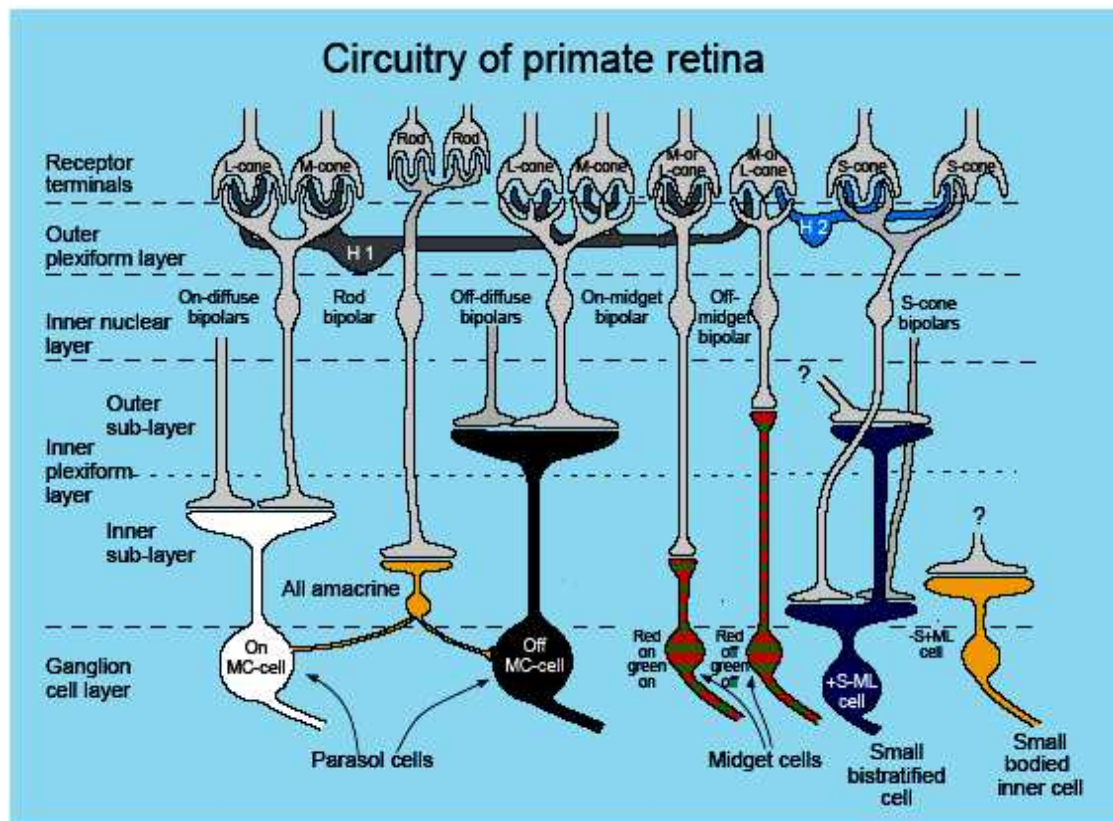


Abb. 3-9: Schema des neuronalen Netzes in der Primaten-Retina (44)(Lee, 2004)

Für einen quantitativen Vergleich zwischen der Farbopponenz des rot-grün-Kanals und des blau-gelb-Kanals in der peripheren Retina führte man Berechnungen anhand eines Zapfen-Modells durch. Die Empfindlichkeit des blau-gelb-Kanals nimmt gegenüber dem rot-grün-Kanal in der peripheren Retina zu. Die durchgezogene Linie stellt den idealen Beobachter dar. Die Berechnungen sind durch Kreise markiert und gegen die chromatische Achse (Azimuth) für eine Testperson bei Exzentrizitäten von 6 Grad, 12 Grad, 18 Grad, 21 Grad und 24 Grad aufgetragen, siehe Abb. 3-10 (45)(Murray et al., 2006).

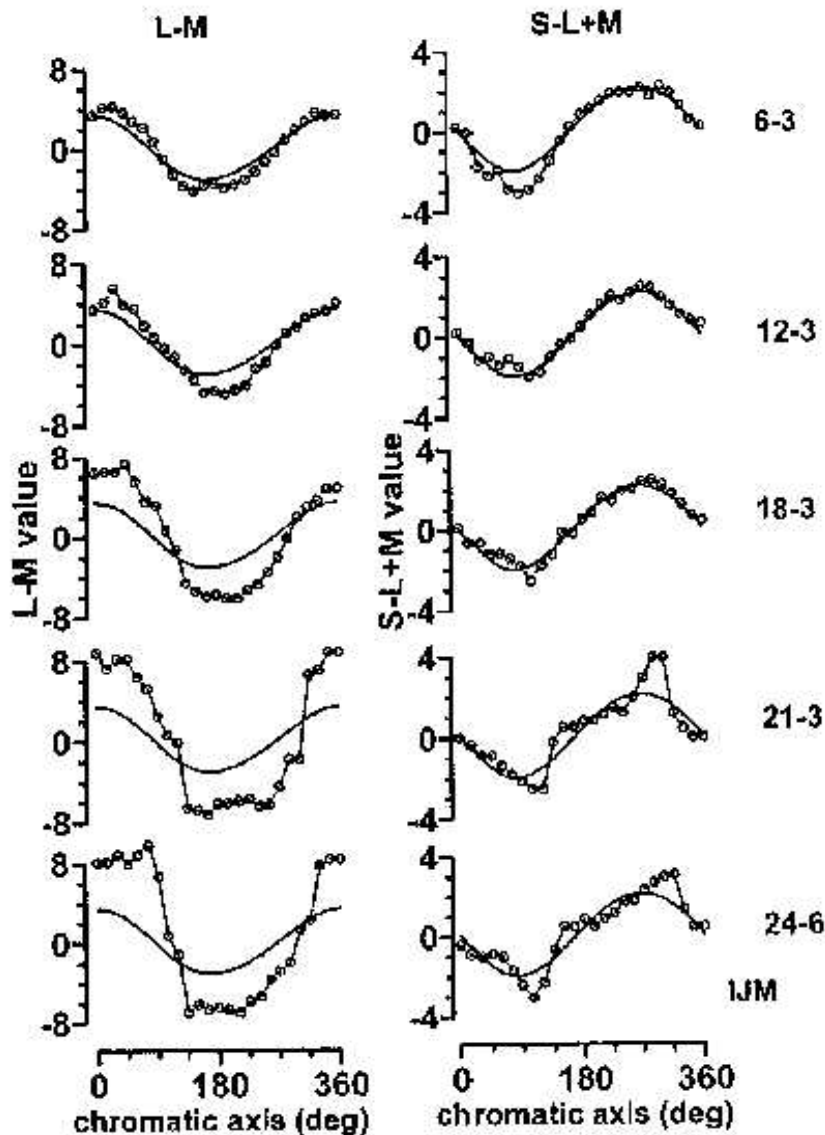


Abb. 3-10: Abnahme der Farbopponenz des L-M-Kanals gegenüber dem S-L+M-Kanal in der peripheren Retina für eine Testperson (45)(Murray et al., 2006)

3.6 Diversität der retinalen Ganglienzellen

In vitro-Präparationen der Makaken-Retina liefern neue Erkenntnisse über die Organisation des Mosaiks und physiologischen Verhältnisse der parasol-, midget- und small-bistratified-Ganglienzellen. Die Größe ihrer Dendritenbäume und die Verteilung dieser Ganglienzelltypen lassen auf eine Variation in der Dichte bei verschiedenen Exzentrizitäten schließen. Die midget-Ganglienzellen bestreiten mit der inneren und äußeren Population den Hauptanteil mit ca. 52 Prozent, siehe Abb. 3-11 und Abb. 3-12 (46)(Dacey, 2004).

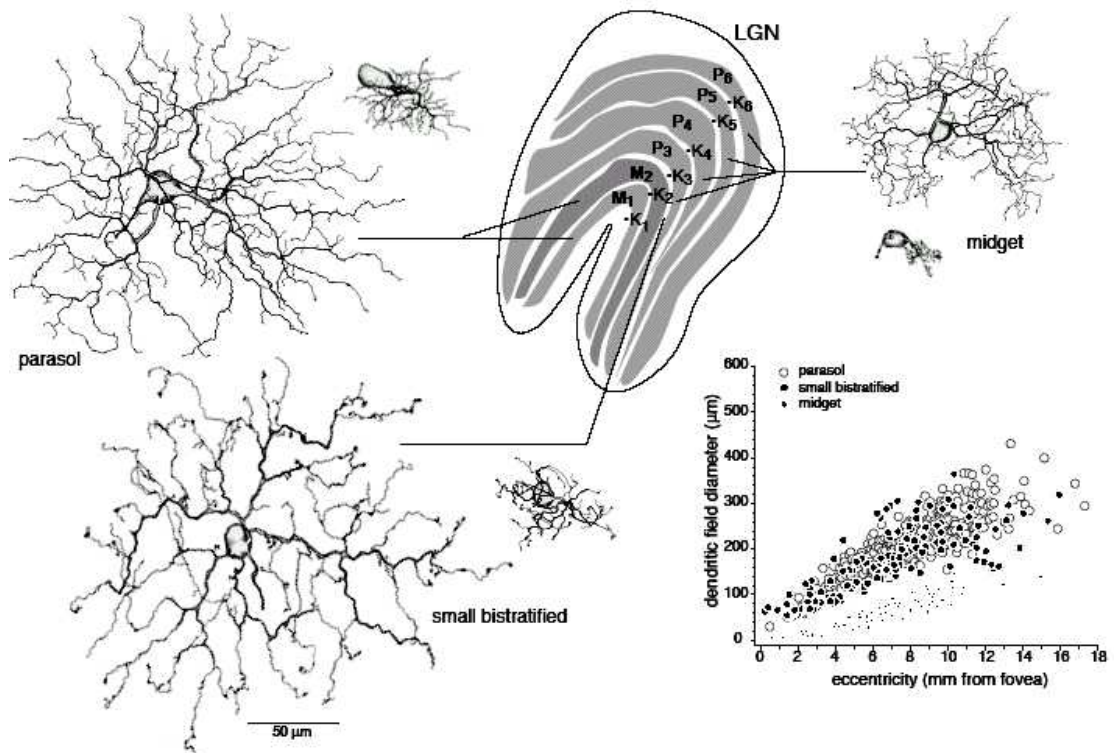


Abb. 3-11: Längsschnitt des LGN zeigt die Bahnen der 3 Ganglienzelltypen. Die parasol-, midget- und small bistratified-Ganglienzellen unterscheiden sich in der Größe und Dichte des Dendritenbaums in der Nähe der Fovea und in der peripheren Retina (46)(Dacey, 2004)

Über die restlichen Ganglienzelltypen, meist von niedriger räumlicher Dichte ist wenig bekannt, obwohl sie in den LGN und/oder in den SC projizieren. Die small bistratified-Ganglienzellen betragen nur ca. 6 Prozent der Gesamtpopulation. Die Größe des Dendritenbaums ist vergleichbar mit der Größe bei den parasol-Ganglienzellen. Die small bistratified-Ganglienzellen reichen wie die midget-Ganglienzellen in die IPL. Die large bistratified-Ganglienzellen besitzen einen größeren Dendritenbaum als die small bistratified-Ganglienzellen. Ihr Anteil liegt bei ca. 3 Prozent der Gesamtpopulation. Sie bekommen erregende Signaleingänge von S-Zapfen und hemmende Signaleingänge von M- und/oder L-Zapfen. Die Polarität und die Stärke der Eingangssignale in das Rezeptive Feld sind nicht bekannt. Über eine spektrale Empfindlichkeit läßt sich somit keine Aussage treffen. Die sparse monostratified-Ganglienzellen nehmen einen Anteil von ca. 2 Prozent der Gesamtpopulation ein. Sie erhalten hemmende Signaleingänge von S-Zapfen und erregende Signaleingänge von M- und L-Zapfen. Die giant monostratified-Ganglienzellen mit nur einem Anteil von ca. 1 Prozent der Gesamtpopulation sind für den Tag-Nacht-Rhythmus und den Pupillenreflex verantwortlich (46)(Dacey, 2004).

In Abb. 3-12 ist der prozentuale Anteil aller bis jetzt bekannten Ganglienzelltypen und ihre Maßgabe an chromatischer und achromatischer Signalverarbeitung dargestellt (46)(Dacey, 2004).

Ganglion Cell Morphological Type	Percent of Total Ganglion Cell Population*	Central Projections	Some Physiological Properties
1 Midget, inner	26	LGN parvo 5, 6	ON-center; OFF-surround Achromatic/chromatic L vs. M cone opponent
2 Midget, outer	26	LGN parvo 3, 4	OFF-center; ON-surround Achromatic/chromatic L vs. M cone opponent S cone OFF opponent group?
3 Parasol, inner	8.0	LGN magno 1, 2	ON-center; OFF-surround Achromatic L+M cone input S cone input controversial
4 Parasol, outer	8.0	LGN magno 1, 2	OFF-center; ON-surround Achromatic L+M cone input S cone input controversial
5 Small bistratified	6.2	LGN konio 3, 4	S-ON; L+M-OFF opponent
6 Large bistratified	2.7	LGN	S-ON opponent, details unknown
7 Thorny monostratified, inner	1.2	LGN	Unknown
8 Thorny monostratified, outer	1.2	LGN	Unknown
9 Broad thorny monostratified	1.2	LGN SC	Unknown
10 Recursive bistratified	4.2	SC	Possible correlate of ON-OFF direction selective
11 Recursive monostratified	1.9	SC LGN? Pretectal area (NOT?)	Possible correlate of ON direction selective
12 Moderate monostratified, inner	1.3	SC	Unknown
13 Moderate monostratified, outer	1.3	SC	Unknown
14 Sparse monostratified, inner	2.0	LGN	L+M-ON; S-OFF opponent
15 Sparse monostratified, outer	1.2	LGN	Unknown
16 Giant monostratified melanopsin-containing, inner/outer, weakly bistratified	1.0	LGN Pretectal area, PON Hypothalamus (SCN)	Sustained ON response S-OFF; L+M-ON opponent Strong rod input Intrinsically photosensitive via novel photopigment
17 Giant monostratified intrinsic axon-collaterals	1.0	Unknown	Unknown

Abb. 3-12: Ganglienzelltypen im Überblick. *In vitro*-Präparationen einer Makaken-Retina (46)(Dacey, 2004)

3.7 Häufigkeitsverteilung der Photorezeptoren

Die Ergebnisse über die Dichte und die Verteilung der 3 Zapfentypen basieren auf vielen physiologischen und psychophysischen Messungen, molekularbiologischen Analysen und bildgebenden Verfahren.

Den größten prozentualen Anteil der Zapfen in der menschlichen Retina liefern mit ca. 59 Prozent die L-Zapfen. Die M- Zapfen sind mit ca. 34 Prozent und die S- Zapfen mit ca. 7 Prozent vertreten (18)(Sharpe et al., 1999b).

Die Dichte der S-Zapfen beträgt bei einer Exzentrizität von 0,1 bis 0,3 mm mehr als 2 000 S-Zapfen pro mm^2 (47)(Curcio et al., 1991). Dieser Wert ist konsistent mit der Dichte von 1 000 bis 5 000 S-Zapfen pro mm^2 bei 1 Grad von der Fovea (48)(Ahnel, 1998). Nur in der Fovea können zwei M- und L-Zapfen direkt nebeneinander sein, in der Peripherie sind sie entweder durch Stäbchen oder durch S-Zapfen getrennt. Innerhalb von 100 μm werden keine S-Zapfen nachgewiesen (48)(Ahnel, 1998).

In der Fovea erreicht die M- und L-Zapfendichte einen Wert von ca. 300 000 Zapfen pro mm^2 , fällt ab und steigt an der Ora serrata nochmals auf eine Dichte von 20 000 Zapfen pro mm^2 an (48)(Ahnel, 1998). Bei ca. 30 Grad von der Fovea ist die Stäbchendichte mit 170 000 Stäbchen pro mm^2 am größten und verringert sich nach außen. In der gesamten peripheren Retina sind die Stäbchen zahlreicher als die Zapfen (48)(Ahnel, 1998).

Die S-, M- und L- Zapfen sind über die menschliche Retina zufallsverteilt. In der Affen-Retina sind die M- und L-Zapfen zufallsverteilt, dagegen sind die S-Zapfen regulär verteilt (49)(Roorda et al., 2001).

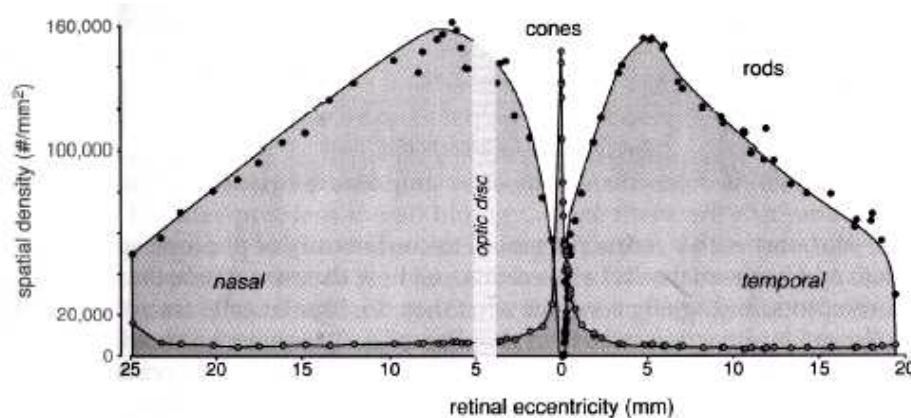


Abb. 3-13: Häufigkeitsverteilung der Stäbchen (rods) und Zapfen (cones) in der Retina. Die Verteilung der Stäbchen und Zapfen ist nasal und temporal unterschiedlich (50)(Rodieck, 1998)

Die Ganglienzellen erreichen bei Untersuchungen in der menschlichen Retina eine Dichte zwischen 0,7 und 1,5 Millionen Zellen pro mm^2 . Die Topographie bei den Zapfen ist in der peripheren Retina anders als bei den Ganglienzellen, siehe Graphik in Abb. 3-14 (51)(Curcio und Allen, 1990).

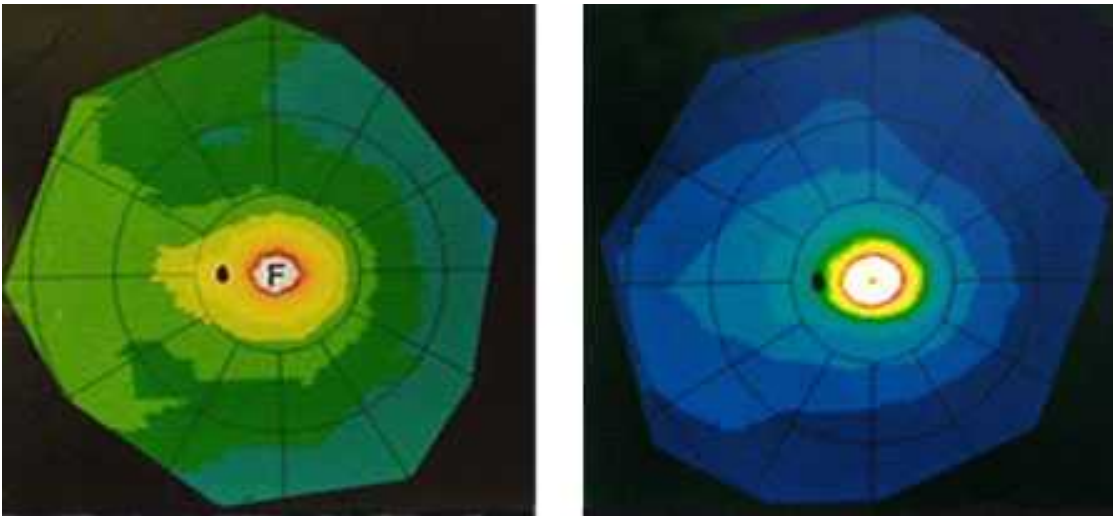


Abb. 3-14: In der Graphik ist die Zapfendichte im Bild links und die Dichte der Ganglienzellen im Bild rechts in der menschlichen Retina dargestellt. Mit F wird die Fovea und mit schwarzem Punkt wird der blinde Fleck gekennzeichnet. Hohe Zelldichte (rot), niedrigere Zelldichte (blau) (51)(Curcio und Allen, 1990)

3.8 Variation der M- und L-Zapfenzahl

Zapfen können zufallsverteilte oder selektive Verbindungen eingehen, was sich auf die Auflösung auswirkt (52)(Masland, 2001). Bei der Verteilung der M- und L-Zapfen variiert die M- und L-Zapfenzahl beträchtlich zwischen den einzelnen Individuen.

3.8.1 Tendenz zur höheren L-Zapfenzahl

Mit der Mikrospektralphotometrie wurden Messungen an einer menschlichen Retina (53)(Bowmaker und Dartnall, 1980) und an 7 menschlichen Retinae durchgeführt (19)(Dartnall et al., 1983). Das Ergebnis über die Verteilung der M- und L-Zapfen lag im Mittel bei 56 Prozent der L-Zapfen und 35 Prozent der M-Zapfen (54)(Information). Bei mikrospektralphotometrischen Messungen ist es schwierig, genügend Daten einer großen Zapfenzahl zu erhalten und die Verteilung zu quantifizieren.

Bei den psychophysischen Messungen bewegten sich die Werte für die M- und L-Zapfenzahl zwischen 1,5:1 und 2,4:1 bei einer Exzentrizität von 4 Grad. Im Mittel kontaktierten zwei L-Zapfen einen M- Zapfen in der Nähe der menschlichen Fovea (55)(Cicerone und Nerger, 1989).

Im Bereich der Fovea wurde die Verteilung der M- und L-Zapfen bei 4 Zwergmeerkatzen-Männchen und 6 Zwergmeerkatzen-Weibchen (*Miopithecus talapoin*) mit der Mikrospektralphotometrie an 557 Zapfen untersucht. Bei der Messung der spektralen Absorption/Transmission des Zapfenpigments überwog der Anteil der M-Zapfen (56)(Mollon und Bowmaker, 1992).

Das relative Verhältnis der L- zu M-Zapfen-mRNA wurde in der menschlichen Retina bei verschiedenen Exzentrizitäten mit der Real Time-PCR analysiert. In der Nähe der Fovea ergab sich im Durchschnitt ein relatives Verhältnis der L- zu M-Zapfen-mRNA von 3:2. Bei einer Exzentrizität von 40 Grad erreichte es den Wert von 3:1 (57)(Hagstrom et. al., 1998).

Auch in der Altweltaffen-Retina wurden mit der PCR-SSCP molekularbiologische Analysen bei verschiedenen Exzentrizitäten durchgeführt. Das relative Verhältnis der L- zu M-Zapfen-mRNA reichte von 0,6 bis 7,0. Dieser Befund stimmte gut mit elektrophysiologischen Messungen der Zapfen-Verteilung in der menschlichen Retina überein. Eine mögliche Erklärung für die Dominanz der L-Zapfen gegenüber den M-Zapfen ist die Nähe des L-Zapfengens zum LCR (58)(Deeb et al., 2000).

Die mfERG bietet gegenüber mRNA-Analysen, psychophysischen Messungen und ERG-Messungen einen Vorteil in der höheren Auflösung. Mit dem mfERG ist es möglich, die Signale der L- und M-Zapfen mit einer Auflösung von ca. 5 Grad Sehwinkel über eine Sehfläche von 84 Grad x 75 Grad zu messen. Die Interpretation der komplexen mfERG-Amplituden ist schwierig. Nach dem 1. negativen Ausschlag (N1) erscheint eine positive Spitze (P1), der ein 2. negativer Ausschlag (N2) folgt. Die N1-Komponente wird den Antworten der OFF-Bipolarzellen und die P1-Komponente den Antworten der ON-Bipolarzellen zugeschrieben, während die N2-Komponente von beiden Bipolarzelltypen stammt. Die N1P1-Komponenten der mfERG-Antworten zeigen, dass das Verhältnis der L- zu M-Zapfen in der Fovea und in der peripheren Retina zwischen den Individuen stark variiert. Die mfERG ist für Antworten aus dem fovealen Bereich weniger geeignet, da die Rauschempfindlichkeit zunimmt. Auch tritt eine Verstärkungsänderung zwischen den Photorezeptoren und Bipolarzellen auf, die von der Exzentrizität abhängt.

Bei Testpersonen mit normalen Farbsehen wurden mfERG-Antworten aufgenommen. Zuerst modulierte man entweder nur die L-Zapfen oder nur die M-Zapfen mit gleichem Kontrast und Intensität. Die Amplitude des L-Zapfensignals war bei allen Exzentrizitäten größer als die Amplitude des M-Zapfensignals. Die Werte korrelierten mit den L- zu M-Zapfenzahlen,

die mit dem ERG-Flickerspektrogramm bestimmt wurden. Für die N1P1-Komponenten erhielt man im Bereich der Fovea ein Verhältnis von 1,4 und in der peripheren Retina ein Verhältnis von 2,3. Die lokale Änderung der Amplituden und die Latenz-Zeiten der mfERG-Antworten kann auf die Variationen der L- zu M-Zapfenzahlen und/oder auf den Verstärkungsfaktor zwischen den Photorezeptoren und Bipolarzellen bezogen werden (59)(Albrecht et al., 2002).

Mit einer speziellen Technik der Ophthalmoskopie, der adaptiven Optik, wird das Zapfenmuster im lebenden Auge direkt sichtbar. Man umgeht die Streuung der Augenmedien und bekommt somit eine gute Auflösung. Mit entsprechendem spektralen Licht werden die einzelnen Zapfentypen gebleicht, wobei sich deren Absorptionen ändern. Auf dem Fundusbild haben die Zapfentypen einen anderen Grauwert als die ungebleichten. Die Daten zeigen, dass das Mischungsverhältnis der M- und L-Zapfen beim Menschen in der peripheren Retina sehr variabel ist. Mit der hochauflösenden adaptiven Optik und der retinalen Densitometrie wurde die Verteilung der S-, M- und L-Zapfen in der menschlichen Fovea charakterisiert. Bei Männern mit normalem Farbsehen führten die Messungen zu L- zu M-Zapfenverhältnissen von 1,1:1 bis 16,5:1. Die Verhältniszahlen stimmten gut mit den Werten überein, die mit dem ERG-Flickerspektrogramm gemessen wurden. Alle Personen hatten ähnliche S-Zapfendichten. (60)(Hofer et al., 2005).

3.8.2 Protanop und deuteranop

Die genetischen Verhältnisse bei einem Protanopen und Deuteranopen mit mütterlichen und väterlichen X-Chromosomen sind in Abb. 3-15 dargestellt. Die Gene der L-Zapfenpigmente (gelbe Streifen) und der M-Zapfenpigmente (grüne Streifen) liegen bei der Lokalisation Xq28 des X-Chromosoms. Die LCR und der Promoter Bereich sind blau markiert. TEX28 ist ein unabhängiges Gen. Für den Protanopen und Deuteranopen ergeben sich unterschiedliche Zapfen-Mosaik. Ein „protanopes Chromosom“ exprimiert kein Photopigment im Bereich eines „normalen“ L-Zapfenpigments und vice versa ein „deuteranopes Chromosom“ exprimiert kein Photopigment im Bereich eines „normalen“ M-Zapfenpigments. Bei einem Deuteranopen wird ein L- zu M-Zapfenverhältnis von 5:1 und bei einem Protanopen ein Verhältnis von 1:2 angenommen (61)(Hood et al., 2006).

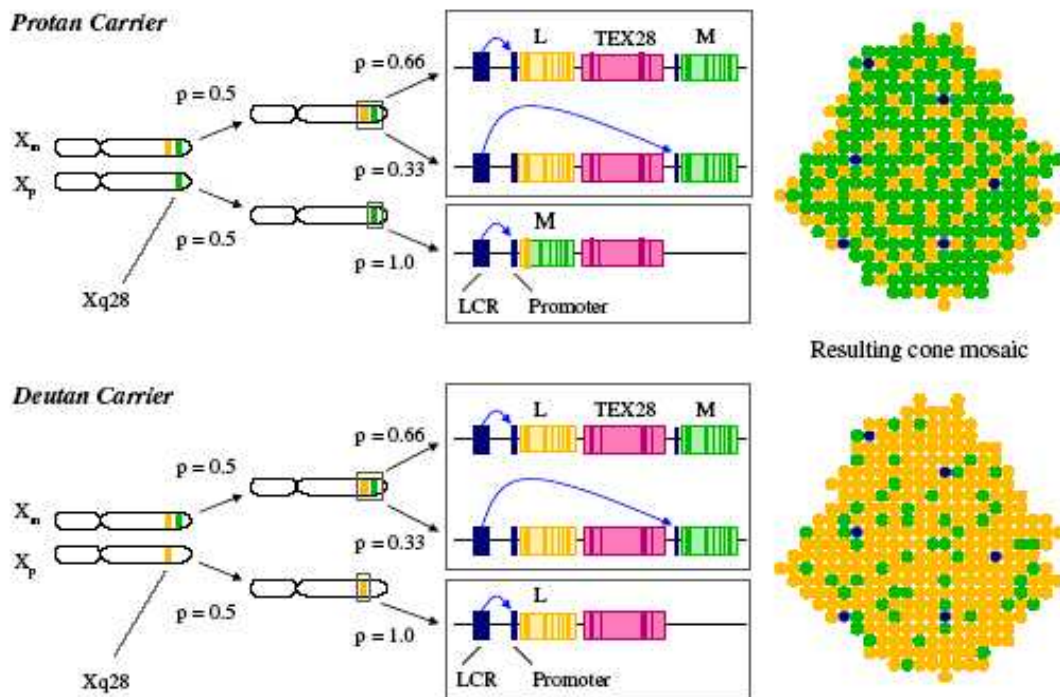


Abb. 3-15: Stochastische Zeitereignisse bestimmen die relative Zahl von M- und L-Zapfen bei Trägern mit Farbdefekten (61)(Hood et al., 2006)

3.9 Elektrophysiologische Reaktion

In vitro-Aufzeichnungen (patch-clamp oder intrazellulär) von isolierten Retina-Präparationen brachten das Verständnis über die retinale Physiologie und Biochemie auf ein neues Niveau. Elektrophysiologische Untersuchungen am optischen Nerv und an visuellen Signalwegen tragen zur Klärung und klinischen Relevanz für das Sehsystem bei (62)(Brigell et al., 2005). Jahrzehnte intensivster Forschung waren nötig, den Ort und die Art der aus dem Blitz-ERG entstehenden Wellen in der Retina zu verstehen. Die zeitliche Abfolge der Extremwerte und der aufgezeichnete Signalwert werden nach international verwendeter Konvention bestimmt. Die erkennbaren Wellen-Minima und Wellen-Maxima bezeichnet man in der zeitlichen Reihenfolge ihres Auftretens mit Kleinbuchstaben, die mit a beginnen. Bei einem Lichtreiz treten vorwiegend a- und b-Welle auf. Ist die Belichtung der Retina länger als 0,1 Sekunde, so bilden sich noch zusätzlich eine c- und eine d-Welle aus. Die a-Welle entsteht möglicherweise durch die Hyperpolarisation der Photorezeptoren (63)(Hood und Birch, 1990) und die b-Welle rührt von der Depolarisation der ON-Bipolarzellen her (64)(Stockton und Slaughter, 1989). Der spätere Anteil der b-Welle stammt von anderen retinalen Zellen (65)(Dong und Hare, 2000). Eine i-Welle aus dem Blitz-ERG kann der Aktivität der retinalen Ganglienzellen zugeschrieben werden (66)Gouras, 1998).

Abhängig von der zu untersuchenden Funktion eines bestimmten Bereichs in der Retina werden spezielle ERG-Antworten zur Beurteilung herangezogen. Beim skotopischen ERG sind die Photorezeptoren an die Dunkelheit adaptiert, während sie beim photopischen ERG an eine bestimmte Lichtintensität gewöhnt werden. Das skotopische ERG wird ausschließlich der Aktivität der Stäbchen und den retinalen Signalwegen der Stäbchen zugeschrieben. Bei Blitzintensitäten von mehr als 1 cd/cm^2 erfolgt der Übergang in den photopischen Bereich. Die Lichtantwort der Stäbchen kommt in die Sättigung und die Signale der Zapfen gewinnen an Bedeutung.

3.9.1 Klassisches ERG

Das ERG stellt eine extrazelluläre Summenableitung der gesamten Retina dar. Aus diesem Grunde ist die Aussagekraft dieser Methode beschränkt. Sie erlaubt hauptsächlich die Beobachtung der Ebenen der Photorezeptoren und Bipolarzellen. Vorgänge in der inneren Retina können gar nicht oder nur sehr indirekt beobachtet werden. Der Informationsfluss durch die Retina folgt verschiedenen Wegen. Bei Anregung mit einem Rechteck-Impuls als Lichtreiz antworten die retinalen Zelltypen mit phasischen und tonischen Komponenten.

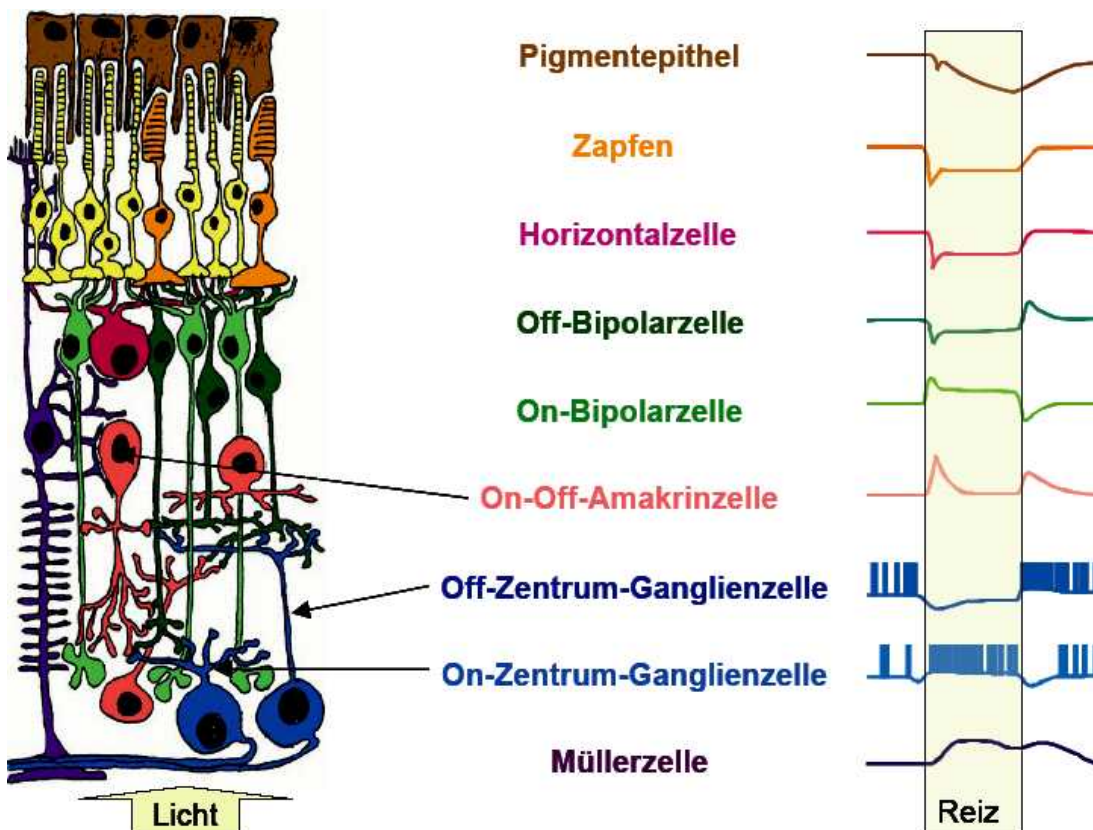


Abb. 3-16: Erregungsmuster der Zelltypen (13)(Dick, 2005)

3.9.2 Wirkung von Ketamin auf das ERG

An Langschwanz-Makaken (*Macaca fascicularis*) wurden ERG-Antworten gemessen. Nach der Dunkeladaptation erzeugte man mit einzelnen Lichtblitzen eine negative a-Welle, der eine positive b-Welle und eine spätere c-Welle folgten. Die beiden ersten Wellen wurden komplett aufgezeichnet, die c-Welle nicht. Sie wurde des öfteren durch Augenbewegungen verfälscht. Die Amplituden der a- und b-Welle erreichten nach 20 Minuten ein Maximum. Die optimale Intensität des Lichtblitzes wurde für die a- und b-Welle bei 2 Joule und einer Zeitkonstante von 0,1 Sekunden ermittelt. Der Amplitudenwert der a-Welle lag bei 163,3 μ Volt (Standardabweichung $\pm 44,9$ μ Volt) und der Amplitudenwert der b-Welle bei 437,0 μ Volt (Standardabweichung $\pm 37,9$ μ Volt). Die Latenz-Zeiten der a- und b-Welle ergaben sich zu 17,3 msec ($\pm 0,5$ msec) und zu 53,5 msec ($\pm 3,2$ msec). Diese Werte waren reproduzierbar (67)(Sato et al., 1980).

Anästhetika wirken sich kaum auf die a-Welle aus, dagegen beeinflussen sie merklich die b-Welle. Pentobarbital erhöhte die Amplitude der b-Welle, während Ketamin sie sichtlich reduzierte (67)(Sato et al., 1980).

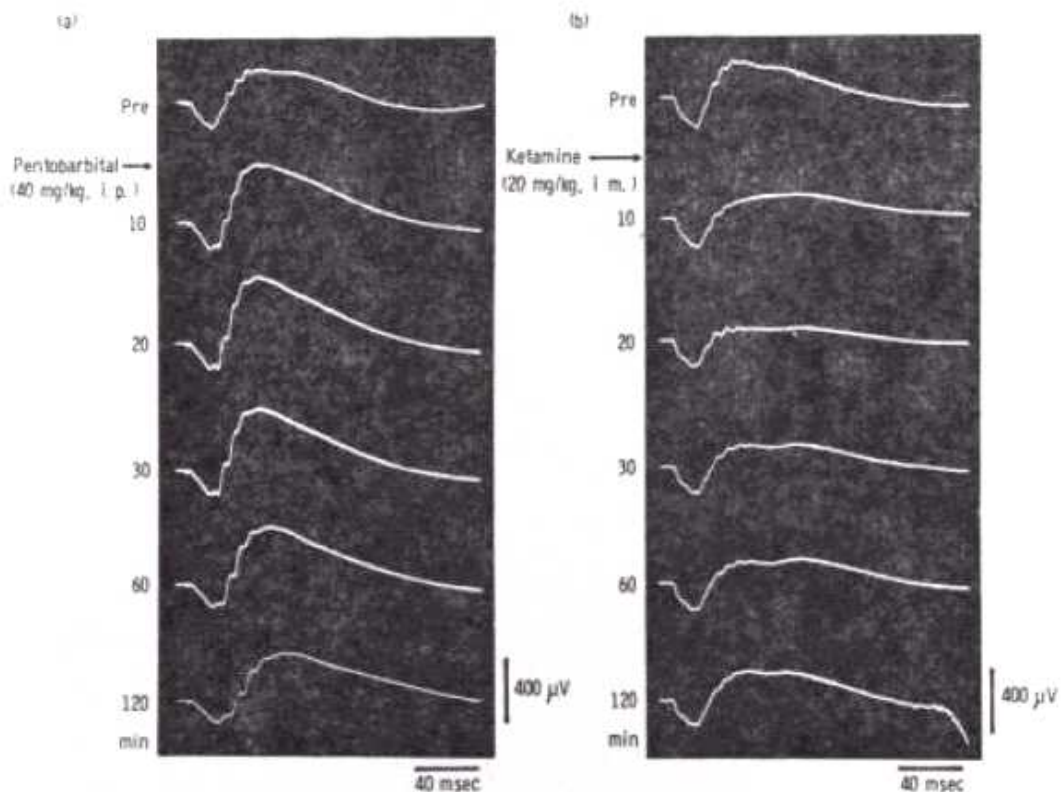


Abb. 3-17: Wirkung von Pentobarbital (Bild a) und Ketamin (Bild b) auf die ERG-Antwort von Langschwanz-Makaken (67)(Sato et al., 1980)
 Intensität: 2 Joule und Zeitkonstante: 0,1 Sekunde
 Pentobarbital (40 mg/kg, i.p.) oder Ketamin (20 mg/kg, i.m.)

4 Farbsehen der Pavianarten

Das Farbsehen der Primaten wird in Abb. 4-1 in die Kategorien mono- und dichromatisch, polymorph und trichromatisch eingeteilt. Diese Diversität leitet sich aus Messungen oder aus anderen Methoden ab (68) (SurrIDGE et al., 2003).

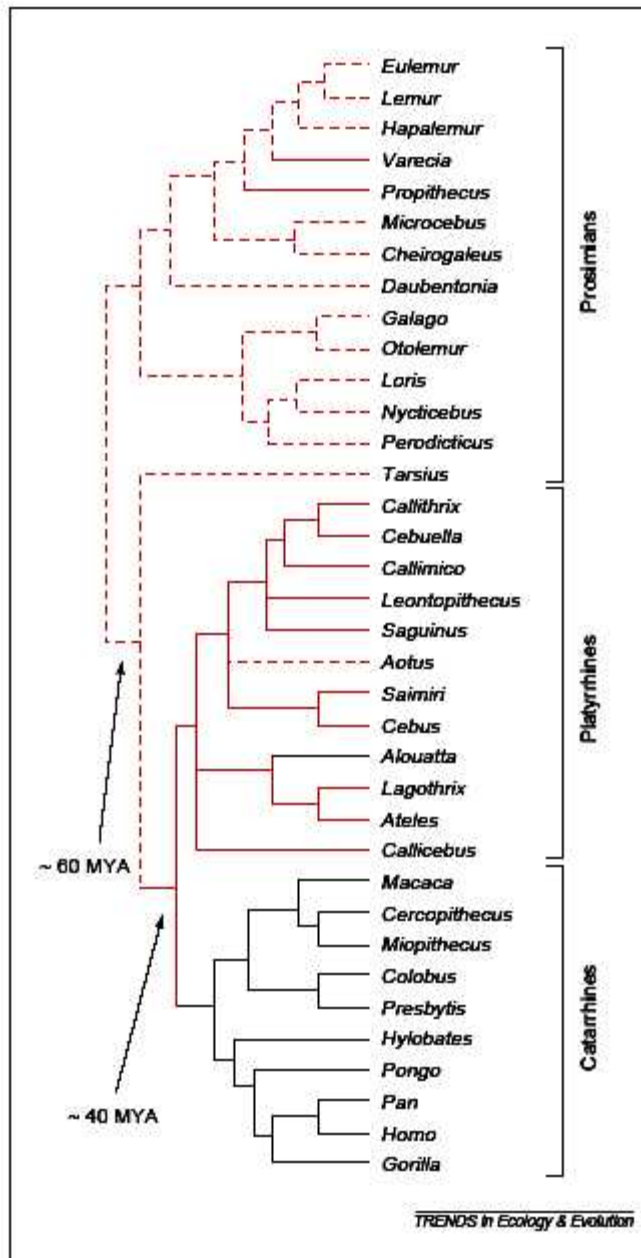


Abb. 4-1: Farbsehen innerhalb der Phylogenie der Primaten (68)(SurrIDGE et al., 2003)

Gestrichelte rote Linie: Mono- und dichromatisch

Durchgezogene rote Linie: Polymorph

Schwarze Linie: Trichromatisch

Latein-Deutsch Bezeichnungen (69) Ordnung der Primaten

Zur Zeit werden ca. 200 Primatenarten in Zwischenordnungen, Überfamilien und Unterfamilien klassifiziert. Grob kann man die Primaten in Halbaffen und höhere Primaten einteilen. Die höheren Primaten bilden eine Unterordnung, die zwei Zwischenordnungen beinhaltet: **Altweltaffen** (*Catarrhini*) und **Neuweltaffen** (*Platyrrhini*). Die Überfamilie der Altweltaffen gruppiert sich in die Geschwänzten Altweltaffen (*Cercopithecoidea*) und die Menschenähnlichen (*Hominioidea*). Die Geschwänzten Altweltaffen gliedern sich in die Familie der Meerkatzenverwandten (*Cercopithecidae*) auf, zu der die Unterfamilien der Meerkatzenartigen (*Cercopithecinae*) und der Schlank- und Stummelaffen (*Colobinae*) gehören. Die Menschenähnlichen bestehen aus den Familien der kleinen Menschenaffen oder Gibbons (*Hylobatidae*) und der Großen Menschenaffen und Menschen (*Hominidae*). Bei den Neuweltaffen teilt sich die Überfamilie in die Familien der Springtamarine (*Callimiconidae*), der Krallenaffen (*Callitrichidae*) und der Kapuzinerartigen Affen (*Cebidae*) auf.

Die Paviane gehören zur Familie der Meerkatzenverwandten (*Cercopithecidae*) und zur Unterfamilie der Meerkatzartigen (*Cercopithecinae*). Die Gattung der Paviane (*Papio*) besteht aus 5 Arten

- **Art:** *Papio anubis* - Grüner Pavian / Anubis Pavian
- **Art:** *Papio cynocephalus* - Gelber Pavian / Babuin / Steppenpavian
- **Art:** *Papio papio* - Roter Pavian / Guineapavian / Sphinxpavian
- **Art:** *Papio ursinus* - Bärenpavian / Tschakma
- **Art:** *Papio hamadryas* - Mantelpavian

Die Altweltaffen beherrschen als Bewohner des arborealen Lebensraumes die erforderlichen Fortbewegungsweisen des Knöchelgangs, des Vierfüßlergangs und die Technik des Schwinghangelns. Der Pavian läuft im Vierfüßlergang und die etwa gleich langen Vorder- und Hintergliedmaßen sind kräftig gebaut. Ein entscheidendes Kriterium für die quadrupede Form der Fortbewegung ist der Entwicklungsgrad des äußeren Kammes in der Grube im Ellenbogenhöcker (*Fossa olecranii*). Ein kräftig entwickelter Kamm ist beim Schimpansen, Gorilla und Pavian, nicht aber beim Menschen nachweisbar (70)(Senut, 1981).

Paviane waren die ersten Affen, die aus der Waldregion in die Savanne wanderten. Auch heute noch repräsentieren manche Paviane semi-terrestrische Lebensformen.

4.1 Genetische Distanz

Zwischen Mensch und dem Gelben Pavian (*Papio cynocephalus*) ergibt sich aus molekularbiologischen Bestimmungen eine genetische Distanz von 6,6 Prozent. Zum Vergleich beträgt sie zwischen Mensch und dem Schimpansen 1,6 Prozent.

	Mensch (<i>Homo sapiens</i>)
Mensch (<i>Homo sapiens</i>)	-----
Schimpanse (<i>Pan troglodytes</i>)	1,6 Prozent
Gelber Pavian (<i>Papio cynocephalus</i>)	6,6 Prozent

Tabelle 4-1: Genetische Distanz zwischen Mensch, Schimpanse und Gelben Pavian (71) Genetische Distanzen zwischen Primaten

Für das Verständnis evolutiver Prozesse dient die Transkriptionsanalyse, die funktionell relevante genetische Unterschiede zwischen den Arten aufzeigen kann. Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig untersuchte den Grad der Gen-Expression bei Menschen, Schimpansen und Makaken. Es ist inzwischen vieles über die Evolution von DNA-Sequenzen und von Genomen bekannt, dagegen wenig, wie sich die Gen-Expression im Laufe der Evolution entwickelte. Von daher sollten nah verwandte Tierarten miteinander verglichen werden.

Das Erbgut von 19 Primatenarten, einschließlich das des Menschen wurde analysiert (72) (Gilad et al., 2004). Bei jeder Art fiel die Wahl auf 100 Gene aus der Familie der Geruchsgene. Daraus bestimmte man den Anteil der funktionslosen Pseudogene. Erwartungsgemäß bestätigte die Analyse die Sonderstellung des Menschen. Die Hälfte seiner Geruchsgene wurden schon in Pseudogene, also überflüssig gewordene Abschnitte im Genom verwandelt. Mit knapp 30 Prozent Pseudogene riecht der Pavian einiges besser als der Mensch, siehe Abb. 4-2.

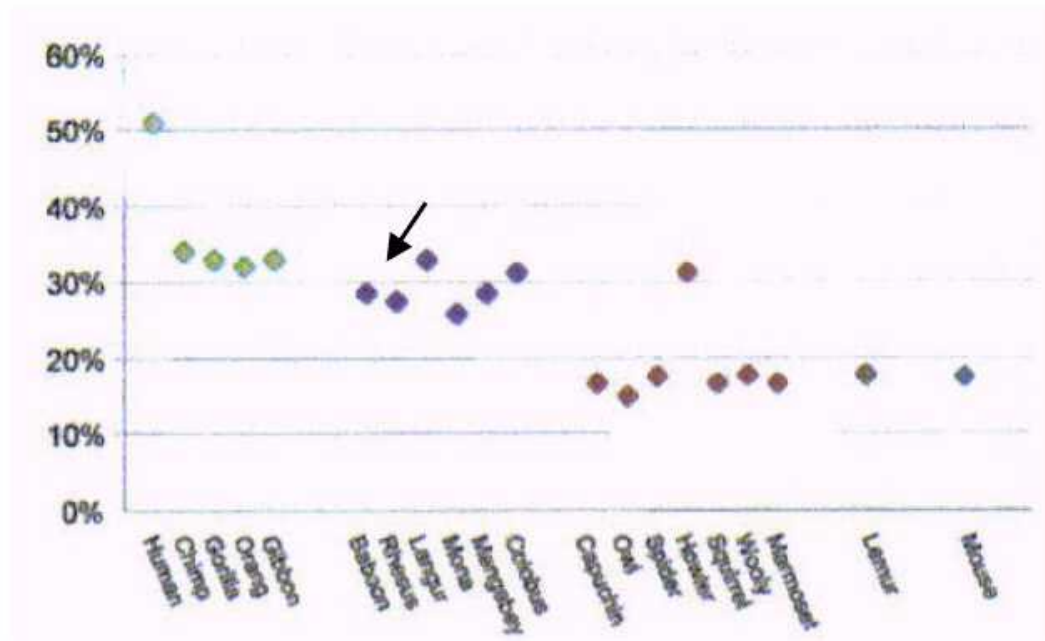


Abb. 4-2: Prozentuale Verteilung von Pseudogenen in Geruchsgenen bei 19 Primatenarten (72)(Gilad et al., 2004)

Die Rauten sind entsprechend der Klassifizierung gefärbt

Grün: Mensch und Menschenaffen

Blau: Altweltaffen: Roter Pavian (*Papio papio*) mit Pfeil gekennzeichnet, Rhesusaffe (*Macaca mulatta*), Silberlangur (*Trachypithecus auratus*), Monameerkatze (*Cercopithecus mona*), Mangabe (*Cercocebus agilis*), Mantelaffe (*Colobus guereza*)

Braun: Neuweltaffen: Gehaupter Kapuziner (*Cebus apella*), Süd-Nachtaffe (*Aotus azara*), Braunkopf-Klammeraffe (*Ateles fusciceps*), schwarzer Brüllaffe (*Alouatta caraya*), Totenkopffäffchen (*Saimiri sciureus*), Wollaffe (*Lagothrix lagotricha*), Weißbüschelaffe (*Callithrix jachus*) und Halbaffe Mongozmaki (*Eulemur mongoz*)

Grau: Maus (*Mus musculus*)

4.2 Photopigmente bei Primaten

Die Altweltaffen besitzen Photopigmente für die Wellenlängen 430 nm, 535 nm und 565 nm. Die Neuweltaffen verfügen über zusätzliche intermediäre Photopigmente im rot-grün-Bereich bei 543 nm und 556 nm. In Abb. 4-3 sind die Photopigmente in den Primatenstammbaum eingetragen (73)(Gegenfurtner und Sharpe, 2000).

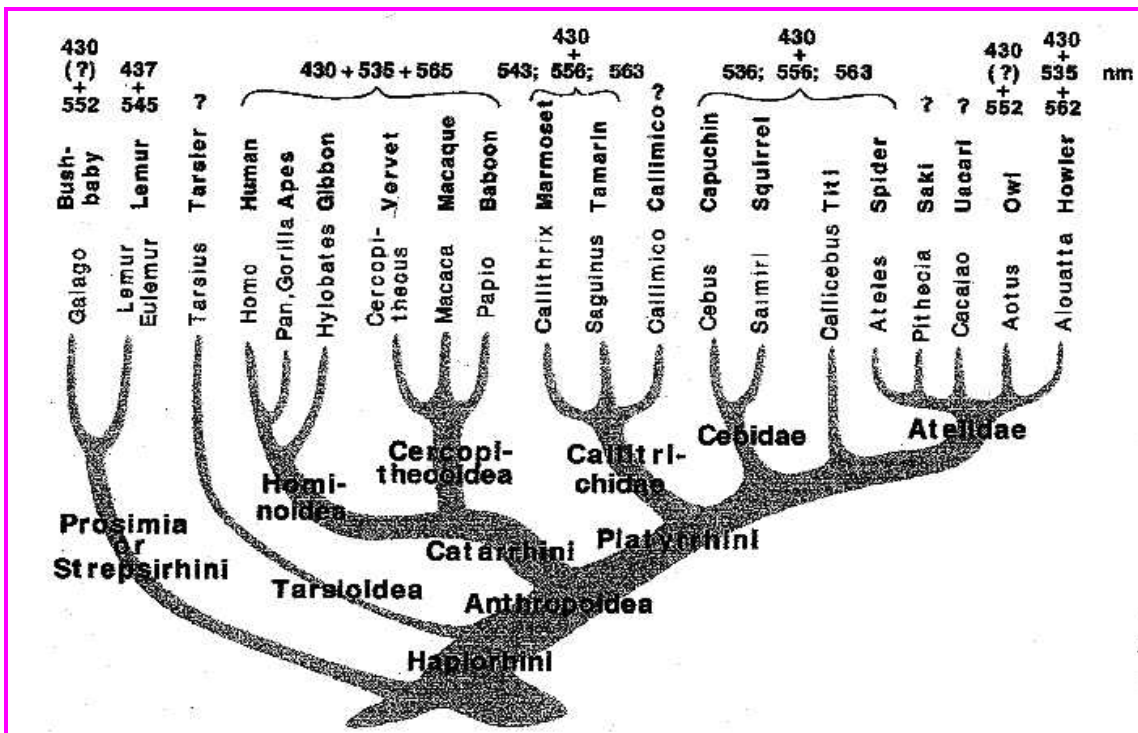


Abb. 4-3: Photopigmente bei Primaten im Überblick. Die Pigmentdaten entstammen nachfolgenden Quellen (73)(Gegenfurtner und Sharpe, 2000) (Dartnall et al., 1965, 1983; MacNichol et al., 1983; Baylor et al., 1987; Harosi, 1987; Jacobs und Neitz, 1987a/b; Jacobs et al., 1987; Petry und Harosi, 1990; Bowmaker, 1991a/b; Tovee et al., 1992; Jacobs et al., 1993, 1996a/b; Jacobs und Deegan, 1993a)

Einige der tagaktiven Halbaffen entwickelten ähnlich der Neuweltaffen einen Polymorphismus des Opsingens auf dem X-Chromosom (74)(Tan und Li, 1999). Sie besitzen wenig Zapfen und keine foveale Spezialisierung.

Neuweltaffen haben auf dem X-Chromosom nur 1 Opsingen im rot-grün-Bereich. Das Gen besteht aus drei unterschiedlichen Allelen und führt zu 3 dichromatischen und 3 trichromatischen Phänotypen. Die Weibchen mit demselben Gen auf 2 X-Chromosomen sind Trichromaten (21)(Bowmaker, 1990), (75)(Jacobs, 1998a).

Die Unterscheidung eines Dichromaten von einem Trichromaten kann nur mit spektraler Messung der ERG-Antwort, mit der Mikrospektralphotometrie, mit spektraler Ableitung an einzelnen Zapfen und mit molekularbiologischen Analysen nachgewiesen werden.

An 14 Cercopithecinae, die sich von Früchten ernähren und an 11 Colobinae, die sich von Bättern ernähren, führte man Messungen mit dem ERG-Flickerspektrum durch. Bei den zwei Altweltaffenarten traten keine signifikanten Positionsänderungen der spektralen Empfindlichkeiten auf. Zum Vergleich wurden frühere Messungen an 44 Makaken herangezogen. Die Altweltaffen besitzen S-, M- und L-Zapfenpigmente (76)(Jacobs und Deegan II, 1999).

Bei mikrospektralphotometrischen Messungen an 1 Rhesus-Affen (*Macaca mulatta*), 1 Blaumaulmeerkatze (*Cercopithecus cephus*), 1 Zwergmeerkatze (*Miopithecus talapoin*), und 4 Roten Pavianen (*Papio papio*) lagen die spektralen Empfindlichkeiten der S-Zapfen bei ca. 430 nm, der M-Zapfen bei ca. 535 nm und der L-Zapfen bei ca. 565 nm (21)(Bowmaker, 1990).

	Short-wave	Middle-wave	Long-wave
<i>Macaca mulatta</i> (Rhesus) (1)	432.8 ± 4.7 (1)	534.6 ± 3.1 (14)	561.5 ± 2.1 (7)
<i>Cercopithecus</i> <i>cephus</i> (1)	430.5 ± 2.2 (6)	533.0 ± 1.1 (23)	566.5 ± 1.4 (18)
<i>Cercopithecus</i> <i>talapoin</i> (1)	430.1 ± 2.5 (2)	534.3 ± 1.3 (23)	566.1 ± 2.3 (12)
<i>Papio papio</i> (baboon) (4)	428.5 ± 3.3 (4)	536.4 ± 1.2 (40)	564.5 ± 1.2 (30)
Total Old World (7)	430.9 ± 0.9 (13)	535.1 ± 0.5 (100)	565.2 ± 0.9 (67)
Human (5)	419.0 ± 2.1 (4)	531.4 ± 0.7 (71)	563.7 ± 0.6 (102)

Abb. 4-4: Spektrale Empfindlichkeiten λ_{\max} in nm der Photorezeptoren bei 7 Altweltaffen (einschließlich 4 Roten Pavianen) und bei 5 Menschen. Die untersuchten Photorezeptoren stehen unter den Angaben der Wellenlängen in Klammern (21)(Bowmaker, 1990)

Bei den Altweltaffen verschieben sich die spektralen Empfindlichkeiten der Zapfentypen im Vergleich zum Menschen in den langwelligeren Bereich.

4.3 Grüner Pavian (*Papio anubis*)



Grüne Paviane kommen in Wäldern, Steppen und Savannen vor. Ihre Ausbreitung reicht von Mali bis Äthiopien. Vereinzelte Gruppen sind sogar in den gebirgigen Regionen der Sahara anzutreffen. Der Grüne Pavian bevölkert das größte Gebiet aller Pavianarten.

Die Retina des Pavians scheint ähnlich aufgebaut zu sein wie die des Menschen. Der Vitamin A Metabolismus entspricht beim Grünen Pavian und Gelben Pavian dem in der menschlichen Retina (77)(Cammer et al., 1990).

4.3.1 Spektrale Empfindlichkeit

Bei 6 Grünen Pavianen wurde die Amplitude der ERG-Antworten ab dem Zeitpunkt der a-Welle bis zur Spitze der b-Welle unter monochromatischen Lichtverhältnissen gemessen. Die Gesamtzeit ergab sich aus der Latenz-Zeit bis zur Spitze der b-Welle. Die skotopischen und photopischen spektralen Empfindlichkeitsfunktionen sind in Abb. 4-5 und Abb. 4-6 dargestellt. Die skotopischen spektralen Empfindlichkeitsfunktionen stimmen gut mit der menschlichen CIE-skotopischen Funktion überein (78) (Adams et al., 1968).

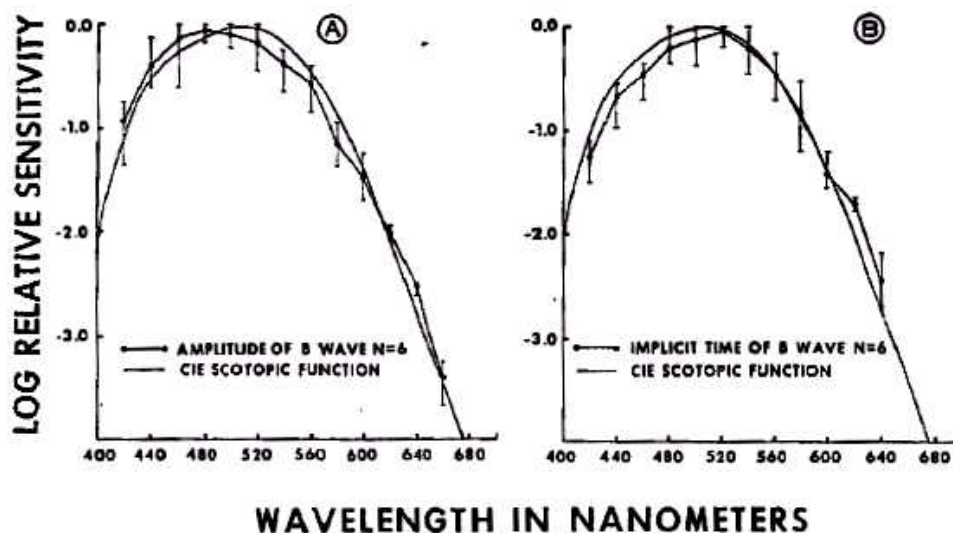


Abb. 4-5: Gemittelte skotopische spektrale Empfindlichkeitsfunktionen von 6 Grünen Pavianen. Amplitude der b-Welle (Bild A) und Latenz-Zeit bis zur Amplitudenspitze der b-Welle (Bild B) (78)(Adams et al., 1968)

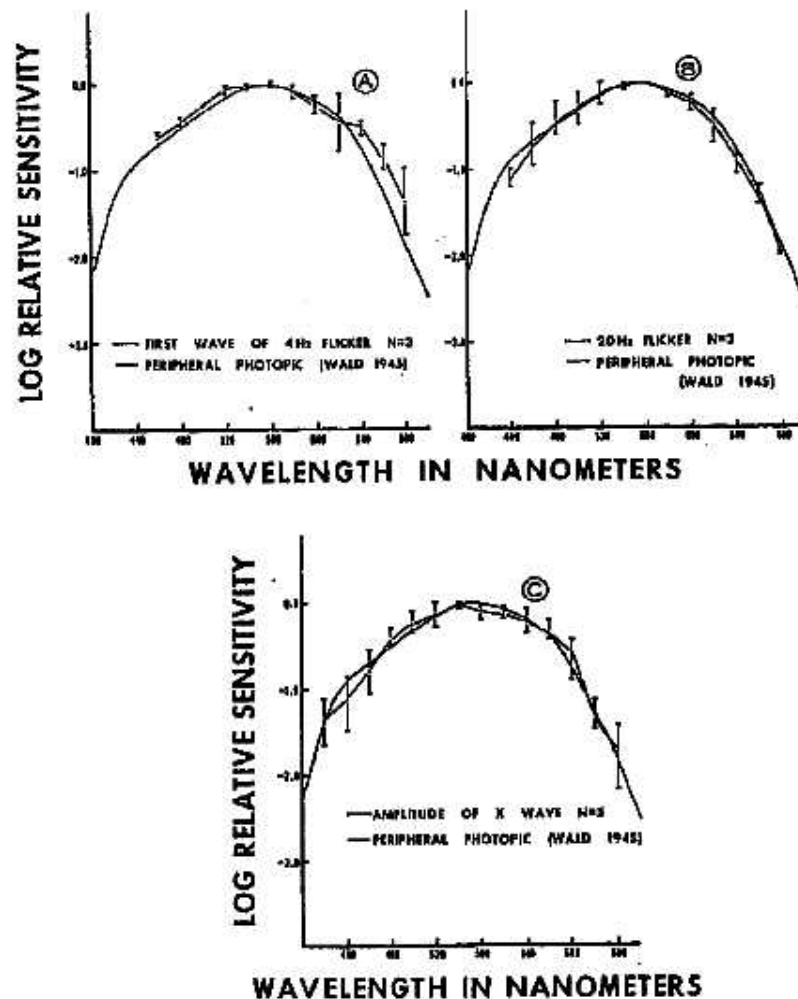


Abb. 4-6: Gemittelte photopische spektrale Empfindlichkeitsfunktionen von 3 Grünen Pavianen (78)(Adams et al., 1968). Kurven psychophysischer Messungen am Menschen (ohne Toleranzbalken) dienen als Vergleich (28)(Wald, 1945)

- A) 4 Hz Flicker-Antwort
- B) 20 Hz Flicker-Antwort
- C) Adaptation an weißes Licht (5 Grüne Paviane)

Bei den skotopischen spektralen Empfindlichkeitsfunktionen erreichten die Amplituden der b-Wellen Werte von 25 bis 50 μ Volt. Die Latenz-Zeit bis zur Amplitudenspitze der b-Welle lag im Bereich von 120 bis 140 msec. Bei den photopischen spektralen Empfindlichkeitsfunktionen wurden Werte von 5 bis 15 μ Volt gemessen (78)(Adams et al., 1968).

Die photopischen spektralen Empfindlichkeitsfunktionen stimmen mit den aus psychophysischen Tests erhaltenen Empfindlichkeiten (28)(Wald, 1945) gut überein.

4.3.2 Häufigkeitsverteilung der retinalen Zelltypen

Mit tangentialen Schnitten durch den Bereich der Fovea eines Grünen Pavians wurden die räumlichen Dichten der retinalen Zelltypen mit dem Transmissionselektronenmikroskop bestimmt. Die Dichten der Horizontalzellen und Bipolarzellen korrelierten mit der Zapfendichte, nicht aber mit den Dichten der Amakrinzellen und Müller-Zellen. Im Abstand 100 μm von der Fovea liegt die Zapfendichte bei 113 000 Zapfen pro mm^2 . In Tabelle 4-2 sind die retinalen Zelltypendichten eines Grünen Pavians zusammengestellt (79)(Krebs und Krebs, 1989).

Zelltypen pro mm^2 in der Fovea eines Grünen Pavians	
Pigmentepithel	5 300
Zapfen	113 000 ¹⁾
Horizontalzellen	20 000
Bipolarzellen	89 000
Amakrinzellen	10 200
Müller-Zellen	20 000

Tabelle 4-2: Zählung der retinalen Zelltypen pro mm^2 in der Fovea eines Grünen Pavians mit dem Transmissions-Elektronenmikroskop (79)(Krebs und Krebs, 1989)

¹⁾ Wert der Zapfendichte im Abstand 100 μm von der Fovea

In der Fovea des Grünen Pavians wurde eine Gruppe von 500 Zapfen mit einer sehr hohen Dichte von 380 000 Zellen pro mm^2 beobachtet (79)(Krebs und Krebs, 1989).

Abb. 4-7 zeigt eine lichtmikroskopische Aufnahme eines tangentialen Schnitts durch den Bereich der Fovea eines Grünen Pavians.

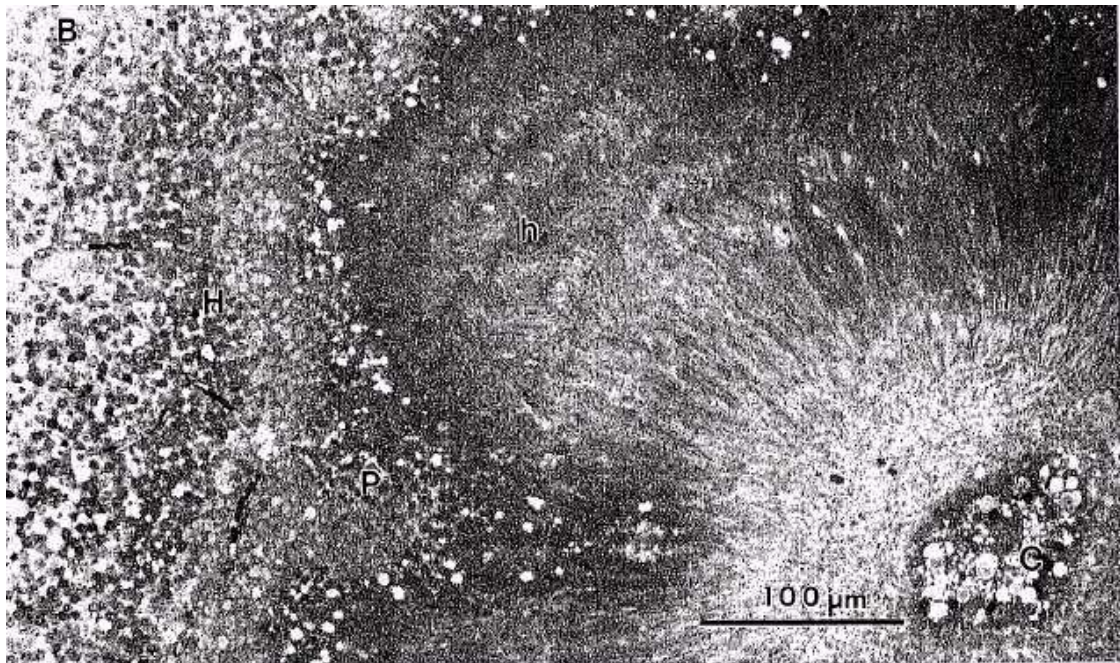


Abb. 4-7: Lichtmikroskopische Aufnahme eines tangentialen Schnitts durch den Bereich der Fovea eines Grünen Pavians. Das Zentrum der Fovea ist mit C gekennzeichnet. B: Bipolarzellen, H: Horizontalzellen, P: Pigmentepithel. Das Feld sehr hoher Zapfendichte erscheint im Zentrum C. Auflösung x262 (79)(Krebs und Krebs, 1989)

In der Fovea des Grünen Pavians sind 1,5 Zapfen auf eine Horizontalzelle und ca. 3 Bipolarzellen auf einen Zapfen verschaltet. Eine Kodierung der Farbkanäle könnte schon auf dem Niveau der Bipolarzellen stattfinden (79)(Krebs und Krebs, 1989).

Mit vertikalen Schnitten durch die Retina bestimmte man bei 5 Grünen Pavianen die Anzahl der Ganglienzellen mit dem Lichtmikroskop und der Querschnitt des optischen Nervs wurde elektronenmikroskopisch untersucht. Die Anzahl der Ganglienzellen liegt bei 1,41 bis 1,81 Millionen Zellen (Standardabweichung $\pm 169\,927$ Zellen). Die größten Dichten der Ganglienzellen treten im Bereich der Fovea mit ca. $33\,750\text{ gc/mm}^2$ (Ganglienzellen pro mm^2) auf (80)(Fischer und Kirby, 1991).

Grüne Paviane besitzen einen stärker ausgeprägten Visual streak als die übrigen nicht-hominiden Primaten. Der Visual streak erscheint bei der Linie gleicher Dichte von $2\,000\text{ gc/mm}^2$. Innerhalb des Visual streaks sind die Somata der Ganglienzellen kleiner als außerhalb. In der nasalen und temporalen Retina werden bei einer Exzentrizität von 10,5 mm die Somata sehr groß, siehe Abb. 4-8 (80)(Fischer und Kirby, 1991).

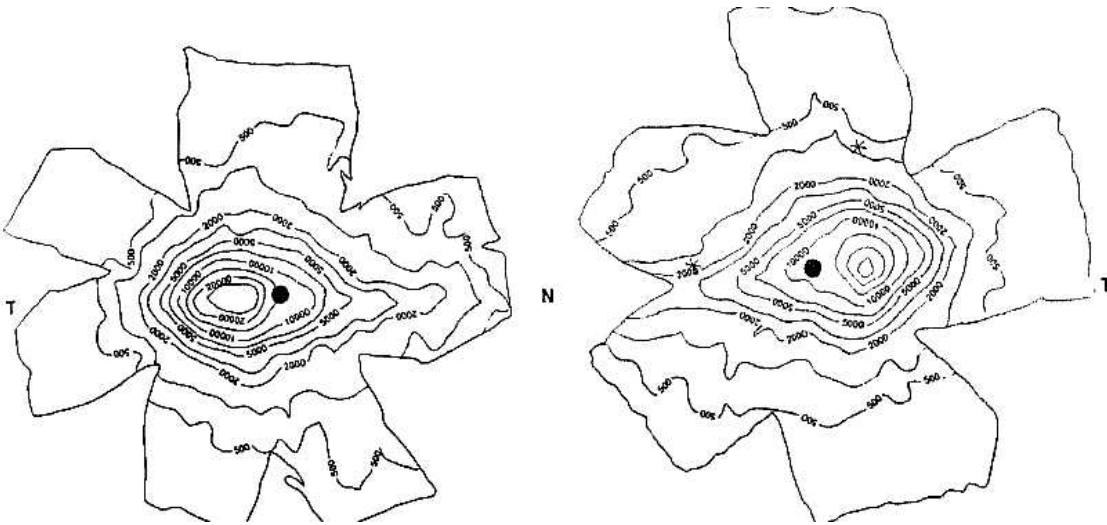


Abb. 4-8: Topographie der Ganglienzellichten in der Retina des rechten Auges (Bild links) und des linken Auges (Bild rechts) eines Grünen Pavians. Die Orte gleicher Dichten beziehen sich auf die zusammenhängenden Linien. Das Kreuzchen in der Retina des linken Auges markiert die vergleichenden Untersuchungen über die Größe der Somata. N: Nasal, T: Temporal, Skala = 5,0 mm (80)(Fischer und Kirby, 1991)

4.3.3 Variation der M- und L-Zapfenzahl

Aus der Analyse des relativen Verhältnisses der L- zu M-Zapfen-mRNA läßt sich eine nasal-temporale Asymmetrie bei den Altweltaffen und beim Menschen erkennen. Mit der PCR-SSCP bestimmte man die mRNA der Zapfen bei den Altweltaffen, dabei wurde die RNA aus der Retina isoliert und in eine cDNA revers transkribiert. Ab einer Exzentrizität von 45 Grad änderte sich das relative Verhältnis der L- zu M-Zapfen-mRNA bei den Altweltaffen im Gegensatz zum Menschen nicht mehr. Bei den Altweltaffen war das relative Verhältnis im temporalen Bereich um 30 Prozent größer als im nasalen Bereich. Beim Grünen Pavian-Männchen mit Nr. 17 erreicht das relative Verhältnis der L- zu M-Zapfen-mRNA den Wert 3:1 und beim Grünen Pavian-Männchen mit Nr. 26 den Wert 1:1, siehe Abb. 4-9 Bild B (58)(Deeb et al., 2000).

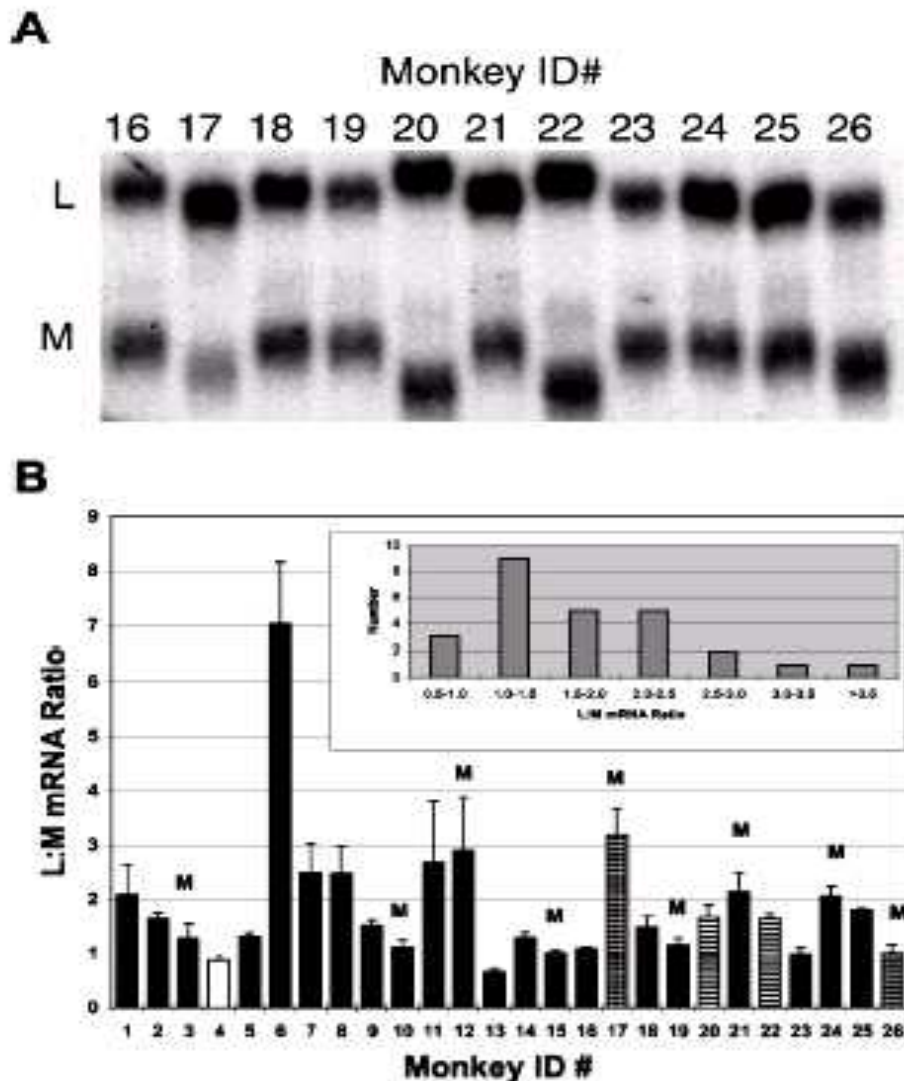


Abb. 4-9: Relatives Verhältnis der L- zu M-Zapfen-mRNA in der Retina von Altweltaffen (58)(Deeb et al., 2000)

Bild A: PhosphorAufnahme einer Gel-Konformation von PCR-Segmenten. Die Nummern der Altweltaffen (Abszisse) korrespondieren mit denen im Bild B

Bild B: Schwarz/weiß Karo-Balken: Grüne Pavian-Männchen Nr. 17 und Nr. 26

Schwarzer Balken: Schweinsaffen (*Macaca nemestrina*)

Weißer Balken: Rhesusaffen (*Macaca mulatta*)

Gestreifter Balken: Langschwanz-Makaken (*Macaca fascicularis*)

Männchen sind mit M über den Balken gekennzeichnet

Eine andere Arbeit zeigt bei einem topographischen Vergleich der Gen-Expression der L-Zapfen- und M-Zapfenopsine in der Retina von juvenilen Grünen Pavian-Männchen und in der menschlichen Retina einen Anstieg des Werts für die L-Zapfen-mRNA zwischen dem fovealen und peripheren Bereich. Die Verteilung des relativen Verhältnisses der Zapfen-mRNA wurde mit der QRT-PCR gemessen, siehe Abb. 4-10 (81)(Neitz et al., 2006).

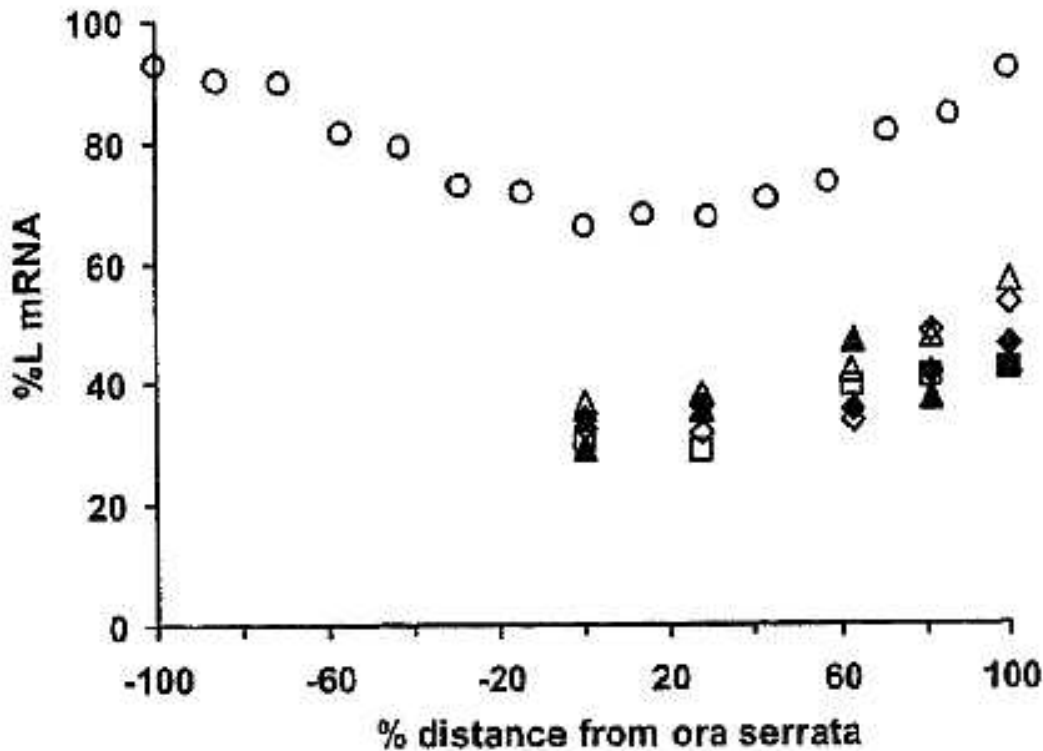


Abb. 4-10: Topographie des prozentualen Anteils der L-Zapfen-mRNA in der Retina von 4 Grünen Pavianen (Pictogramme) im Vergleich zur menschlichen Retina (Kreise) (81)(Neitz et al., 2006)

4.4 Roter Pavian (*Papio papio*)



Rote Paviane bewohnen ein kleines Gebiet im westlichen Afrika. Ihr Verbreitungsgebiet liegt in Guinea, Senegal, Gambia, im südlichen Mauretanien und im westlichen Mali. Nachts ziehen sie sich zum Schlafen auf Bäume zurück. Über ihr Sozialverhalten ist wenig bekannt. Der Rote Pavian ist die kleinste Pavianart.

4.4.1 Spektrale Empfindlichkeit

Mit der Mikrospektralphotometrie wurde das trichromatische Farbsehen des Roten Pavians sehr systematisch untersucht. Die spektrale Empfindlichkeit der Photorezeptoren wurde bei 3 Roten Pavian-Männchen und 1 Roten Pavian-Weibchen in der Nähe der Fovea gemessen.

Die maximalen Wellenlängen λ_{\max} der spektralen Empfindlichkeiten der Zapfen liegen im Mittel bei 430 nm, 536 nm und 565 nm, die der Stäbchen tritt bei etwa 501 nm auf, siehe Abb. 4-11.

Species	Sex	Short-wave cones	Middle-wave cones	Long-wave cones	Rods
<i>Papio papio</i> (i)	M	430.5±3.5 (3)	536.4±4.3 (11)	564.3±3.7 (7)	500.5±3.5 (3)
<i>Papio papio</i> (ii)	M	-	535.2±3.3 (8)	565.7±1.6 (2)	-
<i>Papio papio</i> (iii)	M	-	538.8±4.3 (4)	564.4±7.0 (6)	502.3±2.7 (5)
<i>Papio papio</i> (iv)	F	426.0 (1)	535.6±3.5 (9)	567.8±2.8 (7)	500.9±1.5 (5)

Abb. 4-11: Spektrale Empfindlichkeiten der Photorezeptoren von 4 Roten Pavianen. In Klammern steht die Anzahl der untersuchten Photorezeptoren. Jede Wellenlänge ist mit der Standardabweichung versehen (82)(Bowmaker et al., 1991)

4.4.2 Häufigkeitsverteilung der S-Zapfen

Die Verteilung der S-Zapfen in der peripheren Retina des Roten Pavians ist bei verschiedenen Exzentrizitäten regulär. Bei einer Exzentrizität von 5,0 mm wurde eine S-Zapfendichte von 470 Zapfen pro mm² ermittelt. Die S-Zapfen in der peripheren Retina des Lisztäffchens (*Saguinus oedipus*) sind zufallsverteilt (83)(Martin et al., 2000).

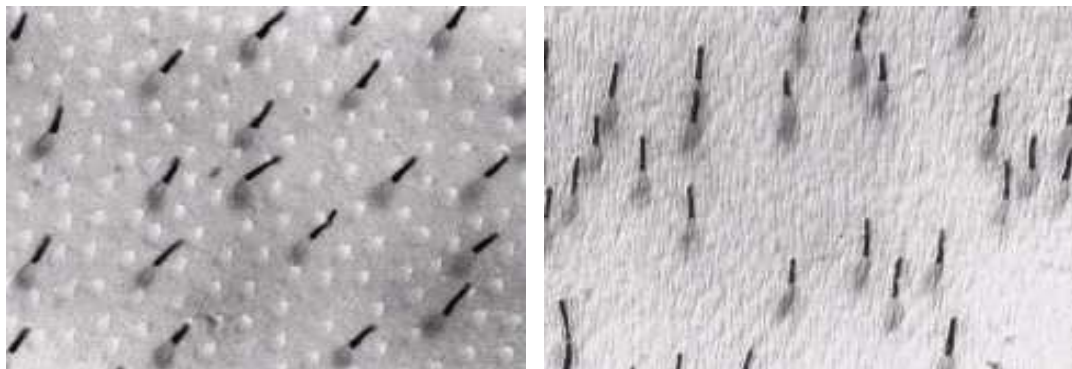


Abb. 4-12: Verteilung der S-Zapfen in der peripheren Retina des Roten Pavians (Bild links) bei einer Exzentrizität von >10,0 mm im Vergleich zum Lisztäffchen (Bild rechts). Die S-Zapfen „schwarze Stifte“ sind mit einem Antiserum gefärbt (83)(Martin et al., 2000)

Die S-Zapfen sind beim Pavian und Mensch nicht zufallsverteilt. Der statistische Packungsfaktor PF-Faktor für die Regularität ist beim Pavian kleiner als beim Orang Utan und Schimpansen. Bemerkenswert ist die große Regularität in der Verteilung der S-Zapfen beim Makaken, siehe Abb. 4-13. Die Regularität ist von der Dichte der S-Zapfen unabhängig (83)(Martin et al., 2000).

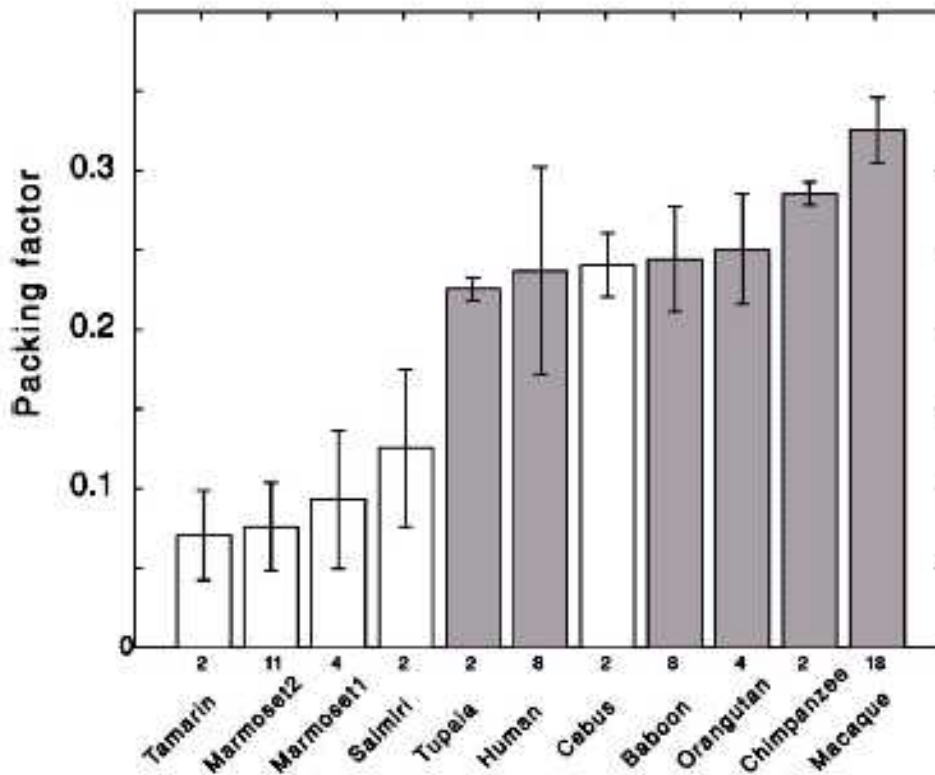


Abb. 4-13: Vergleich des statistischen Packungsfaktors PF. Jeder Balken zeigt den Durchschnittswert und die Standardabweichung für retinale Proben. Die Probenanzahl steht an der Abszisse (83)(Martin et al., 2000).

Dunkler Balken: Tupaja (*Tupaia belangeri*), Mensch, Roter Pavian, Orang Utan, Schimpanse und Makake (*Macaca nemestrina*)

Weißer Balken: Lisztäffchen (*Saguinus oedipus*), Weißbüschelaffe (*Callithrix jacchus*), Totenkopffäffchen (*Saimiri sciureus*) und Gehaupter Kapuziner (*Cebus apella*)

4.4.3 Variation der M- und L-Zapfenzahl

Bei mikrospektralphotometrischen Untersuchungen über die Verteilung der M- und L-Zapfen in der Retina von 4 Roten Pavianen wurden 120 Zellen analysiert. Die M-Zapfen kommen in der Nähe des fovealen Bereichs in größerer Anzahl vor (82)(Bowmaker et al., 1991).

Species	Sex	Middle-wave cones	Long-wave cones	Ratio
<i>Papio papio</i> (i)	M	21	14	1.50
<i>Papio papio</i> (ii)	M	20	9	2.22
<i>Papio papio</i> (iii)	M	14	15	0.93
<i>Papio papio</i> (iv)	F	17	10	1.70

Abb. 4-14: Variation der M- und L-Zapfenzahl im fovealen Bereich in der Retina der Roten Paviane (82)(Bowmaker et al., 1991)

4.5 Gelber Pavian (*Papio cynocephalus*)



Gelbe Paviane ähneln den Bärenpavianen, sind aber kleiner und die Schnauze ist weniger ausgeprägt. Sie bewohnen Savannen und lichte Wälder in Kenia, Tansania, Simbabwe und Botswana.

Die Gene der M- und L-Zapfenopsine liegen bei allen Altweltaffen auf dem X-Chromosom. Zum Pavian gibt es bis heute keine exakten Untersuchungen über die chromosomale Lokalisation der Gene der Zapfenopsine. Mit der PCR wurden beim Gelben Pavian im Exon 5 zwei Aminosäuren an den Positionen 277 und 285 analysiert, die zur spektralen Empfindlichkeit beitragen. Die Teilsequenzen der Gene im Exon 4 und Exon 5 sind mit den Teilsequenzen anderer Altweltaffen identisch (25)(Zhou und Li, 1996).

4.5.1 Häufigkeitsverteilung der retinalen Zelltypen

Die Verteilung der Zapfen in der Retina von 7 Gelben Pavianen wurde mit der histochemischen Methode durch lichtstimulierende Reduktion von NBT bestimmt. Bei einer Exzentrizität von 5 Grad beträgt die Anzahl der S-Zapfen ca. 13 Prozent, der M-Zapfen ca. 54 Prozent und der L-Zapfen ca. 33 Prozent.

Zwischen Fovea und einem Abstand von 0,25 Grad bis 0,5 Grad befinden sich ca. 3 Prozent S-Zapfen. Die S-Zapfen sind bei 1 Grad maximal. Die Anzahl der S-Zapfen wächst bei 1 Grad auf ca. 20 Prozent und fällt bei 5 Grad auf ca. 12 Prozent ab. Der typische Abstand zwischen den S-Zapfen im Bereich der Fovea beträgt ca. 6 Bogenminuten.

Die M- und L-Zapfen sind im fovealen Bereich maximal und über die Retina zufallsverteilt. In der peripheren Retina bei einer Exzentrizität von 5 Grad bis 40 Grad sind die S-Zapfen regulär verteilt (84)(Marc und Sperling, 1977).

4.5.2 Neurotransmitter

Mit der patch-clamp wurden Membranströme von midget- und parasol-Ganglienzellen an 1 Gelben Pavian und 7 Langschwanz-Makaken (*Macaca fascicularis*) gemessen. Die parasol- und midget-Ganglienzellen antworten auf die erregenden KA-, NMDA-, AMPA-Rezeptoren mit ähnlichen Amplitudenwerten und Potentialumkehr in der Nähe des Gleichgewichtspotentials der Kationen. Auch auf die hemmenden GABA- und GLY-Rezeptoren antworten die beiden Ganglienzelltypen mit ähnlichen

Amplitudenwerten und Potentialumkehr in der Nähe des Equilibriumspotentials der Chlor-Ionen. Beide Ganglienzelltypen wurden mit „Lucifer yellow“ gefärbt und mit der Epifluoreszenz aufgenommen. (85)(Zhou et al., 1994).

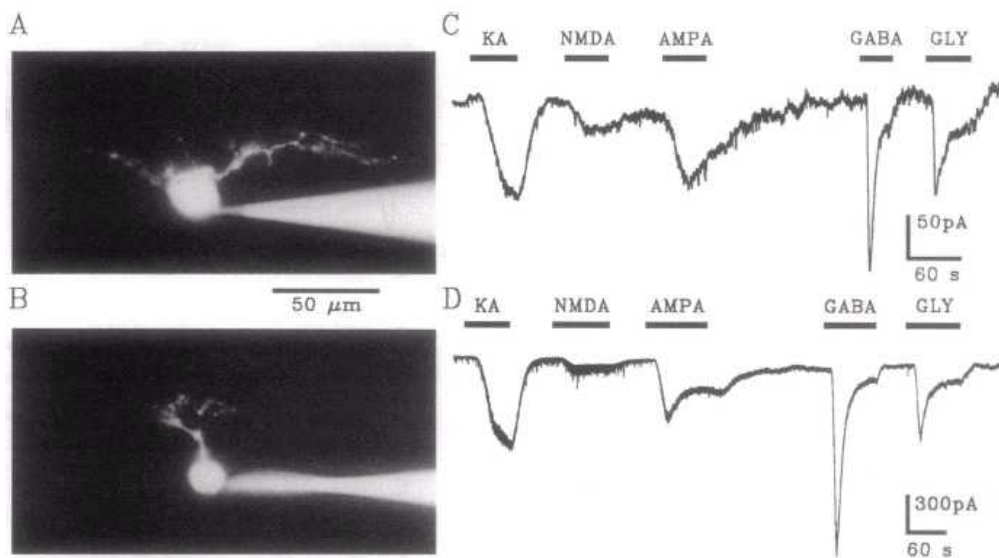


Abb. 4-15: Parasol-Ganglienzellen (Bild A) und midget-Ganglienzellen (Bild B) antworten auf erregende KA-, NMDA-, AMPA-Rezeptoren und hemmende GABA-, GLY-Rezeptoren, siehe Bild C und D (85)(Zhou et al., 1994)

An 7 Gelben Pavianen untersuchte man mit der patch-clamp den Effekt von GABA auf die Membran der retinalen Müller-Zellen. Rezeptorblocker und Agonist, sowie Umkehrpotentiale deuten auf eine mögliche Existenz von GABA-Rezeptoren in Müller-Zellen hin (86)(Reichelt et al., 1996).

4.6 Bärenpavian (*Papio ursinus*)



Das Verbreitungsgebiet der Bärenpaviane ist Angola, Sambia, Mosambik bis Südafrika und Kalahari. Die Männchen besitzen im Gegensatz zu anderen Pavianarten keine Mähne. Der Bärenpavian ist die größte und schwerste Pavianart.

Über den Bärenpavian konnten keine Untersuchungen über retinale Vorgänge des Sehsystems in Erfahrung gebracht werden.

4.7 Mantelpavian (*Papio hamadryas*)

Die Mantelpaviane (*Papio hamadryas*) leben in Nordostafrika und in Südarabien. Sie bevorzugen als Bodenbewohner felsige Gebiete mit wenig Pflanzenwuchs. Das Kennzeichen dieser Art ist die füllig ausgeprägte, silbergraue Mähne um Kopf und Vorderkörper bei den Männchen. Die Weibchen sind kürzer behaart und meist von olivbrauner Farbe. Auch die jungen Männchen besitzen zuerst ein bräunliches Fell, das später in die silbergraue Mähne übergeht. Im Münchener Tierpark Hellabrunn leben die Mantelpaviane auf einem ihrem Habitat angepassten Außengelände. Den Gruppen wird in einem separaten Innenbereich eine Tagesration von ca. 35 kg Obst und Gemüse verabreicht.



Abb. 4-16: Pavianleben im Felsengelände des Münchener Tierparks Hellabrunn

4.7.1 Mantelpavian-Retina

Abb. 4-17 zeigt eine lichtmikroskopische Aufnahme einer Mantelpavian-Retina. Die dickere Zellform der Zapfen lässt sich von der schmalen Zellform der Stäbchen unterscheiden. Die Müller-Zellen wurden mit einem monoklonalen Vimentinantikörper (V3B4, Progen, Heidelberg) immunzytochemisch markiert.

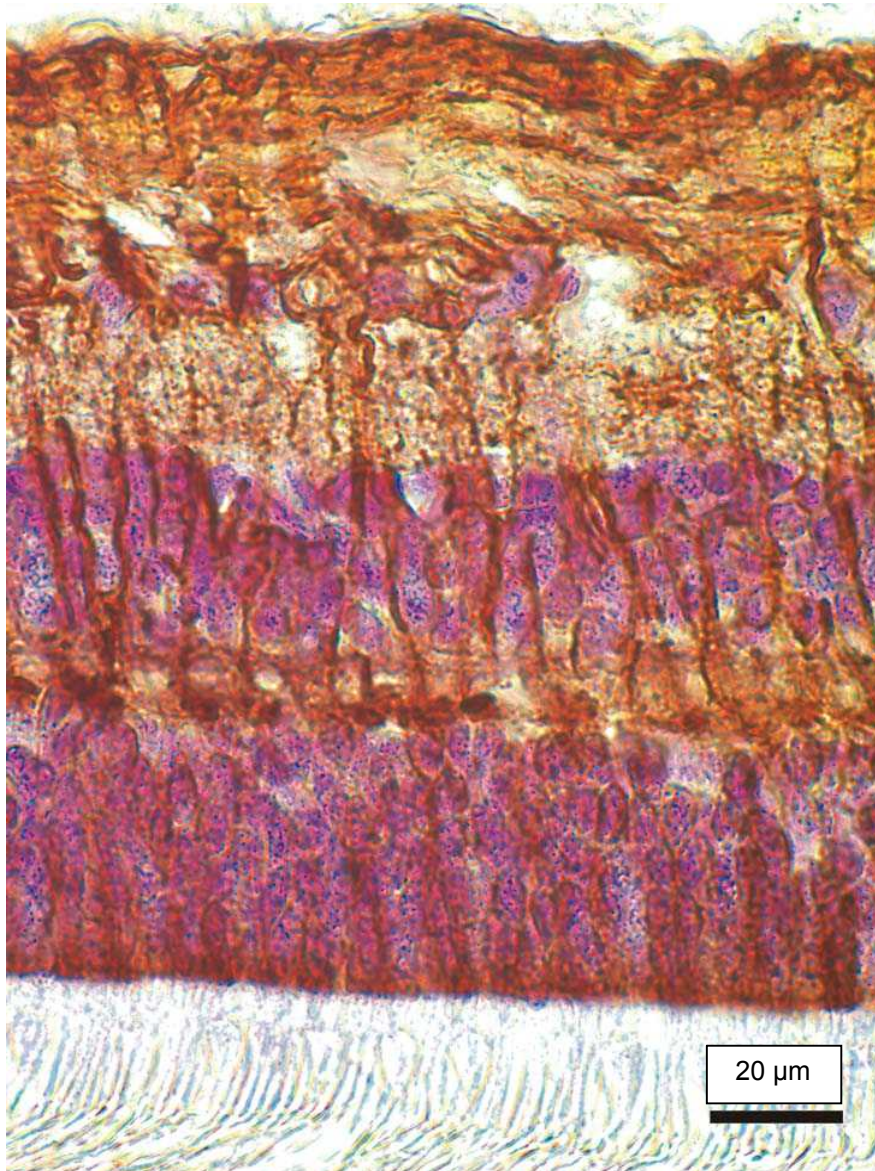


Abb. 4-17: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Mantelpavian-Retina, Skala = 20µm (87)(Reichenbach, 1999)

Mit einer morphometrischen Methode konnte in der Fovea und peripheren Retina eines neonatalen und adulten Mantelpavians eine Zählung der retinalen Zelltypen vorgenommen werden, siehe Schemazeichnung Abb. 4-18.

Die Zählung erfasste Zell-Kolumnen von 12 Neuronen mit Schichtdicken von 10 μm und Streifenbreiten von 20 μm . Die Schichtdicke bestand aus der INL und ONL.

Im fovealen Bereich wurden 3,5 Zapfen und keine Stäbchen, in der peripheren Retina wurden 1 Zapfen und 7 Stäbchen gezählt.

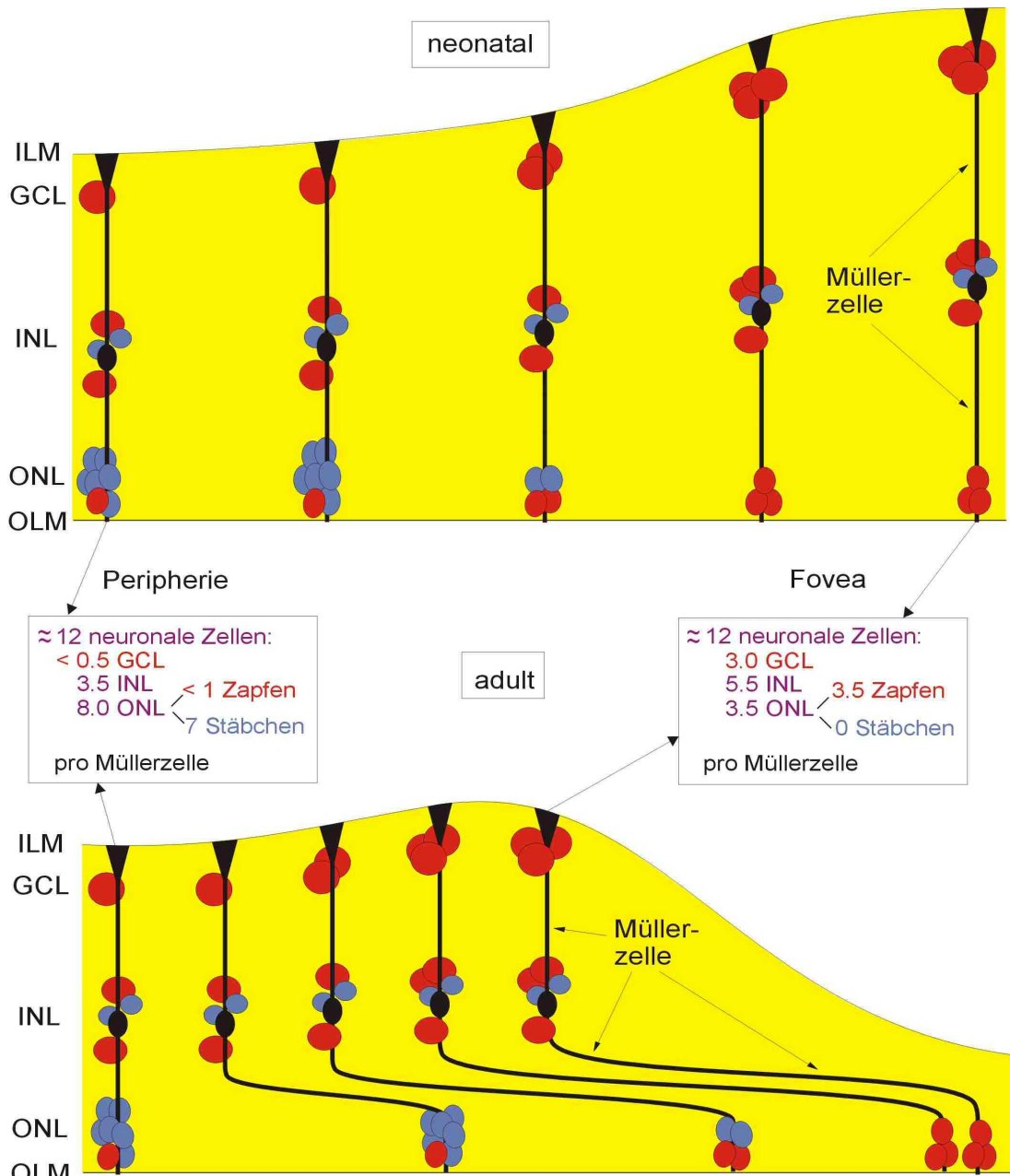


Abb. 4-18: Schemazeichnung: Zählung in Zell-Kolumnen von 12 Neuronen mit Schichtdicken von 10 μm und Streifenbreiten von 20 μm in einer neonatalen und adulten Mantelpavian-Retina. Stäbchen (blau), Zapfen (rot) (87)(Reichenbach, 1999)

5 Methode der Fourierinterferometrischen Stimulation (FIS)

Aus der Literatur konnten keine elektrophysiologischen Untersuchungen an Mantelpavianen recherchiert werden. Um zu neuen Erkenntnissen über die Mantelpavian-Retina zu gelangen, ist es nun interessant, ihre spektrale Empfindlichkeit mit der Methode der Fourierinterferometrischen Stimulation (FIS) zu messen. Dafür wurde eigens eine transportable Apparatur mit neuer Software-Umgebung für den Feldversuch konzipiert.

Die spektrale Empfindlichkeit ist ein Maß für die relative wellenlängenabhängige und intensitätsunabhängige Antwortverteilung. Alle bisherigen bekannten Verfahren zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit bei Tier und Mensch verwenden monochromatische Lichtreize. Jede Wellenlänge wird mehrmals nacheinander dargeboten. Als Antwort wird die ERG-Antwort oder intrazellulär gemessen. Diese Verfahren benötigen lange Messzeiten wegen vieler nacheinander durchzuführenden Messungen, die erforderlich sind, um eine ausreichende spektrale Auflösung zu erhalten. Mit der Methode FIS wurde eine schnelle Messung der Farbrezeption im Labor möglich (4)(Gemperlein et al., 1983), (5)(Adamczyk et al., 1983). Eine Feinstruktur im UV-Bereich der spektralen Empfindlichkeit der Schmeißfliege (*Calliphora erythrocephala*) konnte mit dieser Methode erstmals wegen der möglichen hohen spektralen Auflösung nachgewiesen werden (88)(Paul, 1981). Später fand diese Feinstruktur im UV-Bereich mit monochromatischem Licht, also nacheinander gegebenen Reizen ihre Bestätigung (89)(Kirschfeld et al., 1983).

Die dynamische Methode FIS eignet sich für höhere Intensitäten. Bei modulierten Reizen betrachtet man die Intensitätsänderungen und die zugehörige Antwort. Zwischen der unterschiedlichen Wirksamkeit gleicher Quantenmengen auf unterschiedliche Wellenlängen besteht ein weitgehender linearer Zusammenhang.

Die Methode FIS beruht auf dem Prinzip der Fourier-Spektroskopie. Die Frequenzverteilung (Spektrum) einer Lichtquelle wird durch eine optische Fourier-Transformation in ein sich zeitlich änderndes Signal (Zeitreihe) transformiert. Aus dem Zeitsignal berechnet sich das Spektrum der Lichtquelle durch numerische Fourier-Transformation. Wird die Lichtquelle vor oder nach der optischen Transformation durch eine absorbierende Substanz, z.B. durch die Photorezeptoren spektral moduliert, dann liefert die numerische Fourier-Transformation das modifizierte Spektrum. Die spektralen Anteile der Lichtquelle werden während der

Reizdauer um ein mittleres Intensitätsniveau moduliert. Das biologisch lichtempfindliche System befindet sich in einem definierten Adaptationsniveau.

Sowohl bei der Fourier-Spektroskopie als auch bei der Methode FIS dient das Michelson-Interferometer als optischer Fourier-Transformator. Das einfallende Licht wird durch den Strahlenteiler zur Hälfte unter 45 Grad reflektiert und zur Hälfte durchgelassen. An Spiegeln werden die Teilstrahlen reflektiert und über erneute Transmission und Reflexion am Strahlenteiler zur Interferenz gebracht. In Abhängigkeit von der Wegdifferenz der Teilstrahlen entsteht beim Zusammenführen eine Verstärkung oder eine Auslöschung der Amplituden ihrer Wellenlängen. Der prinzipielle Aufbau eines Michelson'schen Interferometers ist in Abb. 5-1 Bild links dargestellt.

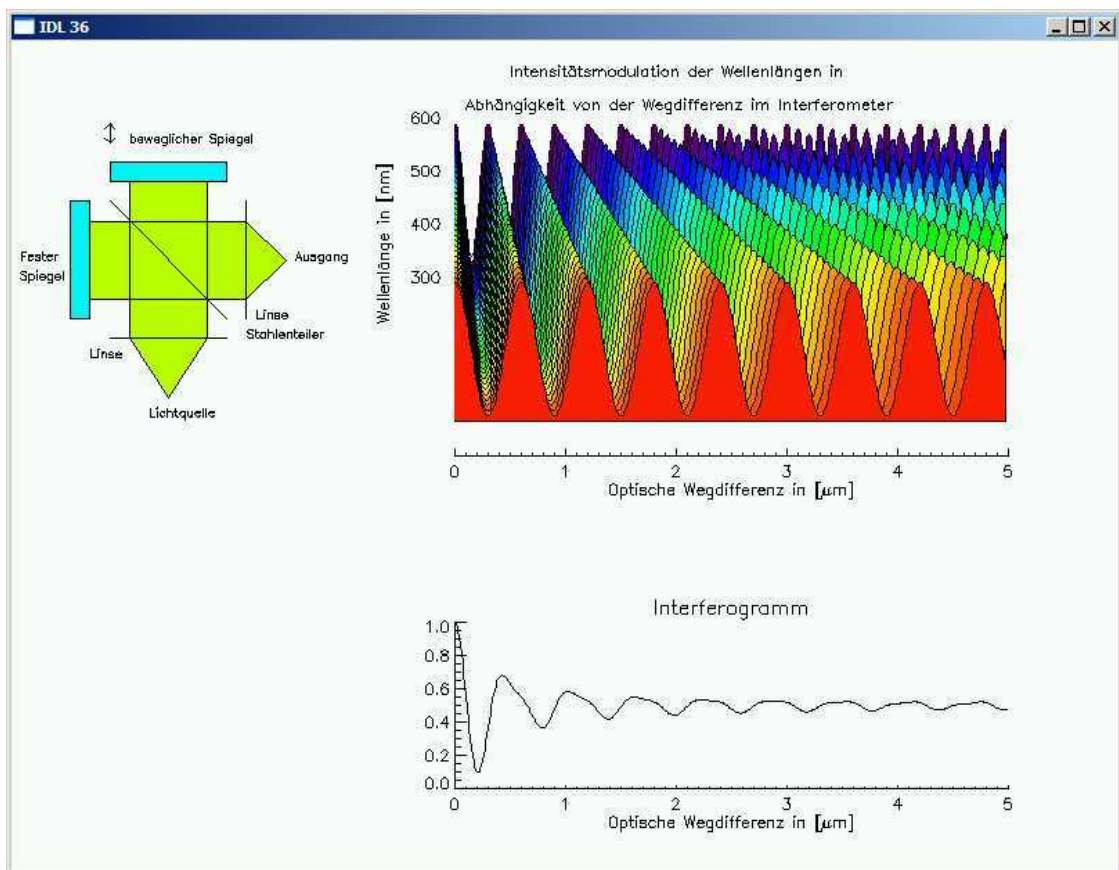


Abb. 5-1: Methode der Fourierinterferometrischen Stimulation (FIS) nach (4)(Gemperlein et al., 1983)

5.1 Modulationsfrequenz

Als Lichtquelle wurde eine Xenon-Bogenlampe als breitbandiger Strahler verwendet. Führt man die Verschiebung des Spiegels mit konstanter Geschwindigkeit durch, so sind die cos-förmigen Intensitätsamplituden in der Frequenz moduliert. Die Geschwindigkeit des fahrbaren Spiegels wird in der Fourier-Spektroskopie als Modulationsfrequenz des Laserinterferogramms angegeben. Über diesen Zusammenhang lassen sich die Modulationsfrequenzen für die Wellenlängen bestimmen.

Die Intensitätsmodulation der Wellenlängen in Abhängigkeit von der optischen Wegdifferenz bildet die Zeitachse (3. Achse der 3D-Darstellung). An der Ordinate ist der Spektralbereich von 300 nm bis 600 nm und an der Abszisse ist die optische Wegdifferenz in μm aufgetragen, siehe Abb. 5-1 oben. Durchlaufen die Teilstrahlen denselben optischen Weg (Wegdifferenz = 0), dann tritt keine Phasenverschiebung auf und die gesamte Intensität wird an der sogenannten "Weißlichtposition" durchgelassen. An dieser Stelle ist die Intensität auf eins normiert.

Werden zu jedem Zeitpunkt auf der Zeitachse die Intensitätsamplituden gegen die optische Wegdifferenz aufgetragen, so erhält man für den FIS-Reiz ein Interferogramm, siehe Abb. 5-1 unten. Bei der optischen Wegdifferenz von ca. $0,3 \mu\text{m}$ durchlaufen die Intensitätsamplituden ein Minimum. Danach bewegt sich die mittlere Intensität der modulierten Intensitätsamplituden auf einem Wert von ca. 0,5.

5.2 Spektrale Auflösung

Die spektrale Auflösung der Methode FIS hängt vom maximal durchfahrenen Weg im Interferometer ab. Die Zählung von 85 Laserwellenlängen à 635 nm führt auf eine optische Wegdifferenz von $54 \mu\text{m}$. Die spektrale Auflösung lässt sich nach dem Rayleigh-Kriterium ableiten:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2 \cdot X_{\max}}$$

Die spektrale Auflösung des Interferometers beträgt ca. 1 nm bei einer Wellenlänge von 300 nm , siehe Abb. 5-2.

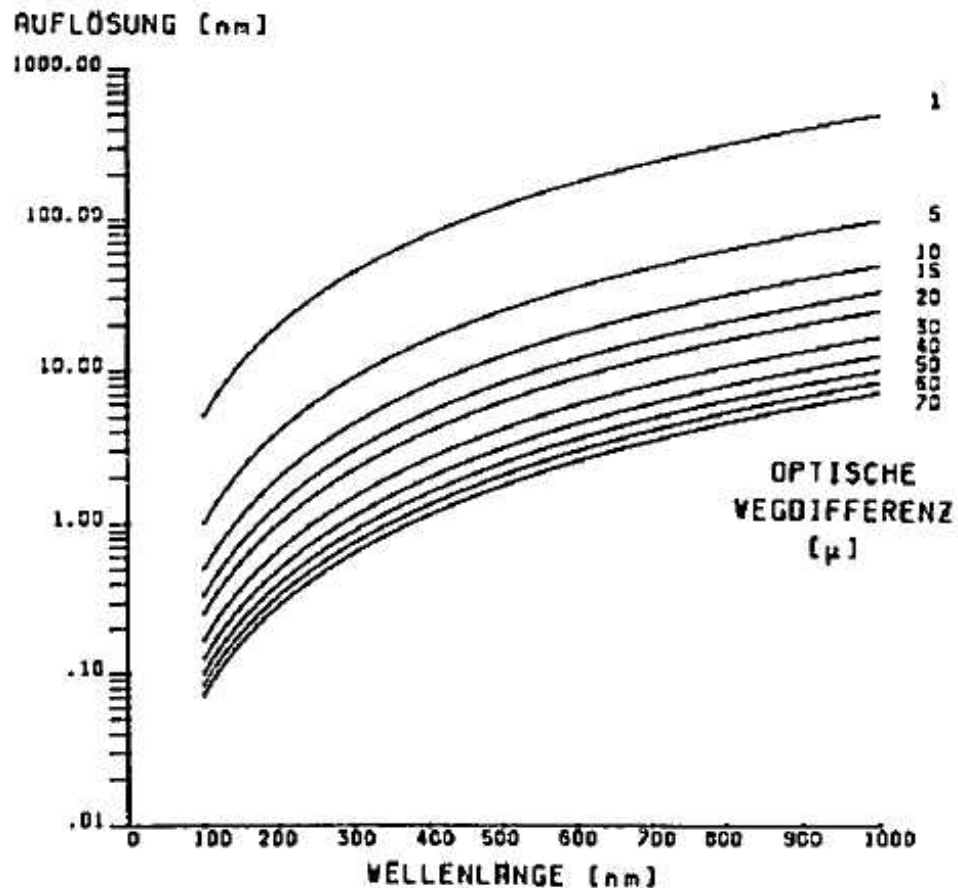


Abb. 5-2: Spektrale Auflösung des Interferometers in Abhängigkeit von der Wellenlänge bei optischen Wegdifferenzen (90)(Gemperlein, 1983/84)

5.3 ERG und spektrale Empfindlichkeit

Ein lichtempfindliches System führt durch seine spektrale Empfindlichkeit den FIS-Reiz in eine ERG-Antwort über, siehe Abb. 5-3 Bild oben. Die ERG-Antwort ist von der Reizintensität abhängig und beträgt ca. 20 μ Volt. Eine einzelne Messung dauert weniger als 20 Sekunden. Das Signal/Rauschverhältnis erhöht sich durch Mitteln mehrerer ERG-Antworten. Die Reizintensität größter spektraler Empfindlichkeit wird auf eins normiert und entspricht der skotopischen Empfindlichkeit des menschlichen Auges, siehe Abb. 5-3 Bild unten. Bei Ganzfeldbeleuchtung geht durch eine Änderung der Reizintensität im Verhältnis 1:100 die skotopische spektrale Empfindlichkeit in die photopische spektrale Empfindlichkeit über. Das Maximum verschiebt sich von 500 nm bis zu 560 nm (91)(Gemperlein, 1992).

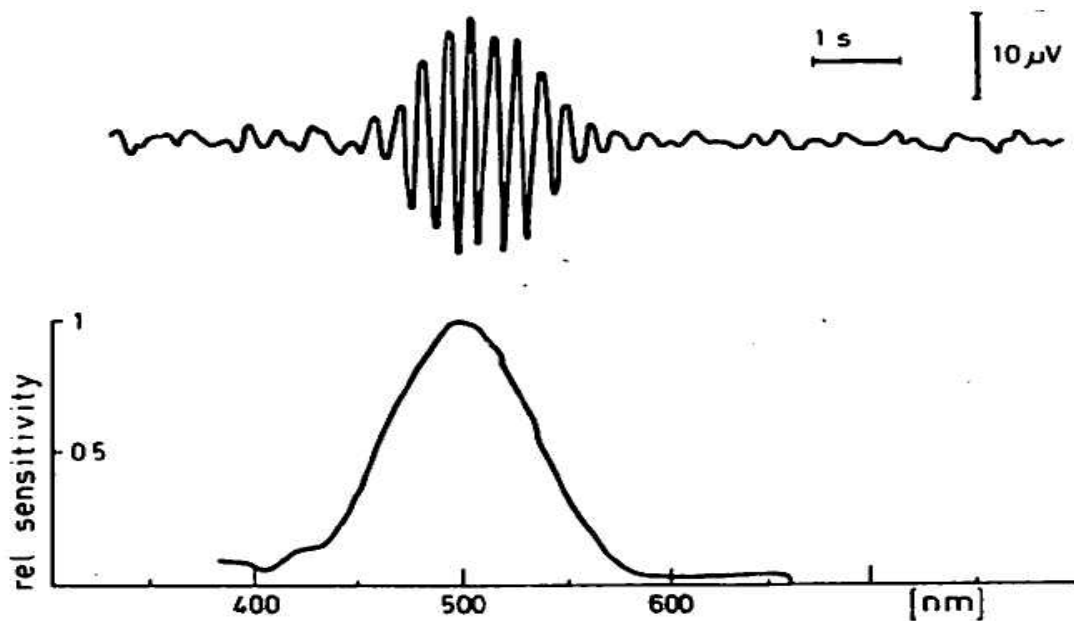


Abb. 5-3: ERG-Antwort auf FIS-Reiz (Bild oben). Skotopische spektrale Empfindlichkeit des Auges bei 500 nm (Bild unten) (3)(Gemperlein und Adamczyk, 1982)

Bei der Methode FIS wird eine Antwort auf einen Reiz in Abhängigkeit von der Wellenlänge bestimmt. Die spektrale Empfindlichkeit berechnet sich als Fourier-analytisch ermittelte lineare Systemantwort aus der Division der Antwort durch den Reiz (91)(Gemperlein, 1992). Eine quantitative Kenntnis einer Kennlinie ist nicht nötig, was einen großen Vorteil gegenüber anderen Messverfahren bedeutet (6)(Steiner, 1984).

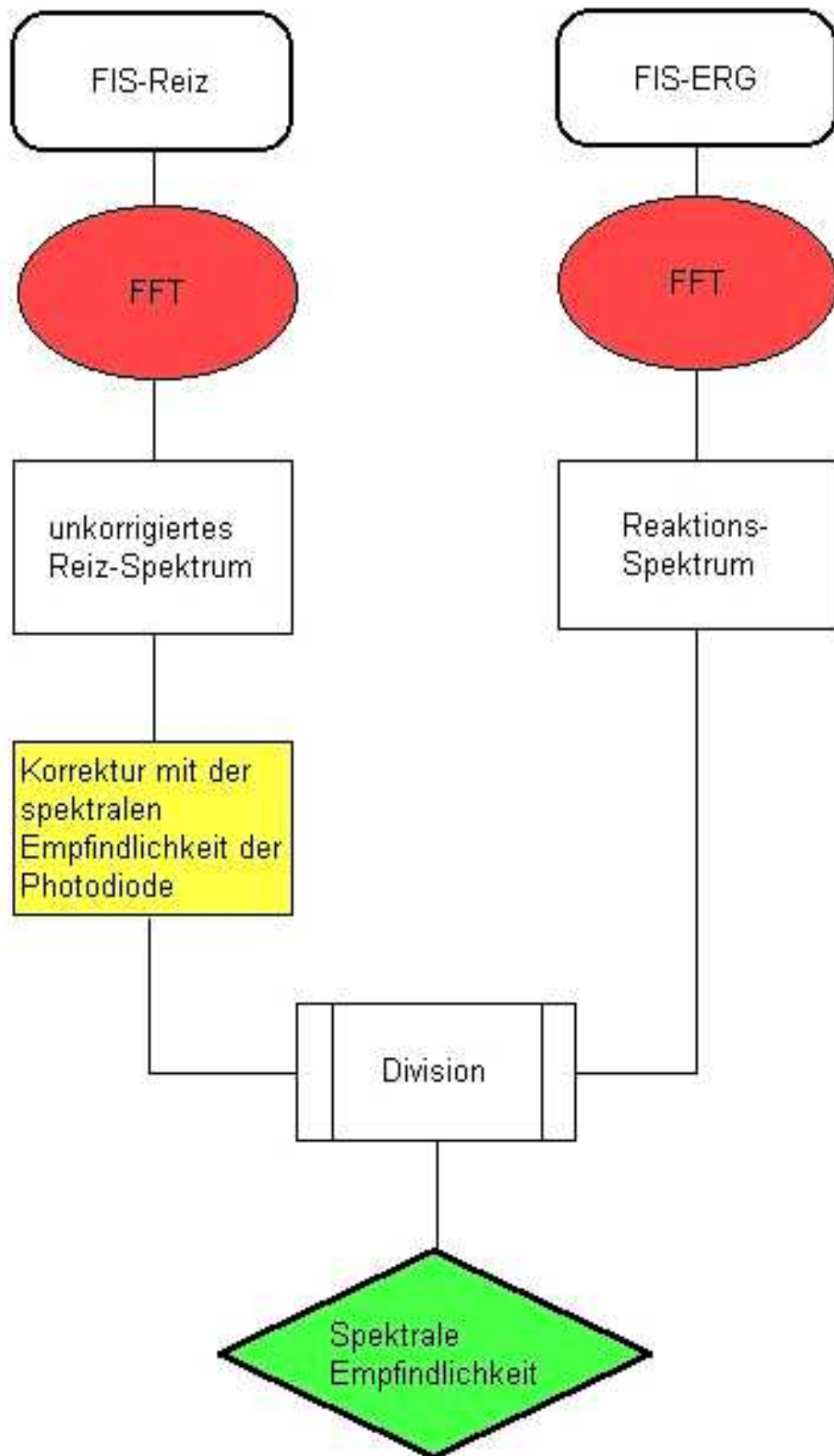


Abb. 5-4: Berechnung der spektralen Empfindlichkeit (91)(Gemperlein, 1992)

5.4 Optoelektronischer Aufbau mit rechnergestützter Erfassung und Auswertung

Der Aufbau für die Erzeugung des Lichtreizes mit der Methode FIS gestaltet sich in einen optischen, elektronischen und rechnergestützten Teil. Zum Einsatz kommen 2 Xenon-Lampen vom Typ 75 W USHIO 4 Type UXL-75 X-0, Nr. DD2206. Sie strahlen mit einer Lichtstärke von 100 cd im Bereich von 250 nm bis 1400 nm. Für den FIS-Reiz wurde der infrarote Teil ausgespiegelt. Die Stromversorgung besteht aus einem Schaltnetzteil der Fa. Till Photonics. Mit der Lichtquelle der Xenon-Lampe 1 erzeugte man die Lichtmodulation für den FIS-Reiz, eine zweite Xenon-Lampe 2 war für eine zusätzliche Adaptations-Untersuchung vorgesehen. Die ERG-Antwort wurde mit einer ERG-jet-Elektrode Fa. Universo Plastique SA gemessen.

Das Kernstück des transportablen Gesamtaufbaus FIS bildet das Interferometer. Im Rahmen eines DFG-Projekts Adamczyk Ad 71/1-1 an der Augenklinik der Ludwig-Maximilians-Universität München fertigte A. Steiner 1983 das Interferometer an. Für die Untersuchung des Farbensehens an Mantelpavianen erfuhr es inzwischen eine Weiterentwicklung, siehe Abb. 5-5 bis Abb. 5-9. Der optische Aufbau ist in einem schwarzen Aluminium-Gehäuse untergebracht, das Lichteinwirkung auf die Optik ausschließt. Das Interferometer liegt auf einem Luftpolster, das Bodenerschütterungen entgegenwirkt.

Der elektronische Teil besteht aus einem programmierbaren Hochspannungsverstärker für die Piezokeramik, der Eigenentwicklung eines Spannungsverstärkers OP 741 zur optimalen dynamischen Aussteuerung der Signale für das Interferogramm, den Laser und der ERG-Antwort. Hinzu kommt ein Ableitverstärker für das Signal der ERG-Antwort und eine PCMCIA-Schnittstelle zum Rechner (Notebook) für die AD/DA-Wandlung. Der Gesamtaufbau und die Erfassung der Methode FIS sind in Abb. 5-15 Diagramm Signalablauf dargestellt.

Zum rechnergestützten Teil gehören die Messung des FIS-Reizes (Interferogramm) und der ERG-Antwort (Reaktion), siehe Kap. 5.5 und Kap.6.6. Die Auswertung des FIS-Reizes und der ERG-Antwort werden im Kap. 7.2 erläutert. Die Entwicklung der Programme für die Messung / Auswertung des FIS-Reizes und der ERG-Antwort sind im Anhang Kap. 13 dokumentiert.

Die Programme für die Messung / Auswertung des FIS-Reizes und der ERG-Antwort sowie die Excel-Vorlage zur Berechnung der spektralen Empfindlichkeit können von der CD aufgerufen werden.

5.4.1 Interferometer

Zur Bestimmung der genauen Position des gefahrenen Weges dient ein Halbleiter-Laser mit bekannter Wellenlänge von 635 nm. Die Interferenzen werden mit einer Photodiode gemessen. Die Anzahl der Modulationsperioden des Halbleiter-Lasers ist ein Maß für den zurückgelegten Weg. An die spannungsabhängige Piezokeramik des fahrbaren Spiegels werden über einen programmierbaren Hochspannungsverstärker Spannungen von 0 Volt bis 500 Volt angelegt. Bei den Messungen bewegt sich der Spiegel mit einer konstanten Geschwindigkeit von $2,54 \mu\text{m}/\text{sec}$, den 2. Spiegel richtet man senkrecht zum fahrbaren Spiegel aus. Für die Ausrichtung sind außen am Aluminium-Gehäuse Kippschalter montiert, die die Mikrometerschrauben (motor mikes) bedienen, siehe Abb. 5-9. Für die Messung des FIS-Reizes spiegelt man mit einem Glasplättchen einen Teil der Intensitätsmodulation auf die gegenüberliegende Photodiode, der andere Teil tritt durch eine verstellbare Irisblende aus und geht zum Lichtleiter, siehe Abb. 5-5 und Abb. 5-7. Vor jeder Messung wird die „Weißlichtposition“ bestimmt. Die Spiegel sind so justiert, dass sie etwa bei der Hälfte des zurückgelegten Weges erscheint. Für die Regelung des Interferometers werden zu jedem Zeitpunkt die Werte des Halbleiter-Laserssignals und des FIS-Reizes über Photodioden erfasst. Mit einem Operationsverstärker verstärkt man die Signale, die an den BNC-Buchsen anliegen, siehe Abb. 5-9. Ein Netzteil ± 15 Volt versorgt die Mikrometerschrauben zur Feinjustierung der Spiegel und ein Netzteil 5 Volt den Halbleiter-Laser, siehe Abb. 5-8.

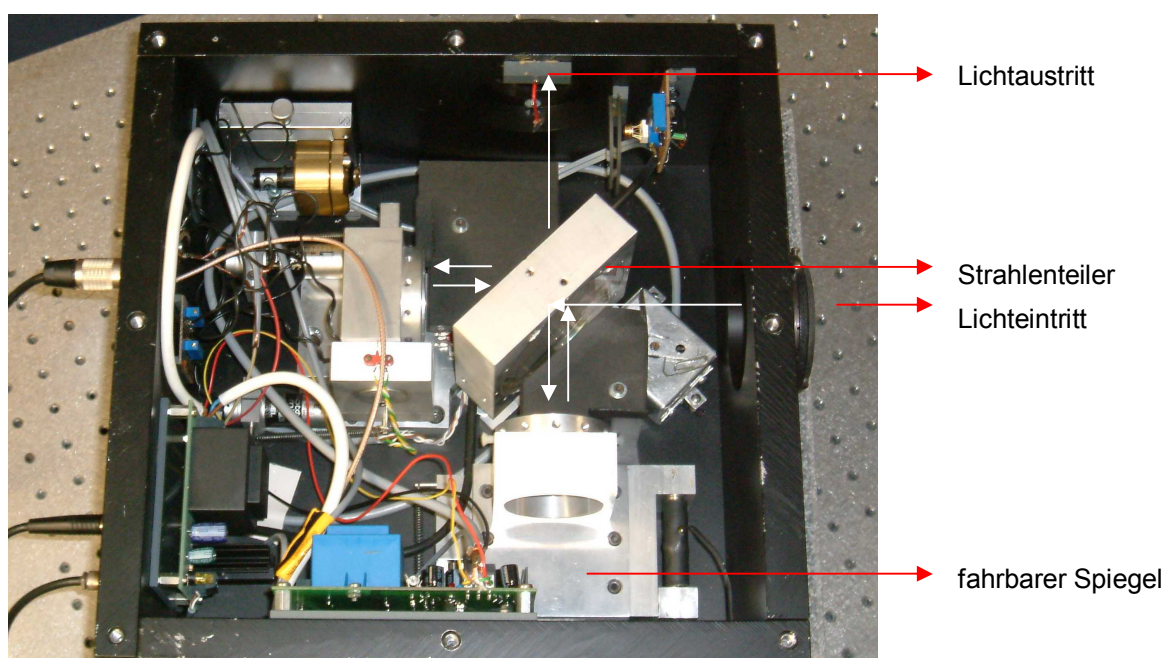


Abb. 5-5: 1. Innenansicht des Interferometers mit Lichteintritt (Xenon-Lampe 1), Lichtaustritt, Strahlenteiler und fahrbarem Spiegel

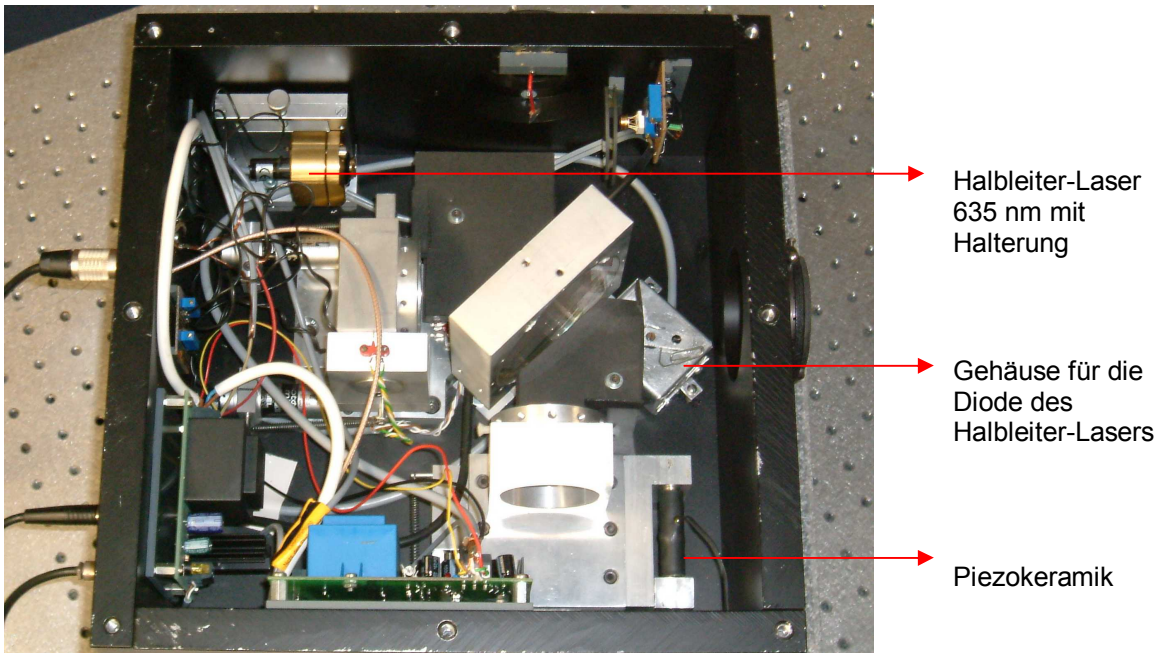


Abb. 5-6: 2. Innenansicht des Interferometers mit Halbleiter-Laser 635 nm, Gehäuse für die Photodiode des Halbleiter-Lasers und Piezokeramik zur Ansteuerung des fahrbaren Spiegels

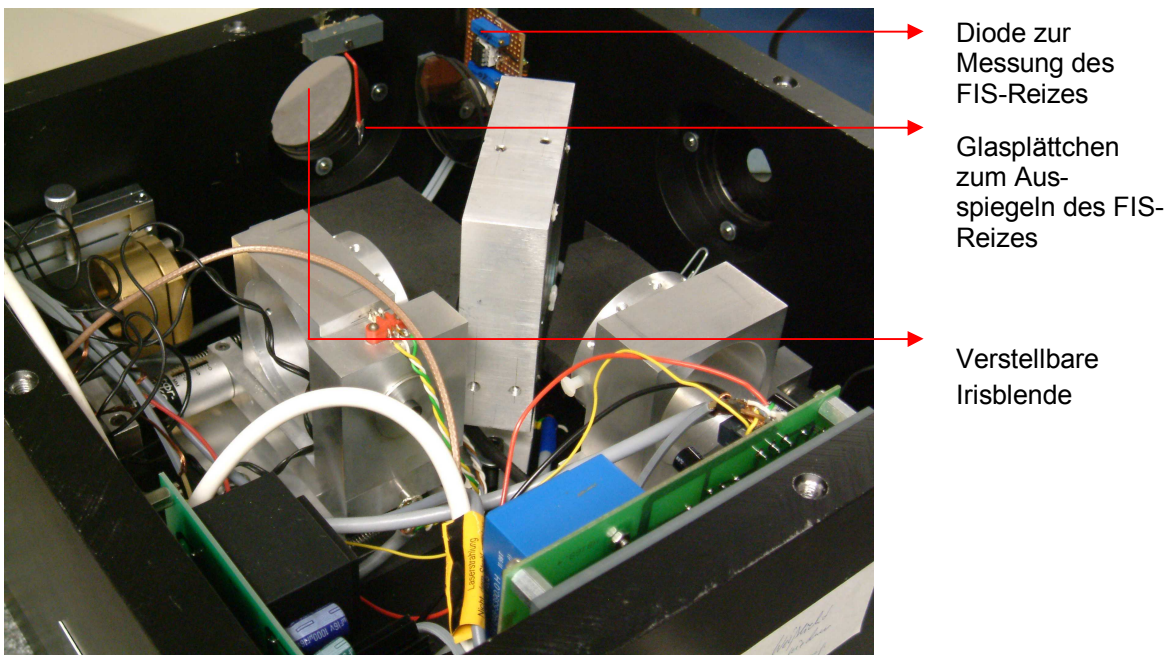


Abb. 5-7: 3. Innenansicht des Interferometers mit Photodiode zur Messung des FIS-Reizes, Glasplättchen zum Ausspiegeln des FIS-Reizes und verstellbarer Irisblende für den Lichtaustritt

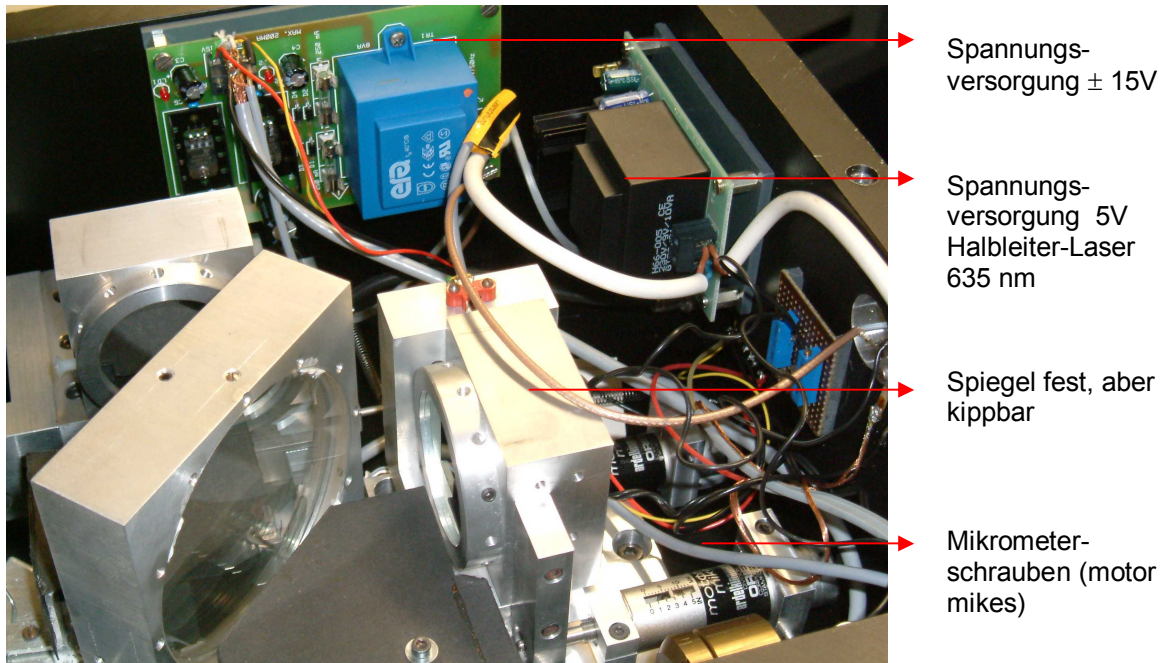


Abb. 5-8: 4. Innenansicht des Interferometers mit Spannungsversorgung ± 15 Volt für die Mikrometerschrauben zur Feinjustierung der Spiegel, Spannungsversorgung 5 Volt für den Halbleiter-Laser 635 nm und Spiegel fest, aber kippbar

An der Frontseite des Aluminium-Gehäuses sind der Eingang der Hochspannungsversorgung für die Piezokeramik und die BNC-Ausgänge für die Signale des FIS-Reizes und des Halbleiter-Lasers zu sehen. Neben den BNC-Ausgängen sind die Kippschalter zur Feinjustage der Spiegel eingebaut, siehe Abb. 5-9.

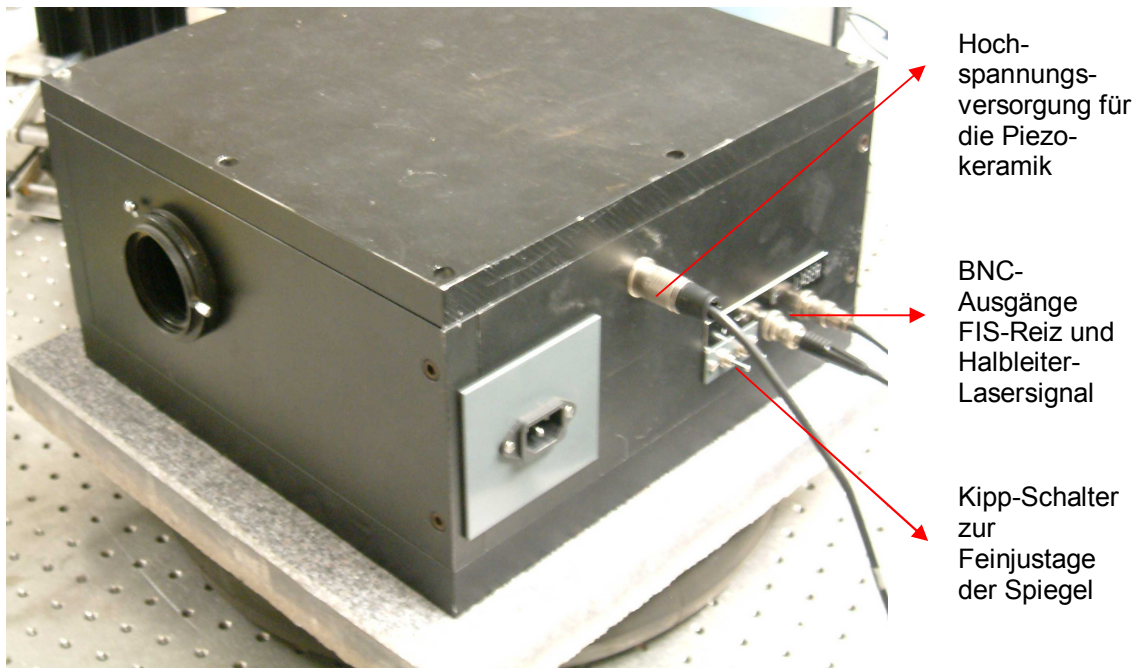


Abb. 5-9: Außenansicht des Interferometers mit Eingang der Hochspannungsversorgung für die Piezokeramik, BNC-Ausgänge für FIS-Reiz, Halbleiter-Lasersignal und Kipp-Schalter zur Feinjustage der Spiegel

5.4.2 Zubehör

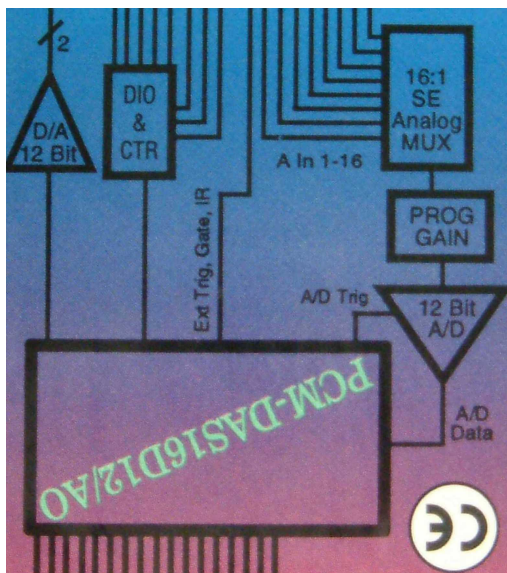


Abb. 5-10: PCMCIA-Schnittstelle

Für die Spannungsversorgung der Piezokeramik steht ein programmierbarer Hochspannungsverstärker Fa. Heinzinger electronic GmbH zur Verfügung. Für den Fahrweg des Spiegels wurde eine Spannungsrampe über die PCMCIA-Schnittstelle programmiert. Dabei arbeitet der Hochspannungsverstärker im Modus Programm. Die Ansteuerung erfolgt durch den Rechner (Notebook) über die PCMCIA-Schnittstelle. Sie dient der AD/DA-Wandlung (12 Bit) zwischen Rechner und des

Spannungsverstärkers OP 741. Der Schaltplan der Schnittstelle ist in Abb. 5-10 abgebildet. Es werden Programmierspannungen im Bereich von 0 Volt bis 10 Volt ausgegeben, über den DAC-Ausgang des Spannungsverstärkers OP 741 verstärkt und an den Eingang des

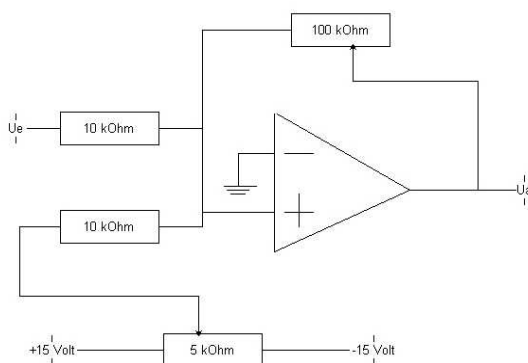
Hochspannungsverstärkers gegeben, siehe Diagramm Signalablauf in Abb. 5-15.

Die Ableitung am Auge wird mit einem galvanisch entkoppelten Ableitverstärker Fa. Walter Elektronik verstärkt. Bei den Messungen im Münchener Tierpark Hellabrunn war der Empfindlichkeitswert auf 50 $\mu\text{V}/\text{cm}$ eingestellt. Der Wert für den Hochpass-Filter lag bei 70 Hz und für den Tiefpass-Filter bei 0,15 Hz.

Am Spannungsverstärker OP 741 werden die Messbereiche eingestellt. Die Signalwerte für die ERG-Antwort, für den FIS-Reiz und für den Halbleiter-Laser werden über die ADC-Kanäle Ch0, Ch1 und Ch2 erfasst. Die Offset- und Gainwerte sind vor Beginn der Messreihen im April 2003 und Juni 2003 nochmals zu überprüfen. Abb. 5-11 zeigt die Einstellung der Offset- und Gainwerte für die Messungen an den Mantelpavianen im Münchener Tierpark Hellabrunn.



Abb. 5-11: Einstellung der Offset- und Gainwerte am Spannungsverstärker OP 741 bei den Messungen am Mantelpavianauge im Münchener Tierpark Hellabrunn



Bei der Wahl von 10 $\text{k}\Omega$ Eingangswiderstand und 100 $\text{k}\Omega$ Rückkopplungswiderstand erzielt man eine 10-fache Spannungsverstärkung.

Abb. 5-12: Prinzip des Spannungsverstärkers OP 741

5.4.3 Ganzfeldbeleuchtung

Der FIS-Reiz wird auf einen Lichtleiter fokussiert, von dort gelangt er in die Ulbrichtkugel mit einem Durchmesser von 4,5 cm. Die Ulbrichtkugel wird nah an das Auge gebracht, um Ganzfeldbeleuchtung herzustellen. Die Beleuchtungsstärke wurde mit einem Photometer Lunasix 3 von Fa. Gossen zu 1400 Lux gemessen. Der FIS-Reiz wird nicht in der Ulbrichtkugel, sondern im Interferometer gemessen.

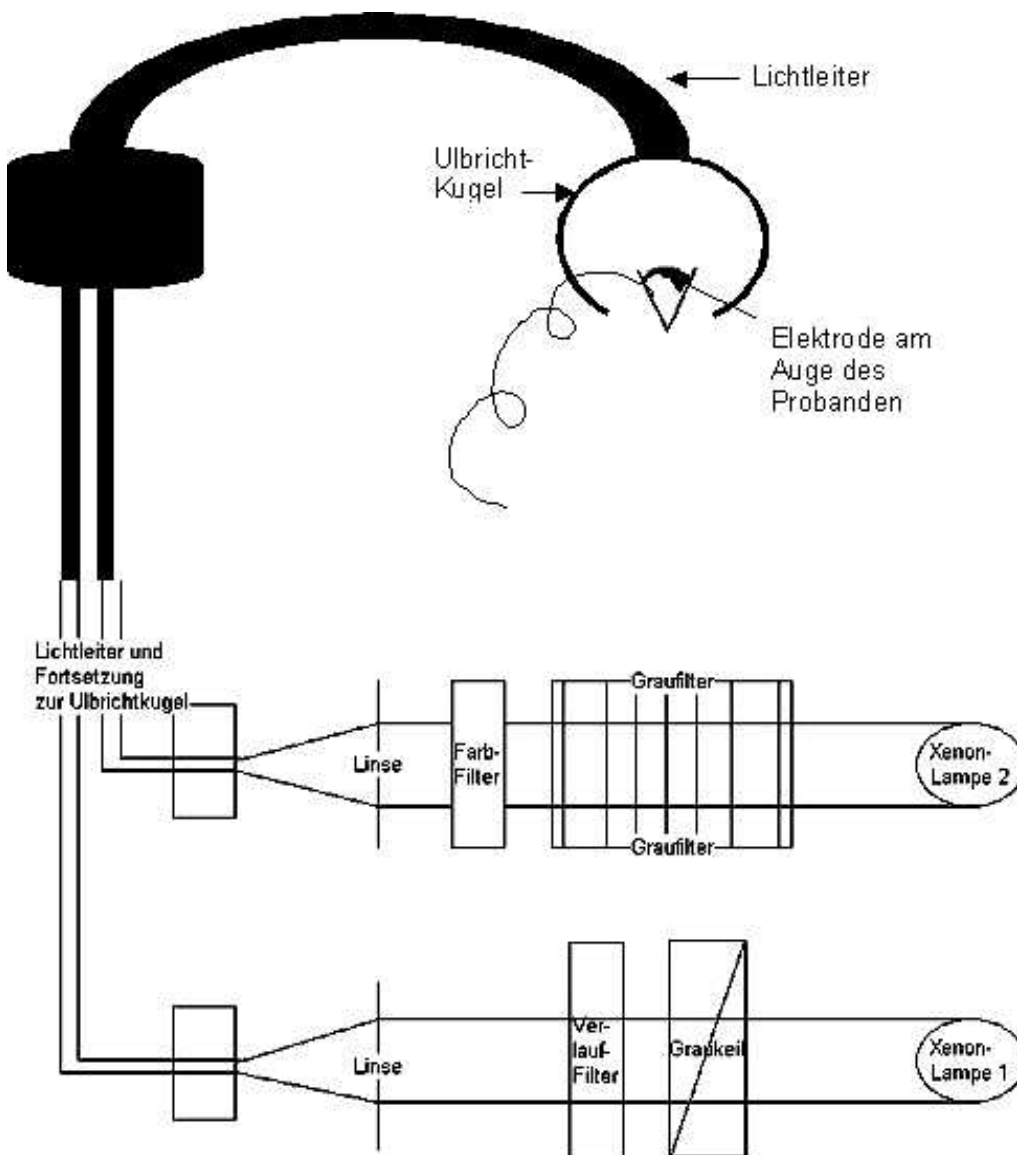


Abb. 5-13: Optischer Aufbau zur Ableitung der ERG-Antwort bei voller Intensität mit Xenon-Lampe 1 und Farbadaptation mit Xenon-Lampe 2

5.5 Messung von FIS-Reiz und ERG im Labor

Mit „regelung.exe“ wird das Programm für die Messung, Erfassung und Speichern der Werte des FIS-Reizes und der ERG-Antwort aufgerufen. In Abb. 5-14 ist die Programmoberfläche dargestellt.

Mit der „ADC/STOP-Start“-Taste werden die Kanäle des Spannungsverstärkers OP 741 erfasst. Die Gain- und Offsetwerte sind so eingestellt, dass der ganze Messbereich im Grafikfenster des AD/DA-Wandlers genützt wird. Die ERG-Antwort am ADC-Kanal Ch0, der FIS-Reiz am ADC-Kanal Ch1 und das Signal des Halbleiter-Lasers am ADC-Kanal Ch2 des Spannungsverstärkers OP 741 werden als blaue, rote und schwarze Kurven im Grafikfenster des AD/DA-Wandlers gezeichnet.

Um die „Weißlichtposition“ etwa in der Mitte der Spannungsrampe zu positionieren, gibt man für den Rampenanfang den optionalen Wert von -1,5 Volt und für das Rampenende den optionalen Wert von -6,5 Volt ein. Der Lauf der Spannungsrampe ist ansteigend, der optionale Wert steht bei „auf“. Aufgrund der nichtlinearen Spannungscharakteristik der Piezokeramik fährt der Spiegel nicht mit konstanter Geschwindigkeit. Für eine eindeutige Zuordnung der Spiegelposition wird ein Referenz-Sinus programmiert.

Mit der „Regelparameter initiieren“-Taste werden die Laserparameter Amplitude und der Wert des Offsets ermittelt, aus diesen Parametern berechnet sich der Referenz-Sinus. An jedem 4. Punkt der 32 Regelunkte pro Periode des Halbleiter-Lasersignals wird gemessen, das sind 8 Messpunkte pro Periode. Diese Werte sind optional. Im Grafikfenster des AD/DA-Wandlers erfasst die Ordinate einen Spannungsbereich von 160 μ Volt. Die Abszisse stellt die Zeit dar. Die Signale werden an 512 Punkten erfasst. Die Messzeit für ein Signal beträgt ca. 20 sec.

Die FFT liefert für eine feste Transformationsgröße $N = 2^n$ (Anzahl der erfassten Datenpunkte) als Ergebnis das Antwortspektrum für $N/2$ ganzzahlige Frequenzindizes. Diese Indizes geben an, wie oft eine Schwingung in das Datenfenster N fällt. Der Datensatz wird nach ganzzahligen Schwingungen analysiert. Da die Laserwellenlänge mit 4 Hz moduliert wird, passen bei einer 512-Werte-FFT 64 Laserwellenlängen in den Datensatz. Damit ist der Modulation mit 4 Hz der Frequenzindex 64 zugeordnet.

Die Synchronisation der Amplituden des Lasers und des Referenz-Sinus überprüft man im Grafikfenster. Die Abweichung von der Synchronisation wird mit Hilfe von Schiebern unterhalb der „FaktorRegelung“ und „RincVolt“ korrigiert. Ab einem Vorlauf von 64

Regelpunkten (2 Perioden) wird geregelt gemessen. Der Vorlauf ist ein optionaler Wert.

Mit der „Speichern“-Taste werden die Werte in den 3 Kanälen Ch0, Ch1 und Ch2 erfasst und gespeichert. Der zu speichernde Name setzt sich aus dem aktuellen Datum und der Messzeit zusammen. Damit ist ein Ordner für jede Messung eindeutig angelegt.

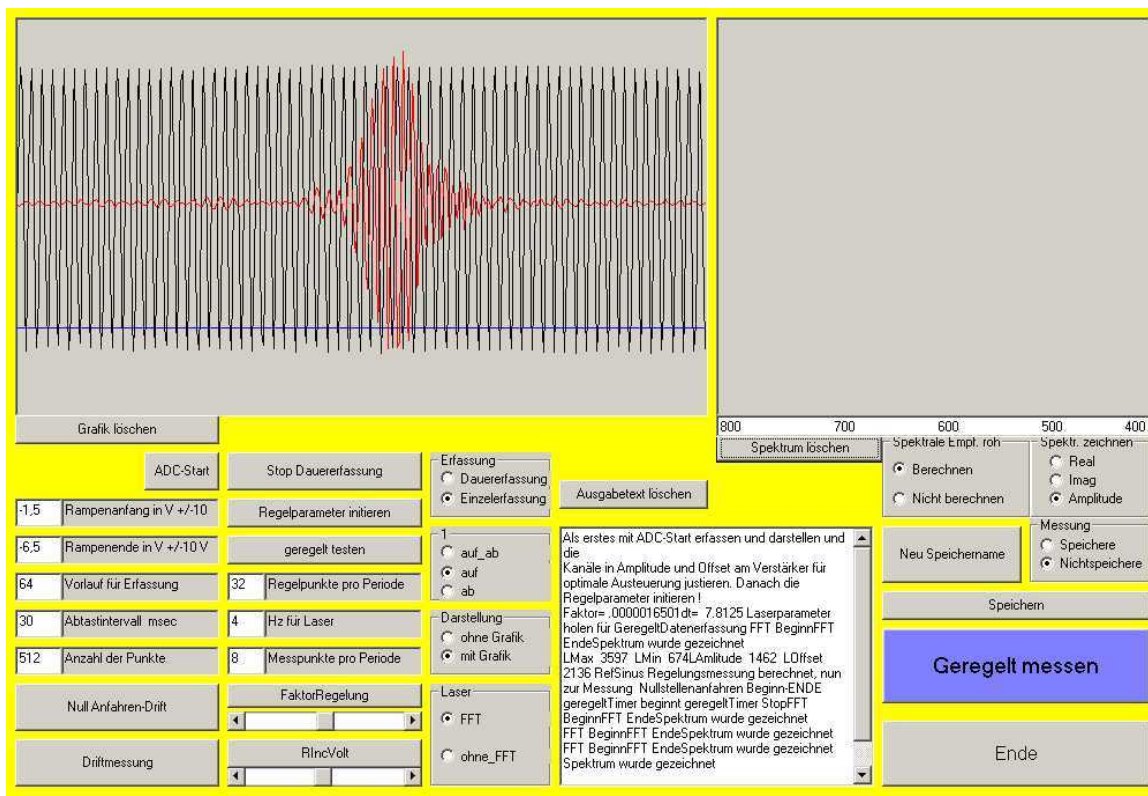


Abb. 5-14: Programmoberfläche zur Messung, Erfassung und Speichern des FIS-Reizes und der ERG-Antwort. Im Graphikfenster: Halbleiter-Lasersignal (schwarz) und FIS-Reiz (rot)

Zur schnelleren Entwicklung im Labor führte man die Messungen mit einer Photodiode mit Farbglass durch. Die Empfindlichkeit der Photodiode liegt etwa im selben Bereich wie die spektrale Empfindlichkeit der Photorezeptoren.

Die Testphase fand mit der Untersuchung der eigenen Farbempfindlichkeit ihren Abschluß.

5.6 Signalablauf

Die Signale der ERG-Antwort, des FIS-Reizes und des Halbleiter-Lasers werden digitalisiert und an den Rechner (Notebook) gegeben.

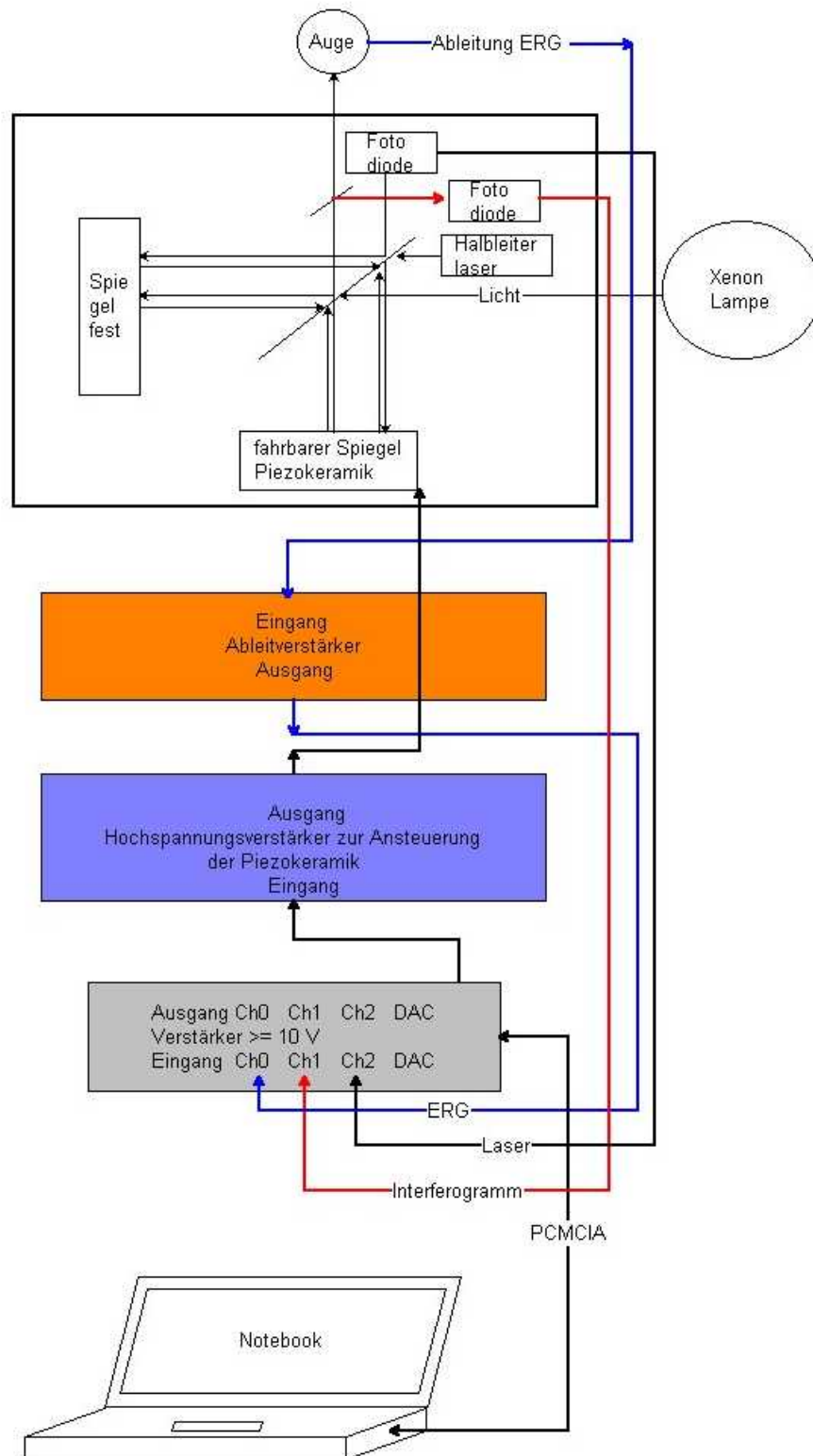


Abb. 5-15: Diagramm Signalablauf

6 Fourierinterferometrische Untersuchungen am Mantelpavian (*Papio hamadryas*)

6.1 Transport und Aufbau der Messapparatur FIS im Münchener Tierpark Hellabrunn

Damit die elektrophysiologischen Messungen im OP-Raum des Münchener Tierparks Hellabrunn nicht durch Tageslicht verfälscht wurden, war eine Abdeckung des Dachkuppelfensters, der Seitenfenster und der Fenster in der Außentüre mit dunklen Planen nötig. Einen Tag vor Beginn der klinischen Untersuchungen fand der Aufbau der portablen Messapparatur im OP-Raum statt. Das Interferometer wurde vorsichtig transportiert, um eine Dejustage der Spiegel zu vermeiden. Eine Nachjustierung wäre mit erheblichen Zeitaufwand verbunden gewesen. Über Nacht war der OP-Raum geheizt, um die Optik auf konstante Temperatur zu halten. Eine Temperierung erzeugte eine Konstanz in den Lichtwegen und bedeutete ein schnelleres Finden der „Weißlichtposition“.



Abb. 6-1: Betrieb des Interferometers im OP-Raum des Münchener Tierparks Hellabrunn

6.2 Hellabrunner Mischung (HM)

Bei Gabe von niederen Dosierungen von Xylazin erfährt das Tier einen beruhigenden, in höheren Dosierungen einen schlafähnlichen Zustand. Da sich mit Xylazin allein keine Allgemeinanästhesie erzielen lässt, sind Kombinationen mit anderen Injektionsanästhetika wie z.B. Ketamin wünschenswert. Die HM ist eine Kombination aus dem dissoziativen Anästhetikum Ketamin und dem sedativhypnotischen Analgetikum Xylazin in einem festen Mischungsverhältnis. Der Inhalt eines Fläschchens Rompun®-Trockensubstanz (500 mg Xylazin) wird in 4 ml einer 10 %igen Ketaminlösung (400 mg Ketamin) ohne Wasserzusatz aufgelöst. In 1 ml der Mischung sind ca. 125 mg Xylazin und 100 mg Ketamin enthalten (92)(Wiesner, 1990). Für Primaten wird eine Dosierung von 0,02 ml pro kg Schätzwicht empfohlen (93)(Wiesner, 1998). Die HM zeigt auch in kleinsten Volumina ihre höchste Wirksamkeit und genügt allen Anforderungen, die für eine sichere Wildtierimmobilisation erforderlich sind. Das allgemeine Mortalitätsrisiko ist äußerst gering, bei 3420 Tieren aus 200 Arten kam es nur zu 12 Todesfällen. Die HM kann bei den unterschiedlichsten Tierarten eingesetzt und antagonisiert werden (93)(Wiesner, 1998).

Aus langjähriger Erfahrung und vielen Voruntersuchungen ist bekannt, dass die empfohlene Dosierung von 0,02 ml pro kg Schätzwicht bei Primaten oftmals nicht genügt. Den Mantelpavianen wurde deshalb eine Dosierung von 0,03 ml pro kg Schätzwicht HM verabreicht, dies entsprach ca. 3,75 mg Xylazin (Rompun® TS) und 3 mg Ketamin (Ketamin 10 %®) pro kg Schätzwicht (94)(Hingerle, 2004).

6.3 Immobilisation und tierärztliche Indikation

Bei medizinischen Eingriffen an Primaten hilft nur eine Immobilisation. Dabei gelten für Wildtiere im allgemeinen die gleichen Vorgehensweisen in der Anästhesie wie für domestizierte Tiere. Zwei Stunden bevor die klinischen Untersuchungen begannen, wurden die Mantelpaviane immobilisiert. Aus einer Distanz von ca. 3 m mit Hilfe eines 1,25 m langen Telinjekt Blasrohrs und eines Injektionspfeils bekamen sie intramuskulär in die Oberschenkelmuskulatur die bewährte Kombination der HM.

Sobald die Sedation eintrat wurde den Tieren die Pupille des rechten Auges mit Augentropfen, bestehend aus 1 Prozent Atropin und 0,5 Prozent Tropicamid Mydriaticum Stulln Fa. Pharma Stulln GmbH weitgestellt. Anschließend brachten die Tierärztin Fr. Dr. von Maltzan, Fr. stud. vet. med. Hingerle und in einer weiteren tierärztlichen Indikation die Tierärztin Fr. Dr. Gohl, Tierpfleger Hr. Reinhardt die Mantelpaviane in den OP-Raum.

Vorsichtig holte der Tierpfleger ein Mantelpavian-Männchen aus der Transportbox, siehe Abb. 6-2 Bild links. Sie reagierten trotz geöffneter Augen und funktionsfähiger Lidreflexe nicht auf Schmerzreize. Eine laufende Überwachung der Lidreflexe, der Pulsfrequenz und des CO₂-Gehaltes der Atemluft diente zur Beurteilung der Immobilisationstiefe. In Abb. 6-2 Bild rechts ist die Weitstellung der Pupille schon gut zu erkennen, während Tierärztin Fr. Dr. Gohl das Gebiss des Mantelpavian-Männchens untersucht.



Abb. 6-2: Klinische Untersuchungen an einem Mantelpavian-Männchen, Alter ca. 9 Jahre und 30 kg schwer

6.4 Untersuchungsreihen mit der Methode FIS

In der Zeit von September 2002, April 2003 und Juni 2003 fand an der gesamten Mantelpaviankolonie des Münchener Tierparks Hellabrunn eine routinemäßige Gesundheitskontrolle statt. Zur Kennzeichnung implantierte man einigen Mantelpavianen einen Transponder. Das Alter der Tiere lag zwischen 5 und 10 Jahren. Im Zeitraum dieser Massnahmen war es möglich das Farbsehen der Mantelpaviane zu untersuchen.

Im September 2002 wurden 7 Messreihen mit 149 Messungen an 7 Mantelpavianen durchgeführt, davon waren 3 Tiere männlichen Geschlechts und 4 Tiere weiblichen Geschlechts.

September 2002

Datum	Messreihe	Messung	Transponder-Nr.	♂	♀	Alter	Gewicht kg
17.09.2002	1	16	968-155012	x		adult	ca. 13,8
19.09.2002	1	22	968-1195533		x	juvenil	ca. 7,8
19.09.2002	1	7	968-1194675		x	adult	ca. 7,8
24.09.2002	1	50	968-155012	x		adult	ca. 13,8
26.09.2002	1	18	968-153540		x	adult	ca. 12,2
26.09.2002	1	17	968-25451		x	adult	ca. 11,4
27.09.2002	1	19	968-1199915	x		adult	ca. 13,8

Tabelle 6-1: Untersuchungsreihen an 7 Mantelpavianen im September 2002

Im April 2003 und Juni 2003 wurden 5 Messreihen mit 39 Messungen an 3 Mantelpavianen durchgeführt, alle Tiere waren männlichem Geschlechts.

April und Juni 2003

Datum	Messreihe	Messung	Transponder-Nr.	♂	♀	Alter	Gewicht kg
03.04.2003	1	9	000-266763	x		adult	ca. 29,8
03.04.2003	1	6	000-266763	x		adult	ca. 29,8
04.04.2003	1	9	977-21250651	x		adult	ca. 29,9
04.04.2003	1	8	977-21250651	x		adult	ca. 29,9
18.06.2003	1	7	n.n.	x		n.n	ca. 6,9

Tabelle 6-2: Untersuchungsreihen an 3 Mantelpavianen im April 2003 und Juni 2003

6.5 Messung von FIS-Reiz und ERG am Mantelpavian

Die Immobilisationstiefe im Stadium 3 war bei voll ausgeprägter Muskelrelaxation und Analgesie erreicht. Sicherheitshalber überwachte der Tierpfleger die Immobilisationstiefe des Mantelpavian-Männchens. Für die klinischen Untersuchungen und elektrophysiologischen Messungen lag es in Seitenlage auf dem OP-Tisch. Das Mantelpavian-Männchen und der Tierpfleger waren bezüglich der Messapparatur geerdet, damit keine Potentialstörungen die ERG-Antworten überlagerten. Aus diesem Grund trugen beide ESD-Bänder um das Handgelenk, siehe Abb. 6-3.

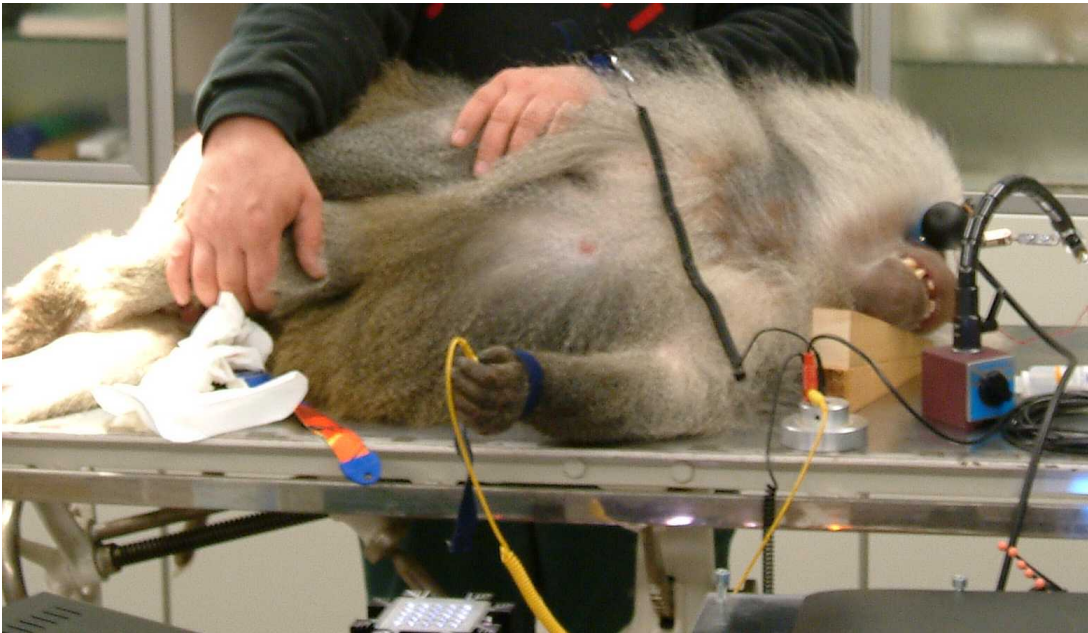


Abb. 6-3: Mantelpavian-Männchen und Tierpfleger geerdet

Ein Tuch über dem linken Auge schützte vor Lichteinfall. Die Schnauze lag auf zwei Holzkeilen, um eine einheitliche Position einzunehmen. Die Stirn und die Augenbrauen wurden mit einer Reinigungspaste SkinPure Fa. NIHON KOHDEN gesäubert.

Zu Beginn jeder Messreihe kontrollierte man die Weitstellung der Pupille. Danach wurde die mit Methylcellulose-Gel (2 Prozent Methocel Fa. CIBA Vision) bestrichene ERG-jet-Elektrode extraokular mittig auf die Pupille gesetzt. Als Referenz diente eine feine Nadelelektrode in der Nähe der Augenbraue des Mantelpavian-Männchens. Die ERG-jet-Elektrode wird auch beim Menschen eingesetzt.

Unter Ganzfeldbeleuchtung wurden mit der ERG-jet-Elektrode die ERG-Antworten gemessen, siehe Abb 6-4.



Abb. 6-4: Ulbrichtkugel am Auge des Mantelpavians. Messung unter Ganzfeldbeleuchtung

Jedes Geräusch oder kleines Muskelzucken von den Mantelpavianen verursachten kleinere Störsignale in den ERG-Antworten. Sie konnten bei den Auswertungen korrigiert werden. Die Signale der ERG-Antworten lagen im Bereich von wenigen μVolt .

Eine Einzelmessung dauerte ca. 20 Sekunden. Für viele Mittelungen konnten sich die Messzeiten über mehrere Minuten erstrecken, vorausgesetzt, dass die Sedation lange anhält.

Die elektrophysiologischen Messungen erfolgten nach den Programmschritten wie sie in Kap. 5.5 beschrieben sind. In Abb. 6-5 und Abb. 6-6 werden der Gesamtaufbau der Messapparatur und das Erfassungsprogramm der Methode FIS im OP-Raum des Münchener Tierparks Hellabrunn dargestellt.

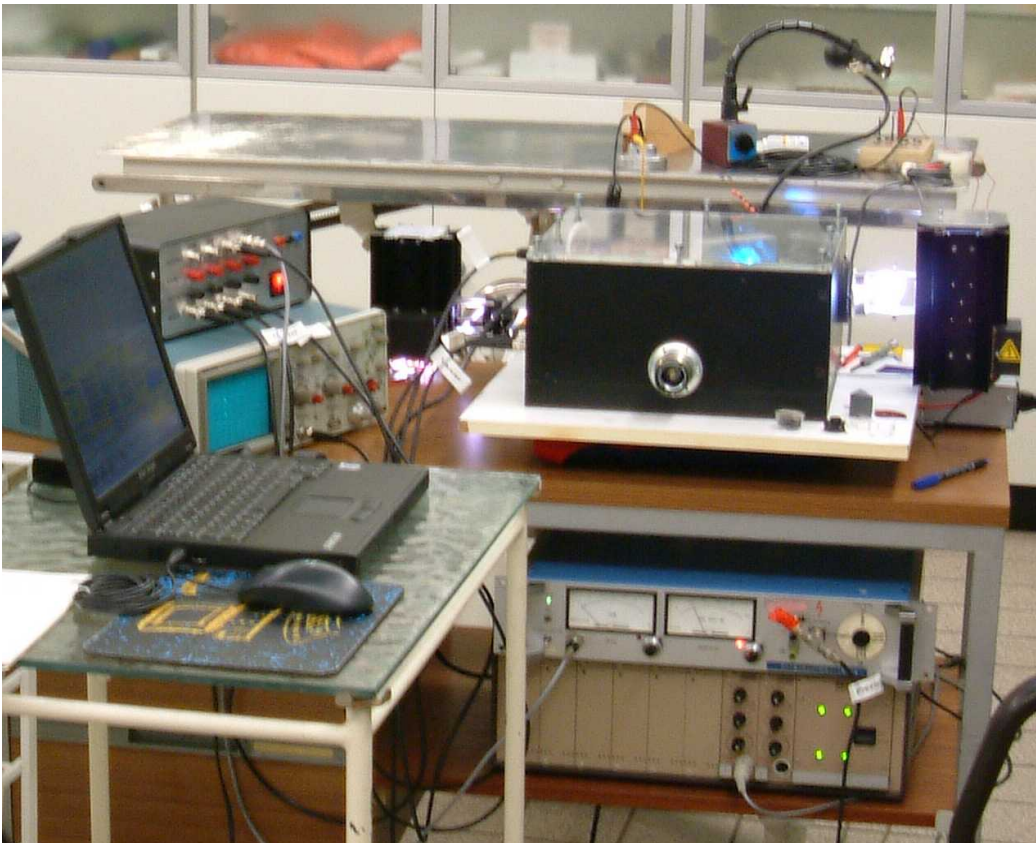


Abb. 6-5: Gesamtansicht der Messapparatur FIS im OP-Raum des Münchener Tierparks Hellabrunn



Abb. 6-6: Erfassungsprogramm FIS im OP-Raum des Münchener Tierparks Hellabrunn

7 Ergebnis der FIS-Untersuchungen am Mantelpavian (*Papio hamadryas*)

7.1 Klassisches ERG

Bei 3 Mantelpavianen wurden ERG-Antworten mit einem Rechteck-Impuls als Lichtreiz gemessen. Die Dauer des Lichtreizes war ca. 250 msec. Bei einem Mantelpavian sind Störungen der ERG-Antwort (blaue Kurve) überlagert. Die Ursachen könnten ein Lidschlag und/oder kleine Muskelbewegungen des Auges gewesen sein, siehe Abb. 7-1.

In den ERG-Antworten beginnt der Anstieg mit einer Latenzzeit von ca. 15 msec. Die Amplitude geht in ein breites Plateau über und erreicht ca. 40 μ Volt. Mit dem Ende des Lichtreizes klingt die Depolarisation ab und geht in eine kurze Hyperpolarisation über.

Damit ist gezeigt, dass mit der ERG-jet-Elektrode erfolgreich ERG-Antworten an Mantelpavianen gemessen werden können. Dies bildet nun die Grundlage mit der Methode FIS die spektrale Empfindlichkeiten zu messen.

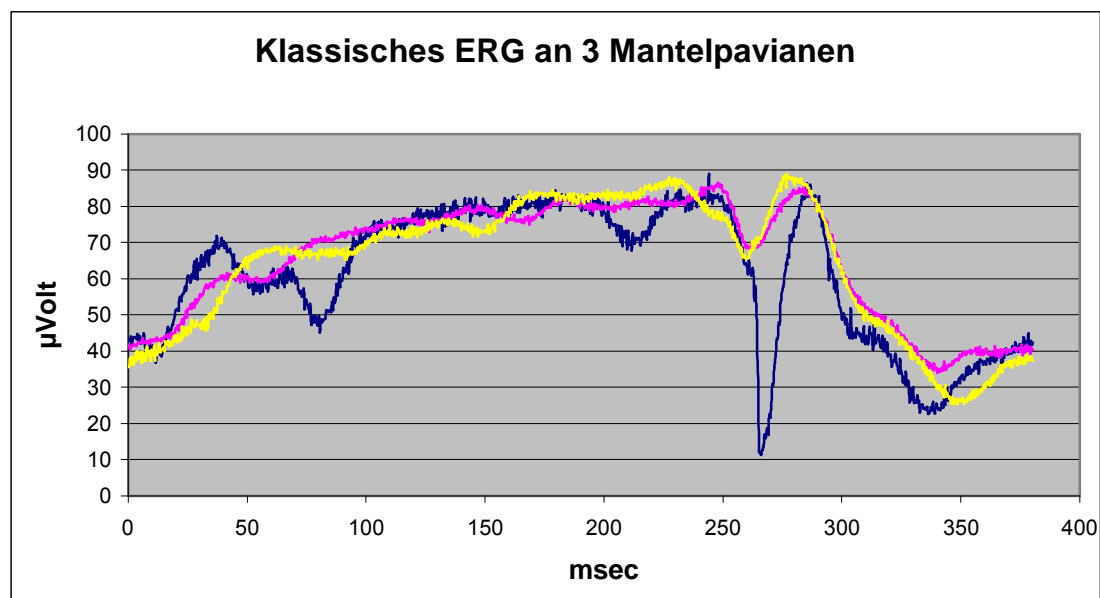


Abb. 7-1: ERG-Antwort auf einen Rechteck-Impuls als Lichtreiz / Pavian-Auge / n=3

7.2 Auswertung von FIS-Reiz und ERG

7.2.1 Signalverarbeitung

Ein Originalordner enthält eine Messreihe. Die Bezeichnung des Originalordners enthält das Datum der Messung. Die Originaldaten werden in neue Ordner gespeichert, da sie unter der Signalverarbeitung verändert werden.

Mit „datenansetzen.exe“ wird das Programm für die Signalverarbeitung des FIS-Reizes und der ERG-Antwort aufgerufen. In Abb. 7-2, Abb. 7-4 bis Abb. 7-6 und Abb. 7-8 sind die Programmoberflächen dargestellt.

Mit der „Start“-Taste wird ein Ordner ausgewählt. Auf der Programmoberfläche zeigt sich unter DateiNamen eine Liste von Messungen. Sie bestehen aus den Daten-Tripeln des FIS-Reizes (IFG), des Halbleiter-Laserssignals (LAS) und der ERG-Antwort. Der Aufruf der Zeitsignale des FIS-Reizes (grün), des Halbleiter-Lasers (rot) und der ERG-Antwort (blau) ist in 3 Graphikfenstern zu sehen, siehe Abb. 7-2.

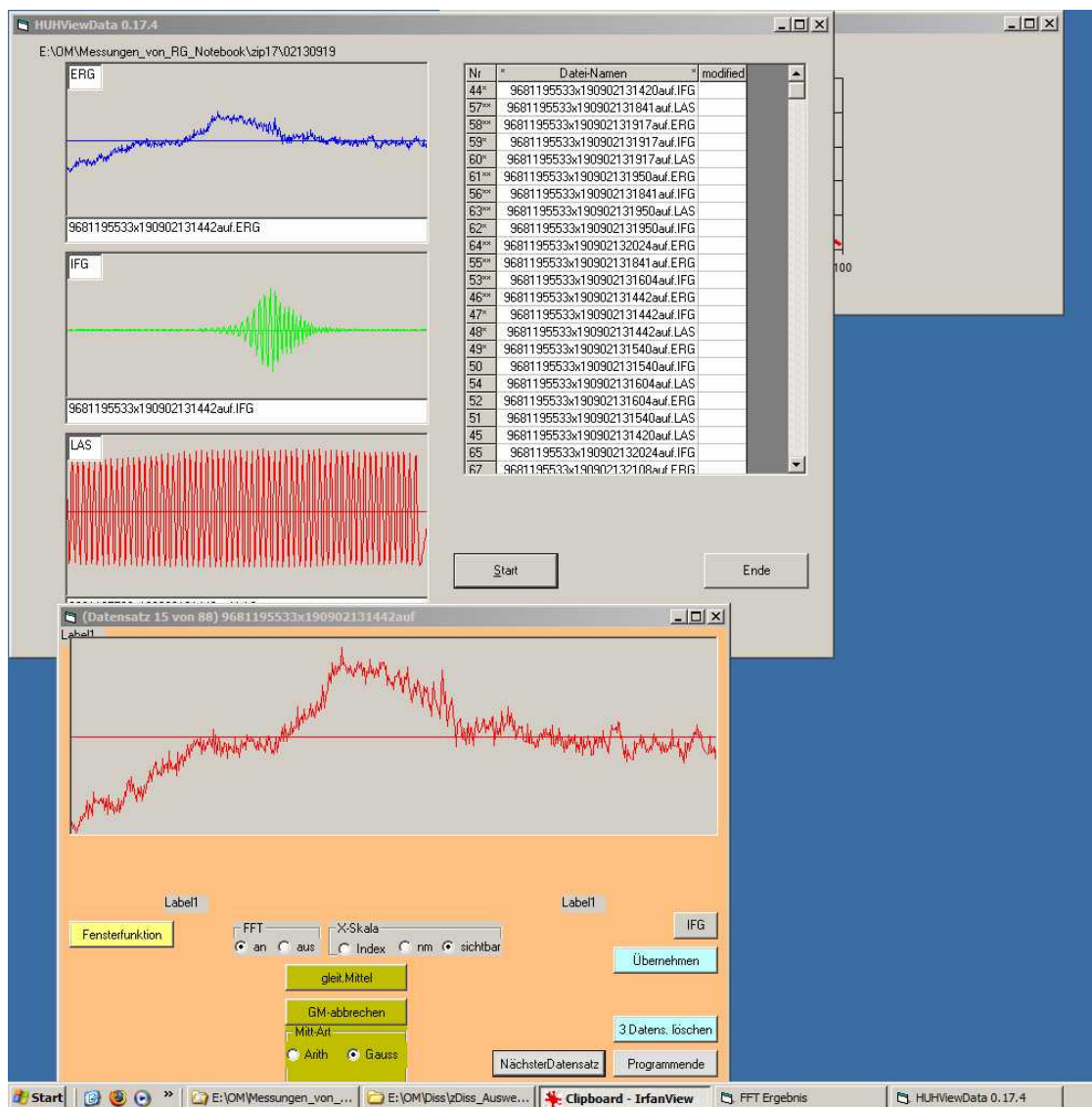


Abb. 7-2: Zeitsignale der ERG-Antwort (blau), des FIS-Reizes (IFG, grün) und des Halbleiter-Lasers (LAS, rot)

Mit der „IFG“-Taste wird der FIS-Reiz (grün) über die ERG-Antwort (rot) gelegt, siehe Abb. 7-4. Der Signalbeitrag der ERG-Antwort ist im Bereich der Überdeckung zu erwarten.

Mit der „Fensterfunktion“-Taste wird das Hanning-Fenster (schwarz) über die ERG-Antwort (rot) gelegt und mit Hilfe von Schiebern auf den interessierenden Bereich begrenzt. Die Schieber befinden sich unterhalb des Grafikfensters.

Mit der „Berechnen“-Taste wird der Ausschnitt der ERG-Antwort mit der Hanning-Fensterfunktion multipliziert. In Abb. 7-5 ist die Multiplikation der „ausgeschnittenen“ ERG-Antwort mit der Hanning-Fensterfunktion dargestellt. Das Ergebnis ist die gewichtete ERG-Antwort (blau).

Die FFT eines begrenzten Signals liefert über einen größeren Bereich im Spektrum eine Verbreiterung der Linien. Die Störungen des Spektrums durch seitliche Ausläufer lassen sich durch geeignete Wahl einer Fensterfunktion vermeiden. In Abb. 7-3 sind die in der Praxis gängigen Fensterfunktionen abgebildet. Sie alle sorgen für den gleichen Wert an den Rändern des Fensters und somit für eine periodische Fortsetzbarkeit des Signals ohne Sprünge. Die Multiplikation mit einer Fensterfunktion im Zeitbereich entspricht einer Faltung im Frequenzbereich. Die Fenster liegen symmetrisch um einen mittleren Abtastpunkt.

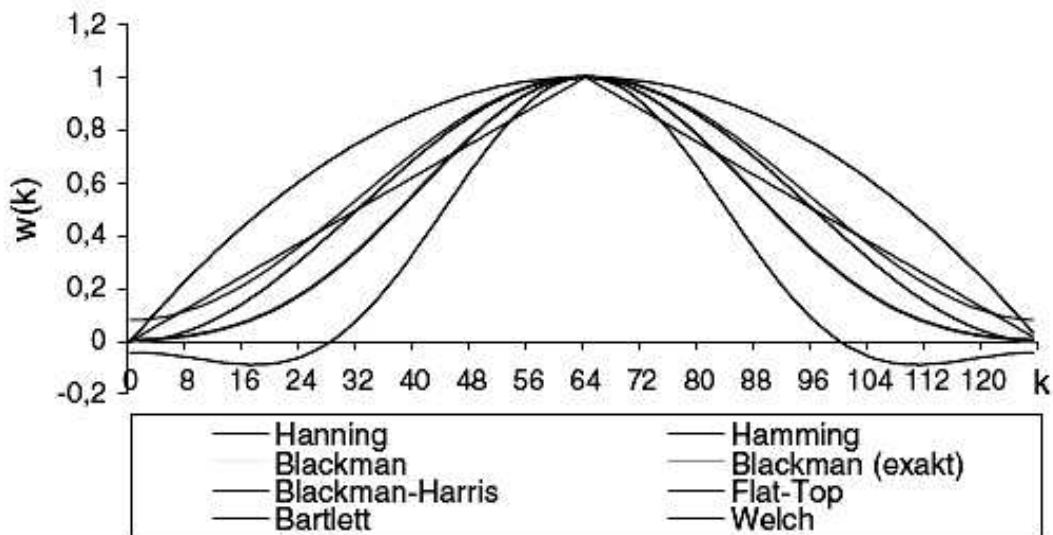


Abb. 7-3: Cosinus-Funktionen der verschiedenen Fensterfunktionen (95)(Kluge, 2006)

Bei der Verarbeitung des FIS-Reizes und der ERG-Antwort wurde das Hanning-Fenster gewählt. Die spektrale Auflösung sinkt zwar um den Faktor 2, reduziert aber die gegenseitige Beeinflussung der Frequenzbänder.



Abb. 7-4: FIS-Reiz (grün) und ERG-Antwort (rot)

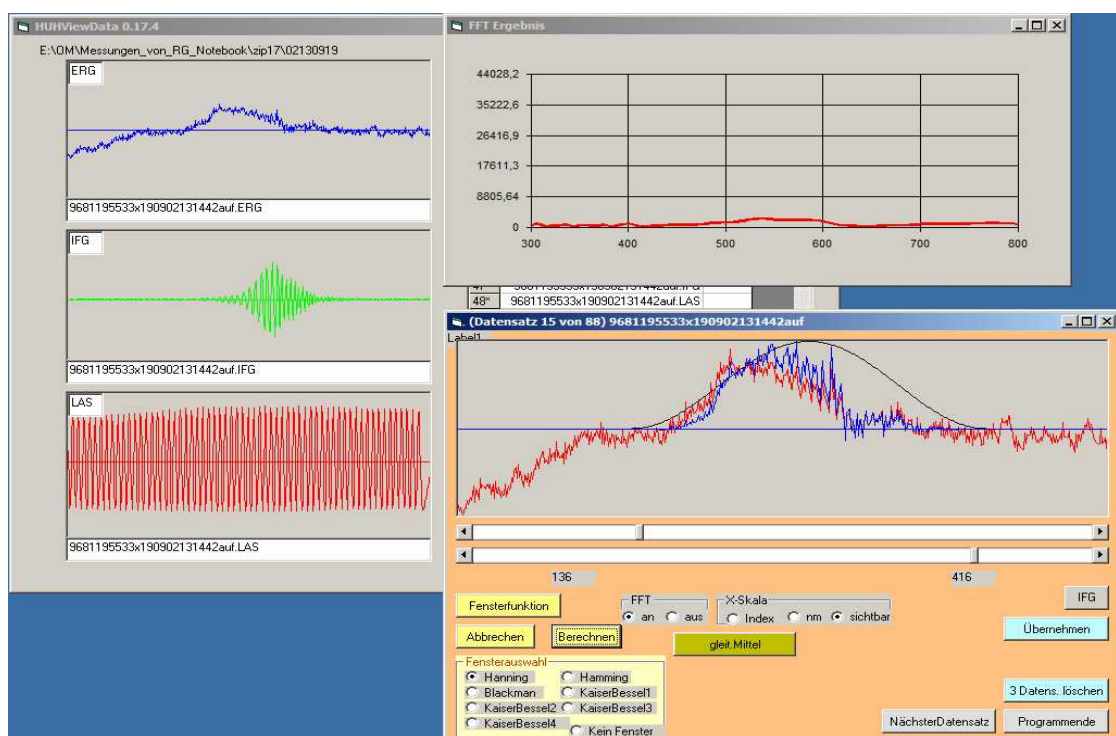


Abb. 7-5: Berechnung der ERG-Antwort mit der Hanning-Fensterfunktion

Mit der „Übernehmen“-Taste steht die ERG-Antwort der weiteren Signalverarbeitung zur Verfügung.

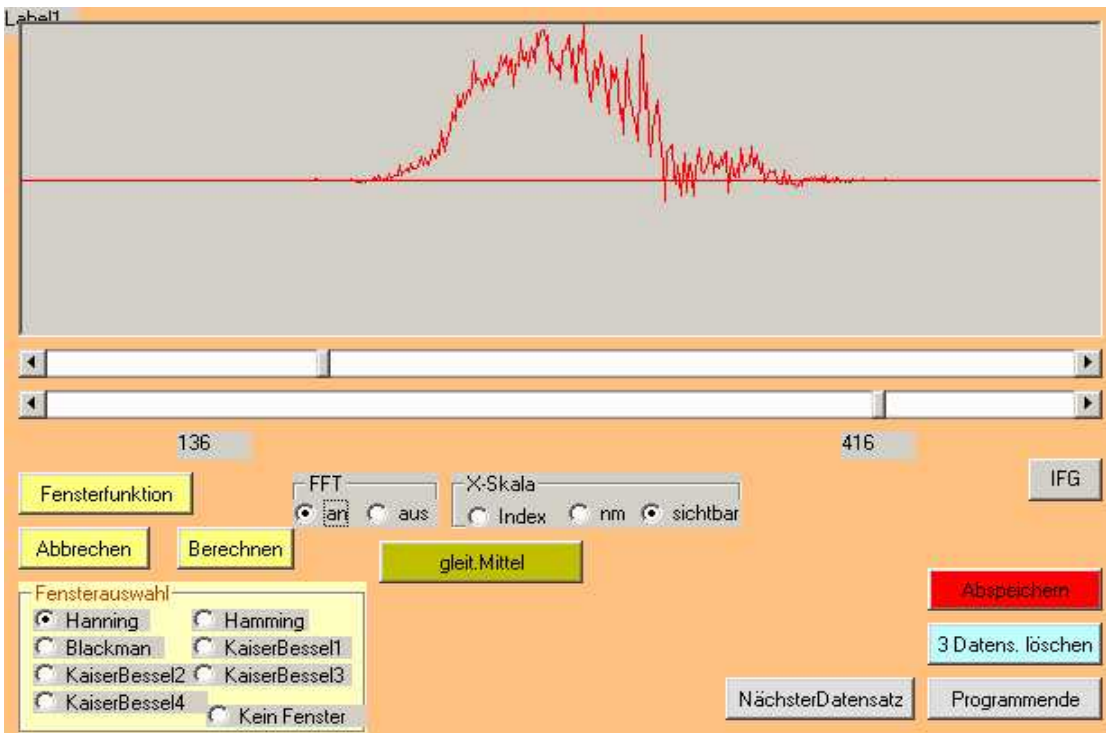


Abb. 7-6: ERG-Antwort nach der Applikation der Hanning-Fensterfunktion

Das Mittelwertfilter eignet sich besonders zur Reduzierung von zufälligen Störungen, wie sie bei Messwerterfassungen häufig auftreten. Ein digitales Filter berechnet den Mittelwert aus einer Anzahl von Messwerten. In Abb. 7-7 ist der Amplitudenfrequenzgang eines Mittelwertfilters mit 3 und 10 Werten gezeigt. Das digitale Filter wirkt somit als Tiefpassfilter.

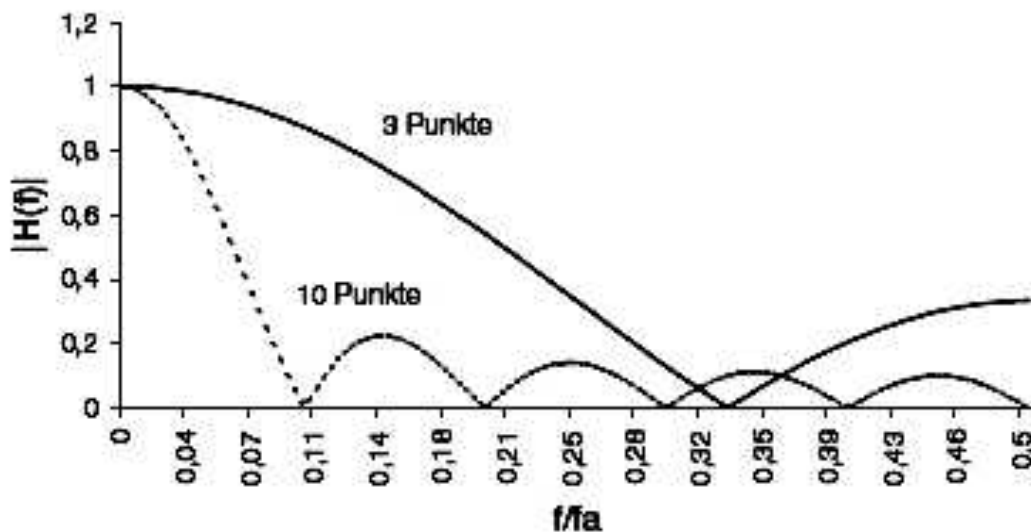


Abb. 7-7: Amplitudenfrequenzgang eines Mittelwertfilters mit 3 und 10 Werten (95)(Kluge, 2006)

Mit der „gleit. Mittel“-Taste führt eine Mittelung zu jedem Zeitpunkt zum gleitenden Mittelwert. Die Anzahl der benachbarten Punkte (Breite der Gewichtsfunktion) wird mit einem Schieber unterhalb des Grafikfensters eingestellt. Bei den Messungen am Mantelpavianauge genügen 11 benachbarte Punkte, um das Amplitudenspektrum entsprechend zu optimieren, siehe Abb. 7-8. Das Gauss'sche Mitteln wichtet die Umgebung jeder Punkte gemäß einer Normalverteilung und vermeidet die Nebenmaxima bei höheren Frequenzen, siehe Abb. 7-7. Die Werte der Mittelungskurve (schwarz) werden von den Werten der ERG-Antwort abgezogen. Der Vorgang entspricht einer Hochpassfilterung und drückt sich im Endergebnis der ERG-Antwort (blau) aus, siehe Abb. 7-8. Die ERG-Antwort wird mit Hilfe der FFT in den Frequenzbereich transformiert und abgespeichert, siehe Abb. 7-8 Bild rechts oben.

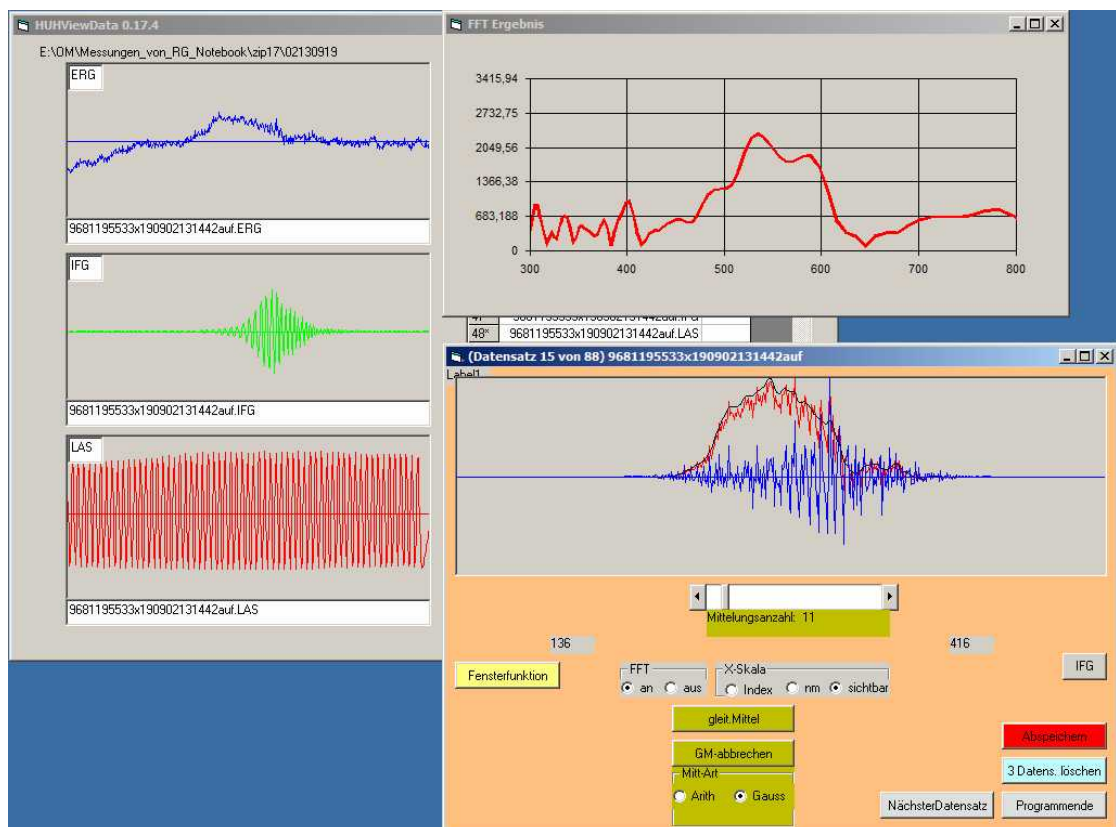


Abb. 7-8: Gemittelte ERG-Antwort (blau) mit zugehörigem FFT-Spektrum (rot)

Mit der „NächsterDatensatz“-Taste wird ein neues Daten-Tripel des FIS-Reizes, des Halbleiter-Lasersignals und der ERG-Antwort verarbeitet. Nicht auswertbare ERG-Antworten werden gleich zu Beginn mit der „3 Datens. löschen“-Taste entfernt.

7.2.2 Mittelung von Amplituden- und Phasenspektren

Mit „mitteln.exe“ wird das Programm für die Mittelung der Amplitudenspektren und Phasenspektren der ERG-Antwort und des FIS-Reizes aufgerufen. Dieselben Messreihen wie unter „datenansuchen.exe“ werden verarbeitet und in den Ordnern als neue Ergebnisse abgespeichert.

Mit der „Start“-Taste wird ein Ordner ausgewählt. Auf der Programmoberfläche zeigt sich unter „DateiNamen“ die Liste der schon verarbeiteten Messungen. Die Zeitsignale der ERG-Antwort (blau), des FIS-Reizes (grün) und die Frequenzlinie des Halbleiter-Lasers (grau) erscheinen in den Graphikfenstern, siehe Abb. 7-9.

Die Mittelung der Amplitudenspektren und Phasenspektren ist beendet, wenn das Programm „fertig“ mitteilt. Mit der „Abspeichern“-Taste wird das Ergebnis in die Ordner gespeichert.

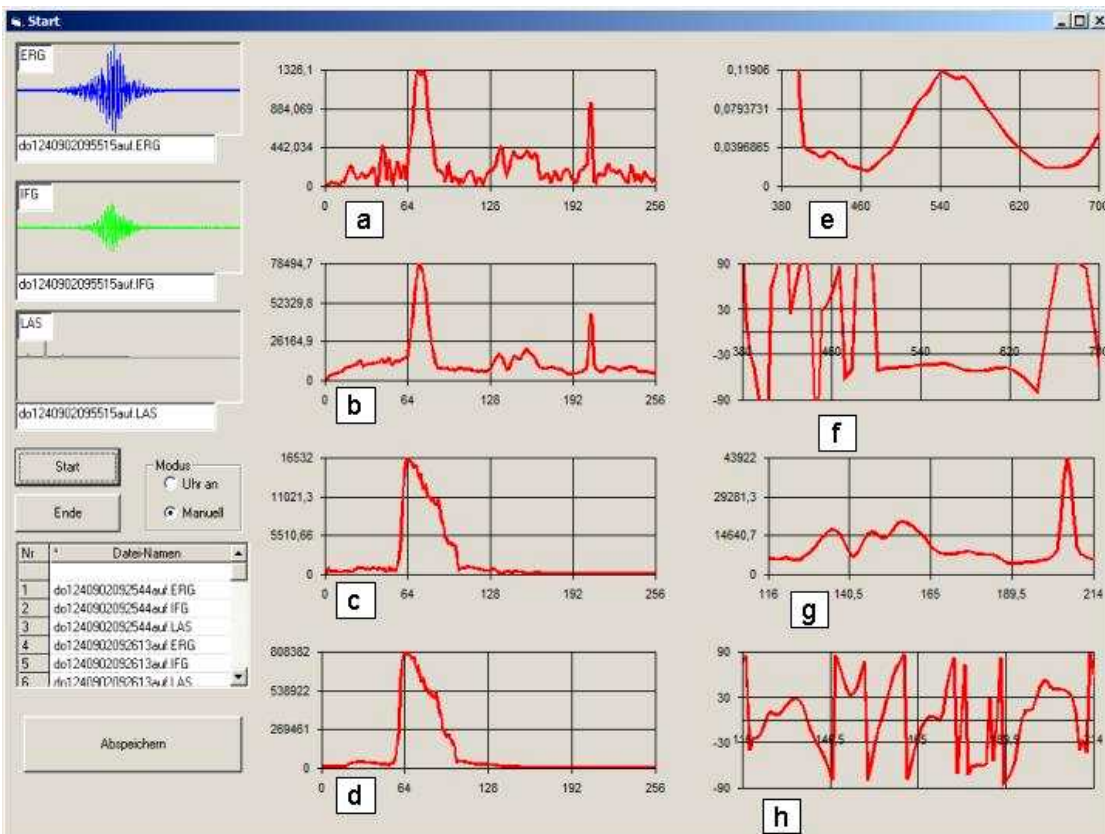


Abb. 7-9: Mittelung der Amplituden- und Phasenspektren der ERG-Antwort (blau) und des FIS-Reizes (grün)

Abb. 7-9a: Einzelnes Amplitudenspektrum der ERG-Antwort

Abb. 7-9b: Gemitteltes Amplitudenspektrum der ERG-Antwort

Abb. 7-9c: Einzelnes Lampenspektrum

Abb. 7-9d: Gemitteltes Lampenspektrum

Abb. 7-9e: Gemittelte spektrale Empfindlichkeit

Abb. 7-9f: Gemittelte Phase der spektralen Empfindlichkeit

Abb. 7-9g: Nichtlinearer Anteil der spektralen Empfindlichkeit

Abb. 7-9h: Nichtlinearer Anteil der Phase der spektralen Empfindlichkeit

Man beschränkt sich bei den Signalspektren auf die Amplitudenspektren. Sie sind für jeden Signalabschnitt identisch und deshalb von einer eventuellen zeitlichen Verschiebung des periodischen Signals unabhängig.

Das Phasenspektrum ist dagegen sehr wohl abhängig vom gewählten zeitlichen Bezugspunkt. Die „Weißlichtposition“ zeigte während der Messungen eine leichte Drift, wahrscheinlich wurde sie doch von minimalen Temperaturunterschieden im Interferometer hervorgerufen. Trotz dieser kleinen Phasenverschiebungen soll die Subtrahierung der Phasen ein Anhaltspunkt sein, ob ein Phasensprung im retinalen Signal vorliegt.

7.2.3 Berechnung der spektralen Empfindlichkeit

Vor der Berechnung der spektralen Empfindlichkeit wird eine Korrektur des Xenon-Lampenspektrums vorgenommen. Das unkorrigierte Xenon-Lampenspektrum teilt man durch die Dioden-Empfindlichkeit. Anschliessend liefert die Division der ERG-Antwort durch das korrigierte Xenon-Lampenspektrum (FIS-Reiz) die spektrale Empfindlichkeit. Das Verhältnis ist normiert und dimensionslos, siehe Kap. 5.3.

Mit der Methode FIS wird die spektrale Empfindlichkeit als Summenantwort aller retinaler Vorgänge dargestellt. Da die Mikrospektralphotometrie zur Bestimmung der Spektraldaten von Photopigmenten und die Methode FIS zum gleichen Ergebnis führen sollten, werden die durchschnittlichen Spektraldaten der Photopigmente des Roten Pavians (82)(Bowmaker et al., 1991) als Wichtung in die Summenantwort eingegeben.

Die spektrale Empfindlichkeit bei den Mantelpavianen wird in mehreren Schritten aus Datenbezügen einer programmierten Excel-Vorlage berechnet, siehe Abb. 7-10. Zur Erläuterung dient das Beispiel des Mantelpavians mit Transponder-Nr. 968-155012 aus der Untersuchungsreihe September 2002. Bei den übrigen Mantelpavianen wird analog verfahren.

Unter Excel (alle Dateien) wird eine Messreihe aufgerufen. Die Datenreihen der nm-Skala (NM.SPE), der Amplitudenspektren (SPEAMPL.SPE) und Phasenspektren (SPEPHASE.SPE) werden nacheinander geöffnet, als Text importiert und in Zahlenformate übergeführt, (Punkt wird durch Komma, Format durch Zahl ersetzt usw.). In dem Ordner, wo die Messergebnisse des jeweiligen Mantelpavians stehen, wird eine Kopie der Excel-Vorlage aufgerufen. Anschließend füllt man die Zahlenkolonnen der nm-Skala, der Amplitudenspektren und

Phasenspektren in die entsprechenden Spalten des Excel-Blatts „gemittelte Daten“ und speichert die Kopie der Excel-Vorlage unter der Transponder-Nr. des Mantelpavians im Ordner ab.

In der Kopie werden rechts oben, 2. Zeile in die blauen, grünen und roten Spalten und über der Zeile Art der Verknüpfung die Spektraldaten der Photopigmente des Roten Pavians (82)(Bowmaker et al., 1991) eingegeben: 430 nm für die S-Zapfen, 536 nm für die M-Zapfen und 565 nm für die L-Zapfen.

Im Excel-Blatt „FIT“ der Kopie wird die berechnete spektrale Empfindlichkeit als braune Kurve, die Summenantwort aller retinalen Vorgänge als schwarze Kurve dargestellt. Die beiden Kurven sollten nun so gut wie möglich übereinstimmen. Das kann durch eine prozentuale Wichtung der Spektraldaten erreicht werden, die über die Schieber „blau“, „grün“ und „rot“ links neben dem Graphikfenster eingestellt wird. Die prozentuale Wichtung zeigt sich im Graphikfenster als blaue Kurve für die S-Zapfen, als grüne Kurve für die M-Zapfen und als rote Kurve für die L-Zapfen. Die Summenantwort (schwarze Kurve) und die berechnete spektrale Empfindlichkeit (braune Kurve) werden durch Verschieben der drei Farbkurven angeglichen.

Die Gegenfarbverschaltung wird in der Zeile Art der Verknüpfung mit der Wahl der Vorzeichen bestimmt.

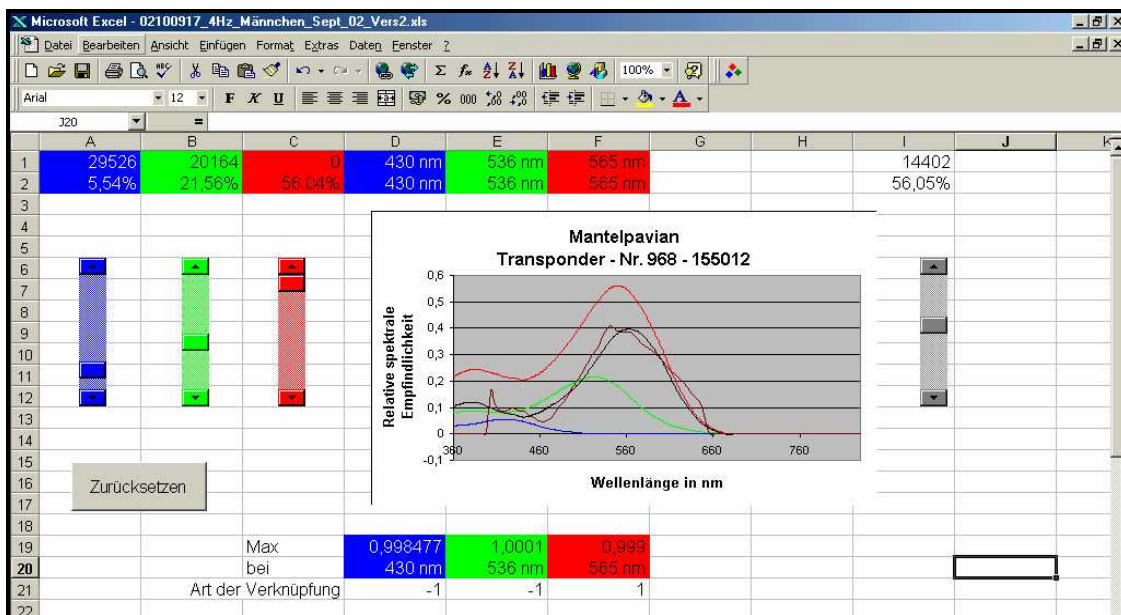


Abb. 7-10: Ansicht Datenbezüge aus der Excel-Vorlage zur Berechnung der spektralen Empfindlichkeit. Die Excel-Zeile mit „gemittelte Daten“ und „FIT“ ist abgeschnitten

7.3 Spektrale Empfindlichkeit

Wie sehr die Mittelung der Amplitudenspektren von ERG-Antworten in die Berechnung der spektralen Empfindlichkeiten eingeht, ist aus den Ergebnissen ersichtlich. Bei allen Messungen mit mehr als 9 Mittelungen wird eine gute Übereinstimmung der berechneten spektralen Empfindlichkeiten (braune Kurve) mit den Summenantworten (schwarze Kurve) erreicht. Von 6 Mantelpavian-Männchen und 4 Mantelpavian-Weibchen sind 12 berechnete spektrale Empfindlichkeiten in Abb. 7-11 bis Abb. 7-22 dargestellt.

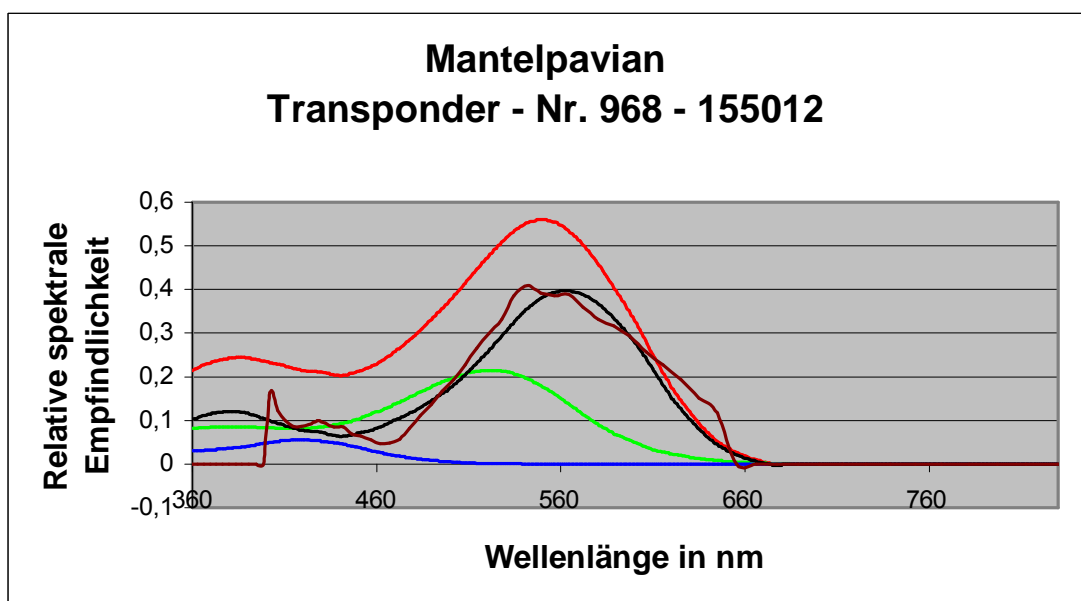


Abb. 7-11: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 16 Messungen

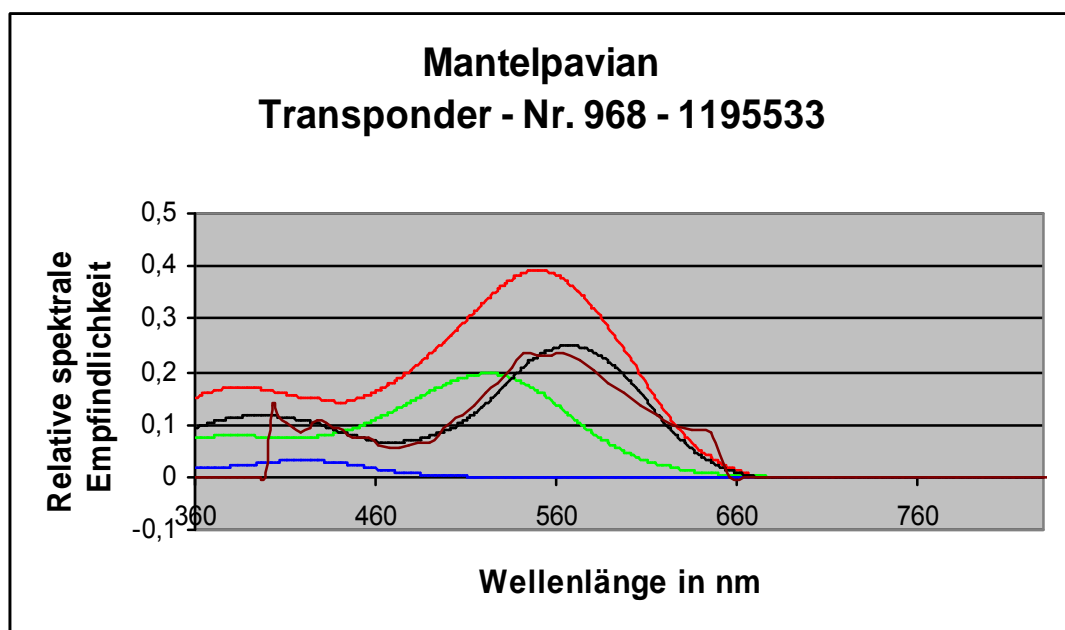


Abb. 7-12: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 16 Messungen

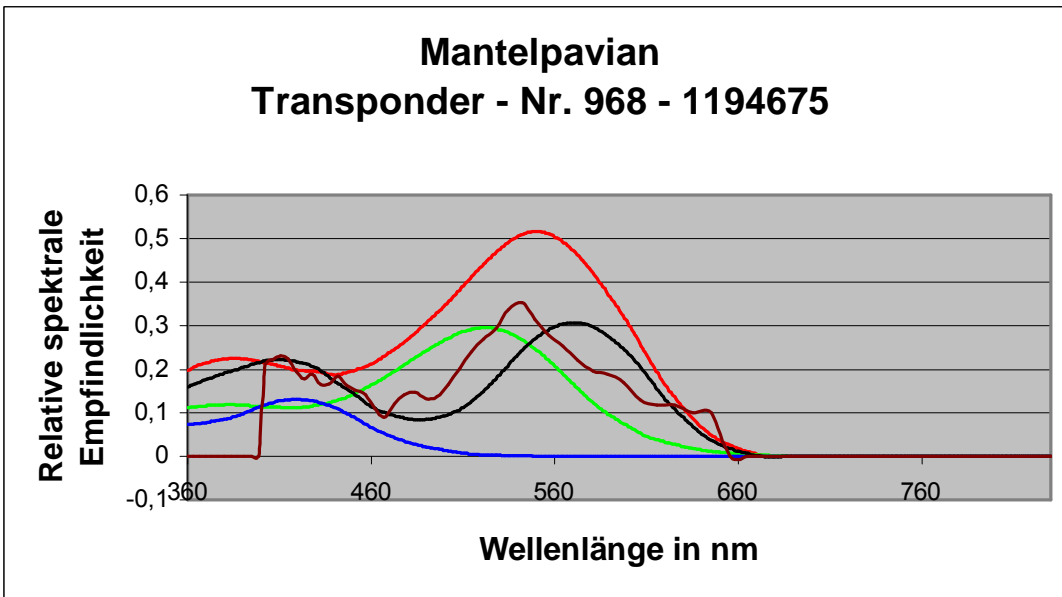


Abb. 7-13: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 7 Messungen

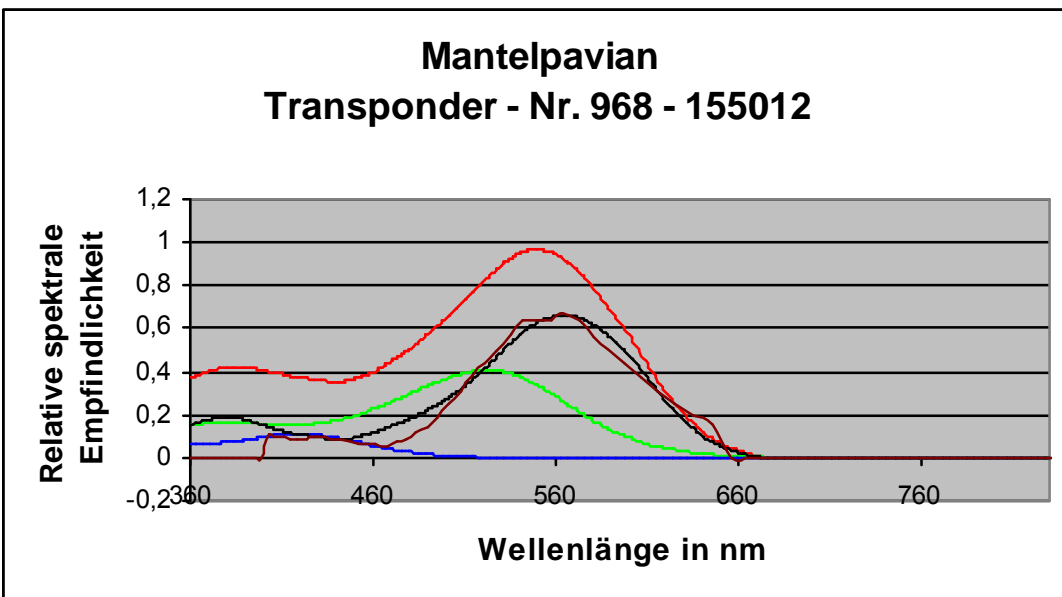


Abb. 7-14: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 50 Messungen

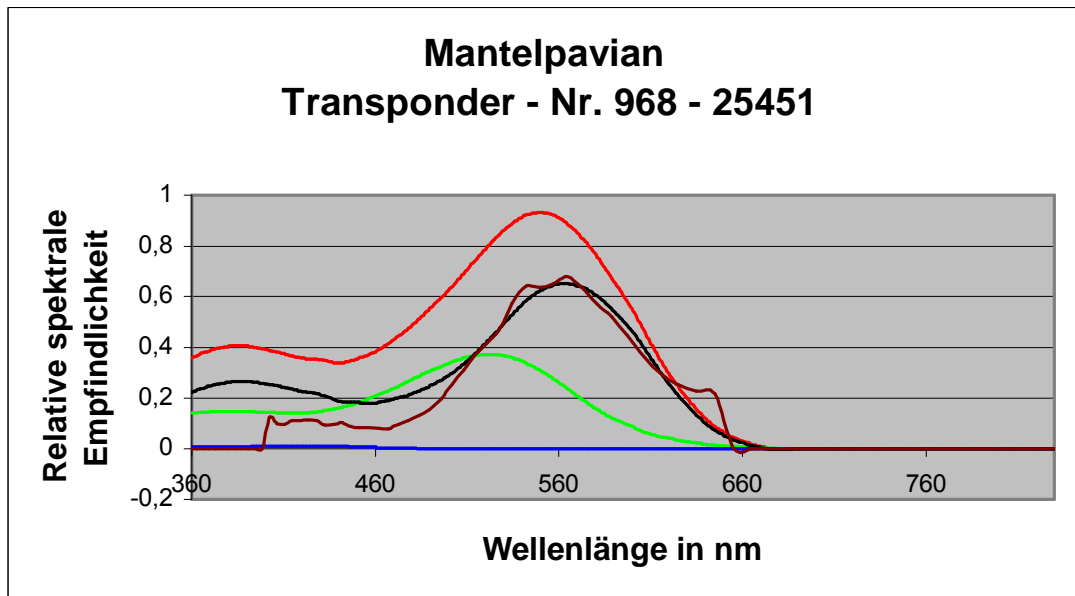


Abb. 7-15: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 17 Messungen

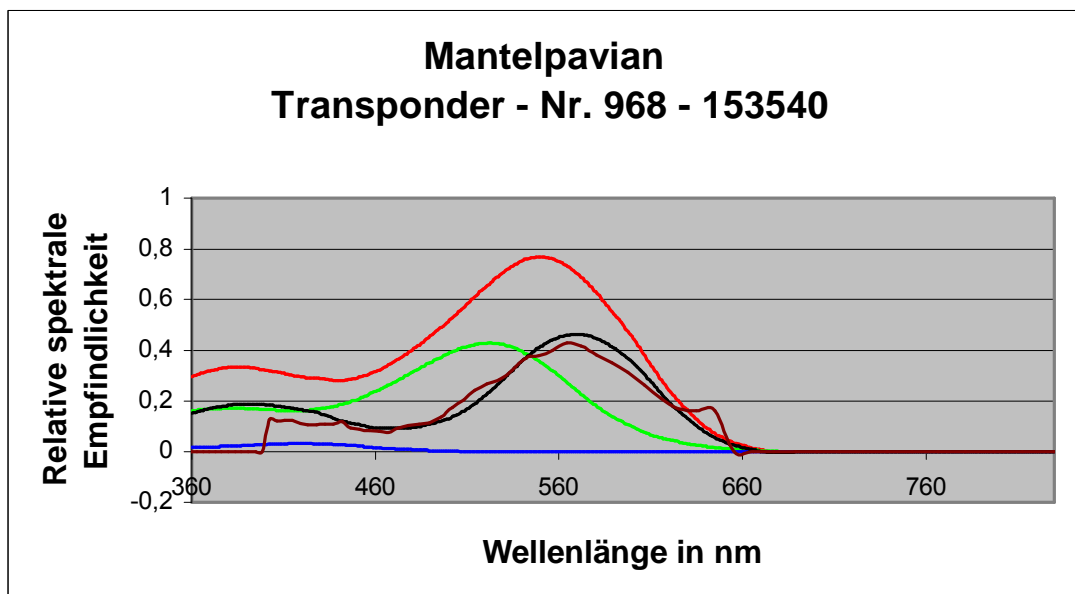


Abb. 7-16: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 18 Messungen

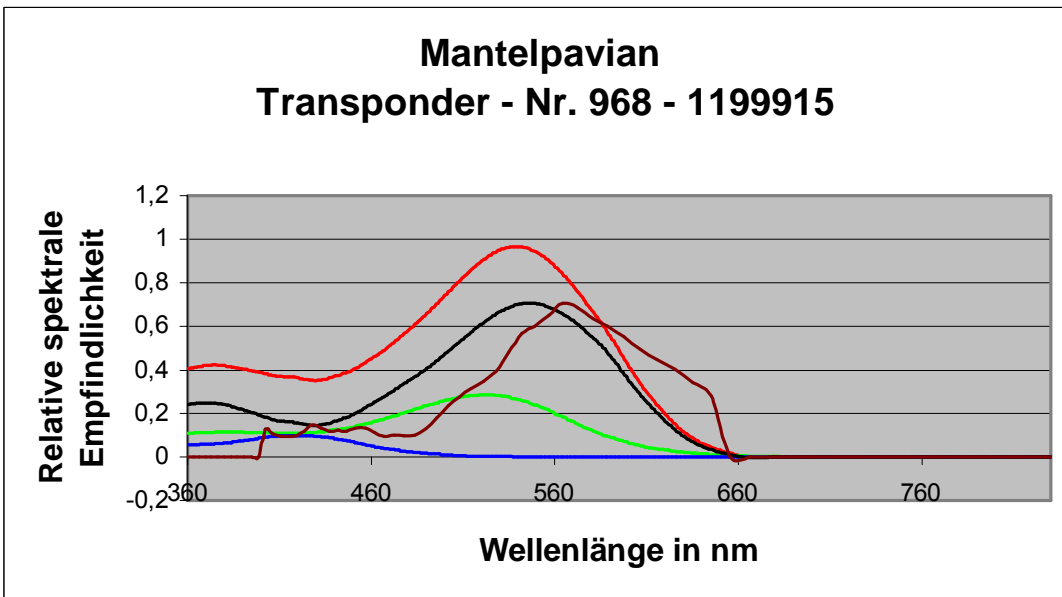


Abb. 7-17: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 19 Messungen

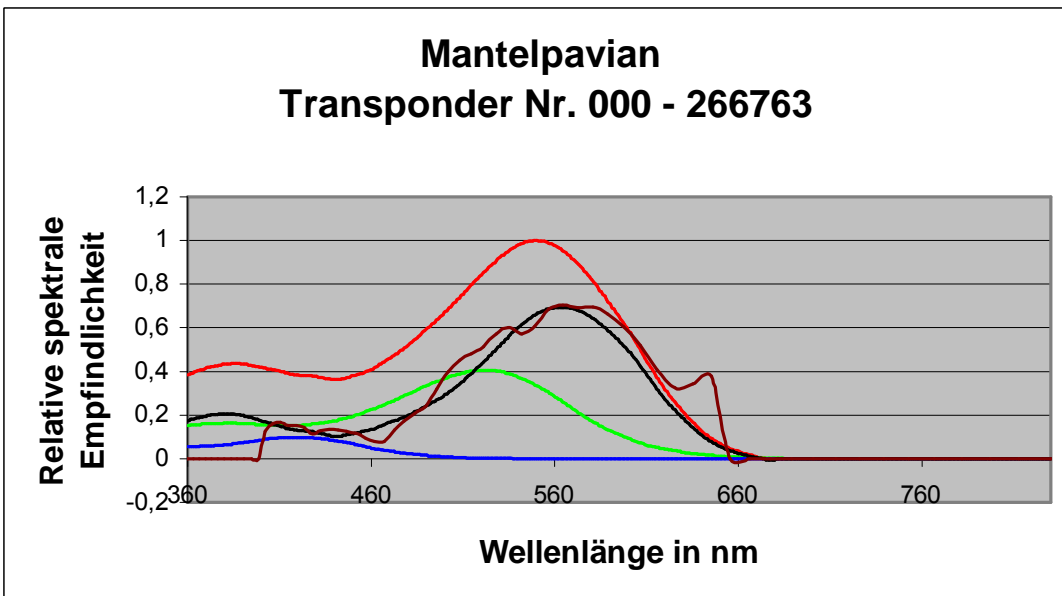


Abb. 7-18: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 9 Messungen

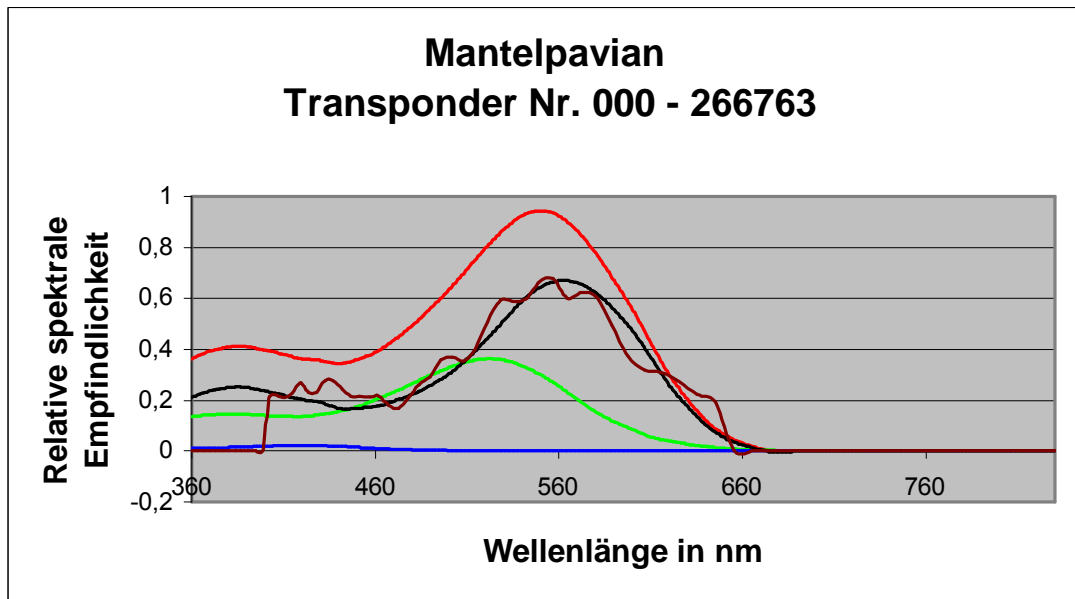


Abb. 7-19: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 6 Messungen

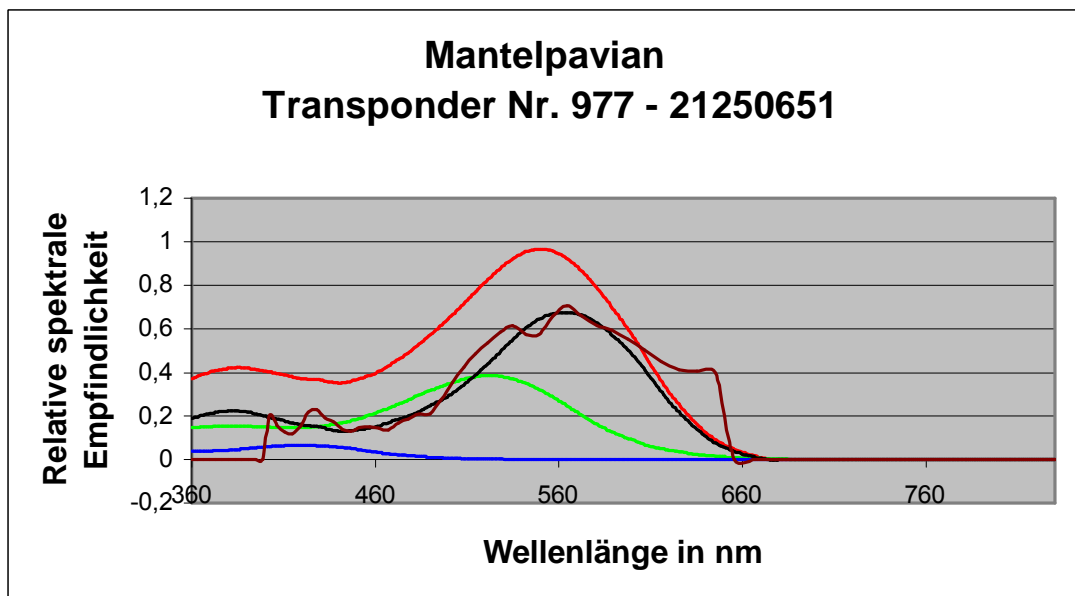


Abb. 7-20: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 9 Messungen

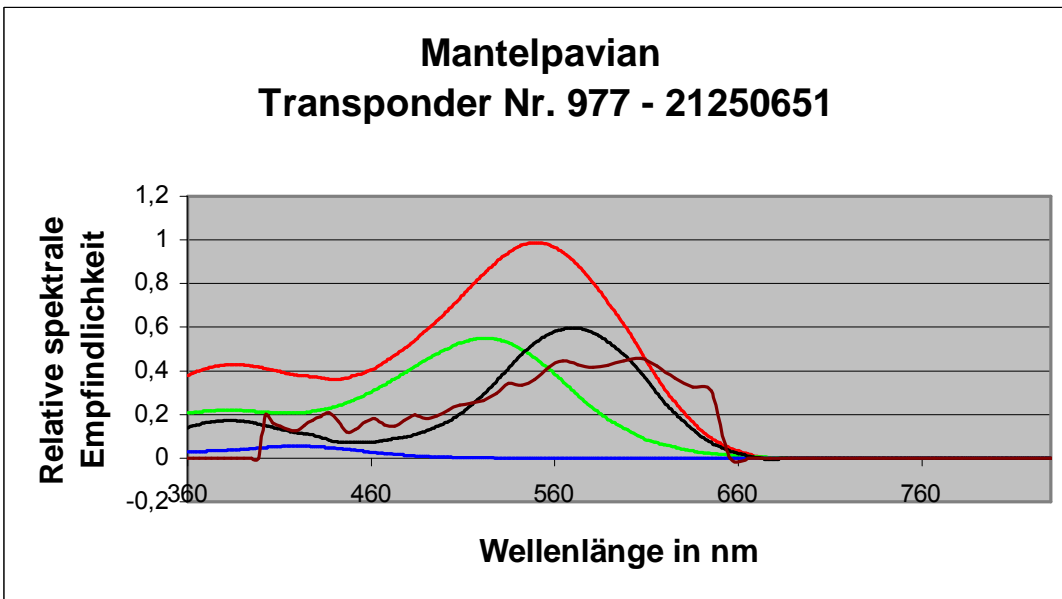


Abb. 7-21: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 8 Messungen

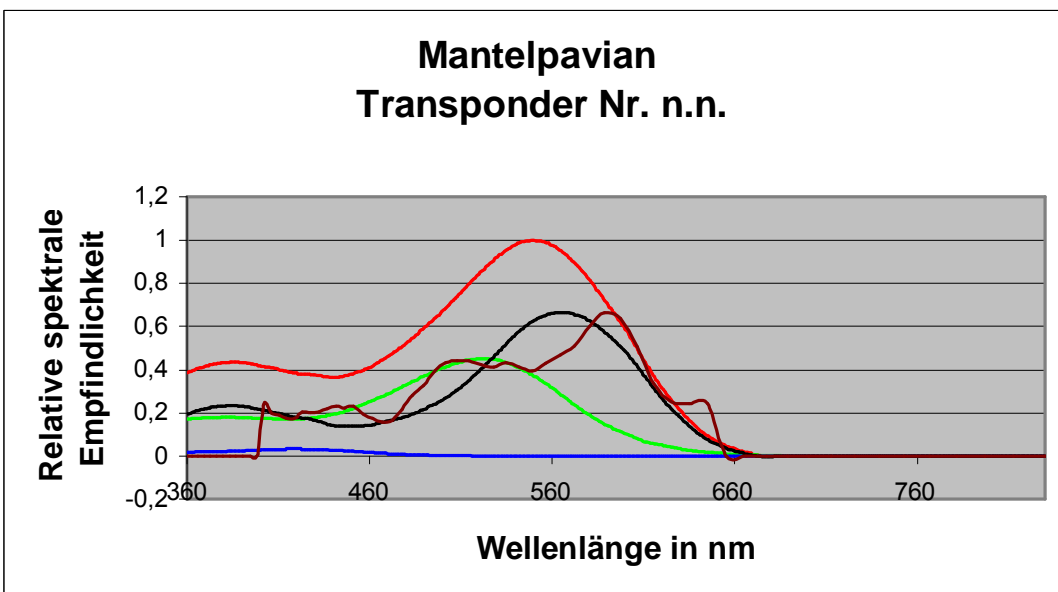


Abb. 7-22: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 7 Messungen

Aus den spektralen Empfindlichkeiten der Mantelpavian-Retina berechnet sich die klassische Antwort der S-/(L+M)-OFF Zellen.

7.4 Verteilung der S-, M- und L-Zapfen

Der Anteil eines jeden Zapfentyps wird zur Gesamtsumme der 3 Zapfentypen prozentual ins Verhältnis gesetzt. In Tabelle 7-1 ist der prozentuale Anteil der Zapfentypen bei den Mantelpavianen angegeben.

Transponder-Nr.	♂	♀	Alter	Prozentualer Anteil der Zapfentypen		
				S	M	L
968-1195533		x	juvenil	5,07	31,64	63,29
968-1194675		x	adult	13,86	31,33	54,82
968-153540		x	adult	2,68	34,82	62,50
968-25451		x	adult	0,84	28,33	70,33
968-155012 ¹⁾	x		adult	6,67	25,93	67,41
968-155012	x			7,41	27,41	65,18
968-1199915	x		adult	7,32	21,14	71,54
000-266763	x		adult	6,57	27,01	66,42
977-21250651	x		adult	1,65	27,27	71,07
				4,65	27,13	68,22
n.n.	x		n.n.	3,45	34,48	62,07
				2,22	30,37	67,41

Tabelle 7-1: Prozentualer Anteil der S-, M- und L-Zapfen bei den Mantelpavianen

¹⁾ Messung der ERG-Antwort an verschiedenen Tagen, deshalb wird es als 6. Männchen gezählt.

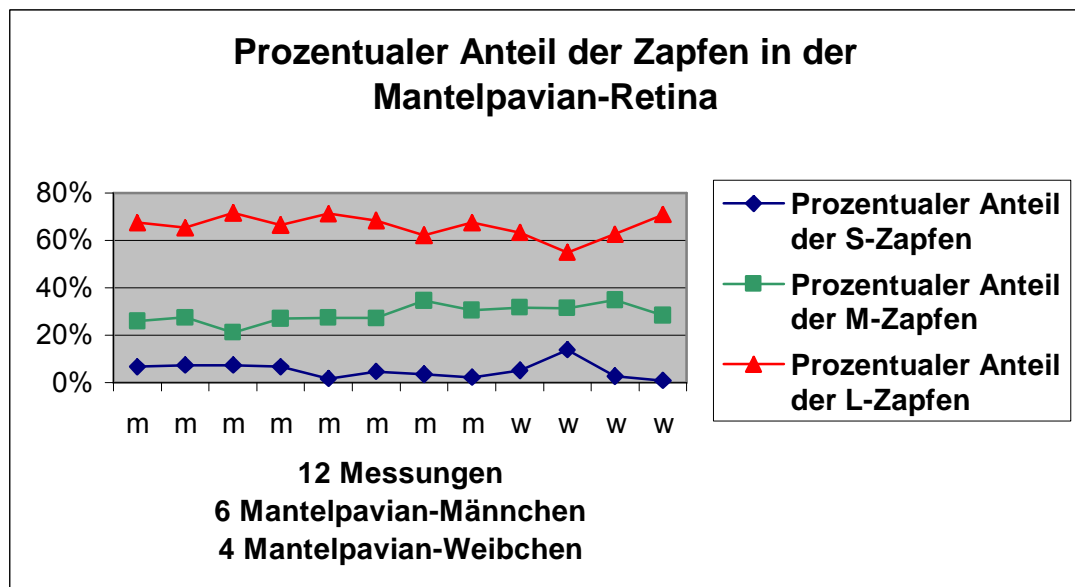


Abb. 7-23: Prozentualer Anteil der S-, M- und L-Zapfen in der Mantelpavian-Retina. Der Ausreißer stammt vom Mantelpavian-Weibchen mit Transponder-Nr. 968-1194675

Im Durchschnitt besitzen 10 Mantelpaviane ca. 5 Prozent S-Zapfen, ca. 29 Prozent M-Zapfen und ca. 66 Prozent L-Zapfen.

7.5 Variation der M- und L-Zapfenzahl

Das Verhältnis der L- zu M-Zapfenzahl bestimmt sich aus dem durchschnittlichen prozentualen Gesamtanteil der L- Zapfen zu den M-Zapfen je Geschlecht, siehe Tab. 7-1. Das Verhältnis der L- zu M-Zapfenzahl beträgt für die Mantelpavian-Weibchen 2,0:1 und für die Mantelpavian-Männchen 2,4:1.

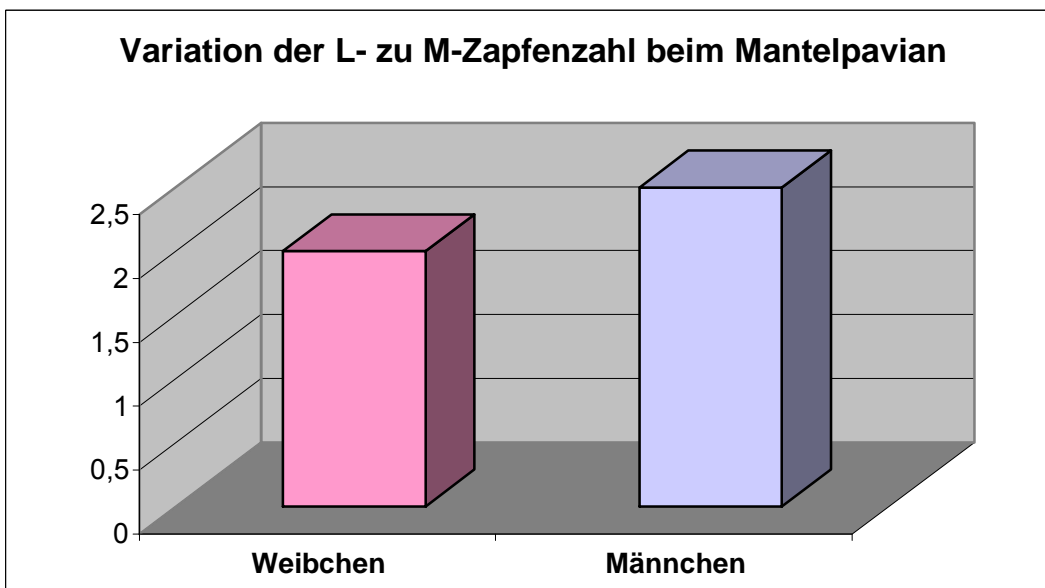


Abb. 7-24: Variation der L- zu M-Zapfenzahl in der Mantelpavian-Retina bei Weibchen und Männchen. Die Standardabweichung beträgt 0,04 Prozent jeweils für M- und L-Zapfen

8 Diskussion

8.1 Einfluss experimenteller Bedingungen auf die Ergebnisse

8.1.1 ERG und Reproduzierbarkeit

Das Anästhetikum Ketamin wirkt auf GABA- und NMDA-Rezeptoren (37)(Frenkel und Urban, 1992). In den ERG-Antworten von Langschwanz-Makaken (*Macaca fascicularis*) reduzierte eine Dosierung von 20 mg/kg Ketamin die b-Welle (67)(Sato et al., 1980), siehe Abb. 3-17. Bei der Immobilisation der Mantelpaviane, siehe Kap. 6.2 traten Dosierungen von ca. 21 mg bis ca. 90 mg Ketamin auf. Sie könnten die Signalstärken der ERG-Antworten abgeschwächt haben.

Die Sedationsdauern begrenzten die Messzeiten der ERG-Antworten. Das Mantelpavian-Weibchen mit Transponder-Nr. 968-1194675 aus der Untersuchungsreihe September 2002 war von allen Tieren in kürzester Sedationsdauer von ca. 33 Minuten und ließ nur 7 Messungen zu. Bei den Mantelpavianen aus den Untersuchungsreihen im April 2003 und Juni 2003 lag die Anzahl der Messungen im Mittel bei 8 Messungen. Um zu einem guten Ergebnis zu gelangen, benötigt man mindestens 9 Messungen. Beim Mantelpavian-Männchen mit Transponder-Nr. 968-155012 wurden mit ca. 50 Messungen sehr gute ERG-Antworten bei einer Sedationsdauer von ca. 57 Minuten erzielt.

Die psychische Verfassung der Tiere spielt auch eine Rolle. Obwohl das Mantelpavian-Männchen mit Transponder-Nr. 968-1199915 aus der Untersuchungsreihe im September 2002 einen ruhigen Eindruck vermittelte, waren die ERG-Antworten nicht gut.

Beim Mantelpavian-Männchen mit Transponder-Nr. 968-155012 aus der Untersuchungsreihe im September 2002 wurden an zwei verschiedenen Tagen die ERG-Antworten gemessen. Beide Ergebnisse weisen ähnliche spektrale Empfindlichkeiten auf, siehe Abb. 7-11 und Abb. 7-14.

Die Untersuchung des Farbensehens war nur an 10 ausgewählten Tieren möglich. Das gute Ergebnis über die spektralen Empfindlichkeiten läßt darauf schließen, dass die Mantelpaviane ein trichromatisches Farbsehen besitzen.

8.2 Pavian-Retina

Die Größe der Pavian-Retina liegt zwischen der Größe der Makaken-Retina und der menschlichen Retina (96)(Stone and Johnston, 1981). Bei den leicht höheren M- und L- Zapfendichten pro Grad könnten die Paviane über eine ähnliche Sehschärfe wie der Mensch verfügen.

8.2.1 Spektrale Empfindlichkeit

Die skotopischen und photopischen Sehsysteme des Grünen Pavians entsprechen den Sehsystemen des Menschen (78)(Adams et al., 1968). Die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen des Grünen Pavians sind den spektralen Empfindlichkeiten beim Menschen sehr ähnlich. Beim Menschen liegen die spektralen Empfindlichkeiten etwas bei kürzeren Wellenlängen, so für die S-Zapfen bei 419 nm, für die M-Zapfen bei 531 nm, für die L-Zapfen bei 558 nm (19)(Dartnall et al., 1983).

Die Photopigmente der Mantelpaviane sollten sich homogen in die Reihe der Photopigmente der anderen Pavianarten einfügen. Deshalb wird als Wichtung in die Summenantwort die Wellenlängen der Zapfentypen des Roten Pavians eingegeben: 430 nm für die S-Zapfen, 536 nm für die M-Zapfen und 565 nm für die L-Zapfen (82)(Bowmaker et al., 1991). Die berechneten spektralen Empfindlichkeiten (braune Kurve) stimmen gut mit den retinalen Summenantworten (schwarze Kurve) überein, siehe Kap. 7.3.

8.2.2 Häufigkeitsverteilung der retinalen Zelltypen

Im Bereich 100 μm von der Fovea in der Retina des Grünen Pavians liegt die Zapfendichte bei ca. 113 000 Zapfen pro mm^2 (79)(Krebs und Krebs, 1989). In der menschlichen Retina beträgt sie im diesem Bereich ca. 100 000 Zapfen pro mm^2 (97)(Goodchild et al., 1996).

Im Zentrum der Fovea in der Retina des Grünen Pavians befindet sich eine Gruppe von 500 Zapfen mit sehr hoher Dichte von ca. 380 000 Zapfen pro mm^2 (79)(Krebs und Krebs, 1989). In der menschlichen Fovea existiert ebenfalls eine derartige Gruppe mit hoher Zapfendichte (48)(Ahnelt et al., 1998). Bis heute stellt sich die Frage, welche Bedeutung diese Gruppe für das Sehsystem hat.

Die S-Zapfen haben bei ca. 1 Grad von der Fovea in der Retina des Gelben Pavians eine Dichte von ca. 6 000 Zapfen pro mm^2 (84)(Marc und Sperling, 1977). In der menschlichen Retina erreichen die S-Zapfen bei ca. 1 Grad von der Fovea mit einer Dichte von 1 000 bis 5 000 Zapfen pro mm^2 eine vergleichbare Größenordnung (48)(Ahnelt, 1998).

In der Fovea der Retina des Mantelpavians wurden nach einer morphometrischen Methode im fovealen Bereich 3,5 Zapfen und keine Stäbchen, in der peripheren Retina 1 Zapfen und 7 Stäbchen gezählt, siehe Kap. 4.7.1 (87)Reichenbach, 1999). Der foveale Bereich in der Mantelpavian-Retina ist wie beim Menschen frei von Stäbchen.

Der Grüne Pavian besitzt einen Visual streak in der Retina (80)(Fischer und Kirby, 1991). Er zeigt sich in ausgeprägterer Form als der Visual streak des Menschen (51)(Curcio und Allen, 1990).

Die Anzahl der Ganglienzellen beträgt beim Grünen Pavian ca. 1,61 Millionen (80)(Fischer und Kirby, 1991) und ist mit der Anzahl der Ganglienzellen von ca. 1,5 Millionen in der menschlichen Retina vergleichbar (51)(Curcio und Allen, 1990). Die midget- und parasol-Ganglienzellen beim Gelben Pavian antworten auf die erregenden KA-, AMPA- und NMDA-Rezeptoren und auf die hemmenden GABA-, und GLY-Rezeptoren (85)(Zhou et al., 1994). Es werden dieselben Neurotransmitter-Rezeptoren wie in der menschlichen Retina vorgefunden.

Beim Gelben Pavian und Roten Pavian sind die M- und L-Zapfen über die Retina zufallsverteilt, dagegen sind die S-Zapfen regulär verteilt. Diese Verteilung der Zapfentypen haben die beiden Pavianarten mit dem Menschen gemein (84)(Marc und Sperling, 1977), (83)(Martin et al., 2000).

Nur beim Gelben Pavian konnten Werte über die prozentuale Verteilung der S-, M- und L-Zapfen ermittelt werden. Beim ihm wurde die Anzahl der S-Zapfen auf ca. 13 Prozent, die Anzahl der M-Zapfen auf ca. 54 Prozent und die Anzahl der L-Zapfen auf ca. 33 Prozent bei einer Exzentrizität von mehr als 5 Grad bestimmt (84)(Marc und Sperling, 1977). Dieses Ergebnis unterscheidet sich von den genetischen Daten, die mit der PCR erhalten werden. In der Retina des Grünen Pavians kommt durchschnittlich mehr L- als M-Zapfen-mRNA vor (58)(Deeb et al., 2000), (81)(Neitz et al., 2006).

Nach der Methode FIS besitzen 10 Mantelpaviane im Mittel ca. 5 Prozent S-Zapfen, ca. 29 Prozent M-Zapfen und ca. 66 Prozent L-Zapfen, siehe Kap. 7.4. Da die Messungen unter Ganzfeldbeleuchtung stattfanden, beziehen sich die prozentualen Anteile auf die gesamte Exzentrizität der Retina des Mantelpavians. In der menschlichen Retina beträgt die Verteilung der S-Zapfen ca. 7 Prozent, der M-Zapfen ca. 34 Prozent und der L-Zapfen ca. 59 Prozent (18)(Sharpe et al., 1999b).

Aus der Verteilung der S-, M- und L-Zapfen beim Mantelpavian kann abgeleitet werden, dass er ähnliche Spektraldaten der Photopigmente wie der Rote Pavian aufweist.

8.2.3 Variation der M- und L-Zapfenzahl

Bei mikrospektralphotometrischen Messungen an 4 Roten Pavianen waren die untersuchten Zellen in der Nähe der Fovea auf 120 Zellen limitiert. Die Anzahl der M-Zapfen war größer als die Anzahl der L-Zapfen, siehe Kap. 4.4.3 (82)(Bowmaker et al., 1991). χ^2 - Tests zeigten, dass eine Aussage zur Variation der M- zu L-Zapfenzahl lediglich über Individuen oder über eine Art getroffen werden kann (82)(Bowmaker et al., 1991).

Das relative Verhältnis der M- zu L-Zapfen-mRNA ist bei nicht-hominiden Altweltaffen vergleichbar mit dem relativen Verhältnis der M- zu L-Zapfen-mRNA in der menschlichen Retina (81)(Neitz et al., 2006). Die genetische Variation der M- zu L-Zapfenzahl ist bei den nicht-hominiden Altweltaffen kleiner als beim Menschen. Das durchschnittliche Verhältnis der L- zu M-Zapfen-mRNA liegt bei Grünen Pavian-Männchen bei 2:1, siehe Abb. 4-9 (58)(Deeb et al., 2000).

Aus den prozentualen Anteilen der L- zu M-Zapfen berechnen sich durchschnittliche Verhältnisse: 2,0:1 für die Mantelpavian-Weibchen und 2,4:1 für die Mantelpavian-Männchen. Dieses Ergebnis harmoniert mit Resultaten, die von anderen Altweltaffen bekannt sind. Das relative Verhältnis der L- zu M-Zapfen-mRNA wurde in der Retina von 7 Schweinsaffen-Männchen und 14 Schweinsaffen-Weibchen (*Macaca nemestrina*), 2 Langschwanzmakaken-Weibchen (*Macaca fascicularis*), 1 Rhesusaffen-Weibchen (*Macaca mulatta*) und 2 Grünen Pavian-Männchen bestimmt. Der statistische Unterschied des relativen Verhältnisses der L- zu M-Zapfen-mRNA ist mit einem Wert von 1,77 bei den Weibchen und mit einem Wert von 1,93 bei den Männchen gering (58)(Deeb et al., 2000).

8.2.4 Gegenfarbkodierung

Die Empfindlichkeit des blau-gelb-Kanals nimmt in der peripheren Retina gegenüber dem rot-grün-Kanal zu (45)(Murray et al., 2006). Nach der Methode FIS läßt sich aus der Berechnung der spektralen Empfindlichkeit die S-ON/(L+M)-OFF Zellen und eine weitere ableiten, für die es aber mehr Messungen bedarf.

9 Zusammenfassung / Summary

Die vorliegende Arbeit vergleicht die detaillierten Strukturanalysen in der Retina von 4 Pavianarten mit den Untersuchungen in der Retina des Mantelpavians. Das Ziel dieser Arbeit ist es, tiefere Erkenntnisse über das Farbsehen des Mantelpavians zu erlangen. Die Anwendung moderner Messmethoden ist aus tierschutzrechtlichen Gründen bei den Pavianarten rar und nur in wenigen Fällen wurden *in vitro*-Untersuchungen durchgeführt.

Die M- und L-Zapfendichte im Bereich 100 μm von der Fovea (79)(Krebs und Krebs, 1989), die S-Zapfendichte bei 1 Grad von der Fovea (84)(Marc und Sperling, 1977) und die Dichte der Ganglienzellen (80)(Fischer und Kirby, 1991) sind in der Retina des Grünen Pavians und Gelben Pavians gegenüber den Dichten in der menschlichen Retina leicht erhöht (51)(Curcio und Allen, 1990), (97)(Goodchild et al., 1996), (48)(Ahnelt, 1998).

Die Zufallsverteilung bei den M- und L-Zapfen und die reguläre Verteilung bei den S-Zapfen haben der Gelbe Pavian und der Rote Pavian mit dem Menschen gemein (84)(Marc und Sperling, 1977), (83)(Martin et al., 2000). Der Grüne Pavian besitzt einen Visual streak (80)(Fischer und Kirby, 1991), der etwa die gleiche Form hat wie in der menschlichen Retina (51)(Curcio und Allen, 1990). Beim Gelben Pavian antworten die midget- und parasol-Ganglienzellen auf die erregenden KA-, AMPA-, NMDA-Rezeptoren und auf die hemmenden GABA-, GLY-Rezeptoren (85)(Zhou et al., 1994).

Bis auf Untersuchungen an Müller-Zellen in der Mantelpavian-Retina, siehe Kap. 4.7.1 gibt es keine Veröffentlichung über das Sehsystem des Mantelpavians. In der Fovea wurden nur Zapfen und keine Stäbchen gezählt (87)(Reichenbach, 1999). Dieser Befund ist schlüssig mit der über alle Primaten getroffenen Aussage.

Ein für elektrophysiologische Messungen nach der Methode FIS tauglicher portabler Versuchsaufbau wurde neu entwickelt. Messungen in medias res an 10 Mantelpavianen im Münchener Tierpark Hellabrunn belegen die hohe Qualität des Verfahrens. Die Methode FIS, die Entwicklung des Verfahrens, seine aufwendige Programmierung der Regelung und Auswertung werden in den Kap. 5, Kap. 7.2 und im Anhang Kap. 13 erläutert.

Die Methode FIS erlaubt schnelle Messungen der ERG-Antworten mit hoher Auflösung im 10^{-9} m Bereich. Die daraus berechneten spektralen Empfindlichkeiten zeichnen sich durch gute Reproduzierbarkeit aus.

Die spektralen Empfindlichkeiten können durch Summation von Absorptionskurven angenähert werden, wie ein Abgleich mit den nach der

Mikrospektralphotometrie gewonnenen Spektraldaten der Photopigmente beweist (82)(Bowmaker et al., 1991), siehe Kap. 7.2.3 und Kap. 7.3. Die Spektraldaten der Photopigmente der Mantelpaviane reihen sich in die Spektraldaten der Altweltaffen ein.

Die Messungen der ERG-Antworten und die Berechnung der spektralen Empfindlichkeiten von 10 Mantelpavianen nach der Methode FIS bringen neue Ergebnisse über die Verteilung der S-, M- und L-Zapfen und über die Variation der L- zu M-Zapfenzahl bei den Pavianarten. Für die Mantelpavian-Retina beträgt die durchschnittliche prozentuale Verteilung der S-Zapfen ca. 5 Prozent, der M-Zapfen ca. 29 Prozent und der L-Zapfen ca. 66 Prozent, siehe Kap. 7.4. Die Werte zeigen eine ähnliche Verteilung der S-, M- und L-Zapfen wie sie in der menschlichen Retina beobachtet wird (18)(Sharpe et al. 1999b).

In der Variation der L- zu M-Zapfenzahl zeichnet sich beim Mantelpavian eine Tendenz zu mehr L-Zapfen ab. Bei den Mantelpavian Weibchen wird eine Variation von 2,0:1 und bei den Mantelpavian-Männchen eine Variation von 2,4:1 bestimmt, siehe Kap. 7.5. Es gibt keinen großen Unterschied in der Variation der L- zu M-Zapfenzahl zwischen dem Geschlecht der Mantelpaviane. Bei den Altweltaffen existiert kein merklicher statistischer Unterschied im relativen Verhältnis der L- zu M-Zapfen-mRNA (58)(Deeb et al., 2000).

Aus der Berechnung der spektralen Empfindlichkeiten bei den Mantelpavianen lassen sich eine klassische blau-gelb-Verschaltung und eine weitere Verschaltung ableiten, die aber näherer Prüfung bedarf. Das Ergebnis steht im Einklang mit der Zunahme des blau-gelb-Kanals gegenüber dem rot-grün-Kanal in der peripheren Retina (45)(Murray et al., 2006).

In weiteren Forschungsvorhaben sollten bei den Pavianarten die Gegenfarbmechanismen der klassischen S-ON/(L+M)-OFF Zellen, S-OFF/(L+M)-ON Zellen und weiterer Ganglienzelltypen untersucht werden, die zum Farbsehen beitragen könnten.

Die neuen Ergebnisse über die Mantelpaviane geben weitere Impulse zu Untersuchungen offener Fragestellungen.

Der Mantelpavian besitzt ein trichromatisches Farbsehen

This thesis is concerned with an overview of the retinal tissues of 4 baboon species and the hamadryas baboon. The aim of this scientific work is it to achieve a deeper knowledge of the color vision of the hamadryas baboon. The application of modern measuring methods and analysis is scarce in baboon species out of legal reasons concerning the protection of animals. In only few cases *in vitro*-investigations at baboons have been carried out.

The density of M- und L-cones in the field of 100 μm of the fovea (79)(Krebs und Krebs, 1989), the density of S-cones at 1 degree of the fovea (84)(Marc and Sperling, 1977) and the density of ganglion cells (80) (Fischer und Kirby, 1991) are slightly higher in the retinas of the anubis baboon and cynocephalus baboon compared with that of the human retina (51)(Curcio und Allen, 1990), (97)(Goodchild et al., 1996), (48)(Ahnelt, 1998).

The coincidence distribution of the M- and L-cones and the regular distribution of the S-cones in the retinas in the cynocephalus baboon and papio baboon are in common with humans (84)(Marc und Sperling, 1977), (83)(Martin et al., 2000). The anubis baboon possesses a visual streak (80)(Fischer and Kirby, 1991) which has about the same shape as the human retina (51)(Curcio und Allen, 1990). The midget- and parasol-ganglion cells of the cynocephalus baboon react to KA-, AMPA-, NMDA- and GABA-, GLY-receptors (85)(Zhou et al., 1994).

Except investigations into Mueller cells in the hamadryas baboon retina, see chap. 4.7.1 there are no publications concerning to color vision of the hamadryas baboon. In the fovea only cones and no rods were counted (87)(Reichenbach, 1999). These findings are conclusive with the knowledge we have of all primates.

A portable experimental setup suited for electrophysiological measurements according to FIS-method has specially been developed. In Munich Zoo measurements on 10 hamadryas baboons were carried out and they prove the high standard of this method. The FIS-method, the development of this method, its complex programming of the controlling and the evaluation are described in chap. 5, chap. 7.2 and appendix chap. 13.

The FIS-method permits fast measurements of the ERG with high resolution in the 10^{-9} m range. Spectral sensitivities calculated with it are characterised by very good reproductibility. The spectral response curves are fitted by the summation of spectral data from other investigations, e.g. microspectralphotometry (82)(Bowmaker et al., 1991), see chap. 7.2.3 and chap. 7.3. As a result the spectral data of the hamadryas baboons join those of the old world monkeys.

The measurements of the ERG and the computation of spectral sensitivities of 10 hamadryas baboons bring new results about the distribution of the S-, M- and L- cones and about the variation of the L:M cone ratio within the baboon species. For the retina of the hamadryas baboon the average proportional distribution of the S- cones amounts to approx. 5 per cent, the M-cones approx. 29 per cent and the L- cones approx. 66 per cent, see chap. 7.4. In the retinas of the hamadryas baboons a similar distribution of S-, M- and L-cones is observed like in the human retina (18)(Sharpe et al. 1999b).

The hamadryas baboon shows a tendency to more L-cones in the variation of the L:M cone ratio. The L:M cone ratio is computed 2,0:1 with females and 2,4:1 with males, see chap. 7.5. The evaluation of the spectral sensitivities shows that the variation of the L:M cone ratio is not remarkable between hamadryas baboon females and males. Between the sexes of the old world monkeys there is no noticeable statistical difference in L:M mRNA ratios (58)(Deeb et al., 2000).

From the computation of spectral sensitivities in hamadryas baboons a classical blue-yellow coding pathway can be derived. The result is in conformity with the increase of the blue-yellow coding pathway in contrast to the red-green coding pathway in the peripheral retina (45) (Murray et al., 2006).

Further studies are necessary to examine the details of color opponency of the classical S-ON/(L+M)-OFF cells, S-OFF/(L+M)-ON cells and other ganglion cell types that could contribute to the color vision of the baboons.

The new results about the hamadryas baboons give new impetus to more investigations into open questions.

The hamadryas baboon shows a trichromatic color vision

10 Literaturverzeichnis

Datenbanken: Pubmed, www

Bibliotheken: Bibliothek des Zoologischen Institutes der Ludwig-Maximilians-Universität München
Bayerische Staatsbibliothek BSB

Die Bilder zu den Pavianen sind der Datenbank von Wikipedia entnommen
www.wikipedia.org

Link auf → [pdf](#): Aufruf von Publikationen

1. Hepp-Reymond M-C (2000): Verein Forschung für Leben: Die Primaten in der biomedizinischen Forschung: Schwerpunkt Neurowissenschaften → [pdf](#)
2. Grupe G, Christiansen K, Schröder I, Wittwer-Backofen U (2005): Anthropologie: Ein einführendes Lehrbuch ISBN 3-540-21159-4 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
3. Gemperlein R, Adamczyk R (1982): Bestimmung spektraler Empfindlichkeiten des visuellen Systems durch fourierinterferometrische Reizung (FIS): In Automation und neuere Technologie in der Ophthalmologie: Otto-Erich Lund, Klaus Riedel, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart
4. Gemperlein R, Adamczyk R, Paul R, Steiner A (1983): Die Vorteile fourierinterferometrischer Stimulation (FIS) bei der Bestimmung spektraler Empfindlichkeiten des menschlichen Auges. Fortschr Ophthalmol 80: 492-495 → [pdf](#)
5. Adamczyk R, Gemperlein R, Paul R, Steiner A (1983): Objektive elektrophysiologische Bestimmung der skotopischen und photopischen spektralen Empfindlichkeiten des menschlichen Auges mit Hilfe fourierinterferometrischer Stimulation (FIS). Fortschr Ophthalmol 80: 488-491 → [pdf](#)

6. Steiner A (1984): Die lineare und nichtlineare Analyse biologischer Sehsysteme mit einfachen Sinusreizen und Fourier-Interferometrischer Stimulation (FIS). Dissertation an der Fakultät für Biologie der Ludwig-Maximilians-Universität München
7. Peich L, Behrmann G, Kröger RHH (2001): For whales and seals the ocean is not blue: a visual pigment loss in marine mammals. *Eur. J. Neurosci.* Vol 13, 1520-1528 → [pdf](#)
8. Winter Y, López J, Høivang O von (2003): Ultraviolet vision in a bat. *Nature*, Bd. 425, S. 612-614, 9
9. Jacobs GH, Rowe MP (2004): Invited Review Evolution of vertebrate colour vision. *Clin Exp Optom* 87: 4–5: 206–216 → [pdf](#)
10. Nei M, Zhang J, Yokoyama S (1997): Color Vision of Ancestral Organisms of Higher Primates. *Mol. Biol. Evol.* 14(6): 611-618 → [pdf](#)
11. Dulai KS, Bowmaker JK, Mollon JD, Hunt DM (1994): Sequence divergence, polymorphism und evolution of the middle-wave and long-wave visual pigment genes of great apes and old world monkeys. *Vision Res.* Vol. 34, No. 19, pp. 2483-2491 → [pdf](#)
12. Jacobs GH (2002): Progress Toward Understanding the Evolution of Primate Color Vision *Evolutionary Anthropology*, Suppl 1: 132–135 → [pdf](#)
13. Dick (2005): Fortbildung Universität Heidelberg Stammbaum der Sehpigmente (Opsine) der Säugetiere, Seite 29 und Erregungsmuster der Zelltypen, Seite 34 → [pdf](#)
14. Smallwood PM, Wang Y, Nathans J (2002): Role of a locus control region in the mutually exclusive expression of human red and green cone pigment genes. 99: 1008-1011, *Proc Natl Acad Sci USA*
15. Dulai KS, Dornum von M, Mollon JD, Hunt DM (1999): The evolution of trichromatic color vision by opsin gene duplication in New World and Old World primates. *Genome Res.* 9: 629-638 → [pdf](#)
16. Dominy NJ, Lucas PW (2001): Ecological importance of trichromatic vision to primates. *Nature* 410, 363-366 → [pdf](#)

17. Nathans J, Thomas D, Hogness DS (1986): Molecular genetics of human color vision: the genes encoding blue, green and red pigments *Science* 232: 193-202 → [pdf](#)
18. Sharpe LT, Stockman A, Jägle H, Nathans J (1999b): Opsin genes, cone photopigments, color vision and colorblindness. In: Gegenfurtner, K und Sharpe, LT, *Color vision: from genes to perception*, pp. 5-48. Cambridge: Cambridge University
19. Dartnall HJA, Bowmaker JK, Mollon JD (1983): Human visual pigments: microspectrophotometric results from the eyes of seven persons *Proceedings of the Royal Society of London B* 220, 115-130 → [pdf](#)
20. Heldmaier G, Neuweiler G (2003): *Vergleichende Tierphysiologie Band 1 Neuro- und Sinnesphysiologie*. ISBN 3-540-44283-9 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
21. Bowmaker JK (1990): Cone Visual Pigments in Monkeys and Humans. *Advances in Photoreception: Proceeding of a Symposium on Frontiers of Visual Science* → [pdf](#)
22. Neitz M, Neitz J, Jacobs GH (1991): Spectral tuning of pigments underlying red-green color vision. *Science* Vol. 252, 971-974 → [pdf](#)
23. Merbs SL, Nathans J (1993): Role of hydroxyl-bearing amino acids in differentially tuning the absorption spectra of the human red and green cone pigments. *Photochem Photobiol* 58: 706-10
24. Wissinger B, Kohl S (2005): Genetische Ursachen der Farbblindheit *Biospektrum* 1/11. Jahrgang → [pdf](#)
25. Zhou Y, Li W (1996): Gene Conversion and Natural Selection in the Evolution of X-Linked Color Vision Genes in Higher Primates *Mol. Biol. Evol.* 13 (6): 780-783 → [pdf](#)
26. Wässle H (2004): Parallel processing in the mammalian retina. *Nature Reviews Neuroscience*, Volume 5 → [pdf](#)
27. Kolb H (2003): *How the retina works*. Sigma Xi, The Scientific Research Society. *Reproduction* → [pdf](#)
28. Wald G (1945): Human vision and the spectrum. *Science*, N.Y. 101, 653-658

29. Leskov IB, Klenchin VA, Handy JW, Whitlock GG, Govardovskii VI, Bownds MD, Lamb TD, Pugh EN, Arshavsky Jr, Arshavsky VY (2000): The gain of rod phototransduction: reconciliation of biochemical and electrophysiological measurements. *Neuron*. 27:525-537 → [pdf](#)
30. Wässle H, Dacey DM, Haun T, Haverkamp S, Grünert U, Boycott BB (2000): The mosaic of horizontal cells in the macaque monkey retina: With a comment on bplexiform ganglion cells *Visual Neuroscience* 17, 591-608 → [pdf](#)
31. Kaplan E, Benardete E (2001): The Dynamics Of Primate Retinal Ganglion Cells. *Progress In Brain Research* → [pdf](#)
32. Spillmann L, Ransom-Hogg A, Oehler R (1987): A comparison of perceptive and receptive fields in man and monkey. *Hum Neurobiol.* 6(1):51-62 → [pdf](#)
33. Brandstätter JH (2002): Mini-Review Glutamate receptors in the retina: The molecular substrate for visual signal processing. *Current Eye Research* Vol. 25, No. 6, pp. 327-331 → [pdf](#)
34. Vardi N, Dhingra A, Zhang L, Lyubarski A, Wang TL, Morigiwa K (2002): Neurochemical organization of the first visual synapse. *Keio J Med* 51 (3): 154-164 → [pdf](#)
35. Kalloniatis M, Sun D, Foster L, Haverkamp S, Wässle H (2004): Localization of NMDA receptor subunits and mapping NMDA drive within the mammalian retina. *Visual Neuroscience* 21, 587-597 → [pdf](#)
36. Grunder T, Kohler K, Guenther E (2001): Alterations in NMDA receptor expression during retinal degeneration in the RCS rat. *Vis. Neurosci.* 18, 781-781
37. Frenkel C, Urban BW (1992): Molekulare Wirkprofile intravenöser Anästhetika *Anesthesiol. intensivmed. Notfallmed. Schmerzther.* 27 101-108. Georg Thieme Verlag Stuttgart New York → [pdf](#)
38. Hirota K, Lamber DG (1996): Ketamine: Its mechanism(s) of action and unusual clinical uses. *Br J Anaesth* 77(4): 441-444
39. Kohrs R, Durieux ME (1998): Ketamine: Teaching an old drug new tricks *Anesth Analg* 87 (5): 1186-1193

40. Calkins DJ, Sterling P (1999): Evidence that Circuits for Spatial and Color Vision Segregate at the First Retinal Synapse Review. *Neuron*, Vol. 24, 313-321 → [pdf](#)
41. Mullen KT, Kingdom FAA (2002): Differential distributions of red-green and blue-yellow cone opponency across the visual field. *Visual Neuroscience* 19, 109-118 → [pdf](#)
42. Martin PR, Lee BB, White AJ, Solomon SG, Rüttiger L (2001): Chromatic sensitivity of ganglion cells in peripheral primate retina. *Nature* Vol. 410: 933-936 → [pdf](#)
43. Solomon SG, Lee BB, White AJ, Ruttiger L, Martin PR (2005): Chromatic organization of ganglion cell receptive fields in the peripheral retina. *Journal of Neuroscience* 25(18), 4527-4539 → [pdf](#)
44. Lee BB (2004): Paths to colour in the retina. *Clin Exp Optom* 87: 4-5:239-248 → [pdf](#)
45. Murray IJ, Parry NRA, McKeefry DJ (2006): Cone opponency in the near peripheral retina. *Visual Neuroscience* 23, 503-507 → [pdf](#)
46. Dacey D (2004): Origins of perception: Retinal ganglion cell diversity and the creation of parallel visual pathways in: Gazzaniga MS (ed) *The Cognitive Neurosciences III*. MIT Press, Cambridge Mass, p 281-301 → [pdf](#)
47. Curcio CA, Allen KA, Sloan KR, Lerea CL, Hurley JB, Klock IB, Milam AH (1991): Distribution and morphology of human cone photoreceptors stained with anti-blue opsin. *J Comp Neurol.*, 312(4): 610-24 → [pdf](#)
48. Ahnelt PK (1998): The photoreceptor mosaic. *Eye*, 12: 531-540 → [pdf](#)
49. Roorda A, Metha AB, Lennie P, Williams DR (2001): Packing arrangement of the three cone classes in primate retina. *Vision Research* 41 1291-1306 → [pdf](#)
50. Rodieck RW (1998): *The first steps in seeing*. Sinauer Associates. Sunderland, Massachusetts
51. Curcio CA, Allen KA (1990): Topography of ganglion cells in human retina. *J. Comp. Neurol.* 300:5-25 → [pdf](#)
52. Masland RH (2001): The fundamental plan of the retina. *Nature Neuroscience*, Volume 4, No 9 → [pdf](#)

-
53. Bowmaker JK, Dartnall HJA (1980): Visual pigment of rods and cones in a human retina. *Journal of Physiology, London*, 298, 501-511
54. Information, Topographic distributions of L- and M-cones → [pdf](#)
55. Cicerone CM, Nerger JL (1989): The relative numbers of long-wavelength-sensitive to middle-wavelength-sensitive cones in the human fovea centralis. *Vision res. Vol. 29, No. 1*, pp. 115-128
→ [pdf](#)
56. Mollon JD, Bowmaker JK (1992): „The spatial arrangement of cones in the primate fovea“. *Nature Vol. 360*, 677-679 → [pdf](#)
57. Hagstrom SA, Neitz J, Neitz M (1998): Variation in cone populations for red-green color vision examined by analysis of mRNA. *NeuroReport Vol. 9, No. 9*, 1963-1967 → [pdf](#)
58. Deeb SS, Diller LC, Williams DR, Dacey DM (2000): Interindividual and topographical variation of L:M cone ratios in monkey retinas. *J. Opt. Soc. Am. A Vol. 17, No. 3*, 538–544 → [pdf](#)
59. Albrecht J, Jägle H, Hood DC, Sharpe LT (2002): The multifocal electroretinogramm (mfERG) and cone isolating stimuli: Variation in L- and M-cone driven signals across the retina. *Journal of visions 2*, 543-558 → [pdf](#)
60. Hofer H, Carroll J, Neitz J, Neitz M & Williams DR (2005): Organization of the Human Trichromatic Cone Mosaic. *The Journal of Neuroscience*, 25(42)9669-9679 → [pdf](#)
61. Hood SM, Mollon JD, Purves L, Jordan G (2006): Color discrimination in carriers of color deficiency. *Vision Research 46* 2894-2900
→ [pdf](#)
62. Brigell M, Dong C-J, Rosolen S, Tzekov R (2005): An overview of drug development with special emphasis on the role of visual electrophysiological testing. *Documenta Ophthalmologica 110*: 3-13 → [pdf](#)
63. Hood DC, Birch DG (1990): The A-wave of the human electroretinogram and rod receptor function. *Invest Ophthalmol Vis Sci 31*: 2070-81
64. Stockton RA, Slaughter MM (1989): B-wave of the electroretinogram. A reflection of ON bipolar cell activity. *J Gen Physiol. 93*: 101-122

65. Dong CJ, Hare WA (2000): Contribution to the kinetics and amplitude of the electroretinogram b-wave by third-order retinal neurons in the rabbit retina. *Vision Res* 40: 579-589
66. Gouras P (1998): Detecting early post-chiasmatic visually evoked responses. *Clin Vis Sci* 3: 119-124
67. Satoh H, Fukuda N, Kuriki H, Maki Y, Nomura M, Saji Y, Nagawa Y (1980): A procedure for recording electroretinogram (ERG) in conscious monkeys, and effects of some drugs. *Folia pharmacol. japon.* 76, 581-594 → [pdf](#)
68. Surrige AK, Osorio D, Mundy NI (2003): Evolution and selection of trichromatic vision in primates. *Trends Ecol Evol* Vol. 18, No. 4: 198-206 → [pdf](#)
69. Ordnung der Primaten → [pdf](#)
70. Senut B (1981): Humeral outlines in some hominoid primates and in Plio-Pleistocene hominids. *Am. J. Phys. Anthrop.* 56, 275-283
71. Genetische Distanz zwischen Primaten:
Page SL, Chiu C und Goodman M (1999) Molecular phylogeny of Old world monkeys (Cercopithecidae) as inferred from gamma-globin DNA sequences *Molecular Phylogenetics and Evolution* 13(2):348-59 → [pdf](#)
72. Gilad Y, Wiebe V, Przeworski M, Lancet D, Pääbo S (2004): Loss of Olfactory Receptor Genes Coincides with the Acquisition of Full Trichromatic Vision in Primates. *PLoS Biology* Volume 2, Issue 1, Page 0120 → [pdf](#)
73. Gegenfurtner KR, Sharpe LT (2000): *Color Vision: From Genes to Perception*. ISBN-10: 0521590531, ISBN-13: 978-0521590532 Cambridge University Press
74. Tan Y, Li W (1999): Trichromatic vision in prosimians *Nature* 402:36
75. Jacobs GH (1998a): A perspective on color vision in platyrrhine monkeys. *Vision Research*, 38, 3307-3313
76. Jacobs GH, Deegan II JF (1999): Uniformity of colour vision in Old World monkeys *Proc. R. Soc. Lond. B* 266, 2023-2028 → [pdf](#)
77. Cammer TJ, Malsbury DW, Tsin AT (1990): Vitamin A metabolism in the baboon eye. *Brain Res Bull.* 24(6):755-7 → [pdf](#)

78. Adams CK, Bryan AH, Jones AE (1968): Electroretinographic determination of the spectral sensitivity of the baboon (*Papio anubis*). Vision Res. Vol. 8, pp.1399-1405. Pergamon Press
→ [pdf](#)
79. Krebs W, Krebs IP (1989): Quantitative Morphology of the Central Fovea in the Primate Retina. The American Journal of Anatomy 184: 225-236 → [pdf](#)
80. Fischer QS, Kirby MA (1991): Number and Distribution of Retinal Ganglion Cells in Anubis Baboons (*Papio anubis*). Brain Behav Evol 37: 189-203 → [pdf](#)
81. Neitz M, Balding SD, McMahon C, Sjöberg SA, Neitz J (2006): Topography of long- and middle-wavelength sensitive cone opsin gene expression in human and Old World monkey retina. Visual Neuroscience 23, 379-385 → [pdf](#)
82. Bowmaker JK, Astell S, Hunt DM, Mollon JD (1991): Photosensitive and photostable pigments in the retinae of old world monkeys. J.exp. Biol. 156, 1-19 → [pdf](#)
83. Martin PR, Grünert U, Chan TI, Burnstedt K (2000): Spatial order in short-wavelength-sensitive cone photoreceptors: a comparative study of the primate retina. J. Opt. Soc. Am. A Vol. 17, No. 3 → [pdf](#)
84. Marc RE, Sperling HG (1977): Chromatic organization of primate cones Science, Vol. 196 → [pdf](#)
85. Zhou ZJ, Marshak DW, Fain GL (1994): Amino acid receptors of midget and parasol ganglion cells in primate retina. Proc. Natl. Acad. Sci. USA Vol. 91, pp. 4907-4911 → [pdf](#)
86. Reichelt W, Hernandez M, Damian RT, Kisaalita WS, Jordan BL (1996): GABA_A receptor currents recorded from Müller glial cells of baboon (*Papio cynocephalus*) retina. Neuroscience Letters 203 159-162 → [pdf](#)
87. Reichenbach A (1999): Neuroglia – das andere zelluläre Element im Nervensystem: Die Müllersche Gliazelle. Socio-medico Verlag, pp 1-217 Wessobrunn

88. Paul R (1981): Neue Aspekte der spektralen Empfindlichkeit von *Calliphora Erythrocephala* gewonnen durch Fourierinterferometrische Stimulation (FIS). Dissertation an der Fakultät für Biologie der Ludwig-Maximilians-Universität München
89. Kirschfeld K, Feiler R, Hardie R, Vogt K, Franceschini N (1983): The sensitizing pigment in fly photoreceptors. Properties and candidates. *Biophys. Struct. Mech.* 10, 81
90. Gemperlein R (1983/84): Einsatz spektral modulierten Lichtes zur simultanen Messung optischer Eigenschaften. Sonderdruck aus: *DIE FARBE* 31, Nr. 4-6 → [pdf](#)
91. Gemperlein R (1992): 1. Münchner Forum für experimentelle Grundlagenforschung am visuellen System Fourierinterferometrische Stimulation zur Analyse des visuellen Systems → [pdf](#)
92. Wiesner H (1990): Zum aktuellen Stand der Distanzimmobilisation. Deutsche veterinärmed. Gesellschaft e.V. Tagung der Fachgruppe für Zootierkrankheiten, S.27-35
93. Wiesner H (1998): Tierschutzrelevante Neuentwicklung zur Optimierung der Distanzimmobilisation. *Tierärztl. Praxis* 26, S. 225-233
94. Hingerle A (2004) Klinische Studien über die Immobilisation von Mantelpavianen (*Papio hamadryas*) unter Verwendung der „Hellabrunner Mischung“ und über den postnarkotischen Einfluss von Atipamezol und Yohimbin im Vergleich zu Etilefrin als Aufwachbeschleuniger. Dissertation an der Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München
95. Kluge O (2006): Praktische Informationstechnik mit C#, Anwendungen und Grundlagen, X, 304 p., 115 illus., Hardcover ISBN: 3-540-20812-7 → [pdf](#)
96. Stone J, Johnston E (1981): The topography of primate retina. A study of the human, bushbaby, and new- and old-world monkeys. *J. Comp. Neurol.*, 196:205-223
97. Goodchild AK, Gosh KK, Martin PR (1996): Comparison of photoreceptor spatial density and ganglion cell morphology in the retina of human, macaque monkey, cat and the marmoset *Callithrix jacchus*. *The journal of comparative neurology* 366:55-75 → [pdf](#)

11 Abkürzungsverzeichnis

S-, M-, L- Zapfen	(Short-wavelength), (Middle-wavelength), (Long-wavelength)-Zapfen
FIS	Fourierinterferometrische Stimulation
ERG	Elektroretinogramm
LCR	Locus control region
OLM	Äußere Grenzmembran
ONL	Äußere nukleäre Schicht, Outer Nuclear Layer
OPL	Äußere plexiforme Schicht, Outer Plexiform Layer
INL	Innere nukleäre Schicht, Inner Nuclear Layer
IPL	Innere plexiforme Schicht, Inner Plexiform Layer
GCL	Ganglienzellschicht, Ganglion Cell Layer
ILM	Innere Grenzmembran
cGMP	Zyklisches Guanosinmonophosphat
GMP	Guanosinmonophosphat
GDP	Guanosindiphosphat
GTP	Guanosintriphosphat
PDE	Phosphodiesterase
CNG-Kanäle	Cyclic-nucleotide-gated-Kanäle
GCE	Guanylatzyklase
IMB	Invaginating-midget-Bipolarzelle
FMB	Flat-midget-Bipolarzelle
KA	Kainat
NMDA	N-methyl-D-aspartate
AMPA	α -amino-3-hydroxy-5-methyl-4-isoxazole propionate

GABA	γ -Aminobuttersäure
GLY	Glycin
iGluR	Ionotroper Glutamatrezeptor
mGluR	Metabotroper Glutamatrezeptor
Ketamin	2-(2-Chlorphenyl)-2-methylaminocyclohexanon-hydrochlorid
LGN	Lateral geniculate nucleus
SC	Superior colliculus
mRNA	Direkte RNA-Kopie eines zu einem Gen gehörenden Teilabschnitts der DNA
PCR-SSCP	Polymerase chain reaction-single strand conformation polymorphism
mfERG	Multifokales Elektroretinogramm
QRT-PCR	Real time polymerase chain reaction
Visual streak	Elongation gleicher Dichtelinie entlang der horizontalen Achse in der Retina
PF	Der statistische Packungsfaktor ist das Verhältnis des maximalen Zellabstands bei hexagonaler Packungsdichte zum effektiven Zylinder-Radius im Quadrat
NBT	Nitroblau Tetrazolium Chlorid
DAC	Digital-Analog-Konverter
ADC Ch0/1/2	Analog-Digital-Konverter Kanal 0/1/2, Channel 0/1/2
Offset	Gleichspannungsanteil
Gain	Verstärkung
HM	Hellabrunner Mischung
ESD	Electrostatic discharge
IFG	Interferogramm, FIS-Reiz
LAS	Halbleiter-Lasersignal
FFT	Fast Fourier Transformation

12 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Stammbaum der Sehpigmente (Opsine) der Säugetiere (13)(Dick, 2005)	4
Abb. 2-2: Die Farbigkeit im S-Kanal (S/(L+M, Ordinate) und im L-Kanal (L/(L+M, Abszisse) für Früchte und Blätter aus dem Nahrungsspektrum der Schimpansen und Altweltaffen. Die Werte sind helligkeitsnormiert (16))(Dominy und Lukas, 2001)	5
Abb. 2-3: Absorptionsspektren der 3 Zapfentypen und der Stäbchen für die menschliche Retina. (Relative Absorption, Ordinate) und (Wellenlänge λ in nm, Abszisse) (19)(Dartnall et al., 1983)	7
Abb. 2-4: Spektraler Shift im Absorptionsmaximum zwischen dem L- und M-Zapfengen durch Aminosäuresubstitutionen (23)(Merbs und Nathans, 1993)	8
Abb. 3-1: Längsschnitt des Auges und Aufbau der Retina in Schichten (27)(Kolb, 2003)	9
Abb. 3-2: Bild links: Eingefärbte Zapfen in einer Affen-Retina Bild Mitte: Innenansicht auf die Disks mit Rhodopsin-Moleküle Bild rechts: Jedes Rhodopsin besteht aus dem Proteinanteil Opsin und dem 11- <i>cis</i> - Retinal Bild rechts unten: Bei Lichtreiz ändert das Retinal-Molekül seine Form (27)(Kolb, 2003)	10
Abb. 3-3: Bipolarzelltypen in der Primaten-Retina (26)(Wässle, 2004)	12
Abb. 3-4: Dichte der Horizontalzellen und Zapfen bei unterschiedlichen Exzentrizitäten in der Makaken-Retina (30)(Wässle et al., 2000)	13
Abb. 3-5: Bild links: Aktivierung der ON- und OFF-Ganglienzellen in der peripheren Retina Bild rechts: Aktivierung der ON- und OFF-Ganglienzellen in der Fovea (27)(Kolb, 2003)	14
Abb. 3-6: Ionotrope und metabotrope Glutamatrezeptoren in der Retina (33)(Brandstätter, 2002)	15
Abb. 3-7: Molekulare anästhetische Wirkprofile bei bisher untersuchten Strukturen. Die Zahlen in Klammern beziehen sich auf Literaturangaben im Original (37)(Frenkel und Urban, 1992)	16
Abb. 3-8: Anisotrope Form des Dendritenbaums einer midget-Ganglienzelle. Symbolisch ist der Modellrechnung eine Zapfenverteilung in einer Makaken-Retina hinterlegt. Weißer Kreis kennzeichnet die Optimierung. Skala = 50 μm (42)(Martin et al., 2001)	18
Abb. 3-9: Schema des neuronalen Netzes in der Primaten-Retina (44)(Lee, 2004)	19
Abb. 3-10: Abnahme der Farbopponenz des L-M-Kanals gegenüber dem S-L+M-Kanal in der peripheren Retina für eine Testperson (45)(Murray et al., 2006)	20

- Abb. 3-11: Längsschnitt des LGN zeigt die Bahnen der 3 Ganglienzelltypen. Die parasol-, midget- und small bistratified-Ganglienzellen unterscheiden sich in der Größe und Dichte des Dendritenbaums in der Nähe der Fovea und in der peripheren Retina (46)(Dacey, 2004) 21
- Abb. 3-12: Ganglienzelltypen im Überblick. *In vitro*-Präparationen einer Makaken-Retina (46)(Dacey, 2004) 22
- Abb. 3-13: Häufigkeitsverteilung der Stäbchen (rods) und Zapfen (cones) in der Retina. Die Verteilung der Stäbchen und Zapfen ist nasal und temporal unterschiedlich (50)(Rodieck, 1998) 23
- Abb. 3-14: In der Graphik ist die Zapfendichte im Bild links und die Dichte der Ganglienzellen im Bild rechts in der menschlichen Retina dargestellt. Mit F wird die Fovea und mit schwarzem Punkt wird der blinde Fleck gekennzeichnet. Hohe Zelldichte (rot), niedere Zelldichte (blau) (51)(Curcio und Allen, 1990) 24
- Abb. 3-15: Stochastische Zeitereignisse bestimmen die relative Zahl von M- und L-Zapfen bei Trägern mit Farbdefekten (61)(Hood et al., 2006) 27
- Abb. 3-16: Erregungsmuster der Zelltypen (13)(Dick, 2005) 28
- Abb. 3-17: Wirkung von Pentobarbital (Bild a) und Ketamin (Bild b) auf die ERG-Antwort von Langschwanz-Makaken (67)(Satoh et al., 1980) Intensität: 2 Joule und Zeitkonstante: 0,1 Sekunde Pentobarbital (40 mg/kg, i.p.) oder Ketamin (20 mg/kg, i.m.) 29
- Abb. 4-1: Farbsehen innerhalb der Phylogenie der Primaten (68)(SurrIDGE et al., 2003) 30
- Abb. 4-2: Prozentuale Verteilung von Pseudogenen in Geruchsgenen bei 19 Primatenarten (72)(Gilad et al., 2004) 33
- Abb. 4-3: Photopigmente bei Primaten im Überblick. Die Pigmentdaten entstammen nachfolgenden Quellen (73)(Gegenfurtner und Sharpe, 2000) 34
- Abb. 4-4: Spektrale Empfindlichkeiten λ_{\max} in nm der Photorezeptoren bei 7 Altweltaffen (einschließlich 4 Roten Pavianen) und bei 5 Menschen. Die untersuchten Photorezeptoren stehen unter den Angaben der Wellenlängen in Klammern (21)(Bowmaker, 1990) 35
- Abb. 4-5: Gemittelte skotopische spektrale Empfindlichkeitsfunktionen von 6 Grünen Pavianen. Amplitude der b-Welle (Bild A) und Latenz-Zeit bis zur Amplitudenspitze der b-Welle (Bild B) (78)(Adams et al., 1968) 36
- Abb. 4-6: Gemittelte photopische spektrale Empfindlichkeitsfunktionen von 3 Grünen Pavianen (78)(Adams et al., 1968). Kurven psychophysischer Messungen am Menschen (ohne Toleranzbalken) dienen als Vergleich (28)(Wald, 1945) 37
- Abb. 4-7: Lichtmikroskopische Aufnahme eines tangentialen Schnitts durch den Bereich der Fovea eines Grünen Pavians. Das Zentrum der Fovea ist mit C gekennzeichnet. B: Bipolarzellen, H: Horizontalzellen, P:

Pigmentepithel. Das Feld sehr hoher Zapfendichte erscheint im Zentrum C. Auflösung x262 (79)(Krebs und Krebs, 1989)	39
Abb. 4-8: Topographie der Ganglienzelldichten in der Retina des rechten Auges (Bild links) und des linken Auges (Bild rechts) eines Grünen Pavians. Die Orte gleicher Dichten beziehen sich auf die zusammenhängenden Linien. Das Kreuzchen in der Retina des linken Auges markiert die vergleichenden Untersuchungen über die Größe der Somata. N: Nasal, T: Temporal, Skala = 5,0 mm (80)(Fischer und Kirby, 1991)	40
Abb. 4-9: Relatives Verhältnis der L- zu M-Zapfen-mRNA in der Retina von Altweltaffen (58)(Deeb et al., 2000)	41
Abb. 4-10: Topographie des prozentualen Anteils der L-Zapfen-mRNA in der Retina von 4 Grünen Pavianen (Pictogramme) im Vergleich zur menschlichen Retina (Kreise) (81)(Neitz et al., 2006)	42
Abb. 4-11: Spektrale Empfindlichkeiten der Photorezeptoren von 4 Roten Pavianen. In Klammern steht die Anzahl der untersuchten Photorezeptoren. Jede Wellenlänge ist mit der Standardabweichung versehen (82)(Bowmaker et al., 1991)	43
Abb. 4-12: Verteilung der S-Zapfen in der peripheren Retina des Roten Pavians (Bild links) bei einer Exzentrizität von >10,0 mm im Vergleich zum Lisztäffchen (Bild rechts). Die S-Zapfen („schwarze Stifte“) sind mit einem Antiserum gefärbt (83)(Martin et al., 2000)	43
Abb. 4-13: Vergleich des statistischen Packungsfaktors PF. Jeder Balken zeigt den Durchschnittswert und die Standardabweichung für retinale Proben. Die Probenanzahl steht an der Abszisse (83)(Martin et al., 2000).	44
Abb. 4-14: Variation der M- und L-Zapfenzahl im fovealen Bereich in der Retina der Roten Paviane (82)(Bowmaker et al., 1991)	44
Abb. 4-15: Parasol-Ganglienzellen (Bild A) und midget-Ganglienzellen (Bild B) antworten auf erregende KA-, NMDA-, AMPA-Rezeptoren und hemmende GABA-, GLY-Rezeptoren, siehe Bild C und D (85)(Zhou et al., 1994)	46
Abb. 4-16: Das Spiel der Paviane im Felsengelände des Münchener Tierparks Hellabrunn	47
Abb. 4-17: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Mantelpavian-Retina, Skala = 20µm (87)(Reichenbach, 1999)	48
Abb. 4-18: Schemazeichnung: Zählung in Zell-Kolumnen von 12 Neuronen mit Schichtdicken von 10 µm und Streifenbreiten von 20 µm in einer neonatalen und adulten Mantelpavian-Retina. Stäbchen (blau), Zapfen (rot) (87)(Reichenbach, 1999)	49
Abb. 5-1: Methode der Fourierinterferometrischen Stimulation (FIS) nach (4)(Gemperlein et al., 1983)	51
Abb. 5-2: Spektrale Auflösung des Interferometers in Abhängigkeit von der Wellenlänge bei optischen Wegdifferenzen (90)(Gemperlein, 1983/84)	53

Abb. 5-3: ERG-Antwort auf FIS-Reiz (Bild oben). Skotopische spektrale Empfindlichkeit des Auges bei 500 nm (Bild unten) (3)(Gemperlein und Adamczyk, 1982)	54
Abb. 5-4: Berechnung der spektralen Empfindlichkeit (91)(Gemperlein, 1992)	55
Abb. 5-5: 1. Innenansicht des Interferometers mit Lichteintritt (Xenon-Lampe 1), Lichtaustritt, Strahlenteiler und fahrbarem Spiegel	57
Abb. 5-6: 2. Innenansicht des Interferometers mit Halbleiter-Laser 635 nm, Gehäuse für die Photodiode des Halbleiter-Lasers und Piezokeramik zur Ansteuerung des fahrbaren Spiegels	58
Abb. 5-7: 3. Innenansicht des Interferometers mit Photodiode zur Messung des FIS-Reizes, Glasplättchen zum Ausspiegeln des FIS-Reizes und verstellbarer Irisblende für den Lichtaustritt	58
Abb. 5-8: 4. Innenansicht des Interferometers mit Spannungsversorgung ± 15 Volt für die Mikrometerschrauben zur Feinjustierung der Spiegel, Spannungsversorgung 5 Volt für den Halbleiter-Laser 635 nm und Spiegel fest, aber kippbar	59
Abb. 5-9: Außenansicht des Interferometers mit Eingang der Hochspannungsversorgung für die Piezokeramik, BNC-Ausgänge für FIS-Reiz, Halbleiter-Lasersignal und Kipp-Schalter zur Feinjustage der Spiegel	60
Abb. 5-10: PCMCIA-Schnittstelle	60
Abb. 5-11: Einstellung der Offset- und Gainwerte am Spannungsverstärker OP 741 bei den Messungen am Mantelpavianauge im Münchener Tierpark Hellabrunn	61
Abb. 5-12: Prinzip des Spannungsverstärkers OP 741	61
Abb. 5-13: Optischer Aufbau zur Ableitung der ERG-Antwort bei voller Intensität mit Xenon-Lampe 1 und Farbadaptation mit Xenon-Lampe 2	62
Abb. 5-14: Programmoberfläche zur Messung, Erfassung und Speichern des FIS-Reizes und der ERG-Antwort. Im Graphikfenster: Halbleiter-Lasersignal (schwarz) und FIS-Reiz (rot)	64
Abb. 5-15: Diagramm Signalablauf	65
Abb. 6-1: Betrieb des Interferometers im OP-Raum des Münchener Tierparks Hellabrunn	66
Abb. 6-2: Klinische Untersuchungen an einem Mantelpavian-Männchen, Alter ca. 9 Jahre und 30 kg schwer	68
Abb. 6-3: Mantelpavian-Männchen und Tierpfleger geerdet	70
Abb. 6-4: Ulbrichtkugel am Auge des Mantelpavians. Messung unter Ganzfeldbeleuchtung	71
Abb. 6-5: Gesamtansicht der Messapparatur FIS im OP-Raum des Münchener Tierparks Hellabrunn	72

Abb. 6-6: Erfassungsprogramm FIS im OP-Raum des Münchener Tierparks Hellabrunn	72
Abb. 7-1: ERG-Antwort auf einen Rechteck-Impuls als Lichtreiz / Pavian-Auge / n=3	73
Abb. 7-2: Zeitsignale der ERG-Antwort (blau), des FIS-Reizes (IFG, grün) und des Halbleiter-Lasers (LAS, rot)	75
Abb. 7-3: Cosinus-Funktionen der verschiedenen Fensterfunktionen (95)(Kluge, 2006)	76
Abb. 7-4: FIS-Reiz (grün) und ERG-Antwort (rot)	77
Abb. 7-5: Berechnung der ERG-Antwort mit der Hanning-Fensterfunktion	77
Abb. 7-6: ERG-Antwort nach der Applikation der Hanning-Fensterfunktion	78
Abb. 7-7: Amplitudenfrequenzgang eines Mittelwertfilters mit 3 und 10 Werten (95)(Kluge, 2006)	78
Abb. 7-8: Gemittelte ERG-Antwort (blau) mit zugehörigem FFT-Spektrum (rot)	79
Abb. 7-9: Mittelung der Amplituden- und Phasenspektren der ERG-Antwort (blau) und des FIS-Reizes (grün)	80
Abb. 7-10: Ansicht Datenbezüge aus der Excel-Vorlage zur Berechnung der spektralen Empfindlichkeit. Die Excel-Zeile mit „gemittelte Daten“ und „FIT“ ist abgeschnitten	82
Abb. 7-11: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 16 Messungen	83
Abb. 7-12: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 16 Messungen	83
Abb. 7-13: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 7 Messungen	84
Abb. 7-14: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 50 Messungen	84
Abb. 7-15: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 17 Messungen	85
Abb. 7-16: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 18 Messungen	85
Abb. 7-17: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 19 Messungen	86
Abb. 7-18: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 9 Messungen	86
Abb. 7-19: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 6 Messungen	87
Abb. 7-20: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 9 Messungen	87
Abb. 7-21: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 8 Messungen	88
Abb. 7-22: Spektrale Empfindlichkeit der ERG-Antwort mit FIS-Reiz/ 7 Messungen	88
Abb. 7-23: Prozentualer Anteil der S-, M- und L-Zapfen in der Mantelpavian-Retina. Der Ausreißer stammt vom Mantelpavian-Weibchen mit Transponder-Nr. 968-1194675	89

Abb. 7-24: Variation der L- zu M-Zapfenzahl in der Mantelpavian-Retina bei Weibchen und Männchen. Die Standardabweichung beträgt 0,04 Prozent jeweils für M- und L-Zapfen

90

13 Anhang Programme in Visual Basic

Programm für die Regelung und Messung von FIS-Reiz (Interferogramm) und Reaktion (ERG)

(Gemperlein, Obermüller)

Option Explicit

Variable für die PCMCIA Karte

Const BoardNum% = 1

Const Gain = BIP10VOLTS

Const NumPoints& = 9

Const FirstPoint& = 0

Dim ADDaten%(NumPoints&)

Board number zur Datenerfassung

Set the gain

Number of data points to collect

Puffer für eine Abtastung

Programm Variable

Dim Vorlauf As Integer

Dim AnzahlWerte As Integer

Dim MaxWerte As Integer

Dim MaxWerteReg As Integer

Dim Sizex As Integer

Dim Chan%

Dim Kan0%

Dim Kan1%

Dim Kan2%

Dim LMin As Integer

Dim LMax As Integer

Dim LAmplitude As Integer

Dim LOffset As Integer

Dim RPPP As Integer

Dim MPPP As Integer

Dim HzLas As Double

Dim dt As Double

Dim RefS() As Single

Dim Direction As Integer

Dim Faktor As Double

Dim Diff As Single, Diffalt As Single

Dim RIncAnfang As Double

Dim Gesamtpunkte As Integer

Dim sizey As Integer

Dim deltax As Variant

Dim deltay As Variant

Dim i As Integer

Dim Eins As Integer

Dim Messzähler As Integer

Dim j As Long

Dim l As Long ' allgemeiner Zähler

Dim N As Integer

Dim LängeZ As Integer

Dim RAVolt! 'single Fließkomma

Dim REVolt!

Dim RZwi!

Dim RIncVolt!

Dim DAWert%

Dim UIStat%

Reaktion ERG blau

Reiz Interferogramm rot

Laser schwarz


```

Dim Range%
Dim MemHandle&, ChanTags%()
' define a variable to contain the handle for
' memory allocated by Windows through cbWinBufAlloc%()
Dim D As String
Dim Zeichen As String
Dim ext As String
Dim Speiname As String
Dim GeprNamen As String
Dim Nameneingegeben As Boolean
Const Zeichenmin = 3
Const Zeichenmax = 15
Dim Ordner As String
Dim fso As New FileSystemObject
Dim tstream As TextStream
Dim filnam As String
Dim K As Integer
Dim gespeichert As Boolean
Dim Endknopfgedrückt As Boolean
Dim Erfassen As Boolean
Dim GeregeltErfassen As Boolean
Dim Laserparamgeholt As Boolean
Dim TextMeldung As String
' Aus Modul FFT
Const Pi = 3.1415926535897
Dim Inverse As Boolean
Dim Daten() As Double
Dim Amplituden() As Double
Dim Samples As Long
Dim RealDaten() As Double, ImagDaten() As Double
Dim RealFT() As Double, ImagFT() As Double
Dim Min As Double, Max As Double
Dim MWERT As Double
Dim aufab As Boolean
Dim lasermarke_durchlaufen As Boolean
Dim Aufhören As Boolean

```

Diese Routine wird als erstes beim Start des Programmes ausgeführt. Sie initiiert die Variablenanfangswerte und die PCMCIA-Karte

```

Private Sub Form_Load()
    geregeltStart.Enabled = False
    lasermarke_durchlaufen = False
    GeregeltErfassen = False
    Nameneingegeben = False
    Laserparamgeholt = False

```

Anfangswerte für Regelung im Tierpark

```

'RPPP = Val(EingRPPP.Text)
'RIncAnfang = -0.002480064
'RIncVolt = RIncAnfang
'FaktorReg.Value = 18858

```

Piezo macht bei Steiner-OM IF=Tierpark maximal 85 Laserperioden bei 0-5Volt

Anfangswerte für Regelung im Labor: September 2006 RG

```

RPPP = Val(EingRPPP.Text)
RIncAnfang = -0.001477
RIncVolt = RIncAnfang
FaktorReg.Value = 16501

```

***Regelungspunkte pro Periode
Increment der Spannung am Anfang***

```

MPPP = Val(MPunkte.Text)

```

***Faktor bei der Regelungsberechnung
des nächsten Schrittes
Messpunkte pro Periode***

```

HzLas = Val(HzLaser.Text)
Inverse = False
gespeichert = False
Eins = 1
Vorlauf = Val(VorlaufEingabe.Text)

If Speichere.Value = True Then
  NamenBilden
End If

```

Frequenz des Lasers bei der Messung, hieraus berechnet sich das dt für den Timer normale FFT, bei True Inverse FFT

Namen zur Speicherung: Datum und Zeit wird angehängt

Alles an Timern ausgeschaltet

```

Endknopfgedrückt = False
ZeittriggerEinzel.Enabled = False
ZeittriggerEinzel.Interval = Val(Abtastrate.Text)
ZeittriggerEauf_ab.Enabled = False
ZeittriggerEauf_ab.Interval = Val(Abtastrate.Text)
laserTimer.Enabled = False
RegelungTimer.Enabled = False
MessungTimer.Enabled = False
DriftTimer.Enabled = False
geregeltTimer.Enabled = False
Druck.Enabled = False

```

PCMCIA Initialisierungen

```

' declare revision level of Universal Library
  UIStat% = cbDeclareRevision(CURRENTREVNUM)
' Initiate error handling
' activating error handling will trap errors like
' bad channel numbers and non-configured conditions
' Parameters:
' PRINTALL:all warnings and errors encountered will be printed
' DONTSTOP:if an error is encountered, the program will not stop,
'           errors must be handled locally
  UIStat% = cbErrHandling(PRINTALL, DONTSTOP)
  If UIStat% <> 0 Then Stop
' If cbErrHandling% is set for STOPALL or STOPFATAL during the program
' design stage, Visual Basic will be unloaded when an error is encountered
' We suggest trapping errors locally until the program is ready for compiling
' to avoid losing unsaved data during program design. This can be done by
' setting cbErrHandling options as above and checking the value of UIStat%
' after a call to the library. If it is not equal to 0, an error has occurred
ADCStop.Visible = False
Chan% = 0
RAVolt! = Val(Rampeanfng.Text) %
  UIStat% = cbFromEngUnits(BoardNum%, Range%, RAVolt!, DAWert%)
  If UIStat% <> 0 Then Stop
  UIStat% = cbAOut(BoardNum%, 0, Gain, DAWert)
End Sub

```

**DAC Ausgabekanal
RAVolt umwandeln**

Ungeregeltes Erfassen

Die ADC-Start und Stop Taste erlauben die Erfassung der verschiedenen Kanäle Damit ist eine optimale Justage der Signale möglich, indem am OM-Verstärker die Verstärkung und der Offset so eingestellt werden, dass nahezu Vollausteuern

im Fenster erfolgt.

```

Private Sub ADCStart_Click()
    Messzähler = 0
    If auf_ab.Value = True Then
        aufab = True
    Else
        aufab = False
    End If
    Auf_Ab_Messen
End Sub

```

Hier wird erfasst und dargestellt

```

Private Sub ADCStop_Click()
    ADCStart.Visible = True
    ADCStop.Visible = False
    ZeittriggerEinzel.Enabled = False
    ZeittriggerEauf_ab.Enabled = False
End Sub

```

```

Private Sub Auf_Ab_Messen()
    ReDim Daten(2, Anzahl)
    ReDim Amplituden(2, Anzahl)
    ReDim RealDaten(Anzahl)
    ReDim ImagDaten(Anzahl)
    ReDim RealFT(Anzahl)
    ReDim ImagFT(Anzahl)

    MaxWerte = (Anzahl + 2 * Vorlauf) - 1
    If Einzelerfassung(0).Value = True And AnzahlWerte = MaxWerte Then GoTo Ende

    AnzahlWerte = 0
    Eins = 1
    If Speichere.Value = True And Nameneingegeben = False Then
        NamenBilden
        Nameneingegeben = True
    End If
    If Vorlauf = 0 Then Erfassen = True Else Erfassen = False
    RAVolt! = Val(Rampeanfang.Text)
    REVolt! = Val(Rampenende.Text)

    Umrechnung von Volt in DAC Werte für +/-10V
    -10 = 4094, 0 = 2048, +10 = 0
    If aufab = True Then
        If Messzähler Mod 2 = 0 Then
            auf.Value = True
        Else
            ab.Value = True
        End If
    End If

    If (auf.Value = True) Then
        RIncVolt! = (REVolt! - RAVolt!) / ((Anzahl - 1) + Vorlauf)
    End If
    If ab.Value = True Then
        RZwi! = REVolt!
        REVolt! = RAVolt!
        RAVolt! = RZwi!
        RIncVolt! = (REVolt! - RAVolt!) / ((Anzahl - 1) + 2 * Vorlauf)
    End If

```

```

UIStat% = cbFromEngUnits(BoardNum%, Range%, RAVolt!, DAWert%)
If UIStat% <> 0 Then Stop

ADCStart.Visible = False
ADCStop.Visible = True
Punktinit

'If (AnzahlWerte = 0 And ab.Value = True) = True Then SchnellAuf

If (ab.Value Or auf.Value) = True Then
I = 0
ZeittriggerEinzel.Enabled = True
End If

Ende: Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "Ende Auf_Ab_Justage "
End Sub

Private Sub ZeittriggerEinzel_Timer()
If I = 0 Then Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "ZeittriggerEinzel_Timer"
I = 1
ADCConvert
RAVolt! = RAVolt! + RIncVolt!
UIStat% = cbFromEngUnits(BoardNum%, Range%, RAVolt!, DAWert%)
If UIStat% <> 0 Then Stop
'ohne Grafik
If ohneGrafik = True Then GoTo DAnz:
,mit Grafik
If Erfassen = False Then GoTo DAnz:
PunktZeichnung (AnzahlWerte - Vorlauf)
DAnz: AnzahlWerte = AnzahlWerte + 1
Erfassen = (AnzahlWerte >= Vorlauf) And (AnzahlWerte <= MaxWerte - Vorlauf)
If AnzahlWerte = MaxWerte Then
ZeittriggerEinzel.Enabled = False 'Stop der Messung
Messzähler = Messzähler + 1
ADCStart.Visible = True
ADCStop.Visible = False
Auf_Ab_Messen
End If
End Sub

```

**Auf_Ab_Messen wird vom ZeittriggerEinzel_Timer über ADC-Start aufgerufen
Aufruf LaserTimer_Timer**

```

Private Sub ADCConvert()
Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "ADCConvert"

```

Hier erfolgt die Erfassung eines Wertes

```

UIStat% = cbAln(BoardNum%, 0, Gain, Kan0%)
UIStat% = cbAln(BoardNum%, 1, Gain, Kan1%)
UIStat% = cbAln(BoardNum%, 2, Gain, Kan2%)

```

Während des Vorlaufs wird nur die Rampe ausgegeben und nicht erfasst

```

If Erfassen = False Then GoTo DA:
Daten(0, AnzahlWerte - Vorlauf) = Kan0%
Daten(1, AnzahlWerte - Vorlauf) = Kan1%

```

```
Daten(2, AnzahlWerte - Vorlauf) = Kan2%
'Debug.Print Kan0%, Kan1%, Kan2%
```

DAC-Ausgabe

```
DA: UIStat% = cbAOut(BoardNum%, 0, Gain, DAWert%)
End Sub
```

Aufruf von ZeittriggerEinzel_Timer und LaserTimer_Timer, Auf_Ab_geregelt2

```
Private Sub Punktinit()
    Sizex = Picture1.ScaleWidth
    sizey = Picture1.ScaleHeight
    deltax = Sizex / (Anzahl - 1)
    deltax = sizey / 4095
End Sub
```

```
Private Sub PunktZeichnung(v As Integer)
    If auf.Value = True Then
        If v >= 1 Then
            v = v - 1
            'Ausgabe.Text = Str(v) + " " + Str(deltax)
            Picture1.Line (deltax * v, deltax * (4096 - Daten(0, v)))-(deltax * (v + 1), deltax *
            (4096 - Daten(0, v + 1)))
            Picture1.ForeColor = RGB(256, 0, 0)
            Picture1.Line (deltax * v, deltax * (4096 - Daten(1, v)))-(deltax * (v + 1), deltax *
            (4096 - Daten(1, v + 1)))
            Picture1.ForeColor = RGB(0, 0, 0)
            Picture1.Line (deltax * v, deltax * (4096 - Daten(2, v)))-(deltax * (v + 1), deltax *
            (4096 - Daten(2, v + 1)))
            Picture1.ForeColor = RGB(0, 0, 256)
        End If
    End If
    If ab.Value = True Then
```

Abwärtslaufende Werte laufen von rechts in das Diagramm ein

```
    If v >= 1 Then
        v = v - 1
        'Ausgabe.Text = Str(v) + " " + Str(deltax)
        Picture1.Line (deltax * (Anzahl - v), deltax * (4096 - Daten(0, v)))-(deltax *
        (Anzahl - (v + 1)), deltax * (4096 - Daten(0, v + 1)))
        Picture1.ForeColor = RGB(256, 0, 0)
        Picture1.Line (deltax * (Anzahl - v), deltax * (4096 - Daten(1, v)))-(deltax *
        (Anzahl - (v + 1)), deltax * (4096 - Daten(1, v + 1)))
        Picture1.ForeColor = RGB(0, 0, 0)
        Picture1.Line (deltax * (Anzahl - v), deltax * (4096 - Daten(2, v)))-(deltax *
        (Anzahl - (v + 1)), deltax * (4096 - Daten(2, v + 1)))
        Picture1.ForeColor = RGB(0, 0, 256)
    End If
End If
End Sub
```

Ende aller bei ADC-Start verwendeten Sub-Routinen

Regelung

Zuerst müssen die Parameter initiiert werden. Die Laserparameter Amplitude und Offset werden ermittelt. Daraus wird der Referenzsinus berechnet. Anschließend wird geregelt gefahren und das Ergebnis angezeigt

```

Private Sub Regelunginit_Click()
    ReDim Amplituden(2, Anzahl)
    ReDim Daten(2, Anzahl)
    ReDim RealDaten(Anzahl)
    ReDim ImagDaten(Anzahl)
    ReDim RealFT(Anzahl)
    ReDim ImagFT(Anzahl)

    RPPP = Val(EingRPPP.Text)
    HzLas = Val(HzLaser.Text)
    MPPP = Val(MPunkte.Text)
    dt = 1000# / (HzLas * RPPP)
    Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "dt= " + Str(dt)
    laserTimer.Interval = dt
    RegelungTimer.Interval = dt
    MessungTimer.Interval = dt
    geregeltTimer.Interval = dt
    Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + " Laserparameter holen für
    GeregeltDatenerfassung "
    AnzahlWerte = 0
    If Vorlauf = 0 Then Erfassen = True Else Erfassen = False
    MaxWerte = (Anzahl + 2 * Vorlauf) - 1
    RAVolt! = Val(Rampeanfang.Text)
    REVolt! = Val(Rampenende.Text)
    'Umrechnung von Volt in DAC Werte für +/-10V
    '-10=4094, 0=2048, +10=0
    RIncVolt! = RIncAnfang
    UIStat% = cbFromEngUnits(BoardNum%, Range%, RAVolt!, DAWert%)
    If UIStat% <> 0 Then Stop
    Punktinit

    laserTimer.Enabled = True
End Sub

Private Sub LaserTimer_Timer()
    ADCCConvert

    RAVolt! = RAVolt! + RIncVolt!
    UIStat% = cbFromEngUnits(BoardNum%, Range%, RAVolt!, DAWert%)
    If UIStat% <> 0 Then
        Ausgabe.Text = "STOP"
        Stop
    End If
    'ohne Grafik
    If ohneGrafik = True Then GoTo DANz:
    'mit Grafik
    If Erfassen = False Then GoTo DANz:
    PunktZeichnung (AnzahlWerte - Vorlauf)
DANz: AnzahlWerte = AnzahlWerte + 1
    'Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + Str(AnzahlWerte)

```

Die Laserparameter Amplitude und Offset werden ermittelt. Damit wird der Referenzsinus aufgerufen

Erfassung zum Triggerzeitpunkt, mit 0 beginnen und Daten(x,N) speichern

```

Erfassen = (AnzahlWerte >= Vorlauf) And (AnzahlWerte <= MaxWerte + 1 -
Vorlauf)
If AnzahlWerte = MaxWerte + 1 Then
    laserTimer.Enabled = False 'Stop der Messung
'Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "Laser_Timer aus ! "
    If auf.Value = True Then SchnellAb
    If ohneGrafik = True Then DatenZeichnung
    If FFT.Value = True Then FFT_Ausfuehren (2) 'Laser

```

Ermitteln von Laseramplitude, Min, Max und Offset

```

LMin = Daten(2, 0)
LMax = Daten(2, 0)
'Debug.Print "Laserparam ermitteln"
For i = 0 To Anzahl - 1
    If Daten(2, i) > LMax Then LMax = Daten(2, i)
    If Daten(2, i) < LMin Then LMin = Daten(2, i)
Next i
LAmplitude = (LMax - LMin) / 2
LOffset = (LMax + LMin) / 2
Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "LMax " + Str(LMax) + " LMin " + Str(LMin)
+ "LAmplitude " + Str(LAmplitude) + " LOffset " + Str(LOffset)

```

Referenzsinus für Regelung berechnen

```

Referenzsinus
Laserparamgeholt = True
geregeltStart.Enabled = True
End If
End Sub

```

```

Private Sub Referenzsinus()
Dim m As Integer
Dim Vorlauflänge As Integer
    m = RPPP / MPPP
    MaxWerteReg = (MaxWerte + 1) * m
    Vorlauflänge = Vorlauf * m
ReDim RefS(2, MaxWerteReg)
For i = 0 To MaxWerteReg - 1
    RefS(0, i) = LAmplitude * Sin(2 * Pi * i / RPPP) + LOffset
    If (i Mod m = 0) And (i > Vorlauflänge - 1) And (i < MaxWerteReg - Vorlauflänge)
Then
        RefS(1, i) = 1
        Else
        RefS(1, i) = 0
        End If
'Debug.Print i, RefS(0, i), RefS(1, i)
Next i
Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + " RefSinus Regelungsmessung berechnet, nun
zur Messung"
    Auf_Ab_geregelt2
    End If
End Sub

```

```

Private Sub Auf_Ab_geregelt2()

```

Maxwerte im Referenzsinus definiert

```

Direction = 1
Eins = 1 'bestimmt auf oder -1 ab
RAVolt! = Val(Rampeanfang.Text)
REVolt! = Val(Rampenende.Text)
UIStat% = cbFromEngUnits(BoardNum%, Range%, RAVolt!, DAWert%)
If UIStat% <> 0 Then Stop

```



```

NullstelleSinusanfahrenGeregelt      N wird bis 2000 gezählt
Picture1.Refresh
Spektren.Refresh
Punktinit
AnzahlWerte = 0
N = 0
If aufab = True Then
    If Messzähler Mod 2 = 0 Then
        auf.Value = True
    Else
        ab.Value = True
    End If
End If

```

```

RIncVolt = RIncAnfang
If ab.Value = True Then
    RIncVolt = -RIncVolt
    RZwi! = REVolt!
    REVolt! = RAVolt!
    RAVolt! = RZwi!
End If
geregeltTimer.Enabled = True

```

Damit beginnt die Datenerfassung

```

Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + " geregeltTimer beginnt"

```

End Sub

```

Private Sub NullstelleSinusanfahrenGeregelt()
Dim AlterWert As Integer, NeuerWert As Integer
Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + " Nullstellenanfahren Beginn"
Erfassen = False
N = 0
Richtung = 1
Do
    N = N + 1
    AlterWert = Kan2%
    ADCConvert
    NeuerWert = Kan2%
    Erfassung und Vergleich mit RefS
    If NeuerWert - AlterWert > 0 Then Richtung = 1 Else Richtung = -1

```

Rinc berücksichtigt bei Berechnung die Anzahl der Regelungspunkte und Messpunkte

```

    RAVolt! = RAVolt! + RIncVolt! / 40
    UIStat% = cbFromEngUnits(BoardNum%, Range%, RAVolt!, DAWert%)
    If UIStat% <> 0 Then Stop
Loop Until (Kan2% > RefS(0, 0) - 20 And Kan2% < RefS(0, 0) + 20 And Richtung =
1) Or N = 2000
'Debug.Print Kan2%, RefS(0, 0), N, Richtung 'wenn N=3000 then nochmals
Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "-ENDE"
End Sub

```

```

Private Sub geregeltTimer_Timer()
Dim Lastlaser As Single
Dim aktlaser As Single
Dim steig As Integer

Lastlaser = Kan2%

```

ADCMessungConvert

**Erfassung zum Triggerzeitpunkt,
mit 0 beginnend und speichern bei
RefS(1,i)=1 in Daten(N)**

```

aktlaser = Kan2%
If aktlaser > Lastlaser Then
    steig = Direction
Else
    steig = -Direction
End If
Diffalt = Diff
Diff = (aktlaser - RefS(0, AnzahlWerte)) * steig * Faktor

RAVolt! = RAVolt! + RIncVolt! + Diff
UIStat% = cbFromEngUnits(BoardNum%, Range%, RAVolt!, DAWert%)
If UIStat% <> 0 Then Stop

```

```

'ohne Grafik
If ohneGrafik = True Then GoTo DANz:
'mit Grafik
If RefS(1, AnzahlWerte) = 0 Or Eins = -1 Then GoTo DANz:
'PunktMessZeichnung (N - 1)
PunktZeichnung (N - 1)

```

DANz: AnzahlWerte = AnzahlWerte + Eins

```

If AnzahlWerte = MaxWerteReg Then
    geregeltTimer.Enabled = False 'Stop der Messung
    Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + " geregeltTimer Stop"
    Messzähler = Messzähler + 1
    GeregeltErfassen = False
    'auf oder ab, einzel oder dauernd
    If aufab = False And auf.Value = True Then SchnellAb
    If aufab = False And ab.Value = True Then SchnellAuf
' schneller Rück- oder Vorlauf
If ohneGrafik = True Then DatenZeichnung
If FFT.Value = True Then FFT_Ausführen (2) 'Laser
If Speichere.Value = True Then
    NeueZeitBilden
    Alles speichern
End If
If EmpfJa.Value = True Then
    FFT_Ausführen (0)
    FFT_Ausführen (1)
    Empfindlichkeit
End If
If Aufhören = True Then GoTo Ende
Auf_Ab_geregelt
End If

```

Ende:

End Sub

Private Sub ADCMessungConvert()

'Hier erfolgt die Erfassung eines Wertes

UIStat% = cbAln(BoardNum%, 0, Gain, Kan0%)

UIStat% = cbAln(BoardNum%, 1, Gain, Kan1%)

UIStat% = cbAln(BoardNum%, 2, Gain, Kan2%)

'Während des Vorlaufs wird nur die Rampe ausgegeben und nicht erfasst

If RefS(1, AnzahlWerte) = 0 Then GoTo DA:

Daten(0, N) = Kan0%

Daten(1, N) = Kan1%

Daten(2, N) = Kan2%

N = N + Eins '+1 oder -1 je nach auf ab

```
'Debug.Print Tab, N

'DAC-Ausgabe
DA: UIStat% = cbAOut(BoardNum%, 0, Gain, DAWert%)

End Sub
```

Ende der Initiierung der Regelparameter

Die Parameter wurden initiiert, die Laserparameter Amplitude und Offset ermittelt, daraus der Referenzsinus berechnet. Anschließend wurde geregelt gefahren und das Ergebnis angezeigt

Geregelt MESSEN

```
Private Sub geregeltStart_Click()
  ReDim Daten(2, Anzahl)
  ReDim Amplituden(2, Anzahl)
  ReDim RealDaten(Anzahl)
  ReDim ImagDaten(Anzahl)
  ReDim RealFT(Anzahl)
  ReDim ImagFT(Anzahl)

  RPPP = EingRPPP.Text
  HzLas = HzLaser.Text
  MPPP = MPunkte.Text
  RIncVolt = RIncAnfang
  Messzähler = 0
  If auf_ab.Value = True Then
    aufab = True
  Else
    aufab = False
  End If

  Auf_Ab_geregelt
End Sub

Private Sub Auf_Ab_geregelt()
  GeregeltErfassen = True
  If Dauererfassung.Value = False Then
    If aufab = False And Messzähler <> 0 Then GoTo Ende
    If aufab = True And Messzähler > 1 Then GoTo Ende
  End If

  If Speichere.Value = True And Nameneingegeben = False Then
    NamenBilden
    Nameneingegeben = True
  End If

  AnzahlWerte = 0
  If Vorlauf = 0 Then Erfassen = True Else Erfassen = False
  MaxWerte = (Anzahl + 2 * Vorlauf) - 1
  RAVolt! = Val(Rampeanfang.Text)
  REVolt! = Val(Rampenende.Text)
  If aufab = True Then
    If Messzähler Mod 2 = 0 Then
      auf.Value = True
    End If
  End If
End Sub
```

```

Else
  ab.Value = True
End If
End If

RIncVolt = RIncAnfang
If ab.Value = True Then
RIncVolt = -RIncVolt
RZwi! = REVolt!
REVolt! = RAVolt!
RAVolt! = RZwi!
End If
UIStat% = cbFromEngUnits(BoardNum%, Range%, RAVolt!, DAWert%)
If UIStat% <> 0 Then Stop
Punktinit

```

Auf_Ab_geregelt2

Bei Regelungsparameter initiieren

Ende:
End Sub

ENDE

Allgemein

```

Private Sub RIncV_Change()
  RIncVolt! = RIncAnfang * (RIncV.Value / 16000)
  Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + RIncVolt!
End Sub

Private Sub Druck_Timer()
  Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + ADDaten%(N)
  N = N + 1
  If N = NumPoints& + 1 Then Druck.Enabled = False
End Sub

Private Sub Löschknop_Spektren_Click()
  Spektren.Refresh
End Sub

Private Sub AusgabeLöschen_Click()
  Ausgabe.Text = ""
End Sub

Private Sub Löschknopf_Click()
  Picture1.Refresh
  Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "Grafik wurde gelöscht"
End Sub

Private Sub meldung()
  Dim Mldg, Stil, Titel, Antwort
  Mldg = "Möchten Sie die Daten speichern ?" ' Meldung definieren.
  Stil = vbYesNo + vbCritical + vbDefaultButton2 ' Schaltflächen definieren.
  Titel = "Speichern" ' Titel definieren.
  Antwort = MsgBox(Mldg, Stil, Titel) ' Meldung anzeigen.
  If Antwort = vbYes Then TextMeldung = "Ja" Else TextMeldung = "Nein"
End Sub

Private Sub Endknopf_Click()

```

```

Endknopfgedrückt = True
If gespeichert = False Then meldung

If TextMeldung = "Ja" Then
    NamenBilden
    AllesSpeichern
Else
    gespeichert = False
End
End If
End Sub

```

Regelungskontroll-Zeichnung

```

Private Sub PunktRegZeichnung(v As Integer)
Dim m As Integer
Dim m1 As Integer

m = v Mod RPPP
m1 = (v + 1) Mod RPPP
If v >= 1 Then
    v = v - 1
    'Ausgabe.Text = v
    'REFERENZSINUS (blau)
    Picture1.Line (deltax * v, deltay * (4096 - RefS(0, m)))-(deltax * (v + 1), deltay *
(4096 - RefS(0, m1)))
    Picture1.ForeColor = RGB(256, 0, 0)
    'Differenz (rot)
    Picture1.Line (deltax * v, deltay * (3400 - 100000 * Diffalt))-(deltax * (v + 1),
deltay * (3400 - 100000 * Diff))
    Picture1.ForeColor = RGB(0, 0, 0)
    'Laser (sw)
    Picture1.Line (deltax * v, deltay * (4096 - Daten(2, v)))-(deltax * (v + 1), deltay *
(4096 - Daten(2, v + 1)))
    Picture1.ForeColor = RGB(0, 0, 256)
End If
End Sub

```

```

Private Sub PunktMessZeichnung(v As Integer)
Dim m As Integer
m = RPPP / MPPP
If v >= 1 Then
    v = v - 1
    'Ausgabe.Text = v
    'REFERENZSINUS (blau)
    Picture1.Line (deltax * v, deltay * (4096 - RefS(0, v * m)))-(deltax * (v + 1),
deltay * (4096 - RefS(0, (v + 1) * m)))
    Picture1.ForeColor = RGB(256, 0, 0)
    'Differenz (rot)
    Picture1.Line (deltax * v, deltay * (3700 - 200000 * Diffalt))-(deltax * (v + 1),
deltay * (3700 - 200000 * Diff))
    Picture1.ForeColor = RGB(0, 0, 0)
    'Laser (sw)
    Picture1.Line (deltax * v, deltay * (4096 - Daten(2, v)))-(deltax * (v + 1), deltay *
(4096 - Daten(2, v + 1)))
    Picture1.ForeColor = RGB(0, 0, 256)
End If
End Sub

```

Daten komplett zeichnen

```

Private Sub DatenZeichnung()
Punktinit
' Null-Volt Linie
Picture1.Line (deltax * 0, sizey / 2)-(deltax * (Anzahl), sizey / 2)
For i = 0 To (Anzahl - 1)
Picture1.Line (deltax * i, deltay * (4096 - Daten(0, i)))-(deltax * (i + 1), deltay *
(4096 - Daten(0, i + 1)))
Picture1.ForeColor = RGB(256, 0, 0)
Picture1.Line (deltax * i, deltay * (4096 - Daten(1, i)))-(deltax * (i + 1), deltay *
(4096 - Daten(1, i + 1)))
Picture1.ForeColor = RGB(0, 0, 0)
Picture1.Line (deltax * i, deltay * (4096 - Daten(2, i)))-(deltax * (i + 1), deltay *
(4096 - Daten(2, i + 1)))
Picture1.ForeColor = RGB(0, 0, 256)
Next i
Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "Daten wurden gezeichnet"
End Sub

```

```

Private Sub SpektrenZeichnung(DS, R, G, B)
Dim deltaxs As Integer
Dim deltays As Integer
Dim Amplitude As Double
Sizex = Spektren.ScaleWidth
sizey = Spektren.ScaleHeight
deltaxs = Sizex / (Anzahl / 2 - 1)
Amplitude = (Max - Min)
deltays = sizey / Amplitude
For i = 0 To (Anzahl / 2 - 1)
Spektren.ForeColor = RGB(R, G, B)
' Spektren.Line (deltaxs * i, deltays * (Amplitude - DS(i)))-(deltaxs * (i + 1),
deltays * (Amplitude - DS(i + 1)))
Spektren.Line (deltaxs * i, deltays * (1 - DS(i) / Amplitude))-(deltaxs * (i + 1),
deltays * (1 - DS(i + 1) / Amplitude))
Next i
Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "Spektrum wurde gezeichnet" + vbCrLf
End Sub

```

```

Private Sub Empfindlichkeitzeichnen(DS)
Sizex = Spektren.ScaleWidth
sizey = Spektren.ScaleHeight
deltax = Sizex / 51
Min = 0
Max = 0
For i = 51 To 101 '796 - 402 nm
If DS(i) > Max Then Max = DS(i)
Next i
Debug.Print Max
deltay = sizey / Max

Spektren.ForeColor = RGB(255, 255, 0)
For i = 51 To 101 '796 - 402 nm
Spektren.Line (deltax * (i - 50), deltay * (Max - DS(i)))-(deltax * (i - 50 + 1),
deltay * (Max - DS(i + 1)))
Next i

Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "Empfindlichkeit gezeichnet" + vbCrLf

End Sub

Private Sub Endauswertung()

```

```

    If ohneGrafik = True Then DatenZeichnung
    If FFT.Value = True Then FFT_Ausfuehren (2) 'Laser
        If Speichere.Value = True Then
            NeueZeitBilden
            Alles speichern
        End If
    End Sub

'geregelt testen

Private Sub regMessung_Click()
    Direction = 1
    Ausgabe.Text = "geregelt Testen"

    ReDim Daten(2, Anzahl)
    Gesamtpunkte = Anzahl * RPPP / MPPP
    AnzahlWerte = 0
    N = 0
    If Vorlauf = 0 Then Erfassen = True Else Erfassen = False
    MaxWerte = (Anzahl + 2 * Vorlauf) - 1
    RAVolt! = Val(Rampeanfang.Text)
    REVolt! = Val(Rampenende.Text)
    UIStat% = cbFromEngUnits(BoardNum%, Range%, RAVolt!, DAWert%)
    If UIStat% <> 0 Then Stop
    Faktor = FaktorReg.Value * 0.0000000001
    Punktinit
    NullstelleSinusanfahren

    RAVolt = RAVolt + RIncVolt
    RegelungTimer.Interval = dt
    RegelungTimer.Enabled = True
    'geregeltTimer.Interval = dt
    'geregeltTimer.Enabled = True

    'Damit beginnt die Datenerfassung
End Sub

Private Sub NullstelleSinusanfahren()
    Dim AlterWert As Integer, NeuerWert As Integer
    Erfassen = False
    N = 0
    Richtung = 1
Do
    N = N + 1
    AlterWert = Kan2%
    ADCCConvert 'Erfasse und vergleiche mit RefS
    NeuerWert = Kan2%
    If NeuerWert - AlterWert > 0 Then Richtung = 1 Else Richtung = -1
    'Rinc muss bei Berechnung berücksichtigen wieviele Regelpunkte und wie viele
    Messpunkte !!!
    RAVolt! = RAVolt! + RIncVolt! / 20
    UIStat% = cbFromEngUnits(BoardNum%, Range%, RAVolt!, DAWert%)
    If UIStat% <> 0 Then Stop
Loop Until (Kan2% > RefS(0, 0) - 10 And Kan2% < RefS(0, 0) + 10 And Richtung =
1) Or N = 2000
    'Debug.Print Kan2%, RefS(0,0), N, Richtung 'wenn N=3000 then nochmals
End Sub

```



```

Private Sub RegelungTimer_Timer()
Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "Regelung_Timer"
Dim rs As Integer
Dim Lastlaser As Single, aktlaser As Single
Dim steig As Integer
rs = (AnzahlWerte + 1) Mod RPPP
Lastlaser = Kan2%
ADCConvert
aktlaser = Kan2%
If aktlaser > Lastlaser Then
steig = Direction
Else
steig = -Direction
End If
Diffalt = Diff
Diff = (aktlaser - RefS(0, rs)) * (steig) * Faktor
RAVolt = RAVolt + RIncVolt + Diff

'ohne Grafik
If ohneGrafik = True Then GoTo DANz:
'mit Grafik
If Erfassen = False Then GoTo DANz:
'PunktZeichnung (AnzahlWerte - Vorlauf)
PunktRegZeichnung (AnzahlWerte - Vorlauf)
DANz: AnzahlWerte = AnzahlWerte + 1
Erfassen = (AnzahlWerte >= Vorlauf) And (AnzahlWerte <= MaxWerte + 1 -
Vorlauf)

UIStat% = cbFromEngUnits(BoardNum%, Range%, RAVolt!, DAWert%)
If UIStat% <> 0 Then Stop

If AnzahlWerte = MaxWerte - 1 Then
RegelungTimer.Enabled = False 'Stop der Messung
'Debug.Print RIncVolt, Diff
If auf.Value = True Then SchnellAb
If ohneGrafik = True Then DatenZeichnung
If FFT.Value = True Then FFT_Ausfuehren (2) 'Laser
End If
End Sub

Private Sub DriftabNull_Click()
DriftTimer.Interval = dt
Punktinit
AnzahlWerte = Vorlauf
NullstelleSinusanfahren
Erfassen = True
DriftTimer.Enabled = True
End Sub

Private Sub Drift_Click()
DriftTimer.Interval = dt
DriftTimer.Enabled = True
Punktinit
AnzahlWerte = Vorlauf
Erfassen = True
End Sub

```

```
Private Sub DriftTimer_Timer()
```

```
    ADCConvert
    PunktZeichnung (AnzahlWerte - Vorlauf)
    AnzahlWerte = AnzahlWerte + 1
    If AnzahlWerte = Anzahl Then
        DriftTimer.Enabled = False
    End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub SchnellAb()
```

```
Do
    For j = 1 To 20000
    Next j
    RAVolt! = RAVolt! + 0.002
    UIStat% = cbFromEngUnits(BoardNum%, Range%, RAVolt!, DAWert%)
    If UIStat% <> 0 Then Stop
    UIStat% = cbAOut(BoardNum%, 0, Gain, DAWert%)
Loop Until RAVolt! > Val(Rampeanfang.Text)
End Sub
```

```
Private Sub SchnellAuf()
```

```
For i = 1 To Anzahl + 2 * Vorlauf
    For j = 1 To 20000
    Next j
    'Debug.Print REVolt!, i, Anzahl, Vorlauf, RIncVolt
    REVolt! = REVolt! - RIncVolt!
    UIStat% = cbFromEngUnits(BoardNum%, Range%, REVolt!, DAWert%)
    If UIStat% <> 0 Then Stop
    UIStat% = cbAOut(BoardNum%, 0, Gain, DAWert%)
Next i
End Sub
```

Click und Change-Routinen

```
Private Sub cmd_Stop_Dauer_Click()
```

```
Aufhören = True
Einzelerfassung(0).Value = True
End Sub
```

```
Private Sub FaktorReg_Change()
```

```
    Faktor = FaktorReg.Value * 0.0000000001
    Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "Faktor=" + Str(Faktor)
End Sub
```

```
Private Sub Anzahl_Change()
```

```
    Anzahl = Val(Anzahl.Text)
    Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + Anzahl.Text
    Wegprüfung
End Sub
```

```
Private Sub Abtastrate_Change()
```

```
    ZeittriggerEinzel.Interval = Val(Abtastrate.Text)
    ZeittriggerEauf_ab.Interval = Val(Abtastrate.Text)
    Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + Abtastrate.Text
End Sub
```

```
Private Sub Rampeanfang_Change()
```

```
    Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + Rampeanfang.Text
End Sub
```

```

Private Sub Rampenende_Change()
    Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + Rampenende.Text
End Sub
Private Sub EingRPPP_Change()
    RPPP = Val(EingRPPP.Text)
    If RPPP <> 0 Then dt = 1000 / (HzLas * RPPP)
    Wegprüfung
End Sub

Private Sub HzLaser_Change()
    HzLas = Val(HzLaser.Text)
    Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + " HzLas=" + Str(HzLas)
    If HzLas <> 0# Then dt = 1000# / (HzLas * RPPP)
    Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + " dt=" + Str(dt)
End Sub

Private Sub MPunkte_Change()
    MPPP = Val(MPunkte.Text)
    Wegprüfung
End Sub

Private Sub Wegprüfung()
    Dim Laserperioden As Integer
    Const Maxweg = 85
    If MPPP = 0 Then GoTo Ende
    Laserperioden = (Anzahl + 2 * Vorlauf) / MPPP
    Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "Laserperioden=" + Laserperioden
    If Laserperioden >= Maxweg Then Ausgabe.Text = "Weg zu groß !!!"
Ende: Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "MPPP = 0 !!!"
End Sub

Private Sub Speichernknopf_Click()
    If Nameneingegeben = False Then
        NamenBilden
    Else: NeueZeitBilden
    End If
    AllesSpeichern
End Sub

Private Sub NeueZeitBilden()
    D = CDate(CDb1(Now))
    D = Replace(D, ".", "")
    D = Replace(D, " ", "")
    D = Replace(D, ":", "")
    Zeichen = GeprNamen + D
    If auf.Value = True Then Zeichen = Zeichen + "auf"
    If auf_ab.Value = True Then
        If Eins = 1 Then Zeichen = Zeichen + "auf"
        If Eins = -1 Then Zeichen = Zeichen + "ab"
    End If
    Ordner = Mid(D, 5, 4) + Mid(D, 3, 2) + Left(D, 2)
    'Datum umgestellt in Jahr,Monat,Tag: damit wird ein Ordner
    'für alle Messungen an diesem Tag angelegt
End Sub

Private Sub NEUSpeichernname_Click()
    NamenBilden
End Sub

```

```

Private Sub NamenBilden()
D = CDate(CDb1(Now))
D = Replace(D, ".", "")
D = Replace(D, " ", "")
D = Replace(D, ":", "")
Ordner = Mid(D, 5, 4) + Mid(D, 3, 2) + Left(D, 2)
'Datum umgestellt in Jahr,Monat,Tag: damit wird ein Ordner
'für alle Messungen an diesem Tag angelegt
Zeichen = ""
LängeZ = Len(Zeichen)
Do Until LängeZ >= Zeichenmin And LängeZ <= Zeichenmax
Zeichen = InputBox("Bitte Namen 3-15 Zeichen eingeben", "Datenspeicherung
unter...")
LängeZ = Len(Zeichen)
Loop
Nameneingegeben = True
  GeprNamen = Zeichen
  'Debug.Print "gpr: ", GeprNamen
  'Gesamten Namen zusammensetzen
  Zeichen = Zeichen + D
End Sub

Private Sub AllesSpeichern()
'3x Abspeichern
ext = "ERG" 'CH0
Speichern (ext)
ext = "IFG" 'CH1
Speichern (ext)
ext = "LAS" 'CH2
Speichern (ext)
  gespeichert = True
  If Endknopfgedrückt = True Then End
End Sub
Private Sub Speichern(E As String)
Speiname = Zeichen + "." + E
'Ordner angelegt werden + Textdatei erzeugen
  With fso
  If .FolderExists("C:\Messungen\" + Ordner) Then GoTo Schonda
  .CreateFolder ("C:\Messungen\" + Ordner)
Schonda:   filnam = .BuildPath("C:\Messungen\" + Ordner, Speiname)
  Set tstream = .CreateTextFile(filnam)
  End With
  If E = "ERG" Then j = 0
  If E = "IFG" Then j = 1
  If E = "LAS" Then j = 2
  With tstream
  For K = 0 To Anzahl - 1
  WriteLine Daten(j, K)
  Next
  Close
  End With
  Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + E + " Gespeichert! " ' vbCrLf
End Sub

Private Sub VorlaufEingabe_Change()
  Vorlauf = Val(VorlaufEingabe.Text)
  Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + VorlaufEingabe.Text
  Wegprüfung
End Sub

```

```

Sub FFT_Ausfuehren(Kanal As Integer)
    Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "FFT Beginn"
    Samples = Anzahl
    ' Daten 0=ERG, 1=IFG, 2=Laser
    For i = 0 To Anzahl - 1
        RealDaten(i) = Daten(Kanal, i)
        ImagDaten(i) = 0
        MWERT = MWERT + RealDaten(i)
    Next i
    MWERT = MWERT / Anzahl
    For i = 0 To Anzahl - 1
        RealDaten(i) = RealDaten(i) - MWERT
    Next i
    FourierTransform NumSamples:=Samples, RealIn:=RealDaten,
    ImagIn:=ImagDaten, RealOut:=RealFT, ImagOut:=ImagFT,
    InverseTransform:=Inverse
    Ausgabe.Text = Ausgabe.Text + "FFT Ende"
    Min = 0
    Max = 0
    If Real.Value Or Imag.Value = True Then
        For i = 0 To Anzahl - 1
            If RealFT(i) < Min Then Min = RealFT(i)
            If ImagFT(i) < Min Then Min = ImagFT(i)
            If RealFT(i) > Max Then Max = RealFT(i)
            If ImagFT(i) > Max Then Max = ImagFT(i)
        Next i
        If Real.Value = True Then SpektrenZeichnung RealFT, 255, 0, 0
        If Imag.Value = True Then SpektrenZeichnung ImagFT, 0, 255, 0
    End If
    If Amplitude.Value = True Or EmpfJa = True Then
        ' Amplitude berechnen
        Min = 0
        Max = 0
        For i = 0 To Anzahl - 1
            ImagDaten(i) = Sqr(RealFT(i) ^ 2 + ImagFT(i) ^ 2)
            If EmpfJa = True Then Amplituden(Kanal, i) = ImagDaten(i)
            If ImagDaten(i) < Min Then Min = ImagDaten(i)
            If ImagDaten(i) > Max Then Max = ImagDaten(i)
        Next i
        SpektrenZeichnung ImagDaten, 0, 0, 255
    End If
End Sub

Private Sub Empfindlichkeit()
    Min = 0
    Max = 0
    For i = 0 To Anzahl - 1
        If Amplituden(1, i) = 0 Then 'müsste Reiz sein
            ImagDaten(i) = ImagDaten(i - 1)
        Else
            ImagDaten(i) = Amplituden(0, i) / Amplituden(1, i) ' 0 müsste die Reaktion sein
        End If
        If ImagDaten(i) < Min Then Min = ImagDaten(i)
        If ImagDaten(i) > Max Then Max = ImagDaten(i)
    Next i
    SpektrenZeichnung ImagDaten, 0, 0, 0
    Empfindlichkeitzeichnen ImagDaten
End Sub

```

Programm für die Signalverarbeitung von FIS-Reiz (Interferogramm) und Reaktion (ERG)

(Gemperlein, Obermüller, Hieninger)

```

Option Explicit
Private Sub MSFlexGrid1_Click()
  With Me.MSFlexGrid1
    HUH_MOD_Error.info "Nachbearbeitung von Datensatz " & .Row & " --> " &
    .TextMatrix(.Row, .Col) _
    & HUH_MOD_Error.HUH_WARN_NotYetImplemented
    editSample (.Row)
  End With
End Sub

Private Sub Start_Click()
'Dim chdemo As New HUH_Channels
'chdemo.HUHTEST

Datenansehen.initChannels
  Dim s As String
  With filesInfo
    FlexEinlesen .Path

'display the currently used path
Me.currentPath = .Path

End With

currentSample.fileName = MSFlexGrid1.TextMatrix(1, 1)
For N = 1 To NMax
  MsgBox ("nächste 3 Datensätze lesen")

  'Markieren der aktiven Zeile
  MSFlexGrid1.TextMatrix(N, 0) = MSFlexGrid1.TextMatrix(N, 0) + "*"
  'Ende anzeige der aktiven Zeile
  If N = 1 Then
    'Anfangsbedingung setzen
'HUH LetzterName = Left$(s, Len(s) - 4)
    LetzterName = currentSample.sampleName
  Else
    'skip
  End If

  AktuellerName = Left$(s, Len(s) - 4)
  HUH_MOD_Error.log (N), title:="N: "
  If AktuellerName = LetzterName Then
  If currentSample.sameSample(MSFlexGrid1.TextMatrix(N, 1)) Then
    currentSample.fileName = MSFlexGrid1.TextMatrix(N, 1)
    GrafischeDarstellung AktuellerName
    GrafischeDarstellung MSFlexGrid1.TextMatrix(N, 1)
    GrafischeDarstellung currentSample.fileName
  Else
    Speiname = LetzterName

    LetzterName = AktuellerName
    'Zähler zurücksetzen, damit nach der
    'Bearbeitung wieder richtig begonnen wird

```

```

        N = N - 1
        Dim nix As Boolean
        nix = HUH_MOD_Error.log((N), title:=Me.name)
        Debug.Print Speiname
        ' Nun zur Bearbeitung der Datensätze
        DatenFormbearb.links.Visible = False
        DatenFormbearb.rechts.Visible = False
        DatenFormbearb.Abbrechen.Visible = False
        DatenFormbearb.Abspeichern.Visible = False
        DatenFormbearb.Caption = "(Datensatz " & N - 1 & " von " &
        MSFlexGrid1.Rows & ") " & currentSample.sampleName

Datenansehen.BearbZeichnung 2
    DatenFormbearb.Show vbModal ** 0
    currentSample.fileName = MSFlexGrid1.TextMatrix(N, 1)
    N = N - 1
    End If

    If N = NMax Then
        DatenFormbearb.links.Visible = False
        DatenFormbearb.rechts.Visible = False
        DatenFormbearb.Abbrechen.Visible = False
        DatenFormbearb.Abspeichern.Visible = False
        DatenFormbearb.Caption = "(Datensatz " & N & " von " & MSFlexGrid1.Rows &
        ") " & currentSample.sampleName

Datenansehen.BearbZeichnung 2
    DatenFormbearb.Show vbModal ** 0
    currentSample.fileName = MSFlexGrid1.TextMatrix(N, 1)
    End If
    Next
    End Sub

Private Sub editSample(aNumber)
    DatenFormbearb.links.Visible = False
    DatenFormbearb.rechts.Visible = False
    DatenFormbearb.Abbrechen.Visible = False
    DatenFormbearb.Abspeichern.Visible = False
    DatenFormbearb.Caption = "(Datensatz " & aNumber & " von " &
    MSFlexGrid1.Rows & ") " & currentSample.sampleName

Datenansehen.BearbZeichnung 2
    DatenFormbearb.Show vbModal ** 0
    currentSample.fileName = MSFlexGrid1.TextMatrix(aNumber, 1)
    End Sub

Private Sub Ende_Click()
    End
End Sub

Private Sub Form_Load()
    Me.Caption = App.ProductName & " " & App.Major & "." & App.Minor & "." &
    App.Revision
    ReDim Daten(5, Anzahl)
    ReDim RealDaten(Anzahl)
    ReDim ImagDaten(Anzahl)
    ReDim CosDaten(Anzahl)
    ReDim SinDaten(Anzahl)
    ReDim nmSkala(Anzahl / 2)
    N = 0
    Debug.Print N

```

```

DatenFFTForm.Show
FeAnfang = DatenFormbearb.links.Value
FeEnde = DatenFormbearb.rechts.Value
End Sub

```

Programm für die Mittelung der Amplituden- und Phasenspektren von FIS-Reiz und ERG-Antwort

(Gemperlein)

```

Option Explicit
Private Sub Abspeichern_Click()
    Speichern (GEM_SPE_AMPL)
    Speichern (GEM_IFG_AMPL)
    Speichern (GEM_SPE_PHASE)
    Speichern (GEM_IFG_PHASE)
    nmSkalaSpeichern
End Sub

Public Sub Speichern(E As Integer)
    Dim K As Integer
    Dim L As Integer
    Ordnername = ""
    L = Len(Path) - 1
    Do
        Ordnername = Mid$(Path, L, 1) + Ordnername
        L = L - 1
    Loop Until Mid$(Path, L, 1) = "\"
    Debug.Print Ordnername

    If E = GEM_SPE_AMPL Then Speiname = Ordnername + "SPEAMPL"
    If E = GEM_IFG_AMPL Then Speiname = Ordnername + "IFGAMPL"
    If E = GEM_SPE_PHASE Then Speiname = Ordnername + "SPEPHASE"
    If E = GEM_IFG_PHASE Then Speiname = Ordnername + "IFGPHASE"

    Speiname = Path + Speiname + ".SPE"
    Debug.Print Speiname

Ordner werden angelegt + Textdatei erzeugt
    Open Speiname For Output As #2
        For K = 0 To Anzahl - 1
            Write #2, Daten(E, K)
        Next
    Close #2
    Debug.Print Speiname + " Gespeichert! "
End Sub

Public Sub nmSkalaSpeichern()
    Dim K As Integer

Ordner werden angelegt + Textdatei erzeugt
    Speiname = Path + Ordnername + "NM.SPE"
    Open Speiname For Output As #2
        For K = 0 To Anzahl / 2 - 1
            Write #2, nmSkala(K)
        Next

```



```

Close #2
End Sub

Private Sub Start_Click()
    N = 0
    Path = ""
    Path = Namenholen
    If Path = "" Then Exit Sub
    X = Split(Path, "\")
    a = ""
    For i = LBound(X) To UBound(X) - 1
        a = a + X(i) + "\"
    Next i
    Path = a
    Debug.Print a
    FlexEinlesen ' Es werden alle Datensätze eingelesen und sortiert

```

Beginn von MSFlexGrid1 in Zeile 2 mit den ersten Daten

```

    If Manuell.Value = True Then
        Timer1.Enabled = False
        Text1.Visible = False
        Intervall.Visible = False
    End If
    If Uhr_an.Value = True Then
        Weiter = False
        Timer1.Interval = 500
        Timer1.Enabled = True
    End If
    Debug.Print Weiter
    For N = 2 To NMax + 1
        s = MSFlexGrid1.TextMatrix(N, 1)
        If N = 2 Then LetzterName = Left$(s, Len(s) - 4)
        AktuellerName = Left$(s, Len(s) - 4)
        'Debug.Print AktuellerName
        If AktuellerName = LetzterName Then
            GrafischeDarstellung
        Else

```

Alle 3 zusammengehörigen Datensätze gelesen

```

    Speiname = LetzterName
    LetzterName = AktuellerName

```

Zähler zurücksetzen, damit nach der Bearbeitung wieder richtig begonnen wird

```

    N = N - 1
    'Debug.Print N, s

```

Bearbeitung der Datensätze

Erst FFT von LAS und nm_Skala bestimmen und COS,SIN und AMPL zuweisen

nm_Skala' muss hier berechnet werden, da jetzt erst Maxindex einen Wert hat

```

    EndnmInd = Laserwellenlänge * MaxIndex / nmAnfang
    AnfnmInd = Laserwellenlänge * MaxIndex / nmEnde
    Debug.Print , EndnmInd, AnfnmInd

```

Spektrum darstellen

```

    FFT_Plot 0, LAS_AMPL, "Index"
    'MsgBox "Laser nm_Skala berechnet"

```

FFT von ERG

```

    Daten_an_FFT ERG
    DatenFFT
    Amplitude ERG_COS, ERG_SIN, ERG_AMPL
' Spektrum darstellen
    FFT_Plot 0, ERG_AMPL, "Index"

```

Dazuzählen COS + SIN Anteil, Amplitude, Phase berechnen

```

    addiere ERG_COS
    FFT_Plot 3, GEM_ERG_AMPL, "Index"
    FFT_Plot 2, GEM_ERG_PHASE, "phase"
    'MsgBox "ERG berechnet"

```

FFT von IFG

```

    Daten_an_FFT IFG
    DatenFFT
    Amplitude IFG_COS, IFG_SIN, IFG_AMPL
' Spektrum darstellen
    FFT_Plot 1, IFG_AMPL, "Index"

```

Dazuzählen COS + SIN Anteil, Amplitude, Phase berechnen

```

    addiere IFG_COS
    FFT_Plot 4, GEM_IFG_AMPL, "Index"
    FFT_Plot 2, GEM_IFG_PHASE, "phase"
    'MsgBox "IFG berechnet"

```

Globale spektrale Empfindlichkeit berechnen: ERG/IFG und darstellen

```

    Spe_Berechnen
    FFT_Plot 5, GEM_SPE_AMPL, "SpE"
    FFT_Plot 6, GEM_ERG_AMPL, "SpeNL"

```

```

    phase_Berechnen
    FFT_Plot 2, GEM_SPE_PHASE, "phase"
    FFT_Plot 7, GEM_ERG_PHASE, "phaseNL"

```

```

    If Manuell.Value = True Then MsgBox ("Phase subtrahiert,die nächste 3
    Datensätze lesen")

```

```

End If 'Aktueller=Letztername
'Debug.Print "nach End if : ", N
If NMax = N - 1 Then

```

Bearbeitung des letzten Datensatzes

Erst FFT von LAS und nm_Skala bestimmen

nm_Skala muss hier berechnet werden, da jetzt erst Maxindex einen Wert hat

```

    EndnmInd = Laserwellenlänge * MaxIndex / nmAnfang
    AnfnmInd = Laserwellenlänge * MaxIndex / nmEnde
    Debug.Print , EndnmInd, AnfnmInd
' Spektrum darstellen
    FFT_Plot 0, LAS_AMPL, "Index"
    'MsgBox "Laser nm_Skala berechnet"

```

FFT von ERG

```

    Daten_an_FFT ERG
    DatenFFT
    Amplitude ERG_COS, ERG_SIN, ERG_AMPL
' Spektrum darstellen
    FFT_Plot 0, ERG_AMPL, "Index"

```

Dazuzählen COS + SIN Anteil, Amplitude, Phase berechnen

```

addiere ERG_COS
FFT_Plot 3, GEM_ERG_AMPL, "Index"
FFT_Plot 2, GEM_ERG_PHASE, "phase"
'MsgBox "ERG berechnet"

```

FFT von IFG

```

Daten_an_FFT IFG
DatenFFT
Amplitude IFG_COS, IFG_SIN, IFG_AMPL
'Spektrum darstellen
FFT_Plot 1, IFG_AMPL, "Index"

```

Dazuzählen COS + SIN Anteil, Amplitude, Phase berechnen

```

addiere IFG_COS
FFT_Plot 4, GEM_IFG_AMPL, "Index"
FFT_Plot 2, GEM_IFG_PHASE, "phase"
'MsgBox "IFG berechnet"

```

Globale spektrale Empfindlichkeit berechnen: ERG/IFG und darstellen

```

Spe_Berechnen
FFT_Plot 5, GEM_SPE_AMPL, "SpE"
phase_Berechnen
FFT_Plot 2, GEM_SPE_PHASE, "phase"
MsgBox ("Fertig !!!")
End If
Next
End Sub

```

```

Private Sub Ende_Click()
End
End Sub

```

```

Public Function Namenholen() As String
CommonDialog1.CancelError = True
CommonDialog1.DialogTitle = "Ordner mit Daten zum Einlesen öffnen"
CommonDialog1.InitDir = "c:\Messungen\"
CommonDialog1.FileName = "*.*)"
On Error Resume Next
CommonDialog1.ShowOpen
Namenholen = CommonDialog1.FileName
End Function

```

```

Public Sub FlexEinlesen()
Set fs = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
Set f = fs.GetFolder(Path)

Set fc = f.Files
N = 0
s = "<Nr |* Datei-Namen *"
MSFlexGrid1.FormatString = s$
For Each f1 In fc
N = N + 1
s = f1.name
MSFlexGrid1.AddItem ""
MSFlexGrid1.TextMatrix(N, 0) = N
MSFlexGrid1.TextMatrix(N, 1) = s
Next

```

Alle files eingelesen

```

    MSFlexGrid1.Sort = 5
    'Sortiert
    NMax = N
End Sub

Public Sub GrafischeDarstellung()
    Dim Antwort
    kanal = Endung(s)
    If kanal = 0 Then DatensatzLAS.Text = s
    If kanal = 1 Then DatensatzIFG.Text = s
    If kanal = 2 Then DatensatzERG.Text = s
    'Debug.Print s
    DatenEinlesen s, kanal
    Datennormieren kanal
    DatenZeichnung kanal
End Sub

Public Sub DatenEinlesen(name As String, kanal As Integer)
    Dim h As Integer
    '0 Laser, 1 =IFG, 2=ERG
    'hier die Daten den Daten(i,Anzahl) zuweisen
    name = Path + "\" + name

    Open name For Input As #1
    For i = 0 To Anzahl - 1
        Input #1, Daten(kanal, i)
        'Debug.Print Daten(Kanal, i)
    Next i
    Close #1
End Sub

Public Sub DatenZeichnung(kanal)
    Dim Min As Double
    Dim Max As Double
    Dim Sizex As Double
    Dim Sizey As Double
    Dim deltax As Double
    Dim deltay As Double
    Sizex = Picture_ERG.ScaleWidth
    Sizey = Picture_ERG.ScaleHeight
    deltax = Sizex / (Anzahl - 1)
    deltay = Sizey / 4095
    'Debug.Print deltax, deltay

    If kanal = 0 Then
        Picture_LAS.Cls
        Picture_LAS.ForeColor = RGB(255, 0, 0)
        ' Null-Volt Linie
        Picture_LAS.Line (deltax * 0, Sizey / 2)-(deltax * (Anzahl), Sizey / 2)
        For i = 0 To (Anzahl - 1)
            Picture_LAS.Line (deltax * i, deltay * (2048 - Daten(kanal, i)))-(deltax * (i + 1),
                deltay * (2048 - Daten(kanal, i + 1)))
        Next i
    End If
    If kanal = 1 Then
        Picture_IFG.Cls
        Picture_IFG.ForeColor = RGB(0, 256, 0)
        ' Null-Volt Linie
        Picture_IFG.Line (deltax * 0, Sizey / 2)-(deltax * (Anzahl), Sizey / 2)
        For i = 0 To (Anzahl - 1)

```

```

        Picture_IFG.Line (deltax * i, deltay * (2048 - Daten(kanal, i))-(deltax * (i + 1),
            deltay * (2048 - Daten(kanal, i + 1)))
    Next i
End If
If kanal = 2 Then
    Picture_ERG.Cls
    Min = 0
    Max = 0
    For i = 0 To (Anzahl - 1)
        If Daten(kanal, i) < Min Then Min = Daten(kanal, i)
        If Daten(kanal, i) > Max Then Max = Daten(kanal, i)
    Next i

    deltay = Sizey / (Max - Min)
    Debug.Print Max; Min; deltay
    ' Wert aus Datei übernehmen
    Picture_ERG.ForeColor = RGB(0, 0, 255)
    ' Null-Linie
    Picture_ERG.Line (deltax * 0, Sizey / 2)-(deltax * (Anzahl), Sizey / 2)
    For i = 0 To (Anzahl - 2)
        Picture_ERG.Line (deltax * i, deltay * ((Max + Min) / 2 - Daten(kanal, i)) + Sizey /
            2)-(deltax * (i + 1), deltay * ((Max + Min) / 2 - Daten(kanal, i + 1)) + Sizey / 2)
    Next i
End If

If kanal = 5 Then
    Picture_LAS.Cls
    Picture_LAS.ForeColor = RGB(128, 128, 128)
    ' Null-Volt Linie
    Picture_LAS.Line (deltax * 0, Sizey / 2)-(deltax * (Anzahl), Sizey / 2)
    For i = 0 To (Anzahl - 1)
        Picture_LAS.Line (deltax * i, deltay * (2048 - Daten(kanal, i))-(deltax * (i + 1),
            deltay * (2048 - Daten(kanal, i + 1)))
    Next i
End If

Status.Text = "Daten wurden gezeichnet"
End Sub
Public Sub addiere(Nr)
    Dim i As Integer
    Dim j As Integer
    Dim h As Double
    For j = 0 To 2
        For i = 0 To Anzahl - 1
            Daten(Nr + 3 + j, i) = Daten(Nr + 3 + j, i) + Daten(Nr + j, i)
        Next
    Next
End Sub

Phase berechnen
h = -180 / Pi
For i = 0 To Anzahl - 1
    If Daten(Nr + 1, i) = 0 Then
        Daten(Nr + 6, i) = 0
    Else
        Daten(Nr + 6, i) = h * Atn(Daten(Nr, i) / Daten(Nr + 1, i))
    End If
Next
End Sub

Public Sub Spe_Berechnen()

```

**Sollte ich auf den Lampenbereich beschränken: AnfnmInd=Ende sichtbar,
EndnmInd=Anfang sichtbar**

```

For i = 0 To AnfnmInd
    Daten(GEM_SPE_AMPL, i) = Daten(GEM_ERG_AMPL, i)
    'Debug.Print , i, Daten(GEM_SPE_AMPL, i)
Next
Debug.Print , "2ter Teil"
For i = AnfnmInd To EndnmInd
    If Daten(GEM_IFG_AMPL, i) = 0 Then
        Daten(GEM_SPE_AMPL, i) = 0
    Else
        Daten(GEM_SPE_AMPL, i) = Daten(GEM_ERG_AMPL, i) /
        Daten(GEM_IFG_AMPL, i)
        Debug.Print , i, Daten(GEM_SPE_AMPL, i), Daten(GEM_ERG_AMPL, i),
        Daten(GEM_IFG_AMPL, i)
    End If
Next
Debug.Print , "3ter Teil"
For i = EndnmInd + 1 To Anzahl - 1
    Daten(GEM_SPE_AMPL, i) = Daten(GEM_ERG_AMPL, i)
    'Debug.Print , i, Daten(GEM_SPE_AMPL, i)
Next
End Sub

```

Public Sub phase_Berechnen()

Bis sichtbar Phase IFG abziehen, bei nichtlinear einfach belassen

```

For i = 0 To Anzahl - 1
    Daten(GEM_SPE_PHASE, i) = Daten(GEM_ERG_PHASE, i) -
    Daten(GEM_IFG_PHASE, i)
Next i
End Sub

```

Public Sub Datennormieren(kanal)

```

Dim mitt
    mitt = 0
    For i = 0 To Anzahl - 1
        Daten(kanal, i) = 2048 - Daten(kanal, i)
        mitt = mitt + Daten(kanal, i)
    Next
    mitt = mitt / Anzahl
    For i = 0 To Anzahl - 1
        Daten(kanal, i) = Daten(kanal, i) - mitt
    Next
End Sub

```

Public Function Endung(na As String)

```

If Right(na, 3) = "LAS" Then Endung = 0
If Right(na, 3) = "IFG" Then Endung = 1
If Right(na, 3) = "ERG" Then Endung = 2
End Function

```

Public Sub nm_Skala()

```

Dim nm As Integer
Dim mitt As Variant
    FensterMultHann

```

**Laser wird mit Hanning-Fenster
multipliziert**

```

    DatenZeichnung 0
    DatenFFT
    Amplitude LAS_COS, LAS_SIN, LAS_AMPL

```

```

MaxIndex = 0
Max = 0
For i = 1 To Anzahl / 2 - 1
  If Daten(LAS_AMPL, i) > Max Then
    Max = Daten(LAS_AMPL, i)
    MaxIndex = i
  End If
  Daten(LAS_AMPL, i) = Daten(LAS_AMPL, i) / 50
Next
DatenZeichnung 5 ' zeichne in Start.Laserfenster das Spektrum
For i = 1 To Anzahl / 2 - 1
  nmSkala(i) = Laserwellenlänge * MaxIndex / i
Next
'Da Wert in 0 unendlich wäre
nmSkala(0) = nmSkala(1)
End Sub

Public Sub Amplitude(COS, SIN, AMPL)
  For i = 0 To Anzahl / 2 - 1
    Daten(COS, i) = CosDaten(i)
    Daten(SIN, i) = SinDaten(i)
    Daten(AMPL, i) = Sqr(Daten(COS, i) ^ 2 + Daten(SIN, i) ^ 2)
  Next
End Sub

Public Sub Daten_an_FFT(Nr As Integer)
  Dim Max As Double
  Dim imax As Integer
  'Max bei IFG suchen und Daten verschieben
  Max = 0
  For i = 0 To Anzahl - 1
    If Daten(IFG, i) > Max Then
      Max = Daten(IFG, i)
      imax = i
    End If
  Next

  For i = imax To Anzahl - 1
    Daten(LAS, i - imax) = Daten(Nr, i)
    RealDaten(i - imax) = Daten(Nr, i)
    ImagDaten(i) = 0
  Next

  For i = 0 To imax - 1
    Daten(LAS, Anzahl - imax + i) = Daten(Nr, i)
    RealDaten(Anzahl - imax + i) = Daten(Nr, i)
    ImagDaten(i) = 0
  Next
  'DatenZeichnung 0

End Sub

Public Sub FensterMultHann()
  Dim anull As Variant
  Dim aeins As Variant
  Dim c As Variant
  'Hanning
  anull = 0.5
  aeins = -0.5
  c = 2 * Pi / Anzahl
  For i = 0 To Anzahl - 1

```

```
Daten(0, i) = Daten(0, i) * (anull + aeins * COS(c * i))
  RealDaten(i) = Daten(0, i)
  ImagDaten(i) = 0
Next
End Sub
```

```
Public Sub Form_Load()
Dim i As Integer
Dim j As Integer
ReDim Daten(23, Anzahl)
'setze Daten=0
For i = 0 To Anzahl - 1
  For j = 0 To 22
    Daten(j, i) = 0
  Next
Next
ReDim RealDaten(Anzahl)
ReDim ImagDaten(Anzahl)
ReDim CosDaten(Anzahl)
ReDim SinDaten(Anzahl)
ReDim nmSkala(Anzahl / 2)
N = 0
'Timer1.Interval = 500
'Timer1.Enabled = True
End Sub
```

```
Private Sub Timer1_Timer()
  Weiter = True
  Debug.Print "Timer: "; Weiter

End Sub
```


14 Danksagung

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. nat. R. Gemperlein
für

- ... die sehr gute fachliche Betreuung im Labor und Tierpark
- ... seine sehr, sehr großzügige Unterstützung bei der Programmierung
- ... mehrmaliges Korrekturlesen der vorliegenden Arbeit

Hr. Prof. Dr. vet. med. H. Wiesner, Direktor des Münchener Tierparks
Hellabrunn
für

- ... die Ermöglichung dieses Themas der Dissertation über das
Farbsehen an Mantelpavianen
- ... die freundliche Unterstützung und reibungslosen Ablauf im Tierpark
- ... die Immobilisation einer größeren Anzahl von Mantelpavianen

Werkstattleiter Hr. Zschka und Hr. Pröller für die prompte Beschaffung von
mechanischen Aufbauten und Zubehör

Fr. stud. vet. med. Hingerle, Fr. Dr. vet. med. Gräfin von Maltzan, Fr. Dr.
vet. med. Pohl und Tierpfleger Hr. Reinhardt für die aufmerksame
Betreuung der Mantelpaviane während der optischen Messungen am Auge

Hr. Prof. Dr. rer. nat. U. Smola für seine für mich sehr wichtigen Themen-
Anregungen und Diskussionen

Bibliothek Fr. Garbereder für die vielen Literaturbestellungen bei der
Bayerischen Staatsbibliothek BSB

Hr. Angermann für die Unterstützung bei Formatierungen

IT-Administratoren Hr. Molter für die Behebung von Netzwerk- und
Softwareproblemen und Hr. Schultheiß für die Anleitung zur temporären
Übermittlung großer Datenmengen

Beruflicher Werdegang (Kurzfassung)

2007	Sabbatical Promotion
<i>Rohde & Schwarz München</i>	
2004 - 2006	Innovationsmanagement Produktzuverlässigkeit Investition in neue Messtechnik und Kostencontrolling Validierung der Audio-Messtechnik Speziell getailerte Umweltprüfung für die militärische Anforderung
<i>Siemens München</i>	
1991 - 2004	Umwelt-Qualitätsmanagement Fest-/Mobilfunknetze, Voice/Data-Konvergenznetze und Access Bauelementezulassung Lichtwellenleiter Klimatische/mechanische Umwelt- und Zulassungsprüfung Erdbebest und Produktsicherheit
<i>Infineon München</i>	
1988 - 1991	Fachgruppenleiterin Qualitätssicherung Electrostatic-Discharge (ESD)-Produktqualifikation Halbleiter-bauelemente Entwicklung von Schutzschaltungen
<i>Fujitsu Siemens Augsburg</i>	
1985 - 1988	Physikerin Qualitätssicherung Schwingungs-Messtechnik und Schall-Leistungsmessung an Werks- und OEM-Produkten Forschungsvorträge am Institut of Environmental Science USA
<i>Softwarefirma Schneider München</i>	
1983 - 1984	Applikationsingenieurin
<i>Wissenschaftliche Hochschulausbildung und Lehrtätigkeit</i>	
2000 - 2003 / 2007	Ludwig-Maximilian-Universität München Promotion in Biophysik während beruflicher Vollzeit
2004	Stipendiatin der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung
2004	Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus Zulassung Quereinstieg von Diplombewerbern in Physik Ausbildungsprogramm entsprechend dem 2. Staatsexamen in Mathematik/Physik für das Lehramt an Realschulen
1994 - 1995	Fachhochschule München Praktikumsleitung Technische Akustik
1986 - 1987	Technische Akademie Esslingen Dozentin Technische Schwingungslehre
1986	Lufthansa Hamburg Astronautenausbildung D2 Mission
1985	Ludwig-Maximilian-Universität München Diplom-Hauptprüfung in Physik/Astronomie Technische Universität München Abschluß in den Vertiefungsstudiengängen Maschinenbau und Informatik